



A felületi érdesség és nyírószilárdság változása ismételt nyírószilárdsági vizsgálat során Mórágyi Grániton

Konzulens:

Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikoletta

Készítette:

Agárdi Tamás

2019. Október





A felületi érdesség és nyírószilárdság változása ismételt nyírószilárdsági vizsgálat során Mórágyi Grániton

A kőzetekkel kapcsolatban álló, kőzetre, kőzetben vagy éppen kőzetből épülő tartószerkezetek tervezésénél szükség van a kőzetkörnyezet tervezés szempontjából kritikus paramétereinek kellő pontosságú ismeretére. Ezen paraméterek megismeréséhez szabvány szerinti helyszíni vagy laboratóriumi vizsgálatokat végezhetünk.

Jelen dolgozatomban Mórágyi Gránit minták tagoltság menti nyírószilárdságának meghatározását tűztem ki célul. A rendelkezésemre álló kőzet mintákból 5 db természetes tagolófelületű próbatestet alakítottam ki.

Korábban az építőmérnöki gyakorlatban a kőzetminták felületi érdességének jellemzésére a Barton fésűvel elkészített profilt, metszetet használták. Mára azonban a technológia továbbhaladt, és a mérnöki munka elengedhetetlen részét képezik az újabbnál újabb eszközök, szoftverek. Szakítva a korábbi, fent említett gyakorlattal két háromdimenziós modellalkotó szoftvert használtam fel a minták dokumentálásához. Az egyik szoftver a 3GSM által fejlesztett ShapeMetrix3D elnevezésű jogvédett program volt, a másik pedig nyílt forráskódú, ingyenes VSFM és a szintén nyílt forráskódú MeshLab nevű program közös alkalmazása. Célul tűztem ki e módszerek megbízhatóságának ellenőrzését a hagyományos, Barton fésűs eljárással.

A próbatestek felület menti nyírószilárdságát állandó normál erő mellett ötszöri ismétlési számmal vizsgáltam. Minden mérés után újra elvégeztem a térbeli felületi leképezést, így a felület tönkremenetele és a felületi érdesség változása követhető volt. Minden mintán három-három kiválasztott profilban a felületi érdességet a Barton fésűvel is ellenőriztem.



Surface roughness and shear strength after multiple shear strength tests on Mórággy Granit

During designing and constructing structures on and in rock environment estimation of the properties and parameter values of the rock is necessary. These values can be estimated by 'in situ' or in laboratory conditions.

The aim of this project was determination the shear strength along discontinuities of Mórággy Granite. Five granitic samples with natural discontinuity surfaces were made. Surface roughness was detected in two dimensions by Barton comb following the previous engineering practice. Nowadays, by developing new technologies, new equipments for detection and new softwares for determination are available. Therefore, surface roughness was measured by two different 3D image modelling programs. The first one is ShapeMetrix3D (proprietary software developed from 3GSM) and the other is the combination of VisualSFM and MeshLab (open source software). My goal was to check the reliability of the two 3D imaging procedure with the traditional method of the Barton comb.

The shear strength along discontinuities of the samples were measured under constant normal load conditions and tests were repeated five times on each specimen. Changing of the surface geometry was determined both by the 3D imaging procedure and by Barton comb after each shearing cycle.



1 Bevezetés

TDK dolgozatom célja természetes tagolófelületeken végzett nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeinek kiértékelése, azon belül a tagolófelületek morfológiájának különböző eszközökkel történő vizsgálata volt. A felület menti nyírószilárdságot több tényező befolyásolja (tagolófelület nyomószilárdsága, mérete, nyírási hossz [1] felületek közti kitöltés, tagolófelületek egymással érintkezése [2], az érintkezési felületek mállottsága [3], tagolófelület meredeksége [4] stb.) és ezek mellett az egyik legjelentősebb a tagolófelület érdessége és annak változása a mozgás során [5, 6]. A felületi érdesség meghatározására elterjedt az ún. lézer szkenneres eljárás, amelyben egy erre a célra fejlesztett lézer szkennerral letapogatják az egész felületet és így állítanak elő egy háromdimenziós képet [7, 8]. Jelen tanulmányhoz ez a módszer nem állt rendelkezésre, ezért a számomra elérhető fényképanalízisen alapuló háromdimenziós technikák közül választottam.

A nyírószilárdsági vizsgálatokat 5 természetes tagolófelületből készített Mórággyról származó gránit kőzetmintán végeztem el. A felület menti nyírószilárdság vizsgálatot minden felületen egymás után ötször megismételtem. A próbatetek felületi morfológiáját a nyírószilárdsági vizsgálatok előtt és után is több módszerrel detektáltam. Céлом volt a hagyományos, kézi eszközzel végezhető felületi leképezés és a modern, fényképanalízisen alapuló számítógépes programok összehasonlítása. Három, egymástól független eszközt használtam: az ún. Barton fésűt, amellyel a próbatetekeken kétdimenziós keresztmetszeteket lehet meghatározni, a ShapeMetrix3D-t és a VisualSFM szoftvert, amelyekkel háromdimenziós felületi leképezés végezhető el. A két számítógépes programmal történő rögzítés és feldolgozás után a két alkalmazott szoftver közül az alábbi szempontok szerint választottam ki a további vizsgálatokhoz a legmegfelelőbbet:

- (esetlegesen) rosszabb minőségű, felbontású képek esetén pontos(abb) képet szolgáltat a vizsgált felületről
- feldolgozáshoz és tároláshoz szükséges fájlformátumok alkalmazása, ismerete
- mobil eszközökkel kompatibilis fájlformátum alkalmazása, ismerete
- mérnöki, kőzetmechanikai, és az adott kutatás szempontjából elégséges pontosság, részletgazdagság
- jól alkalmazható a jelenleg rendelkezésre álló számítási, számítógépes kapacitáshoz
- könnyen kezelhető felhasználói felület



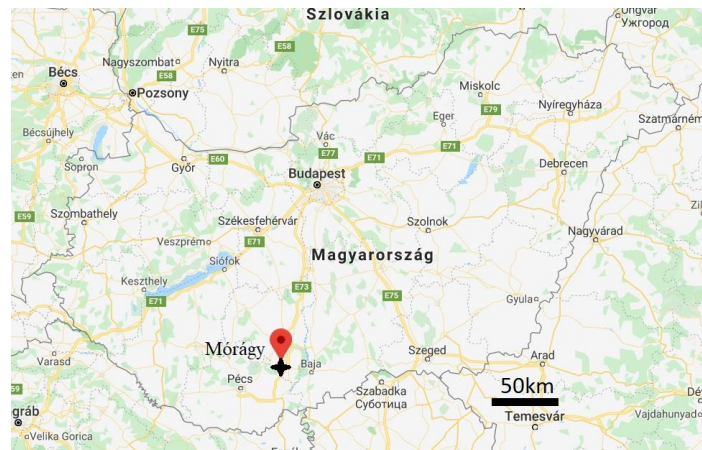
Az első nyírószilárdsági vizsgálat előtt mindegyik próbatest alsó és felső felületét is megmértem mind a három módszerrel. A Barton fésűs metszeteket az egész felületen 5 millimétereként a nyírás irányával párhuzamosan és a nyírás irányára merőlegesen is megrajzoltam. Mindkét számítógépes programmal elkészítettem az összes próbatest felületéről a pontfelhőt, és ezután a felületi hálót. Azokban a vonalakban, amelyekben a Barton fésűvel metszeteket vettem fel, a programokkal is meghatároztam a metszeteket, és az így kapott 3 eredményt összehasonlítottam. A fenti szempontok függvényében a két szoftver közül kiválasztottam azt, amely az első nyírás előtt nyert adatok, keresztmetszetek alapján könnyebben és jobb eredményeket szolgáltatott. Ezután minden elvégzett nyírásvizsgálat után a kiválasztott programmal elvégeztem a háromdimenziós felület leképezést az alsó és felső próbatestrészen is. Mindkét felületen meghatároztam három darab a nyírás irányára merőleges és három darab a nyírás irányával párhuzamos keresztmetszetet, ahol Barton fésűvel rögzítettem a felületi érdesség változását. Ezeknek a kiválasztásánál figyelembe vettem a felületen az első nyírás után látható kopásokat, töréseket. Ugyanezen keresztmetszetekben a választott programot alkalmazva elkészítettem a digitális keresztmetszeteket és összehasonlítottam a különböző módszerrel kapott eredményeket.

Kiszámítottam a vizsgálati eredményekből a különböző ismétlési számhoz tartozó felület menti nyírószilárdságot, meghatároztam az ezekből az adatokból nyerhető törési határgörbéket és összehasonlítottam az eredményeket az ismételt nyírás számától függően.

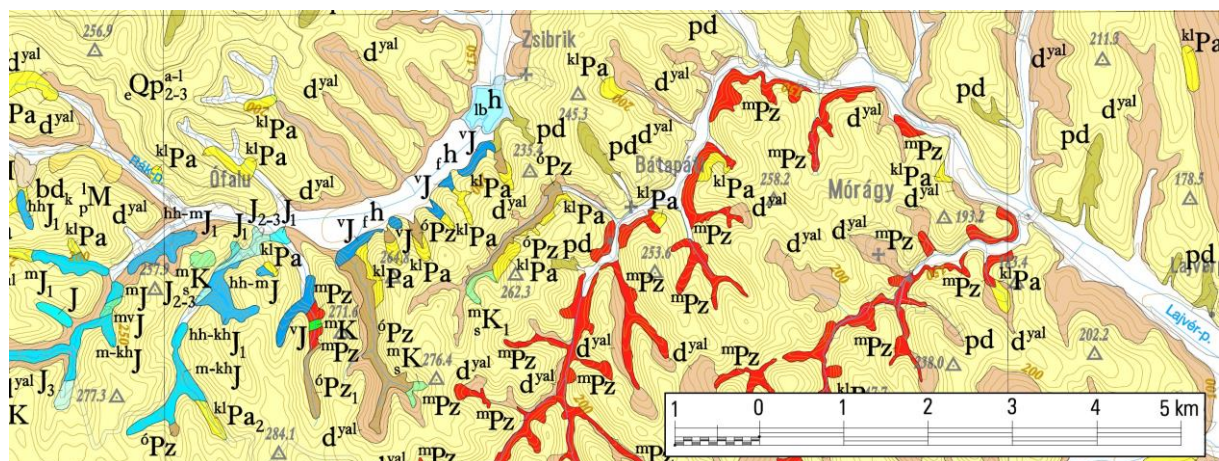


2 Geológia

Az általam vizsgált próbatesteket egy, a Mórágyi Gránit Formációból származó közettömb tagolófelületeiből készítettem el. Mórágyszlovákia déli határához közel, Pécs és Baja közt légvonalban közel félúton helyezkedik el (1. ábra). A mecseki kristályos alaphegységhez tartozik, a Mecsek hegység DDK-i előterében található, és a Tiszai nagyszerkezeti egység része [9]. Ez a kőzet az ún. Mórágyszlovákia paleozoos közettömegét alkotja, amely közel 340 millió évvel ezelőtt egy mafikus és egy felzikus magma keveredésének eredményeként keletkezett [10], és foltokban a felszínen is megjelenik (2. ábra). A Mórágyszlovákia Gránit Formáció egész gránittestét a magmás kristályosodás után metamorf hatás érte, aminek hatására fázisátalakulások és ásványkémiail változások nyomait fedezhetjük fel benne [11].



1. ábra: Mórágyszlovákia elhelyezkedése [12]

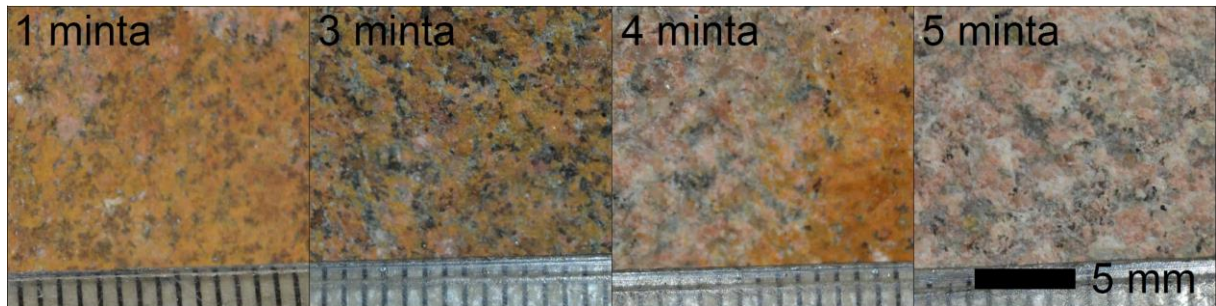


2. ábra: Földtani térkép Mórágyszlovákia környékéről [13] (piros szín jelöli a Mórágyszlovákia Gránit Formációt)

A gránit formációban leggyakrabban előforduló kőzet a monzogranit, amelynek összetétele és megjelenése is változatos. Legjellemzőbb ásványai a plagioklász, mikroklin, kvarc, biotit, ritkábban amfibol [11]. A gránit változatosságát és a vizsgált próbatestek makroszkopikus fotóját a 3. ábra mutatja be. A Mórágyszlovákia Gránit formáció gránit kőzeteit a



Bátaapáti térségében létesített kis és közepes radioaktivitású hulladék befogadására alkalmas Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) építése kapcsán sokat vizsgáltak. E kutatási eredményekből a kőzet egytengelyű légszáraz nyomószilárdsága 150-200 MPa [14]. Korábbi kőzetfizikai vizsgálati eredményeket az 1. táblázat tartalmaz. Ezekből a jelentősen eltérő adatokból is jól látszik, hogy a kőzet nem homogén, és szilárdsága a helyszíntől és a mélységtől függően változik.



3. ábra: A vizsgált minták felülete

1. táblázat: Gránit kőzetfizikai jellemzői [15]

Lelőhely	Testsűrűség [g/cm ³]	Vízfelvétel [V%]	Nyomószilárdság	
			Légszáraz [Mpa]	Vízzel telített [Mpa]
Velence	2.61	0.4-0.7	78-163	59-131
Sukoró	2.63	0.9-1.6	98-130	80-125
Székesfehérvár	2.53	0.5-1.3	105-165	95-110
Erdősmecke	2.69	0.2-0.8	76-195	69-105
Mórággy	2.66	0.5-1.1	75-103	58-93



3 Vizsgálat előkészítése

A Mórágyi Gránit Formáció egy jelentősen töredezett, tagolófelületekkel átszőtt kőzettest (4. ábra), így egy kőzettömbből több tagolófelület menti minta is kinyerhető volt. A minták előkészítése és a laboratóriumi vizsgálatok a Budapesti Műszaki Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének Kőzetmechanikai laboratóriumában készültek. A kőzet töredezettsége miatt végül öt darab nyírószilárdsági mintát készítettem el.



4. ábra: Minták gyűjtése

3.1 Próbatetek előkészítése

A próbatetek geometriai kialakításánál figyelembe vettem az ISRM [16] által ajánlottakat. A kiválasztott kőzetek változatos formája és változatos tagolófelületeik miatt nem volt lehetőségem szabályos négyzet alakú minták kialakítására, ezért a próbatetek szabálytalan alakúak. A formába öntés előtt előzetesen szemügyre vettem minden elkészített próbatest felületét, nyírási síkjait. A nyírás irányának meghatározásához figyelembe vettem a felület geometriáját, érdességét.

Ezután a mintákat polisztirolból készített formával rögzítettem a nyírógéphez pontosan illeszkedő betonozó sablonba, ügyelve a már meghatározott nyírási irányokra. A betonozáshoz C30/37 szilárdságú betont készítettem és töltöttem ki a sablont.

A próbatetek három nap után kerültek kizsaluzásra. A kizsaluzás folyamata alatt nem sérült sem a kőzet, sem a beton felülete, éle. A betonon szabad szemmel látható repedéseket, töréseket egyik minta esetében sem találtam. A kizsaluzást követően kivártam a beton teljes szilárdulási idejét, 28 nap elteltével kezdtem meg a vizsgálatokat.



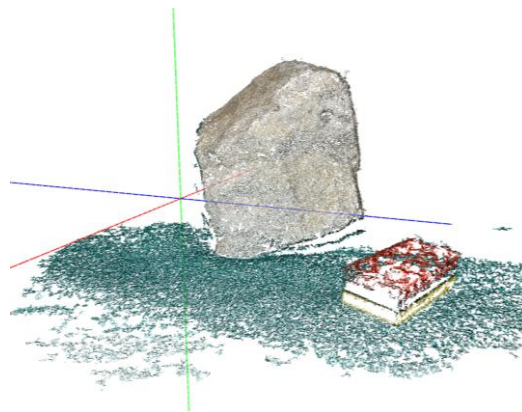
A 2 jelű minta esetében a kőzet és a beton közötti tapadás nem bizonyult elégségesnek, emiatt még az első nyírási vizsgálatot megelőzően mozgás közben a kőzetminta kifordult a betonból. Felmerült a minta javításának lehetősége, de bízva abban, hogy a megmaradt négy minta elegendő adatot szolgáltat a vizsgálataimhoz a javításra nem került sor. A továbbiakban négy mintán végeztem el a kísérleteket és a kettes számú minta hiányzik.

3.2 Mérési módszer kiválasztása

A későbbi adatfeldolgozáshoz szükség volt egy méretezési rendszerre, ami a már bebetonozott próbatestre illeszthető. A jelrendszerrel kapcsolatban követelmény volt, hogy garantáltan ne mozduljon el a nyírási vizsgálatoknál, nem lehetett magasabb a betonból kiálló kőzet résznél (vizsgálat közben letörne), valamint, hogy elérje a kívánt milliméteres pontosságot.

Elsőként a LEGO© által gyártott építőelemek kerültek szóba. Ezen építőelemek méretei 0.01 mm pontosságúak, tehát megfelelnek erre a célra. A blokkok méretei világcég lévén szigorúan titkosak, nehezen lehetett hozzáférni a pontos adatokhoz. Miután a LEGO Support-tal történt egyeztetés után megkaptam a pontos külső méreteket, elkezdődtek a kísérletek.

Több elrendezésben, több különböző színben került tesztelésre, hogy a LEGO elemeket hogyan képesek detektálni a szoftverek. Az ismételt futtatásokból azt állapítottam meg, hogy a szoftverek nem tudták a LEGO elemek formáját lekövetni.



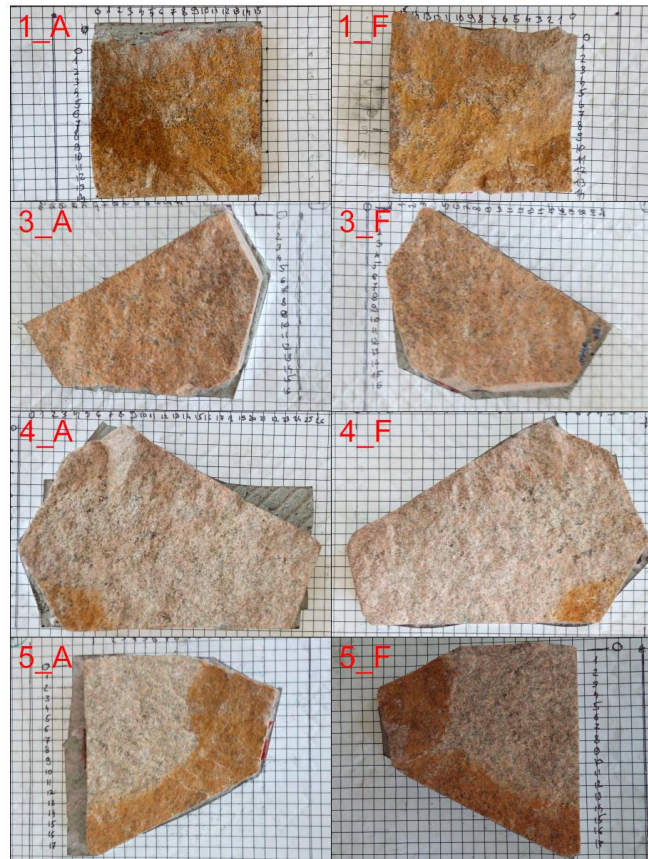
5. ábra: LEGO elem és egy kőzetminta a feldolgozás után

Ennek egyik oka az elemek fényes felülete volt, másik oka pedig, hogy nehezen tudja leképezni az egybefüggő, egyszínű, nagyon sima és így változás nélküli felületrészeket a program. Ezen okoknál fogva a 3D-s modellekben a LEGO blokkok élei nem voltak



szabályosak, egyértelműek, tehát nem volt lehetőség arra, hogy az él mentén a geometriai méret egyértelműen meghatározható legyen (5. ábra). Nem alkalmas arra, hogy az elkészült 3D modell méreteit beállíthassam az elemek méreteinek felhasználásával.

Ezek után olyan módszert kerestem, ami könnyedén, gyorsan beszerezhető, elkészíthető és elhelyezhető a próbatesten. Végül a próbatestek beton felületére egy 5×5 mm raszterű papírlapra nyomtatott hálót ragasztottam (6. ábra).



6. ábra: Elkészített próbatestek

A papírlap nem zavarja a nyírószilárdsági vizsgálatot, a ragasztás miatt nem mozdul el, kellő pontosságú. További nagy előnye, hogy a szintén 5 mm-es raszterben elkészítendő Barton fésű keresztmetszeti helyeinek felvételét és számon tartását nagymértékben megkönnyíti. A fehér papíron fekete színnel rajzolt háló vonalait az alkalmazott szoftverek különböző pontossággal, de képesek voltak felismerni.

