



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

GRÁNIT, MÁRGA ÉS DURVA MÉSZEKŰ ULTRAHANG TERJEDÉSI
SEBESSÉGÉNEK ÉS SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGAINAK ÖSSZEFÜGGÉSE

CORRELATION BETWEEN ULTRASONIC PULSE VELOCITY AND
COMPRESSIVE STRENGTH OF GRANITE, MARL AND POROUS LIMESTONE

Készítette:

Böröczki Luca

Konzulensek:

Németh Andor

Dr. Török Ákos

Dr. Vásárhelyi Balázs

Lógó Benedek András

TARTALOMJEGYZÉK

Összefoglalás.....	3
Abstract	4
1. Bevezetés	5
2. Vizsgált kőzetek bemutatása.....	7
Gránit.....	7
Márga	8
Durva mészkő.....	9
3. Mérési módszerek	12
4. Eredmények	23
Gránit.....	23
Márga	28
Durva Mészkő	33
5. Eredmények értelmezése	38
6. Összevetés a nemzetközi irodalommal	55
7. Összegzés.....	58
8. Irodalom lista	59

ÖSSZEFOGLALÁS

A mérnökgeológiában a kőzetek fizikai tulajdonságainak meghatározására roncsolásmentes vizsgálatok is elterjedtek. Ezeken belül az ultrahangos vizsgálati módszerrel meghatározható a P (primer) és S (szekunder) hullámok terjedési sebessége, amelyből számítható a kőzetek rugalmassági, nyírási, és kompressziós modulusa, Poisson-tényezője.

A kutatásom során három, hazánkban gyakran felhasznált, egymástól nagymértékben különböző kőzettípusban vizsgáltam a P és S hullámok terjedési sebességét, illetve ezek összefüggéseit különböző kőzetmechanikai paraméterekkel. A 34 darab kőzetminta egy része a Mórággyi Gránit Formációból származik monzogránitos kőzetváltozatnak tekinthető, a második csoport az eocén, Budai Márga Formációból származó mészmárga, míg a fennmaradó kőzetminták pedig porózus ún. durva mészkövek, amelyek a Citadellából származó tömbökből lettek kialakítva s a miocén Tinnyei Formációt képviselik

A próbatesteknek kiszámítottam a száraz és víztelített testsűrűségét, majd a Geotron készülékkel összesen 636 ultrahangos mérést végeztem a P és S hullámok terjedési sebességének meghatározására a kőzetmintákban. A P és S hullámok terjedési sebességéből dinamikus Poisson-tényezőt, rugalmassági, nyírási és kompressziós modulust számítottam. A roncsolásmentes vizsgálatokat követően roncsolásos egyirányú nyomószilárdságvizsgálatnak vettem alá a kőzetmintákat, ennek eredményéből pedig meghatároztam a statikus rugalmassági modulust és a nyomószilárdságot. Minden vizsgálatot légszáraz és víztelített kőzetfizikai állapotú mintákon is végeztem. A mért és számított adatokat ábrázolva láthatók az összefüggések a testsűrűség, a hullámterjedési sebességek, a deformációs modulusok és a nyomószilárdság közt. A kapott összefüggéseket összevetettem a nemzetközi szakirodalomban leírt egyenletekkel.

Méréseim igazolták, hogy olyan roncsolásmentes mérésekkel, mint az ultrahang terjedési sebesség fontos kőzetfizikai paraméterek adhatók meg és megfelelő nagy adat mennyiség esetén lehetőség nyílik összefüggések felállítására a különböző kőzetfizikai paraméterek között, ami segít a jövőbeli mérések tervezésében, a mérés számok csökkentésében.

ABSTRACT

Non-destructive tests are commonly applied tools in engineering geology, especially in stone testing. Developing and improving these methods require further testing of stones and collecting data. In this study, ultrasonic pulse velocity of various rock types was measured in order to deduce rock behaviour and mechanical parameters. These include strength and porosity that can be estimated from P (primer) and S (secondary) ultrasonic pulse velocities. Additional values such as elastic, shear and bulk modulus and Poisson ratio.

