



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI
EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

GÉP- ÉS TERMÉKTERVEZÉS TANSZÉK
SZABÓ BENCE, PÁSTHY LÁSZLÓ

TDK DOLGOZAT

Alakhatás vizsgálatához létrehozott zúzottköveket modellező mesterséges szemcsék anyagjellemzőinek laboratóriumi vizsgálata

Konzulensek:

Dr. Tamás Kornél
egyetemi adjunktus
Gép- és Terméktervezés
Tanszék

Orosz Ákos
doktorandusz
Gép- és Terméktervezés
Tanszék

Dr. Rádics János Péter
egyetemi adjunktus
Gép- és Terméktervezés
Tanszék

Budapest, 2020.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnénk köszönetünket kifejezni mindazoknak, akik hozzájárultak munkánk sikeres megvalósításához:

A BME Gép- és Terméktervezés Tanszékről köszönjük konzulenseinknek: Dr. Tamás Kornél Tanár úrnak, Orosz Ákos Tanár úrnak és Dr. Rádics János Péter Tanár úrnak, hogy inspiráltak és segítettek minket munkáink során. Köszönjük Dr. Farkas Zsolt Tanár úrnak, hogy eszközöket biztosított méréseinkhez, és Széles Leventének, hogy elkészítette nekünk Polyet és FDM technológiákkal készült próbatesteket.

Külön köszönetet mondunk a BME Polimertechnika Tanszék munkatársainak, kiemelve Dr. Bakonyi Péter Tanár urat, Hliva Viktor Tanár urat és Pántya Szabolcs urat, akik lehetővé tették, hogy méréseinket a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában végezhessük.

Köszönet illeti az Industrial Service Center Kft. munkatársait és Dr. Máthé László urat, aki felajánlotta a Multi Jet Fusion technológiával készült próbatestek gyártását és további segítségét.

Köszönjük a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék tanszékvezető-helyettesének Dr. Nehme Salem Georges Professzor úrnak, hogy rendelkezésünkre bocsájtotta laborjukat és kővágó berendezésüket az andezit és bazalt próbatestek legyártásához. Továbbá köszönjük Pálinkás Bálintnak a Mérnökgeológia és Geotechnika Tanszék technikusának a próbatestek legyártásában közreműködését.

Hálásak vagyunk Dr. Bagi Katalin Professzor asszonynak és Dr. Gálos Miklós Professzor úrnak, hogy útmutatást és motivációt biztosítottak számunkra kutatási témánkhoz.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	1
1 Bevezetés	3
1.1 Célkitűzés	4
1.2 Áttekintés	5
2 Irodalomkutatás	7
2.1 A vasúti zúzottkőágyazatok felépítése és igénybevétele.....	7
2.2 Vasúti zúzottkövek anyagainak - tulajdonságai	8
2.3 Vasúti zúzottkövek, és zúzottkőhalmazok szilárdságára irányuló vizsgálatok eredményei	8
2.4 A beton	12
2.4.1 A betonok különböző szempontok szerinti osztályozása:	12
2.4.2 A beton szilárdsági és kopási jellemzői	13
2.4.3 A friss beton jellemzői, és keveréséhez fontos tudnivalók	13
2.4.4 A beton szilárdsági jellemzői.....	14
2.4.5 Ultra nagy szilárdságú beton.....	14
2.4.6 A beton nyomószilárdságának szabványos meghatározása.....	14
2.4.7 Szabványos hajlító vizsgálat betonra	17
2.5 A habarcs	18
2.5.1 A habarcsok csoportosítása.....	18
2.5.2 A habarcsok szilárdsági vizsgálatának módszerei	19
2.6 Polimerek	19
2.6.1 Hőre lágyuló polimerek	19
2.6.2 Hőre keményedő polimerek	19
2.6.3 Epoxigyanta	20
2.6.4 Poliuretángyanta	20
2.6.5 Telítetlen poliésztergyanta	21

2.6.6	A polimerek szabványos nyomóvizsgálata.....	22
2.6.7	A polimerek szabványos hajlítóvizsgálata.....	24
2.7	A Polimer-beton kompozitok.....	26
2.7.1	Polimerrel impregnált beton	26
2.7.2	Polimerbeton	27
2.7.3	Polimer cementbeton	27
3	Mérési és kiértékelési folyamatok	28
3.1	Anyagok melyeken kísérleteket végeztünk.....	28
3.2	A mérési koncepció megfogalmazása	30
3.3	A mérőberendezés és a mérési folyamat pontos bemutatása	31
3.3.1	Univerzális szakítógép bemutatása	31
3.3.2	Digitális elmozdulásmérő (DIC) bemutatása.....	31
3.4	Eredmények értékelési folyamatai	32
4	Mérési eredmények.....	35
4.1	Vasúti zúzottkövek anyagainak vizsgálati eredményei (A1, A2, BA).....	35
4.2	Építőiparban használatos, és hasonló anyagok vizsgálati eredményei	37
4.3	3D nyomtatott polimerek vizsgálati eredményei (PLA, TPLA, ABS, PJ, MJ).....	41
4.4	Öntött polimerek vizsgálati eredményei (E, P, PUR, PZ).....	44
4.5	Kis szilárdságú anyagok vizsgálati eredményei (F, ST)	47
4.6	Az eredmények összefoglalása.....	49
5	Konklúzió	53
6	Összefoglalás	56
7	Tervek a jövőre.....	57
8	Hivatkozások	58

1 Bevezetés

A vasúti közlekedés két évszázados fejlődése továbbra is töretlen. Mind a vasúti szerelvények, mind a közlekedési pálya tekintetében folynak a folyamatos fejlesztések hazánkban és a világ más országaiban. A vasúti pálya fejlesztése kulcsfontosságú szerepet tölt be a vasúti közlekedés előrelépésében. Ezen fejlesztések egyik iránya a hagyományos zúzottkőágyazat tulajdonságainak javítása. Az ágyazat egyik fontos feladata a pálya állékonyságának, azaz az ágyazat hossz- és keresztirányú ellenállásának biztosítása, melyre nagy hatással van az egyedi szemcsék alakja.

Az alakhatás jelenleg egy erősen kutatott terület (például: [1] [2]). Általános cél összefüggéseket keresni a halmazt alkotó szemcsék alakja, és a teljes halmaz fizikai tulajdonságai között. A pontos összefüggés nem ismert, ezért a kutatók kísérletek és numerikus szimulációk alapján vonják le következtetéseiket. A kísérletezések esetében az okoz problémát, hogy a halmaz geometriája kísérletenként változik és nem teljesen ismert, a szimulációk során pedig az, hogy azokat mérések eredményei alapján kell validálni és kalibrálni.

Friss alakhatásra irányuló kutatási eredményeket áttekintve [3] [4] azt állapíthatjuk meg, hogy a numerikus szimulációhoz készült geometriai modellek nem modellezik a fizikai halmaz geometriáját pontosan. Csupán hasonló szemcseelrendezés került kialakításra a fizikai halmazban a szimulációs modellhez képest.

Egy lehetséges megoldás lehet az előbbieken leírt problémákra, ha általunk meghatározott geometriájú szemcséket állítunk elő, és azokból reprodukálható és modellezhető halmazokat építünk. Így egy numerikus módszerrel, például diszkrét elemes módszerrel (DEM) [5] vizsgált modell egyforma halmazokon végzett kísérletek segítségével validálható. A DEM lehetővé teszi szemcsék halmazon belüli viselkedésének modellezését.

A reprodukálható halmazok létrehozásának fontossága ezek alapján belátható, azonban a halmazépítés előtt szükségesnek találtuk megvizsgálni azon anyagokat és technológiákat melyek reprodukálható általunk meghatározott geometriájú szemcsékből felépülő vasúti zúzottkőágyazatok fizikai modellezésére alkalmasak.

1.1 Célkitűzés

A szakirodalom áttekintése alapján a következő célokat határoztuk meg, hogy a szemcsehalmazok kísérleti modellezését biztosabb alapokra helyezzük:

1. Olyan anyagok felkutatása és mechanikai vizsgálatai melyekből általunk meghatározott geometriájú, reprodukálható szemcse készíthető.
2. Mérési eredményeink alapján az egyes anyagok összehasonlítása a vasúti zúzottkövek mechanikai jellemzőivel.
3. Javaslattétel; milyen anyagokat és módszereket alkalmazzunk vasúti zúzottkőszemcsék és egyéb szemcsés anyagok modellezésére a kísérleti alakhatás-vizsgálatokban.

1.2 Áttekintés

Kétféle elmélet szerint közelíthető meg a reprodukálható halmazmodellezés módszere. A kettő közötti különbséget a fizikai kísérleti modell és a virtuális modell közöti kapcsolat határozza meg.

1. Ha a valóságos modell geometriája megegyezik a virtuális modell geometriájával, azaz pontosan meghatározható a szemcsehalmaz minden szemcséjének alakja, mérete, helyzete és orientációja mind a virtuális, mind a fizikai modellben, a valóság pontosabban modellezhető. Azonban ez esetben a halmaz fizikai létrehozásának módszerei és a szemcsegyártáshoz használható anyagok száma jelentősen korlátozott. Továbbá a halmazépítéshez szükséges idő is több és annak körülményessége is fokozódik.
2. Feloldható a fizikai modell és a virtuális modell közti geometriai kötöttség a halmaz egyszerűbb fizikai megvalósíthatóságának érdekében. Ez esetben mindkét modellbe azonos számú és alakú szemcséket helyezünk, de eltekintünk a szemcsék halmazban elfoglalt pontos helyük és helyzetük ismeretétől. Ennek hátránya, hogy a valóságos halmazgeometriát nem tudjuk képezni virtuális környezetben, csak közelíteni tudjuk azt. Nagy előnyt jelent azonban ennél a módszernél az, hogy a fizikai halmazépítés korlátai kiszélesednek. Ennek eredményeként sokkal tágabb körben választhatunk szemcseanyagot. Ezt a módszert alkalmazták a bemutatott kutatások során is.

Számos korszerű technológiát és eljárást használhatunk az előző két pontban megfogalmazott felépítésű reprodukálható fizikai kőhalmazmodellek létrehozásához. A különböző halmazépítési módszerek azonban meghatározzák, milyen technológiával készülhetnek a halmazt alkotó szemcsék. A halmazépítési technológia behatárolja a szemcsék előállításához használható anyagok sorát is.

Mivel a reprodukálható halmazt alkotó szemcsék anyagai széles skálán mozognak (különböző típusú betonok, habarcsok, polimerek, polimerbetonok), ezért anyagvizsgálat nélkül csupán a katalógusokban található értékek alapján az anyagtulajdonságokat nem tudtuk összehasonlítani. Azt a megállapítást tettük, hogy a különböző anyagokon vizsgálatokat kell végeznünk. A vizsgálatok kiterjednek létrehozási eljárásra, roncsolásos módszerrel történő anyagtulajdonságok meghatározására és tönkremeneteli módok megfigyelésére.

Mindezek előtt azonban részletes szakirodalomkutatást végeztünk, melyet dolgozatunk 2. fejezetében összegzünk. A 2.1, 2.2, 2.3. fejezet áttekintést nyújt a vasúti zúzottkőágyazatok felépítéséről és igénybevételeéről, azok szilárdsági vizsgálatáról, illetve a vasúti

zúzottkőágyazatokat alkotó szemcsék anyagainak tulajdonságairól és azok vizsgálati módszereiről.

A következő fejezetekben (2.4-2.7) utánajártunk milyen anyagok léteznek, és melyek azok, amikből reprodukálható szemcséket lennének képesek létrehozni. Bemutatjuk a betonok, habarcsok, polimerek, polimerbetonok jellemző mechanikai tulajdonságait, és összefoglaljuk azon szabványok tartalmát, melyek ezen anyagok szilárdsági jellemzőinek meghatározására irányulnak. Szem előtt tartva a vasúti zúzottkövek anyagainak vizsgálati módszereit nyomó és hajlítóvizsgálatokról gyűjtöttünk információkat.

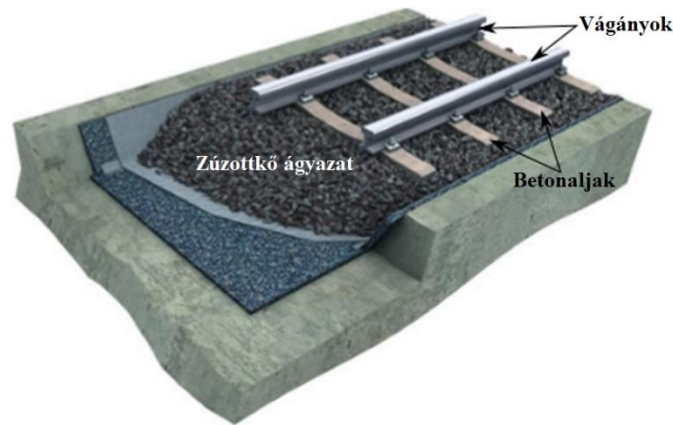
Az irodalomáttekintés után a 3. fejezetben ismertetjük azokat az anyagokat, melyeket kiválasztottunk. A 20 vizsgált anyag közt szerepelnek a vasúti zúzottkövek anyagai, additív technológiákkal gyártott és öntött polimerek, beton és habarcs. Ezeken öntési vagy 3D nyomtatási, további anyagjellemzők feltárására pedig nyomó és hajlító vizsgálatokat végeztünk. Ismertetjük, milyen mérési koncepciót állítottunk fel. Bemutatjuk a mérőberendezéseket, melyeken méréseinket végeztük és áttekintjük, milyen módszerekkel értékeltük ki az eredményeket, és milyen problémákkal szembesültünk méréseink során.

Anyagcsoportok szerint rendezve a 4. fejezetben részletesebben bemutatjuk a vizsgált anyagokat, és a meghatározott mérési eredményeket: a nyomási és hajlítási rugalmassági modulust, és a feszültség-alakváltozás görbékről leolvasható nevezetes pontokat. Digitális optikai nyúlásmérő által készített felvételek alapján pedig elemezzük az egyes anyagok nyúlásait és tönkremenetelét. Végül összegezzük a kapott eredményeinket.

Az 5. fejezetben a kapott eredmények alapján javaslatot teszünk arra, mely anyagok alkalmazhatók reprodukálható vasúti zúzottkőágyazatok fizikai modellezésére. Összevetjük a vasúti zúzottkövek anyagain végzett nyomó és hajlító vizsgálat során kapott feszültség-alakváltozás görbéket további vizsgált anyagok ugyanezen görbéivel.

2 Irodalomkutatás

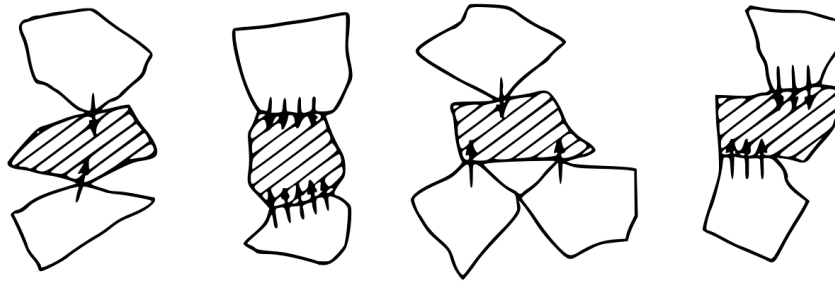
2.1 A vasúti zúzottkőágyzatok felépítése és igénybevétele



2.1. ábra: Szemcsés szerkezetű vasúti zúzottkőágyzat felépítése [2]

Kazinczy [6] szerint a vasúti zúzottkőágyzatok feladatai a vágányok és a betonaljak alátámasztása, a teherhordás, rugalmas ágyazás megvalósítása, állékonyság biztosítása és a vízvezetés. Ezen feladatok szempontjából az ágyazatot alkotó zúzottkövekkel szemben támasztott követelmények is felsorolhatók. (A 2.1. ábra szemlélteti a szemcsés szerkezetű vasúti zúzottkőágyzat felépítését.) Fontos a megfelelő szilárdság, szemeloszlás, fagyállóság, zúzottkőalak, tömörség, rugalmasság, szennyeződésmentesség és az ellenállás biztosítása terhelésekkel szemben. A megfelelő szilárdság a zúzottkőanyagok helyes megválasztásával biztosítható. Magyarországon leggyakrabban alkalmazott zúzottkő anyagok az andezit és a bazalt [7].

A halmazban fellépő szemcse szintű igénybevételekre fókuszálva a szemcsék egymással kis felületeken érintkeznek. Az érintkezések helyein fellépő erőhatások következtében és a szemcsék szabálytalan alakjaiból adódóan egy szemcse igénybevétele lehet húzás (szemcsehasítás), nyomásból adódó nyírás, hajlítás vagy tiszta nyírás [8]. Ezt szemlélteti a 2.2. ábra. Ezen igénybevételek alapján lehet elindulni milyen módszerekkel érdemes megközelíteni a vasúti zúzottkőágyzatok szilárdsági tulajdonságaira és alakhatásvizsgálatára irányuló vizsgálatokat.



2.2. ábra: A szemcsék igénybevétele a közöttük kialakuló erőhatás következtében [8]

2.2 Vasúti zúzottkövek anyagainak - tulajdonságai

Érdemes tisztában lenni a vasúti ágyzatok anyagainak jellemzőivel és azok mechanikai vizsgálati módszereivel. Az egyik legfontosabb jellemzője a kőzeteknek azok egytengelyű nyomószilárdsága. Az egyes kőzetek minősítése a nyomószilárdság alapján történik. Egy kőzet szilárdsági tulajdonságai azért definiálható nehezen, mivel a kőzetek nem tekinthetők homogénnek, és izotrópnak. A kőzet anyagán belül jelentős a hibahelyek száma. A próbatest szilárdságát jelentősen befolyásolják a zárványok, repedések, gyengébb zónák, anyagfolytonossági változások. [9]

2.3 Vasúti zúzottkövek, és zúzottkőhalmazok szilárdságára irányuló vizsgálatok eredményei

Az egyirányú nyomószilárdsághoz használt próbatestek alakja henger. Ennek oka az, hogy ezt a geometriát a legegyszerűbb kimunkálni a kőzettömbből. A próbatestek magasság-átmérő arányát lehetőség szerint 2:1-re kell választani. Ezen arány megváltoztatásával erőteljesen befolyásolhatók a mért szilárdsági értékek. Ez arra vezethető vissza, hogy a nyomott felületeken a súrlódás gátolja a keresztirányú alakváltozást, így ezen felületek környékén a próbatestben zavart feszültségviszonyok alakulnak ki. Más alaktényezőjű próbatestek esetén ezen zónák közelednek, illetve távolodnak egymástól, aminek eredményeként a feszültségértékekre más értékeket kapunk. Lehetőség van azonban más arányú próbatesteken mért egyirányú nyomószilárdsági érték átszámítására. [9]

A továbbiakban néhány módszert kutattunk fel, hogyan vizsgálták más kutatók kőzetek, és kőhalmazok szilárdságát. Három mérés módszereit és eredményeit ismertetjük röviden.

Dincer és szerzőtársai (2004) egytengelyű nyomóvizsgálatot végeztek: Bodrum Peninsulából való négy különböző bazalt és 14 különböző andezit próbatesten, majd anyagonként meghatározták a maximális, minimális és átlagos sűrűséget (ρ), az egytengelyű nyomószilárdságot, valamint rugalmassági modulust (E) [10]. A vizsgálatokat az International

Society for Rock Mechanics (1981a) és (1981b) ajánlásai alapján végezték 54,7 mm-es átmérőjű, hengeres próbatesteken. Az eredményeket a 2.1. táblázat mutatja.

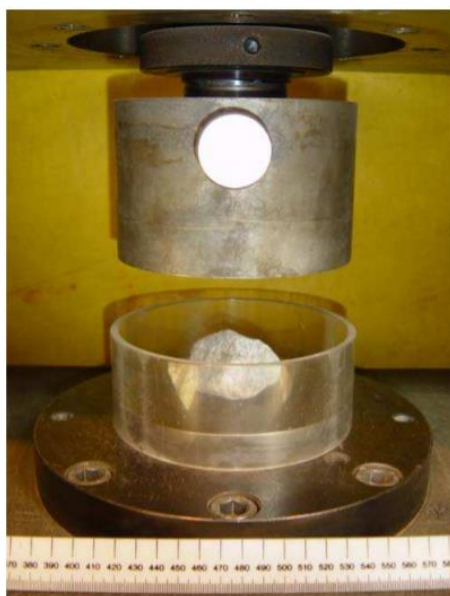
2.1. táblázat: Bodrum Peninsula-ból való bazalt és andezit nyomószilárdsága [10]

		Maximum	Minimum	Átlag	Szórás
Bazalt	ρ [kg/m ³]	2701	2584	3643	51,99
	Egytengelyű nyomószilárdság [MPa]	108	65	86,48	20,94
	E [GPa]	21,18	11,57	16	4,45
Andezit	ρ [kg/m ³]	2562	1863	2297	245,7
	Egytengelyű nyomószilárdság [MPa]	112,7	38,48	82,52	23,3
	E [GPa]	25,13	18,28	22,53	2,41

A táblázatból látható, hogy a mérések alapján a bazalt átlagos szilárdsága a nagyobb, viszont a legnagyobb nyomószilárdságot az andezitnél mérték. A bazalté szűkebb, míg az andezité tágabb határok között változik az egyes próbatestek esetében.

Lim (2004) doktori értekezésében különböző méretű és anyagú (2.2. táblázat) zúzottköveken végzett egytengelyű nyomóvizsgálatot (

2.3. ábra) [11]. A tanulmány során a nyomás sebessége 1 mm/min volt. Akkor tekintett egy követ összetörtnek, ha a letört darabok meghaladták az eredeti kő térfogatának 1/3-át. A nyomószilárdságot a törőerő és a kövek redukált átmérőjének segítségével határozta meg. A kapott eredményeket a 2.3. táblázat tartalmazza.



2.3. ábra: Vasúti zúzottkő egytengelyű nyomóvizsgálata [11]

2.2. táblázat: Egytengelyű nyomóvizsgálathoz használt próbatestek anyaga [11]

Próbatest jele	Próbatest anyaga
A	granodiorit
B	gránit
C	granodiorit
D	granodiorit
E	porfíros felzit
F	granodiorit

2.3. táblázat: Vasúti zúzottkövek törési szilárdsága [11]

Zúzottkő redukált átmérője [mm]	Próbatest anyaga	Törési szilárdság [MPa]	Tömeg [kg]
10-14	A	38,8	2,96
	B	24	3,2
	C	54,8	3,26
	D	26	2,64
	E	48,9	3,36
	F	48,3	3,07
20-28	A	27,9	4,22
	B	17,5	3,84
	C	44,4	2,81
	D	14,7	1,89
	E	32,9	2,73
	F	37,9	2,61
37,5-50	A	21,7	3,07
	B	13	3,2
	C	32,8	3,21
	D	12,3	1,66
	E	21,1	3,65
	F	29	2,71

Látható, hogy mindegyik méretkategóriájú zúzottkőből 5 db-ot vizsgáltak. A kisebb, 10-14 mm-es köveknek nagyobb lett a nyomószilárdsága, mint a 20-28 mm-es illetve 37,5-50 mm-es redukált átmérőjű köveknek.

Indraratna és szerzőtársai (1998) bazalt zúzottkő halmaz törési szilárdságát vizsgálták triaxiális nyomógéppel (lásd 2.4. ábra) [12]. Az eredményeket a 3.3 táblázatban látható módon összevetették korábbi tanulmányokkal, amelyeknél más volt a kövek átlagos redukált (d_{red}) és maximális átmérője (d_{max}).



2.4. ábra: Triaxiális nyomóvizsgálat [2]

2.4. táblázat: Bazalt zúzottkö halmazok nyomószilárdsága [12]

Tanulmány	Törési szilárdság [MPa]	d_{\max} [mm]	d_{red} [mm]
Indraratna A (1998)	130	53	38,9
Indraratna B (1998)	130	53	30,3
Marachi et al. (1972)	175	50	13
Marsal (1967, 1973)	175	80	7
Charles és Watts (1980)	360	38	13

2.4 A beton

„A beton kötőanyag, víz és nagy szemű adalékanyag és esetleg adalékszer vagy segédanyag keverékéből előállított építőanyag, amely a készítéskor lágy, alakítható, a kötőanyag és a víz közt meginduló hidratációs folyamatok során előbb megköt, majd fokozatosan szilárdul, mesterséges kővé keményedik.” [13]

Az alkotórészei kötőanyag, víz, adalékanyag, adalékszer, segédanyag és a hézagokat kitöltő levegő [13].

A beton minőségét aktív és passzív minőségi feltételek határozzák meg. Előbbibe sorolandó a betont alkotó alapanyagok megfelelő mennyiségére és minőségére, alkalmazott vízmennyiségre és légtartalomra, alkalmazott adalék mennyiségére és minőségére. Aktív feltételek között említendő a beton keverése, készítése és kezelése. Befolyásolja a beton tulajdonságait még a beton kora. Ezek alapján vonható le az a következtetés, hogy a beton minőségét erősen befolyásolja annak készítésének gondossága, továbbá a raktározási és kezelési körülmények. [13]

2.4.1 A betonok különböző szempontok szerinti osztályozása:

A betonok különböző megközelítések szerint csoportosíthatók. Ezen osztályozásokat írják le a következő pontok. [13]

- a) A kötőanyagok mennyisége és minősége szerint lehet:
Cement-, transzcement-, pernyecement-, kohósalakcement-, mészbeton; sovány-, kövérbeton.
- b) A friss beton konzisztenciája szerint lehet:
Alig földnedves beton, földnedves beton (jele: FN), kissé képlékeny beton (jele: KK), képlékeny beton (jele: K), folyós beton (jele: F), illetve önthető beton. A konzisztencia a beton esetében a friss beton keverhetőségét, tömöríthetőségét, bedolgozhatóságát, szállíthatóságát, állékonyságát határozza meg.
- c) Az adalékanyag fajtája szerint lehet:
Kavics-, zúzottkő-, salakbeton; nehéz-, súlyos-, könnyű-, adalékos beton
- d) Az előállítás, bedolgozás, szállítás módja szerint lehet:
Gyári-, döngölt-, öntött-, vibráltbeton.
- e) Környezeti osztályozás szerint lehet:
fagyálló, olvasztó só álló (jele: XF), vízzáró (jele: XV, VZ), ezen belül a gyengén vízzáró (2 bar víznyomást nem enged át) a VZ2 jelű, mérsékleten vízzáró, jele VZ4, vízzáró, jele VZ6, illetve különlegesen vízzáró a VZ8 jelű. Ezen kívül a beton lehet

még kopásálló, amit XK jelöléssel tüntetnek fel. Az ezen betűjelek után következő szám gyakorlatilag a környezeti osztályozásnak mértékét jelöli.

f) A megszilárdult légszáras beton testsűrűsége szerint lehet:

Lehet könnyűbeton, jelölése Magyarországon LC, sűrűsége: 800–2000 kg/m³; A normálbeton, jelölése C, sűrűsége 2001–2600 kg/m³; illetve a nehézbeton, jelölése HC, sűrűsége 2600 kg/m³ felett.

g) Felhasználás módja szerint lehet:

Alapbeton, tömbbeton, tömegbeton, útbeton, vízepítési beton szerkezeti beton feszített beton, látszó beton

h) A nyomószilárdság szerint

2.4.2 A beton szilárdsági és kopási jellemzői

A beton szilárdságát az abban lévő leggyengébb alapanyag szabja meg. Általában az adalékanyag nyomó és húzószilárdsága meghaladja a cementgél szilárdságát. A kőzet megkívánt saját szilárdsága a beton minősítő szilárdságának minimum háromszorosa, és legalább 50 MPa. Az adalékanyag kopási ellenállása annak saját szerkezetével keménységével és szilárdságával összefüggő tulajdonság. Kopásálló betonhoz célszerűtiszt, legalább 450 portlandcementet használni, melynek legalább 50%-os C3S tartalma van. Adalékanyagul olyan kőzetfajtákat kell használni, melyek jó kopási tulajdonságokkal rendelkeznek. Kísérletek igazolják, hogy a beton kopásállóságát jelentősen csökkenti a koptatóhatással egyhelyen és egyidejűleg jelen lévő víz. [13]

2.4.3 A friss beton jellemzői, és keveréséhez fontos tudnivalók

A friss betonnak olyan tulajdonságokkal kell rendelkeznie, amely révén a reprodukált zúzottkövekre vonatkozó követelmények biztosíthatók. A megkívánt követelmények eléréséhez a betont megfelelő alapanyagokból, megfelelő összetétellel és megfelelő keverési aránnyal, konzisztenciával és állékonysággal kell előállítani. Ezek a követelmények konkrétan megnevezve: A friss beton töltse ki a zúzottkő formájú formaüreget maradéktalanul, és vegye fel lehetőleg a forma felületi érdességét minimális szükséges vibráció mellett. A konzisztencia mértéke legyen lehetőleg folyós a könnyű bedolgozhatóság érdekében, és a képlékeny betonban végül kevés levegőbuborék maradjon. A betonhoz adagolt víz teszi lehetővé a betonban lévő cement kötését. A cement kötéséhez szükséges vízmennyiség legfeljebb a cement tömegének 18%-ra tehető. Ennél több víz használata esetén javul a beton bedolgozhatóságának feltétele, de hosszabbodik a kötési idő és csökkenti a cementpép tömörségét, ami a beton szilárdságcsökkenését eredményezi. Ha az adalék és a

cementmennyiség ugyan az marad, a vízcement-tényező pedig csökkentésre kerül, akkor ez erős szilárdság- és kopásállóságnövekedést eredményez, azonban a beton konzisztenciája csökken, ami nehezebb bedolgozhatósághoz vezet. A beton elérhető szilárdságának maximumát földnedves betonfolyósság esetén érheti el megfelelő bedolgozás mellett. A beton kötési ideje függ a cementfajtától, cement mennyiségétől és a vízcement-tényezőtől. [13]

2.4.4 A beton szilárdsági jellemzői.

A nyomópróbák eredményeit jelentősen befolyásolják a próbatest alakja és jellemző méretei. A beton rideg anyag, ezért hívják mesterséges kőnek is. A törőterhelés határállapotáig elasztoviszkózus viselkedésű, törésállapotát plasztikusnak tekinthető jelenségek kísérik. A nyomólap és a nyomópróbatétest között fellépő súrlódás jelentősen befolyásolja a nyomószilárdság értékeit és a törésképet. Kísérletek igazolják, hogy súrlódás lehetőségek szerinti kiküszöbölésével a csúszótörés jelensége helyett szakadótörés jelei mutatkoznak a próbatest tönkremenetele során. [13]

2.4.5 Ultra nagy szilárdságú beton

A hagyományos beton mellett létezik egy eljárás, amellyel lehetőség van nagyobb szilárdságú beton gyártására. Az ultra nagy szilárdságú beton átlagos nyomószilárdsága legalább 150 MPa, és elérheti a 250 MPa, esetleg 350 MPa értéket. Az összetevők arányait a 2.5. táblázat tartalmazza:

2.5. táblázat: Ultra nagy szilárdságú beton összetevői [14]

Összetevők	Finomszemű	Durvaszemű
	ultra nagy szilárdságú beton összetétele, kg/m ³	
CEM I 52,5 szulfátálló portlandcement	800	580
Víz	170	150
Kvarchomok, legnagyobb szemmagyság 0,5 mm	1020	355
2/8 mm szemmagyságú bazalt zúzottkő	-	710
0,09 mm alatti kvarcliszt	220	130
Szilikapor	135	175
Acélszál	-	195
Folyósító adalékszer	25	30

2.4.6 A beton nyomószilárdságának szabványos meghatározása

A nyomószilárdság meghatározásának módjában a magyar szabvány (MSZ EN 1992-1-1:2010) eltér az európai szabványtól (EN 206-1:2000). A magyar szabvány alapján a nyomószilárdságot 300 mm magas és 150 mm átmérőjű, az öntés után 1 nappal víz alá helyezett és ott tárolt próbahengerrel végzik el. Ezt nevezik hengerszilárdságnak. Ezzel szemben az

európai szabvány a kockaszilárdságot is méri. A kockaszilárdságot 150 mm élhosszúságú próbakockán határozzák meg. [15]

A beton nyomószilárdságáról, és annak méréséről a Betonopus Betontechnológiai és Közvetalkalmazástani Mérnökiroda Bt. honlapjáról [16] tájékozódunk.

A beton nyomószilárdsága sok tényezőtől függ, többek között:

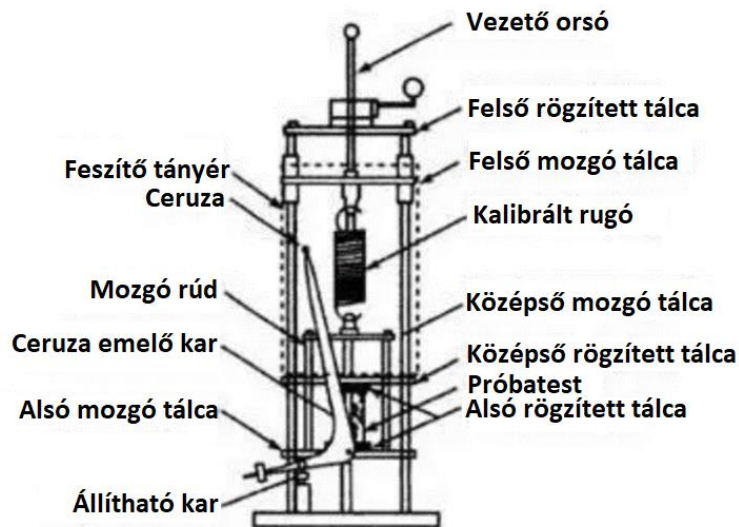
- próbatest mérete
- próbatest alakja
- próbatest víztartalma
- beton legnagyobb szemcsenagysága
- próbatest utókezelésének módja
- nyomószilárdság vizsgálóberendezés rendszere és pontossága
- próbatest elhelyezkedése a szilárdság vizsgáló gépben
- terhelő erő növekedésének sebessége
- próbatest nyomott felülete és a vizsgálóberendezés csiszolt nyomólapjai, amelyek egyike a gömbcsukló része, illetve azoknak megfelelő minőségű, a nyomólapok kímélése érdekében alkalmazott alátétlemezek közötti tapadási súrlódás
- gömbcsukló kialakítása
- beton kora

A szabványos nyomóvizsgálat lépései:

- kocka próbatest: 150 mm élhosszúságú
- hengeres próbatest: 150 mm-es átmérő, 300 mm-es magasság
- a nedves cementet négy rétegben kell az öntőformába tenni
- az egyes negyed rétegeket kocka próbatest esetén 35-ször, a hengeres próbatest esetén 25-ször szabványos tömőrúddal kell döngölni
- Az öntőforma megtöltése után a felső réteget le kell simítani egy simítókanállal
- egy nap után az öntőformát el kell távolítani
- a próbatesteket egy vízzel teli kádba kell helyezni, ahol 27 ± 2 °C-os a víz hőmérséklet
- 7 nap után a próbatesteket ki kell venni a kádból és ki kell szárítani (5-6 óra)
- a próbatesteket be kell helyezni a nyomógépbe (a hengeresnél a forgástengely legyen függőleges helyzetben)
- A mozgó nyomólapot úgy kell beállítani, hogy éppen érintse a próbatest tetejét

- A terhelést percenként 140 kg/cm²-rel (13,73 MPa-al) kell emelni, amíg a próbatest el nem törik
- Az a terhelés, ahol a próbatest eltört feljegyzésre kerül
- A tesztet 3 próbatesten végzik el és az eredmények átlaga adja a beton nyomószilárdságát

A nyomóvizsgálat során az elmozdulás függvényében vizsgálják az erőnövekményt, amiből kirajzolódik az erő-elmozdulás diagram. A nyomószilárdság egyértelműen számítható a maximális erő és a keresztmetszet hányadosából.



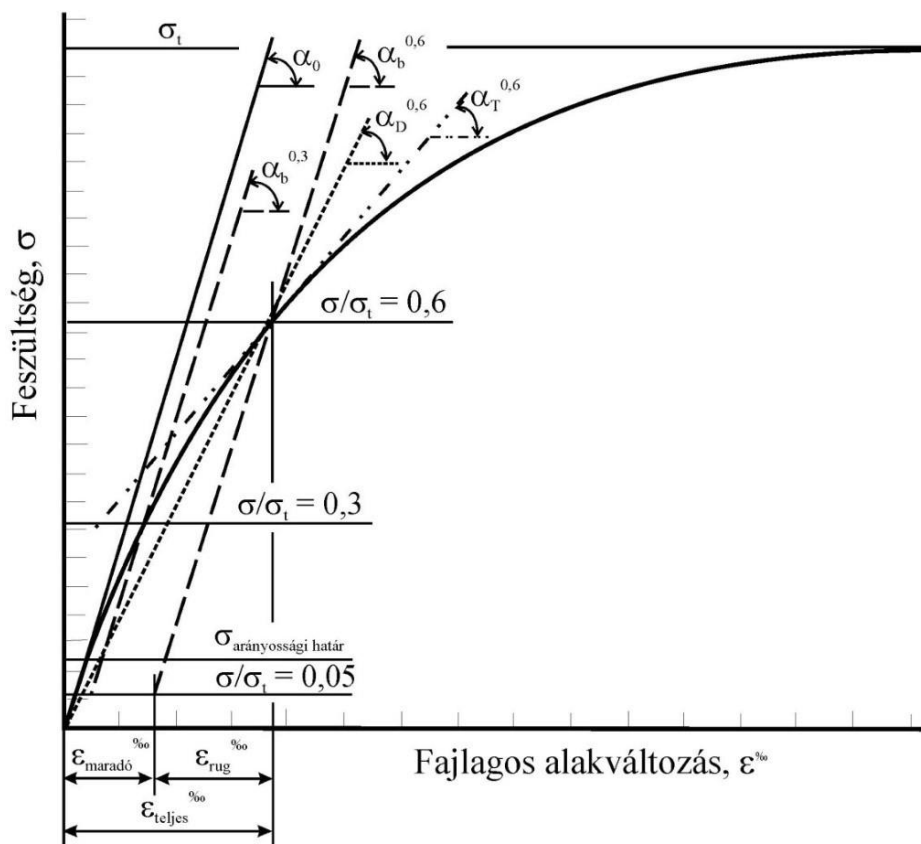
2.5. ábra: Szabványos nyomóvizsgálat elvégzésére alkalmas mérőberendezés [16]

A szakítódiagramból meghatározható továbbá a statikai rugalmassági modulus is, melynek értéke az ε – σ koordináta-rendszerben ábrázolt (fajlagos) alakváltozás–feszültség görbe nevezetes pontjaiban értelmezett iránytangensek változásával változik. Így megkülönböztetjük az arányossági határon belül a kezdeti (jele: E_0), az arányossági határ felett a tehermentesítési rugalmassági modulust (jele: E_b), a stabilitás vizsgálatoknál szerephez jutó érintő-modulust (jele: E_T) és az alakváltozási modulusnak is nevezett húr-modulust (jele: E_D). [16]

Az alakváltozási modulus (húr-modulust) akkor kapjuk, ha a húzó- nyomófeszültséghez az arányossági határon túl nem a rugalmas fajlagos alakváltozást (ε_{rug}), hanem a teljes fajlagos alakváltozást (ε_{teljes}) rendeljük: $E_{\text{alakváltozási}} = E_D = \frac{\sigma}{\varepsilon_{teljes}}$

A kezdeti rugalmassági modulus (E_0) az ε – σ görbe (a gyakorlatban általában σ – ε görbének nevezik, ezért ezt az elnevezést követjük) arányossági határon belüli lineáris szakasza

hajlásszögének (α_0) iránytangense ($E_0 = \operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{rug}}}$.) E megfogalmazás során elvonatkoztatunk attól, hogy a σ - ε görbe a lineáris szakasz alatt az abszcisszatengelyhez közel aszimptotikusan illeszkedik.



2.6. ábra: Statikai rugalmassági modulus meghatározása a nyomódiagramból [16]

A kezdeti rugalmassági modulus a beton nyomószilárdságának növekedésével kissé növekszik, miközben a nagyobb nyomószilárdságú beton fajlagos alakváltozása valamelyest kisebb. A nyomószilárdság elérése után a nagyobb szilárdságú beton fajlagos alakváltozása rohamosabban csökken, mint a kisebb nyomószilárdságú betoné. A beton σ - ε görbéjének fel- és leszálló ága a nagyobb nyomószilárdságú beton esetén meredekebb, mint a kisebb nyomószilárdságú beton esetén. A nyomószilárdság közelében a nagyobb nyomószilárdságú beton σ - ε görbéje „csúcsosabb”, a kisebb nyomószilárdságú beton σ - ε görbéje „laposabb”.