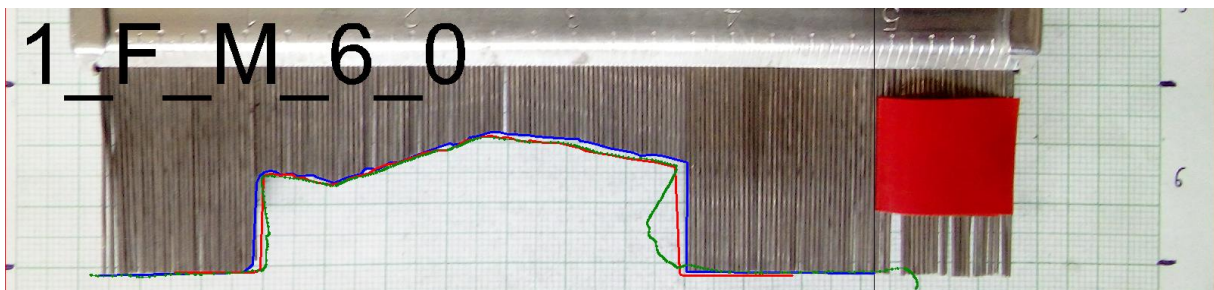
Minden mintára elhelyeztem a raszterhálót. A raszterre kézzel felírtam keresztmetszetek sorszámát, ügyelve arra, hogy az alsó és felső mintán megjelenő keresztmetszetek ugyanazt a sorszámot kapják. Ez a későbbiekben nagyban megkönnyítette feldolgozást.



A mintákon elhelyezett rasztert használva Barton fésűvel felvettem a már megszámozott keresztmetszeteket. Az 5 mm-es raszterben felvett Barton keresztmetszetek már jól mutatják a felület érdességét, reprezentatívnak tekinthetők. Ezen keresztmetszeteket egy előre elkészített 10 mm-es osztással és méretezhetőséget segítő pontokkal ellátott papírlapra rajzoltam át, rögzítettem.

Felmerült a lehetőség, hogy a keresztmetszet felvétele után az átrajzolás helyett fényképek készüljenek a Barton fésűről, amelyeket aztán digitalizálva megkapjuk a metszetet. A 7. ábrán látható kék színnel a Barton fésű lefotózásával és átrajzolásával kapott metszet, pirossal a Barton fésű átrajzolásával és digitalizálásával kapott metszet, zölddel pedig ugyanezen a helyen ShapeMetrix3D-el készített metszet. A ShapeMetrix3D és az átrajzolással készült metszet jól illeszkednek egymáshoz, a fotóról átrajzolt Barton fésűs metszet torzít.

A digitalizálás során szembesültem azzal, hogy a Barton fésűről készült fényképek a mögé helyezett mm-papír ellenére sem nyújtanak elegendő pontosságot ahhoz, hogy a későbbiekben összehasonlíthatók legyenek a különböző technikával készült profilok. Annak ellenére, hogy a Barton fésű háttérében mm osztású papírt helyeztem el, a kamera, mobiltelefon állása szerint és a Barton fésű és mm-papír közti néhány mm-es távolság miatt különböző, nem javítható módon torzultak a fényképek.



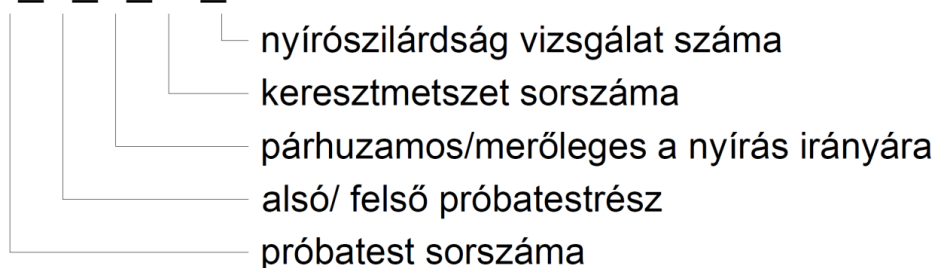
7. ábra: Fényképezés és átrajzolás összehasonlítása

Törekedve a precizításra a Barton fésű lefényképezésének módszerét elvettem és a papírlapokon kézzel rajzoltam át a metszeteket, majd a keresztmetszetek digitalizálását AutoCAD program segítségével végeztem el. A feldolgozás eredményéül vektoros formátumú méretarányos keresztmetszeteket kaptam, amelyek pontjainak koordinátáit meg tudtam határozni. A digitalizálás elvégzésére amiatt volt szükségem, hogy a későbbiekben elkészített 3D modellekből leválasztható digitális formában meglévő keresztmetszetekkel könnyedén összehasonlíthatóvá váljanak.



A fényképezést és a nyírási vizsgálatokat megelőzően felvettem egy számozási rendszert, ami alapján nyilvántartottam a keresztmetszeteket és a mintákat. A jelölési rendszert az 8. ábra mutatja.

1_A_P_12_5



8. ábra: Próbatessokról készült metszetek számozásának rendszere

A nyírószilárdsági vizsgálatok előtt és után a fényképek készítése mellett ellenőrzés céljából Barton fésűvel metszeteket készítettem a nyírásirányára merőlegesen és vele párhuzamosan. Ezeket később összehasonlítottam a modellekből származó metszetekkel (M2/1 és M2/2 jelű melléklet). Az 1-es, 3-as és 4-es jelű próbatesten 3-3 db ellenőrző keresztmetszet került kijelölésre. Az 5-ös próbatess területén az első nyírószilárdsági vizsgálat után nagyobb kopások, letöredezések nem voltak láthatók továbbá felülete kevésbé barázdált, érdes, ezért itt 2-2 Barton fésűs metszetet vettem fel. A Barton fésűs metszetek sorszámát a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Ellenőrző keresztmetszetek

1 minta				4 minta			
Alsó		Felső		Alsó		Felső	
1_A_M_7	1_A_P_6	1_F_M_7	1_F_P_6	4_A_M_10	4_A_P_4	4_F_M_10	4_F_P_4
1_A_M_11	1_A_P_10	1_F_M_11	1_F_P_10	4_A_M_16	4_A_P_10	4_F_M_16	4_F_P_10
1_A_M_13	1_A_P_12	1_F_M_13	1_F_P_12	4_A_M_21	4_A_P_11	4_F_M_21	4_F_P_11
3 minta				5 minta			
Alsó		Felső		Alsó		Felső	
3_A_M_6	3_A_P_11	3_F_M_6	3_F_P_11	5_A_M_4	5_A_P_3	5_F_M_4	5_F_P_3
3_A_M_11	3_A_P_12	3_F_M_11	3_F_P_12	5_A_M_12	5_A_P_12	5_F_M_12	5_F_P_12
3_A_M_14	3_A_P_13	3_F_M_14	3_F_P_13				

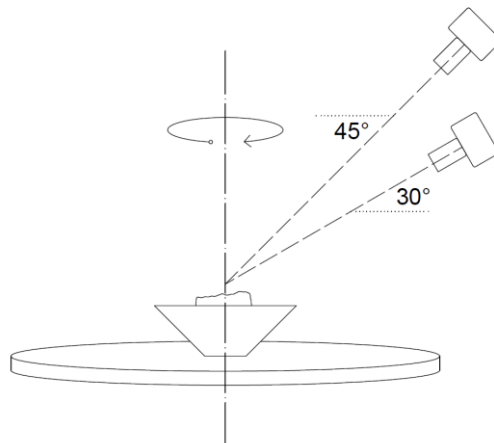


3.3 Fényképek készítése

Az általam alkalmazni kívánt 3D modellalkotó szoftverek bemeneti adatai fényképek. A fényképek elkészítéséhez több módszert is kipróbáltam. A LEGO elemek tesztelésével párhuzamosan meghatároztam a számomra legjobb eredményt nyújtó fényképezési módszert.

Az alkalmazott kamera Nikon D3100 típusú, a hozzá alkalmazott objektív Nikon AF-S DX 18-55 mm, az elkészített fényképek felbontása: 3456×2304 pixel. A próbatestek alsó és felső részeit külön fényképeztem le.

Minden próbatestet külön egy 360°-ban forgatható pultra helyeztem, majd a pult mellett állványon rögzítettem a fényképezőgépet olyan módon, hogy a fényképezőgép objektíve a vízszintessel ~30°-os szöget zárt be. Két fénykép elkészítése között a pultot 10-15°-kal elfordítottam. Az így elkészített 30-35 fénykép után módosítottam a kamera állását, az előbbi 30°-ról ~45°-ra állítottam, majd ismételten elkészítettem a fényképeket a pult körbeforgatásával (9. ábra).



9. ábra: Fényképezőgép beállítása

A két sorozat után, kézből fényképet készítettem a minta felületéről közel merőleges irányban, kiegészítő képeket készítettem azokról a részletekről, amelyekről azt gondoltam (előzetes próbálkozások alapján) hogy a programok számára problémát okozhat a leképezés. Ilyen részlet pl.: homorú felület, bemélyedések, vágások. Össességében egy darab alsó vagy egy darab felső mintáról átlagosan 70-85 db fénykép készült (3. táblázat).



A két sorozatban történő körbefényképezés, az egyedi részletek felvétele és a kamera felbontása biztosította a két egymást követő fénykép közötti elégséges átfedést. A megfelelő átfedés feltétele a szoftveres feldolgozásnak. Mielőtt a fényképeket a számítógépes programokkal feldolgoztam, egyesével átnéztem őket, hogy ne maradjon közöttük elmosódott, homályos kép. A fényképezést ezzel a módszerrel a továbbiakban minden elvégzett nyírószilárdság vizsgálat után megismételtem. Vizsgálataim során a minták 3D modelljeinek felépítéséhez 3488 fényképet készítettem és dolgoztam fel (3. táblázat)

3. táblázat: Elkészült fényképek száma

Minta jele	Alsó/felső	Fénykép darabszáma						
		nyírás előtt	I. nyírás	II. nyírás	III. nyírás	IV. nyírás	V. nyírás	Σ
1	alsó	83	65	66	60	60	59	393
	felső	78	70	68	73	62	73	424
3	alsó	71	71	68	70	70	92	442
	felső	73	79	65	63	77	84	441
4	alsó	77	71	71	72	104	70	465
	felső	69	69	67	78	60	93	436
5	alsó	71	102	72	63	70	95	473
	felső	69	66	71	67	78	63	414
								3488



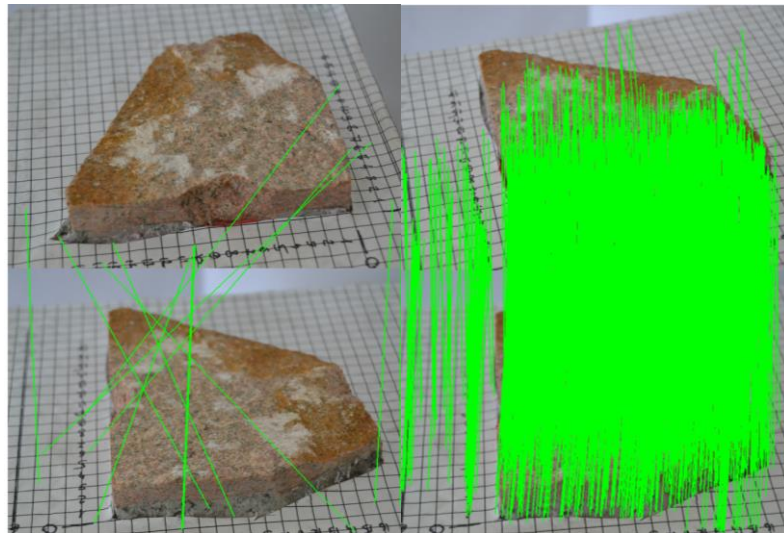
4 Alkalmazott szoftverek

Az elkészített képeket két különböző programmal dolgoztam fel. Az általam használt egyik program a 3GSM által készített ShapeMetrix3D. A program oktatást, kutatást szolgáló, de teljes verzióját használtam. A program lehetőséget ad arra, hogy előre elkészített nagy felbontású fényképekből 3D-modellt állítsunk elő. A hazai gyakorlatban kevesen alkalmazzák, a Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló (NRHT) építéskor használták az alagút körüli kőzetkörnyezet töredezettségének megállapításához [14]. Külföldön sziklafalak, sziklarézsűk állékonyságvizsgálatánál, alagutak homlokfalának felmérésénél, alagutak, tagoltságok felmérésénél és egyéb mérnökgeológiai problémák vizuális megjelenítésénél gyakori a használata. A program ezek mellett lehetőséget ad laboratóriumi minták digitalizálására is, ezt a funkciót használtam én is.

Ismerve a ShapeMetrix3D tulajdonságait, a másik programnak olyan szoftvert kerestem, ami nyílt forráskódú (opensource), de képes a ShapeMetrix3D-hez hasonló eredményt elérni. Internetes keresés után találtam rá a VisualSFM (Visual Structure from Motion) elnevezésű programra. A program térbeli pontfelhőt képes létrehozni fényképek felhasználásával. A program nem mérnökgeológiai alkalmazásra készült, bármilyen térbeli kiterjedésű objektum lefényképezése után képes annak a digitális leképezésre. A vizsgálataimhoz azonban nem volt elegendő a pontfelhő, szükséges volt a pontfelhő felületté alakítása. Ehhez szintén egy ingyenesen használható programot kerestem. Az elkészült pontfelhőt a MeshLab nevű, az interneten szintén nyílt forráskódú formában elérhető programmal alakítottam felületté. A programban 3D pontfelhők, felületek széles körű szerkesztése lehetséges. Felhasználására végtelen lehetőség adódhat, szinte minden fájlformátummal kommunikál.



Mindkét szoftver hasonló elven dolgozik. A feldolgozandó képekből olyan módon állít elő pontfelhőt, hogy az egyes fényképek átvizsgálásával azonosítja azokat a pontokat, amelyek legalább két fényképen megtalálhatók. (10. ábra) Emiatt fontos a már korábban említett átlapolás a fényképek között. A 10. ábra bal oldalán látható az az eset, amikor a szoftver csak néhány pontot tud több képen beazonosítani, a jobb oldali ábrán pedig az az eset, amikor sok ezer pontot azonosít egy fényképpáron.



10. ábra: Két fényképen azonos pontként beazonosított pontpárok

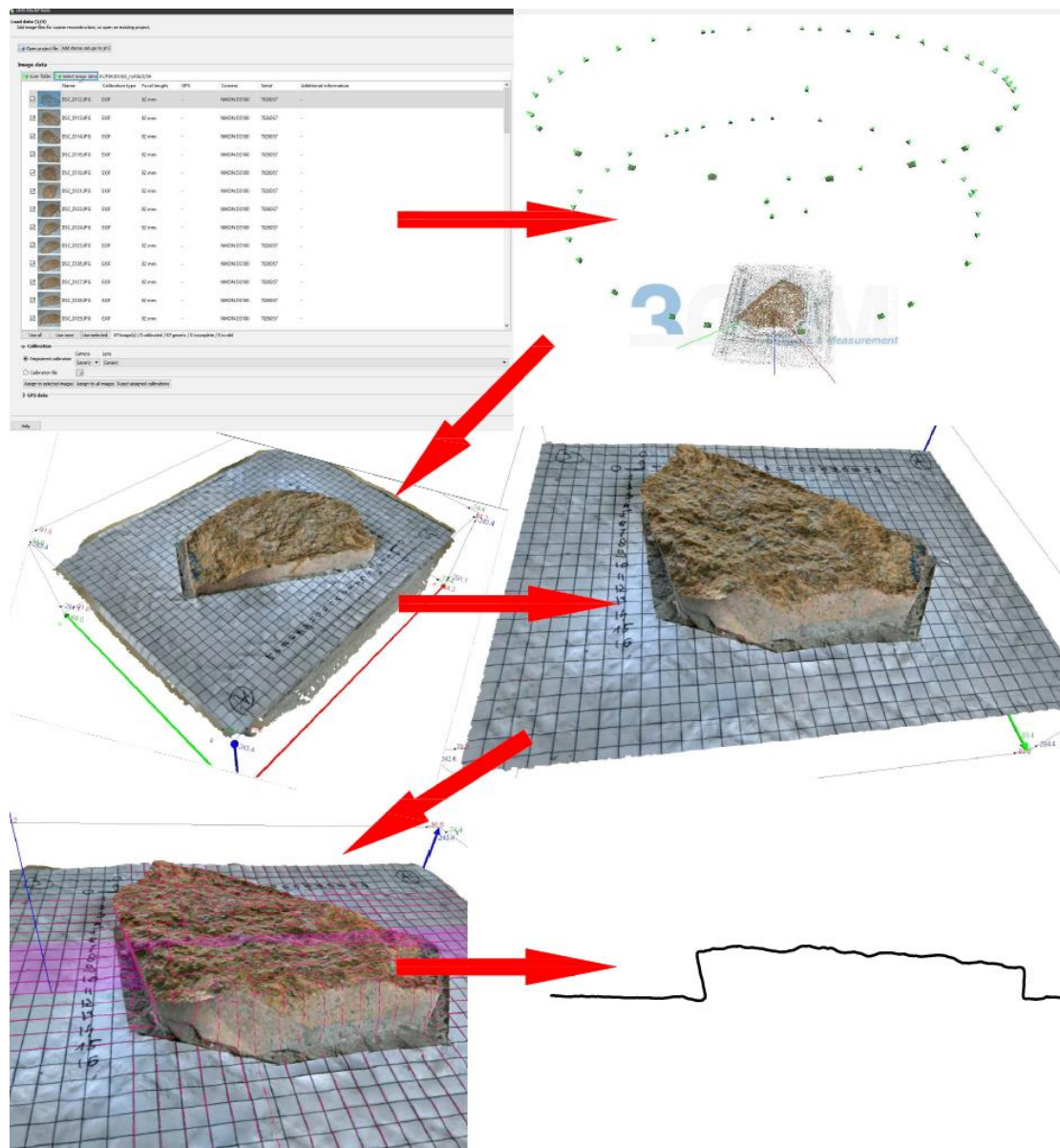
4.1 Képek feldolgozása ShapeMetrix3D programmal

A program szerkezete moduláris jellegű. Külön programrész végzi a felület építését, szerkesztését, átméretezését és feldolgozását. Elsőként szükséges a képek betöltése a felület építését végző programba. Az importálás során a szoftver ellenőrzi, hogy relevánsak-e a képek és kiszűri azt, ami nem felel meg a modell építéséhez. Majd követve a párbeszédpanelt a szoftver elvégzi a még nem pontos kevésbé sűrű pontfelhő építését (coarse reconstruction).

Ezt követően lehetőséget ad megvizsgálni a pontfelhőt, dönteni a minőségről és a pontfelhő megtisztításáról. A futtatások során nem korlátoztam a pontfelhő részletességét, a meglévő számítógépes kapacitás elégségesnek bizonyult a nagy méretű pontfelhők előállítására és kezelésére. A továbbiakban a szoftver elvégzi a részletes (dense reconstruction) és végeredményül a részletes, de még nem méretarányos pontfelhőre generált hálót kapjuk a gyártó szoftver saját fájlformátumában.