During this research, three widely used rock types were studied. The first type is a plutonic igneous rock, granite from Mórág. This lithotype usually has higher strength and very low porosity and is considered a durable material. Marlstone is a special sedimentary, compact, well-bedded rock with a relatively higher strength and porosity than granite. The third type is porous Miocene limestone which is marine carbonate with high porosity. It is one of the most common building materials of Budapest. The studied samples were taken from Citadella. From the three lithotypes, 34 cylindrical samples were tested. Density was calculated, and the P and S wave velocities were measured using Geotron device. Tests were made on air-dry and water-saturated specimens. Altogether 636 pulse velocity measurements were made. After non-destructive tests, the cylindrical specimens were tested for uniaxial compressive strength. The standard deviation of the data-set was also calculated. The measured and calculated values were used to outline the correlation between these parameters. Relationships were calculated between density, ultrasonic pulse velocities and compressive strength of the studied rock types. Both dry and water saturated specimens were tested thus correlation between dry and saturated parameters were also possible to determine. The obtained relationships were compared to internationally published data sets and equations.

The study shows that non-destructive tests provide valuable information and can be used to evaluate rock mechanical parameters based on newly outlined equations. It is feasible when large data sets are available and it also helps in reducing the number of future measurements.

1. BEVEZETÉS

A mérnökgeológia feladatai közé tartozik a kőzetek különböző fizikai tulajdonságainak vizsgálata. Ezen vizsgálatok célja egyrészt lehet a vizsgált kőzet minősítése, azaz annak meghatározása, hogy mire használható fel, mire alkalmas az adott kőzet. Logikailag megfordítva a gondolatmenetet, a vizsgálatok célja másrészt lehet annak eldöntése, hogy az adott kőzet megfelel-e egy konkrét célra. Mindkét esetben lényeges, hogy meghatározzuk azokat a kőzetfizikai tulajdonságokat és paramétereket, amelyekkel a tervezés során számolni kell.

Az elvégzett vizsgálatok lehetnek roncsolásmentesek, azaz a kőzetmintát nem károsító, az anyag szerkezetében változást nem okozó vizsgálatok, illetve lehetnek roncsolásosak, azaz anyagszerkezeti változást okozó vizsgálatok. Ezen kutatás keretein belül a roncsolásmentes vizsgálatok közül a longitudinális (haladási irányban rezgést keltő) primer (P) hullámok, illetve transzverzális (haladási irányra merőlegesen rezgést keltő) szekunder (S) hullámok terjedési sebességét vizsgáltam. Az elvégzett mérések alkalmazhatók különböző kőzetek minősítésére, de különösen alkalmas olyan védett építmények, mint a műemlékek kőanyagának elemzésére - akár történelmi kutatási, akár állékonysági (biztonsági) vizsgálat céljából - amelyek minősítése roncsolásos módszerekkel nem valósítható meg. A módszert nemzetközi szinten is elterjedten alkalmazzák (Vasconcelos et al. 2008, Vasanelli et al. 2020).

A különböző kőzetekben mért hullámterjedési-sebességeket Lama & Volarovics (1978) foglalta össze, míg a azt, hogy a víztartalom hogyan befolyásolja a kőzetek viselkedését Wong et al. (2016) jellemezte. A víz jelenléte lényegesen csökkenti, a mechanikai paramétereket ami a kőzetek idő előtti tönkremenetelét is okozhatja. Magyarországon felhasznált építési kőanyagok jelentős része, mint az általam is vizsgált durva mészkő, illetve különböző tufák, homokkövek nagy porozitással rendelkeznek, így vízérzékenyek (Vásárhelyi 2018, Gubányi-Kéber és Vásárhelyi, 2004).