2.4.7 Szabványos hajlító vizsgálat betonra

A rideg anyagtulajdonságok miatt normál betonokra nincsen szabványos hajlító vizsgálat, viszont szálerősített betonok hajlító vizsgálatára néhány ország kidolgozott szabványos eljárásokat. Ilyen szabványok az amerikai ASTM C 1018, belga NBN B 15-238, francia AFNOR P 18-409, japán JSCE-SF2, JSCE-SF4, német DBV-Merkblatt:1991 valamint spanyol UNE 83-504, UNE 83-509 és UNE 83-510.

2.5 A habarcs

A habarcs összetevői a finomszemcséjű adalékanyag (folyami, vagy bányahomok), a kötőanyag, habarcsjavító anyagok, és hozzáadott víz. Friss állapotban kenhető vagy önthető, később szilárd halmazállapotú lesz. A habarcs nem szerkezetkialakító, hanem szerkezetkiegészítő anyag. Ebből kifolyólag kisebb a szilárdságuk, mint a betonnak, azonban szerkezetük kevésbé anizotróp. [13]

2.5.1 A habarcsok csoportosítása

A habarcsokat kétféle csoportosítás szerint osztályozhatjuk, összetevők vagy rendeltetés szerint. [13]

Habarcsok csoportosítása kötőanyagok szerint:

A habarcsok legelterjedtebb kötőanyaga a mész, illetve a gipsz. A habarcs tulajdonságainak (főleg szilárdságának) javítása érdekében adagolnak a különböző habarcsfélékhez más összetevőket. Például portlandcementet, hidraulitokat, vízüveget, magnéziát, különböző javítóanyagokat, adalékszereket, segédanyagokat, felületképzőket.

- Mészhabarcs: kötőanyaga csupán építési mész
- Javított mészhabarcs: kötőanyaga mészen kívül hidraulit, vagy cement.
- Cementhabarcs: többnyire cement alkotja minimális hozzáadott mésszel, és a cement mennyiségének 25%-át nem meghaladó hidraulitot tartalmaz
- Gipszes habarcs: főleg építési mész és gipsz alkotja
- Gipszhabarcs: fő kötőanyaga a gipsz, de más kötőanyagokat is tartalmazhat.
- Magnéziahabarcs: Kötőanyaga klasszikus magnézia, és $MgCl_2$ keveréke
- Műanyaghabarcs: Fő kötőanyaga valamilyen műgyanta.
- Bitumenes habarcs: kötőanyaga a bitumen, amelyet olvadt állapotban, vagy emulzió formájában bekevernek.
- Agyaghabarcs: kötőanyaga az agyag
- Bentonithabarcs: kötőanyaga a bentonit
- Vízüveges habarcs: kötőanyaga a vízüveg, vagy vízüveg fluorid keveréke.

Habarcsok csoportosítása rendeltetés szerint:

- Falazóhabarcs
- Vakolóhabarcs
- Ágyazó és burkolóhabarcs
- Simítóhabarcs

- Felületképzőhabarcs
- Hőszigetelő habarcs
- Sugárgátló habarcs
- Víz záró habarcs
- Injektáló habarcs

2.5.2 A habarcsok szilárdsági vizsgálatának módszerei

A habarcsok hajlító-húzó és nyomószilárdsága az MSZ EN 1015-11:2000 és MSZ EN 1015-11:1999/A1:2007 szerint vizsgálhatók. Eszerint vizsgálatokhoz 3 db 4x4x16 cm-es próbatestet készítünk szabványos próbaformák felhasználásával. A megfelelő konzisztenciájú habarcsot két részletben kell a formákba rakni, és mindkét rétegét a szabványokban leírt kialakítású és tömegű döngölővel tíz ütéssel kell tömöríteni. A próbatesteket 28 napos korukig szobalevegőn (20 ± 3 °C) tároljuk. Azokat a próbatesteket, melyek cementhabarcsból készülnek azokat hét napos korukig nedves helyen (90% relatív páratartalmú és 20 ± 3 °C-os levegőn), majd szobalevegőn kell tárolni. A próbatesteket elsőnek hajlítóvizsgálatnak kell alávetni. A hajlításpróbát követően lehet a 6 fél próbatesten elvégezni a nyomóvizsgálatokat szabványos 40x62,5 mm-es nyomólapok között. [17]

2.6 Polimerek

2.6.1 Hőre lágyuló polimerek

A hőre lágyuló műanyagok – mint a neve is tükrözi – hőközlés hatására ömledékállapotba kerülnek, amennyiben azok üvegesedési és/vagy kristályosodási hőmérséklete szobahőmérséklet felett van. Ezen csoportba tartozó anyagok magas hőmérsékleten kerülnek feldolgozásra és külső erő hatására kerülnek formázásra. Lehűlés után megszilárdulnak és akkor veszik fel végleges formájukat. Az olvasztás és a megszilárdulás reverzibilis folyamatok. Egyes additív gyártási technológiák (Például az FDM) kihasználja ezt az előnyös tulajdonságot, így a hőre lágyuló polimerekből is lehetséges költséghatékony módon halmazszemcsék létrehozása. Elsősorban PLA, PA, PC, PETG, ABS, PET, PEEK anyagokat használhatjuk fel ilyen módon szemcsegyártáshoz. [18]

2.6.2 Hőre keményedő polimerek

A térhálós polimerek polimerizáció során a láncok között kialakuló primer kémiai kötések kialakulásával jönnek létre. Ezek mindegyike besorolható az elasztomerek, vagy a duromerek csoportjába. Az elasztomerekkel a továbbiakban nem foglalkozunk, mivel azok nagyrugalmas tulajdonságai miatt nem alkalmasak nagy merevségű szemcsék modellezésére. A duromerek hőre keményedő térhálós gyanták, melyek tulajdonságait más tényezők mellett döntően

befolyásolja térhálósűrűségük. Szobahőmérséklet feletti üvegesedési hőmérséklettel rendelkeznek. Általában merevek, nagy szilárdságúak. Polymerizációjuk, ami egybe a térhálósodásuk is az alakadás során játszódik le. A térhálósodás egy irreverzibilis folyamat, amely vagy hő hatására, vagy katalizátor adagolásával, vagy komponensek összekeverésével megy végbe. [18] A későbbiekben szó lesz az epoxigyanta, a poliésztergyanta és a poliuretángyanta jellemzőiről. Ezek mindegyike öntőgyanták formájában kaphatók. Az öntőgyanta két összetevőből áll: a gyantából és az erősítőanyagból, amely a keverés után polimerizáció során megkeményedik. A gyantákhoz keverhetők többek között ásványi adalék-, társító-, és töltőanyagok. Ezekkel módosíthatók az egyes anyagok tulajdonságai. Segítségükkel a felhasználó olyan mechanikai tulajdonságokat tud befolyásolni, mint például a szilárdság, keménység a felületi érdesség, vagy az edényidő. [19]

2.6.3 Epoxigyanta

Az epoxigyanta a hőre keményedő műgyanták közé tartozik, kiváló mechanikai tulajdonságokkal és vegyi ellenálló képességgel bír, jó a hőállósága. Ezen tulajdonságok alapján terjedt el használata mind a gépiparban, mind az építőiparban. A térhálósodott epoxigyanta egy duromer, azaz sűrű térhálós polimer. Az epoxigyanta egy kétkomponensű rendszer. A két komponens keverésénél pontos keverési arány betartása szükséges ahhoz, hogy a térhálósodás folyamata teljes mértékben lezajlhasson. A polimerizáció időbeli lefolyása viszonylag lassú. A teljes polimerizációig akár hét nap is szükséges szobahőmérsékleten. Ennek következtében fontos, hogy az anyagvizsgálatokat ennek megfelelő ütemezés szerint végezzük el. A zsugorodása térhálósodás közben más bemutatott gyantákhoz viszonyítva jelentősen kicsi (0,5-5%). Fontos megjegyezni, hogy a térhálósodott epoxigyanta nem hasznosítható újra, és a gyanta komponensei károsak a környezetre. Éppen ezért az öntési folyamat során fontos a munkavédelmi és környezetvédelmi előírásokat betartani. Gyantaöntés közben ajánlott a gumikesztyű és szemüveg viselése.

Az epoxigyantának általában a kis viszkozitású változatát használják öntésre, amely két komponensből áll: az alapgyantából és a hozzá tartozó keményítőből. A két komponens összekeverésekor egy kémiai reakció zajlik le, amely hatására megkeményedik a gyanta. Az öntőgyanta az alacsony viszkozitás miatt behatol a legkisebb résekbe és üregekbe is, viszont a többi ismert gyantához viszonyítva hosszabb idő alatt térhálósodik. (18)

2.6.4 Poliuretángyanta

Az öntött poliuretángyanták tulajdonságai széles skálát fednek le az alkalmazásuktól függően. Ez az egyik legváltozatosabb anyagfajta. Vannak köztük duromerek, lineáris elasztomerek,

kemény-, és lágyhabok, reaktív ragasztók, stb. A térhálósodott poliuretángyanta tulajdonságai a két komponens, izocianát (merev) és a poliól (lágy), típusától és relatív mennyiségétől függenek. Lehetnek kristályosak vagy amorfak, ez utóbbiak is lehetnek heterogének, tartalmazhatnak kemény és lágy doméneket. [18]

Resin Expert honlapja [19] alapján kigyűjtöttük a térhálósodott poliuretán előnyös és hátrányos tulajdonságait:

Előnyei:

- Kiváló folyási tulajdonságokkal rendelkezik, ezért könnyen keverhető és feldolgozható
- Annak ellenére, hogy viszkozitása nem túl nagy, optimálisan önthető és alakítható
- Gyorsan térhálósodik, így rövid időn belül eltávolítható az öntőformából
- Jó a formakitöltő képessége
- A térhálósodás alatt csak kismértékű a zsugorodás
- A térhálósodás után magas a hőállósága

Hátrányai:

- Érzékeny a nedvességre, ami nemkívánatos reakciókat, például habzást idézhet elő
- Az UV fényvel szembeni ellenálló képességhez meghatározott adalékanyagok szükségesek
- A kikeményedés alatt a sztiren erős szagot eredményez, ami veszélyezteti az egészséget
- Az adhéziós tulajdonságai kevésbé jók, mint az epoxigyantának
- Viszonylag magas az áruk

2.6.5 Telítetlen poliésztergyanta

A Resin Expert honlapja alapján [19]:

Tulajdonságaik nagyon kedvezőek, szilárdságuk és merevségük nagy. Bár a poliésztergyanta elsődleges felhasználása a kompozitok mátrixanyaga, öntőgyantaként is alkalmazzák. Ezen szintetikus gyanták tulajdonságai nagymértékben eltérnek egymástól, mivel nemcsak a felhasználási terület, de a különböző adalék és színező anyagok is szerepet játszanak. Általánosságban elmondható, hogy a poliésztergyanták a kiváló penetrációs tulajdonságaik miatt kivételesen alkalmasak az üvegszál erősítésre. A térhálósítást követően a munkadarabok vízállóak. Továbbá a híg, nem oxidáló savakkal és a vizes sóoldatokkal szemben is jó az ellenálló képességük.

Előnyök az epoxigyantához képest:

- Kedvezőbb az áruk
- A kikeményedési idő részben a felhasználó által is befolyásolható

- Szélesebb választéka van az erősítőanyagoknak
- Egyszerűbb kezelhetőség (csak katalizátor hozzáadása szükséges)
- Rövidebb fazékidő (Szemcsekészítésénél előnyösnek számít)

Hátrányok az epoxigyantához képest:

- Feldolgozásuk közben a párolgó sztirolnak toxikus hatásai vannak az emberi szervezetre
- Gyengébbek a mechanikai tulajdonságaik
- Nagyobb a zsugorodásuk (3-8%)

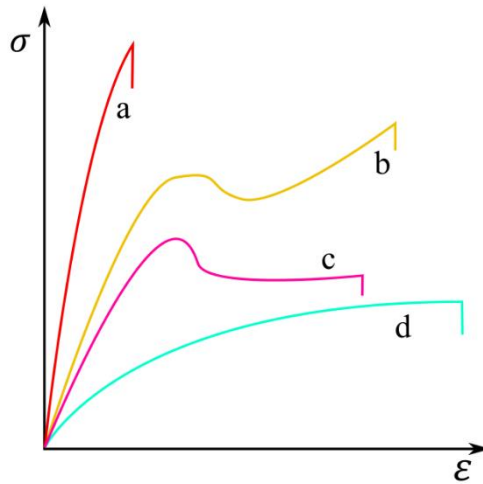
2.6.6 A polimerek szabványos nyomóvizsgálata

A polimerek nyomóvizsgálatának menetét az ISO 604 szabvány írja elő. Ennek tartalmát röviden összefoglaltuk a következőkben.

A vizsgálat paraméterei és a feszültség alakváltozás görbe jellegzetes pontjai:

- Mérőhossz: jelek közötti távolság [mm]
- Vizsgálati sebesség: befogópályák közlekedési sebessége [mm/min]
- Nyomófeszültség (σ): eredeti keresztmetszetre vonatkoztatott nyomóerő, amit próbatest elvisel [MPa]
- Nyomófeszültség megfolyáskor (σ_y): az a feszültség, ahol az alakváltozás a feszültség növekedése nélkül kezd nőni [MPa]
- Nyomószilárdság: legnagyobb nyomófeszültség, amit a próbatest elvisel a nyomóvizsgálat során [MPa]
- Nyomófeszültség töréskor (σ_B): az a feszültség, aminek hatására a próbatest összetörik [MPa]
- Nyomófeszültség x %-os alakváltozáskor (σ_x): x %-os alakváltozáshoz tartozó feszültség [MPa]

A 2.7. ábra mutatja a feszültség nyúlás görbe jellegzetes pontjait különböző anyagú polimer próbatestek esetében:



2.7. ábra: Polimerek feszültség-alakváltozás görbéi. a) rideg (üvegszerű) viselkedés, b) és c) folyáshatárt mutató viselkedés d) lágy, gumiszerű viselkedés nagy (>50%) szakadási nyúlással,

Alakváltozás számítása:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [1]$$

Ahol:

- ΔL : Hosszúságcsökkenés [mm]
- L_0 : Mérési felek közti eredeti távolság [mm]

Nyomási rugalmassági modulus számítása:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [\text{MPa}]$$

Ahol:

- $\varepsilon_1 = 0,0005$: Rugalmassági modulus számításához előírt kis alakváltozás [1]
- $\varepsilon_2 = 0,0025$: Rugalmassági modulus számításához előírt nagy alakváltozás [1]
- $\sigma_1 \rightarrow \varepsilon_1$ alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség [MPa]
- $\sigma_2 \rightarrow \varepsilon_2$ alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség [MPa]

A nyomószilárdság és a rugalmassági modulus számításához eltérő méretű, téglatest alakú próbatestek használatosak. Ezt mutatja a 2.6. táblázat:

2.6. táblázat: Próbatestek ajánlott méretei modulus és szilárdság meghatározásához

	Hossz, l [mm]	Szélesség, b [mm]	Vastagság, h [mm]
Modulus	50±2	10±0,2	4,0±0,2
Szilárdság	10±0,2	10±0,2	4,0±0,2

Próbatestek száma:

- Izotóp anyagtulajdonságok esetén: legalább 5 db.
- Anizotrop anyagtulajdonságok esetén: legalább 10 db, 5 db száliránnyal merőlegesen, 5 db száliránnyal párhuzamosan a nyomólapok közé téve

A szabványos vizsgálati sebességértékek: 1, 2, 5, 10, 20 mm/min. Minél képlékenyebb a vizsgált anyag, annál nagyobb sebesség alkalmazható.

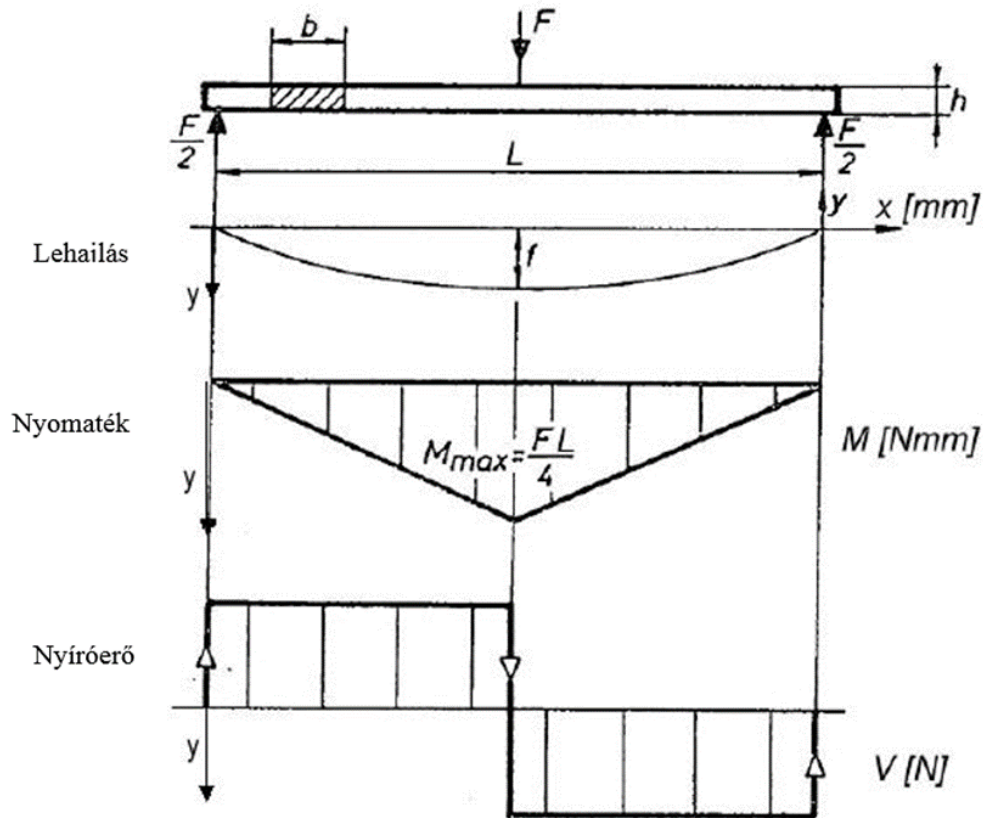
2.6.7 A polimerek szabványos hajlítóvizsgálata

A polimerek hajlítóvizsgálatának menetét az ISO 178:2009 szabvány írja le. Ennek tartalmát röviden összefoglaltuk a következőkben.

Hárompontos hajlítóvizsgálat során a hasáb alakú próbateseteket kéttámaszú tartóként terhelik meg, egy a középpontra terhelő erővel. A vizsgálat elrendezését a 2.8. ábra mutatja. A vizsgálat során a terhelőerőt mérjük az ábrán jelölt f lehajlás függvényében. A behajlásból és az erőhatás nagyságából a vizsgált próbatest alakváltozására lehet következtetni és kiszámolható a test hajlítószilárdsága a maximális hajlítónyomaték ismeretében.

A vizsgálat paraméterei és a feszültség alakváltozás görbe jellegzetes pontjai:

- Vizsgálati sebesség: befogópályák közlekedési sebessége [mm/min]
- Hajlítófeszültség (σ_f): Névleges feszültség, amit a próbatest közepén lévő külső felülete elvisel. [MPa]
- Hajlítófeszültség töréskor (σ_{fB}): az a feszültség, aminek hatására a próbatest összetörik [MPa]
- Hajlítószilárdság: legnagyobb nyomófeszültség, amit a próbatest elvisel a hajlítóvizsgálat során [MPa]
- Hajlítófeszültség x %-os alakváltozáskor (σ_{fx}): x %-os alakváltozáshoz tartozó feszültség [MPa]
- Lehajlás (f): Az a távolság, ami a próbatest terhelési pontjában lévő alsó vagy felső felülete megtesz a terhelés hatására. [mm]
- Nyúlás (ϵ_f): A próbatest húzott oldalán kialakuló névleges hosszváltozás [%]



2.8. ábra: Hárompontos hajlítóvizsgálat elvi elrendezése, lehajlása, nyomaték és nyíróerő ábrája [20]

Hajlítófeszültség számítása:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [MPa]}$$

Ahol:

- F: Terhelő erő [N]
- L: hajlítópóbatest alátámasztási pontjai közt lévő távolság [mm]
- b: munkadarab szélessége
- h: munkadarab vastagsága

Nyúlás számítása:

$$\varepsilon_f = \frac{600 \cdot f \cdot h}{L^2} \text{ [%]}$$

Ahol:

- f: lehajlás [mm]
- L: hajlítópóbatest alátámasztási pontjai közt lévő távolság [mm]
- h: munkadarab vastagsága

Hajlítás kezdeti rugalmassági modulus számítása:

$$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \text{ [MPa]}$$

Ahol:

- $\varepsilon_1 = 0,0005$: Rugalmassági modulus számításához előírt kis alakváltozás [1]
- $\varepsilon_2 = 0,0025$: Rugalmassági modulus számításához előírt nagy alakváltozás [1]
- $\sigma_1 \rightarrow \varepsilon_1$ alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség [MPa]
- $\sigma_2 \rightarrow \varepsilon_2$ alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség [MPa]

A nyomószilárdság és a rugalmassági modulus számításához eltérő méretű, téglatest alakú próbatestek használatosak. Ezt mutatja a 2.7. táblázat: Szabványos próbatest méretei és alátámasztása :

2.7. táblázat: Szabványos próbatest méretei és alátámasztása [20]

Szabvány száma	Próbatest méretei [mm]			Alátámasztási távolság, L [mm]	Lekerekítések [mm]	
	Hossz, L_t	Szélesség, b	Vastagság, h		r_1	r_2
DIN 53452 [32]	120	15	10	100	10	1
ISO/R 178 [33]	80	10±0,2	4±0,2	64	5	2

Próbatestek száma:

- Izotóp anyagtulajdonságok esetén: legalább 5 db.

A szabványos vizsgálati sebességértékek: 1, 2, 5, 10, 20 mm/min. Minél képlékenyebb a vizsgált anyag, annál nagyobb sebesség alkalmazható.

2.7 A Polimer-beton kompozitok

A beton egyes negatív tulajdonságainak javítása céljából indultak el kutatások már az 50-es években a polimer-beton kompozitok fejlesztésére. [13] Három egymástól különböző típusú polimer-beton kompozitot lehet megkülönböztetni. Ezeket ismertetjük részletesebben a továbbiakban:

2.7.1 Polimerrel impregnált beton

A polimerrel impregnált beton készítésének folyamata [13] az, hogy a portlandcement betont szilárdulás és szárítás után cseppfolyós monomerrel impregnálják majd azt polimerizálják. Az impregnáláshoz mind hőre lágyuló, és hőre keményedő polimerek is alkalmazhatóak

Legnagyobb mértékben akkor változtathatók a beton tulajdonságai ezzel a módszerrel, ha a beton teljes térfogatába eljutnak a monomerek polimerizálás előtt. Ehhez azonban vákuum vagy nyomás alkalmazása szükséges.

Általánosan elmondható, hogy az impregnálás megnöveli a beton szilárdságát, kezdeti rugalmassági modulusát és a törési összenyomódását. Az impregnált beton húzásra és

nyomásra is rugalmasan viselkedik, nyomás hatására robbanásszerűen törik és nagyobb mértékben kúszik az impregnálatlan betonhoz képest. [13]

2.7.2 Polimerbeton

A polimerbeton gyakorlatilag egy kompozit, melynek erősítőanyaga a beton adalékanyaga, és mátrixanyaga (kötőanyaga) a polimer. Mátrixanyagként különböző hőre keményedő polimerek használhatók. Például epoxigyanta, poliésztergyanta, poliuretángyanta, vagy furángyanta. Általánosan elmondható, hogy az adalékanyag szilárdságának legalább 80 MPa-nak kell lennie. Ez az érték felel meg körülbelül a gyanta szilárdságának. Az adalékanyag szilárdságának növelésével növelhető a habarcs, illetve a beton kopással szembeni ellenállósága. A mátrixanyag rugalmassági modulusa körülbelül tízszer kisebb a kötőanyag rugalmassági modulusánál. Ezáltal nyomásra az adalékanyag szemcsék jobban ellenállnak. A szemcsék ugyan feszültséggyűjtő helyek, azonban a mátrixanyag nagy nyomószilárdságának és lassú alakváltozásának köszönhetően a polimer feszültségkiegyenlítőként szolgál. Kevésbé tudományos megfogalmazás szerint a műgyantákba olyan szilárd kémiaiilag ellenálló erősítőanyagokat keverhetünk, amelyet akarunk. A teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány lehetőséget a hagyományos beton adalékanyagain kívül, melyekkel kísérletezhetünk: fémpor (alumínium-, vaspor) grafit, faliszt, természetes homok, ásványlisztek (porcelán, üveg, hamu, cement, kőliszt, pala, homokliszt stb.) [13]

2.7.3 Polimer cementbeton

Olyan hagyományos betonkeverék, amelybe a keverés során monomer vagy gyantarendszer kerül adagolásra. Ez esetben a polimerizációra a beton megkötése során kerül sor. A kötési idő nem sokkal rövidebb a betonhoz képest. A polimer cementbeton a portlandcementhez adott különböző módosított polimerrel, például akril-, polivinil-acetát- és etilén-vinil-acetáttal készül. [21] A polimer cementbeton mechanikai tulajdonságai a betonhoz képest a következőkben leírtak szerint változik: A húzószilárdság 1,5-2 szeresre nő. A nyomószilárdság értékei közt nincs különbség. A rugalmassági modulus kb. felére csökken. A törési nyúlás 1,5-3 szorosra nő. A kopás mértéke fele, vagy kisebb. A repedési hajlam csökken.

3 Mérési és kiértékelési folyamatok

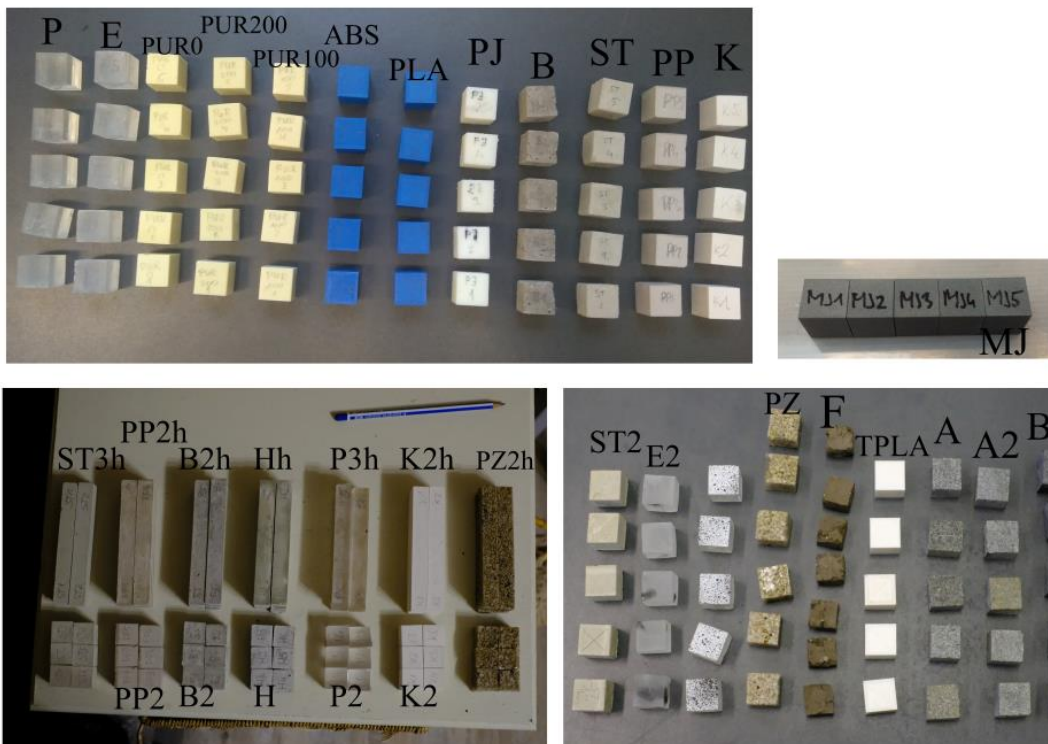
3.1 Anyagok melyeken kísérleteket végeztünk.

Az irodalomkutatás után választottuk ki azon anyagokat, és technológiákat, melyeket érdemesnek tartottunk szemcsereprodukció alkalmazásához. A 3.1. táblázat foglalja össze a vizsgált anyagok sorát, melyek közt szerepelnek vasúti zúzottkövek anyagai is. Egyes anyagokat több alkalommal is vizsgáltunk. Ezeket ezen táblázatban azonban csak egyszer tüntetjük fel.

3.1. táblázat: A vizsgált anyagok

Anyag/technológia megnevezése	Általunk használt rövidítés	Anyag pontosan
Aljzatkiegyenlítő	PP	Ultraplan eco 20
Andezit	A	Nem ismert
Andezit2	A2	Nem ismert
Bazalt 3	BA	Nem ismert
Beton	B	Baumit C20/25
Térhálósodott epoxigyanta	E	EC 141 NF/W 241
EPS ragasztó	ST	Styrokleber EPS rendszerasztó
FDM-ABS	ABS	Nem ismert
FDM-PLA	PLA	Nem ismert
FDM-TPLA	TPLA	Nem ismert
Habarcs	H	Baumit C20/25 átszitált
Kerámiapor	K	„Kerámiapor”
Multi Jet Fusion	MJ	PA12
Térhálósodott Poliésztergyanta	P	Synolite 0328
Poliésztermátrixú zúzottkő	PZ	Synolite 0328 + átszitált Baumit C20/25
PolyJet	PJ	IORA Modell White

Térhálósodott poliuretángyanta (PUR)	PUR0	F 190 Gyorsöntő
PUR + 100% Alumínim-trihidrát	PUR100	F 190 Gyorsöntő
PUR + 200% Alumínim-trihidrát	PUR200	F 190 Gyorsöntő
Agyagos talaj	F	



3.1. ábra: Vizsgált anyagokból készült próbatetek és azok jelölései. (A jelöléssel nem rendelkező próbateteket nem vizsgáltuk)

A 3.1. ábra áttekintést ad a mérések folyamán használt próbatetek megjelenéséről és jelöléséről. A képről hiányoznak még az andezit és bazalt hajlítóprobatetek fotói és jelölései.

3.2 A mérési koncepció megfogalmazása

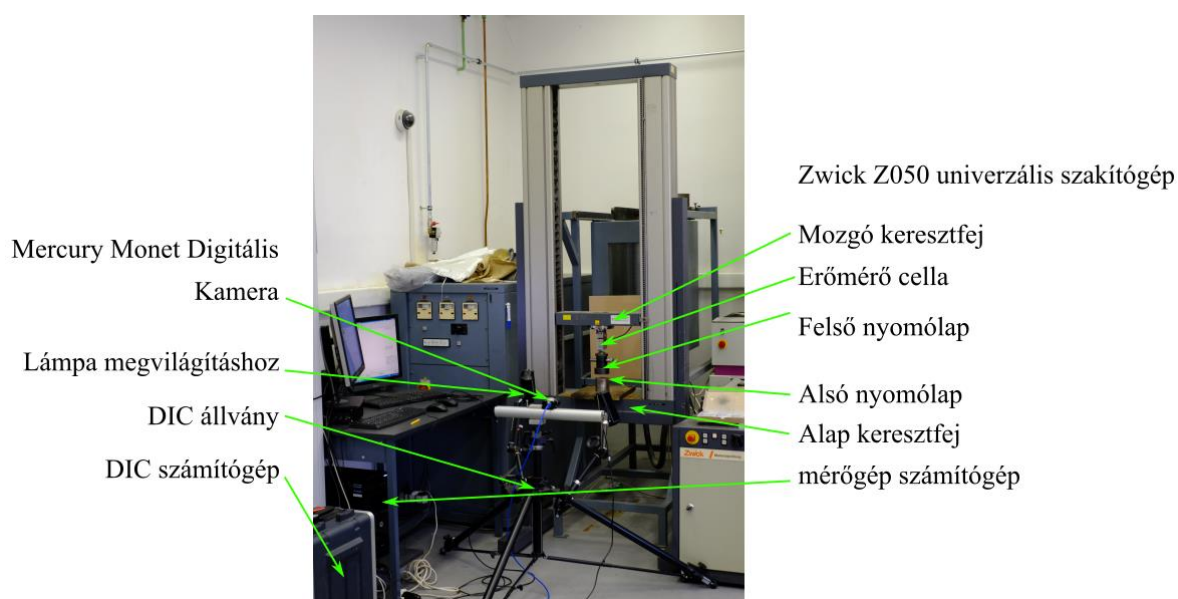
Az irodalomban fellelhető mérési adatok két ok miatt nem használhatók számunkra. Egyrészt a különböző anyagcsoportokhoz az előzőekben leírtak szerint különböző szabványú vizsgálati módszerek tartoznak. Így azokat a táblázatokban található értékeik alapján nem tudjuk összehasonlítani egymással. Nem találtunk olyan anyagvizsgálati szabványt, mely szerint ugyanolyan módon vizsgálhatnánk az építőanyagok, a polimerek, illetve azon közetek anyagjellemzőit, melyek a vasúti zúzottkőágyazatokat alkotják. Másrészt a táblázatok nem adnak részletes információt az adott anyag tönkremeneteli folyamatáról, illetve törésképéről. Ennek következtében nem szabványos méréseket végeztünk illeszkedve kicsit mind a polimerek, mind a beton szabványos vizsgálati módszereihez. Igyekeztük úgy kialakítani a mérési körülményeket, hogy lehetőségünk legyen a különböző anyagcsoportok tulajdonságait összehasonlítani egymással. Törekedtünk arra, hogy lehetőségeink szerint eleget tegyünk a különböző szabványokban előírtaknak is.

Ezeknek megfelelően a kulcskérdés az volt, hogy mekkora, és milyen geometriájú próbatestet alkalmazzunk nyomó, illetve hajlítóvizsgálataink során. Úgy döntöttünk a zömök vasúti zúzottkövek alakját tekintve –melyek a vasúti zúzottkőágyazatok nagyrészét alkotják–, hogy 1:1 magasság-szélesség arányú próbatesteket készítünk. A polimerek esetében az ISO 604-es szabvány és a beton esetében is az európai szabvány szerint négyyszög alapú próbatesteket alkalmaznak nyomóvizsgálatokhoz. Így megfelelő berendezéssel a hosszirányú és keresztirányú nyúlások aránya is könnyen meghatározható. A próbatestek méretének meghatározásánál figyelembe vettük, hogy azok közel álljanak az alakhatás vizsgálatokhoz szükséges halmazok szemcseméreteihez, de ne legyenek túl kicsik ahhoz, hogy az anizotróp anyagok vizsgálhatatlanok legyenek. Figyelembe vettük azt is, hogy mekkora mérőberendezés áll rendelkezésünkre, és hogy a különböző anyagú próbatestek költséghatékonyan létrehozhatók legyenek. Ezek alapján az általunk választott élhosszúság 20 mm-re adódott. Az ISO 604-es és az ISO 174-es polimer vizsgálatairól szóló szabványok méréssorozat hosszára vonatkozó részei öt próbatest vizsgálatát írják elő, amennyiben azok nem rendelkeznek anizotrópiával. Ezt az elvet követtük méréseink során. Igaz, az anizotrópiával rendelkező próbatestek esetén is.

3.3 A mérőberendezés és a mérési folyamat pontos bemutatása

3.3.1 Univerzális szakítógépek bemutatása

A nyomóvizsgálatok nagyobb részét a Zwick Z050-es univerzális szakítógéppel végeztük a 3.2. ábra szerinti elrendezésben. Andezit és bazalt próbatestek esetében néhány nyomóvizsgálat a Zwick Z250-es univerzális szakítógépen történt. Ezen gépekkel a Polimertechnika Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában mértünk. Azon méréseknél, ahol az utóbb bemutatott gépen mértünk ezt feltüntetjük. Minden más mérés a Z050-es géppel történt. Egy, az erőfolyamba szerelt erőmérő cella segítségével mértük a nyomóvizsgálat során fellépő erőt, illetve a gép beépített szenzora mérte a keresztfej elmozdulását. Az adatokat valós időben, a TestXpert nevű szoftverrel rögzítettük 50 Hz-es frekvenciával. A nyomóvizsgálatot állandó sebességű nyomólappal végeztük, melyet 5 [mm/min]-re állítottunk be. Ezt az értéket az ISO 604 és az ISO 178 javaslatai alapján határoztuk meg. Az anyagok többségénél a maximális nyomólap elmozdulást 5 mm-re állítottuk, az erőkorlátot pedig Z050-es gép esetén 40 [kN]-ra, Z250-es gép esetén 200 [kN]-ra. Így biztosítottuk, hogy a gépek erőmérő celláit biztosan ne terheljük túl. Beállítottuk továbbá, hogy amennyiben az erő 80%-kal visszaesik egy korábbi maximum értékhez képest, szintén álljon le a vizsgálat.



3.2. ábra: A mérések során használt Zwick Z050-es univerzális szakítógép

3.3.2 Digitális elmozdulásmérő (DIC) bemutatása

A vizsgálatokról a 3.2. ábra látható Mercury Monet digitális elmozdulásmérő (DIC) [30] segítségével 10 Hz-es frekvenciával videofelvételt készítettünk. A kamera kalibrálása után lehetőség van digitális nyúlásmérő bélyegek felvételére a próbatesten a berendezés szoftverének segítségével. Az egyes képkockákhoz tartozó általunk definiált pontok közti

méretváltozások a vizsgálat során rögzítésre kerültek. A videofelvételek elemzése során pedig lehetőség van a próbatest tönkremeneteli folyamatának, és törésképének vizsgálatára is. Ezen vizsgálathoz azonban a munkadarabok kamera felé néző felületének előkészítése szükséges. 3.3. ábra szerinti módon ezen felületeket fehér festékkel fújtuk le, amit annak száradása után feketével beszórtunk.



3.3. ábra: DIC méréshez előkészített próbatestek

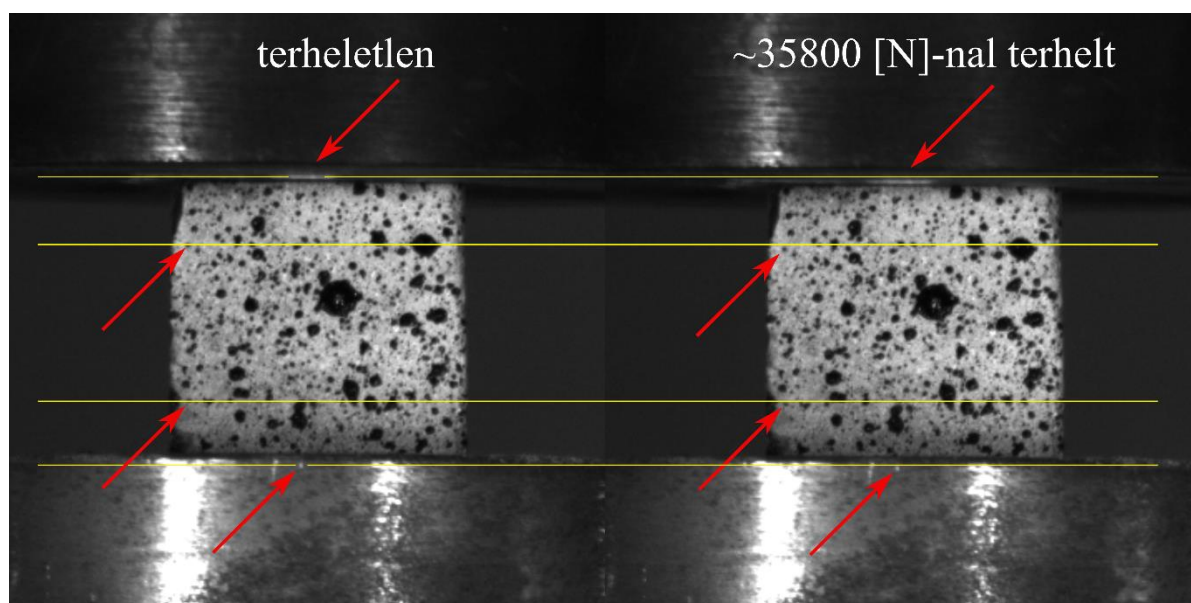
3.4 Eredmények értékelési folyamatai

A mérési eredmények kiértékelését MatLab program segítségével végeztük el, néhány pontban a szabványoktól kissé eltérő módon. A szakítógép által mért erő-elmozdulás értékekből és a próbatestek méretei alapján kiszámítottuk és ábráztuk a feszültség-nyúlás diagramokat.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$$

1. Mivel a görbék felfutó szakaszai egy méréssorozaton belül is eltérő hosszúságúra adódtak, ezért minden görbe lineáris szakaszára lineáris regressziószámítást alkalmazva egyenest illesztettünk. Ezen egyeneseket pedig a hozzájuk tartozó görbével együtt az x tengely mentén úgy toltuk el, hogy azok metsszék az origót.
2. Ezek után határoztuk meg a nyomó- és hajlítószilárdságot, valamint – ha értelmezhető volt – a megfolyási pontot és mindenhez tartozó nyúlásértékeket.
3. Az egyértelműen hibás mérések eredményeit nem vettük figyelembe.
4. A modulust a szabványoktól eltérő módon a lineáris szakaszokra illesztett egyenes meredekségek segítségével definiáltuk.
5. Kiszámítottuk ezen mennyiségek átlagát, szórását és 95%-os megbízhatósági szint mellett a koenfidencia intervallum határait.
6. Kiszámítottuk és ábráztuk a rendezett görbék alapján a méréssorozatot jellemző feszültség-nyúlás átlaggörbét.