Egy másik programmodulba átlépve van lehetőség a méretarány beállítására olyan módon, hogy a szoftver által felkínált fényképeken megadható három darab pont, melyből kettő a méretarány beállításáért felel egy pedig a koordináta-rendszer tájolásáért. Az első két pont kiválasztásánál előre ismert távolságú pontokat jelöltem meg. Megkönnyítette a dolgot a raszterháló, mivel bármely két raszterháló metszéspontjának ismert a távolsága. A méretezés során arra törekedtem, hogy lehetőleg egymástól távol eső pontokat használjak fel, ezzel mérsékelve a keletkező hibát. Ez a távolság minden esetben meghaladta a közetfelület hosszabbik méretét, általában 75-120 mm-re adódott (11. ábra). A programba beépített felület szerkesztő, felület metsző modul segítségével az elkészült felület információt nem nyújtó részei eltávolíthatók. A fentiek elvégzése után a keresztmetszetek felvétele következik. A



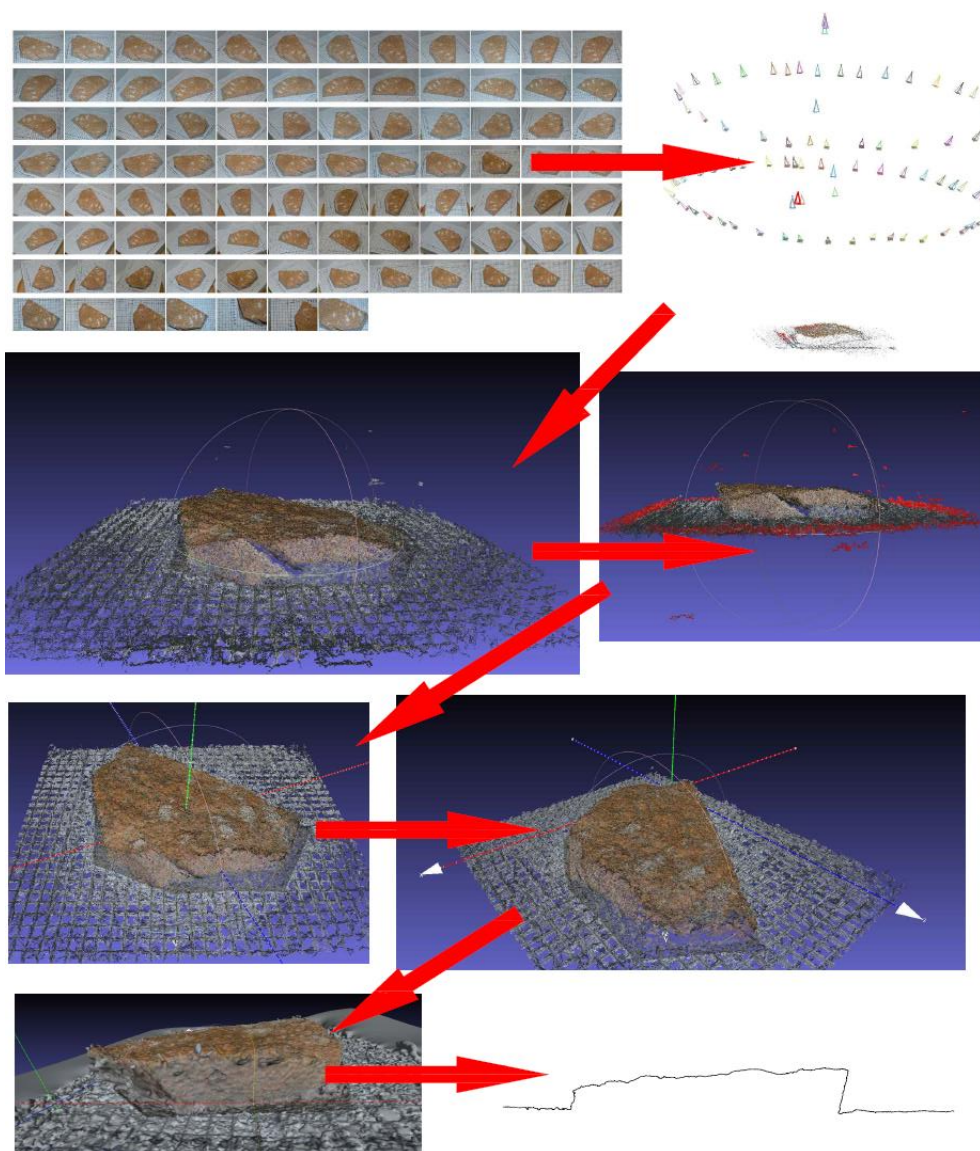
11. ábra: ShapeMetrix3D fénykép feldolgozási folyamat



keresztmetszeteket a raszter hálózhoz igazítva vettem fel. Ezeket egyesével kell felvenni, beállítani és exportálni. Az exportálás során *.DXF és *.CSV fájlformátumokat állítottam elő.

4.2 Képek feldolgozása VSFM és MeshLab programmal

A VisualSFM szoftver használata és működése sokban hasonlít a korábban leírtakhoz. A képek behívása után előzetes futtatásra kerül sor. Ezután a program megjeleníti az előzetes futtatás során alkotott pontfelhőt. A részletes modellalkotást megelőzően nincs lehetőségünk beállításokra, a részletes feldolgozás után a szoftver *.PLY formátumban előállított pontfelhőt készít el (12. ábra).



12. ábra: Fénykép feldolgozás VSFM programmal

Ezután a pontfelhőt a MeshLab programba kell importálni. A pontfelhő a feldolgozás hibája miatt nem egységes, különálló foltok, gömbök, felületdarabok láthatók benne, amelyeket



kézzel, egyesével kijelölve távolíthatunk el. Ennek a műveletnek a gondos kivitelezése sok időt vesz igénybe. A megtisztítás kézzel történik, nem lehet teljesen egybefüggő pontfelhőt létrehozni, ennek hatása a későbbi háló generálás során jelentkezik.

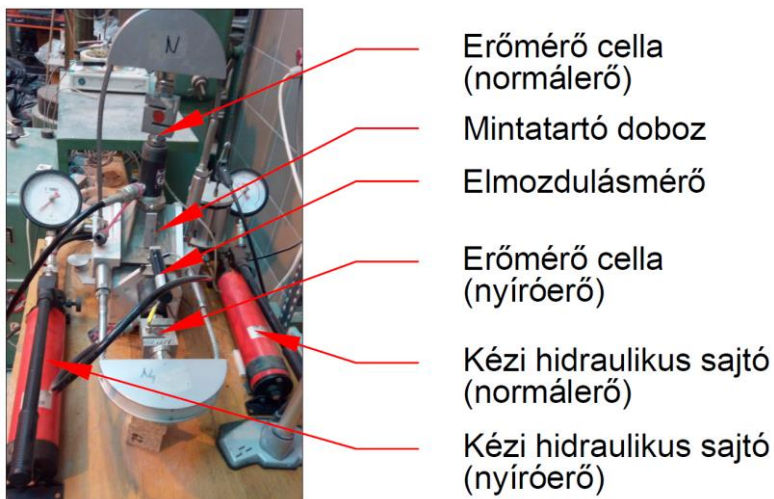
Manuálisan távolságméréssel és átméretezéssel lehet a méretarányt beállítani. Vonalzó eszközzel szükséges megmérni egy ismert szakasz hosszát és kézzel kiszámolni a szorzószámot. A megfelelő eszközt használva a modell forgatható, origója áthelyezhető, így a keresztmetszetek felvételéhez szükséges helyzetbe állítható a koordináta rendszer és a modell (12. ábra).

A koordináta rendszer tengelyei mentén felvehetők a keresztmetszetek. A keresztmetszetek felvétele során nagy előnye a programnak, hogy azok helyzetét egy szabadon választott tengelyre merőlegesen lehet beállítani. Végül a keresztmetszetek *.DXF formátumba exportálhatók.



5 Felület menti nyírószilárdság vizsgálat

A próbatetek az előkészítés után kerülnek a nyírógépbe. A nyírószilárdsági vizsgálat elvégzésénél minden esetben figyelembe vettem és alkalmaztam az ISRM [16] ajánlásait. A méréshez normál és nyíróerő irányban erőmérő cellákat helyeztem el. A nyírás irányában az elmozdulások szintén rögzítésre kerültek (13. ábra). A mérőeszközök számítógéphez csatlakoztatva regisztrálták az értékeket.



13. ábra: Nyírószilárdság vizsgáló gép felépítése

Elsőként az előre a felületek méretéhez képest megállapított normálerő ráhelyezésére került sor. Mind a normálerőt, mind a nyíróerőt kézi hidraulikus sajtóval kellett beállítani és tartani. Az erő ráhelyezése az ISRM [16] ajánlása alapján nem haladta meg a 0.01 MPa/sec sebességet. Ezt követően ellenőriztem, hogy a normál irányú terhelés közben nem mozdult-e el az alsó és felső próbatestrész egymáshoz képest.

A vizsgálatokat az egyes próbatetek esetében ugyanazon normálfeszültség alkalmazása mellett végeztem. A minták felületének méretei és az alkalmazott normálfeszültség az 4. táblázatban láthatók.

4. táblázat: Alkalmazott normálfeszültségek és próbatetek felületének méretei

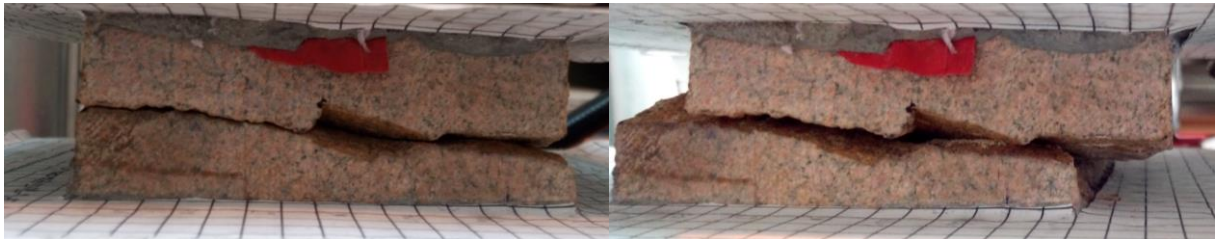
Minta jele	Normálfeszültség [MPa]	Nyírt felület [cm ²]				
		1. nyírás	2. nyírás	3. nyírás	4. nyírás	5. nyírás
3	0.5	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6
5	1.0	61.4	58.3	55.2	55.2	55.2
1	1.5	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0
4	2.0	85.6	79.7	69.8	69.8	69.8



A nyíróelmozdulás sebessége nem haladta meg a 0.2-0.5 mm/percet, így egy vizsgálat átlagosan 40-60 percet vett igénybe. A vizsgálatot addig folytattam, amíg az elmozdulások el nem érték a próbatest nyírás irányába eső hosszának maximum 15%-át (14. ábra). A nyírási hosszak és nyírás irányába eső maximális elmozdulások összefoglalva az 5. táblázatban láthatók.

5. táblázat: Maximális nyíróelmozdulások

Minta jele	1	3	4	5
Nyírási hossz [mm]	75	100	130	85
Maximális elmozdulás [mm]	8,0	10,0	13,0	9,0



14. ábra: Próbatest helyzete a felület menti nyírószilárdság vizsgálat elején (bal oldal) és végén (jobb oldal)



6 Vizsgálati eredmények értékelése

Az elvégzett vizsgálatokat két fő szempont szerint értékeltem ki. Összehasonlításra kerültek az alkalmazott módszerekkel előállított 3D modellek és az azokból készített keresztmetszetek egyaránt. Valamint bemutatásra kerülnek a laboratóriumban végzett nyírószilárdsági vizsgálatokból eredményei, az azokból szerkesztett grafikonok.

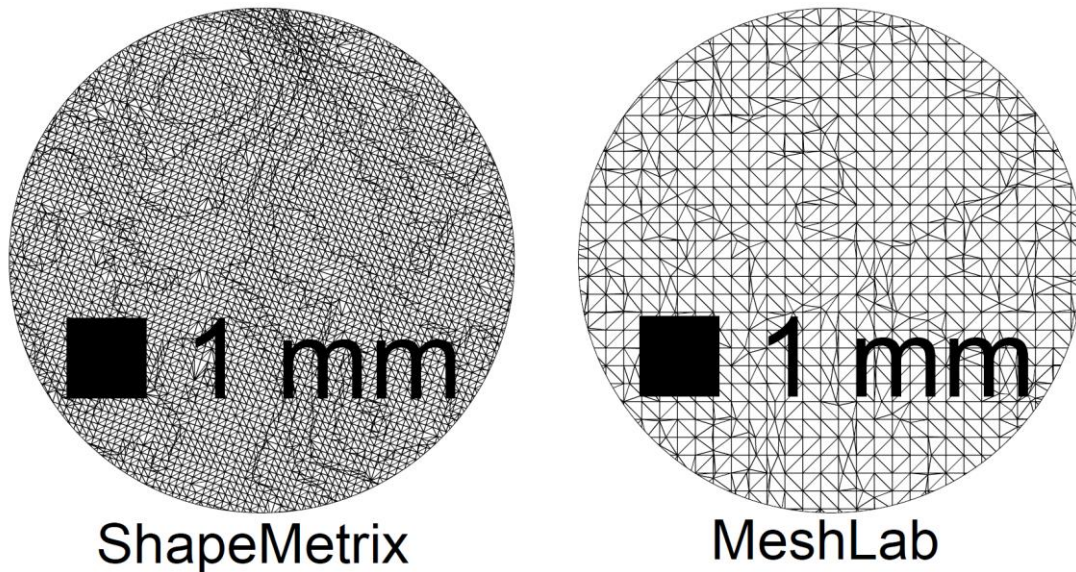
6.1 Felületek feldolgozási módszereinek összehasonlítása

A három módszer összehasonlítását számszerű adatokkal kezdtem. A minták közül véletlenszerűen kiválasztottam felületeket és meghatároztam, hogy az adott program hány pontot határoz meg cm^2 -re vetítve. Az érték meghatározásához a 3D modellből eltávolítottam a beton felület és a raszter felület pontjait, csak a kőzetfelületre eső pontokat vettem figyelembe.

6. táblázat: Azonos felületre eső pontok száma

Felület jele	Shape Metrix [ezer db]	Shape Metrix [db/ cm^2]	VisualSFM MeshLab [ezer db]	VisualSFM MeshLab [db/ cm^2]
1_A_0	1048	18070	215	3700
3_F_0	1004	19840	207	4090
4_A_0	1447	16900	320	3740
5_F_0	989	16100	245	3990

A 6. táblázatból látszik, hogy míg a VSFM program ugyanazon a felületen százezres nagyságrendű pontfelhőt képes építeni addig a ShapeMetrix3D egy nagyságrenddel nagyobb, azaz milliós nagyságrendű pontból álló pontfelhőt hoz létre. Az értékeket cm^2 -re vetítve a különbség jól látható. Az opensource program láthatóan kevesebb pontot hoz létre. A 4-es jelű minta esetében annak nagy felülete miatt a ponthálóban szereplő pontok száma mind a két program feldolgozása után a legnagyobb. Nemcsak a pontok számában találtam különbséget. A 15. ábrán látható a programok által generált háló felnagyítva. Megvizsgálva hálókat a pontsűrűségben fellelhető különbségen kívül látható, hogy míg a ShapeMetrix3D által generált háló rendezetten a próbatest domborzatát követő szintvonalak köré épül fel, addig a MeshLab-ben generált háló szabálytalanul hullámszik.



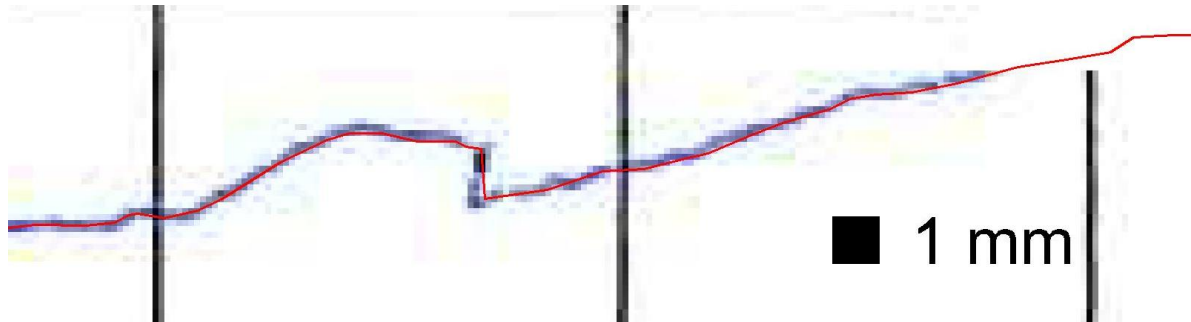
15. ábra: Felület hálók sűrűségének összehasonlítása

A vizsgálatot kiterjesztettem az általam készített és digitalizált Barton fésű keresztmetszetekre is. A 7. táblázatban láthatók a Barton fésűvel digitalizált, a ShapeMetrix3D-ből és a VSFM-ből kivett keresztmetszeteket alkotó vonallánc lánclemeinek száma és átlagos elemhossza (a keresztmetszeteket véletlenszerűen választottam ki).

7. táblázat: Vonallánc elemek száma és átlagos elemhossz

Keresztmetszet jele	Barton		ShapeMetrix3D		VSFM	
	vonalelem száma [db]	átlagos elemhossz [mm]	vonalelem száma [db]	átlagos elemhossz [mm]	vonalelem száma [db]	átlagos elemhossz [mm]
1_A_P_6_0	61	1,30	2180	0,036	260	0,31
1_F_M_1_0	78	0,86	1410	0,049	251	0,30
1_A_P_11_0	80	0,93	2170	0,036	285	0,30
1_A_M_2_0	94	1.04	2830	0,034	334	0,30
1_F_P_13_0	76	1,06	1950	0,041	250	0,33

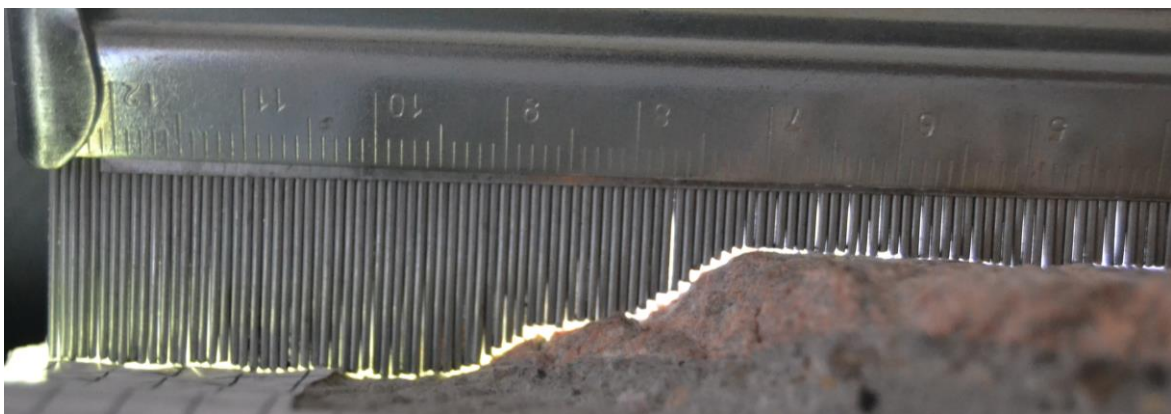
A keresztmetszetekben megállapított átlagos elemhosszak a fésű esetében 1-3 tűnyi távolságot jelentenek, azaz a kézi feldolgozás (átrajzolás) során átlagosan minden harmadik tűnél helyeztem el új töréspontot. A keresztmetszetek átrajzolását ugyanazzal a technikával, a digitalizált raszterkép középvonalát követve végeztem. A 16. ábrán látható a Barton fésűs metszetek digitalizálásának folyamata, az AutoCAD-be importált kép fájl a nagy nagyítás miatt torz, emiatt nehéz a raszterpontok középvonalának átrajzolása.



16. ábra: Barton fésűről készített kézzel rajzolt metszetvonal digitalizálása

A Barton fésűvel készült metszetek esetében szemmel láthatóan jól illeszkedik egymáshoz a minta alsó és felső részén készült metszet. (M1/1 és M1/2 jelű melléklet) Jól kirajzolódnak a felület jellegzetes, egyedi részei. A milliméter alatti változásokat, gödröket, vápákat nehezebben követi le a számítógépes modellezéshez képest. A vonalelemek száma a számítógépes feldolgozás töredéke, az átlagos elemhossz nagyságrendben is csak alig tudja megközelíteni a VSFM keresztmetszeti adatait. Egymás felé helyezve a nyírás vizsgálatok között elkészült metszeteket nagy szórás tapasztaltam. Ez azzal magyarázható, hogy a Barton fésűvel nem lehet mm-es nagyságrendnél kisebb pontossággal lekövetni a felületet.

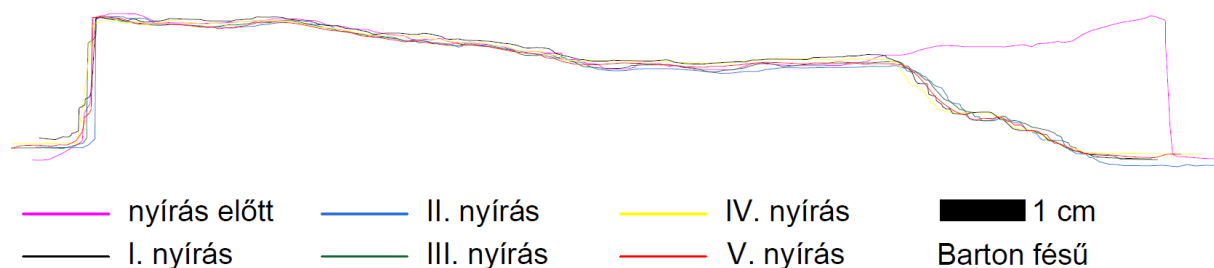
Az 17. ábrán egy szabályosan a felületre nyomott Barton fésű képe látható, az 4_A_P_10_5 keresztmetszetben. A fésű mögött lévő fényforrás segítségével láthatóvá válik a feldolgozott keresztmetszetek nagy szórásának legfőbb indoka: a fésű tüinek szélessége miatt nem lehet tökéletesen a felületre illeszteni a fésűt.