A P és S hullámok terjedési sebességéből számítható a kőzetek rugalmassági, nyírási, és kompressziós modulusa, Poisson-tényezője. Megállapítható emellett a kőzetek állapota, repedezettsége, mállottsága. A kőzetben lévő repedések számának és mértékének növekedésével az ultrahang terjedési sebessége értelemszerűen csökken, illetve belső, szabad szemmel nem látható repedések is kimutathatók a vizsgálatok során. Az ultrahang terjedési sebességek a kőzetek mállásának előrehaladtával szintén csökkennek, mivel a kőzetekben az ásványok bomlása miatt a rugalmas tulajdonságok romlanak. (Vásárhelyi, 2016)

Száritott, illetve víztelített állapotban a kőzetek testsűrűsége, valamint a P és S hullámok terjedési sebessége közötti lineáris kapcsolatot adtak meg (Besharatinezhad et al. 2022). de Vásárhelyi (2005) exponenciális kapcsolatot talált a miocén durva mészkő testsűrűsége és az egyirányú nyomószilárdság között légszáraz és víztelített állapotban is.

A hullámterjedési sebességek mellett roncsolásos egyirányú nyomószilárdság vizsgálat alapján is meghatározhatjuk a kőzetek rugalmassági modulusát (E modulus vagy Young modulus). Előbbi esetben úgynevezett dinamikus rugalmassági modulusról (E_{din}), utóbbi esetben statikus rugalmassági modulusról (E_{stat}) beszélhetünk. E két érték összefüggésére vonatkozó kutatási

eredményekkel szintén több helyen találkozhatunk a nemzetközi szakirodalomban. mind lineáris, mind logaritmikus és exponenciális összefüggéseket is találtak. A dinamikus és statikus rugalmassági modulus közötti eltérés abból adódik, hogy a kőzet nem tökéletesen rugalmas anyag, azaz a reológiai tulajdonságokat figyelembe véve magyarázható a különbség (Vásárhelyi 2016).

Kutatásom során három, hazánkban gyakran felhasznált, egymástól nagymértékben különböző kőzettípusban vizsgáltam a P és S hullámok terjedési sebességét, illetve ezek összefüggéseit különböző kőzetmechanikai paraméterekkel. A 34 darab kőzetminta egy része a Mórágai Gránit Formációból származik, mélységi magmás kőzettípus, mely nagy szilárdságú, nem porózus, idő- és kopásálló; másik része az eocén, Budai Márga Formációból származik, biogén üledékes kőzettípus, mely tömött szövetű, jól rétegzett, relatív nagy szilárdságú, azonban a gránitnál jóval porózusabb; a fennmaradó kőzetminták pedig a Tinnyei Formációhoz tartozó, Sós-kútnál bányászott, a Citadellából származó durva mészkő, szintén biogén üledékes kőzettípus, tengeri eredetű, puha, nagyon porózus.

A hasonló kutatások jelenleg is nemzetközi szinten folynak, alátámasztva a módszer fejlődésének jelentőségét. A nemzetközi eredmények mind a különböző paraméterek közötti kapcsolatokat írják le. Travertinek (forrásvízi mészkövek) esetén összefüggés áll fenn az akusztikus tulajdonságaik és porozitásuk, illetve pórus típusaik között (Soete et al. 2015). Gránit próbatestek esetén új fizikai paramétereket határoztak meg ultrahang terjedési vizsgálatokkal külföldi kutatók (Cerrillo et al. 2014). Roncsolásmentes vizsgálatokkal becsülhető a nyomószilárdság építőkövek és téglák esetén (Aliabdo et al. 2012).

2. VIZSGÁLT KÖZETEK BEMUTATÁSA

GRÁNIT

A vizsgált első mintacsoport a Mórági Gránit Formációból származik. A formáció a paleozoikumban keletkezett magmás test, melynek fő tömegét monzogránit kőzetcsoporthoz tartozó kőzetei (monzogránit, granodiorit, gánit) adják.

A gránit elnevezése szemcsés jellegéből ered, hiszen a granum latin szó szemcsét jelent. A gránitot alkotó ásványok kristálmérete változhat a durva, több centiméteres átlagmérettől egészen az apró milliméteres kristályokig (az utóbbi esetben mikrogránitról beszélhetünk). Fővilágos színű kőzetalkotó ásványai a kvarc, a káliföldpát (ortoklász), a plagioklász (általában albitos), időnként muszkovit. A sötét kőzetalkotók közül főként biotitot és amfibolt tartalmaz. Színe az uralkodó világos elegyrésztől, a káliföldpáttól függ leginkább. Amennyiben a káliföldpát rózsaszín-vörös, a gránit is rózsaszín vagy vörös, ha a káliföldpát szürke vagy fehér, akkor a gránit világosszürke, szürke. Kőzettanilag megkülönböztethető az általam is vizsgált monzogránit, amely plagioklászban szegényebb, és a plagioklászban dúsabb szienogránit.