A mérések során arra lettünk figyelmesek, hogy minél inkább növekszik a próbatestek modulusa, annál valótlanabb elmozdulásokat mutat az univerzális szakítógép. A zúzottkövek vizsgálata során tapasztaltak alapján világítottunk rá a problémára. A 3.4. ábra egy andezit próbatest felterhelését szemlélteti, a folyamatot a DIC berendezéssel rögzítettük. A bal oldalon kiragadott pillanat a terhelés kezdetét szemlélteti, ez esetben a terhelőerő 0 [N] volt. A jobb oldalon a mérés utolsó pillanatait egyikét látjuk. A próbatest ezen körülbelül 35800 [N]- erővel van terelve. A DIC berendezés a mérés során mozdulatlan volt. A vízszintes sárga vonalak segítik az elmozdulások szemléltetését. A piros nyilak pedig rámutatnak egy-egy pontra, melyeket érdemes megfigyelni mindkét képen. Látható, hogy a felső nyomólap elmozdulása nagyságrendileg megegyezik az alsó nyomólap elmozdulásának mértékével. A kettő között lévő próbatesten pedig nem észlelhetők nagy deformációk. A képen ábrázolt esetben a DIC által mért értékek szerint a 15.8838 [mm]-es próbatesten rögzített függőleges szakaszon a kompresszió hatására 0.0228 [mm]-es rövidülés mérhető, míg a szakítógép által mért érték 1.5 [mm].



3.4. ábra: A DIC felvételei andezit nyomópróba közben. A felvételtől kivágott két képkocka terhelt és terheletlen esetben.

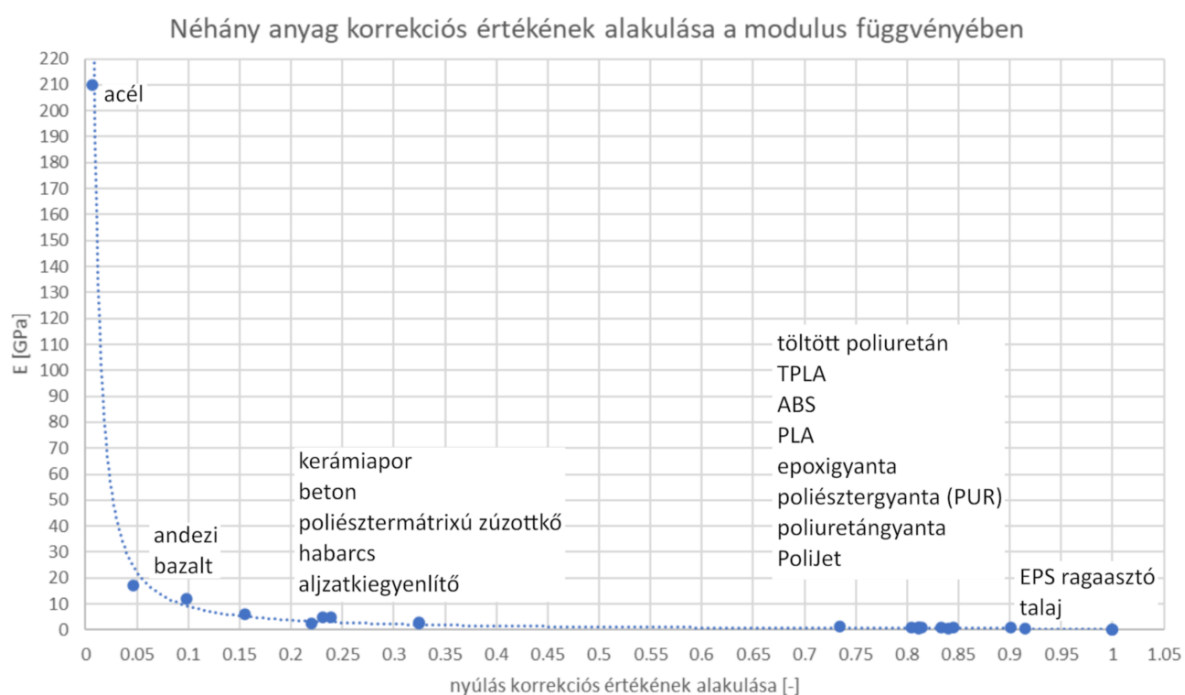
Levonható tehát az a következtetés, hogy minél nagyobb modulussal rendelkezik egy próbatest, annál bizonytalanabban tudjuk meghatározni az elmozdulások (és az abból számolt nyúlások) értékét. Az eredmények értékelése során a DIC által mért elmozdulásokat vettük alapul. Meghatároztunk minden anyag esetében egy közelítő korrekciós értéket (3.5. ábra), mely a gép érzékelője által mért elmozdulásokból számolt nyúlásokat igyekszik a valóságosabb értékek felé módosítani. A gép szenzora által mért eredmények kvantitatív azonban torzított eredményeket ad, míg a DIC által rögzítettek kvalitatív, azonban szaggatott eredményeket

szolgáltató. A korrekciós érték (K) a gép szenzora által mért elmozdulásból számított nyúlás ($\varepsilon_{\text{gép}}$), és a DIC által mért elmozdulásból számított nyúlás (ε_{DIC}) közti arányszám. Fontos, hogy korrekciós tényező meghatározásánál a nyúlásokat a lineáris szakaszon tekintettük. További nehézséget és a korrekciós tényezőben való bizonytalanságot okoz a gép által mért értékek és a DIC által mért értékek időbeli egyeztetése.

$$K = \frac{\varepsilon_{\text{DIC}}}{\varepsilon_{\text{gép}}}$$

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot K$$

Az így kapott korrigált nyúlásértékekkel (ε_k) számoltunk később a modulus meghatározásánál is. A korrekcióval módosított értékeket, és az abból számolt nyomási rugalmassági modulus értékeket fenntartásokkal kell kezelni!



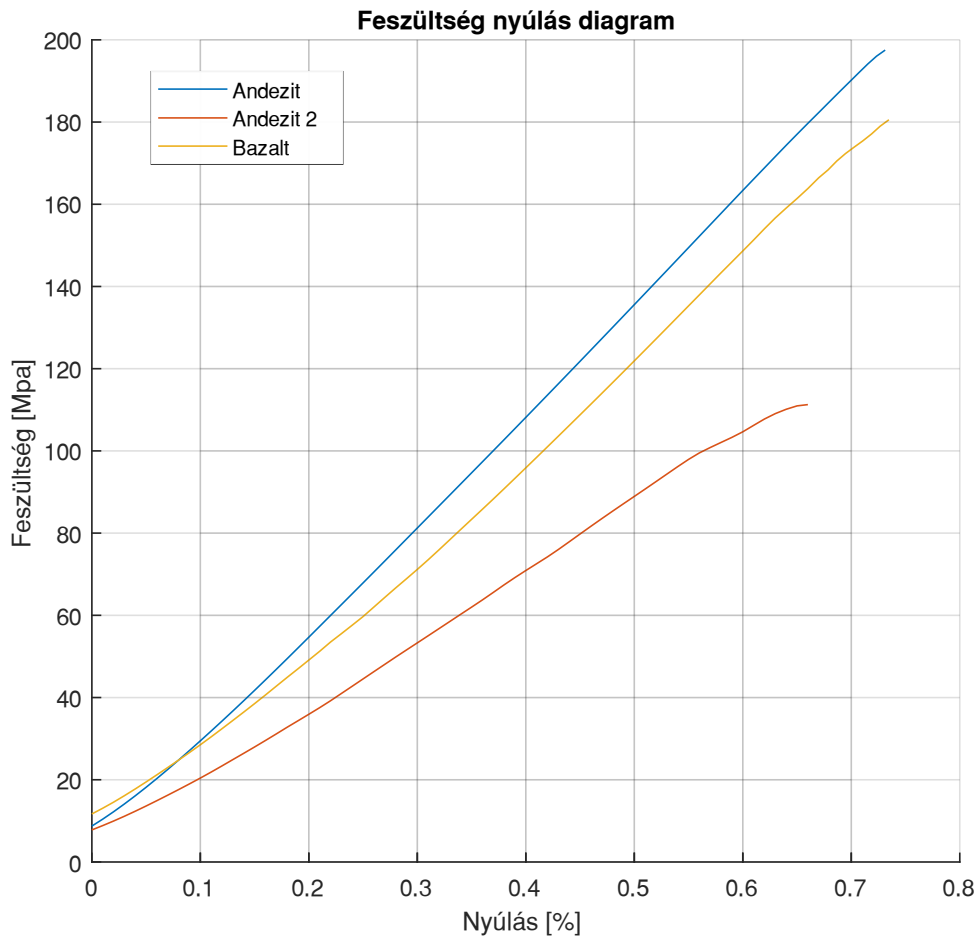
3.5. ábra: Korrekciós értékek alakulása a nyomási modulus függvényében

4 Mérési eredmények

4.1 Vasúti zúzottkövek anyagainak vizsgálati eredményei (A1, A2, BA)

A vasúti zúzottkövek nyomóvizsgálatát kivételesen a Zwick Z250-es géppel végeztük el.

4.1. ábra foglalja össze a kapott eredményeket.

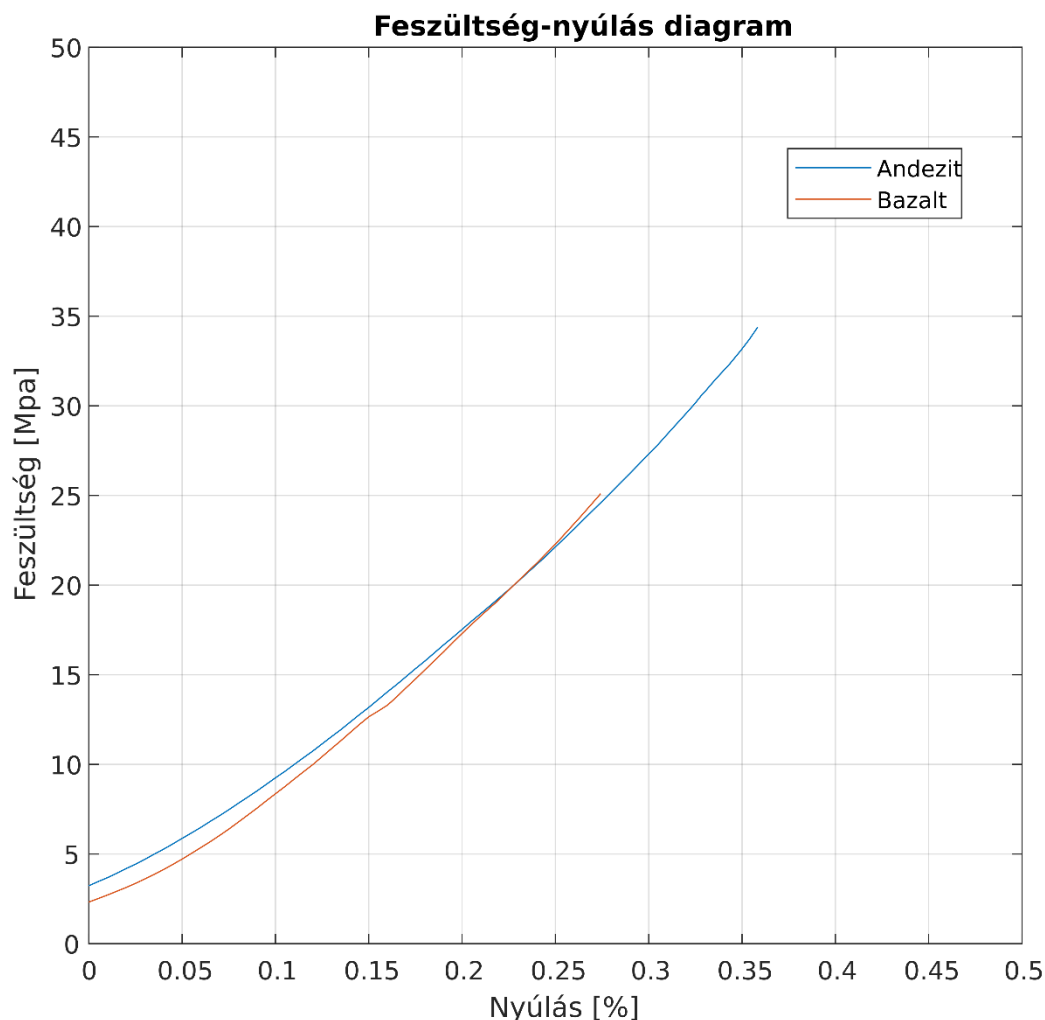


4.1. ábra Vasúti zúzottkövek anyagain végzett nyomóvizsgálatainak korrigált eredményei



4.2. ábra Andezit (felső két sor) és bazalt (alsó sor) próbatestek nyomóvizsgálat után

Az andezit (és a bazalt) nyomóvizsgálat során bekövetkező tönkremenetele robbanásszerűen történt. Általában egyetlen négyszögalapú gúla maradt a tönkremenetel után épen. A 4.2. ábra mutatja be ezeket.



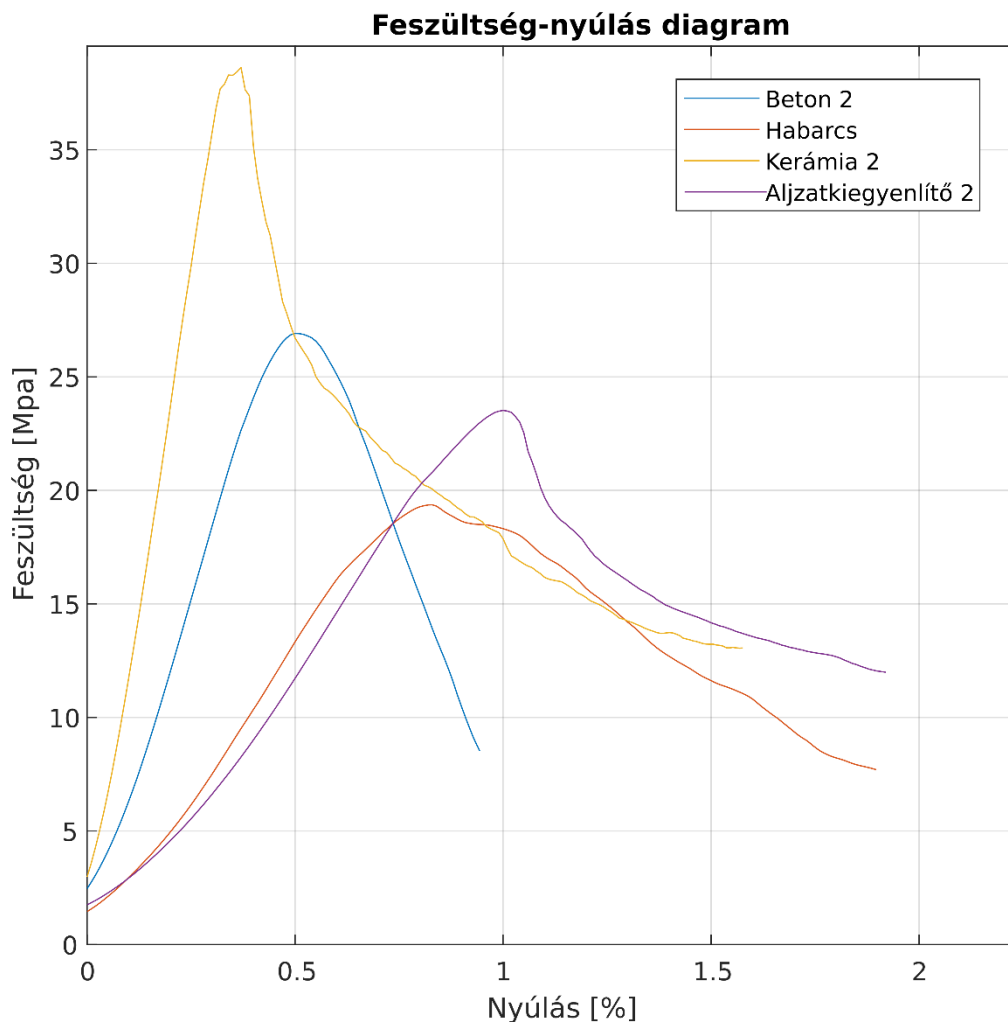
4.3. ábra: Vasúti zúzottkövek anyagain végzett hajlítóvizsgálatainak korrigált eredményei

Az andezit és a bazalt hajlítópróbatetek méretei eltérnek a többi, általunk készített hajlítópróbatetek méreteitől. Ezen okból a mérési elrendezésen is változtattunk. A próbatetet 80 mm-re támasztottuk fel a készüléken. Ismerjük a jelenséget, hogy a mért eredményekre befolyással bír a próbatetek alakja és a mérési elrendezés is, ezért közvetlenül ezen értékekkel a többi hajlítóvizsgálat eredményét nem célszerű egyben összehasonlítani. A hajlítási eredmények (4.3. ábra) érdekessége, hogy a görbék enyhén progresszív jelleget mutatnak. Növekvő terhelőerő mellett csökken az elmozdulás mértéke.

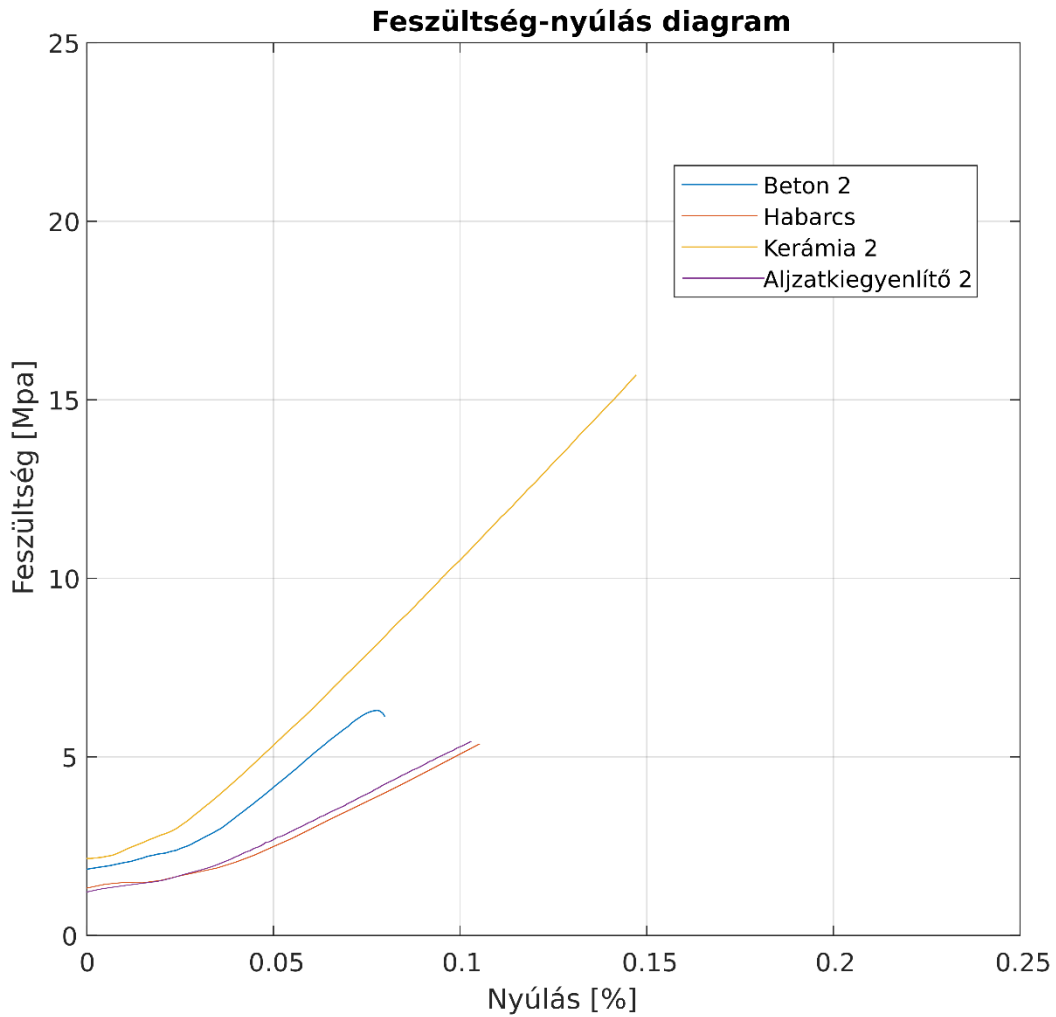
4.2 Építőiparban használatos, és hasonló anyagok vizsgálati eredményei

Az építőiparban használatos anyagok közé soroltuk a betont, a habarcsot, az aljzatkiegyenlítőt és a kerámiaport is. Jóllehet az utóbbi anyagot hobbiboltokban lehet beszerezni, minden bizonnyal ez is egy habarcsféle.

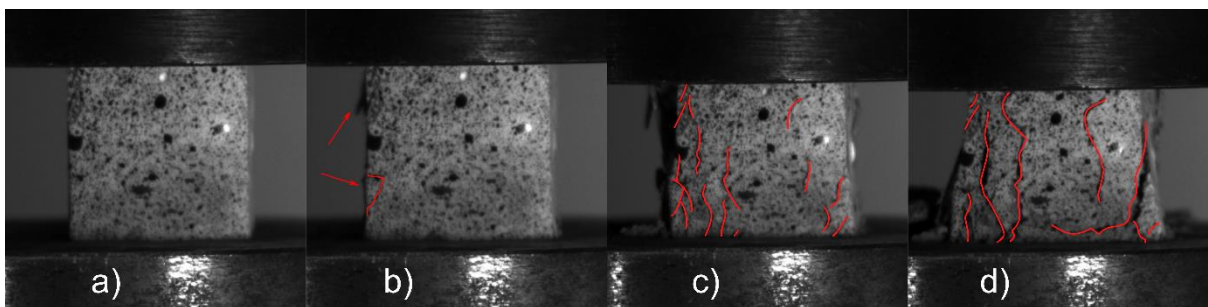
A beton próbatestek létrehozásához a Baumit Kft. által gyártott, előre kevert C20/25 szilárdsági osztályú készbetont használtunk. A keverés során 0.12-re választottuk a víz-cement tényezőt. A próbatesteket a mérés előtt az öntést követő 24 óra elteltével szobahőmérsékletű víz alá helyeztük, és hét napig ott tároltuk. Ezt követően a próbatesteket eltávolítottuk a vízből és a mérés napjáig szobahőmérsékleten szárítottuk. A próbatestek létrehozása során egyszerű rezgetett asztal segítségével végeztük el a tömörítést. A4.4. ábra mutatja a nyomóvizsgálatok, a 4.5. ábra pedig a hajlítóvizsgálat eredményeit.



4.4. ábra: Az építőipari anyagok nyomóvizsgálatainak korrigált eredményei



4.5. ábra: Az építőipari anyagok hajlítóvizsgálatainak korrigált eredményei

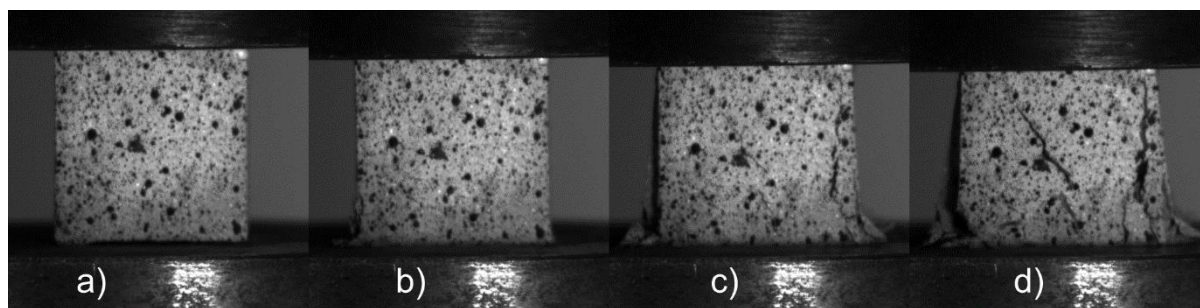


4.6. ábra: A beton összenyomásának folyamata

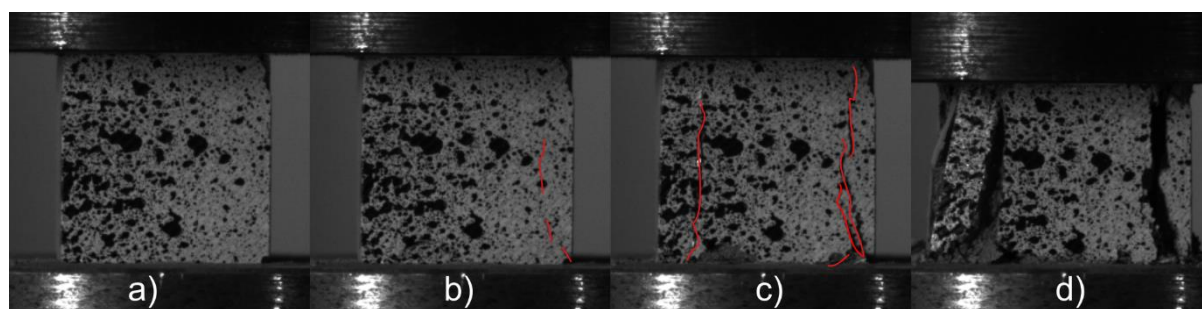
A beton próbatest összenyomási folyamatát szemlélteti a 4.6. ábra, melyen jól megfigyelhető a repedések kialakulása, és terjedése. A széttört nyomópróbatesteknek jellemzően kúp formában megmaradt a próbatest alja és teteje, az oldalai pedig széttöredeztek.

A habarcs létrehozásánál a készbetonból a zúzottkőszemcséket kiszitáltuk és 0.35 víz-cement arányt alkalmaztunk. Minden más tekintetben megegyezik anyaga és előállítási folyamata a

korábban ismertetett betonével. Az aljzatkiegyenlítő esetében 0.26 víz/por arányt használtunk. A használt anyag pontos típusa: Ultraplan eco 20.

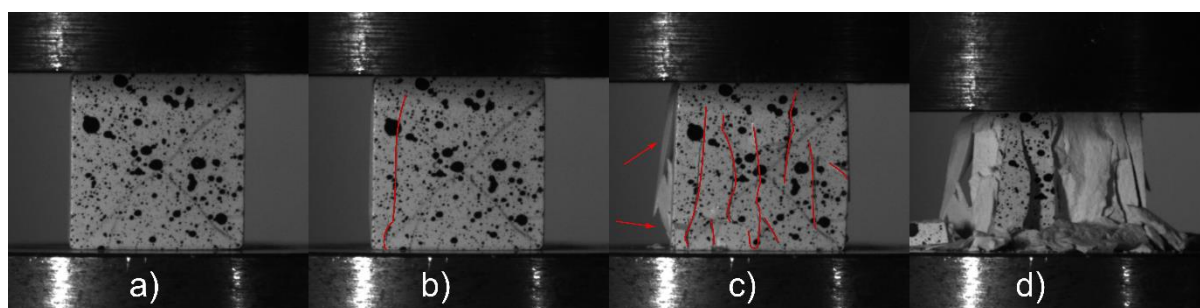


4.7. ábra: A habarcs összemyomásának folyamata



4.8. ábra: Az aljzatkiegyenlítőből készült próbatest összemyomásának folyamata

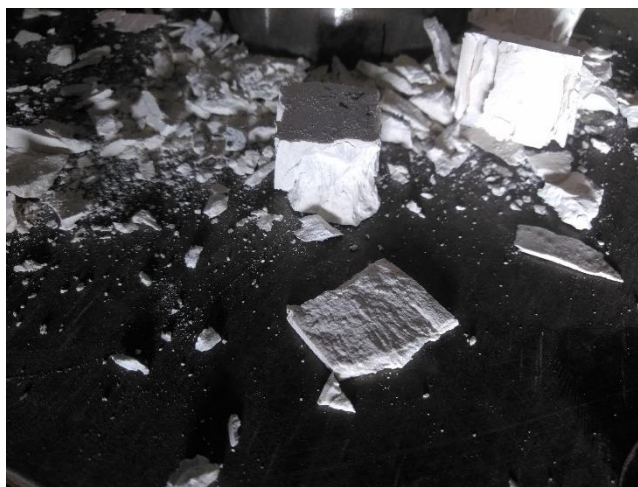
Célszerű együtt tárgyalni a habarcs és az aljzatkiegyenlítő tönkremeneteli folyamatát azok hasonlósága miatt. A hajlítás és nyomás jelleggörbéket ábrázoló 4.4. ábra 4.5. ábra is szemlélteti, mennyire hasonló tulajdonságokkal rendelkezik a két anyag. Mindkét esetben a betonnál valamivel laposabb kúp formában megmaradt a próbatest alja és teteje. Az aljzatkiegyenlítőre jobban jellemző, hogy a próbatest oldalaiból is kúp formálódik a vizsgálatok végeztével.



4.9. ábra: A kerámiaporból készült próbatest összemyomásának folyamata

4.4. ábra kerámiaporból készült próbatest gyártásánál 0.67 víz/por arányt alkalmaztunk. Az egyes nyomóvizsgálatokat nem reprezentálja megfelelően a 4.4. ábra „kerámia” görbéje. Az eredeti görbék az átlaggörbével szemben ugyanis a nyomószilárdság értékének elérése előtt több alkalommal rövid feszültségviszsaeséssel rendelkeznek, azaz a függvény a

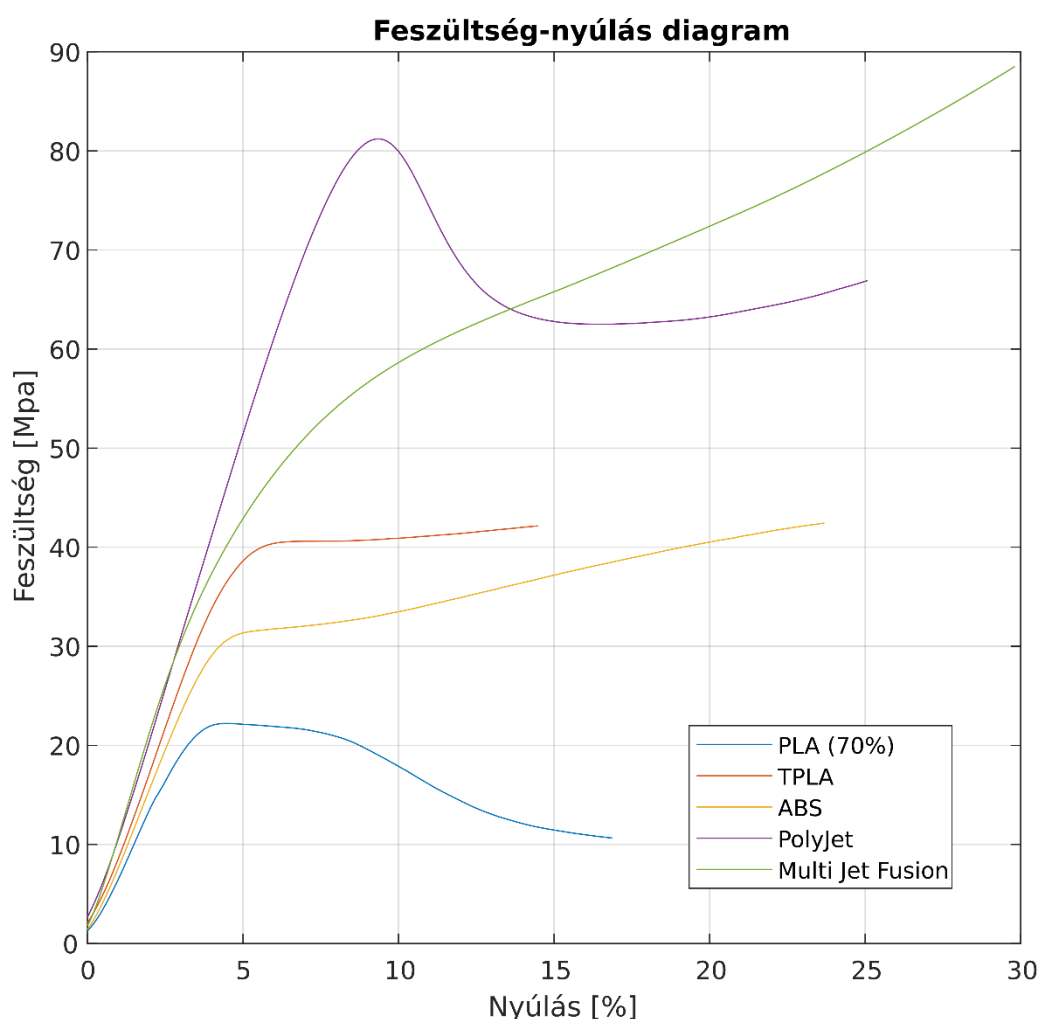
nyomófeszültség eléréséig nem monoton növekvő. Tapasztalataink szerint a nyomószilárdsági ponthoz egyre közelebb érve egyre gyakrabban fordul elő feszültségvisszaesés. A nyomófeszültség értékek elérése után pedig gyors ütemű zuhanás látszik a feszültségértékekben. A görbék a felfutási szakaszban szinte együtt futnak, ezért a modulusok szórása nagyon kicsi nyomás esetén. A törési jelleg nagy ridegségre utal, egyetlen pontban következik be. A kerámiaporból készült próbatestek tönkremenetele során (4.9. ábra) a törésvonalak hirtelen jelennek meg, legtöbb esetben egymás mellett párhuzamosan, amiből szakadótörésre is következtethetünk. Nem mindig alakulnak ki felismerhető kúpok sem a törés után. Ha kialakulnak, akkor a felső és alsó felület képezte egy-egy kúp alapját, melyek egymásba nyomódva maradnak meg. Ezek kézzel szétszedhetők, és egy részük könnyen szétmorzsolható. A próbatest oldalai pedig apró szilánkokra töredeznak, vagy egyben leválnak (4.10. ábra) a vizsgálat során. Ez szintén a szakadótörés jele lehet. Következő mérés alkalmával érdemes lenne csiszolóvászont helyezni a nyomópofák és a próbatest közé. Ezzel növelni lehetne a súrlódást a felületek között, és meg lehetne figyelni úgy is a törési jelleget. Valószínűleg ez befolyásolná a mért szilárdsági értékeket is.



4.10. ábra: Szilánkosra tört hobbikerámia próbatestek, egymásbaragadt kúpok és egyben levált oldalfal

4.3 3D nyomtatott polimerek vizsgálati eredményei (PLA, TPLA, ABS, PJ, MJ)

A halmazreprodukciónak a 3D nyomtatási eljárások alkalmazásával támogatható. Ez esetben azon anyagok sora, melyekből válogathatunk leszükül, főleg polimerekre. Ugyan a polimerek mechanikai tulajdonságai jelentősen eltérnek a zúzottkövek anyagainak tulajdonságaitól, azonban egyes eljárásokkal komplexebb geometria is pontosan és ismételhetően létrehozható. Például a PolyJet technológiával lehetséges komplett halmazokat egyben kinyomtatni. Előnyös, hogy a nyomtatásokhoz szükséges számítógépes geometriai modell képezheti a DEM modell alapját is.



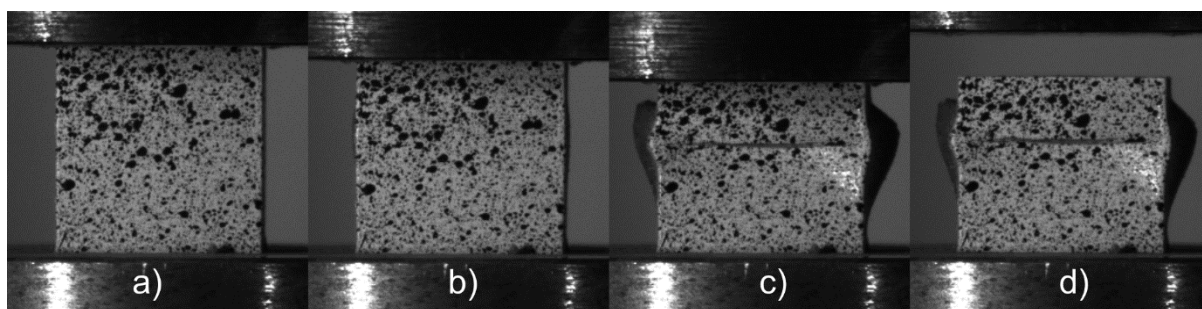
4.11. ábra: 3D nyomtatott polimerek nyomóvizsgálatainak korrigált eredményei

A 4.11. ábra három különböző technológiával készült próbatestek nyomóvizsgálatainak eredményeit összegzi. Ezek név szerint a MultiJet, a PolyJet és az ömledékrétegzés (FDM). Az utóbbi technológiával három anyagon végeztünk kísérleteket. A PLA-n, a TPLA-n és az ABS-

en. Ezek hőre lágyuló polimerek. Látható, hogy a PolyJet technológiával készült próbatestek rendelkeznek a legmagasabb nyomószilárdsági értékkel a felsoroltak közül, és elég hosszú lineáris szakasza van a görbe elején.

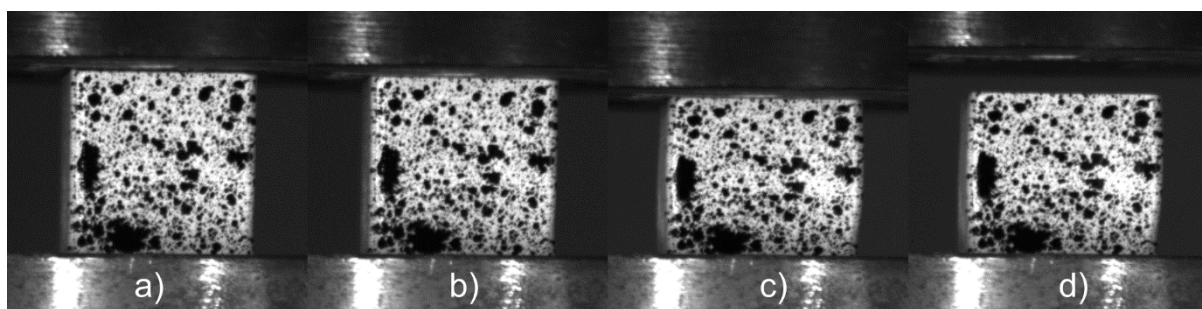
A Multi Jet Fusion technológiával gyártott próbatestnek nem definiálható a nyomószilárdsága, mivel a görbe kezdetektől monoton növekvő. Érdekes, hogy mennyire rövid az a szakasz a görbe elején, melyre Hook törvényét használhatjuk.

A TPLA és az ABS görbéket tekintve érdemes inkább a megfolyási pontot tekinteni a nyomószilárdsági értékek helyét, ugyanis ezen esetekben itt ér véget a lineáris viselkedés.



4.12. ábra: A PLA-ból készült próbatest összenyomásának folyamata

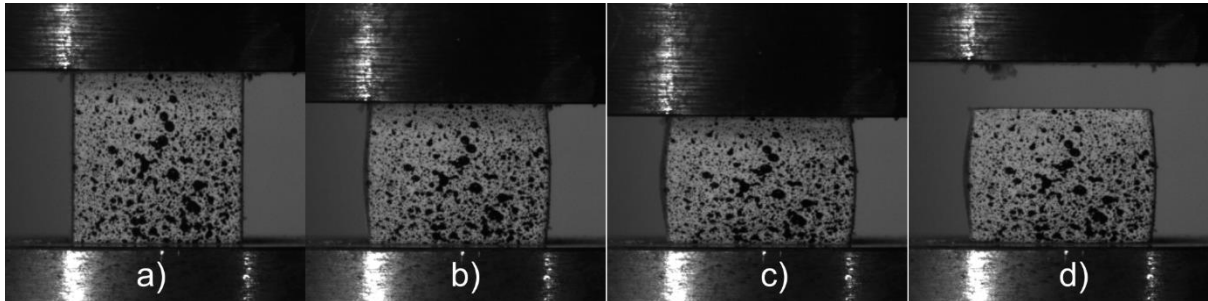
A PLA próbatestek nem készültek teljes tömörséggel, hanem 70%-os kitöltöttséggel. Ennek hatására a nyomószilárdsága valószínűleg alacsonyabb lett, mintha teljes kitöltöttséggel készültek volna. A tönkremenetel folyamatán (4.12. ábra) megfigyelhető, hogy a nem teljes kitöltöttség miatt a próbatest oldalai nyomás hatására páronként kiugranak, illetve begyűrődnek.