17. ábra: Barton fésű felületre illesztése

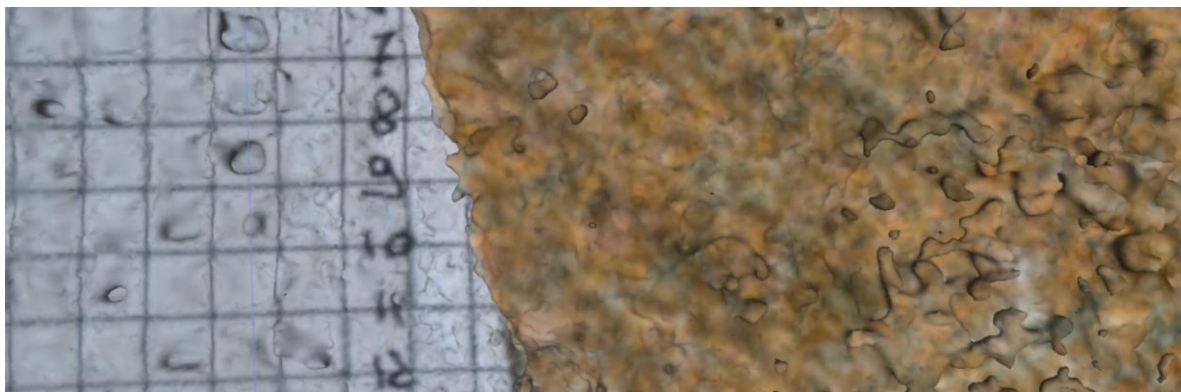


A legnagyobb eltérések a barázdált, egyenetlen részeken láthatók (18. ábra és M3/2 jelű melléklet). Néhány helyen a feldolgozás esetleges pontatlanságából fakadóan „szögletes” lett a metszet vonalvezetése, a vonal élesen megtörik. Másik probléma, hogy a Barton fésű nem képes a minta konkáv részeit leképezni, így a legtöbb Barton fésűvel készült keresztmetszet széleinek vonalvezetése élesen, gyakran egy vonallal vezet le a betonfelületig (M1/2 jelű melléklet: 1_F_P_1_0; 1_F_P_5_0; 1_F_P_13_0). Ez utóbbi a felület mérési eredményeket nem befolyásolja. A 18. ábrán (részletesen a M3/2 jelű melléklet) a nyírás vizsgálatok között a 4_A_P_10 metszetben elkészített ellenőrző keresztmetszetek láthatóak egymás fölé helyezve. A metszetek színei egyeznek a nyírószilárdsági vizsgálat színeivel.



18. ábra: Barton fésűvel készült keresztmetszetek

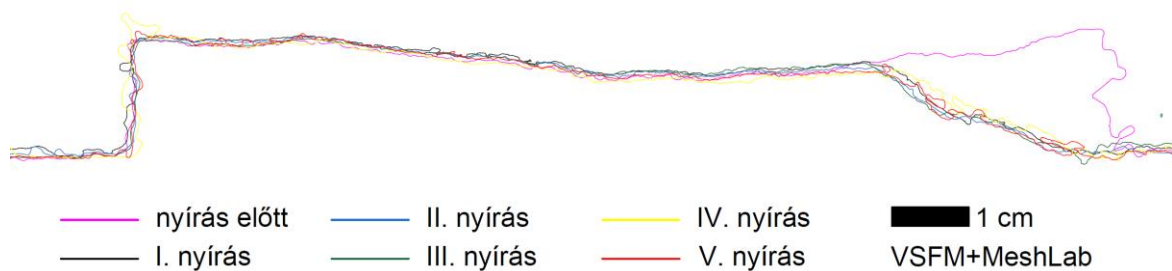
A VisualSFM szoftverrel készült metszetek szintén jól közelítik az eredeti felületet. A szoftverből kiemelt keresztmetszeteket felépítő vonalelemek elemhossza minden véletlenszerűen kiválasztott mintán ~0.3 mm és kétszáz-háromszáz elemből építi fel azokat. A MeshLab-ban történő feldolgozás eredményén látszik, hogy a létrehozott 3D felület nem egységes, a felület felett és alatt apró gömbök, szemcsék láthatók (19. ábra). Megfigyelhető az is, hogy hasonló szemcsék a felületet is torzítják. Ezek a hibák a 3D modellben és a keresztmetszeteken is jól megfigyelhető (M1/1 jelű melléklet: 1_A_M_1_0; 1_A_M_9_0; 1_A_M_14_0; 1_A_P_11_0; 1_A_P_13_0).



19. ábra: Apró gömbök, szemcsék a kész felületen és a felület fölött



Ismét a 4_A_P_10 metszetet tekintve megállapítható, hogy bár a modell jól leköveti a keresztmetszet alakját, formáját, a felületi érdesség mégsem tekinthető relevánsnak látva az ugyanezen keresztmetszetek Barton fésűvel készült profiljait. Megállapítható, hogy a VSFM-ben meghatározott pontfelhőnek a felület mentén nagy a szórása, apró egyenetlenségeket generál a felületen (M1/1 és M1/2 jelű melléklet: 1_A_P_11_0; 1_A_P_13_0; 1_A_M_1_0; 1_A_M_9_0; 1_A_M_14_0). A pontfelhő megtisztítása a MeshLab program teljes ismeretének hiányában nehéz, időigényes, de nem kizárt, hogy ezektől a gömbszerű egyenetlenségeket ki lehetne zárni. A durva hibák kézi eltávolítására volt csak lehetőségem. A nyírás vizsgálatok elkezdése előtt lefuttatásra került minden próbatest alsó és felső része VSFM programmal. A keresztmetszetek áttekintése során láthatóvá vált, hogy a VSFM a profilok mentén a hurkokat jelenít meg, amelyek a kőzeten nem láthatók (20. ábra részletesen a M3/2 jelű melléklet). A fent említett hibák miatt döntöttem úgy, hogy ezzel a módszerrel a nyírási vizsgálatok között nem modellezem tovább a felületet.



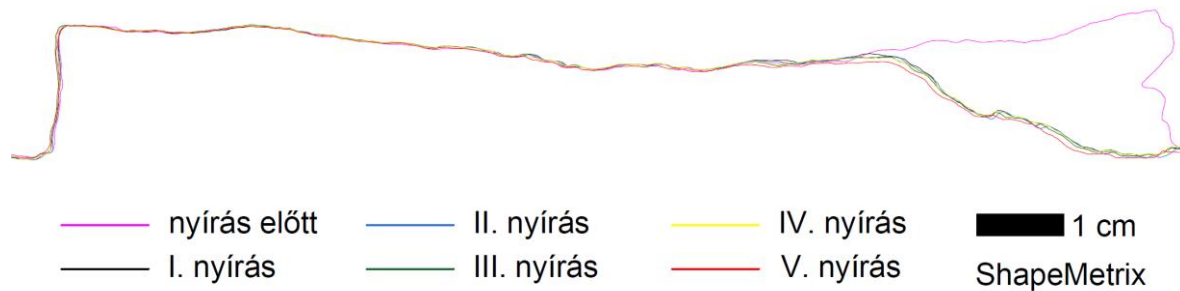
20. ábra: VisualSFM és MeshLab programmal készített metszetek

Az előbbi két feldolgozási módszerhez képest a ShapeMetrix3D programmal nyert adatok elemzése nagyságrendbeli váltást jelentett. Keresztmetszeti szinten 5-8-szoros az elemek mennyisége, átlagos elemhossza tizede a VSFM-hez képest.

Összепárosítva az alsó és felső mintarészeket látható, hogy a két fél egymással teljesen összeillik (M1/1 és M1/2 jelű melléklet). A keresztmetszeteket összehasonlítva a próbatesttel jó, részletes egyezést tapasztaltam. Az elvégzett nyírások után elkészült 3D modellből keresztmetszeteket egymás fölé helyeztem melyből látható, hogy a 4_A_P_10 metszetben a



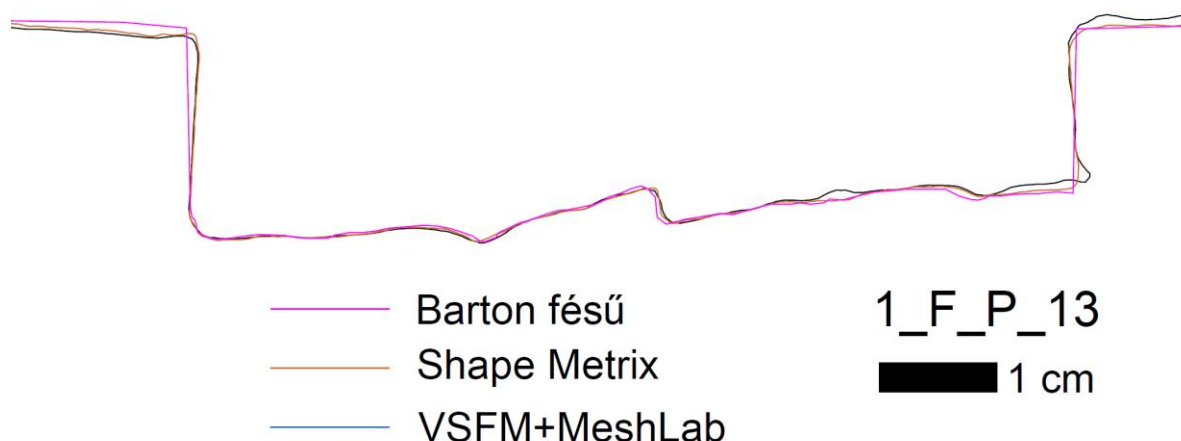
nyírások között elkészült profilok milliméternél kisebb eltérést mutatnak. (21. ábra részletesen a M3/2 jelű melléklet)).



21. ábra: ShapeMetrix3D programban készült keresztmetszetek

Egymás mellé helyezve és szemügyre véve a VSFM és a ShapeMetrix3D modelleket a különbség a ShapeMetrix3D javára szemmel látható (21. ábra).

A különböző módszerrel elkészített keresztmetszeteket egymás mellé, majd egymásra helyeztem, (22. ábra és M3/1 jelű melléklet) így vizuálisan is láthatóvá vált az egyes módszerek közötti különbség. Az ábrákon látható, hogy az elkészült keresztmetszetek szélességi mérete nem teljesen esik egybe, ez a feldolgozás, méretezés hibáját jelentheti. Méretarányos megfigyelésüknél kevés különbséget tapasztaltam. A VSFM programmal megfigyelhető volt a keresztmetszetek vonalában kis hurkok előfordulása, amely a valóságtól eltért, és így a keresztmetszet pontosságát rontotta (20 és 22. ábra és M3/1 jelű melléklet).



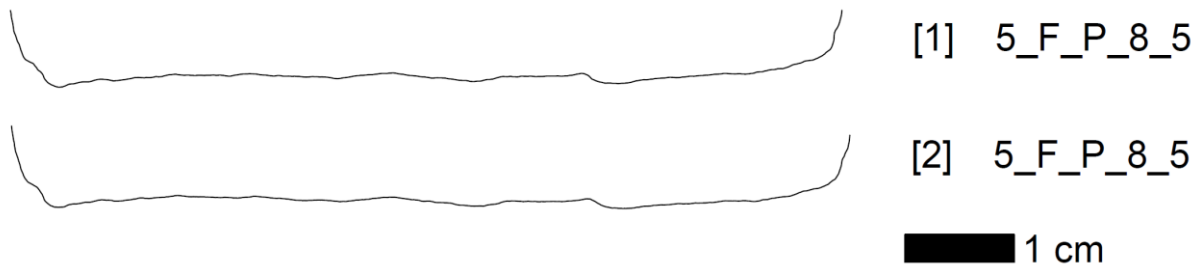
22. ábra: Különböző módszerekkel készült keresztmetszetek összehasonlítása

A szoftverek ellenőrzésének céljából ugyanarról a próbatestről elkészítettem két egymástól különböző fotósorozatot. Célom az volt, hogy azonos technikával elkészült fényképek feldolgozásának eredménye összehasonlítható legyen. A ShapeMetrix3Dben beállított paraméterek mindkét feldolgozási folyamat esetében megegyeztek. Az

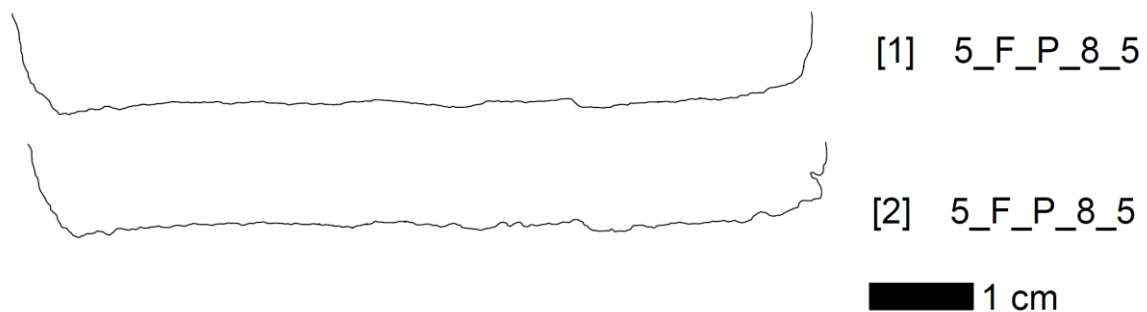


összehasonlítás az 23. ábrán látható. Az összehasonlításból kiderül, hogy szinte hiba nélkül ugyanazt a metszetet képes elkészíteni a program két különböző fotósorozatból.

Ugyanezt a két képsorozatot feldolgoztam VisualSFM-mel is. A képfeldolgozás folyamán természetesen ugyanazokat a műveleteket végeztem el és beállításokat alkalmaztam. Az eredményen látszik, hogy a két képsorozatból kapott eredményen felvett keresztmetszetek kis mértékben, de szemmel láthatóan eltérnek egymástól. Az első képsorozatban a keresztmetszet felületén kevesebb szemcse látható a második képsorozathoz képest (24. ábra). Ebből azt a következtetést vontam le, hogy a VSFM pontossága kisebb, mint a ShapeMetrix3D-é és jelentősen befolyásolja a fényképek minősége és a fényképek minősége, és a végeredmény pontossága bizonytalanabb.



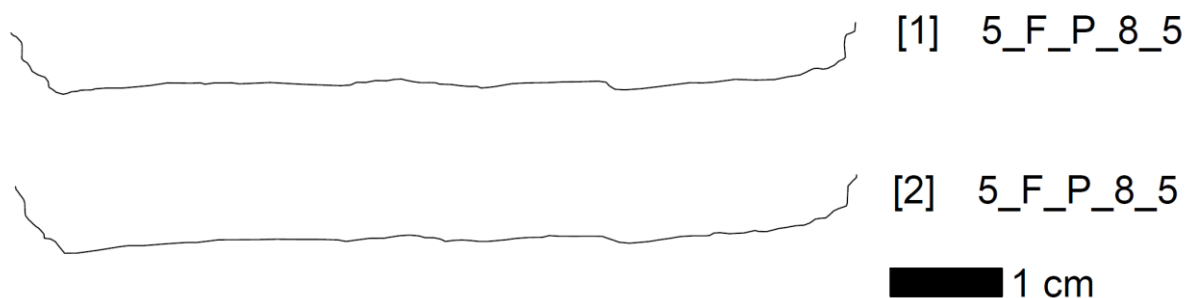
23. ábra: ShapeMetrix3D ellenőrzése



24. ábra: VisualSFM ellenőrzése



Végül a Barton fésűs technika ellenőrzésére elkészítettem az 5_F_P_8_5 keresztmetszeten két darab egymástól független profilt oly módon, hogy az első profil elkészítése majd átrajzolása után visszaállítva a fésű tűt a kiinduló helyzetbe újra elkészítettem a második profilt és átrajzoltam. A két profil összehasonlítása a 25. ábrán látható. Megállapítottam, hogy a Barton fésű használatával a felületen lévő egyenetlenségek mindkét esetben hasonlóan megjelennek, de az elkészítésből és a feldolgozásból származó hibák a két profilon megfigyelhetők. A végeredmény függ attól, hogy a Barton fésű tűi hogyan helyezkednek el, és a készülék helyzete befolyásolja a keresztmetszet geometriáját. A pontatlanságot ilyen kis felületi érdekességnél elhanyagolhatónak tartom.



25. ábra: Barton fésű ellenőrzése

6.2 Felület menti nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeinek értékelése

Az elvégzett vizsgálatokhoz felhasznált erőmérőcellák kN mértékegységben, az elmozdulásmérő mm mértékegységben szolgáltatva az adatokat. Az adatok mintavételi sűrűsége 5 db/másodperc volt. A kapott nyíróerőkből nyírófeszültséget, a normálerőkből normálfeszültséget számítottam.

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Ahol :

τ : Nyírófeszültség [MPa]

T: Nyíróerő [N]

A: Nyírt felület [mm²]

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ahol:

σ : Normálfeszültség [MPa]

F: Normálerő [N]

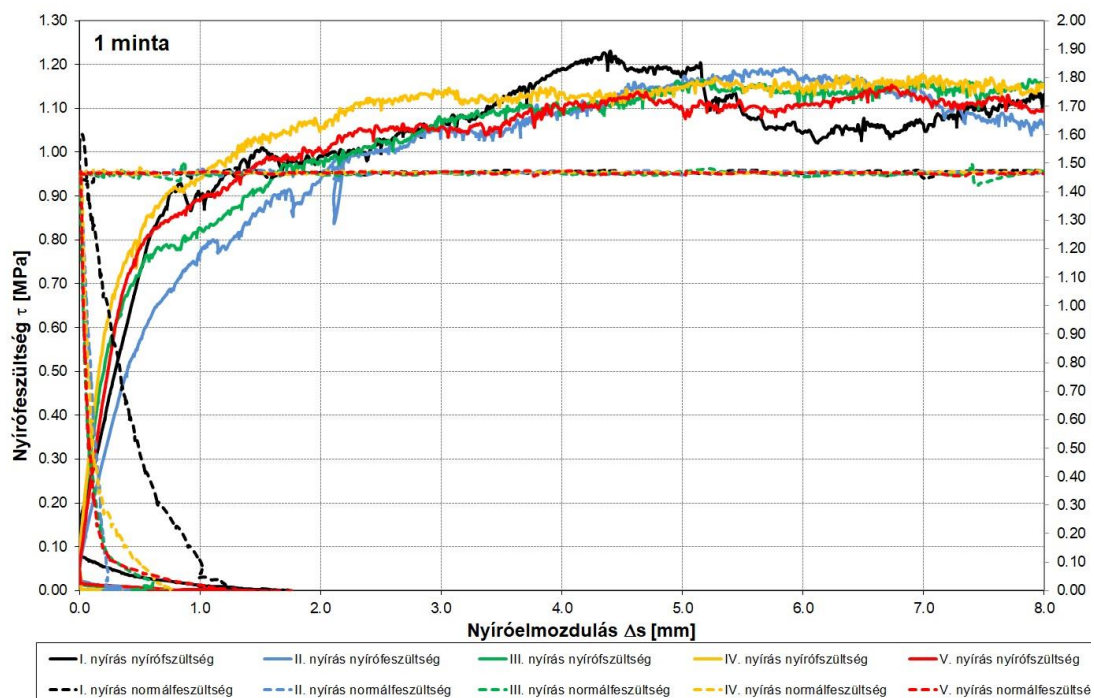
A: Nyírt felület [mm²]

Az átszámított értékekből diagramokat szerkesztettem, melyeknek vízszintes tengelye a nyíróelmozdulást, bal oldali függőleges tengelye a nyírófeszültséget, jobb oldali függőleges tengelye a normálfeszültséget mutatja. A 26- 29. ábrán látható diagramokon ugyanazon próbatesthez tartozó értékeket ábrázoltam, a nyírószilárdsági vizsgálat ismétlési számát a színek jelölik (1. nyírás-fekete, 2. nyírás- kék, 3. nyírás-zöld, 4. nyírás- sárga és 5. nyírás piros). A



nyírófeszültség görbéit a folytonos vonalak, a normálfeszültség görbéit a szaggatott vonalak jelölik.

Az 1. minta első vizsgálatának adataiból szerkesztett görbén a csúcshelyén a csúcshelyén $\sim 4,3$ mm-nél olvasható le az értéke $\sim 1,2$ MPa. Ezután a nyírószilárdság értéke csökken majd 6 mm nyírási hosszt követően ismét felkeményedés látható, a reziduális érték emiatt egyértelműen nem olvasható le. A 2. nyírószilárdság vizsgálata során a vizsgálat alkalmával mért csúcshelyén $\sim 6,0$ mm-nél jelentkezik majd 6,5 mm-től leolvasható a reziduális érték. A további 3-4-5 jelű vizsgálatok esetében a nyírószilárdság reziduális értéke egyértelműen leolvasható a diagrammról. Ezekben az esetekben csúcshelyét nem határoztam meg. A teljes vizsgálat során a normálfeszültség konstansnak tekinthető, értéke $\sim 1,45$ (26 ábra).