A gránitot gyakran járhatják át telérszerű finomabb kristályos, ásványokkal kitöltött erek, amelyeket aplitnak nevezünk, és a velencei, illetve az általam vizsgált mórági gránitban is előfordulnak.

A hazai gránitok közül a Velencei-hegységben (Nadap, Sukoró) található gránit batolit jellegű, biotit-dús gránit, míg a Mecsekben (Mórág, Erdősmecske) a biotitos és amfibol-dús gránitok gyakoriak. A vizsgált minták a Bábaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló területéről származnak. Ez a tároló a Paksi Atomerőmű működése közben keletkező kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezése céljából létesült.

Európa híres gránitjai a Skandináv félszigeten (Finnországban, Svédországban), Németországban és Csehországban, valamint még Spanyolország, Portugália, Franciaország területéről és az Alpok országaiból ismertek.

A gránit felhasználása széles körű mind az építészetben, mind a művészetben. A jó minőségű gránit polírozott lapjai burkolóköként, járólapként és díszítőköként használhatók, de szobortalapzatok, lábazat, járda, és szegélykő is készül gránitból, hiszen nagy szilárdságú, jól megmunkálható, idő- és kopásálló kőzet. Teherhordó szerkezetek, mint oszlopok, pillérek is készülnek belőle, mivel nagy szilárdságú és időtálló, így tartósan teherbíró. A tömbköveket vízepítési célra, a bányászat melléktermékét vagy a nagy mennyiségben előforduló gránitot zúzottköként út- és vasútépítésre használják, mivel nagy halmazszilárdságú, jó az ütés- és kopási ellenállása, valamint fagyálló. A művészetben az egyiptomi kultúra fontos kőzete, az asszuáni vörös gránitból számtalan szobor, obeliszk készült.

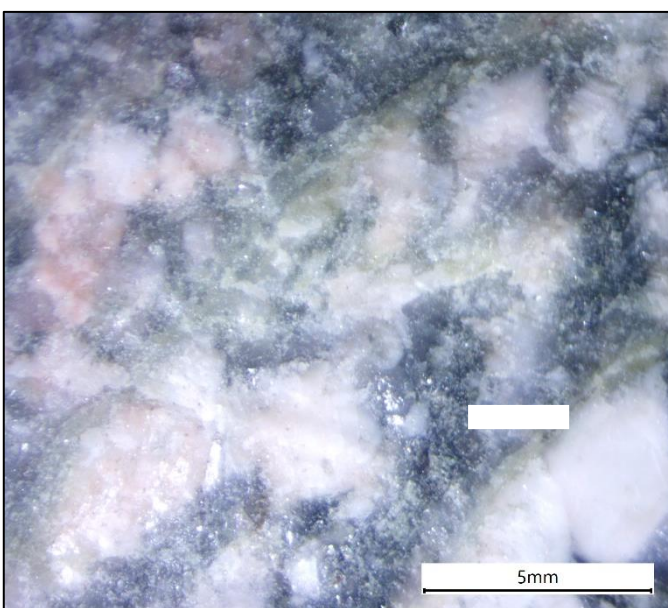
A nálunk felhasznált gránitok közül a szürkés színű ausztriai „Mauthauseni” gránit, amelyből a Szabadság híd és Erzsébet híd pillérei, valamint a németországi vörös gránitok és a finnországi vörös rapakivi gránit a leggyakoribb. Az Országház vörös, egy tömbből faragott gránitoszlopai Svédországból származnak.

Az MSZ EN 12407:2000, a „Természetes építőkövek vizsgálati módszerei, Kőzettani vizsgálat” c. európai szabvány adja meg a kőzetek makroszkópos, azaz a szabad szemmel történő leírásnál és a kőzettani mikroszkópos elemzésénél vizsgálandó paramétereket. Az elemzést a szabványnak megfelelően végeztem el.