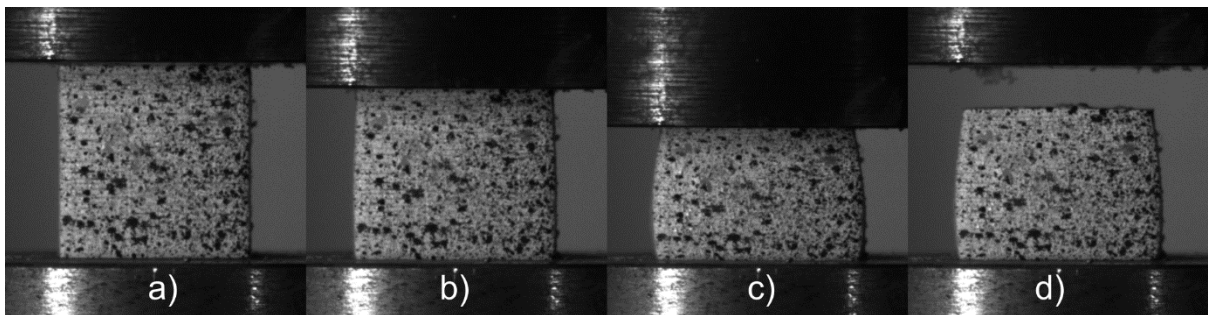
4.13. ábra: A TPLA-ból készült próbatest összenyomásának folyamata

A TPLA próbatestek teljes kitöltöttséggel lettek legyártva. Látható a 4.13. ábra szerint, hogy a tönkremeneteli folyamat polimerekre jellemző módon rugalmas és maradó alakváltozással történik. Ugyan ez a helyzet a többi 3D nyomtatott próbatest esetében is melyeket a 4.14. ábra, a 4.15. ábra, a 4.16. ábra, és a 4.17. ábra szemléltet. Érdekes megfigyelni, hogy a 4.15. ábra és a 4.16. ábra is a PolyJettel nyomtatott anyag tönkremenetelét mutatja, a tönkremenetel jellege mégis kissé más. Mivel más polimer próbatestek esetén ilyesmit nem tapasztaltunk, arra tudunk gondolni, hogy a próbatest térfogati anizotópiával rendelkezik. A 4.17. ábra mutatja a

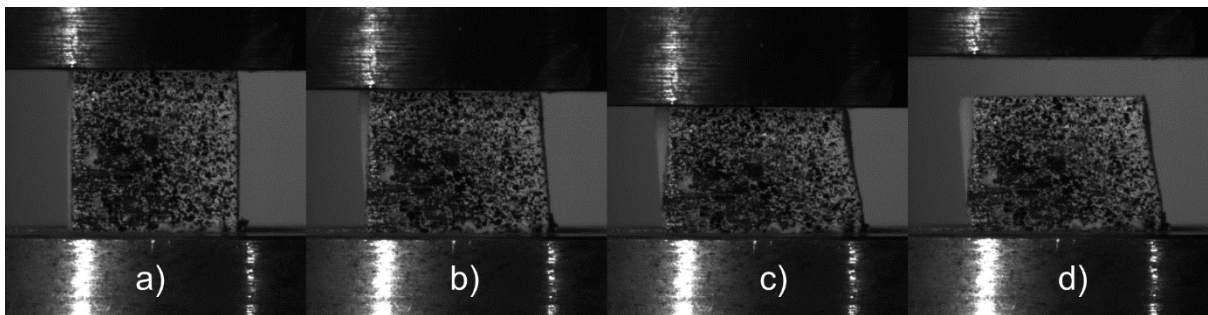
Multi Jet Fusion technológiával gyártott próbatestek tönkremenetelét. Érdekes, hogy a próbatestek sarkai „lekerekednek” a nyomási folyamat végére, a nyomópofák nyitása után pedig a nyomott felületek homorúak maradnak. Ezzel a technológiával készült anyagot a Zwick Z250-es gépen vizsgáltuk.



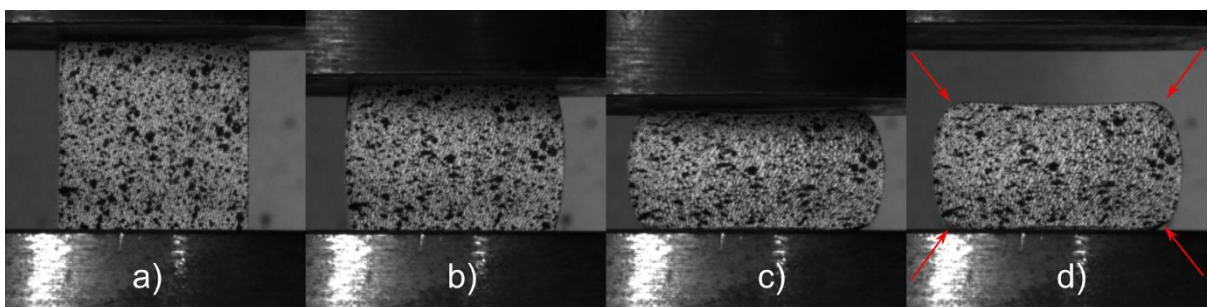
4.14. ábra: Az ABS-ből készült próbatest összenyomásának folyamata



4.15. ábra: A PolyJet technológiával készült próbatest összenyomásának folyamata szimmetrikus tönkremenetel esetén



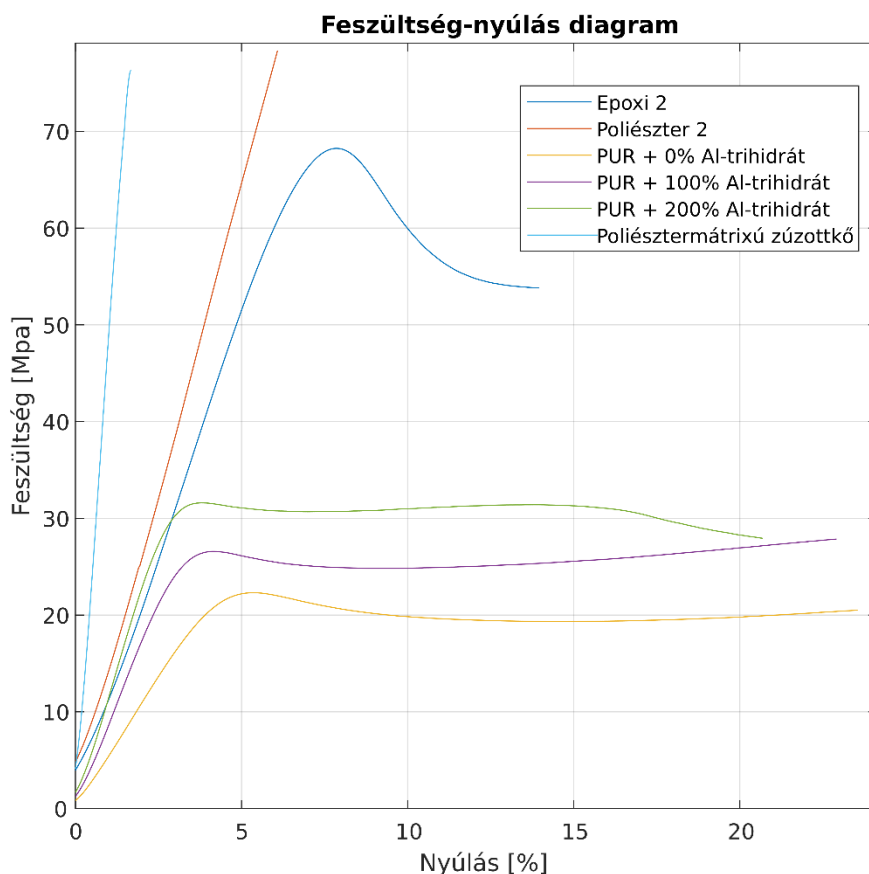
4.16. ábra: A PolyJet technológiával készült próbatest összenyomásának folyamata aszimmetrikus tönkremenetel esetén



4.17. ábra: A MultiJet technológiával készült próbatest összenyomásának folyamata

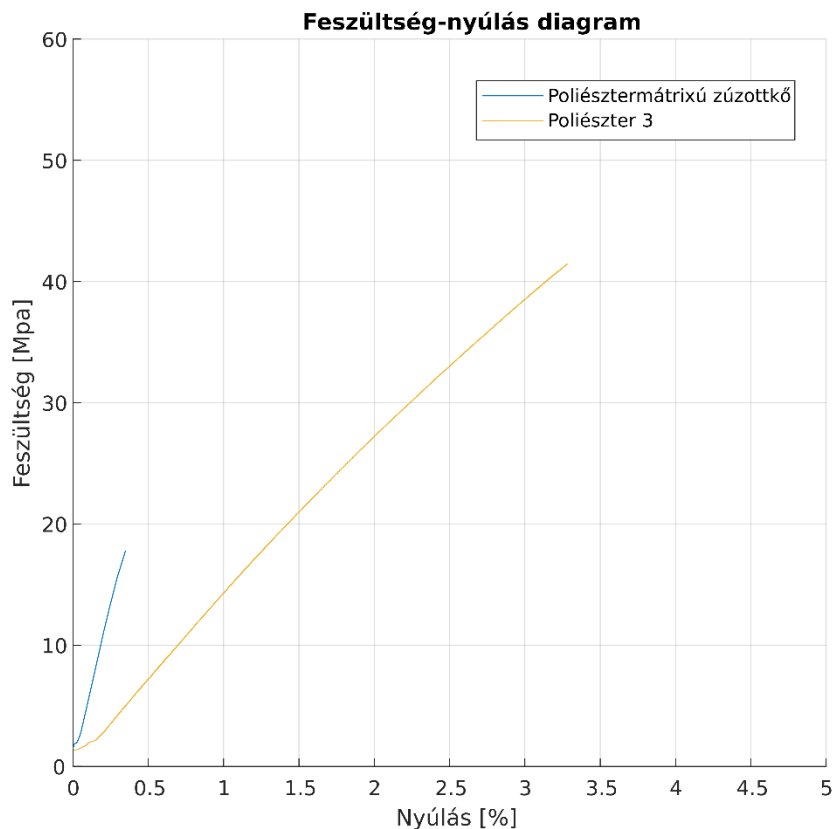
4.4 Öntött polimerek vizsgálati eredményei (E, P, PUR, PZ)

A zúzottkőszemcsék reprodukálásához kipróbáltunk különböző hőre keményedő gyantákat is. A gyantákból készült próbatestek tulajdonságait vizsgáltuk önmagukban, és töltőanyagokkal keverve. Epoxi-, poliészter- és poliuretán-alapgyantákat használtunk. A 4.18. ábra szemlélteti a nyomóvizsgálatok során kapott eredményeket egyes anyagok esetében. A diagramot tanulmányozva megállapítható, hogy a töltés hatására az alapgyanták szilárdsági és merevségi jellemzői nőttek a töltöttség függvényében.



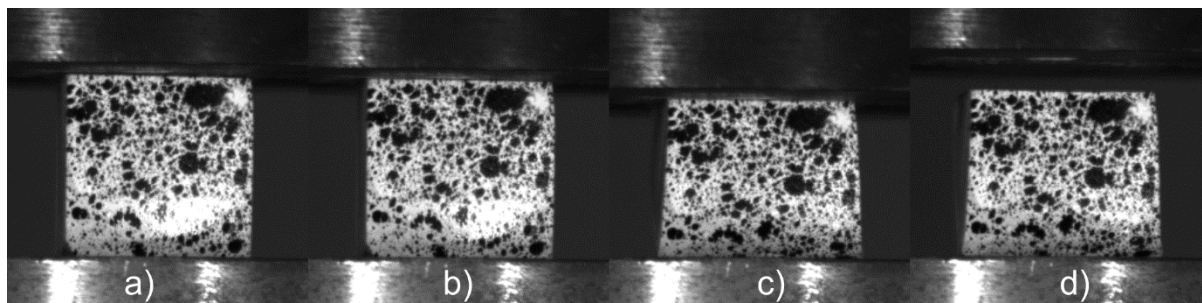
4.18. ábra: Öntött polimerek nyomóvizsgálatainak korrigált eredményei

Ugyan ez a jelenség figyelhető meg hajlítás esetén is (4.19. ábra). Igaz, csak a poliésztergyanta és annak zúzottkővel töltött változatát teszteltük. Látható, hogy a töltés hatására a szakadási nyúlás több mint ötödére csökkent, és a hajlító szilárdság is több mint felére visszaesett. Tehát az anyag erőteljes ridegedését okozta.

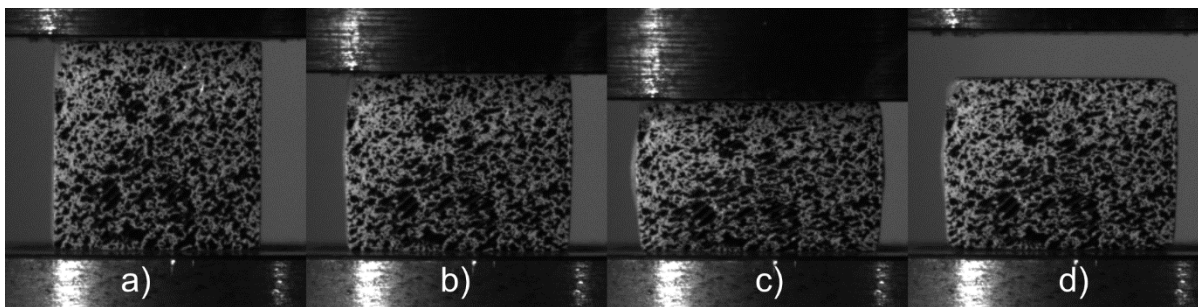


4.19. ábra: Öntött polimerek hajlítóvizsgálatainak eredményei

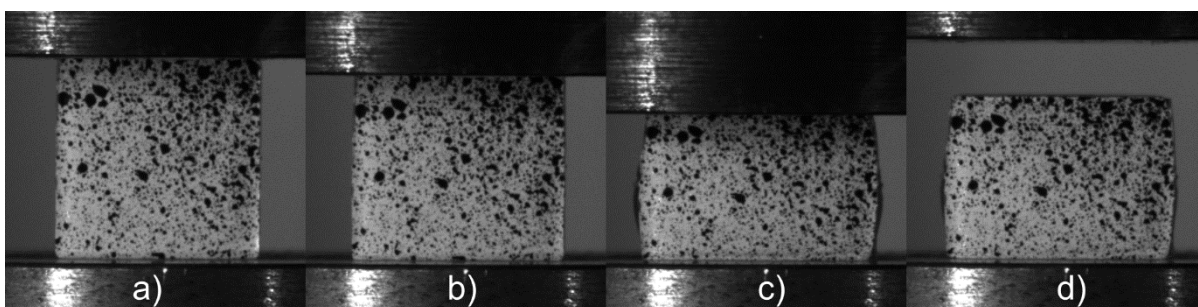
A töltetlen epoxigyanta tönkremeneteli folyamatában (4.20. ábra) nyomás hatására trapézosodás alakult ki. Ennek az is lehet az oka, hogy a súrlódási viszonyok mások voltak az alsó és a felső felületen a vizsgálat közben. Érdeemes lenne a vizsgálatokat esetleg újra elvégezni csiszolóvászont helyezve a próbatest és a nyomólapok közé. A töltetlen gyanták tönkremeneteli formái elég hasonlók, és analógiát mutatnak a 3D nyomtatott tömör próbatestekkel is. Ezek tönkremenetelét is rugalmas és maradó alakváltozás kíséri. (4.20. ábra, 4.21. ábra, 4.22. ábra)



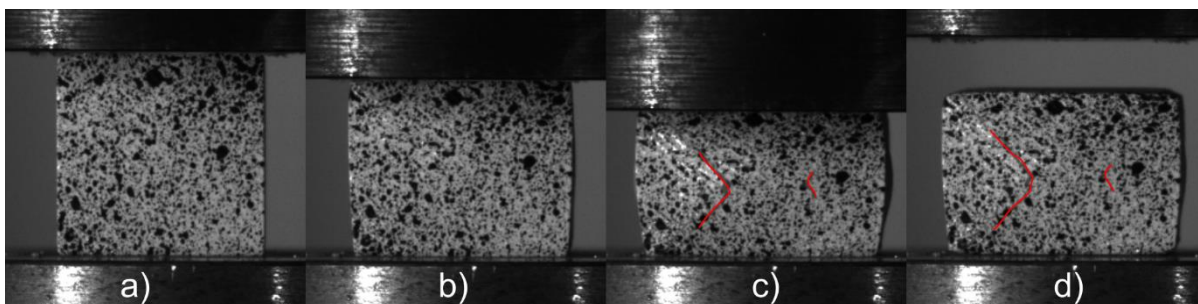
4.20. ábra: A töltetlen epoxigyantából készült próbatest összenyomásának folyamata



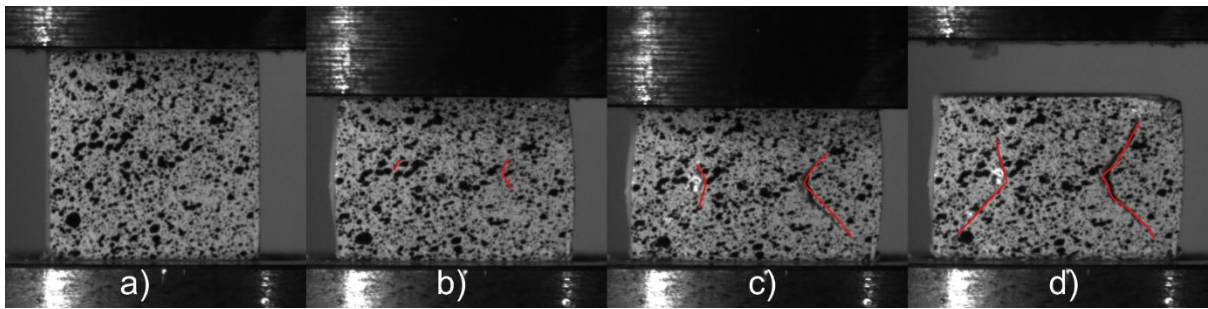
4.21. *ábra*: A töltetlen poliésztergyantából készült próbatest összenyomásának folyamata
 A szilárdsági jellemzőkön túl a tönkremenetel jellegét is befolyásolja az öntőgyanta töltése. Poliuretángyanta esetén figyelhető meg jól a jelenség. A töltetlen eset mellett 100%-os töltöttséggel (100 ml gyantához 100 gramm alumínium-trihidrátot kevertünk) és 200%-os töltöttséggel (100 ml gyantához 200 gramm alumínium-trihidrátot kevertünk) is hoztunk létre próbatesteket. Ezek tönkremeneteli folyamataik kísérhetők figyelemmel a következő három képsorozatokon. (4.22. *ábra* 4.23. *ábra* 4.24. *ábra*) Elemezve a tönkremeneteli folyamatokat a töltőanyag mennyiségének függvényében látható, hogy a tönkremenetel során a maradó deformáció mellett a töltött próbatestek ki is repedtek, a töltőanyag mennyiségének mértéke szerint.



4.22. *ábra*: A töltetlen poliuretángyantából készült próbatest összenyomásának folyamata



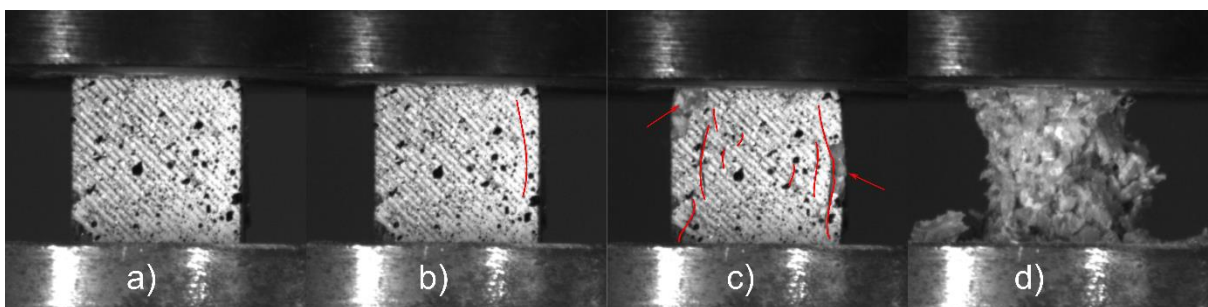
4.23. *ábra*: A 100% alumínium-trihidráttal töltött poliuretángyantából készült próbatest összenyomásának folyamata



4.24. ábra: A 200% alumínium-trihidráttal töltött poliuretángyantából készült próbatest összenyomásának folyamata

A 4.25. ábrán a poliésztermátrixú zúzottkő próbatestek tönkremeneteli folyamata látható. A próbatestek létrehozásához a Baumit Kft. által gyártott, előre kevert C20/25 szilárdsági osztályú készbetonból szitáltuk ki a cementet a zúzottkövek közül, majd mosás után ágyaztuk a zúzottkővet poliésztergyantába. A gyanta pontos típusa: Distitron 3501 S. A gyártás során az öntőformákba előbb a zúzottkővet helyeztük, majd arra öntöttük rá a gyantát.

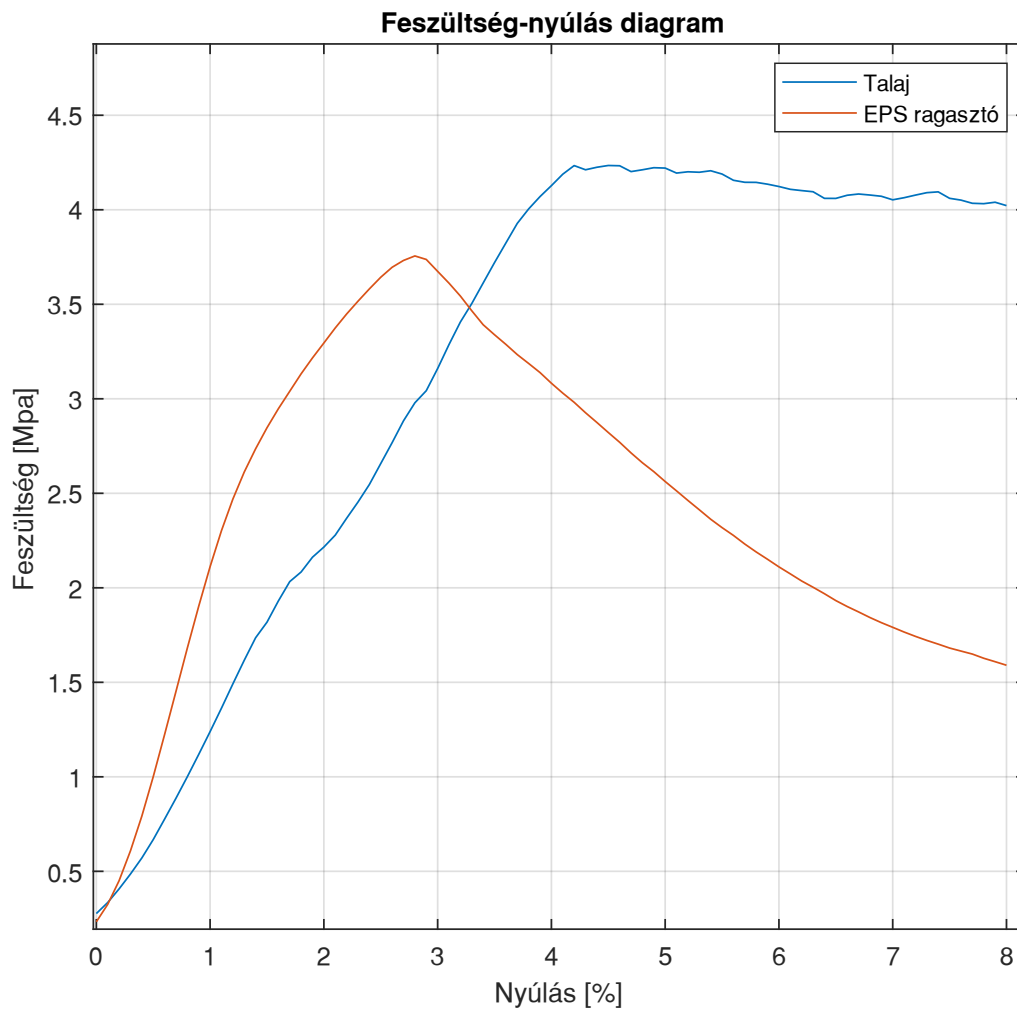
Kétféle tönkremeneteli mód figyelhető meg a poliésztermátrixú zúzottkő nyomóvizsgálata esetében. Vagy hirtelen robbanásszerű volt a törés a vizsgálat végén, erre mutat példát a 4.25. ábra más esetben a próbatest a nyomópofák között maradvan roskadt össze. A robbanásszerű tönkremenetel esetében jellemzően kúp formában megmaradt a próbatest alja és teteje, az oldalai pedig apró darabokra széttöredeztek. Megfigyelhető az is, hogy a térhálósodott poliésztergyanta és a zúzottkőszemcsék között kialakult adhéziós erő olyan nagy, hogy a törési felületek áthaladnak a zúzottköveken is.



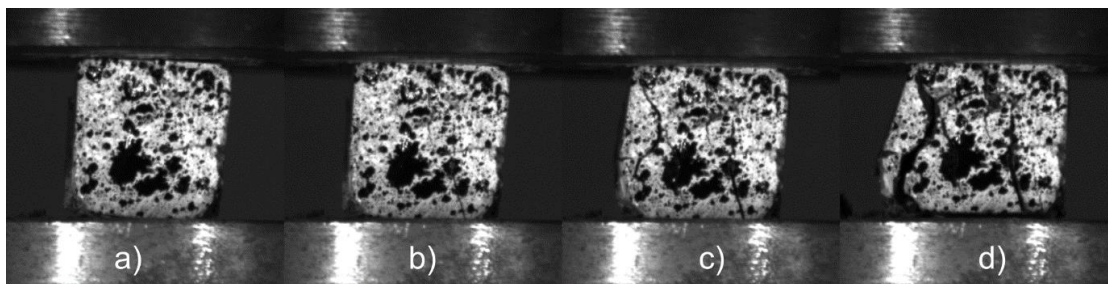
4.25. ábra: A poliésztermátrixú zúzottkő próbatest összenyomásának folyamata

4.5 Kis szilárdságú anyagok vizsgálati eredményei (F, ST)

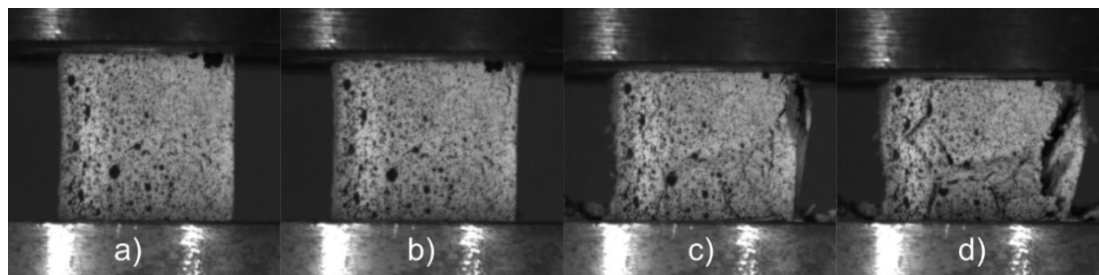
Vizsgálat alá helyeztünk két kis szilárdságú anyagot is. Agyagos talajból és EPS ragasztóból is készítettünk próbatesteket nyomóvizsgálathoz. A nyomóvizsgálatok átlagos eredményeit közli a 4.26. ábra. Mindkét anyag az építőipari anyagokhoz hasonló jellegű viselkedést mutat, de sokkal kisebb szilárdsági és merevségi értékeket kaptunk.



4.26. ábra: kis szilárdságú anyagok nyomóvizsgálatainak eredményei



4.27. ábra: Az agyagos talajból készített próbatetek összenyomásának folyamata



4.28. ábra: Az EPS ragasztóból készített próbatetek összenyomásának folyamata

4.6 Az eredmények összefoglalása

Táblázatos formában összefoglaltuk az egyes anyagok meghatározott jellemzőit. Ezen táblázatok alapján pedig majd a konklúzióban elemezzük előnyeiket és hátrányaikat zúzottkőszemcse-reprodukció szemszögéből.

A 4.1. táblázat tartalmazza a nyomóvizsgálatok eredményeinek átlagait, ehhez hasonlóan a 4.2. táblázat a hajlítóvizsgálatok eredményeit összegzi. A 4.3. táblázat pedig további hasznos információkat tartalmaz a különböző anyagokhoz, segítve a későbbi anyagválasztást. A 4.1. táblázatot tekintve a nyomószilárdság értékek közül zárójelben jelenítjük meg azokat, melyeket a mérési görbék végén kaptunk. Zárójelbe tettük az értékeket is melyek a korrigált modulusát nagyobb bizonytalansággal tudtuk meghatározni.

4.1. táblázat: Nyomóvizsgálat eredményei összefoglalva

Anyag/ technológia	Nyomószilárdság [Mpa]	Korrigált nyúlás nyomószilárdságnál [%]	Korrigált modulus [MPa]	Feszültség megfolyásnál [MPa]	Korrigált nyúlás megfolyásnál [%]
FDM-ABS	(42.53)	23.91	778	31.45	5.16
Térhálósodott epoxigyanta	(24.02)	23.89	462	18.20	5.73
Térhálósodott epoxigyanta 2	68.66	8.04	1031	68.57	7.86
Agyagos talaj	4.55	6.07	124	1.13	0.70
Habarcs	21.27	(0.93)	(2534)	21.14	0.89
Kerámiapor	31.62	(0.69)	(4839)	25.30	0.52
Kerámiapor 2	41.05	(0.36)	(11870)	33.69	0.29
Multi Jet Fusion	(92.68)	29.86	1075	-	-
Térhálósodott poliésztergyanta	54.23	8.36	853	54.06	7.99
Térhálósodott poliésztergyanta 2	(90.99)	7.29	1189		
PolyJet	81.33	9.36	1030	81.26	9.22
FDM-PLA	22.22	4.48	663	20.68	3.79
FDM-TPLA	43.25	17.35	866	40.36	5.95
PUR	22.31	5.37	545	22.26	5.12
PUR + 100% Alumínium- trihidrát	(27.99)	23.29	867	26.51	3.93

PUR + 200% Alumínium-trihidrát	31.62	5.82	1148	31.44	3.48
Aljzatkiegyenlítő	15.94	(0.68)	(2624)	15.93	0.68
Aljzatkiegyenlítő 2	24.03	(0.95)	(2732)	24.00	0.95
Poliésztermátrixú zúzottkő	78.30	1.79	4845	78.29	1.79
EPS ragasztó	1.05	1.85	71	1.00	1.58
EPS ragasztó 2	3.80	2.84	207	3.75	2.66
Beton 2	26.96	(0.51)	(6062)		
Beton	20.00	(0.52)	(4465)		
Andezit 1	207.31	(0.78)	(27118)		
Andezit 2	116.72	(0.74)	(17312)		
Bazalt 1	205.45	(0.84)	(23835)		

4.2. táblázat: Hajlítóvizsgálat eredményei összefoglalva

Anyag	Hajlítószilárdság [Mpa]	Nyúlás hajlítószilárdságnál [%]	Hajlítási modulus [MPa]	Feszültség megfolyásnál [MPa]
Térhálósodott poliésztergyanta	57.41	4.31	1715	Meghajlik, vagy kagylósan törve több pattan
Andezit	34.33	0.38	8784	kettétörve leesik
Bazalt 2	25.01	0.28	8679	kettétörve leesik
Poliésztermátrixú zúzottkő	20.59	0.42	5408	kettétörve leesik
Kerámiapor	18.71	0.18	10423	kettétörve leesik
Aljzatkiegyenlítő	7.71	0.11	7007	törés után nem esik két darabra
Habarcs	7.60	0.12	6377	törés után nem esik két darabra
Beton 2	6.93	0.09	8320	törés után nem esik két darabra
EPS ragasztó	1.85	0.15	1399	törés után nem esik két darabra

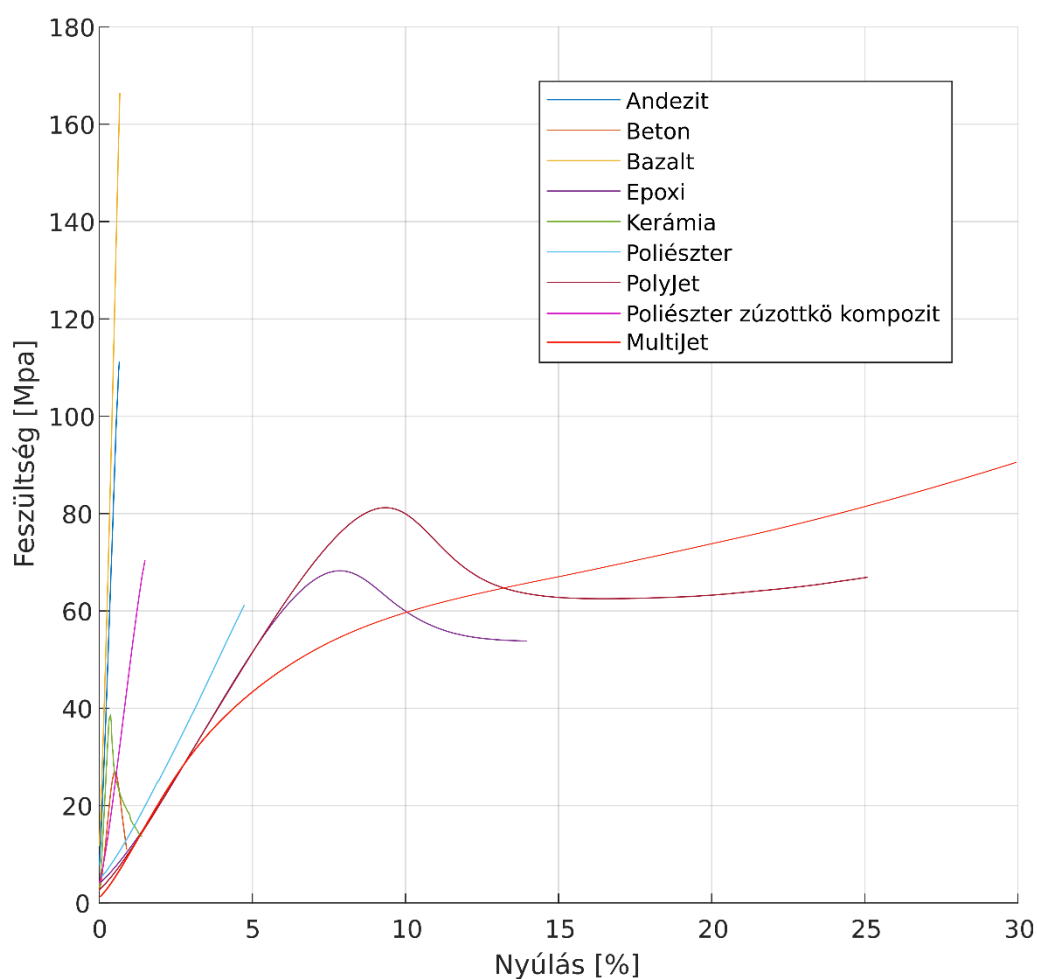
4.3. táblázat: Anyagok egyéb jellemzői összefoglalva

Anyag	Gyárthatóság	Gyártás kezdetétől a mechanikai vizsgálatokig javasolt várakozási idő	Tönkremenetel formája nyomóvizsgálatoknál	Becsült alapanyag-, gyártásköltség 8 cm³-es kocka próbatestre [Ft/db]	Elérhetőség
FDM-ABS	számítógéppel támogatott	~30 perc/ próbatest	maradó alakváltozás	100	2
Térhálósodott epoxigyanta	közepes	min. 1 hét	maradó alakváltozás	80	2
Térhálósodott epoxigyanta 2	közepes	min. 1 hét	maradó alakváltozás	80	2
Agyagos talaj	körülményes	1-2 hét	széttöredezve összenyomódik	-	1
Habarcs	körülményes	min. 8 nap	széttöredezve összenyomódik	1.5	1
Kerámiapor	egyszerű	min. 5 nap	szilánkosan törik	20	2
Multi Jet Fusion	számítógéppel támogatott	3 nap gyártási idő, nagy mennyiség esetén is	maradó alakváltozás		1
Térhálósodott poliésztergyanta	egyszerű	min. 3 nap	maradó alakváltozás/ kagylós törés	35	2
PolyJet	számítógéppel támogatott	~30 perc/ próbatest	maradó alakváltozás	2800	1
FDM-PLA	számítógéppel támogatott	~30 perc/ próbatest	maradó alakváltozás	100	2
FDM-TPLA	számítógéppel támogatott	~30 perc/ próbatest	maradó alakváltozás	100	2
PUR	egyszerű	min. 3 nap	maradó alakváltozás	75	2
PUR + 100% Alumíniumtrihidrát	közepes	min. 3 nap	kireped	75	2
PUR + 200% Alumíniumtrihidrát	közepes	min. 3 nap	kireped	75	2
Aljzatkiegyenlítő	egyszerű	min. 3 nap	széttöredezve összenyomódik	4	2
Poliésztermátrixú zúzottkő	közepes	min. 5 nap	széttöredezve összenyomódik /robbanásszerű	18	2

EPS ragasztó	körülményes	min. 7 nap	széttöredezve összenyomódik	2	2
Beton	körülményes	min. 8 nap	széttöredezve összenyomódik	1.5	1
Andezit 1	-	-	robbanásszerű	-	-
Andezit 2	-	-	robbanásszerű	-	-
Bazalt 1	-	-	robbanásszerű	-	-

A 4.29. ábra szemlélteti azon anyagok jellemző korrigált nyomóvizsgálati eredményeit, melyek alkalmasak lehetnek később vasúti zúzottkőszemcsék modellezésére. A diagram alapján összehasonlíthatók a valódi zúzottkövek anyagjellemzői a mesterségesen előállított anyagok jellemzőivel.

Zúzottkőmodellezéshez ajánlott anyagok feszültség-nyúlás diagramjai



4.29. ábra: Vasúti zúzottkő reprodukcióhoz ajánlott (alap)anyagok nyomóvizsgálatok során kapott korrigált eredményei összehasonlítva valódi zúzottkövek anyagainak korrigált eredményeivel

5 Konklúzió

Munkánk során arra jutottunk, hogy számos anyagból lehetséges reprodukálható szemcséket létrehozni. Vasúti zúzottköveket modellező poliéder formájú fizikai szemcsemodelleket azonban javaslatunk szerint nem minden anyagból érdemes készíteni a későbbi alakhatásvizsgálatokhoz.

Meg kell állapítanunk, hogy zúzottkövek nyomási és hajlítási modulusát, valamint nyomó- és hajlítószilárdságát egyetlen mesterségesen létrehozott anyaggal sem sikerült megközelíteni, ezeken kívül azonban más szempontok alapján is vizsgáldtunk. Hasonlóságokat és különbségeket keresünk további anyagtulajdonságok között. Olyan további szempontokat vettünk figyelembe, mint tönkremenetel jellege, anyag felületének jellemzői szemrevételezéssel. Nem hagytuk azonban figyelmen kívül a szemcsék létrehozásának körülményességét és árát sem. Konkrét sorrendet nem kívánunk felállítani az anyagok felhasználása tekintetében. Néhány anyag előnyére és hátrányára igyekszünk rávilágítani azzal a céllal, hogy megfelelően tudjon döntést hozni anyagválasztáskor ezen elemzések alapján azon kutató, aki vasúti zúzottkövek fizikai modellezésével szeretne foglalkozni.