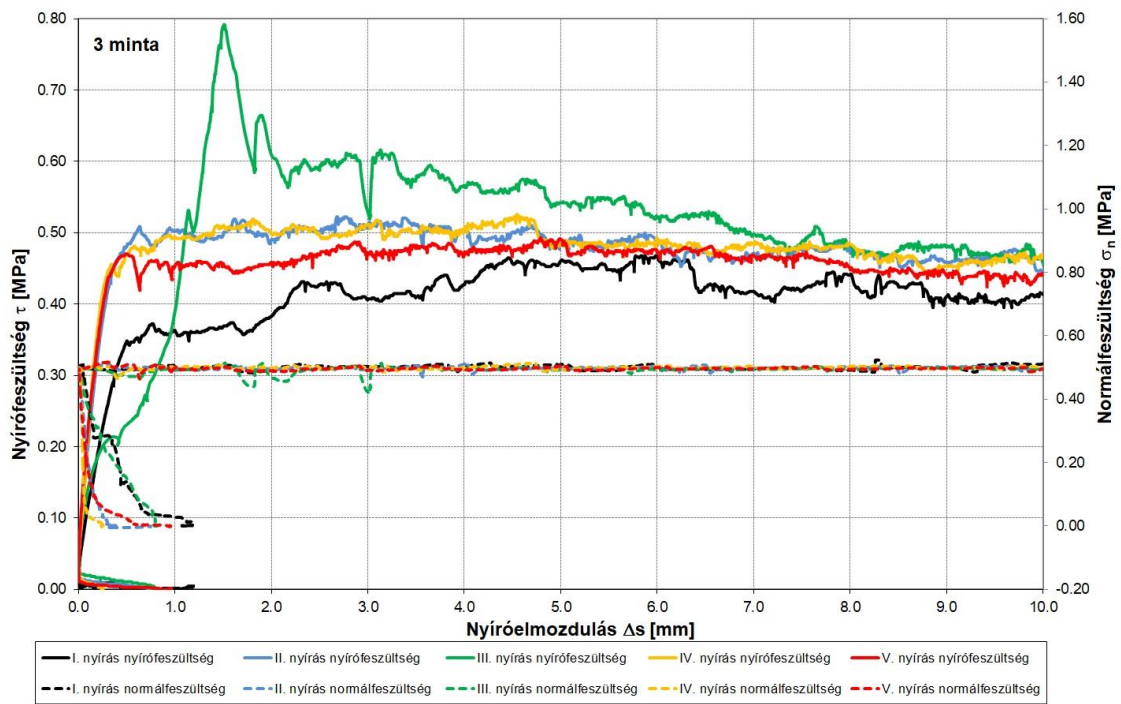


26. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 1. mintán

Az előző próbatesthez hasonlóan a 3. számú minta esetében is az első vizsgálat kezdetén a nyírófeszültség értéke tág határok között mozog, azonban ebben az esetben a $\sim 6,5$ mm elmozdulás után jelentkező csúcshelyén a csúcshelyén a nyírófeszültség visszaesik és ezután leolvasható annak reziduális értéke. A második vizsgálat görbéjén az elsőhöz képest 0,5 mm és 5,0 mm elmozdulások között a csúcshelyén hosszan elnyúlik, az első nyíráshoz hasonlóan 6 mm elmozdulásnál visszaesik majd beáll a reziduális értékre. A harmadik vizsgálat eredménye kitűnik a többi közül, 1,5 mm elmozdulásig a görbe meredeken emelkedik egészen 0,78 MPa nyírófeszültség eléréséig ezután hirtelen visszaesik és a vizsgálat végéig közelít az

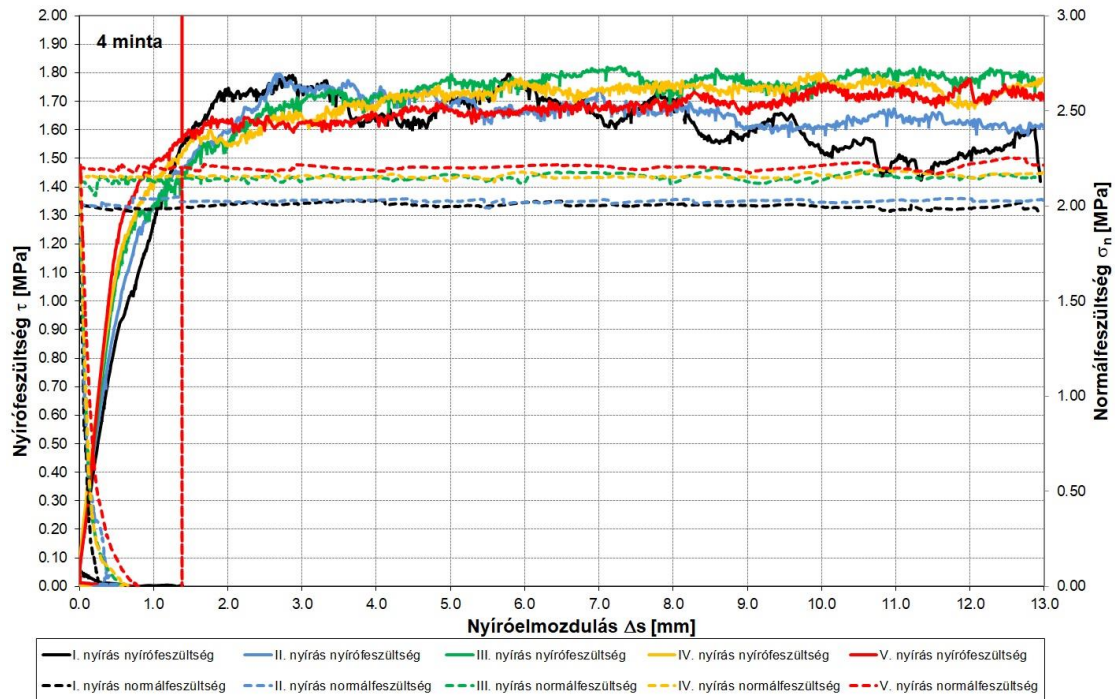


előző vizsgálatoknál látható reziduális értékekhez, amelynek értéke 8,0 mm-től kezdődően leolvasható. (A kiugró feszültség lehetséges indoka később) A 4-5 vizsgálatok esetében a nyírófeszültség felépülése után a görbék reziduális értéket mutatnak. A vizsgálati eredményekből látható, hogy a normálfeszültség konstans (27. ábra).



27. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 3. mintán

A 4. jelű próbatest esetében az első nyírószilárdsági vizsgálat előrehaladtával annak görbéje elsőként ~2,8 mm elmozdulásnál éri el a csúcsheszültséget. Ezután kissé visszaesik, közben a felület kissé lemorzsolódik majd ~5,8 mm elmozdulásnál ismét eléri az előző csúcsheszültség értéket. A második nyírás vizsgálat közben a csúcsheszültség elérése ismét 2,8 mm elmozdulásnál történt meg, azonban ezt követően a maradó reziduális érték olvasható le a grafikonról. A 3-4-5 nyírószilárdsági vizsgálatok görbéiről csúcsheszültség nem olvasható le. A minta esetében nagyobb darabok törtek le a nyírási felületről. Emiatt a vizsgálatok között újra számítottam a felület méretét, majd hozzáigazítottam a normálfeszültség értékét. Az alkalmazott normálfeszültségekben számottevő különbség nincs (28. ábra).

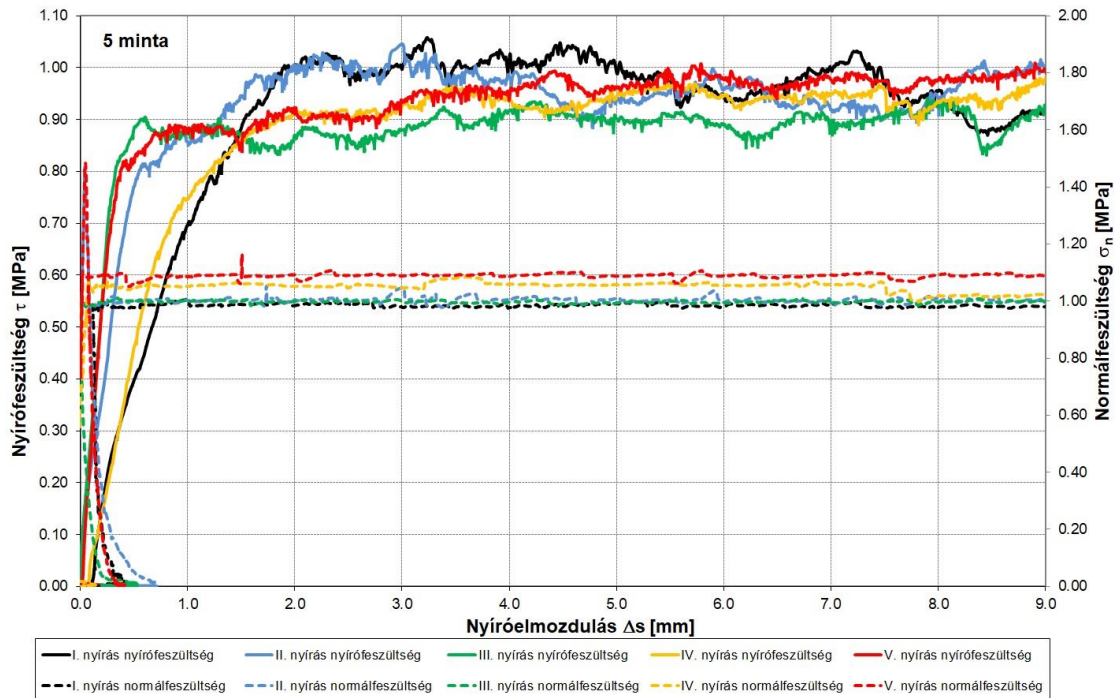


28. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 4. mintán

Az 5 jelű próbatesten elvégzett első vizsgálat során 3,1 mm elmozdulásnál és 4,5 mm elmozdulásnál olvasható le csúcsheszültség, 7,3 mm elmozdulásnál a nyírófeszültség értéke megközelíti a csúcsheszültséget, majd a nyírószilárdság értéke csökken a vizsgálat végéig. A második vizsgálat az azt megelőzőhöz közeli elmozdulási értéknél éri el a csúcsheszültséget, utána a nyírás végeztéig beáll a reziduális értékre. A többi próbatesthez hasonlóan a 3-4-5 ismétlésnél a nyírószilárdság görbéi fokozatosan ellapulnak, közelítenek a reziduális (29. ábra). értékhez. A minta alsó részéről nagyobb, felső részéről kisebb darabok törtek le, a normálfeszültségeket a csökkenő felülethez igazítottam



A fent bemutatott diagramokról leolvasott maximális és reziduális nyírófeszültség értékek az alábbi (8.) táblázatban láthatók. A diagramokról (26-39. ábra) látszik, hogy a normálerő az egyes nyírások alkalmával konstansnak tekinthető, ingadozása nem befolyásolja a vizsgálatot



29. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 5. mintán

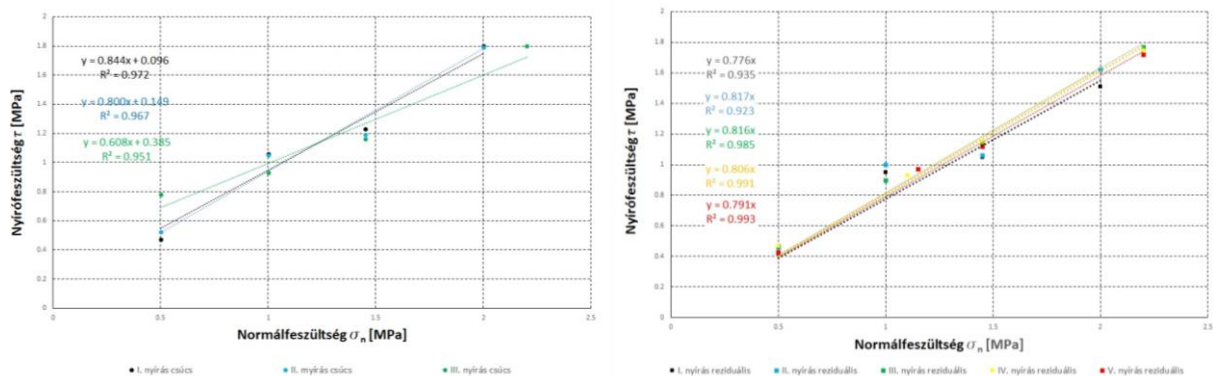
A grafikonokból látszik, hogy az első és második nyírás vizsgálat eredményeiből szerkesztett görbék tág értékek között változnak, ugrálnak. Ezeken a görbéken több lokális csúcserték is leolvasható, azonban nem minden esetben határozható meg teljesen egyértelműen a reziduális érték. A harmadik nyírás vizsgálat görbéi a vizsgálat elején az előbbiekhöz képest kisebb mértékben ingadoznak, majd a vizsgálat előrehaladásával a reziduális érték is könnyen leolvasható. Az ezt követő negyedik és ötödik vizsgálatoknál a görbék ellapulnak, az értékek



között kimagasló csúcsérték nem jelentkezik, nem olvasható le. 2-3 mm nyíró elmozdulás után teljesen vízszintessé válnak, leolvasható a reziduális nyírófeszültségi érték.

8. táblázat: Csúcs és Reziduális nyírószilárdsági értékek

Nyírás vizsgálat száma	Normálfeszültség [MPa]	Maximális Nyírófeszültség [MPa]	Reziduális Nyírófeszültség [MPa]	Minta jele
1	1,4	1,23	1,05	1
1	0,5	0,47	0,42	3
1	2,0	1,80	1,51	4
1	1,0	1,06	0,95	5
2	1,4	1,19	1,06	1
2	0,5	0,52	0,46	3
2	2,0	1,79	1,62	4
2	1,0	1,05	1,00	5
3	1,4	1,16	1,14	1
3	0,5	0,78	0,47	3
3	2,2	1,80	1,77	4
3	1,0	0,93	0,90	5
4	1,4	-	1,15	1
4	0,5	-	0,47	3
4	2,2	-	1,75	4
4	1,1	-	0,93	5
5	1,4	-	1,12	1
5	0,5	-	0,43	3
5	2,2	-	1,72	4
5	1,1	-	0,97	5



30. ábra: Csúcs és Reziduális nyírófeszültségek

A nyírószilárdság vizsgálatok leolvasott maximális csúcsértékeit és a reziduális értékeit a normálfeszültség függvényében ábrázoltam (30.ábra). A bal oldali csúcsértékeket ábrázoló grafikonon a 4. és 5. nyírószilárdság vizsgálatból nem kerültek fel értékek. A pontokra lineáris regressziós egyenest illesztettem.

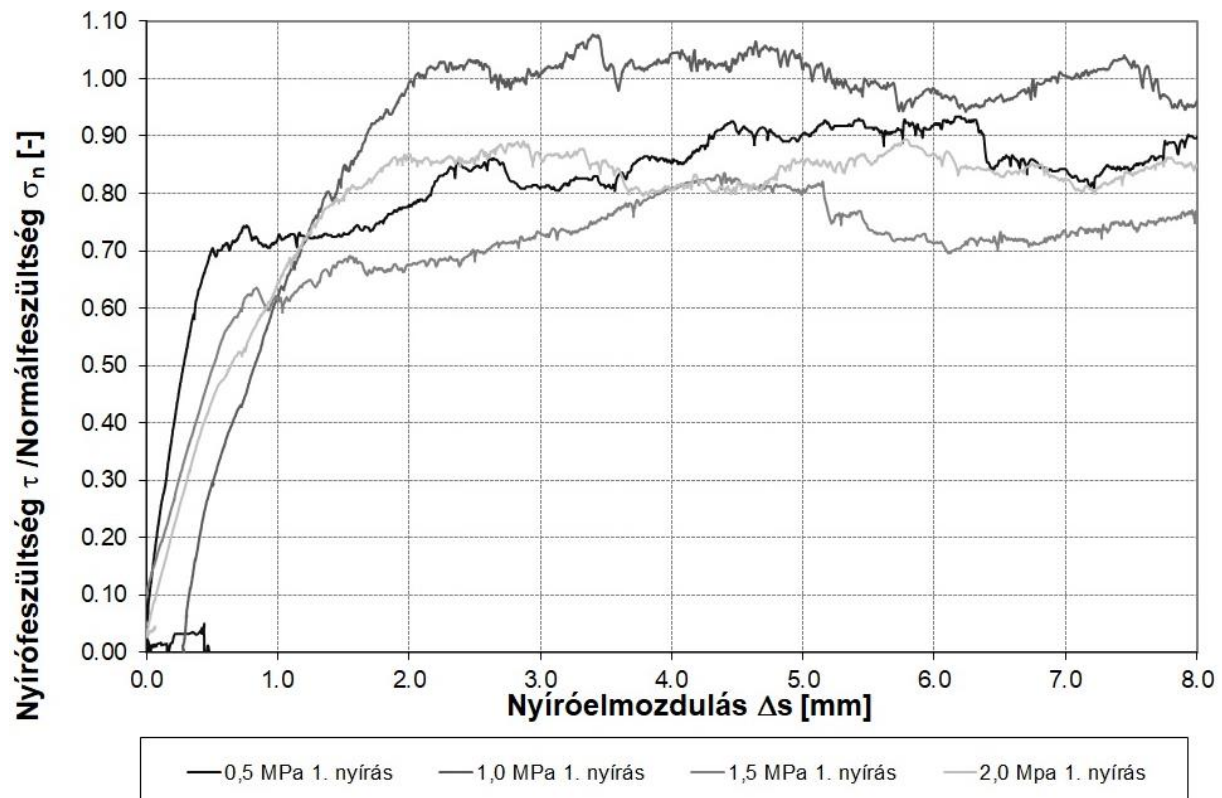


A regressziós egyenesek meredeksége az első vizsgálat és az ötödik vizsgálat között a felület károsodása miatt fokozatosan csökken (9. táblázat). Az egyenesek egyenletéből kiolvasható a látszólagos kohézió. A látszólagos kohézió értéke amiatt, hogy az alsó és felső próbatestrész egyre nagyobb felületen érintkezik a nyírószilárdság vizsgálatok előrehaladásával növekszik. A harmadik nyírásnál megállapított érték nem reális, az egyenes egy kiugró csúcspont miatt kisebb meredekségű, így nagyobb látszólagos kohézió eredményez. A jobb oldali ábrán ábrázoltam a reziduális pontokhoz tartozó egyeneseket, amelyek az origóból indulnak. A görbék meredeksége a vizsgálatok előrehaladtával fokozatosan csökken. Az első vizsgálat eredményeire illesztett egyenes meredeksége kisebb a második vizsgálat eredményére illesztett egyenes meredekségéhez képest, ez a leolvasás bizonytalanságából következik. Az első vizsgálatokból kapott görbéken a reziduális érték egyértelműen nem volt leolvasható. A második vizsgálatról kezdve a meredekség csökkenése megfigyelhető (9 táblázat).

Az adatok feldolgozása során olyan diagramokat is készítettem, amelyek függőleges tengelyen a nyírófeszültség és a normálfeszültség hányadosát ábrázoltam a vízszintes tengelyen feltüntetett nyíróelmozdulás függvényében (31. ábra, M4/1; M4/2 ;M4/3 ;M4/4 ;M4/5 jelű mellékletek). A nyírófeszültség és a normálfeszültség hányadosaként egy olyan dimenzió nélküli értéket kaptam, amely mentes a normálfeszültség esetleges hirtelen változásából, ugrálásából származó hibáktól és a nyírt felületben bekövetkező változásoktól. Ezeket a grafikonokat nem az egy mintához tartozó nyírószilárdsági vizsgálatok eredményei alapján választottam szét, hanem a mintákon elvégzett nyírások ismétlési száma szerint. A nyíróelmozdulás tengelyen a legkisebb mintához tartozó 8,0 mm-es maximum értéket állítottam be.

9. táblázat: Meredekségek és surlódási szögek

	Csúcs		Látszólagos kohézió	Reziduális	
	meredekség	φ [°]		meredekség	φ [°]
I. nyírás	0,844	40,2	0,096	0,776	37,8
II. nyírás	0,800	38,7	0,149	0,817	39,3
III. nyírás	0,608	31,3	0,385	0,816	39,2
IV. nyírás	-	-	-	0,806	38,9
V. nyírás	-	-	-	0,791	38,3



31. ábra: Első nyírószilárdság vizsgálat eredménye

Ezekon a grafikonokon is megfigyelhető a nyírási vizsgálatok előrehaladtával a görbék ellapulása, közeledése a reziduális értékekhez. Az első nyírás vizsgálatokból kapott görbék értékei tág határok között mozognak. A további vizsgálatok eredményeiből látszik, hogy a görbék rendeződnek.

A második nyírási vizsgálatától kezdődően a függőleges tengelyen felvett dimenzió nélküli szám alapján a legmagasabb értéket felvevő görbe a 0,5 MPa normálfeszültséghez tartozik. Alatta következik az 1,0 MPa, majd a 2,0 MPa legvégül a 1,5 MPa alatti nyírás vizsgálat eredményeiből szerkesztett görbe látható.

A harmadik nyíró vizsgálat eredményeit grafikonon ábrázolva az előbbivel egyező sorrend tapasztalható. Megfigyelhető, hogy a 0,5 MPa és az 1,0 Mpa-hoz tartozó vizsgálatok valamint a 1,5 MPa és az 2,0 Mpa-hoz tartozó vizsgálatok eredményeiből szerkesztett görbék közelítenek egymáshoz.