A vizsgált gránit makroszkópos és mikroszkópos felvétele a 2.1 és 2.2 ábrákon látható. A szövetben a centiméteres nagyságú halvány rózsaszín, táblás megjelenésű káliföldpátok a legjellemzőbb fenokristályok. A káliföldpát kristályok maximális mérete elérheti a 3 centiméter is. Ezek mellett a világos kőzetalkotókat néhány milliméteres, helyenként centiméter is elérő szürkésfehér plagioklászok alkotják. A tömegesen megjelenő kvarc kristályok xenomorfak, méretük mm-es mérettartományba esik. A sötét kőzetalkotók közül a biotit uralkodik, de emellett amfiból kristályok is megjelennek szövetben. A minták többségében a szövet irányítatlan, de helyenként a kristálycsoportok enyhe orientációja is megfigyelhető.



2.1. ábra. Gránit makroszkópos felvétele



2.2 ábra. Gránit mikroszkópos felvétele

MÁRGA

A vizsgált második mintacsoport az eocén, Budai Márga Formációból származó mészmárga, amely a formáció idősebb rétegeit képviseli. A formáció fiatalabb rétegeiben uralkodóan agyagmárga, gyakori tufit, tufitos homokkő zsinórok és allodapikus mészkő betelepülések találhatók. Az idősebb szakaszokban számos bryozoa-maradvány jelenhet meg („bryozoás márga tagozat”). A Budai-hegységben nagyobb elterjedésű (budai Vár-hegy), emellett Kosd környékén néhány fúrásban fordul elő és a Bükk előterében a Nagy-Eged déli lábánál bukkan felszínre. Vastagsága 50-200 méter közötti (Gyalog et al. 2015).

A budai márga színe sárgástól szürkéig változhat. A sárga változatok a márgában található vasásványok felszíni oxidációjából erednek, míg a legtöbb hazai márga a mélyfúrásokban eredeti szürke színét mutatja. Minden márga reakcióba lép híg sósavval mésztartalma miatt, sőt, vízdékonny is, amit szépen mutatnak a benne kialakult karsztos és hévizes barlangrendszerek is, mint például a Szemlő-hegyi barlang vagy a Pálvölgyi-barlang.

Számtalan üledékes bélyeget mutathat. Ősmaradványokat, tengeri sünöket, egysejtűeket, sőt még mohaállatok, ún. bryozoák maradványait is megtalálhatjuk többek között az általam vizsgált Budapest környéki eocén márgában is.

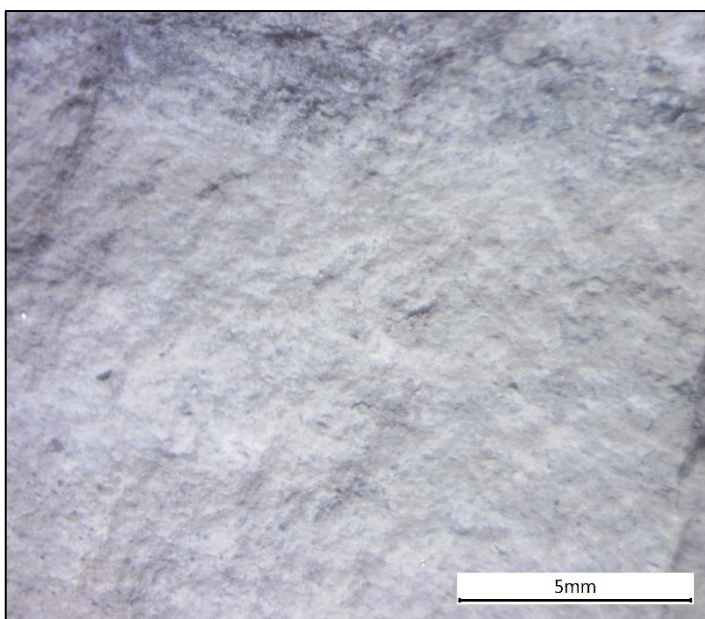
A budai márgát már a római és később a reneszánsz időktől is használták. Falazatok, járólapok készültek belőle, támfalakban, kerti kövezésben is megtaláljuk, de réteglapjaiból kivágott lapos kőzetdarabjai ma is kedveltek, hiszen jól megmunkálható és nagy szilárdságú. A Budai Várban márgából készített szobrok is előkerültek. A legismertebb, ma is létező bányája Ürömön van, de nagy elterjedéséből adódóan a történelmi időkben számtalan helyen bányászhatták.