Jellemzően a monoton növekvő nemlineáris nyomódiagram a polimereknél fordult elő. A vasúti zúzottkövek anyagánál átlagosan 116 [MPa]-tól 207 [MPa]-ig kaptunk értékeket. Látható, hogy a legnagyobb nyomószilárdság, melyet el tudtunk érni mesterséges anyagoknál a poliésztergyantából készült próbatestek 2. sorozatánál adódott. Ugyan ez esetben is a görbe végén mértünk maximális értékeket, azonban elértük a gép méréshatárát a megfolyás előtt. Nem meglepő módon egészen magas (78.30 [Mpa]) nyomószilárdságot mértünk poliésztermátrixú zúzottkő esetében is. Figyelemre méltó nyomószilárdsággal rendelkezik még a PolyJet technológia anyaga, és az epoxigyantából öntött próbatestek. Szemlélteti mindezt a *4.29. ábra*.

A tönkremeneteli módokat tekintve (4.3. táblázat) nyomóvizsgálat esetén csupán a poliésztermátrixú zúzottkő mutatott ugyanolyan robbanásszerű tönkremenetelt, mint a bazalt és az andezit. Minden más anyag esetében ez nem volt jellemző.

A hajlítóvizsgálatok során a tönkremeneteli módokat elemezve (4.2. táblázat) arra lettünk figyelmesek, hogy a zúzottkőanyagok viselkedéséhez ez esetben is a kerámia és a poliésztermátrixú zúzottkő hasonlít a legjobban. Ezeknél ugyanis a hajlítószilárdságot elérve ezen anyagokból készült próbatestek – úgy, mint az andezitnél és a bazaltnál – két részre törve leestek. Igaz, poliésztermátrixú zúzottkő nagyobb nyúlásokat mutatott a többi említett

anyaghoz képest. Érdeemes megfigyelni, hogy hajlításnál nagyon kicsi elmozdulásokat, és viszonylag nagy erőket mértünk a kerámia esetében. Olyannyira, hogy meghaladja hajlítási modulusa a vasúti zúzottkövek anyagainak hajlítómódulusát. Nem szabad azonban elfelejtkezni arról sem, hogy a két próbatest között jelentős méretbeli különbségek voltak.

Ha szemrevételezéssel vizsgáljuk az anyagok felületét, megítélésünk szerint a kerámiaporból készült próbatestek felületi minősége közelíti meg legjobban az andezit, és a bazalt felületi minőségét. Ezen kívül a kerámiánál elég kis nyúlásokat mértünk nagyobb erők esetén is. Tehát elég nagy merevségű anyag. Sejtéseink szerint ezzel az anyaggal lehet elérni mesterségesen a vizsgált anyagok közül a legnagyobb merevséget. Hátránya viszont, hogy nyomószilárdsága az andezittől és a bazalttól nagyon távol áll.

A polimerek előnye vasúti zúzottkövek fizikai modellezésénél úgy nyer értelmet, ha technológiát is társítunk hozzá. Polimerekből ugyanis lehetséges virtuálisan létrehozott szemcsemodell fizikai létrehozása additív technológiák egyikével. (PolyJet, Multi Jet Fusion, FDM) Amennyiben az ár nem számít, és pontos geometriájú halmazra van szükség a vizsgálatokhoz, a PolyJet technológiával célszerű előállítani a halmazokat. Ezzel a technológiával ugyanis komplett halmazok egyben gyorsan reprodukálhatók. Igaz, az anyag nem igazán hasonlít a zúzottkövek anyagaihoz, azonban elég nagy (81 [MPa]) nyomószilárdsággal rendelkezik, és merevsége is a nagyobbak közé sorolható a polimerek között. Ezen kívül nagy méretpontossággal állíthatók elő vele szemcsék, jó felületi érdességgel. Hasonló esetben használható a Multi Jet Fusion technológia is. Akkor éri meg ezt a technológiát választani, ha nagy mennyiségű pontos zúzottkőszemcsére van szükségünk rövid idő alatt. A technológia hátránya, hogy nem vagyunk képesek komplett halmazokat ilyen módon létrehozni, és a létrehozott testek felső felületének minősége kissé eltér a többitől. Észrevehető a nyomtatott testekben némi anizotrópia is. Az FDM technológiák segítségével viszonylag olcsón lehet számítógéppel modellezett szemcséket létrehozni, viszont ezen modellek nagy felületi anizotrópiával rendelkeznek, és a gyártási folyamat nem túl termelékeny, azonban gyártás után egyből használható kísérletezésre a kész modell. Lehetőséget nyújt a technológia arra is, hogy egyben nyomtassunk komplett halmazt. Polimereknél érdemes észben tartani, hogy ridegíthetők azzal, ha üvegesedési hőmérsékletük alá hűtjük őket. Így csökkenthető az alakváltozásuk és megnő a modulusuk. További befolyással bír a polimerek tulajdonságaira azok nedvességtartalma. Érdeemes szárítani a próbatesteket, ha azt akarjuk, elérni, hogy azok ridegebben viselkedjenek.

A betont nem tartjuk teljesen elvetendőnek vasúti zúzottkövek modellezéséhez. Ez a legolcsóbb megoldások egyike, széles körben beszerezhető. Azonban viszonylag körülményes a próbatestek elkészítése: a levegőbuborékok rezgetése, a próbatestek utókezelése, továbbá célszerű hosszú időt várni a próbatestek létrehozásától számítva a vizsgálatok előtt.

Nem javasoljuk zúzottkövek modellezéséhez az agyagos talajt és az EPS ragasztót azok kis szilárdsága miatt.

Nem ajánljuk továbbá adalékanyag nélkül egyetlen műgyanta használatát sem erre a célra. (epoxigyanta, poliuretángyanta, poliésztergyanta) Annál inkább töltött formában. Ahogy a poliésztermátrixú zúzottkőnél is láttuk jelentősen más tulajdonságú próbatestet kapunk, ha különböző töltőanyagokat alkalmazunk különböző mennyiségben. (Fontos, jelentősen függ az öntőgyantákból készült próbatestek szilárdsági jellemzői az öntéstől a nyomóvizsgálatokig eltelt időtől.) Érdekes lehet ezzel tovább kísérletezni, például javasoljuk kipróbálni a töltést andezit és bazalt szemcsékkel poliészter-, és epoxigyanta mátrixanyagba ágyazva is.

Az epoxigyanta és poliésztergyanta közül tapasztalataink szerint a poliésztergyantával egyszerűbb dolgozni, könnyebben elválik a formától, és jelentősen olcsóbb is. Szakirodalom szerint szilárdsági és merevségi értékeik alacsonyabbak az epoxigyantából készült próbatesteknél, méréseinkkel azonban ezt nem tudtuk igazolni. (Valószínűleg az epoxigyanta komponenseinek pontos keverési arányát nem sikerült megfelelően beállítanunk.) Poliésztergyanta öntése közben mindenképpen ajánlott munkavédelmi maszkot viselni. Érdekes szabad levegőn, vagy elszívással rendelkező laboratóriumban dolgozni ezzel az anyaggal, mivel sztirolt párologtat. Ezzel szemben az epoxigyantának nincsen kellemetlen szaga, azonban az azzal való érintkezést mindenképpen kerülni kell, mert bőrirritációt okoz.

Meglátásaink szerint a poliuretángyantából készült próbatestek, a habarcs és az aljzatkiegyenlítő nem rendelkezik kimagaslóan jó, sem nagyon rossz tulajdonságokkal. A poliuretángyanta ára viszonylag magas. A habarccsal ugyan úgy körülményes a munka, mint a betonnal (a rezgetést leszámítva), igaz, nagyon olcsó. Habarcs helyett azonban jó alternatíva az aljzatkiegyenlítő, mivel tulajdonságaik megegyeznek, de tapasztalataink szerint sokkal rövidebb idő elteltével bevethetők kísérletezésre az abból készült próbatestek, és utókezelést sem kíván.

6 Összefoglalás

Az 1.1-es fejezetben felsorolt céljaink között a következők szerepeltek: Olyan anyagok felkutatása, melyekből általunk meghatározott geometriájú, reprodukálható szemcsék készíthetők. Méréseink eredményei alapján anyagok összehasonlítása vasúti zúzottkövek mechanikai jellemzőivel. Célként határoztuk meg azt is, hogy javaslatot tudjunk tenni, milyen anyagok és módszerek alkalmazhatóak vasúti zúzottkőszemcsék és egyéb szemcsés anyagok modellezésére a kísérleti alakhatás-vizsgálatokban.

Szakirodalomkutatásunk során utánajártunk milyen alakhatásvizsgálatra irányuló kutatások folytak a közelmúltban, és milyen eredményekre jutottak a kutatók. Összegyűjtöttük azon anyagcsoportok jellemzőit, melyek – feltételezéseink szerint – szemcsés anyagalmazok szemcséit közelítő geometriai reprodukálásához és fizikai modellezéséhez alkalmasak. Megkerestük milyen tulajdonságokkal rendelkeznek vasúti a zúzottkövek anyagai, hogy később javaslatot tehesünk vasúti zúzottkőalmazok fizikai modellezéséhez alkalmazható anyagokra. Továbbá szabványkutatást végeztünk, hogyan határozhatók meg egyes anyagok mechanikai jellemzői.

Az esetek többségében a szakirodalomból merített tudásunk alapján választottuk ki azon anyagokat, melyeken mechanikai vizsgálatokat végeztünk. Bizonyos esetekben pedig a gyártási technológia határolta be a választható anyagok körét.

A szakirodalom és szabványok alapján, de nem konkrét szabvány szerint, összeállítottunk egy mérési tervet. A kiválasztott anyagokból próbatesteket készítettünk, melyeken hárompontos hajlító- és nyomóvizsgálatokat végeztünk. A nyomóvizsgálatok során a próbatestek elmozdulásait – ebből adódóan a nyúlásokat és a nyomási modulusokat – nem tudtuk minden anyag esetében megfelelő pontossággal direkt mérési eredmények alapján meghatározni, azonban ennek ellenére javaslatokat tudunk tenni arra, milyen anyagok használhatók a későbbi vasúti zúzottkőszemcsé-reprodukcióhoz. Elemzéseink során alkotott javaslataink szerint a vasúti zúzottkő alakjaihoz hasonló poliéder szemcsék reprodukálásánál a következő anyagok felhasználását javasoljuk: hobbikerámia, beton, poliésztermátrixú zúzottkő, PolyJet és Multi Jet Fusion nyomtatással előállított modell anyaga. Dolgozatunk további irányt mutat, milyen anyag típusokat érdemes a továbbiakban még kipróbálni, hogy közelebb kerülhessünk a vasúti zúzottkövek anyagainak tulajdonságaihoz. A mérési eredmények elősegíteni kívánják az alakhatásvizsgálatokra irányuló hosszútávú kutatási célok elérését. Reméljük, hogy egy lépéssel közelebb kerülhetünk ezen munkánkkal ahhoz, hogy egykor pontos összefüggésekkel tudjuk leírni a fizikai szemcsealmazok mechanikai viselkedését.

7 Tervek a jövőre

Mindaz, amivel eddig foglalkoztunk alapjait képzik egy hosszútávú kutatásnak. Ugyan számos olyan technológiával készült anyag létezik még, melyeket nem vetettünk eddig vizsgálat alá (például: SLS illetve SLA additív technológiákkal készülő próbatestek anyagai), azonban néhány vizsgált anyag megítélésünk szerint már alkalmazható a további halmazszintű kutatásaink és kísérleteink során. Ezen mérési eredmények tehát utat nyitottak a tömeges poliéder alakú szemcsereprodukálás irányába. El tudunk kezdeni halmazreprodukciónal, és azokon végzett mechanikai vizsgálatokkal, továbbá DEM modellezéssel foglalkozni.

További feladat a jövőben az eddig elemzett anyagok súrlódási viszonyainak vizsgálata mind saját magával, mind acéllal történő súrlódás esetén. Ezen vizsgálatok is elősegítik a DEM-ben történő modellezést.

8 Hivatkozások

1. **Dr. GÁLOS, Miklós, OROSZ, Ákos és Dr. RÁDICS, János Péter, Dr. TAMÁS, Kornél.** Diszkrét elemes számítógépes módszer a vasúti zúzottkő ágyazat viselkedésének modellezésére. Sínek Világa. máj., 2017.
2. **GONZÁLEZ, Joaquin Irazábal.** Numerical analysis of railway ballast behaviour using the Discrete Element Method. hely nélkül. : TDX (Tesis Doctorals en Xarxa), 2017.
3. **LANDAUER, Johann, és mtsai.** Particle shape matters – Using 3D printed particles to investigate fundamental particle and packing properties. 2020., 361. kötet.
4. **SHUNYING, Ji, SIQIANG, Wang és ZONGYAN, Zhou.** Influence of particle shape on mixing rate in rotating drums based on super-quadric DEM simulations. 2020., 31. kötet.
5. **Dr. BAGI, Katalin.** A diszkrét elemek módszere. Budapest : BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, 2007. 978-963-420-929-4.
6. **Dr. KAZINCZY, László.** <http://www2.uvt.bme.hu/>. BME Út és Vasútépítési Tanszék. [Online] [Hivatkozva: 2020. október 12.]
http://www2.uvt.bme.hu/kazinczy/1.%20Oktat%C3%A1si%20anyagok_/1.1.%20El%C5%91ad%C3%A1sok_/1.1.2.%20K%C3%B6zleked%C3%A9si%20%C3%A9tes%C3%ADtm%C3%A9nyek%20p%C3%A1lyaszerkezetei%20-%20Vas%C3%BAti%20p%C3%A1lyaszerkezetek_/2.9.0.%20%C3%81gyazat.pdf.
7. **JUHÁSZ, Erika és Dr. habil. FISCHER, Szabolcs.** A vasúti ágyazati szemcsék degradációjának mérése laboratóriumi körülmények között. Sínek Világa. 5., 2019.
8. **Dr. habil. GÁLOS, Miklós, Dr. SZABÓ, József és SZEKERES, Dénes.** Zúzottkő ágyazat viselkedésének megítélése. Sínek Világa. 4., 2016.
9. **GÁLOS, Miklós és VÁSÁRHELYI, Balázs.** Közestestek osztályozása az építő. Budapest : Műszaki egyetemi könyvkiadó, 2006.
10. **DINÇER, İsmail, és mtsai.** Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. 2004., 63. kötet.
11. **LIM, Wee.** Mechanics of railway ballast behaviour. PdD Thesis., Nottingham, UK : University of Nottingham, 2004.
12. **INDRARATNA, B., IONESCU, D. és CHRISTIE, H. D.** Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests. 1998., 124. kötet.
13. **Dr. PALOTÁS, László és Dr. BALÁZS, György.** Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Budapest : Akadémiai kiadó, 1980. ISBN 963 05 2289 6.

14. <http://www.betonopus.hu>. [Online] 2009. november. [Hivatkozva: 2020. Okt. 2.]
<http://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/62-ultra-nagy-szilardsagu-beton.pdf>.
15. wikipedia. <https://hu.wikipedia.org>. [Online] [Hivatkozva: 2020. szept. 14.]
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Beton>.
16. <http://www.betonopus.hu/>. Betonopus Betontechnológiai és Kőzetalkalmazástani Mérnökiroda Bt. [Online] [Hivatkozva: 2020. szept. 14.]
<https://www.betonopus.hu/szakmernoki/betonszilardsag.pdf>.
17. **Dr. KAUSAY, Tibor**. www.betonopus.hu. [Online] [Hivatkozva: 2020. okt. 12.]
<https://www.betonopus.hu/szakmernoki/140-habarcs.pdf>.
18. **PUKÁNSZKY, Béla és MÓCZÓ, János**. Műanyagok. Budapest : Typotex Kiadó, 2011. ISBN 978-963-279-481-5.
19. resin-expert. [Online] 2020. [Hivatkozva: 2020. október 17.] <https://resin-expert.com/en>.
20. <http://www.pt.bme.hu/>. [Online] [Hivatkozva: 2020. aug. 31.]
http://www.pt.bme.hu/segedletek/a2_hajlitas_v13.pdf.
21. hun.thehouseofchronic.com. [Online] [Hivatkozva: 2020. október 21.]
<https://hun.thehouseofchronic.com/3934000-polymer-concrete-composition-types-features-application-technology-and-reviews>.
22. **MISKOLCZI, Norbert**. Műanyagok kémiája és technológiája. Veszprém : Pannon egyetem, 2012.

Melléklet

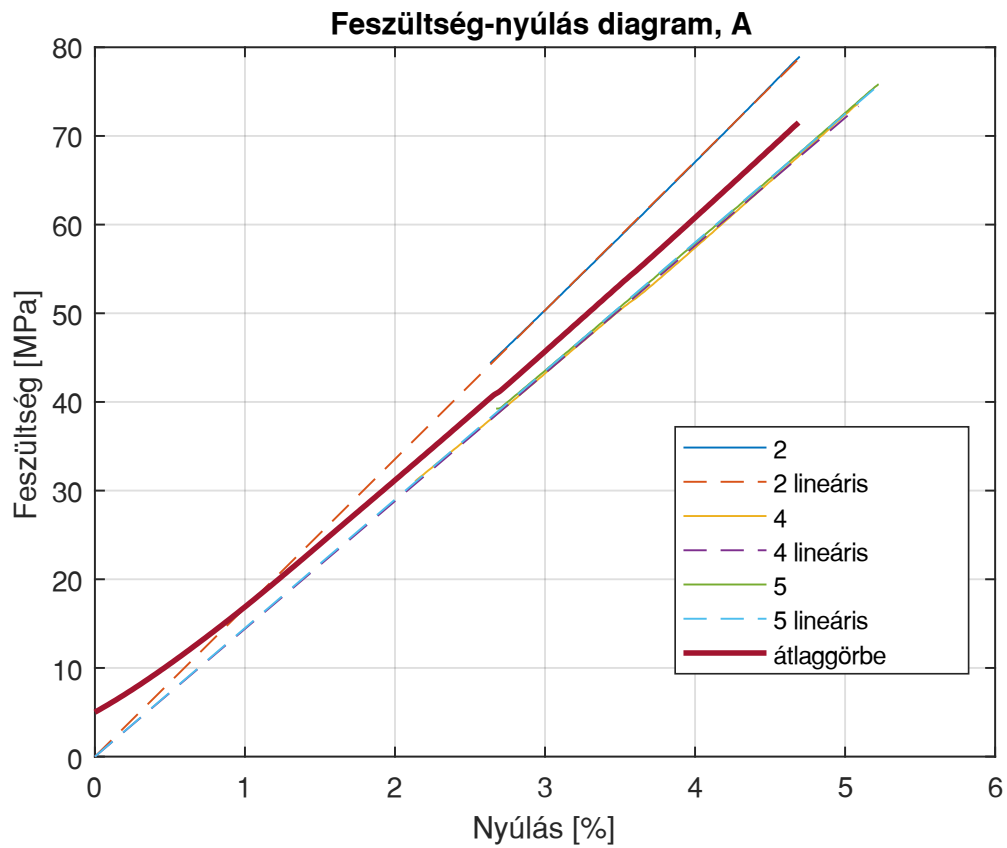
A melléklet tartalmazza az összes elvégzett nyomó és hajlítópróba kiértékelt diagramjait. A diagramokon az univerzális szakítógép érzékelője által mért értékekkel számolt nyúlásokat tüntettük fel korrekció nélkül, továbbá a gépen lévő erőmérő cella által mért erőből számolt feszültséget. A rövidített jelölések információt nyújtanak a próbatestekről. Amennyiben a rövidítésben szám szerepel, az más előéletű próbatestet jelöl a szám nélküli, vagy más számmal rendelkező párjához képest. Ha hajlító és nyomópróba esetén ugyanazon anyagnál ugyanazon szám szerepel, akkor az azonos előélettel rendelkező próbatesteket jelöl. A jelölés végén lévő „h” mutatja, hogy hajlítóvizsgálatról van szó.

Kivételt képeznek ez alól a jelölésrendszer alól az andezit és bazalt próbatestek. A következő táblázat szemlélteti azok értelmezését:

Méréssorozat jelölése	A dokumentációban a jelölése	Használt mérőgép	Vizsgálat típusa
A	Andezit	Zwick Z050	Nyomó
A2	Andezit 2	Zwick Z250	Nyomó
A3	Andezit	Zwick Z250	Nyomó
A4	Andezit 2	Zwick Z250	Nyomó
Ah	Andezit	Zwick Z050	Hajlító
BA	Bazalt	Zwick Z050	Nyomó
BA2	-	Zwick Z050	Nyomó
BA3	Bazalt	Zwick Z250	Nyomó
BA2h	Bazalt 2	Zwick Z050	Hajlító

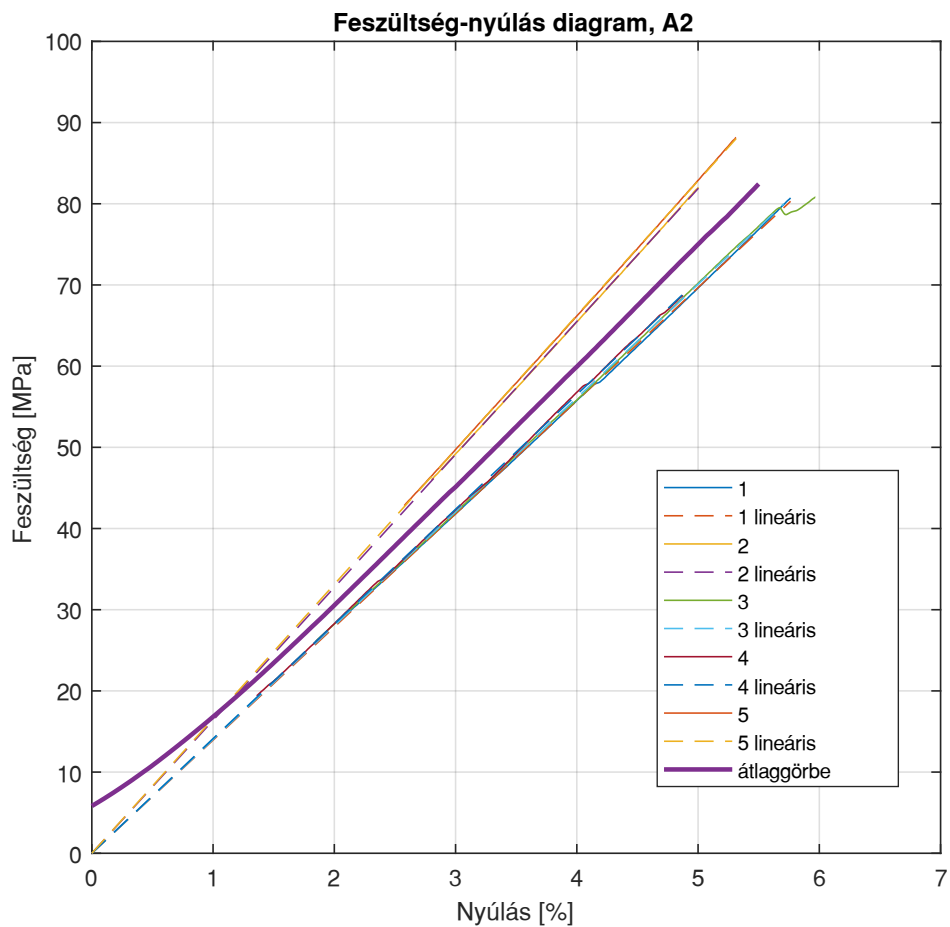
A diagramokon lévő „megfolyási pont” a görbe felfutási szakaszát követően az első feszültségvisszaesési pontot jelöli. A nyomószilárdság a maximális feszültséget jelöli.

1. Andezit nyomóvizsgálat (A)



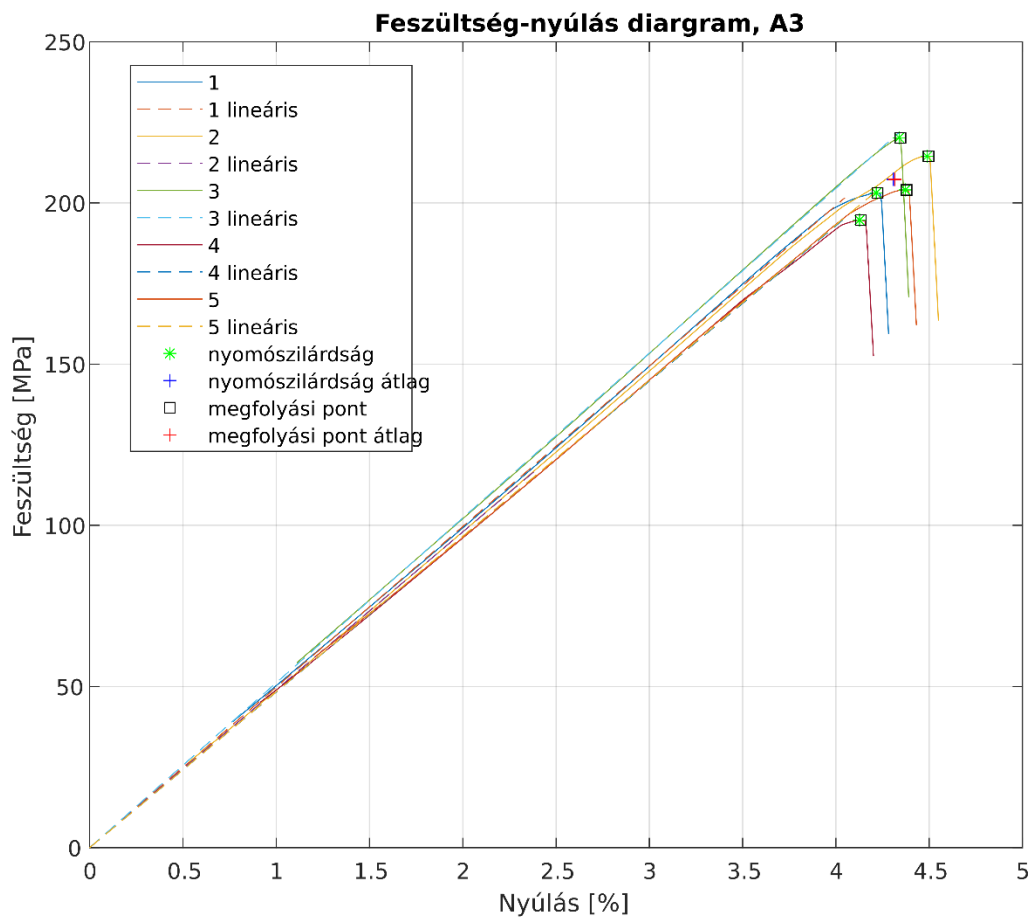
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
2					1678
4					1441
5					1450
átlag					1523
szórás					134
95% felső határ					1791
95% alsó határ					1254

2. Andezit nyomóvizsgálat (A2)



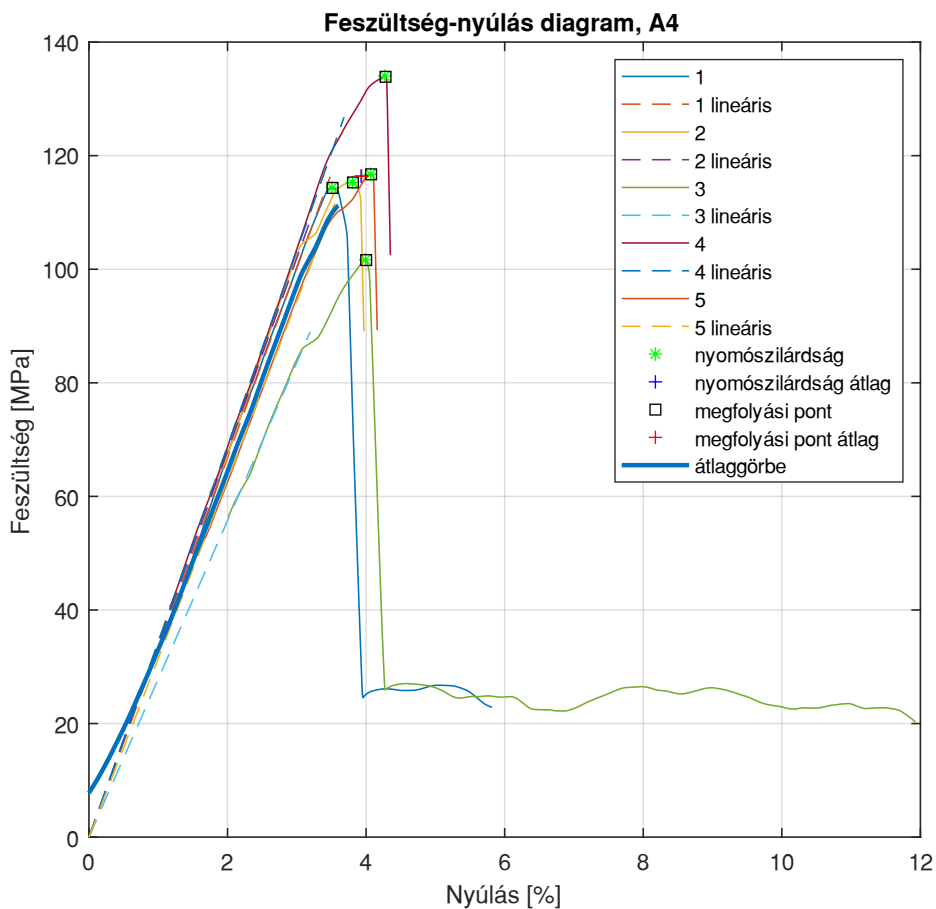
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1					1393
2					1637
3					1402
4					1412
5					1656
átlag					1500
szórás					134
95% felső határ					1769
95% alsó határ					1232

3. Andezit nyomóvizsgálat (A3)



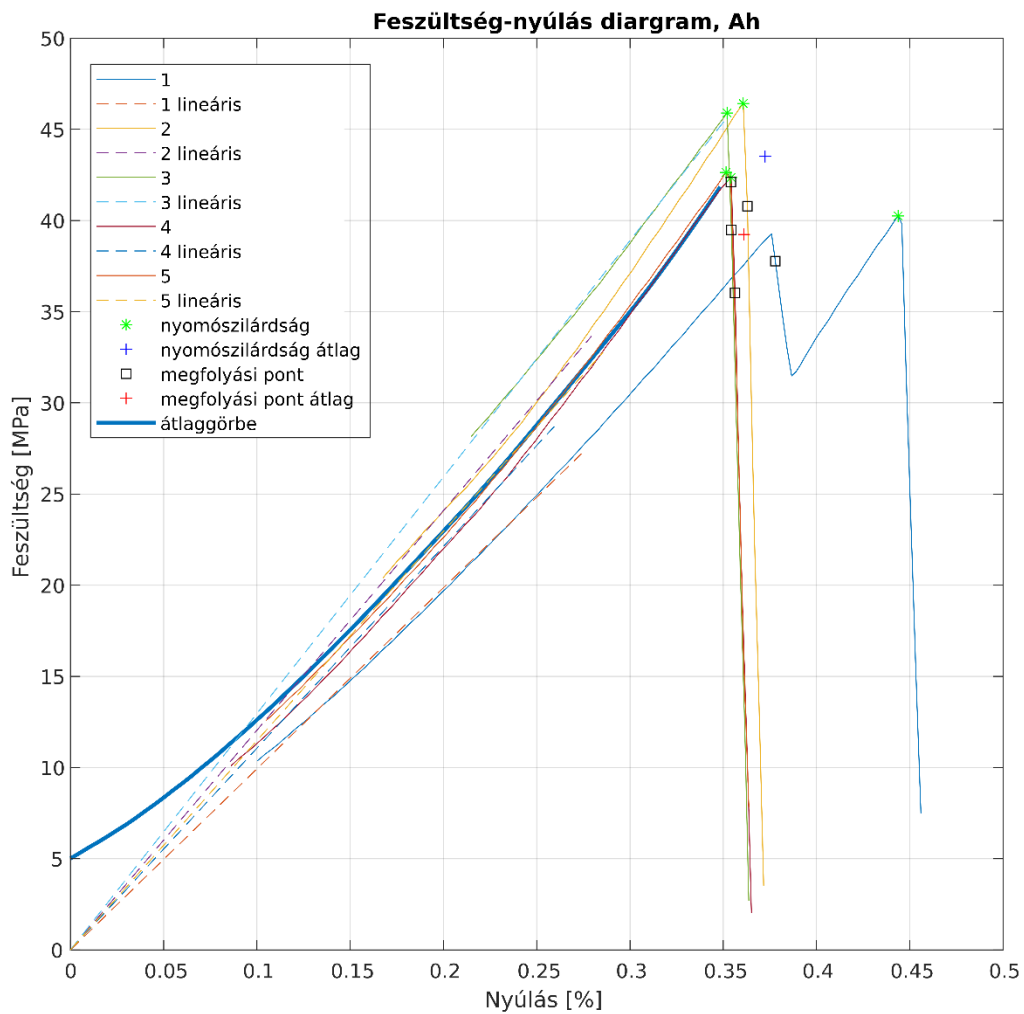
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	203	4.22	89258	1.16	4981
2	214	4.49	92078	1.14	4897
3	220	4.34	95893	1.26	5114
4	194	4.13	83481	1.13	4824
5	204	4.37	89252	1.16	4830
átlag	207	4.31	89992	1.17	4929
szórás	10	0.14	4546	0.05	121
95% felső határ	227	4.59	99084	1.28	5171
95% alsó határ	187	4.03	80901	1.06	4687

4. Andezit nyomóvizsgálat (A4)



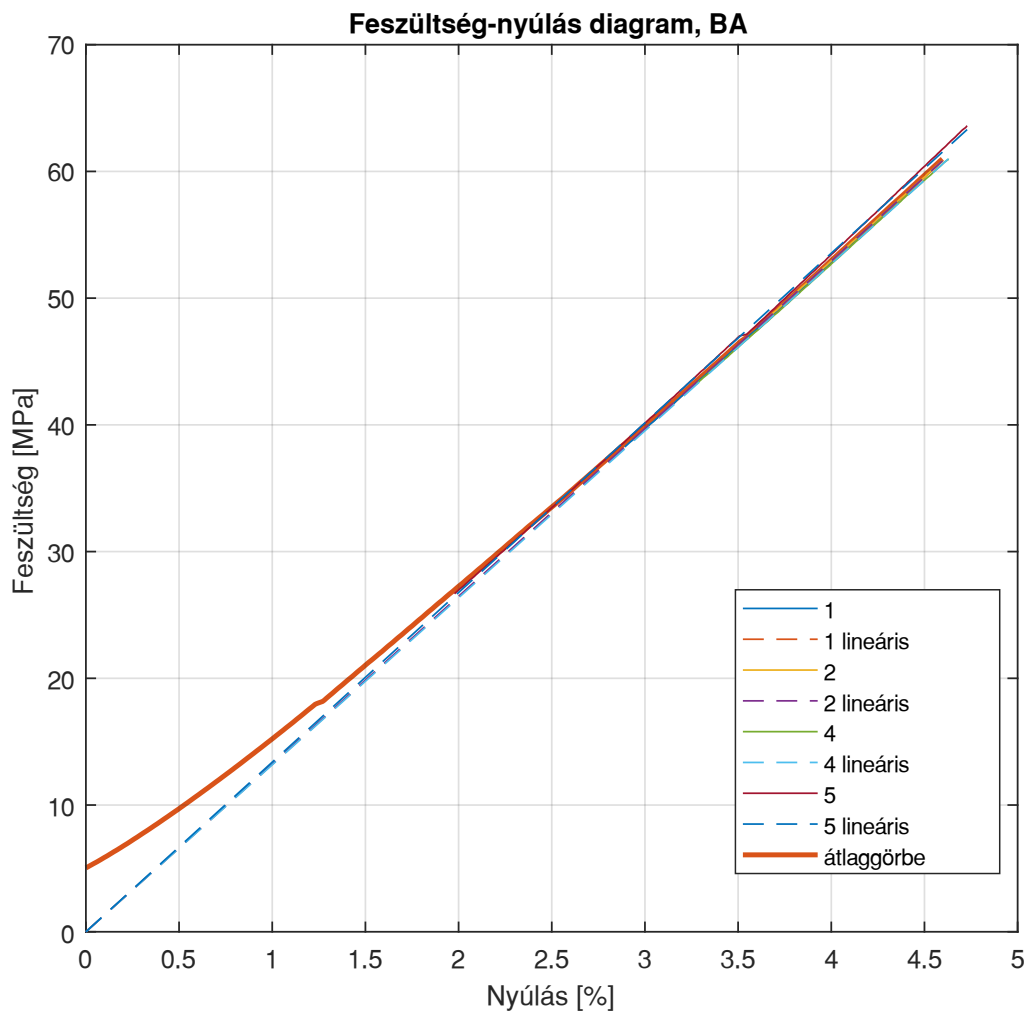
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	114	3.51	49428	0.86	3341
2	115	3.80	50002	1.00	3399
4	102	3.99	43419	0.94	2787
5	134	4.27	53604	1.11	3443
átlag	117	4.06	50682	1.11	3147
szórás	116	3.93	49427	1.01	3223
95% felső határ	12	0.29	3723	0.11	269
95% alsó határ	139	4.51	56873	1.23	3761
1	114	3.51	49428	0.86	3341

5. Andezit hajlítóvizsgálat (Ah)



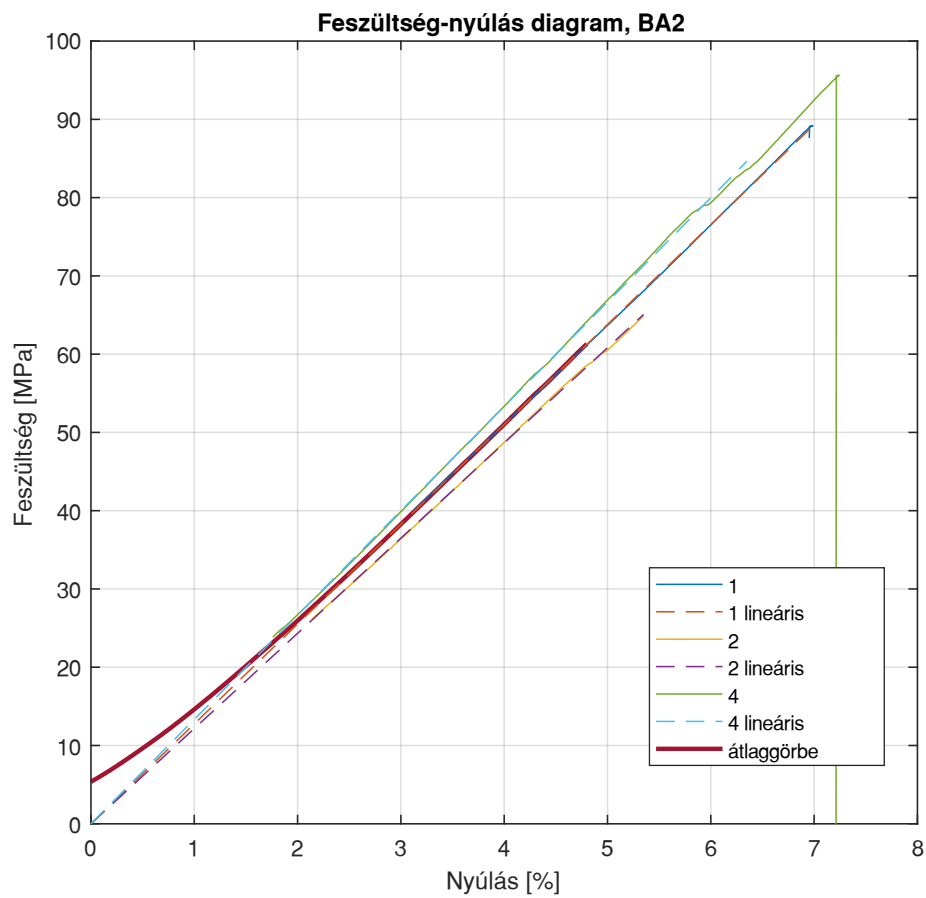
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	32.20	0.42	2766	0.51	8829
2	37.13	0.37	2937	0.42	9310
4	33.89	0.36	2729	0.45	8432
5	34.11	0.36	2931	0.43	8565
átlag	34.33	0.38	2841	0.45	8784
szórás	2.05	0.03	109	0.04	387
95% felső határ	38.44	0.44	3059	0.54	9559
95% alsó határ	30.23	0.32	2623	0.37	8009