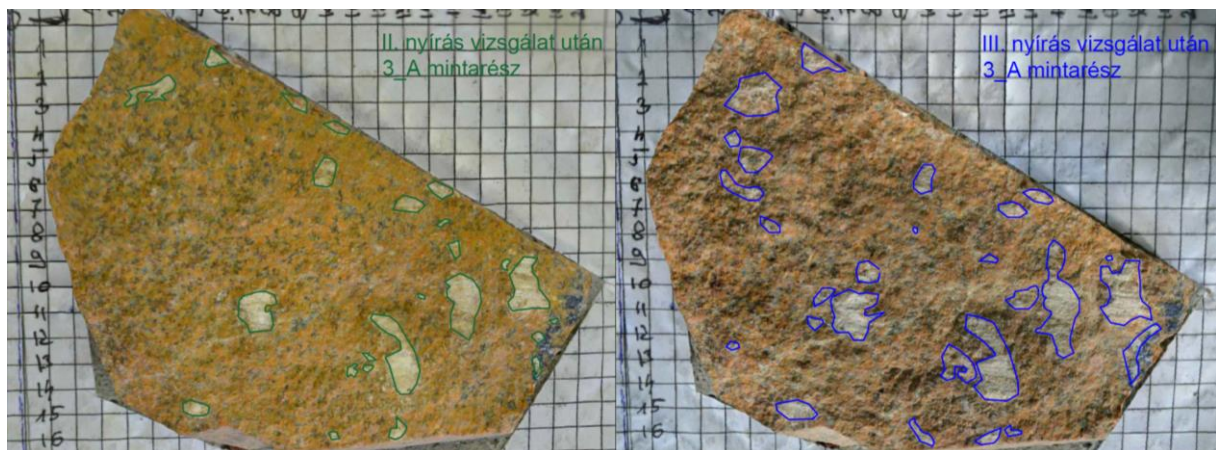
A negyedik és ötödik vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a 0,5 MPa és a 1,0 MPa normálerő alatti nyírás vizsgálat görbéi együtt haladnak, valamint az 1,5 MPa és a 2,0 MPa alatti nyírásvizsgálat görbéi szintén együtt haladnak. Az 1,5 MPa és a 2,0 Mpa-hoz tartozó görbék sorrendje a második és harmadik vizsgálatokhoz képest kis különbséggel, de felcserélődik,



így jó közelítéssel mondható, hogy a grafikonokon a görbék a próbatesteken alkalmazott normálfeszültség szerint rendeződnek.

A fent leírtaknak oka, hogy alacsonyabb normálfeszültség alkalmazása mellett az első nyírásvizsgálatok során a felület kevésbé károsodik, roncsolódik. Emiatt a nyírószilárdság a vizsgálatok számának előrehaladtával lassabban csökken. A nagyobb normálfeszültség alkalmazása során az első vizsgálatok alkalmával a felület nagyobb mértékben károsodik, ezért a reziduális nyírófeszültség hamarabb kialakul.

3. jelű próbatest esetében, a harmadik nyírási vizsgálat alkalmával a korábbiaktól eltérő csúcsheszültség kiugrás látható a nyírófeszültség értékek között (27 ábra). A nyírófeszültség görbe meredeken emelkedik a normálerő változatlansága mellett, ~1,5 mm nyíró elmozdulásnál a felület feszültségmentesül és a nyírófeszültség értéke visszaesik. A görbe értelmezéséhez szükségesek a korábban elkészített fényképek. (32. ábra) A nyírt felületről a második nyírószilárdsági vizsgálat utáni fényképen zöld színnel, a harmadik nyírószilárdsági vizsgálat után készített fényképen kék színnel jelöltem be a felületen tapasztalható sérülések nyomait. Szemrevételezés után kiderül, hogy a harmadik nyírási vizsgálat alkalmával a felület a korábbihoz képest jelentős mértékben sérült, kopott. A gránit szilárdsága miatt a nyírt felületen kevés sérülés látható, emiatt a felületen jelentkező új sérülések jól elkülöníthetők a korábbiaktól. A 3. mérés során tapasztalt hirtelen megnövekedő nyírófeszültség a felületi egyenetlenségek hirtelen lekopásával magyarázható.

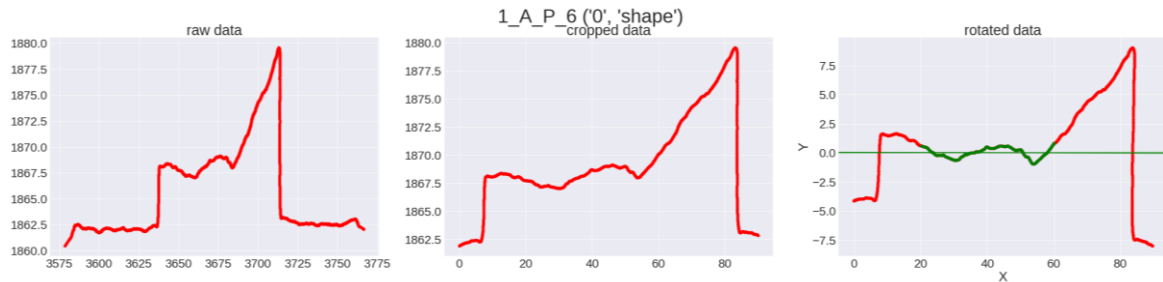


32. ábra: 3. minta alsó felének felületi fényképe a 2. nyírás (bal oldal) és a 3. nyírás (jobb oldal) után

Az eredeti felületen mért és a nyírószilárdsági vizsgálatok után készített keresztmetszeteket egymás fölé helyeztem: Ehhez a profilokat egymásra kellett tolni és egymáshoz kellett forgatni.



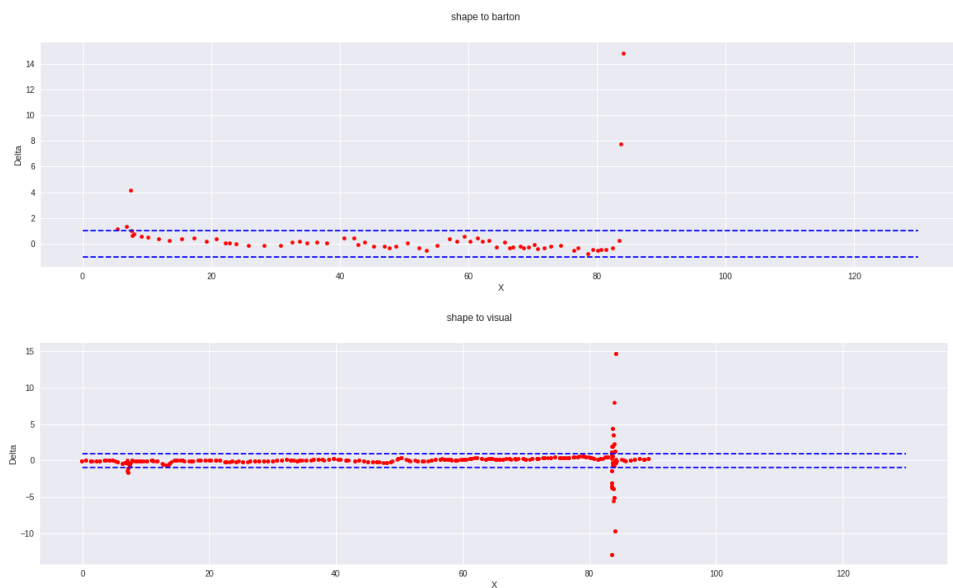
A keresztmetszetek vizsgálatát követően a görbe azon a szakaszára, ahol a profil jelentős mértékben nem változik, lineáris regressziós egyenest illeszttem, majd a keresztmetszeteket egymással párhuzamos állásba forgattam úgy, hogy a lineáris regressziós egyeneseket azonos pozícióba toltam. Ahol szükséges volt eltoltam a keresztmetszeteket, hogy teljesen egymást fedjék (33. ábra).



33. ábra: Keresztmetszetek eltolása, regressziós egyenes illesztése az egy 1_A_P_6 keresztmetszeten

A dolgozatban két keresztmetszetet mutatok be. Az egyik a már fent is látott 4_A_P_10_1 és az 1_A_P_6_1 előbbi esetében a felületről nagyobb darabok törtek le (M3/2 jelű melléklet), utóbbi esetében a felületen apróbb darabok, szilánkok törtek le, többnyire a felület kopása látható rajta.

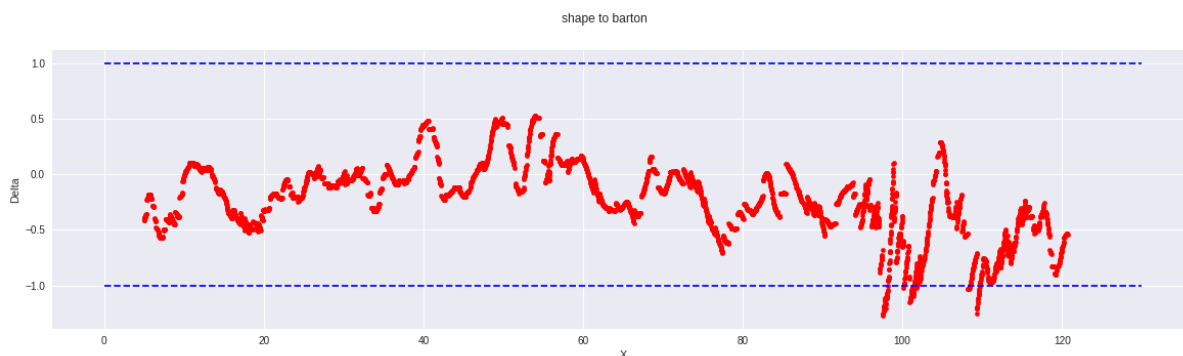
Összehasonlítottam a Barton fésűs leképezést a ShapeMetrix3D-s profillal, valamint a VSFM eredményét a ShapeMetrix3D-s profillal. Pontdiagramon ábrázoltam a VSFM és ShapeMetrix3D keresztmetszet pontjai közötti különbséget a pontok vízszintes koordinátáinak függvényében.



34. ábra: ShapeMetrix3D-Barton fésű és ShapeMetrix3D és VSFM keresztmetszet közötti különbség 1_A_6_1 profilon



A ShapeMetrix3D-vel és Barton fésűvel készült profilok összehasonlításából látható, hogy az eltérés $-0,5$ és $0,5$ mm között halad a minta síknak mondható szakaszán, azaz 1 mm-nél nem nagyobb a különbség (34. ábra). A 35. ábra az első nyírószilárdság vizsgálat után mutatja be a 4. minta alsó felének 10. keresztmetszetének kiértékelését. Így a korábban is látható ~ 100 mm-nél történt sarok letörést a Barton fésű nem tudta követni és a Barton fésűs és a ShapeMetrix3D közötti különbség szemmel láthatóan megnövekszik, hirtelen és nagyobb ütemben változik.



35. ábra: ShapeMetrix3D-Barton fésű keresztmetszet összehasonlítása a 4_A_P_10_1 metszetben

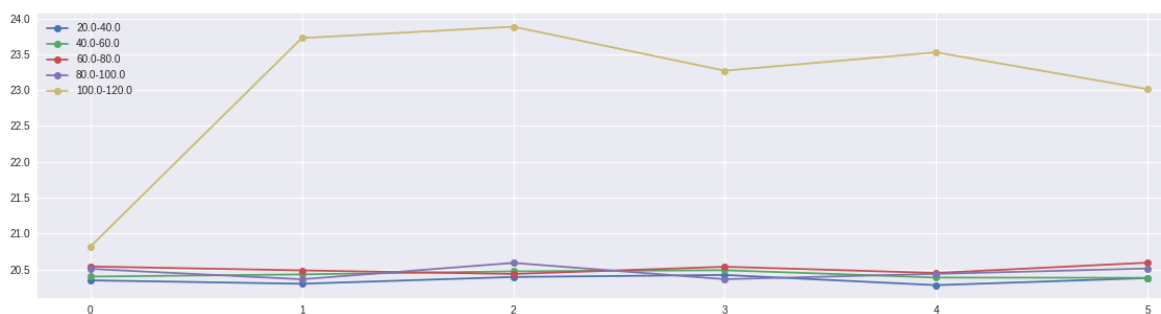
Ezt a hirtelen változást az okozza, hogy a Barton fésű a milliméternél kisebb változásokat, hirtelen felület változást a tűk mérete miatt nehezen követi (17. ábra), így a két profil között számított Δy eltérés megnő, hirtelen változik. A pontok negatív tartományba esnek, ha a ShapeMetrix3D-el készített profil halad feljebb, pozitív tartományba, ha a Barton fésűvel készült profil halad magasabban, 0 értéket vesz fel ha a két profil metszi egymást. A 34-35. ábrán a szaggatott kék vonal csak a vizsgált tartomány jelzésére szolgál.

A ShapeMetrix3D kiértékelésből az első nyírás előtti és mind az 5 mérés utáni keresztmetszet adatokat a következő módon hasonlítottam össze: a keresztmetszeti profilt 20mm-es szakaszokra osztottam. Kiszámítottam ezen 20 mm-es szakaszokat felépítő vonalelemek hosszát mind az 5 nyírószilárdsági vizsgálat után.

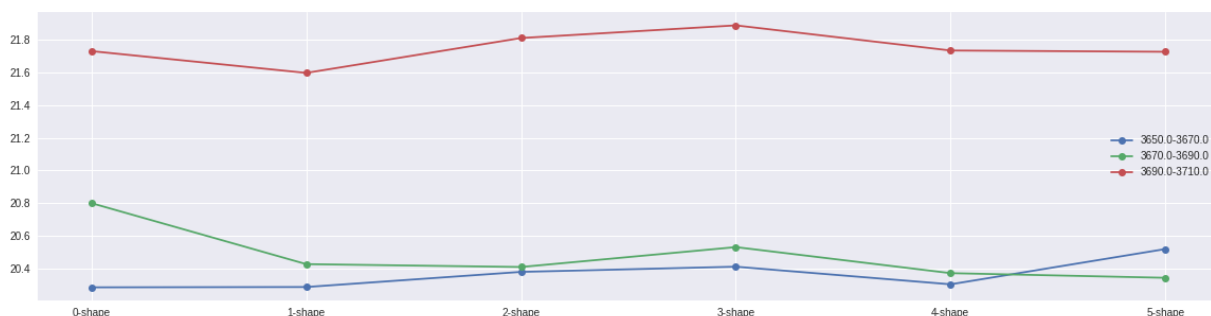
Az így kapott eredményeket koordináta-rendszerben ábrázoltam. A bemutatott 4_A_P_10 és 1_A_P_6 metszet adataiból szerkesztett grafikon az 36-37 ábrán látható. A grafikon vízszintes tengelyén a vizsgálat száma, függőleges tengelyén a 20 mm vetületi hosszon meghatározott profil hossza látható.



A profilt megfigyelve (M3/2 jelű melléklet) látható, hogy az első nyírás alkalmával a 4_A_P_10 metszetben vonalában nagyobb darab letörik a mintáról 100-120 mm között, emiatt az eredetileg mért ~20.7 mm-ről jelentős mértékben elmozdul az első nyírószilárdság vizsgálat után (36. ábra sárga), majd mivel tovább nem károsodik ezért közel vízszintesen halad tovább. Ugyanerről a grafikonról látható az is, hogy a metszet 20-100 mm-es szakaszán jelentős méretű darab nem válik le a próbatestről. Ezen a szakaszokon a próbatest felületén csak kopások láthatók. A feldolgozás pontossága miatt ezek az egyenesek végig közel vízszintesen néhány tized milliméter pontossággal különbséggel ugyanazon értéket vesznek fel.



37. ábra: Felületen mért hosszak, letört felületrész azonosítása



36. ábra: Felületen mért vonalelem hosszúságok

Az 1_A_P_6 keresztmetszetből szerkesztett grafikonon (37. ábra) látszik, hogy a profilt három 20 mm-es szakaszra bontottam fel. Ezekon a szakaszokon mért profil vonalelem hosszúságok megegyeznek, a vonalak szintén néhány tized milliméter eltéréssel közel vízszintesen haladnak. Míg az 4_A_P_10 profil esetében az egyenesek közel egy csoportban haladnak, ebben az esetben kettéválnak. Ennek oka az, hogy míg az 4_A_P_10 metszet közel sík, addig az 1_A_P_6 metszet jobb oldala meredeken emelkedik, bal oldala közel sík (M1/2 jelű melléklet). A meredeken emelkedő részen felvett 20 mm-es szakaszon hosszabb a profil ezért ez elválik a sík részen felvett szakaszoktól.



7 Következtetések, összefoglalás

A mérnöki gyakorlatba beépült, beépülő innovatív módszerek aktualizálhatók a közetmechanika tudományágára, meglévő tapasztalatainkat bővíthetjük, új ismereteket szerezhethetünk.

A szakmában jelenleg a tagolófelület érdekességére alkalmazott Barton fésű-technikát a számítógépek adta lehetőségek meghaladják és pontosítani tudják.

Barton fésűs technikát alkalmazva nem elegendő néhány profil felvétele, a felület részletesebb jellemzéséhez elegendő számú keresztmetszet elkészítése és feldolgozása időigényes művelet.

A VisualSFM és a MeshLab opensource programokat felhasználva megalkotható a vizsgált felület 3D pontfelhője és ebből felület építhető.

A VisualSFM szoftver által létrehozott pontfelhő a felhőt alkotó pontok darabszámát tekintve elégséges, azonban az elkészült pontfelhő pontatlan.

Az általam használt opensource programokra támaszkodva néhány milliméteres pontosságú felület építhető, amely geometriai méreteit és alakját tekintve jól tükrözi az eredetileg vizsgált próbatest felületét.

Az általam használt programokkal készített alsó és felső mintarészekről készített keresztmetszetek összeilleszthetőek, egyezést mutatnak, de a felületen szemcséket és zavart zónákat figyelhetünk meg. Ezek a hibák befolyásolják a profil felületi érdekességét.

ShapeMetrix3D szoftver alkalmazásával a próbatestekről mm-es nagyságrendnél kisebb pontosságú 3D modell hozható létre. A programot alkalmazva a felhasználóbarát módon állíthatunk elő mindenki számára elérhető (*.DXF; *.PDF) formátumú adatokat, elemzéseket. A keresztmetszetek létrehozása könnyen kivitelezhető, ismételt kiértékelés során ugyanarra az eredményre vezet. A felület leképezéséhez használt elem- és pontszám nagyon magas (jelen esetben min. 16000db/cm²).

Az ugyanazon a felületen végzett ismételt nyírószilárdsági vizsgálatok során a tagolófelület morfológiája megváltozik. Ennek hatására a nyírószilárdság-nyíróelmozdulás görbe alakja is jelentősen módosul. Az első és második nyírószilárdsági mérés során egyértelmű



csúcsfeszültség figyelhető meg, míg a 3-5. ismétlés során már csak reziduális nyírószilárdság mérhető. A felületi érdesség hirtelen megváltozása jelentős feszültségcsúcsot okoz.



8 Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikolettának, akinek szakmai és emberi támogatását évek óta élvezhetem. Jelen kutatás alkalmával számtalan jó tanáccsal látott el. Köszönöm, hogy segítette a laboratóriumi munkámat, köszönöm, hogy segítséget nyújtott az adatok feldolgozásában és a dolgozat elkészítésében.

Köszönöm Vattai Alinának a laboratóriumban nyújtott segítséget és a rengeteg gyakorlati jó tanácsot. Külön köszönöm neki, hogy töretlen jókedve és remek humorérzéke feledhetetlenné tette közös munkát.

Köszönet illeti a 3GSM szoftvergyártó céget, hogy a kutatás idejére a rendelkezésemre bocsájtotta a ShapeMetrix3D teljes verzióját.