A márga mállásra hajlamosabb a mészkőnél, mállási terméke pedig agyagos, ebből kifolyólag vízérzékeny, ami csúszásra hajlamossá teheti a márgamálladékot. Számtalan példát találhatunk a mállott márga megcsúszására pl. a Budai-hegységben. (Török 2007)

A vizsgált márga sárgás halványbarna, jellegzetes szöveti elemeit a bioturbációs nyomok képezik (2.3 ábra). Apró sötétbarnás limonitos elszíneződéseket mutat, amelyek nem rétegszerint, hanem vékony foltokban jelennek meg. A biokalsztokat apró héjtöredékek képviselik. A szövet fő alkotója a mikrites finom kristályos kalcit, amely mellett még nagyon kevés agyagásvány is megjelenik. A dolgozatban egy erősen meszes ún, mészmárga változathoz készültek a próbatestek. Ebben a biokalsztok csak nagyon kis méretű (mm alatti) héjtöredékek és kalcit pettyek jelennek meg. Erősen cementált, uralkodóan meszes kötőanyag miatt nagyon kevés és kis méretű pórus található a mintákban (2.4 ábra).



2.3 ábra. Márga makroszkópos felvétele



2.4 ábra. Márga mikroszkópos felvétele

DURVA MÉSZKŐ

A harmadik mintacsoport a miocén korban keletkezett Tinnyei Formációba sorolható ún. durva mészkő volt. A mintákat a Citadella átépítési munkálatai során lebontott kőzettömbök alkották

amelyek sárgásfehér, fehér színűek, porózusak. Ezt a kőzetváltozatot Sós-kútnál bányászták. Sárga, kőzetalkotó tömegű molluszkás kőbélből álló biogén, néhol ooidos mészkő jellemzi. A formációban mészhomokkő, meszes molluszkás homok is előfordul. Általában rosszul rétegzett, néhány cementáltabb pad közbetelepülésével, egyes szintekben keresztétegzett. Gyakran kőzetalkotó mennyiségben tartalmaz molluszkákat (*Cerithium*, *Cardum*, *Hydorbia*), illetve foraminiferákat (*Miliolina*). Az alaphegységen közvetlenül települő mészkőrétegei báziskavicsot is tartalmaznak (Gyalog et al. 2015).

A durva mészkő a tömött mészkőnél puhább, sok esetben kézzel morzsolható és sokkal könnyebb, porózusabb kőzet. Számtalan típusa ismert, az egyik legelterjedtebb az ooidos mészkő. Ez jól kerekített szemcséket (ooidokat) tartalmaz, amelyek halikrához hasonló, 0,2-2 mm-es gömb jellegű mészanyagú szemcsék. Az „ooidos” típus mellett még finomszemű mikritesebb változat és durvaszemű héjtöredékes „szarmata mészkő” változat is előfordul.

Magyarországon a miocén korban keletkezett durva mészkő, sekély meleg tengerekben. Hazánkban több rétegtani szintben előfordul az idősebb miocéntól (ún. bádeni) egészen a fiatalabb miocénig (szarmata). A Fertőrákos térségében és a Lajta-hegységben található kőzetek idősebbek (bádeni korúak), és összetételük is eltér, emellett porozitásuk is kisebb, maximum 20% körüli értéket ad. Jellemző kőzetalkotóik a vörösalgák (*Lithothamnium*ok), foraminiferák és egyéb bioklasztok. Az általam vizsgált Budapest környéki, sós-kúti kőzetváltozatok porozitása nagyobb, elérheti a 37%-ot is (Pápay és Török 2006), de majdnem az összes szarmata durva mészkőnek a porozitása meghaladja a 20%-ot. Pórusainak többsége kisméretű, sok esetben néhány tíz mikrométeres, vagy tizedmiliméteres, de szabad szemmel látható pórusokat is tartalmaz. Ez a porozitás azt eredményezi, hogy nagy a vízfelvétele, vízérzékeny kőzetnek tekinthető. Víz hatására szilárdsága lecsökken.