6. Bazalt nyomóvizsgálat (BA)



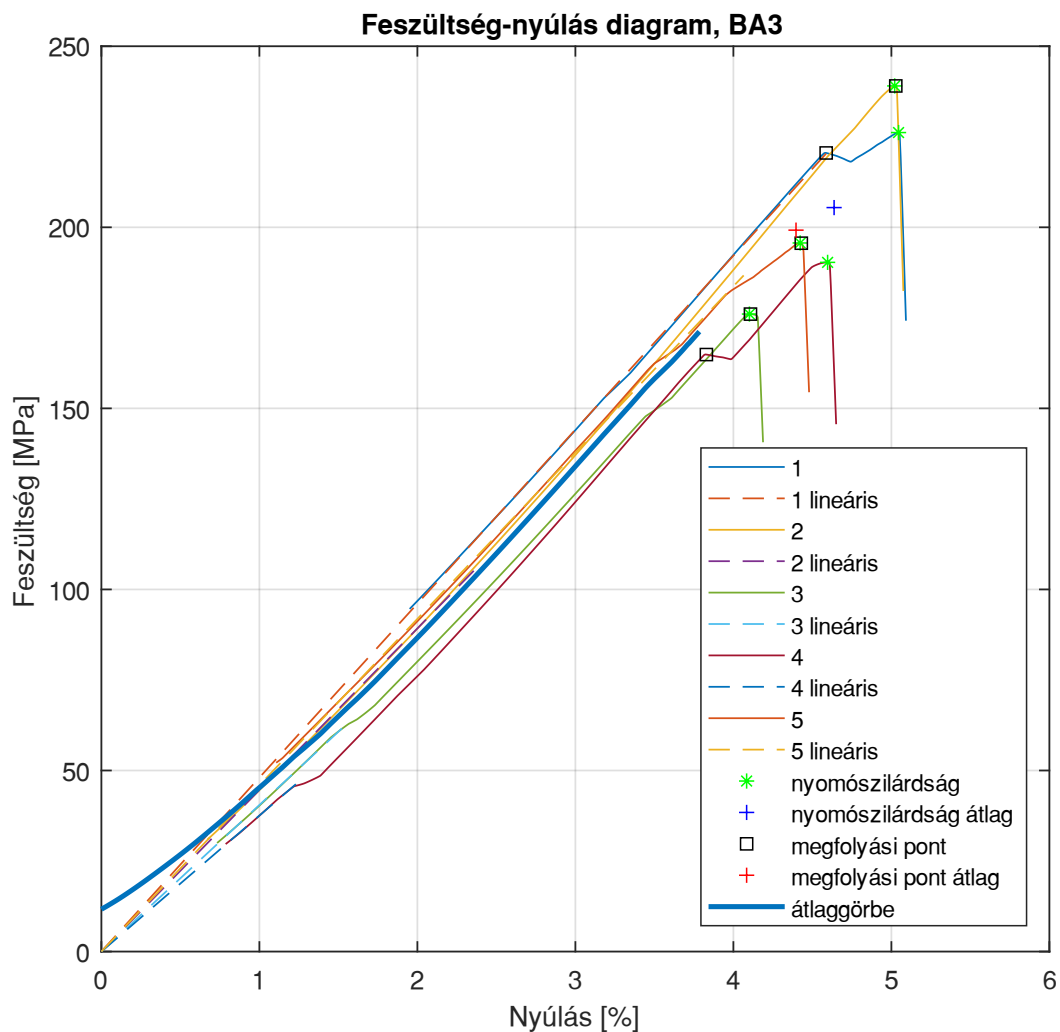
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1					1322
2					1323
4					1318
5					1339
átlag					1325
szórás					9
95% felső határ					1344
95% alsó határ					1307

7. Bazalt nyomóvizsgálata (BA2)



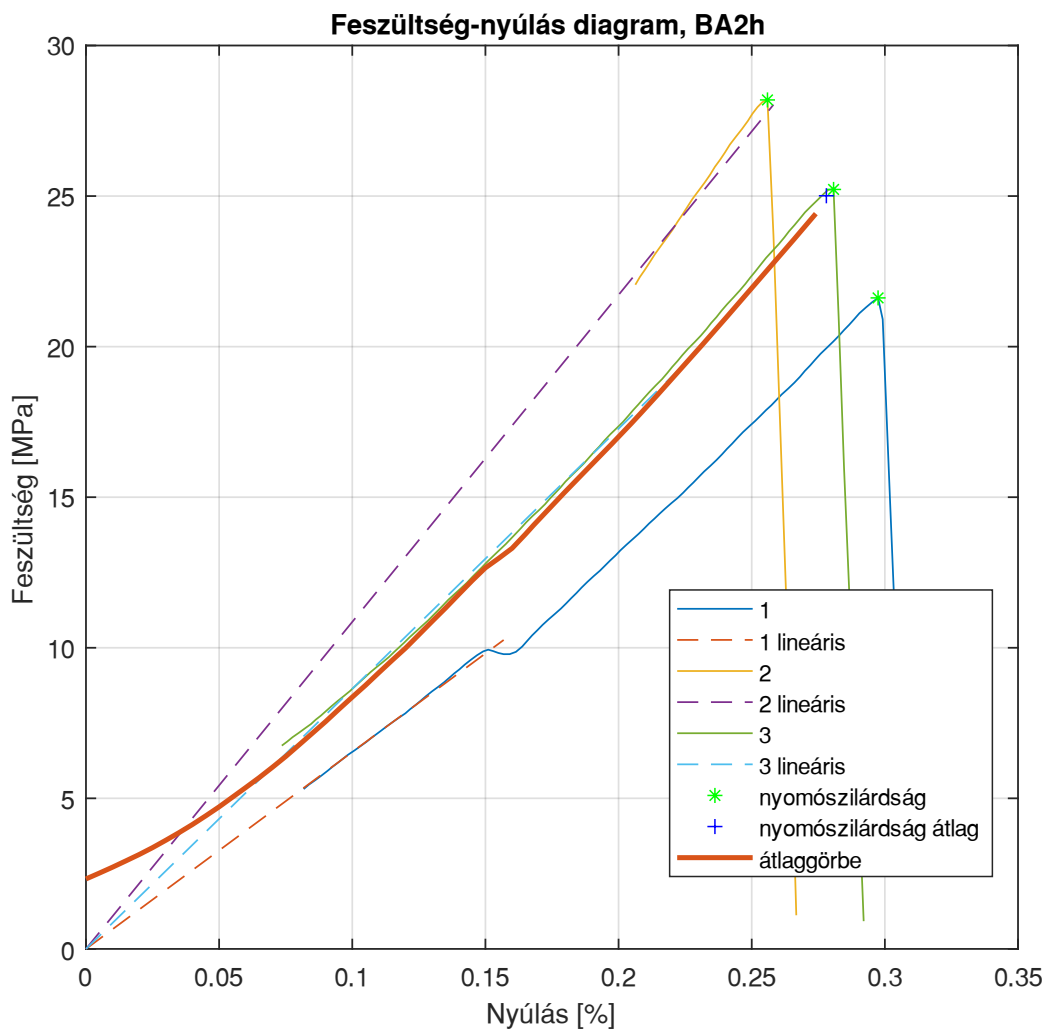
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1					1276
2					1216
4					1333
átlag					1275
szórás					58
95% felső határ					1392
95% alsó határ					1158

8. Bazalt nyomóvizsgálat (BA3)



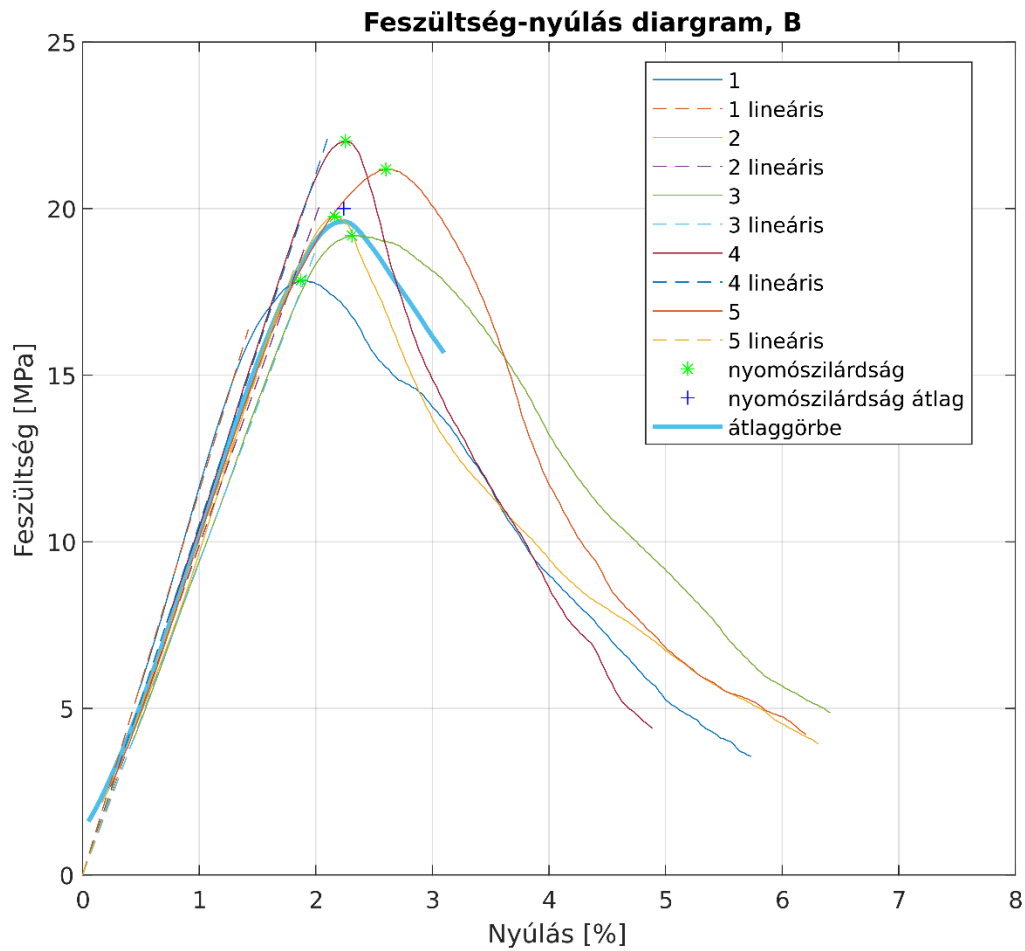
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	226	5.05	109962	1.59	4804
2	239	5.02	116199	1.43	4462
3	176	4.10	87154	1.24	4047
4	190	4.60	88835	1.26	3755
5	196	4.42	89568	1.30	4593
átlag	205	4.64	98343	1.37	4332
szórás	26	0.40	13660	0.15	425
95% felső határ	258	5.44	125664	1.66	5182
95% alsó határ	153	3.83	71023	1.07	3483

9. Bazalt hajlítóvizsgálat (BA2h)



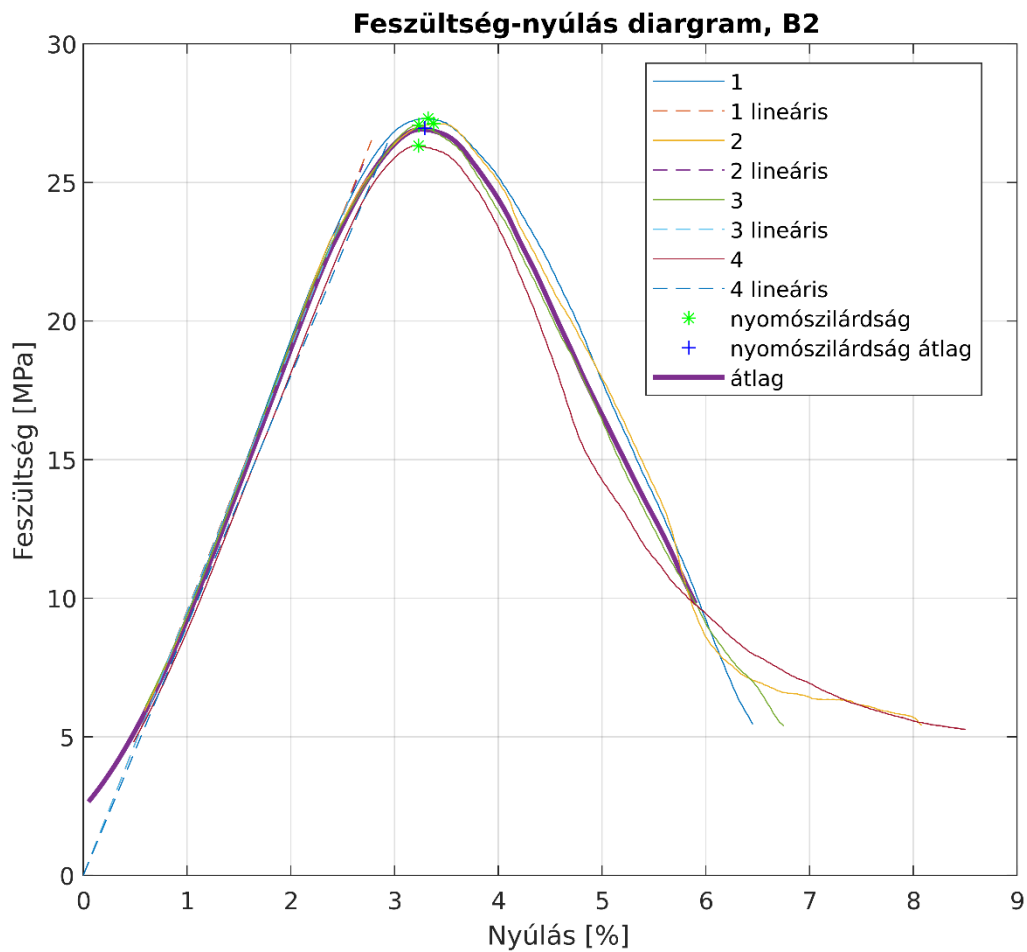
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	21.62	0.30	1446	0.41	6540
2	28.19	0.26	2048	0.32	10859
3	25.22	0.28	1898	0.40	8639
átlag	25.01	0.28	1797	0.37	8679
szórás	3.29	0.02	313	0.05	2160
95% felső határ	31.59	0.32	2424	0.47	12999
95% alsó határ	18.43	0.24	1171	0.28	4360

10.Beton nyomóvizsgálat (B)



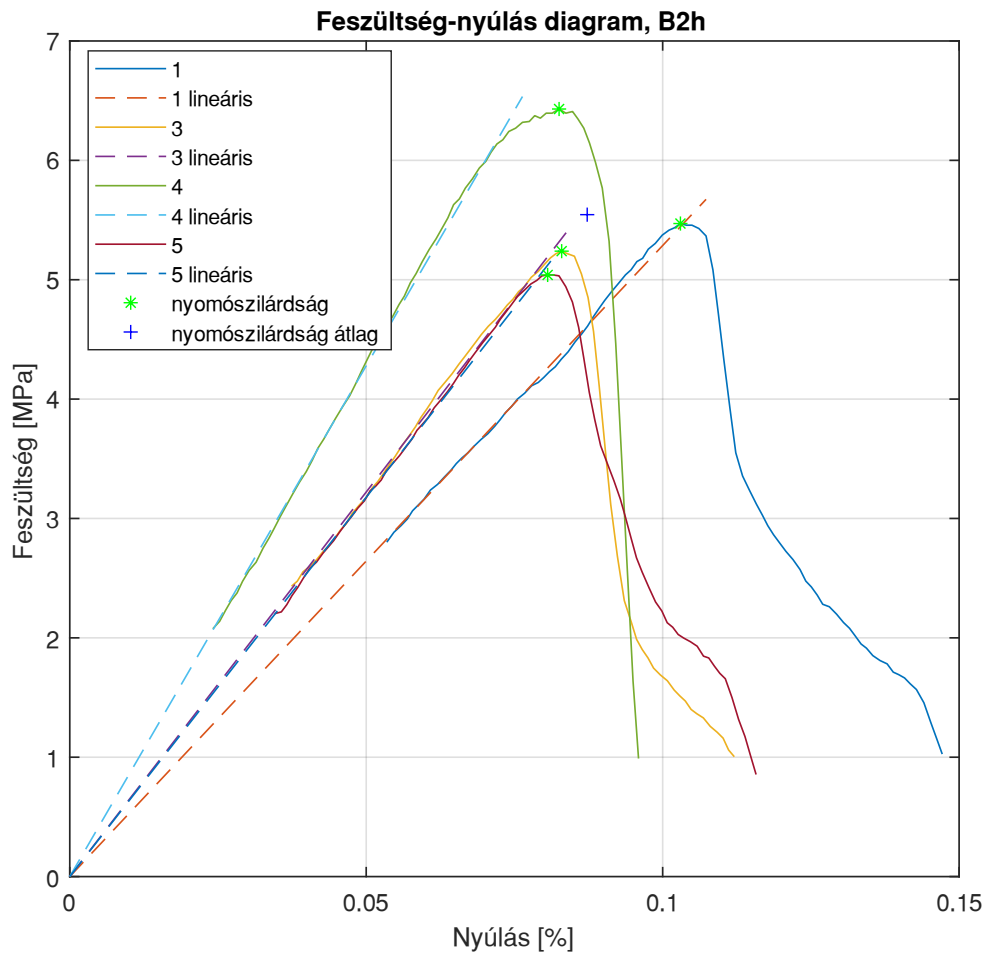
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	17.85	1.87	7043	0.56	1152
2	19.76	2.16	7827	1.04	989
3	19.19	2.31	7610	0.67	938
4	22.03	2.25	8841	0.72	1052
5	21.18	2.60	8580	0.75	1003
átlag	20.00	2.24	7980	0.75	1027
szórás	1.65	0.26	731	0.18	81
95% felső határ	23.29	2.77	9443	1.11	1189
95% alsó határ	16.71	1.71	6518	0.39	865

11. Beton nyomóvizsgálat (B2)



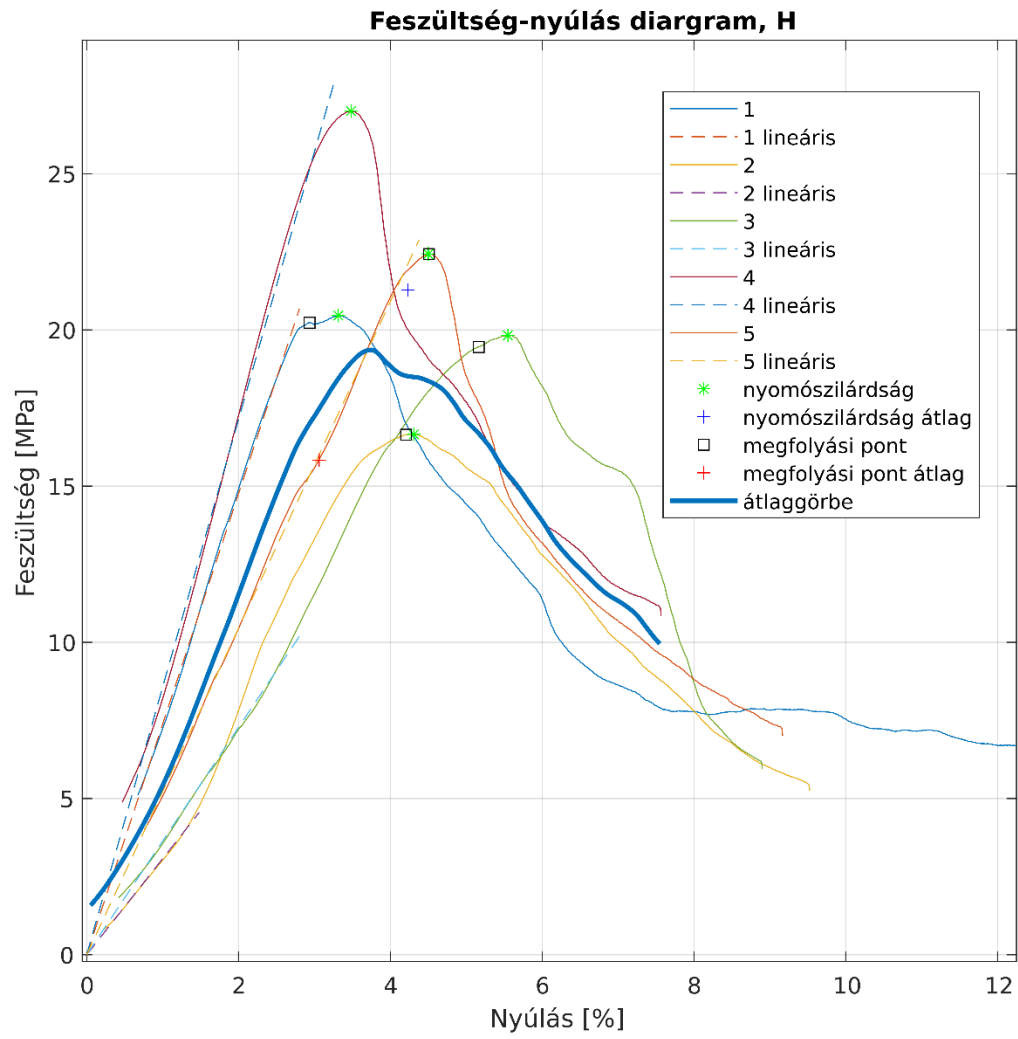
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	27.31	3.32	11027	1.16	954
2	27.12	3.37	10991	1.26	952
3	27.07	3.22	10980	1.13	959
4	26.33	3.23	10657	1.20	901
átlag	26.96	3.29	10914	1.19	942
szórás	0.43	0.07	172	0.06	27
95% felső határ	27.82	3.43	11258	1.30	996
95% alsó határ	26.09	3.14	10569	1.08	887

12.Beton hajlítóvizsgálat (B2h)



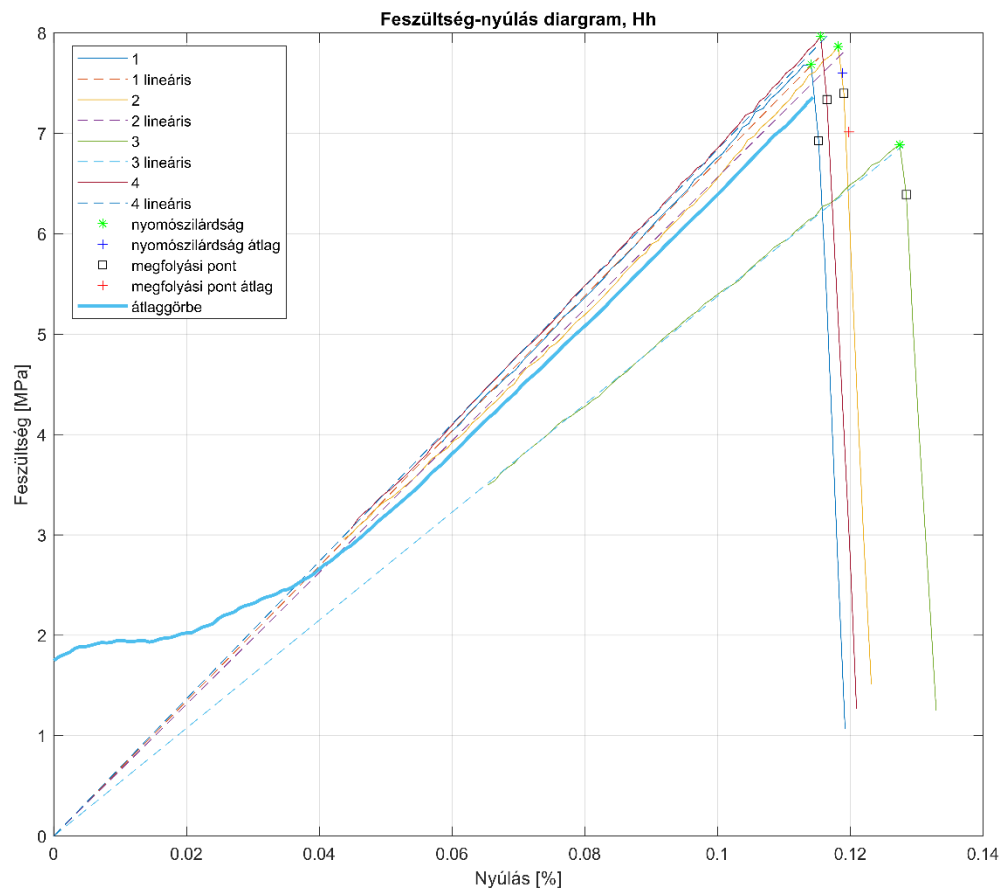
Próbatest Sorszám	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	6.84	0.10	75	0.24	6608
3	6.55	0.08	71	0.21	8029
4	8.04	0.08	88	0.17	10697
5	6.30	0.08	64	0.18	7944
átlag	6.93	0.09	74	0.20	8320
szórás	0.77	0.01	10	0.03	1714
95% felső határ	8.47	0.11	95	0.26	11747
95% alsó határ	5.39	0.07	54	0.14	4893

13.Habarcsvizsgálata (H)



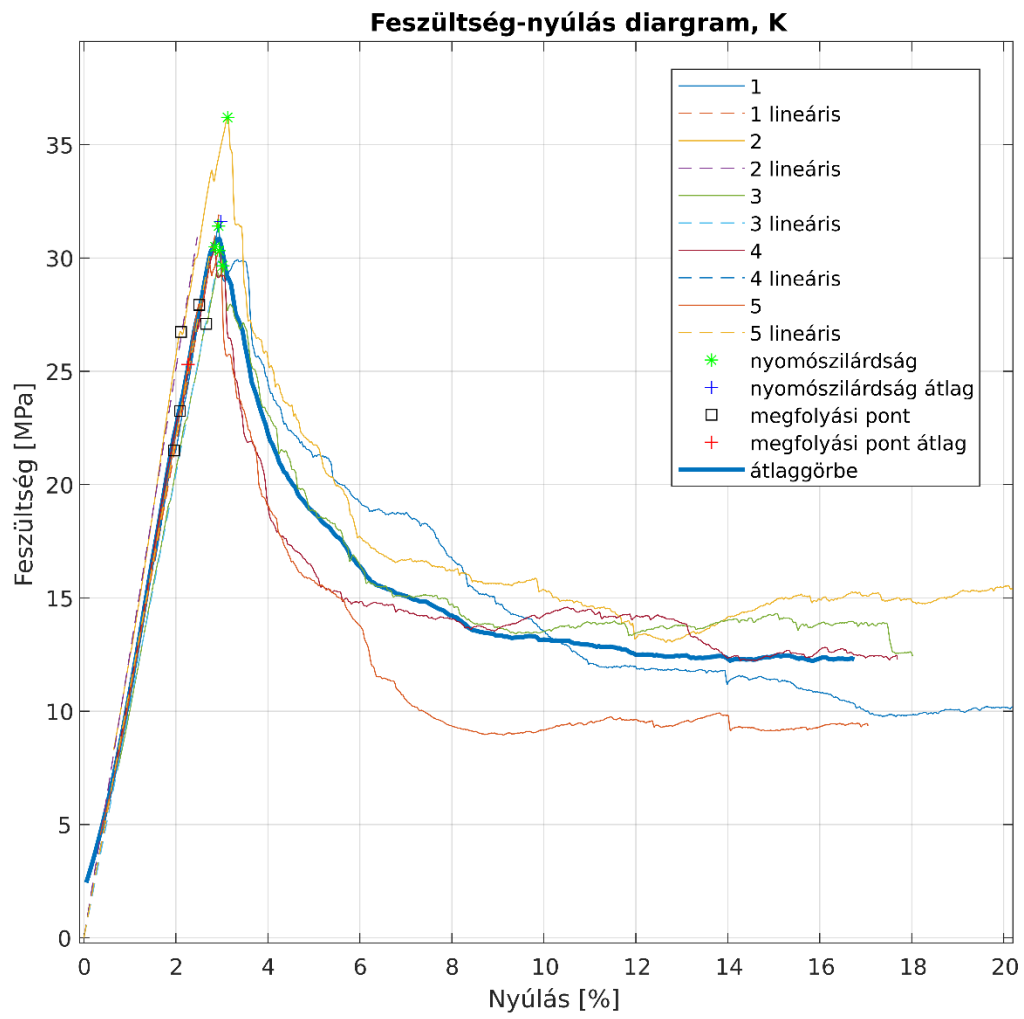
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	20.46	3.31	8254	1.17	738
2	16.66	4.31	6676	1.45	307
3	19.82	5.55	7985	1.81	364
4	27.00	3.48	10952	1.68	857
5	22.43	4.50	9004	1.55	522
átlag	21.27	4.23	8574	1.53	558
szórás	3.82	0.90	1573	0.25	236
95% felső határ	28.91	6.03	11719	2.03	1030
95% alsó határ	13.64	2.44	5429	1.04	85
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	20.23	2.94	8160	1.09	
2	16.64	4.21	6671	1.43	
3	19.45	5.17	7835	1.73	
4	26.97	3.44	10940	1.67	
5	22.43	4.51	9002	1.55	
átlag	21.14	4.05	8522	1.50	
szórás	3.86	0.88	1590	0.26	
95% felső határ	28.86	5.81	11701	2.01	
95% alsó határ	13.43	2.29	5342	0.98	

14.Habarcs hajlítóvizsgálat (Hh)



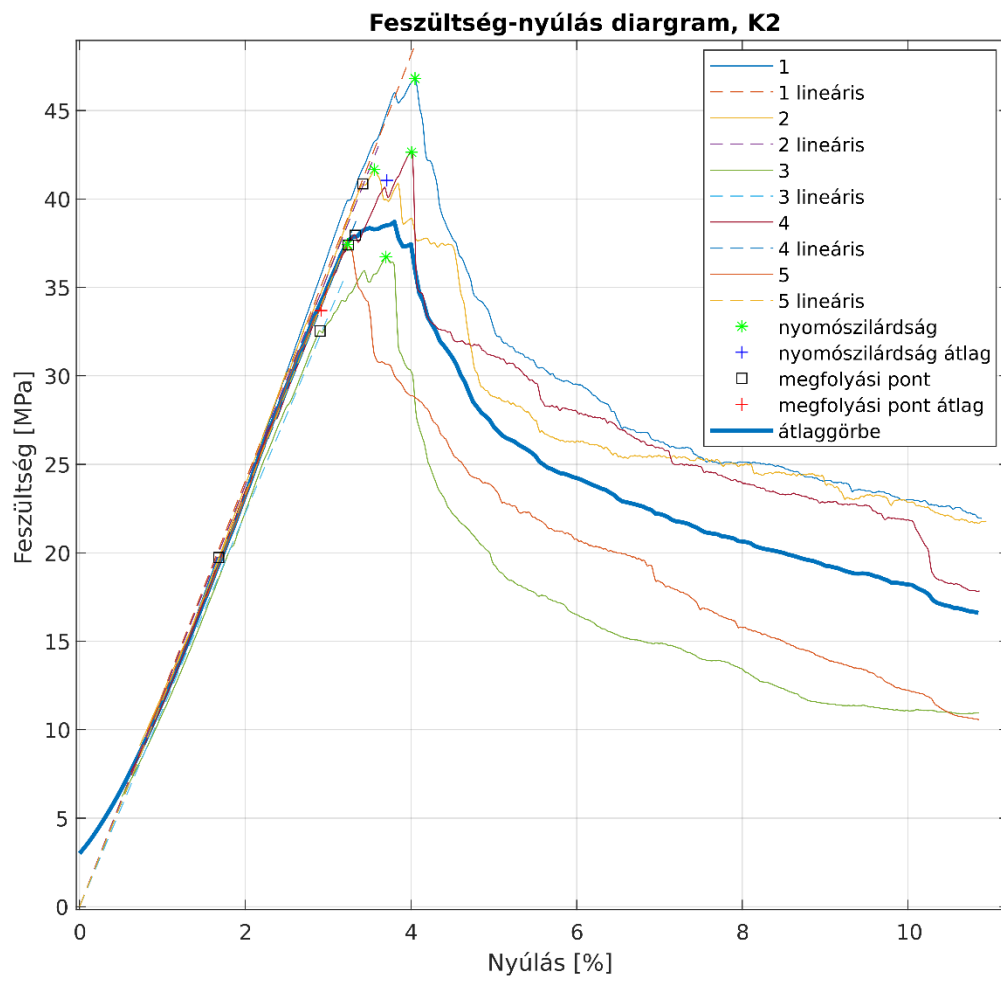
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	7.69	0.11	82	0.27	6727
2	7.87	0.12	84	0.25	6563
3	6.89	0.13	77	0.28	5377
4	7.97	0.12	87	0.24	6842
átlag	7.60	0.12	82	0.26	6377
szórás	0.49	0.01	4	0.02	676
95% felső határ	8.58	0.13	91	0.30	7730
95% alsó határ	6.62	0.11	74	0.23	5024

15. Kerámia nyomóvizsgálat (K)



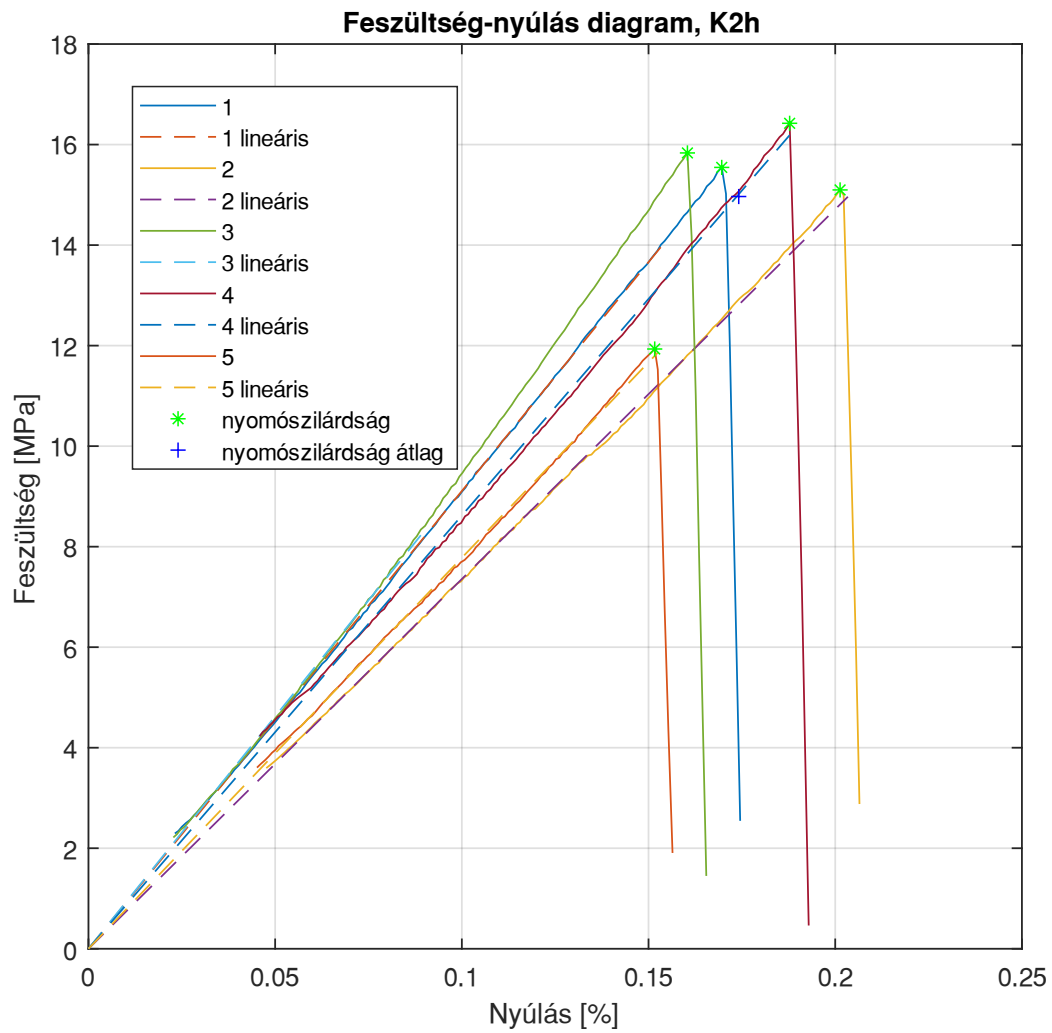
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	31.41	2.93	12637	0.79	1088
2	36.20	3.13	14407	1.03	1255
3	29.66	3.02	12047	0.98	1023
4	30.49	2.85	12347	0.97	1115
5	30.33	2.94	12213	1.15	1103
átlag	31.62	2.97	12730	0.98	1117
szórás	2.64	0.10	962	0.13	85
95% felső határ	36.89	3.18	14654	1.25	1287
95% alsó határ	26.34	2.77	10806	0.72	947
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	30.64	2.80	12329	0.76	
2	26.74	2.11	10639	0.82	
3	27.09	2.66	11003	0.91	
4	23.25	2.09	9414	0.81	
5	27.93	2.51	11248	1.07	
átlag	27.13	2.43	10927	0.87	
szórás	2.66	0.32	1054	0.12	
95% felső határ	32.44	3.08	13036	1.11	
95% alsó határ	21.82	1.79	8818	0.64	

16. Kerámia nyomóvizsgálat (K2)



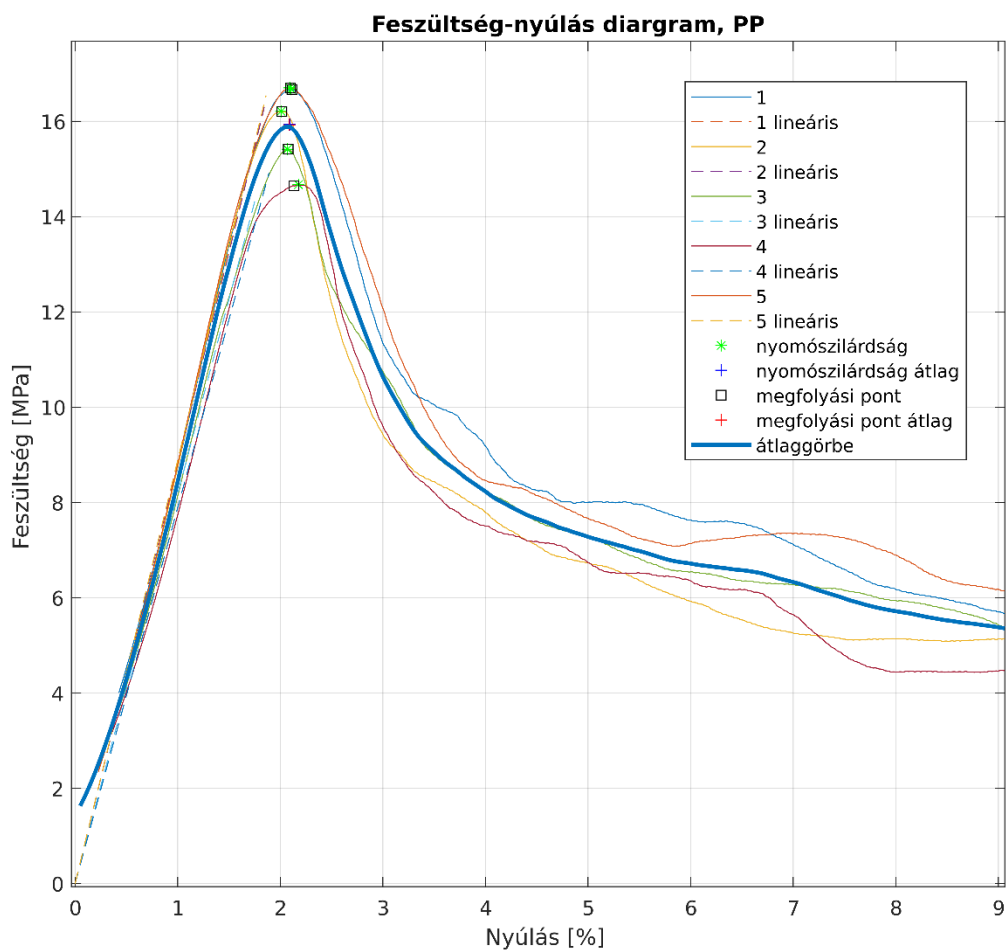
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	46.80	4.05	19277	1.90	1203
2	41.66	3.56	17436	1.38	1192
3	36.72	3.70	15315	1.43	1112
4	42.64	4.01	17431	1.49	1161
5	37.43	3.24	15559	1.13	1166
átlag	41.05	3.71	17003	1.47	1167
szórás	4.12	0.34	1618	0.28	35
95% felső határ	49.29	4.38	20240	2.02	1237
95% alsó határ	32.81	3.04	13767	0.91	1096
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	19.73	1.68	8125	1.42	
2	40.85	3.42	17098	1.36	
3	32.53	2.90	13571	1.26	
4	37.95	3.33	15514	1.35	
5	37.40	3.24	15547	1.13	
átlag	33.69	2.91	13971	1.30	
szórás	8.36	0.72	3499	0.11	
95% felső határ	50.41	4.35	20969	1.52	
95% alsó határ	16.97	1.48	6972	1.08	