9 Ábrajegyzék

1. ábra: Mórágyp elhelyezkedése [12].....	5
2. ábra: Földtani térkép Mórágyp környékéről [13] (piros szín jelöli a Mórágyp Gránit Formációt).....	5
3. ábra: A vizsgált minták felülete	6
4. ábra: Minták gyűjtése	7
5. ábra: LEGO elem és egy kőzetminta a feldolgozás után	8
6. ábra: Elkészített próbatestek	9
7. ábra: Fényképezés és átrajzolás összehasonlítása.....	10
8. ábra: Próbatestekről készült metszetek számozásának rendszere	11
9. ábra: Fényképezőgép beállítása.....	12
10. ábra: Két fényképen azonos pontként beazonosított pontpárok.....	15
11. ábra: ShapeMetrix3D fénykép feldolgozási folyamat	16
12. ábra: Fénykép feldolgozás VSFM programmal	17
13. ábra: Nyírószilárdság vizsgáló gép felépítése.....	19
14. ábra: Próbatétel helyzete a felület menti nyírószilárdság vizsgálat elején (bal oldal) és végén (jobb oldal).....	20
15. ábra: Felület hálók sűrűségének összehasonlítása.....	22
16. ábra: Barton fésűről készített kézzel rajzolt metszetvonal digitalizálása.....	23
17. ábra: Barton fésű felületre illesztése.....	23
18. ábra: Barton fésűvel készült keresztmetszetek	24
19. ábra: Apró gömbök, szemcsék a kész felületen és a felület fölött	24
20. ábra: VisualSFM és MeshLab programmal készített metszetek.....	25
21. ábra: ShapeMetrix3D programban készült keresztmetszetek	26
22. ábra: Különböző módszerekkel készült keresztmetszetek összehasonlítása	26
23. ábra: ShapeMetrix3D ellenőrzése.....	27
24. ábra: VisualSFM ellenőrzése	27
25. ábra: Barton fésű ellenőrzése	28
26. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 1. mintán	29
27. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 3. mintán	30
28. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 4. mintán	31
29. ábra: Felület menti nyírószilárdsági vizsgálat eredményei az 5. mintán	32
30. ábra: Csúcs és Reziduális nyírófeszültségek.....	33
31. ábra: Első nyírószilárdság vizsgálat eredménye	35
32. ábra: 3. minta alsó felének felületi fényképe a 2. nyírás (bal oldal) és a 3. nyírás (jobb oldal) után	36
33. ábra: Keresztmetszetek eltolása, regressziós egyenes illesztése az egy 1_A_P_6 keresztmetszeten	37
34. ábra: ShapeMetrix3D-Barton fésű és ShapeMetrix3D és VSFM keresztmetszet közötti különbség 1_A_6_1 profilon	37
35. ábra: ShapeMetrix3D-Barton fésű keresztmetszet összehasonlítása a 4_A_P_10_1 metszetben.....	38
37. ábra: Felületen mért vonalelem hosszúságok.....	39
36. ábra: Felületen mért hosszak, letört felületrész azonosítása.....	39



10 Táblázatok

1. táblázat: Gránit kőzetfizikai jellemzői [15]	6
2. táblázat: Ellenőrző keresztmetszetek	11
3. táblázat: Elkészült fényképek száma	13
4. táblázat: Alkalmazott normálfeszültségek és próbatestek felületének méretei	19
5. táblázat: Maximális nyíróelmozdulások.....	20
6. táblázat: Azonos felületre eső pontok száma.....	21
7. táblázat: Vonallánc elemek száma és átlagos elemhossz.....	22
8. táblázat: Csúcs és Reziduális nyírószilárdsági értékek.....	33
9. táblázat: Meredekségek és surlódási szögek.....	34

11 Mellékletek



12 Irodalomjegyzék

- [1] Johansson F.: Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 82, pp. 36–47, 2016
- [2] Grasselli, G., Egger, P.: Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 40, pp. 25–40, 2003.
- [3] Barton, N.: The shear strength of rock and rock joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Geomech. Abstr. Pergamon* 13, pp. 255–279, 1976.
- [4] Buocz I., Rozgonyi-Boissinot N., Török Á.: Influence of discontinuity inclination on the shear strength of Mont Terri Opalinus Claystones, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3), pp. 447-453, <https://doi.org/10.3311/PPci.10017>
- [5] Niktabar, S.M.M., Rao, K.S., Shrivastava, A.K.: Effect of rock joint roughness on its cyclic shear behavior. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 9, pp. 1071–1084. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.09.001>
- [6] Yujing Jiang Bo Li Yosihiko Tanabashi: Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints
- [7] Yunfeng Ge, Huiming Tang, M. A. M Ez Eldin, Pengyu Chen, Liangqing Wang & Jinge Wang: A Description for Rock Joint Roughness Based on Terrestrial Laser Scanner and Image Analysis
- [8] Huiming Tang, Yunfeng Ge, Liangqing Wang, Yi Yuan, Lei Huang, Miaojun Sun: Study on Estimation Method of Rock Mass Discontinuity Shear Strength Based on Three-Dimensional Laser Scanning and Image Technique
- [9] Szabó B., Benkó Zs., Molnár F., Lespinasse M.: Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában II.: A Mórággyi Gránit repedésrendszerei, *Földtani Közlöny*, 138/3, pp. 247–256., Budapest, 2008
- [10] Maros Gy.: A Mórággyi Gránit szerkezeti fejlődése az IMAGEO magszkennerrel történt fúrásértelmezések alapján, PhD doktori értekezés, 2006, Mikoviny Sámuel Doktori Iskola, Miskolci Egyetem, <http://midra.uni-miskolc.hu/document/5631/1476.pdf>
- [11] Király E., Koroknai B.: A Mórággyi-rög ÉK-i részének magmás és metamorf fejlődéstörténete, *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése, MÁFI 2003 (2004)*, pp. 313-318
- [12] <https://www.google.com/maps>
- [13] Magyarország fedett földtani térképe 1:100000 CD változat, szerk: Gyalog László, MÁFI, Budapest 2005, ISBN: 9636712514
- [14] Davarpanah M., Somodi G., Kovács L., Vásárhelyi B.: Complex analysis of uniaxial compressive tests of the Mórággy granitic rock formation (Hungary), *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2019; 41(1), pp. 21–32, <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0010>
- [15] Fodor T., Kleb B.: Magyarország műnökgeológiai áttekintése, p. 199, Bp. 1986
- [16] Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blümel M., Chryssanthakis P., Yujing J.: ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:



Revised Version. In: Ulusay R. (ed.): The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer; pp. 131-142.



13 Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
2	Geológia.....	5
3	Vizsgálat előkészítése.....	7
3.1	Próbatestek előkészítése	7
3.2	Mérési módszer kiválasztása	8
3.3	Fényképek készítése.....	12
4	Alkalmazott szoftverek.....	14
4.1	Képek feldolgozása ShapeMetrix3D programmal	15
4.2	Képek feldolgozása VSFM és MeshLab programmal	17
5	Felület menti nyírószilárdság vizsgálat	19
6	Vizsgálati eredmények értékelése	21
6.1	Felületek feldolgozási módszereinek összehasonlítása.....	21
6.2	Felület menti nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeinek értékelése	28
7	Következtetések, összefoglalás	40
8	Köszönetnyilvánítás	42
9	Ábrajegyzék.....	43
10	Táblázatok.....	44
11	Mellékletek	44
12	Irodalomjegyzék	45
13	Tartalomjegyzék	47



Mellékletek:

M0 jelű melléklet: Jelmagyarázat

M1/1; M1/2 jelű melléklet: 1 jelű mintán, nyírás előtti állapotban készített keresztmetszetek összehasonlítása [Bartonfésű-ShapeMetrix3D-VisualSFM]

M2/1; M2/2 jelű melléklet: 1 jelű mintán, nyírás közti állapotban készített keresztmetszetek összehasonlítása [Bartonfésű-ShapeMetrix3D]

M3/1 jelű melléklet: 1 jelű mintán, nyírás előtti állapotban készített keresztmetszetek összehasonlítása [Bartonfésű-ShapeMetrix3D-VisualSFM]

M3/2 jelű melléklet: 5 jelű mintán, nyírás közti állapotban készített keresztmetszetek összehasonlítása [Bartonfésű-VSFM-ShapeMetrix3D]

M4/1 jelű melléklet: I. nyírószilárdság vizsgálat eredményeiből szerkesztett diagramm

M4/2 jelű melléklet: II. nyírószilárdság vizsgálat eredményeiből szerkesztett diagramm

M4/3 jelű melléklet: III. nyírószilárdság vizsgálat eredményeiből szerkesztett diagramm

M4/4 jelű melléklet: IV. nyírószilárdság vizsgálat eredményeiből szerkesztett diagramm

M4/5 jelű melléklet: V. nyírószilárdság vizsgálat eredményeiből szerkesztett diagramm

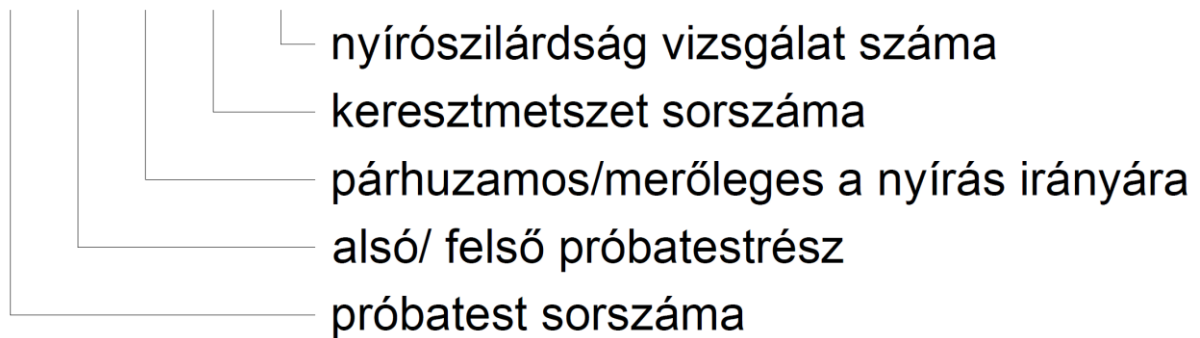


Mellékletek



Jelmagyarázat

1_A_P_12_5



-  Nyírás előtt
-  I. Nyírás
-  II. Nyírás
-  III. Nyírás
-  IV. Nyírás
-  V. Nyírás

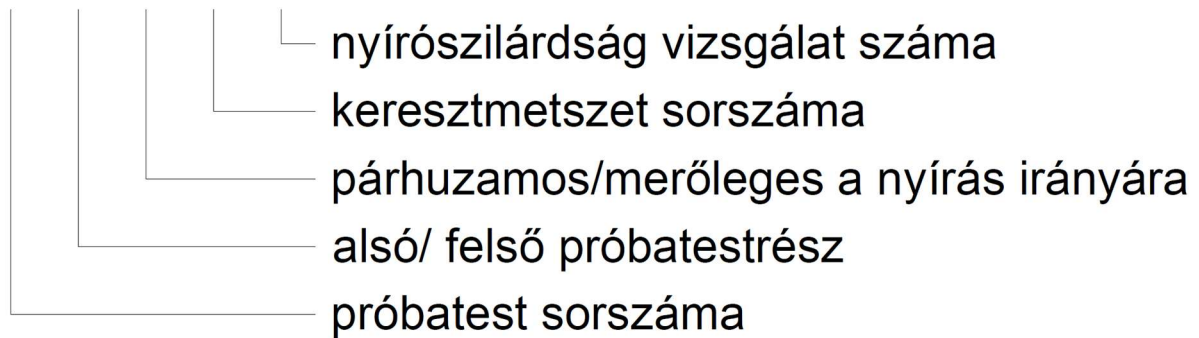


Mellékletek



Jelmagyarázat

1_A_P_12_5



 Nyírás előtt

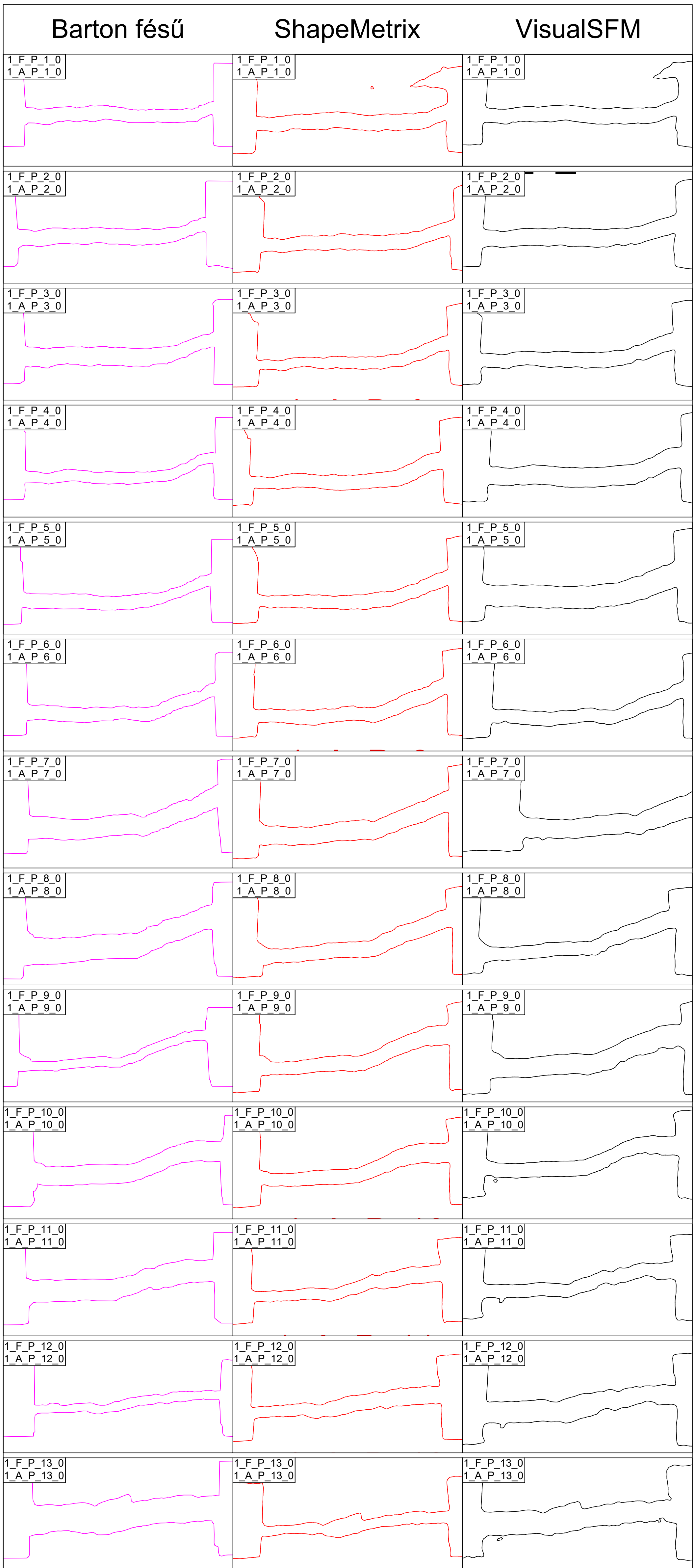
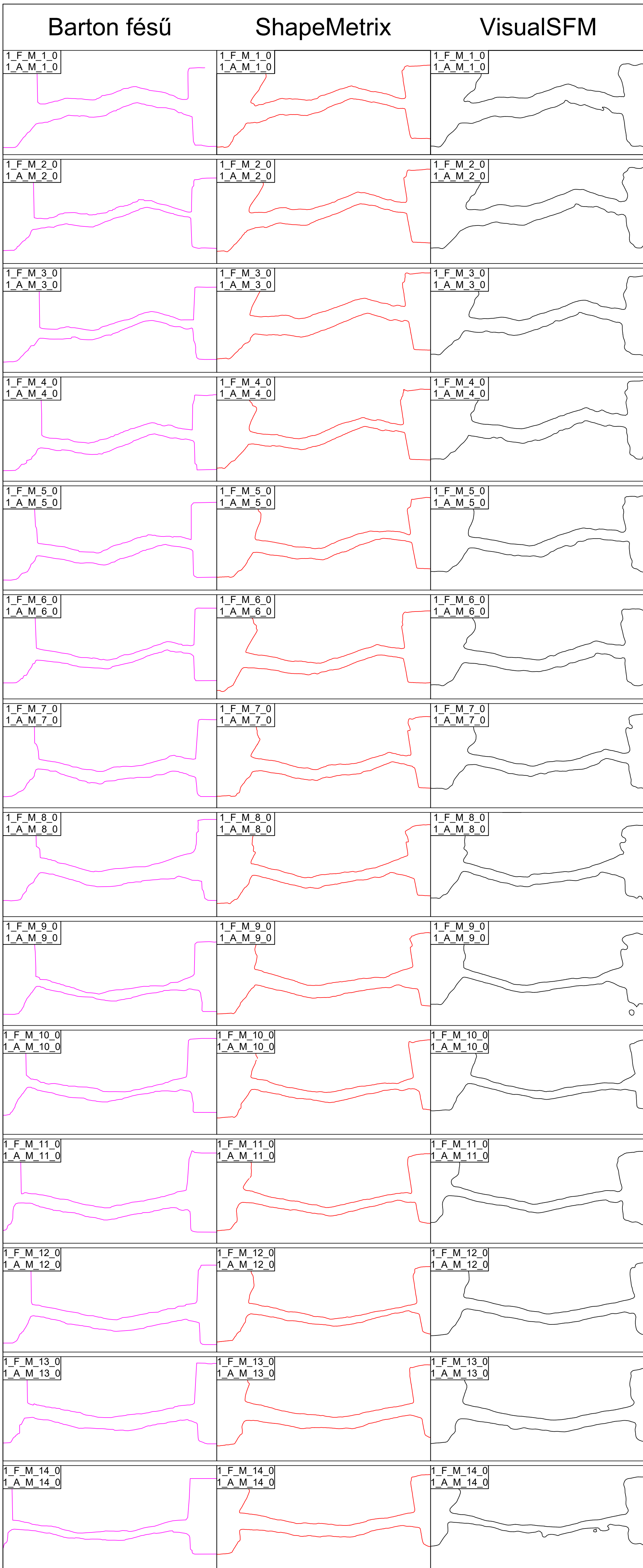
 I. Nyírás

 II. Nyírás

 III. Nyírás

 IV. Nyírás

 V. Nyírás



I. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.M.7.1
1.A.M.7.1

1.F.M.7.1
1.A.M.7.1

1.F.M.11.1
1.A.M.11.1

1.F.M.11.1
1.A.M.11.1

1.F.M.13.1
1.A.M.13.1

1.F.M.13.1
1.A.M.13.1

1.F.P.6.1
1.A.P.6.1

1.F.P.6.1
1.A.P.6.1

1.F.P.10.1
1.A.P.10.1

1.F.P.10.1
1.A.P.10.1

1.F.P.12.1
1.A.P.12.1

1.F.P.12.1
1.A.P.12.1

II. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.M.7.2
1.A.M.7.2

1.F.M.7.2
1.A.M.7.2

1.F.M.11.2
1.A.M.11.2

1.F.M.11.2
1.A.M.11.2

1.F.M.13.2
1.A.M.13.2

1.F.M.13.2
1.A.M.13.2

1.F.P.6.2
1.A.P.6.2

1.F.P.6.2
1.A.P.6.2

1.F.P.10.2
1.A.P.10.2

1.F.P.10.2
1.A.P.10.2

1.F.P.12.2
1.A.P.12.2

1.F.P.12.2
1.A.P.12.2

III. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.M.7.3
1.A.M.7.3

1.F.M.7.3
1.A.M.7.3

1.F.M.11.3
1.A.M.11.3

1.F.M.11.3
1.A.M.11.3

1.F.M.13.3
1.A.M.13.3

1.F.M.13.3
1.A.M.13.3

III. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.P.6.3
1.A.P.6.3

1.F.P.6.3
1.A.P.6.3

1.F.P.10.3
1.A.P.10.3

1.F.P.10.3
1.A.P.10.3

1.F.P.12.3
1.A.P.12.3

1.F.P.12.3
1.A.P.12.3

IV. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.M.7.4
1.A.M.7.4

1.F.M.7.4
1.A.M.7.4

1.F.M.11.4
1.A.M.11.4

1.F.M.11.4
1.A.M.11.4

1.F.M.13.4
1.A.M.13.4

1.F.M.13.4
1.A.M.13.4

1.F.P.6.4
1.A.P.6.4

1.F.P.6.4
1.A.P.6.4

1.F.P.10.4
1.A.P.10.4

1.F.P.10.4
1.A.P.10.4

1.F.P.12.4
1.A.P.12.4

1.F.P.12.4
1.A.P.12.4

V. nyírás után készült keresztmetszetek

Barton fésű

ShapeMetrix

1.F.M.7.5
1.A.M.7.5

1.F.M.7.5
1.A.M.7.5

1.F.M.11.5
1.A.M.11.5

1.F.M.11.5
1.A.M.11.5

1.F.M.13.5
1.A.M.13.5

1.F.M.13.5
1.A.M.13.5

1.F.P.6.5
1.A.P.6.5

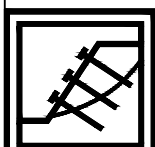
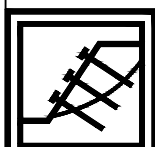
1.F.P.6.5
1.A.P.6.5

1.F.P.10.5
1.A.P.10.5

1.F.P.10.5
1.A.P.10.5

1.F.P.12.5
1.A.P.12.5

1.F.P.12.5
1.A.P.12.5



1_F_P_13_0

1_F_P_6_0

1_F_M_10_0

M 1:1

Barton fésű

M 1:1

Barton fésű

M 1:1

Barton fésű

VisualSFM

VisualSFM

VisualSFM

Shape metrix

Shape metrix

Shape metrix

1_F_P_13_0

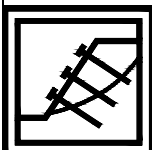
M 2.5:1

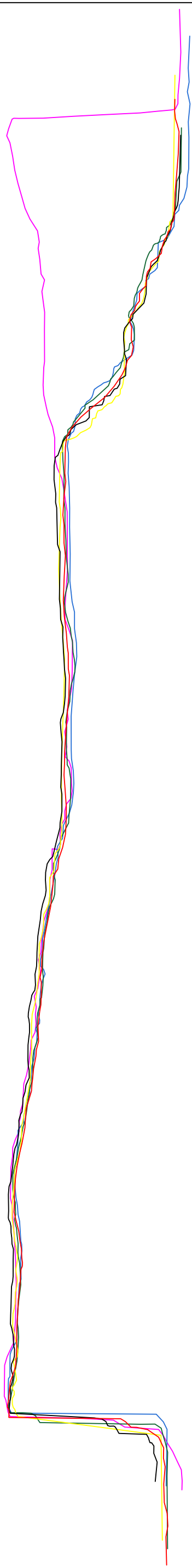
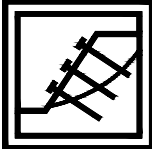
1_F_P_6_0