A durva mészkövet a XIX. században és a XX. század elején, a főváros területén Kőbánya, Budafok és Nagytétény térségében felszín alatti kőfejtőkben fejtették. Az egykori bányák helyén pincerendszerek maradtak, amelyek hasznosítása (sör-, pezsgő- és bortárolás, gombatermesztés) mellett sok mérnökgeológiai problémát vet fel, üregállékonyság, pince-felszakadások. A Budapest környéki előfordulások közül megemlítendő a biatorbágyi, a diósdói és a Zsámbék körüli lelőhelyek. Budapest központjától kb. 30 km-re nyugatra található a sós-kúti kőfejtő, amelyben a mai napig bányásznak durva mészkövet. Ezek mellett Várpalota térségében, Öskü környékén, Fertőrákos területén és Ausztriában a Lajta-hegységben találhatók még fontosabb, az építészetben is felhasználható durva mészkő-előfordulások. Hasonló durva mészkő ismert Pécs környékéről és a Bükkből is. A Dunakanyarban Zebegénynél jelenik meg a fehér színű, idősebb durva mészkő. Az Erdélyi-medencében Kolozsváron és környékén (Bácstorok, Vista, Jegenye) is bányásztak hasonló tulajdonságú kőzeteket, amelyek egy részét a budapesti építkezésekhez is felhasználták (pl. Mátyás-templom, Szent István Bazilika).

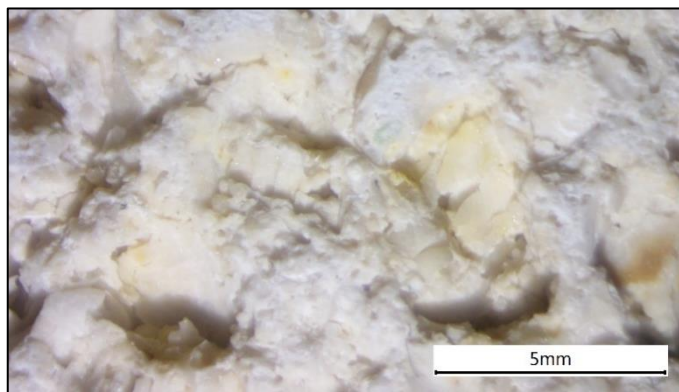
Felhasználásában döntő, hogy nem polírozható, de jól faragható, megmunkálható kőzet. Falazóelemként, burkolólapként, díszítőelemként, korlátok, párkányok, sőt műalkotások, szobrok, mint pl. Budai vár Anjou szobrok anyagaként már a középkortól felhasznált kőzet. A Lajta-hegységi előfordulásokat már a római kortól bányásszák. A XIX. század végének és a XX. század elejének kedvelt építő- és díszítőköve, amelyről a főváros számtalan épülete ad ma

is tanúbizonyságot. A beépített durva mészkövek egyrészt a város területén található kőbányákból, másrészt Sóskút, Biatorbágy, Diósd kőfejtőiből, de a Lajta-hegységből (pl. Szentmargita) és Erdélyből (pl. Bácsorok) is származnak. A legfontosabb durva mészkőből álló budapesti műemlékek közé sorolható az Országház, a Mátyás-templom, a Szent István Bazilika, az Operaház, a Lánchíd, a Citadella, a Gresham-palota, vagy a New York palota, de a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem főépülete is durva mészkőből épült. A porózus mészkövek nemcsak Budapest kedvelt építő- és díszítőkövei, hanem egyik legszebb román kori műemlékünk, a zsámbéki templom is ilyen kőzetből készült.