17. Kerámia hajlítóvizsgálat (K2h)



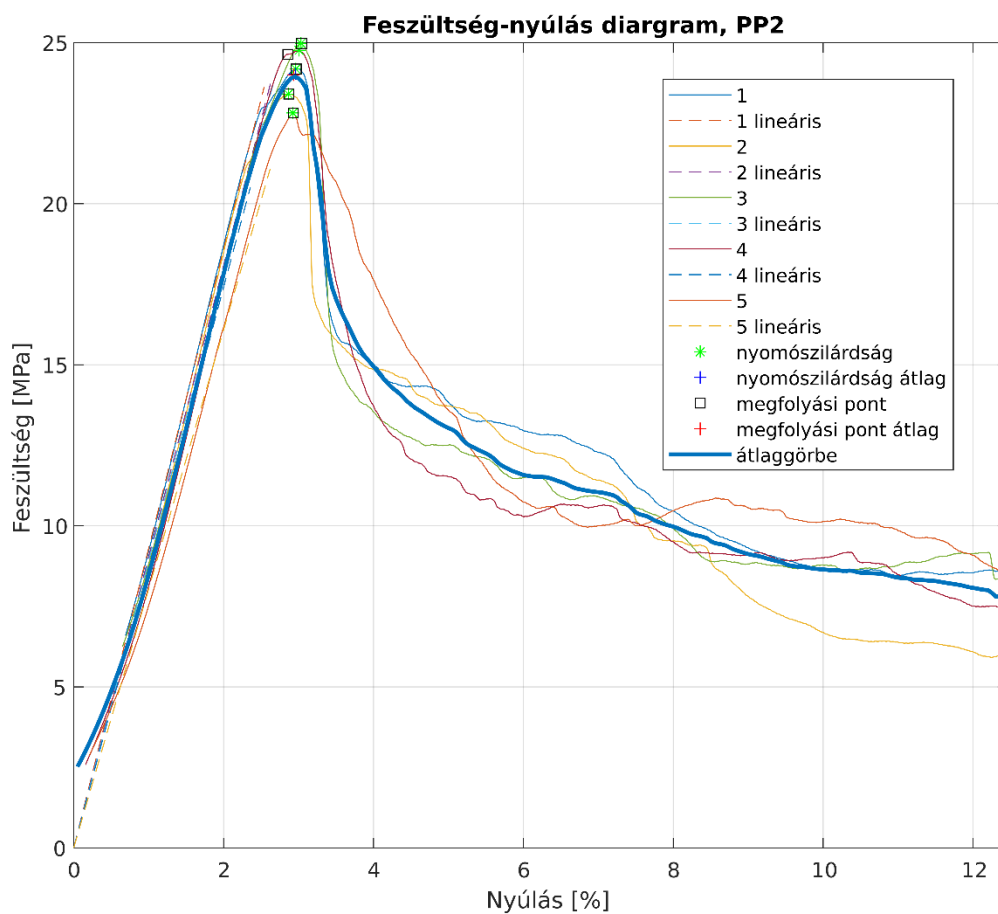
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	19.43	0.17	201	0.33	11441
2	18.87	0.20	190	0.42	9201
3	19.79	0.16	201	0.32	12044
4	20.53	0.20	200	0.40	9735
5	14.92	0.15	142	0.33	9695
átlag	18.71	0.18	187	0.36	10423
szórás	2.20	0.02	25	0.05	1241
95% felső határ	23.12	0.22	237	0.46	12906
95% alsó határ	14.30	0.13	136	0.27	7941

18. Aljzatkiegyenlítő nyomóvizsgálat (PP)



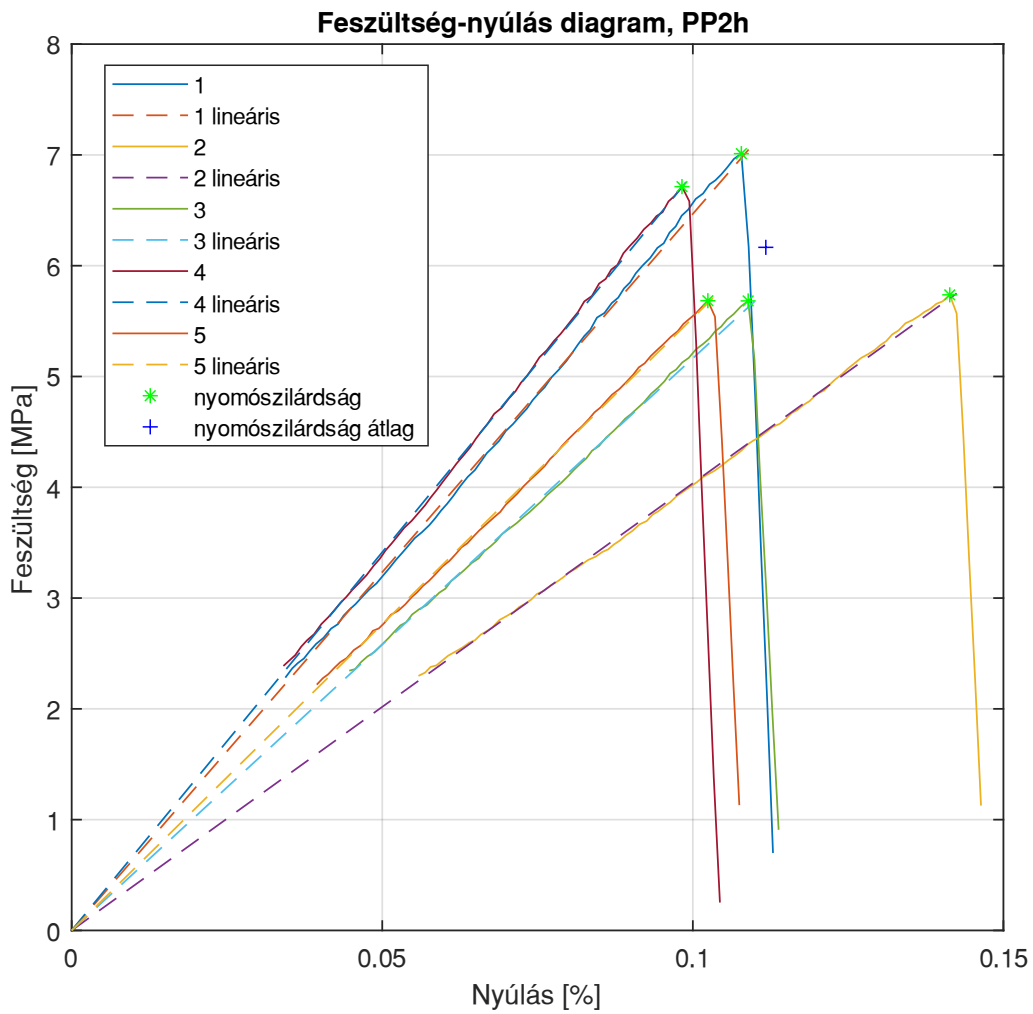
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	16.67	2.11	6763	0.73	883
2	16.21	2.01	6661	0.80	884
3	15.42	2.07	6527	0.65	818
4	14.67	2.18	6285	0.91	789
5	16.70	2.09	7006	0.76	889
átlag	15.94	2.09	6648	0.77	853
szórás	0.88	0.06	269	0.09	46
95% felső határ	17.69	2.21	7185	0.96	944
95% alsó határ	14.18	1.97	6111	0.58	761

19. Aljzatkiegyenlítő nyomóvizsgálat (PP2)



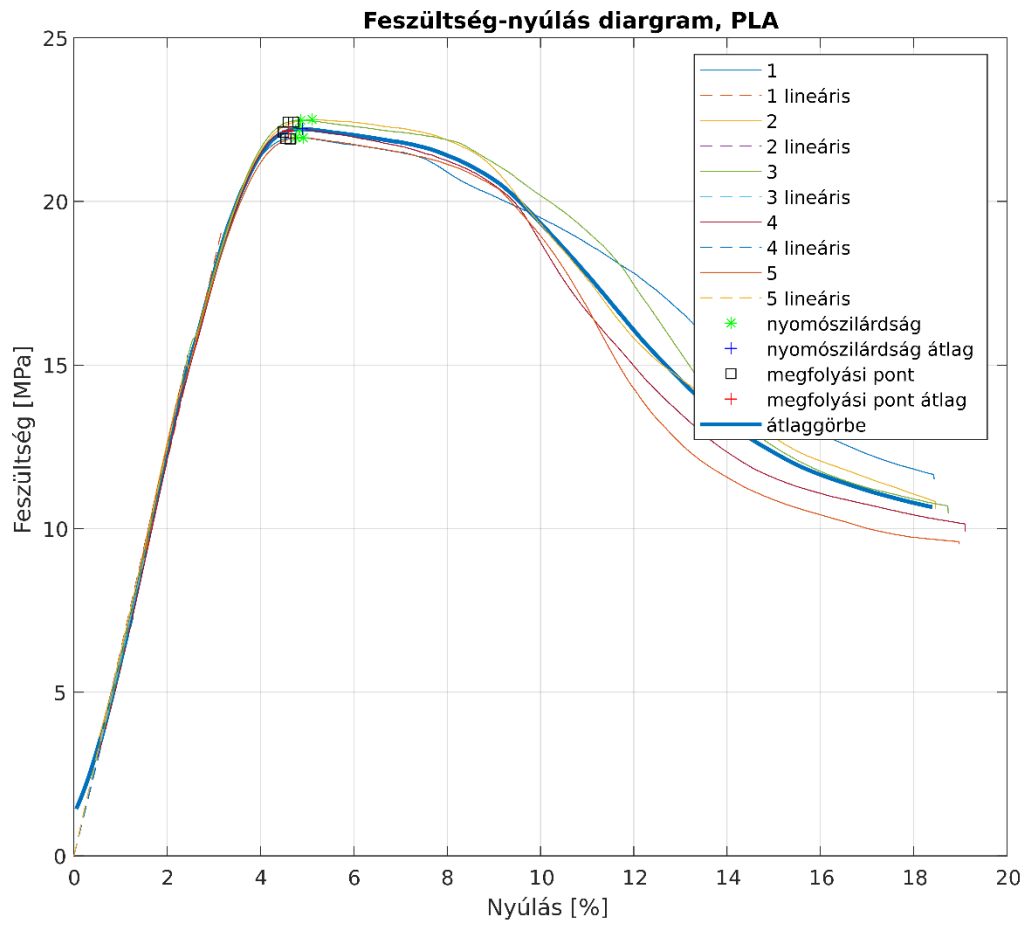
Próbatest Sorszám	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	24.18	2.96	9887	1.05	930
2	23.41	2.95	9522	1.34	831
3	24.98	3.03	10508	1.25	891
4	24.76	3.37	10074	1.60	535
5	22.82	3.39	9297	1.62	451
átlag	24.03	3.14	9858	1.38	728
szórás	0.91	0.22	474	0.24	219
95% felső határ	25.85	3.58	10805	1.86	1165
95% alsó határ	22.21	2.70	8910	0.89	290

20. Aljzatkiegyenlítő hajlítóvizsgálat (PP2h)



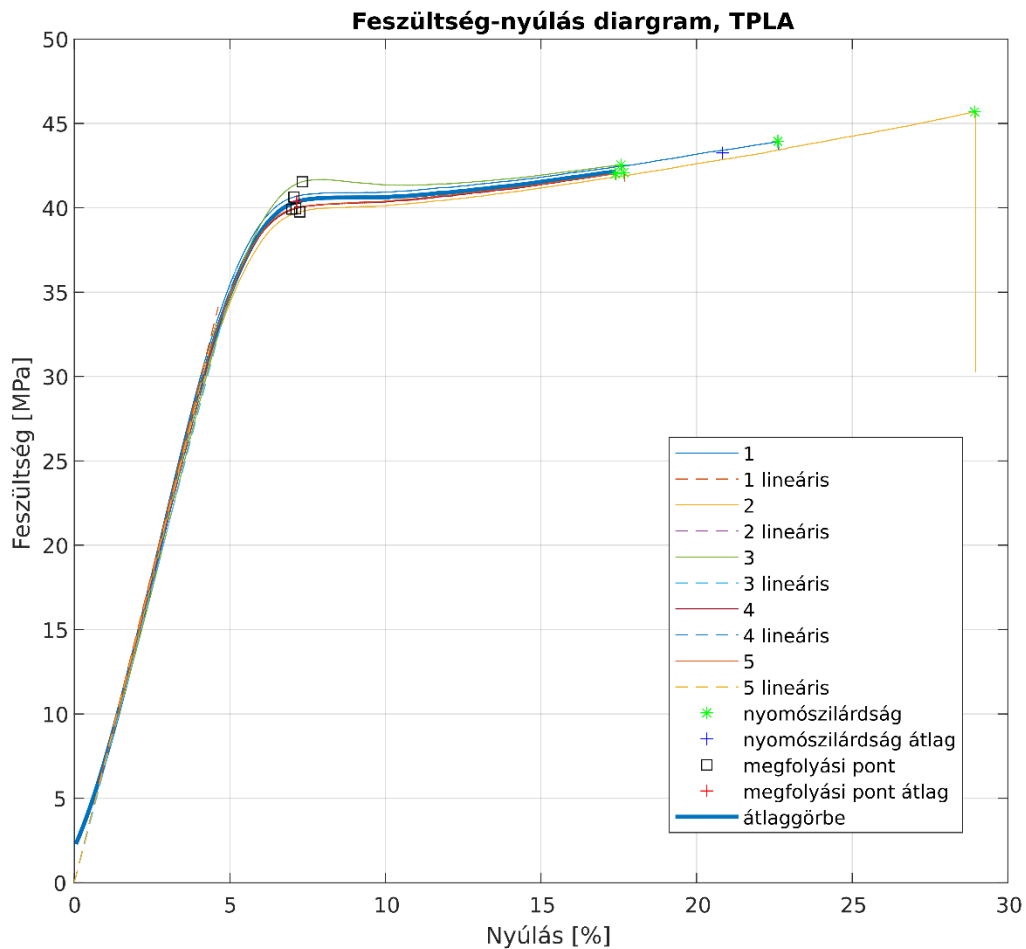
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	52.07	3.04	521	5.00	1955
2	66.49	6.05	654	10.00	1484
3	51.37	2.76	636	4.11	2021
4	67.18	5.94	625	9.99	1553
5	49.96	3.76	473	6.36	1560
átlag	57.41	4.31	582	7.09	1715
szórás	8.64	1.58	80	2.77	252
95% felső határ	74.68	7.47	742	12.63	2219
95% alsó határ	40.14	1.15	422	1.55	1210

21.PLA nyomóvizsgálat (PLA)



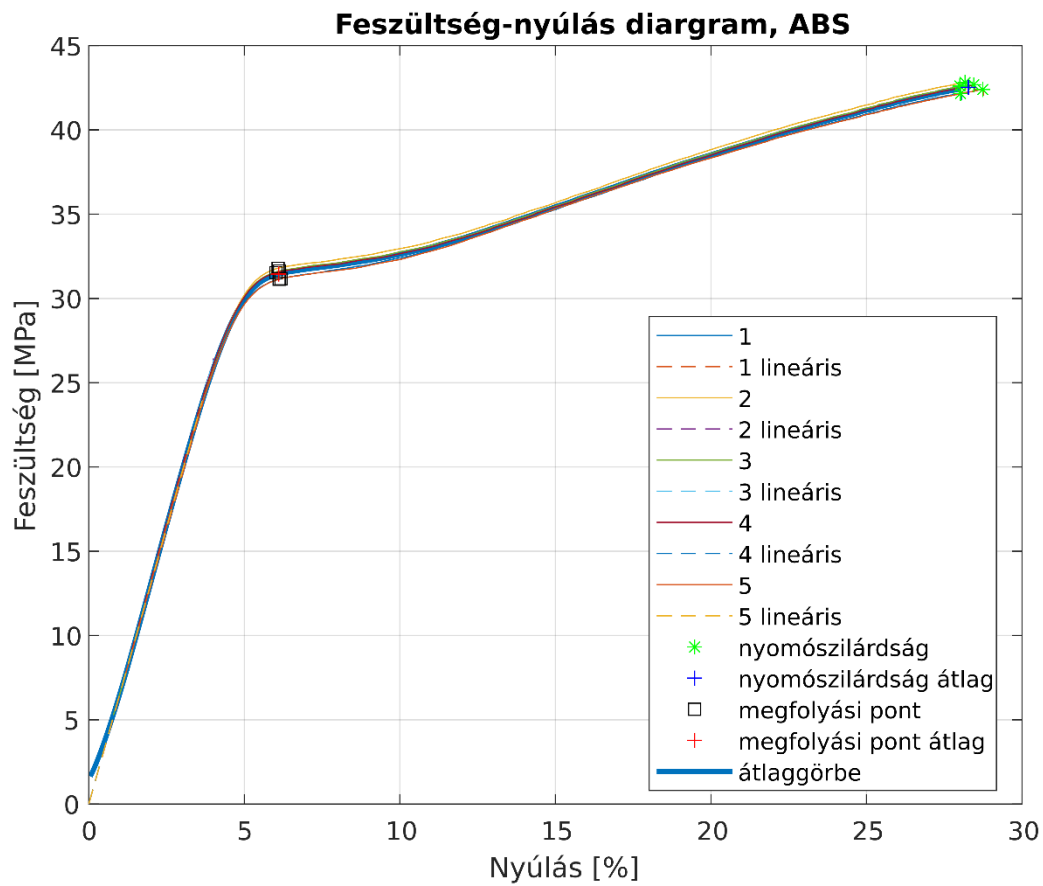
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	21.96	476.29	8787	1.28	604
2	22.50	510.66	9005	1.35	628
3	22.48	486.69	8987	1.25	602
4	22.20	483.34	8881	1.17	574
5	21.94	491.54	8791	1.21	624
átlag	22.22	489.70	8890	1.25	606
szórás	0.27	12.96	104	0.07	21
95% felső határ	22.76	515.63	9098	1.39	649
95% alsó határ	21.68	463.78	8683	1.11	564
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	21.92	4.54	8772	1.24	
2	15.03	2.43	6016	0.81	
3	22.42	4.59	8965	1.19	
4	22.12	4.49	8847	1.10	
5	21.91	4.64	8777	1.15	
átlag	20.68	4.14	8275	1.10	
szórás	3.16	0.96	1266	0.17	
95% felső határ	27.01	6.05	10806	1.43	
95% alsó határ	14.35	2.22	5744	0.76	

22.TPLA nyomóvizsgálat (TPLA)



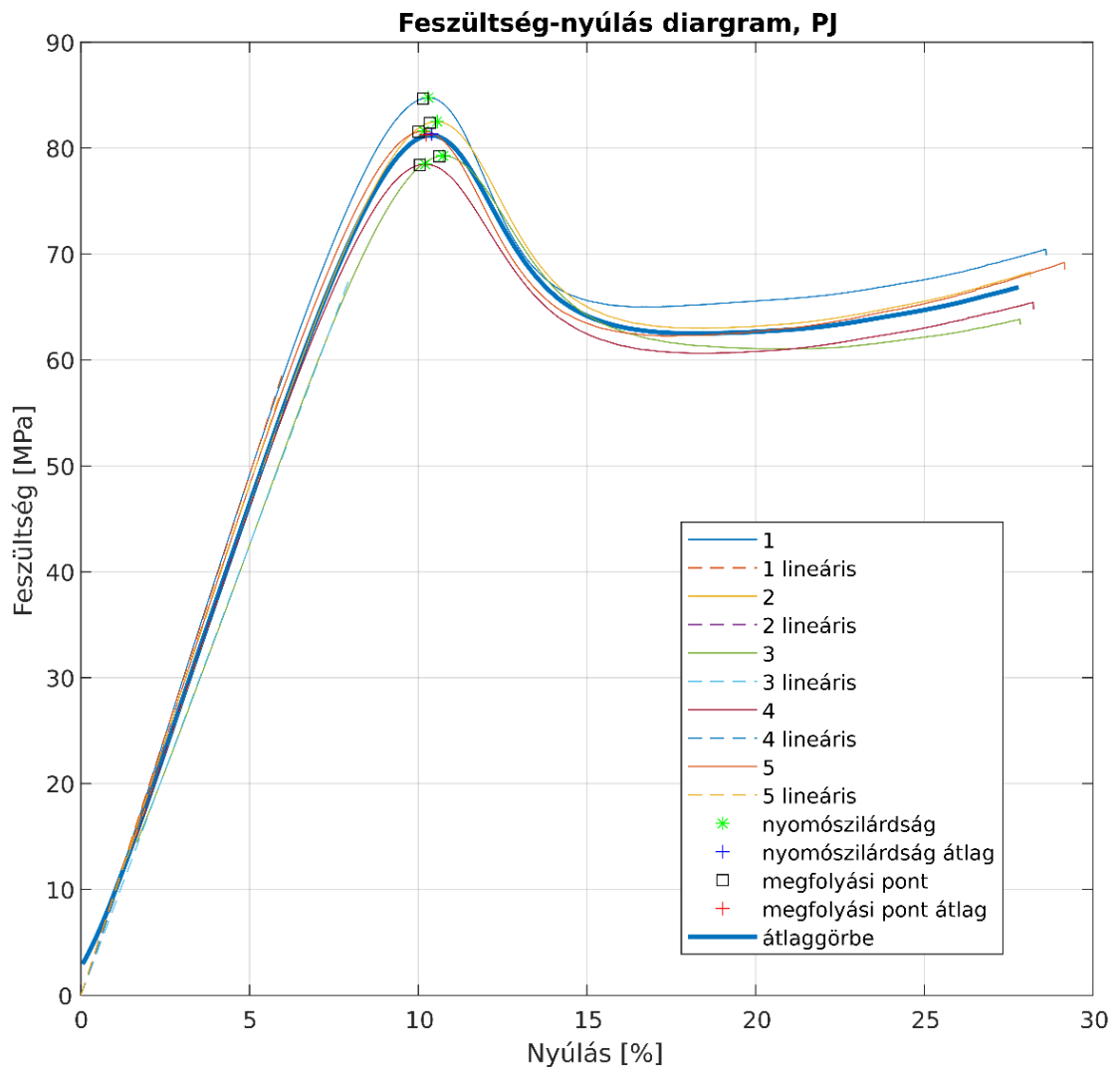
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	40.64	7.06	16158	1.89	737
2	39.76	7.24	15903	1.88	716
3	41.54	7.33	16525	1.95	700
4	39.95	7.12	15939	1.95	727
5	39.92	6.99	15935	1.86	728
átlag	40.36	7.15	16092	1.91	722
szórás	0.74	0.14	263	0.04	14
95% felső határ	41.85	7.42	16618	1.99	750
95% alsó határ	38.88	6.87	15567	1.83	693

23.ABS nyomóvizsgálat (ABS)



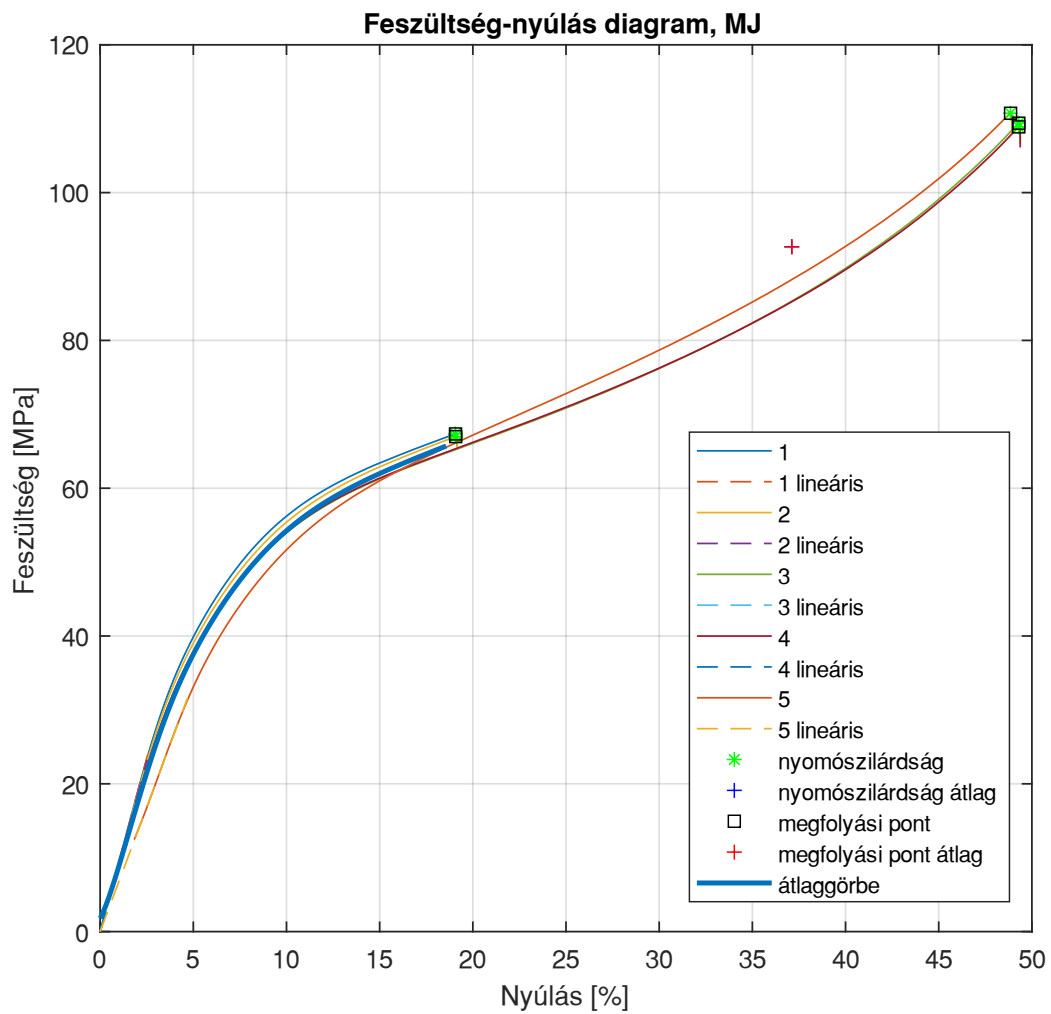
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	31.14	6.12	12531	1.58	649
2	31.79	6.09	12742	1.56	659
3	31.63	6.13	12707	1.59	658
4	31.53	6.02	12655	1.48	665
5	31.17	6.18	12548	1.45	657
átlag	31.45	6.11	12637	1.53	657
szórás	0.29	0.06	94	0.06	6
95% felső határ	32.02	6.23	12825	1.66	669
95% alsó határ	30.88	5.99	12449	1.40	646

24.PolyJet nyomóvizsgálat (PJ)



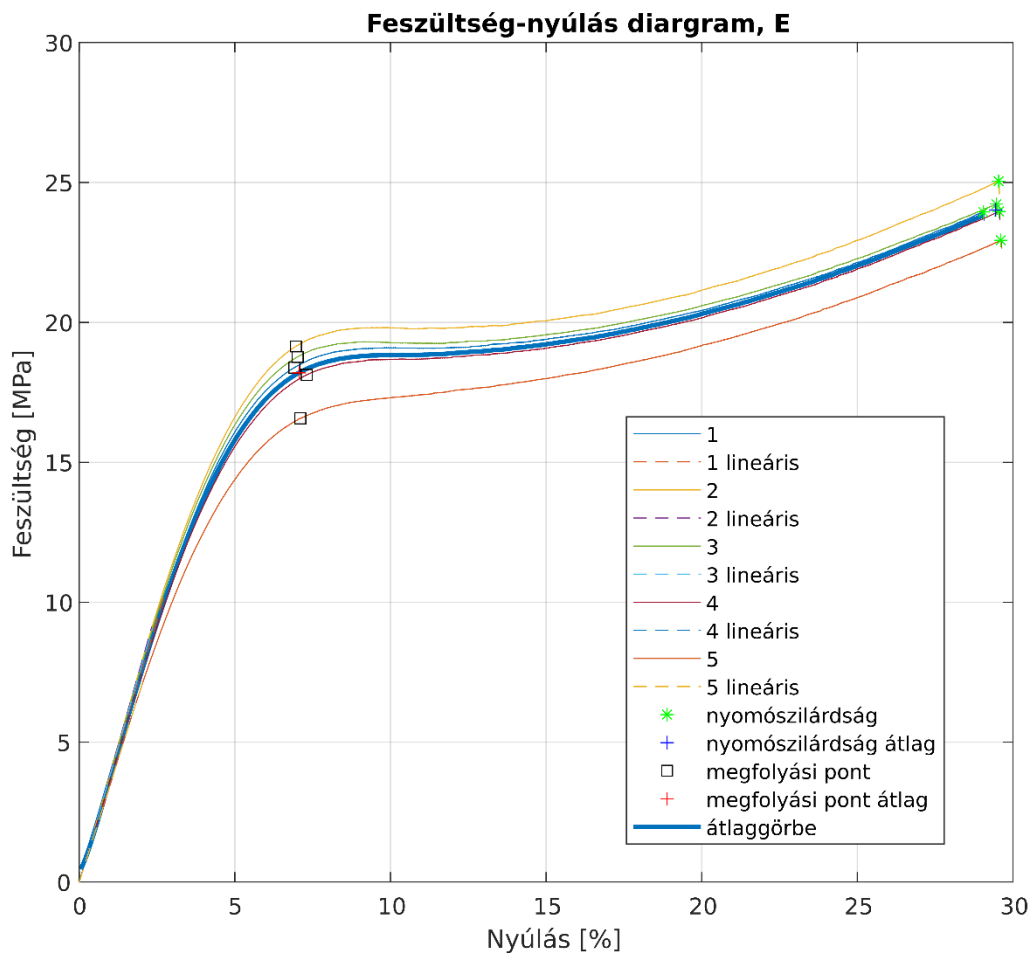
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	84.78	10.30	34423	2.32	983
2	82.51	10.56	33334	2.46	922
3	79.27	10.74	32602	2.53	851
4	78.48	10.21	32754	2.35	920
5	81.63	10.17	32980	2.20	963
átlag	81.33	10.40	33218	2.37	928
szórás	2.54	0.25	727	0.13	51
95% felső határ	86.41	10.89	34673	2.63	1030
95% alsó határ	76.26	9.90	31764	2.12	826
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	84.69	10.14	34384	2.29	
2	82.39	10.34	33286	2.42	
3	79.24	10.63	32587	2.51	
4	78.41	10.05	32726	2.32	
5	81.56	10.01	32950	2.17	
átlag	81.26	10.23	33187	2.34	
szórás	2.52	0.26	719	0.13	
95% felső határ	86.29	10.75	34625	2.60	
95% alsó határ	76.23	9.72	31748	2.08	

25. Multi Jet Fusion nyomóvizsgálat (MJ)



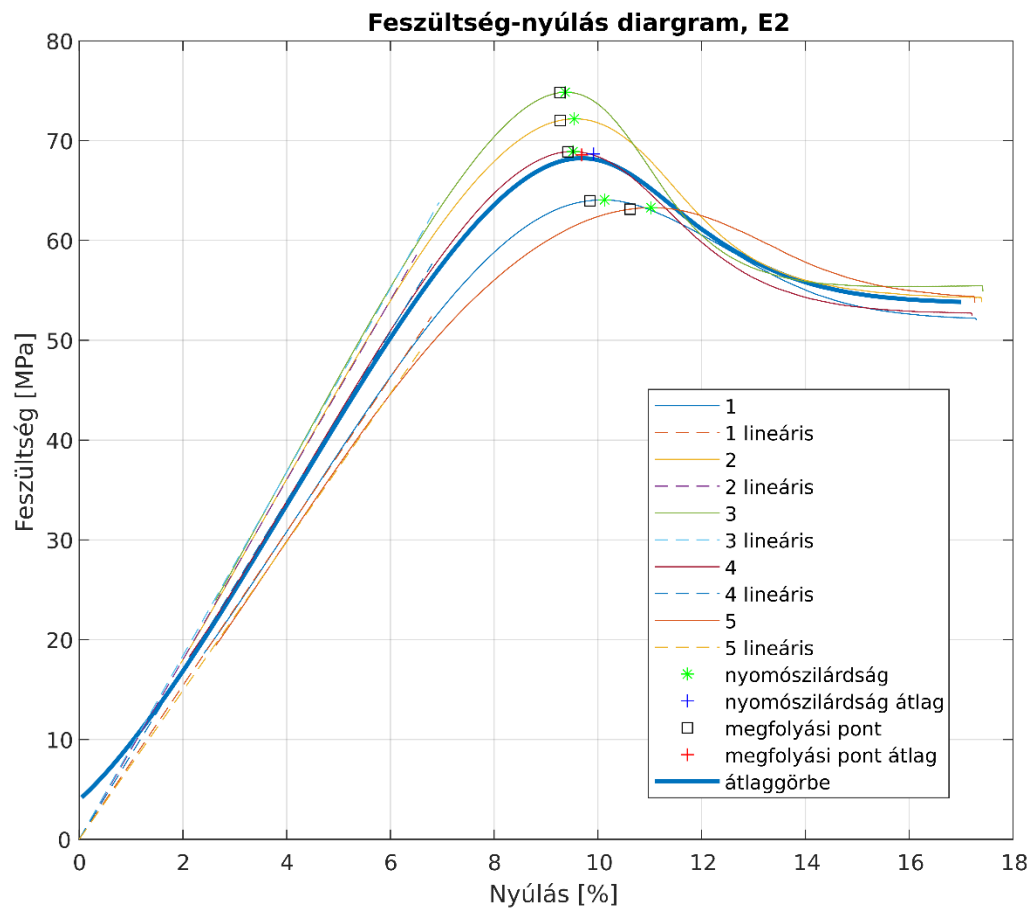
Méréseink alapján a Multi Jet Fusion technológiával készült próbatestek esetén nem tudtunk sem nyomószilárdsági értékeket, sem feszültségvisszaesési értékeket meghatározni.

26.Epoxi nyomóvizsgálat (E)



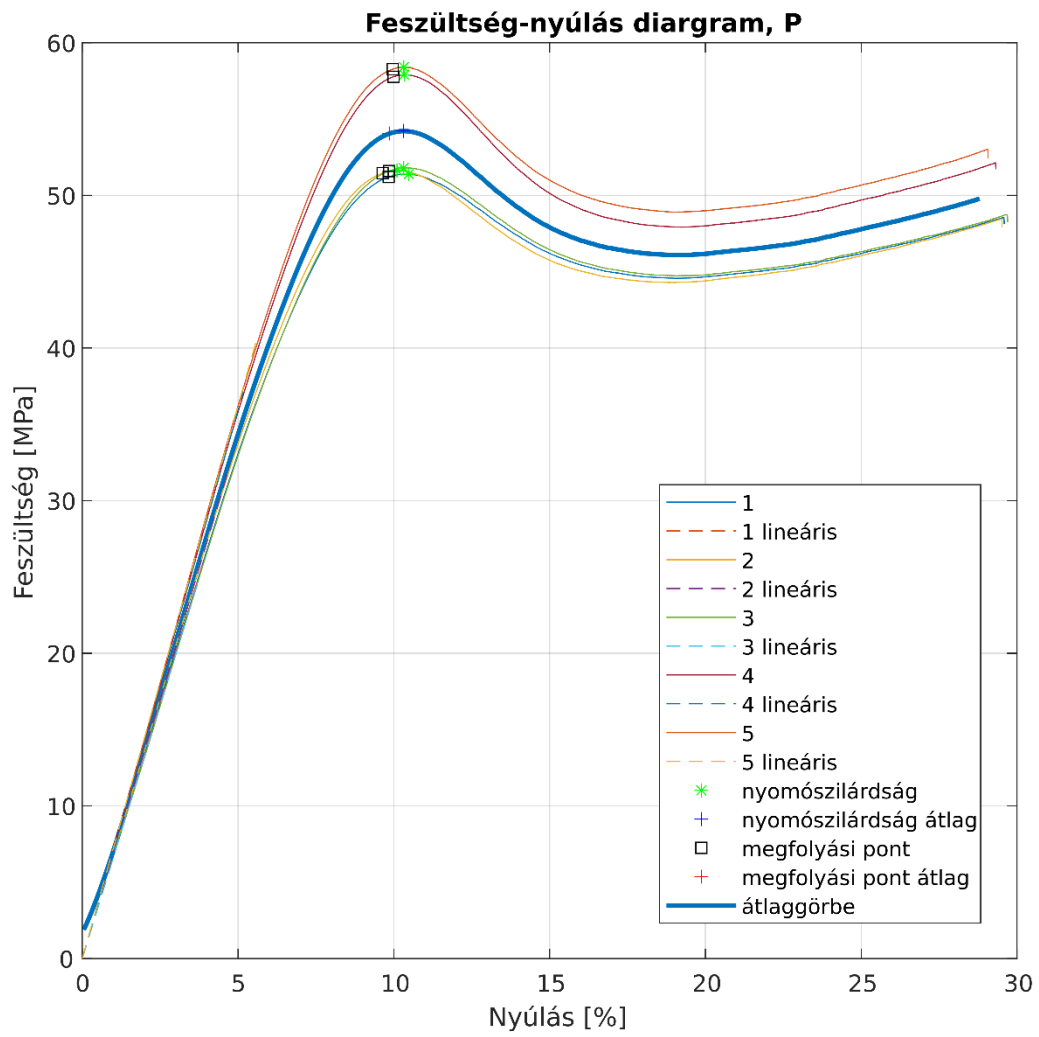
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	23.94	29.06	9640	6.00	375
2	25.04	29.54	10273	6.00	392
3	24.23	29.47	9685	5.99	386
4	23.96	29.56	9691	6.00	370
5	22.93	29.61	9325	5.99	351
átlag	24.02	29.45	9723	5.99	375
szórás	0.75	0.23	343	0.00	16
95% felső határ	25.53	29.90	10409	6.00	407
95% alsó határ	22.51	29.00	9036	5.99	343

27.Epoxi nyomóvizsgálat (E2)



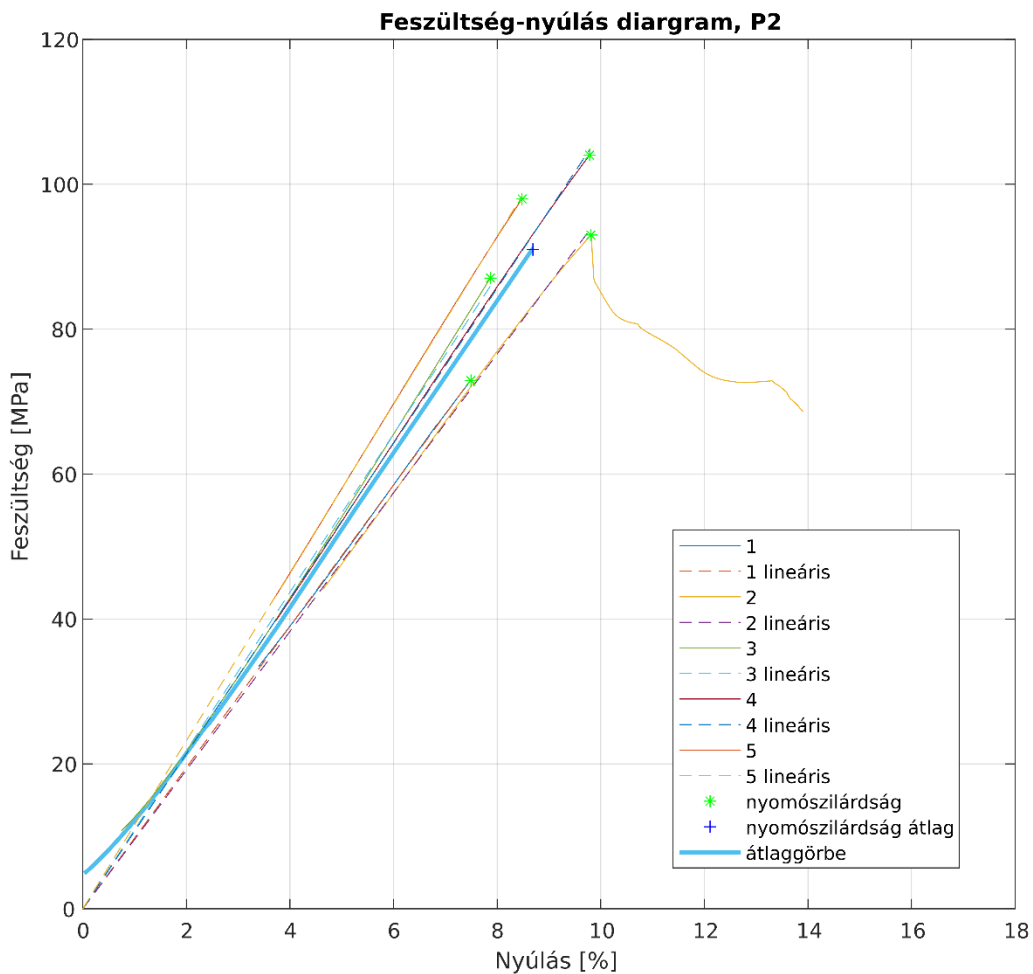
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	64.07	10.13	25254	2.58	771
2	72.19	9.54	28572	2.41	900
3	74.85	9.37	30734	2.39	920
4	68.91	9.52	27274	2.46	848
5	63.29	11.02	26100	2.75	745
átlag	68.66	9.92	27587	2.52	837
szórás	5.02	0.68	2158	0.15	77
95% felső határ	78.70	11.28	31903	2.81	991
95% alsó határ	58.62	8.55	23271	2.22	682
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	63.98	9.85	25220	2.52	
2	72.02	9.27	28504	2.35	
3	74.81	9.27	30717	2.37	
4	68.89	9.42	27266	2.44	
5	63.13	10.62	26037	2.66	
átlag	68.57	9.68	27549	2.47	
szórás	5.04	0.58	2164	0.13	
95% felső határ	78.64	10.84	31878	2.73	
95% alsó határ	58.49	8.53	23220	2.21	

28.Poliészter nyomóvizsgálat (P)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	51.39	1047.85	20340	2.23	668
2	51.63	1010.10	20403	2.18	682
3	51.81	1031.45	20495	2.21	663
4	57.90	1033.51	22746	2.27	718
5	58.41	1031.68	22608	2.33	724
átlag	54.23	1030.92	21318	2.24	691
szórás	3.59	13.49	1242	0.06	28
95% felső határ	61.41	1057.89	23803	2.36	748
95% alsó határ	47.04	1003.95	18834	2.13	635
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	51.21	9.84	20268	2.10	
2	51.46	9.64	20336	2.09	
3	51.59	9.85	20411	2.12	
4	57.77	9.99	22695	2.21	
5	58.26	9.97	22553	2.26	
átlag	54.06	9.86	21252	2.15	
szórás	3.62	0.14	1254	0.08	
95% felső határ	61.30	10.14	23760	2.31	
95% alsó határ	46.82	9.58	18744	2.00	

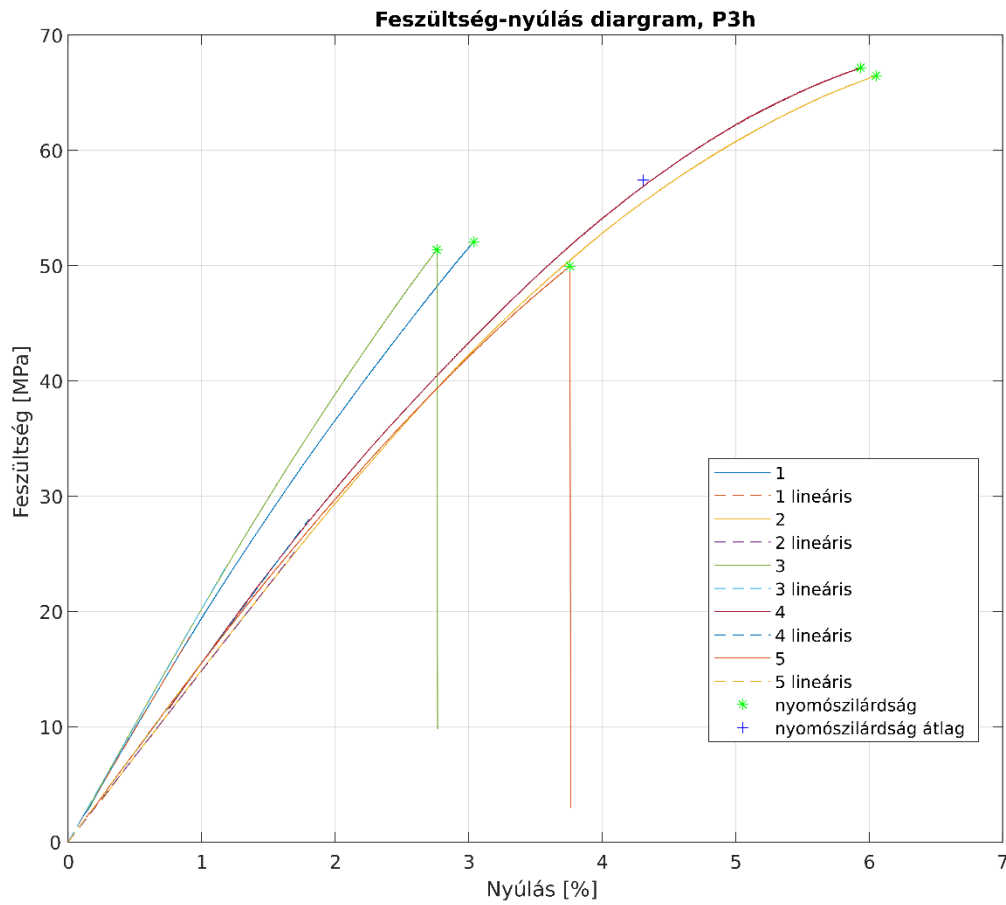
29.Poliészter nyomóvizsgálat (P2)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1*	72.90	7.49	27921	3.00	975
2	93.00	9.81	35634	2.64	957
3*	87.05	7.87	33391	4.00	1092
4*	104.04	9.78	40050	2.43	1071
5*	97.97	8.48	37616	2.50	1160
átlag	90.99	8.69	34922	2.91	1051
szórás	11.89	1.07	4621	0.65	85
95% felső határ	114.78	10.83	44165	4.20	1220
95% alsó határ	67.21	6.54	25680	1.62	882

*Nem volt törés.