M 2.5:1

1_F_M_10_0

M 2.5:1





nyírás előtt

I. nyírás

II. nyírás

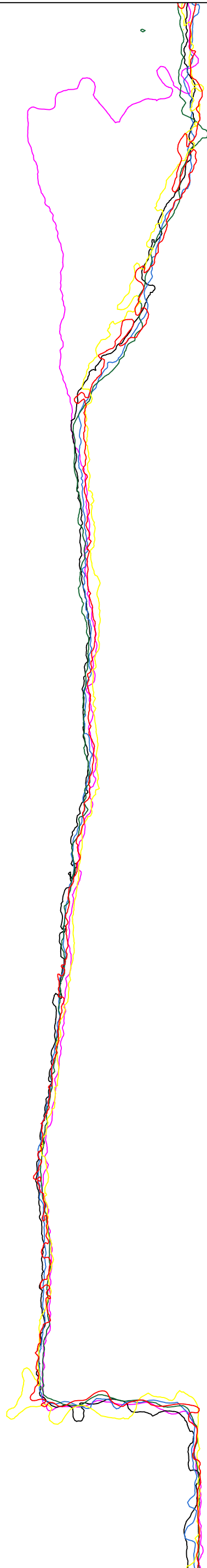
III. nyírás

IV. nyírás

V. nyírás

1 cm

Barton fésű



nyírás előtt

I. nyírás

II. nyírás

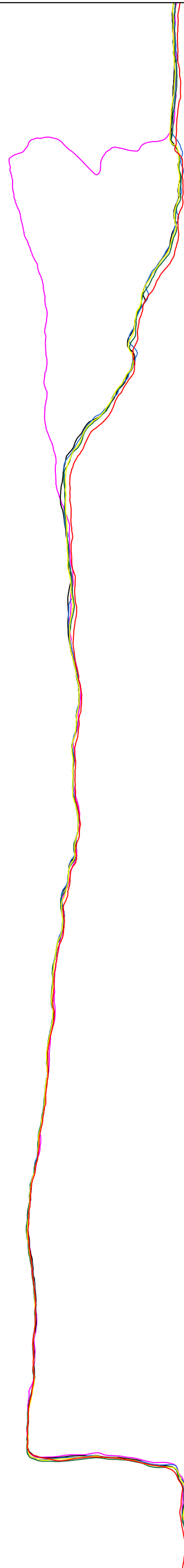
III. nyírás

IV. nyírás

V. nyírás

1 cm

VSFM+MeshLab



nyírás előtt

I. nyírás

II. nyírás

III. nyírás

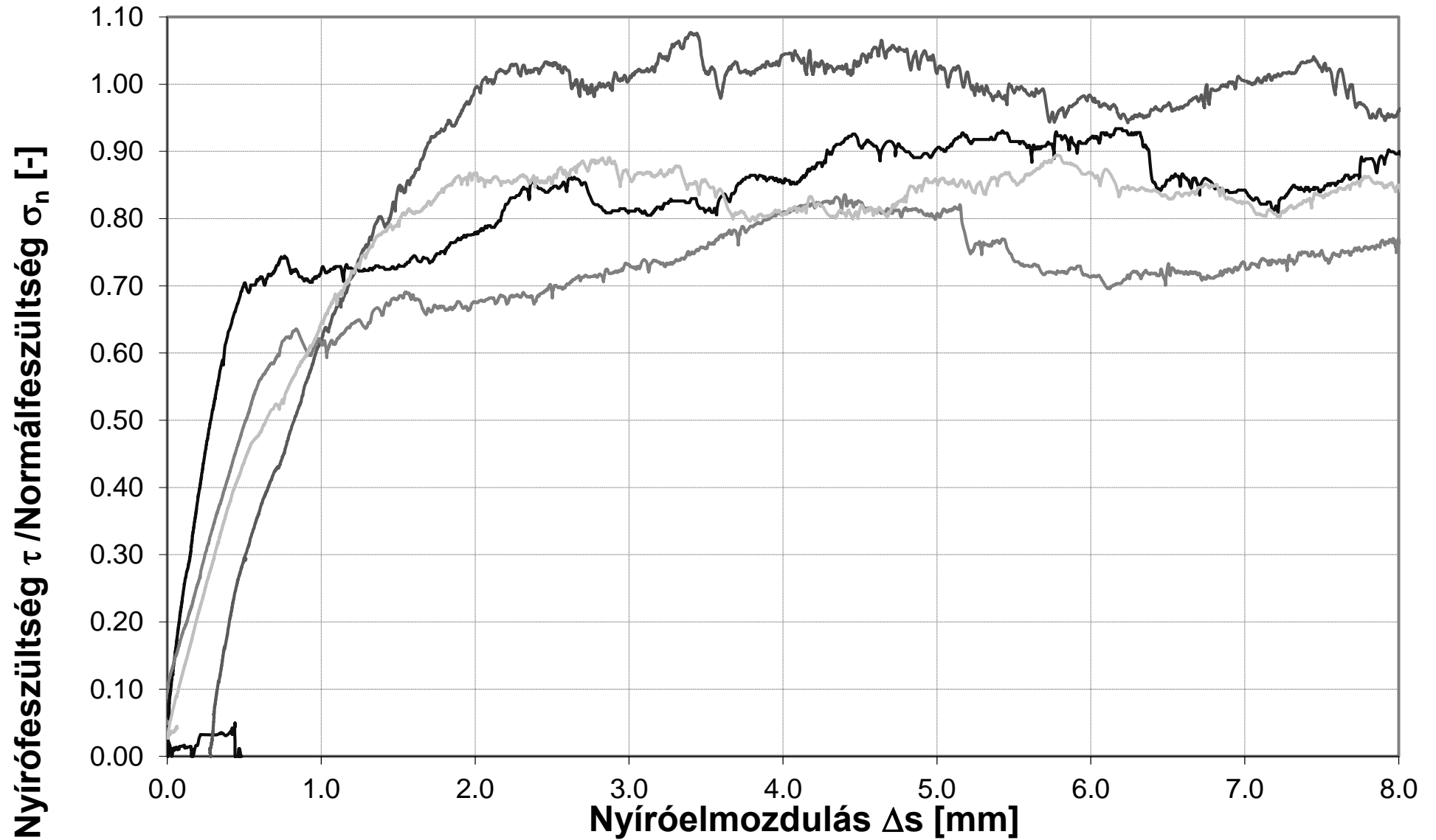
IV. nyírás

V. nyírás

1 cm

ShapeMetrix

M4/1 jelű melléklet



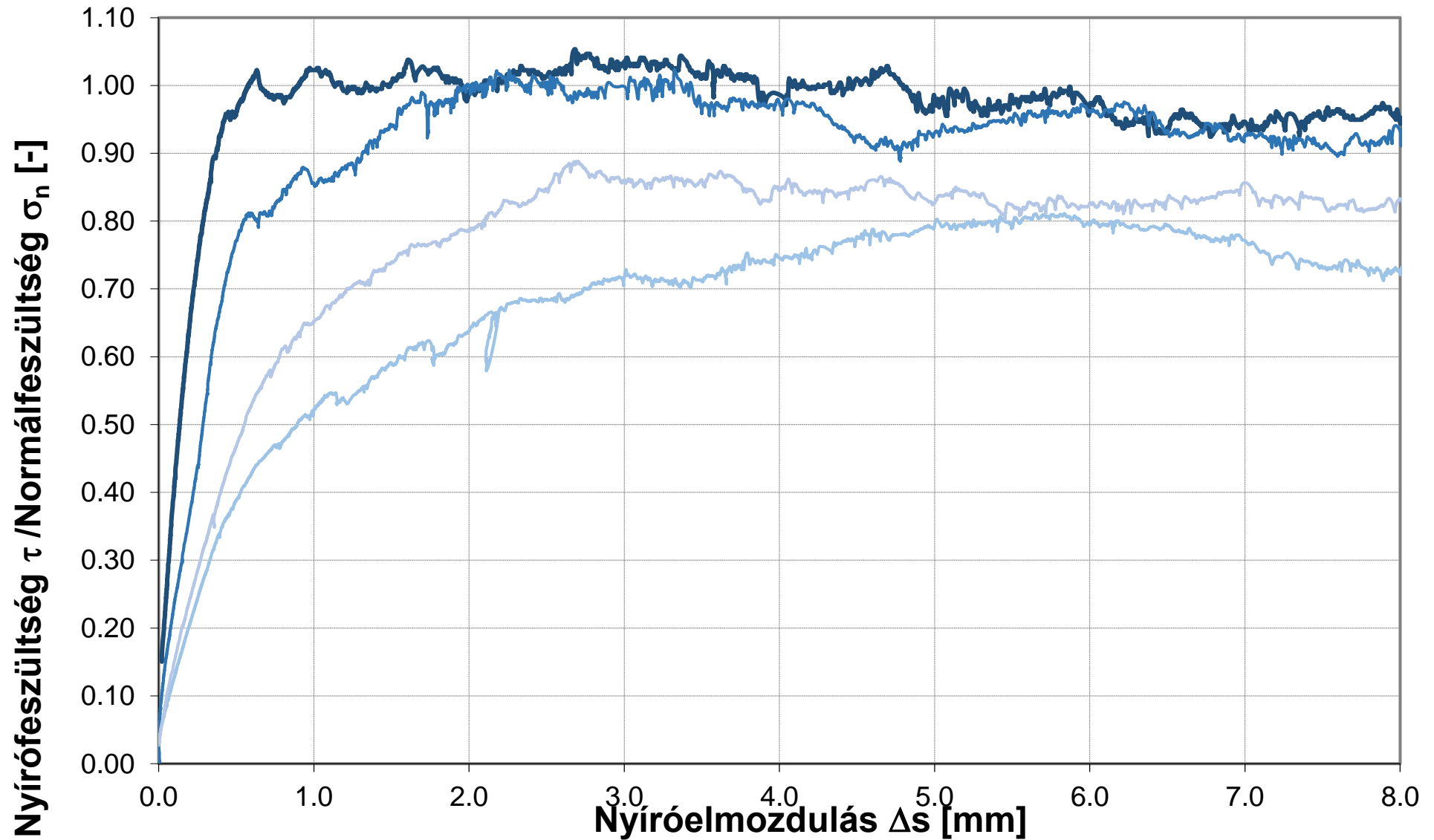
— 0,5 MPa 1. nyírás

— 1,0 MPa 1. nyírás

— 1,5 MPa 1. nyírás

— 2,0 Mpa 1. nyírás

M4/2 jelű melléklet



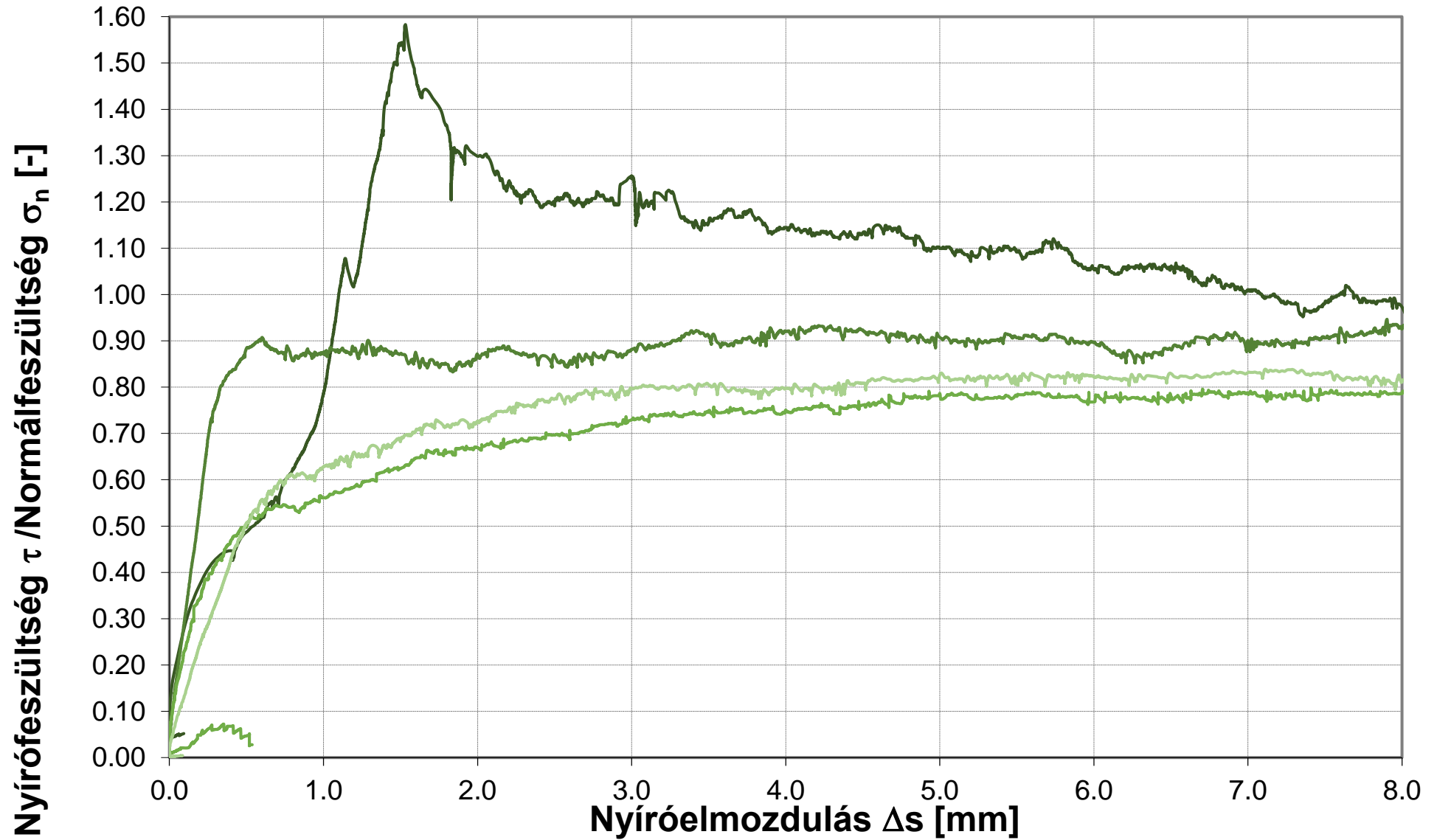
0,5 MPa 2. nyírás

1,0 MPa 2. nyírás

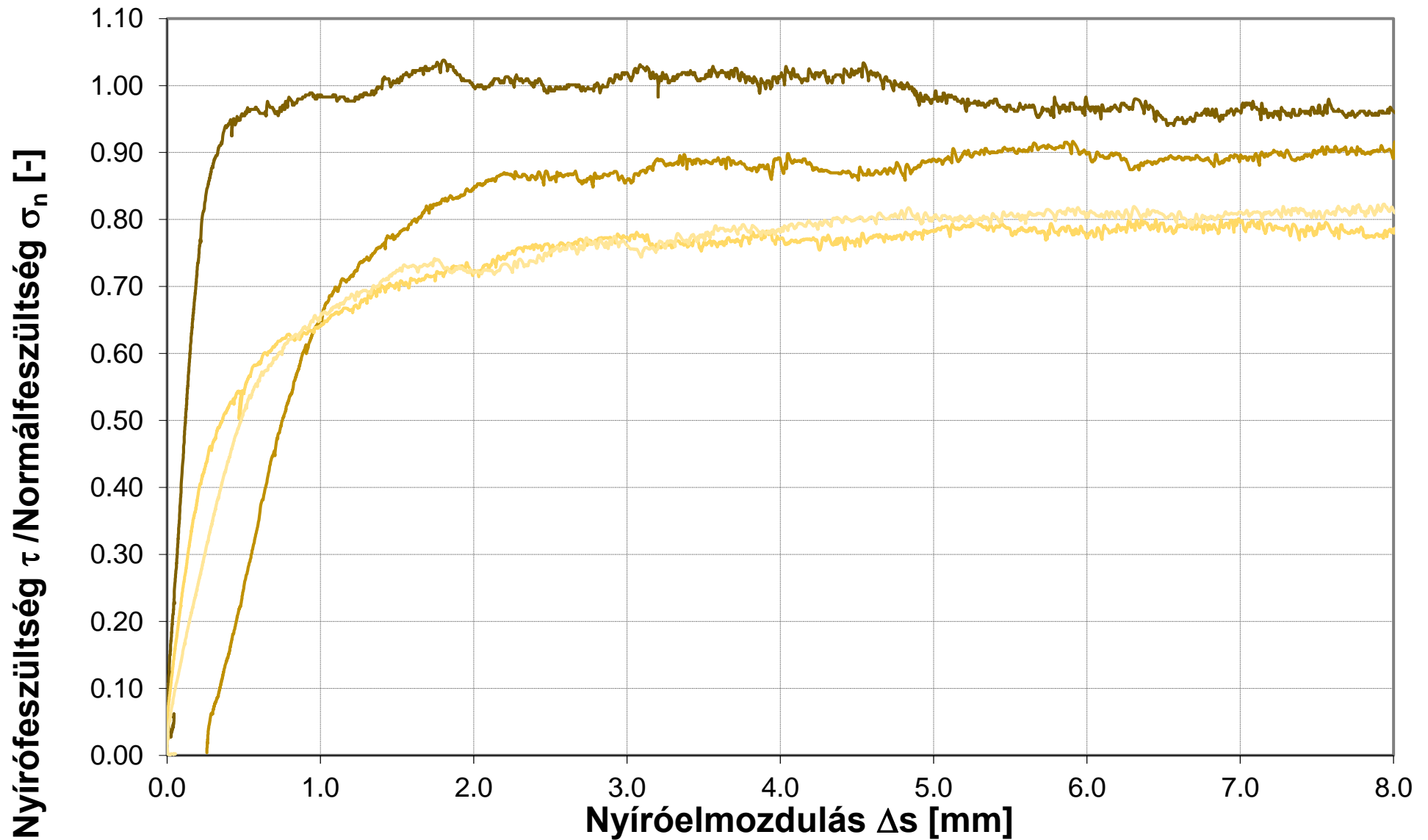
1,5MPa 2. nyírás

2,0 MPa 2. nyírás

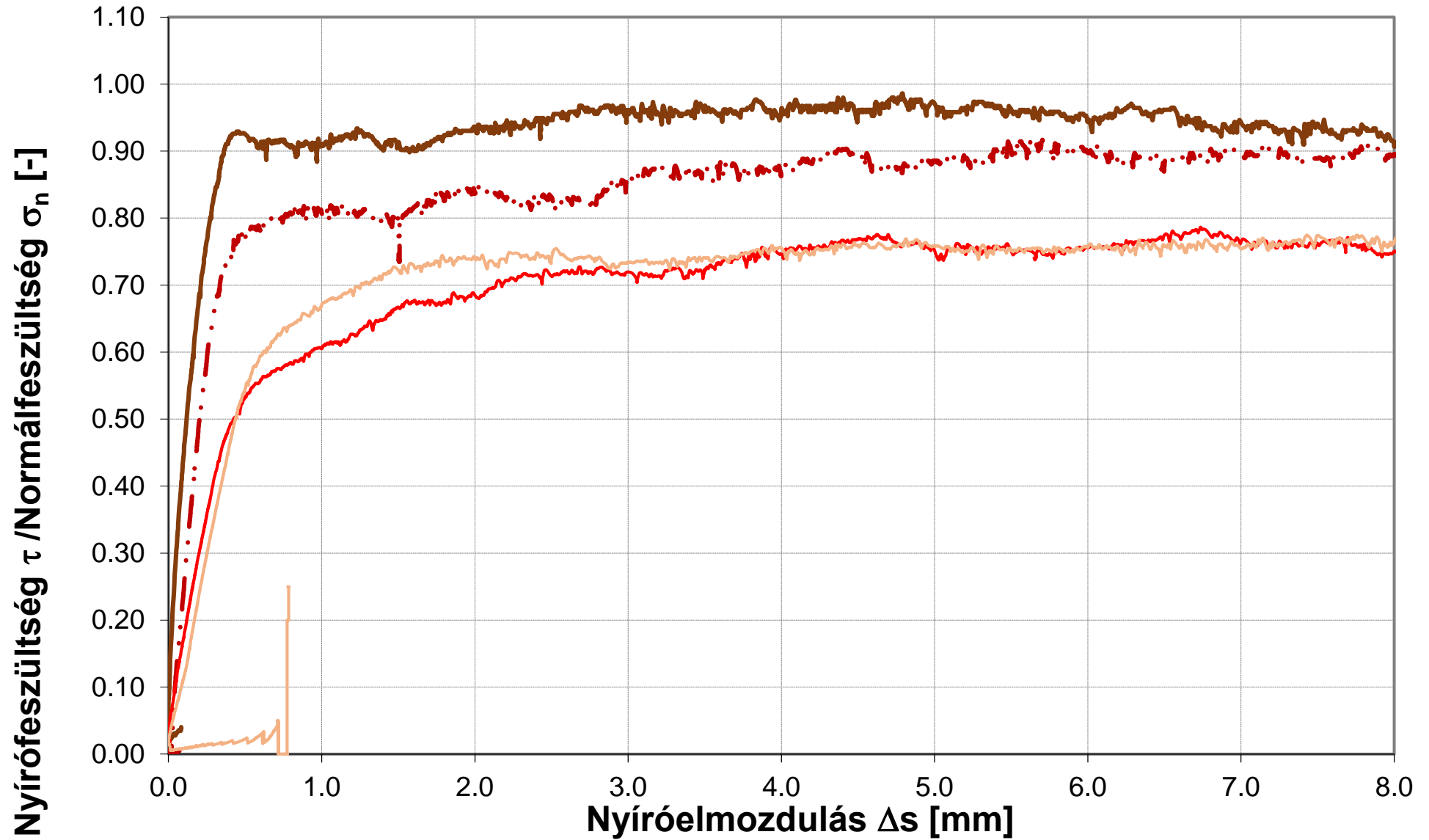
M4/3 jelű melléklet



M4/4 jelű melléklet



M4/5 jelű melléklet



— 0,5 MPa 5. nyírás

—• 1,0 MPa 5.nyírás

— 1,5 MPa 5. nyírás

— 2,0 MPa 5. nyírás