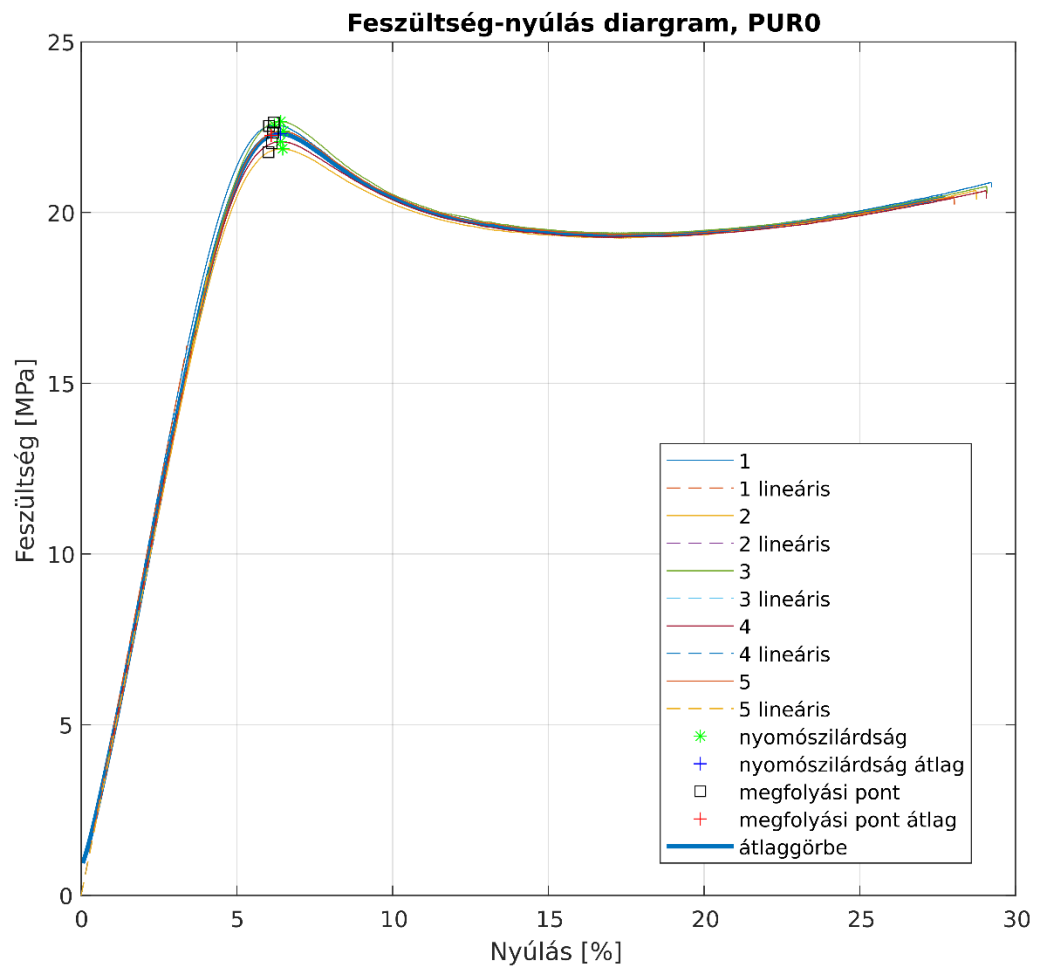
30.Poliészter hajlítóvizsgálat (P3h)



Próbatest Sorszám	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	52.07	3.04	521	5.00	1955
2*	66.49	6.05	654	10.00	1484
3	51.37	2.76	636	4.11	2021
4*	67.18	5.94	625	9.99	1553
5	49.96	3.76	473	6.36	1560
átlag	57.41	4.31	582	7.09	1715
szórás	8.64	1.58	80	2.77	252
95% felső határ	74.68	7.47	742	12.63	2219
95% alsó határ	40.14	1.15	422	1.55	1210

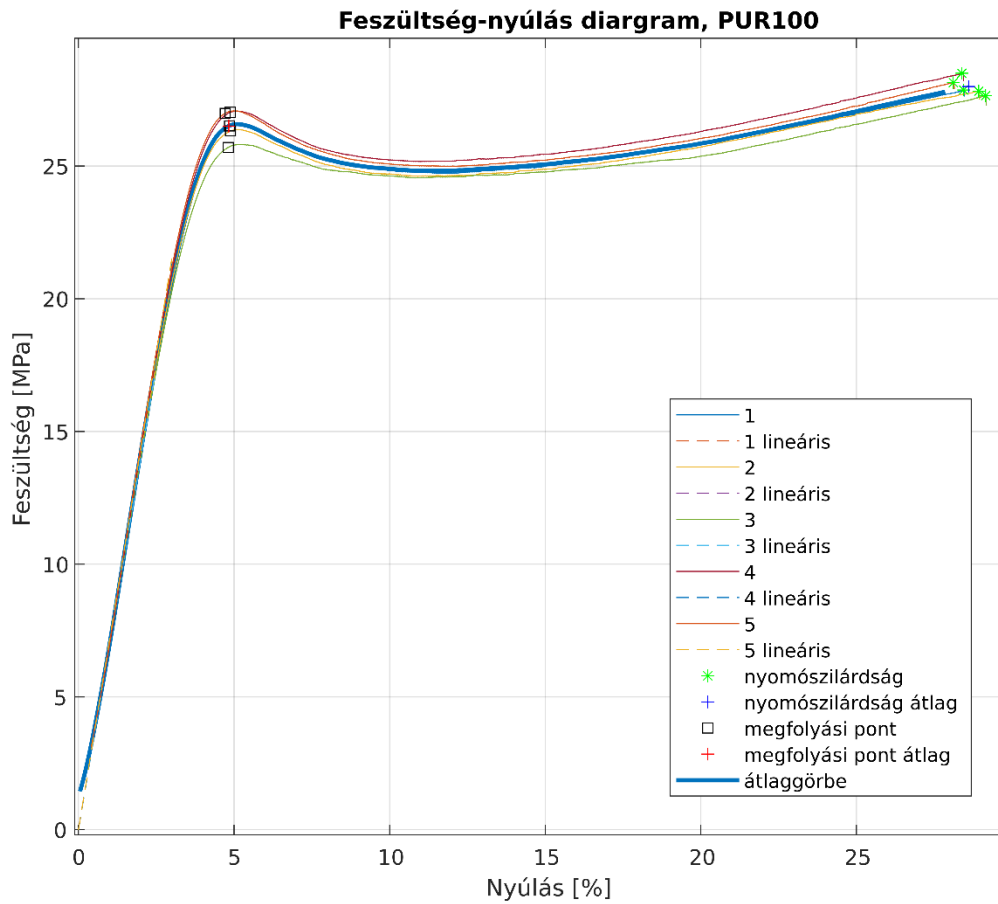
*Nem volt törés.

31. Töltetlen poliuretán nyomóvizsgálat (PUR0)



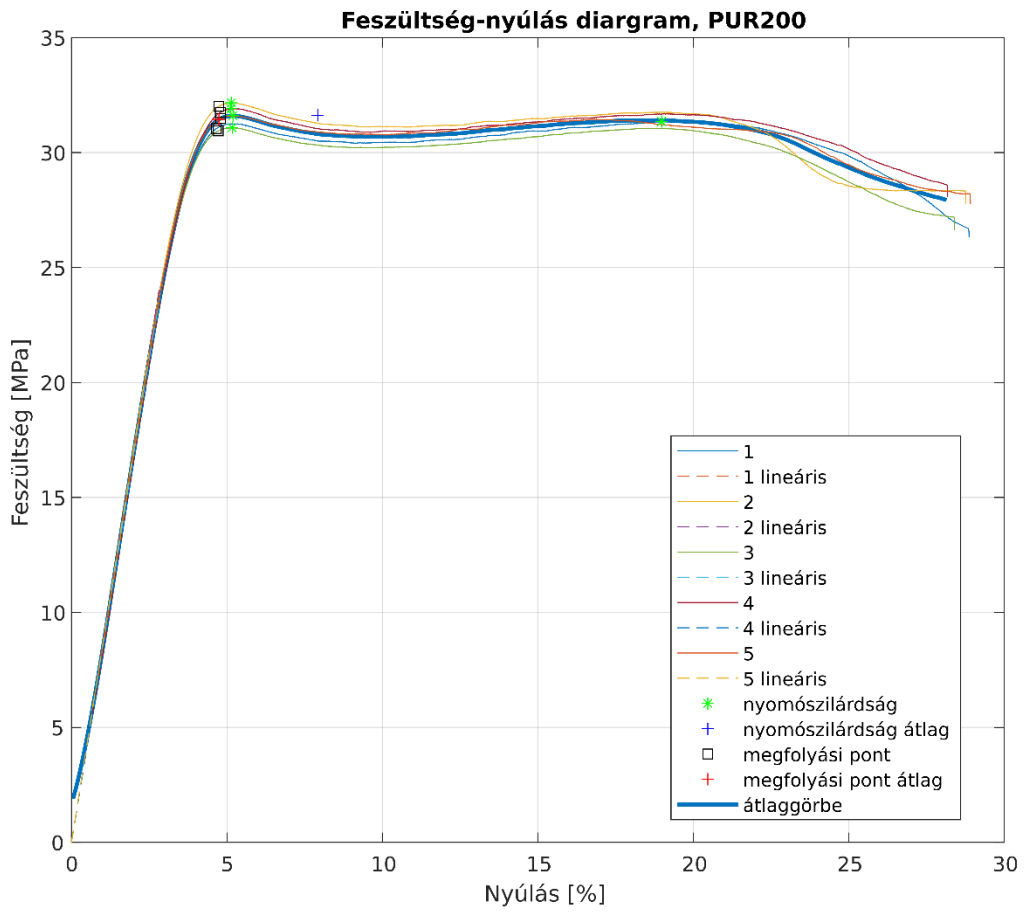
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	22.56	6.20	9062	1.38	474
2	21.87	6.47	8865	1.50	449
3	22.67	6.41	9213	1.46	457
4	22.08	6.40	8950	1.45	456
5	22.39	6.49	8987	1.65	449
átlag	22.31	6.39	9015	1.49	457
szórás	0.34	0.12	131	0.10	10
95% felső határ	22.98	6.63	9278	1.69	478
95% alsó határ	21.64	6.16	8753	1.29	437
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	22.53	6.03	9050	1.35	
2	21.77	6.02	8825	1.41	
3	22.63	6.19	9199	1.42	
4	22.03	6.12	8930	1.39	
5	22.34	6.16	8969	1.59	
átlag	22.26	6.10	8995	1.43	
szórás	0.36	0.08	140	0.09	
95% felső határ	22.98	6.26	9275	1.61	
95% alsó határ	21.54	5.95	8714	1.25	

32.100% alumínium-trihidráttal töltött poliuretán nyomóvizsgálat (PUR100)



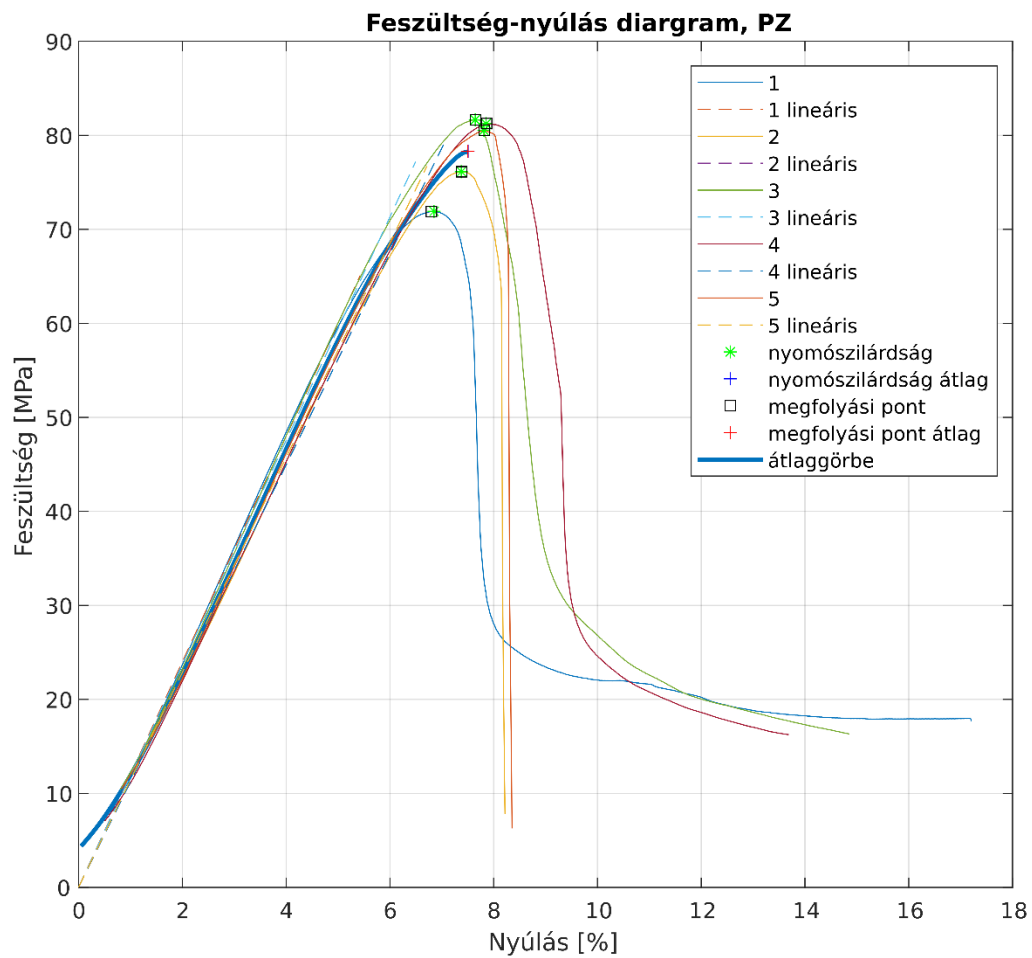
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	26.51	4.86	10952	1.22	700
2	26.32	4.89	11028	1.13	706
3	25.70	4.82	10709	1.11	698
4	27.02	4.88	11130	1.28	709
5	26.98	4.72	11095	1.26	717
átlag	26.51	4.83	10983	1.20	706
szórás	0.54	0.07	168	0.08	8
95% felső határ	27.59	4.97	11318	1.35	721
95% alsó határ	25.42	4.69	10647	1.05	691

33.200% alumínium-trihidráttal töltött poliuretán nyomóvizsgálat (PUR200)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	31.35		12970		842
2	32.17	5.14	13314	1.26	853
3	31.08	5.17	12977	1.29	839
4	31.91	5.13	13488	1.37	825
5	31.60	5.19	13094	1.22	856
átlag	31.62	5.16	13169	1.28	843
szórás	0.43	0.02	227	0.06	12
95% felső határ	32.49	5.22	13622	1.41	867
95% alsó határ	30.76	5.10	12716	1.16	818
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	31.04	4.66	12843	1.10	
2	32.01	4.74	13248	1.18	
3	30.94	4.72	12919	1.20	
4	31.74	4.79	13418	1.30	
5	31.48	4.80	13044	1.14	
átlag	31.44	4.74	13094	1.18	
szórás	0.45	0.06	237	0.07	
95% felső határ	32.35	4.85	13568	1.33	
95% alsó határ	30.54	4.63	12620	1.04	

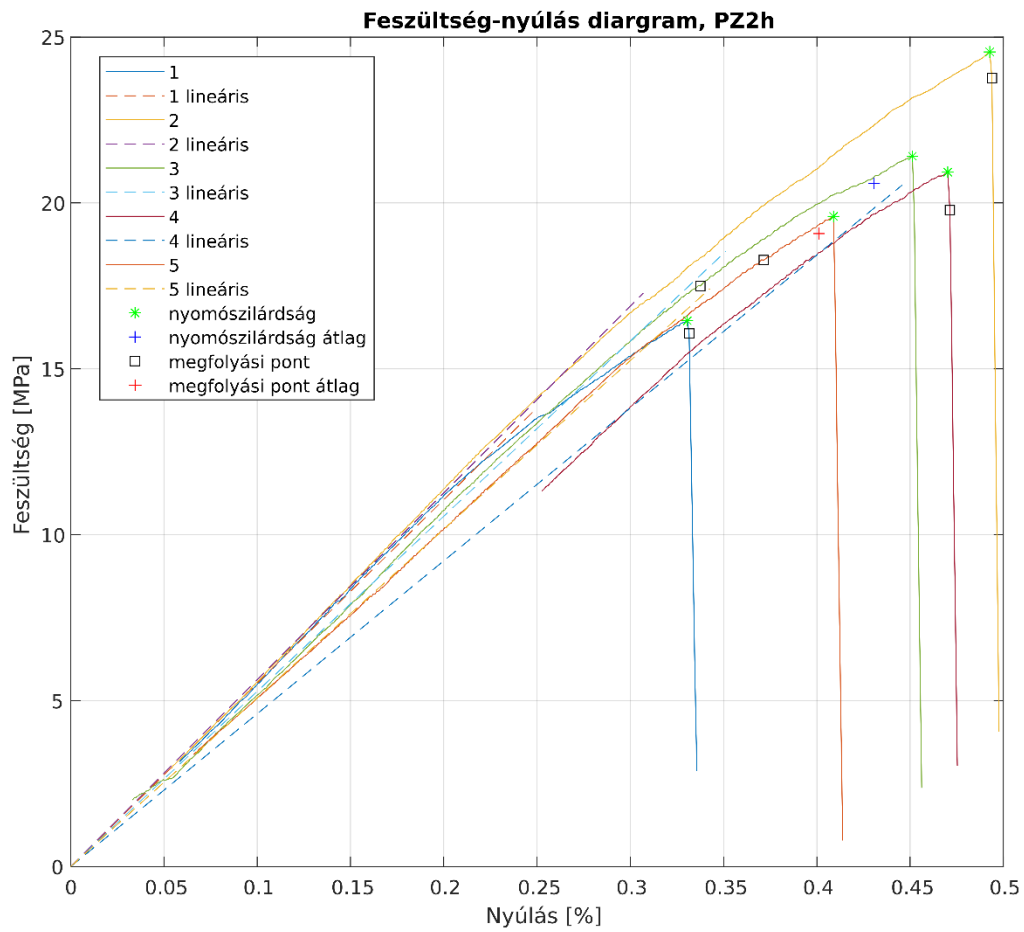
34.Poliésztermátrixú zúzottkő nyomóvizsgálat (PZ)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Eró [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	71.92	6.85	28683	1.93	1199
2*	76.13	7.38	31306	2.10	1124
3	81.65	7.65	33675	2.39	1188
4	81.25	7.85	32582	2.64	1123
5*	80.54	7.81	34050	2.56	1143
átlag	78.30	7.51	32059	2.32	1155
szórás	4.19	0.41	2169	0.30	36
95% felső határ	86.68	8.33	36397	2.93	1228
95% alsó határ	69.91	6.68	27722	1.72	1083

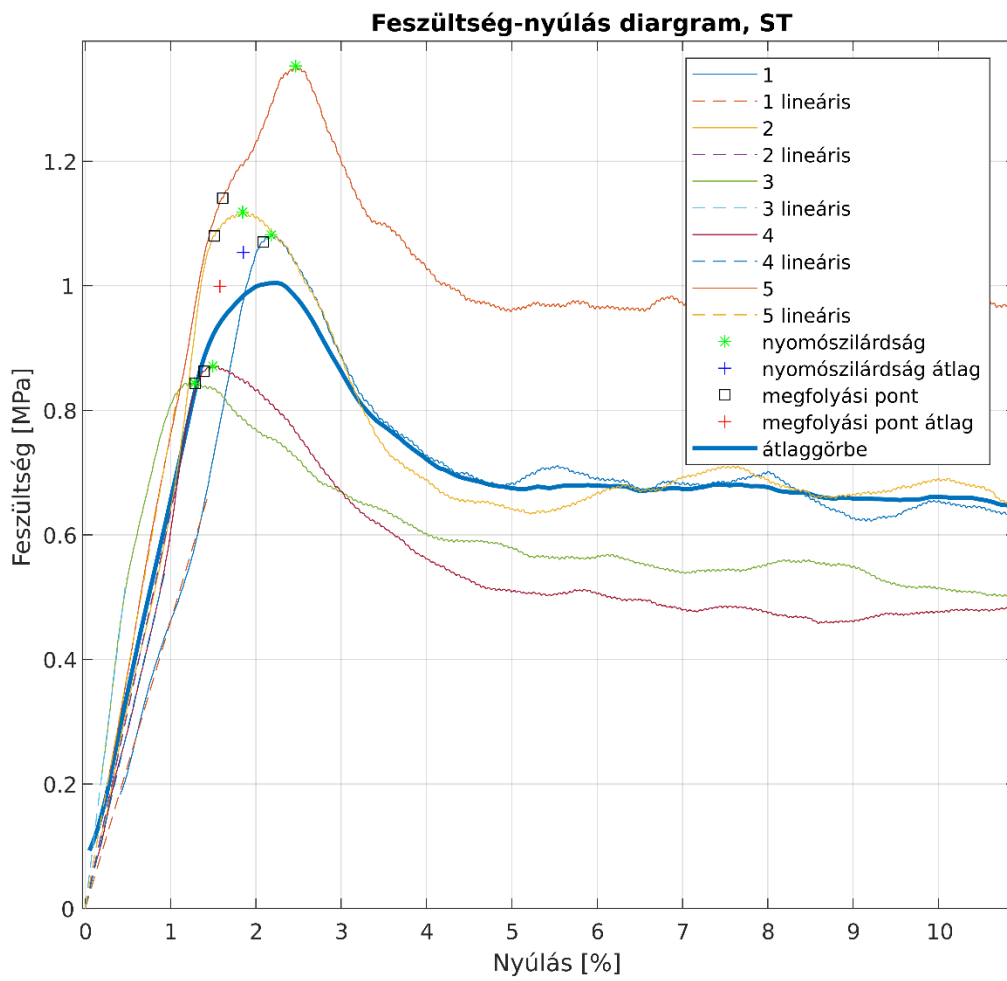
*robbanásszerű törés.

35.Poliésztermárixú zúzottkő hajlítóvizsgálat (PZ2h)



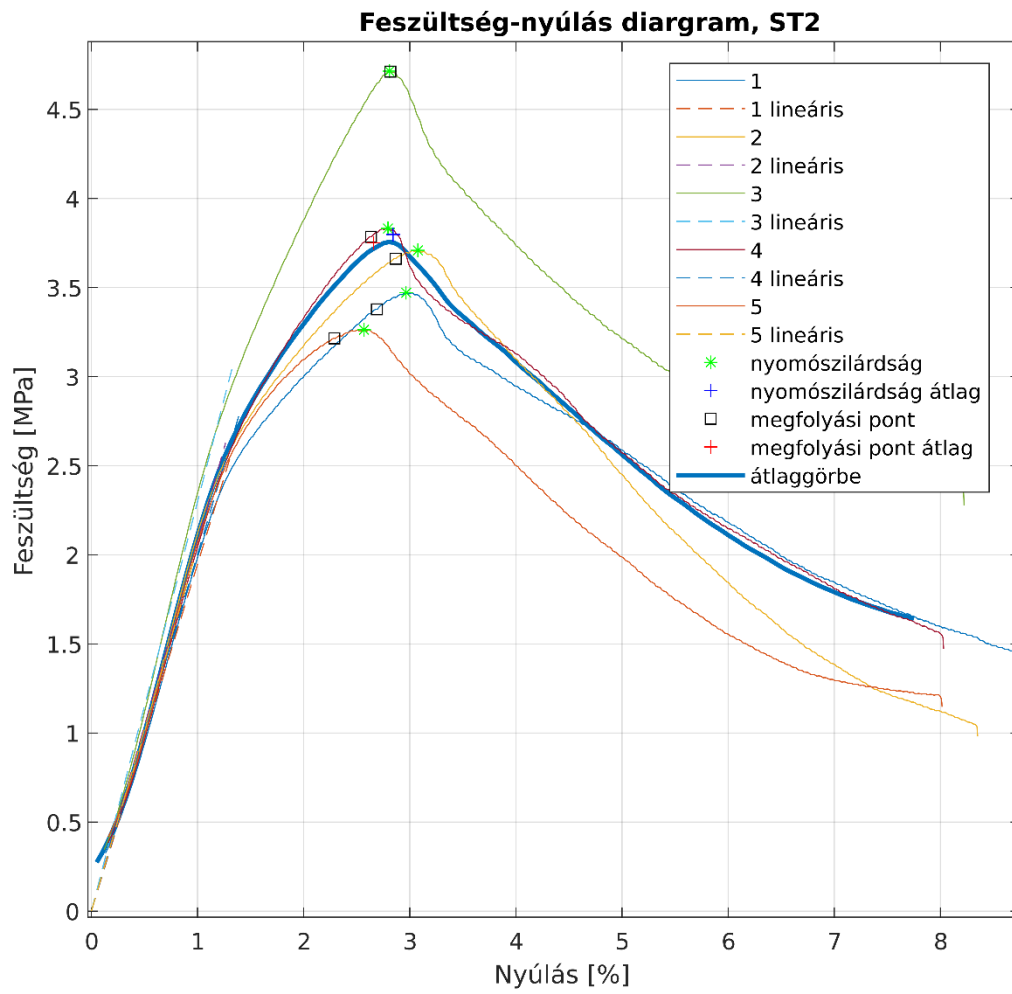
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	16.45	0.33	188	0.55	5640
2	24.55	0.49	264	0.82	5648
3	21.41	0.45	230	0.85	5280
4	20.93	0.43	225	0.74	5344
5	19.60	0.41	209	0.71	5125
átlag	20.59	0.42	223	0.73	5408
szórás	2.94	0.06	28	0.12	230
95% felső határ	26.47	0.54	279	0.97	5868
95% alsó határ	14.71	0.30	167	0.50	4947

36.EPS ragasztó nyomóvizsgálat (ST)



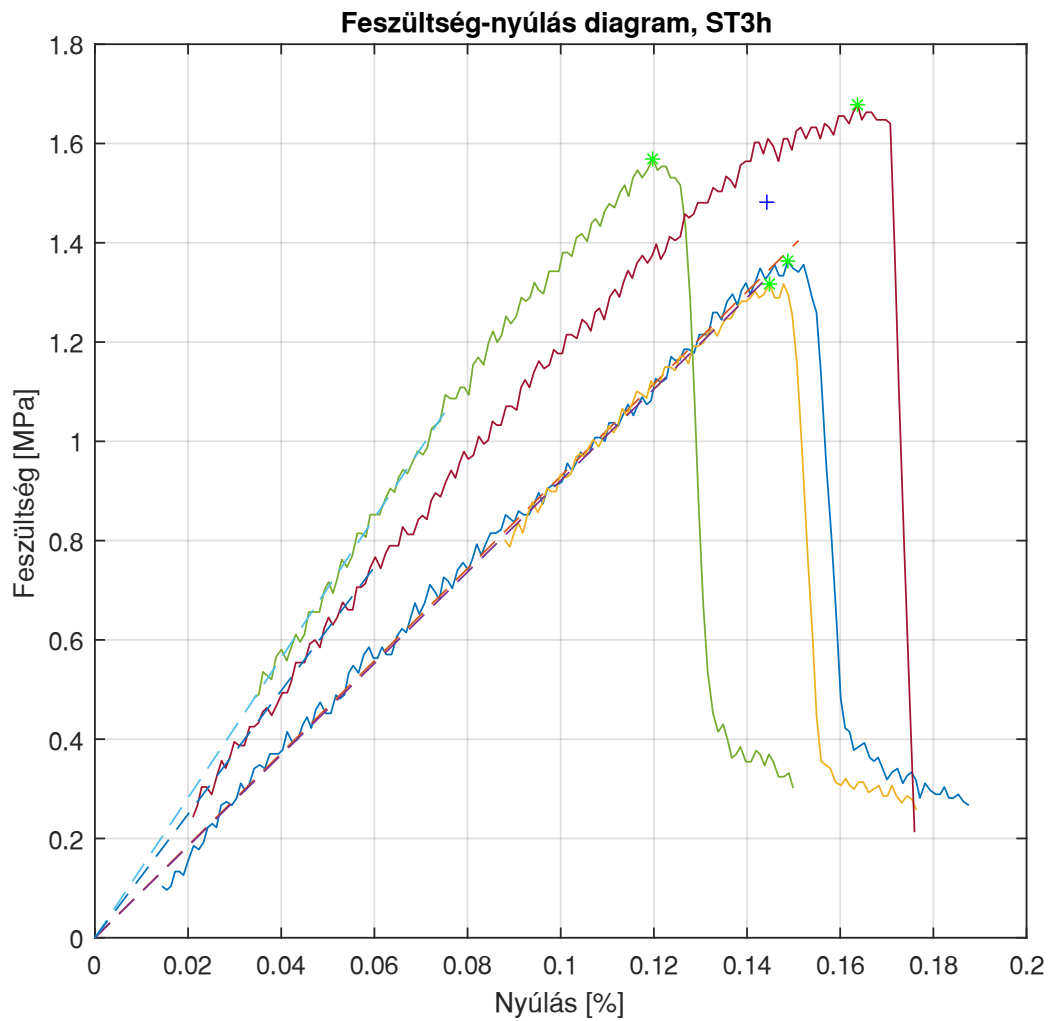
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	1.08	2.18	455	0.70	46
2	1.12	1.85	461	0.52	64
3	0.84	1.28	354	0.33	110
4	0.87	1.50	363	0.46	58
5	1.35	2.47	570	0.69	76
átlag	1.05	1.85	441	0.54	71
szórás	0.21	0.48	88	0.16	25
95% felső határ	1.47	2.82	617	0.85	120
95% alsó határ	0.64	0.89	264	0.23	22
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	1.07	2.09	450	0.68	
2	1.08	1.51	445	0.46	
3	0.84	1.29	354	0.33	
4	0.86	1.39	359	0.44	
5	1.14	1.61	481	0.51	
átlag	1.00	1.58	418	0.49	
szórás	0.14	0.31	58	0.13	
95% felső határ	1.27	2.20	533	0.74	
95% alsó határ	0.73	0.96	303	0.23	

37.EPS ragasztó nyomóvizsgálat (ST2)



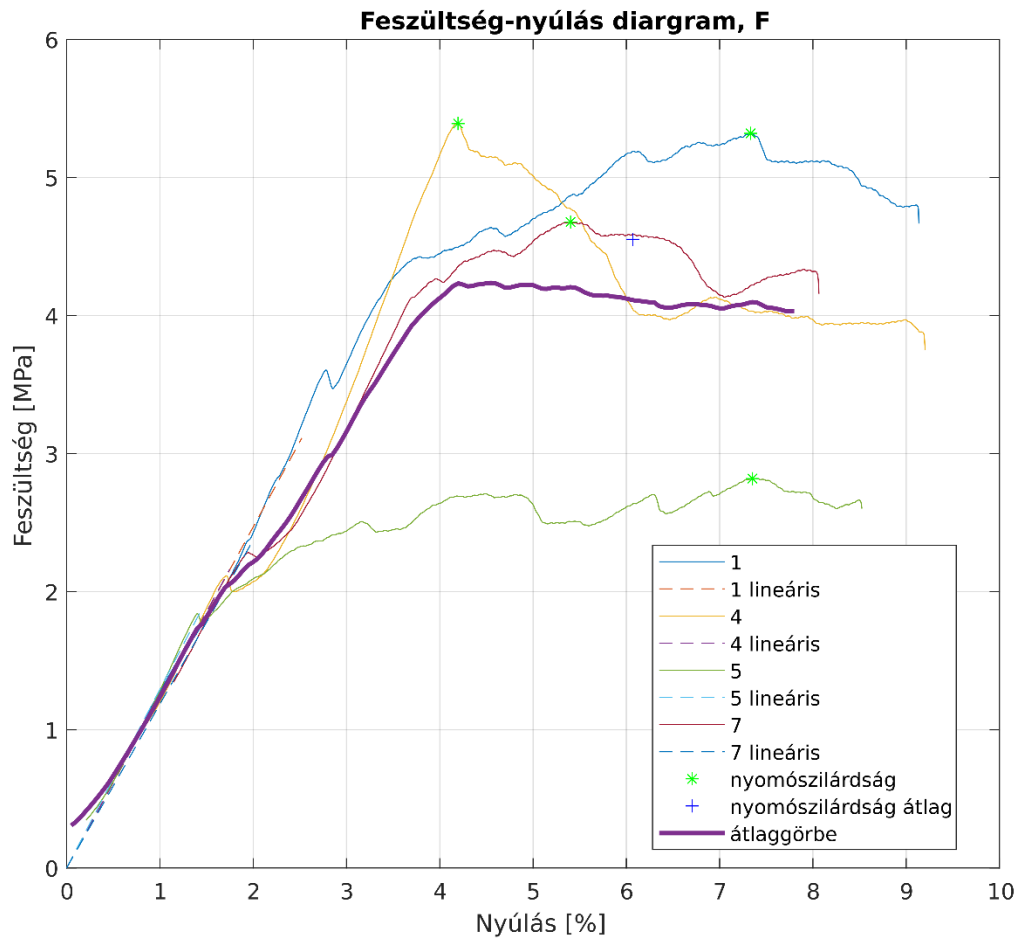
Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	3.47	2.97	1417	0.93	195
2	3.71	3.08	1527	0.94	208
3	4.71	2.81	1921	0.91	230
4	3.83	2.79	1591	0.95	200
5	3.26	2.57	1343	0.90	204
átlag	3.80	2.84	1560	0.93	207
szórás	0.56	0.19	223	0.02	13
95% felső határ	4.91	3.23	2007	0.97	234
95% alsó határ	2.68	2.46	1113	0.88	180
Nyomófeszültség megfolyáskor					
1	3.38	2.69	1379	0.88	
2	3.66	2.87	1507	0.90	
3	4.71	2.82	1920	0.91	
4	3.78	2.63	1571	0.92	
5	3.22	2.29	1324	0.84	
átlag	3.75	2.66	1540	0.89	
szórás	0.58	0.23	234	0.03	
95% felső határ	4.92	3.11	2008	0.95	
95% alsó határ	2.58	2.20	1072	0.82	

38.EPS ragasztó hajlítóvizsgálat (ST3h)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Hajlítószilárdság					
1	1.70	0.15	18	0.22	1121
2	1.65	0.14	18	0.19	1158
3	1.96	0.12	20	0.18	1773
4	2.10	0.16	21	0.25	1547
átlag	1.85	0.15	19	0.21	1399
szórás	0.21	0.02	2	0.03	315
95% felső határ	2.28	0.18	22	0.27	2029
95% alsó határ	1.43	0.11	16	0.15	770

39. Agyagos talaj nyomóvizsgálata (F)



Próbatest Sorszama	Feszültség [MPa]	Nyúlás [%]	Erő [N]	Út [mm]	Modulus [MPa]
Nyomószilárdság					
1	5.32	7.33	1879	1.67	123
4	5.39	4.20	1756	1.10	124
5	2.82	7.35	945	1.78	129
7	4.68	5.40	1622	1.50	119
átlag	4.55	6.07	1550	1.51	124
szórás	1.20	1.55	417	0.30	4
95% felső határ	6.95	9.17	2385	2.11	133
95% alsó határ	2.16	2.97	716	0.91	115