Két eltérő szöveti változatú durva mészkövet vizsgáltam. A finomszemű változatban az uralkodó szöveti elemek az ooidok. Ez jól osztályozott tized milliméteres lekerekített mészszemcsékből ooidokból áll. Az ooidok mellett kisebb foraminiferák és héj töredékek jelennek meg benne. A pórus rendszerét az ooidokkal közel azonos méretű pórusuk uralják, de kisebb pórusok is megjelennek benne. A kőzet színe barnássárga, viszonylag homogén megjelenésű. Az ooidok és szöveti elemek irányítottsága nem látható. A másik kőzetváltozatot szintén barnássárga, de ebben már nagyobb méretű meszes kőzetalkotók uralkodnak. A héjtöredékek néhány milliméteresek és ezek között nagyobb milliméteres pórusok is megjelennek. Mikroszkópos szövetére jellemző, hogy kissé sárgásabbak a nagyobb akár centiméter is elérő héjtöredékek, míg az alapanyagot alkotó többnyire kerekített mészszemcsék kisebbek és világosabb szürkésfehér színűek.



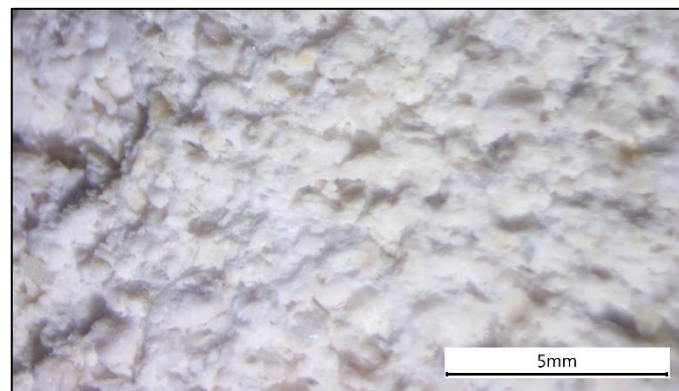
2.5 ábra. Durvább durva mészkő makroszkópos felvétele



2.2 ábra. Durvább durva mészkő mikroszkópos felvétele



2.7 ábra. Finomabb durva mészkő makroszkópos felvétele



2.8 ábra. Finomabb durva mészkő mikroszkópos felvétele

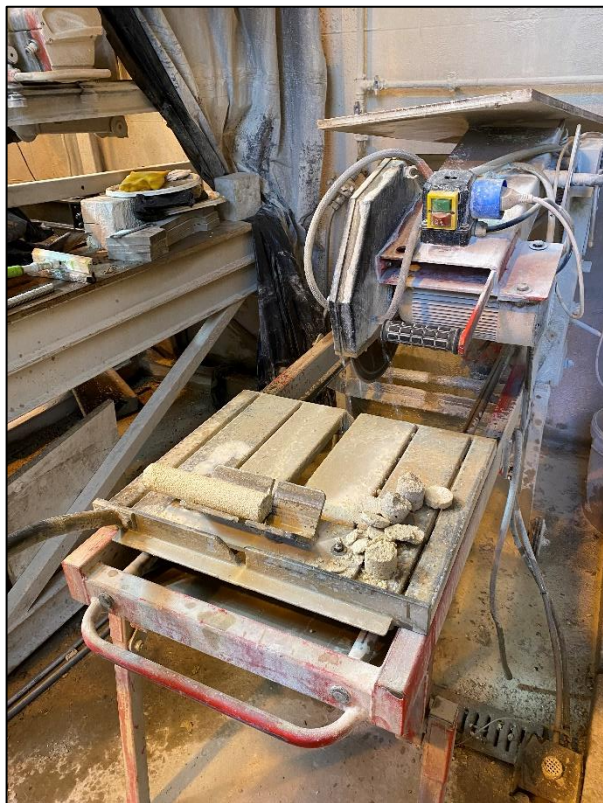
3. MÉRÉSI MÓDSZEREK

Ezen kutatásom során három, hazánkban gyakran felhasznált, egymástól nagymértékben különböző közettípust, mórági gránitot, budai márgát és sósikúti durva mészkövet vizsgáltam. A kőzetekben a P és S hullámok terjedési sebességének, a kőzetek testsűrűségének, Poisson-tényezőjének, rugalmassági, nyírási és kompressziós modulusának, illetve az egyirányú nyomószilárdságának kapcsolatát igyekeztem meghatározni szárított és víztelített kőzetfizikai állapotban egyaránt. A vizsgálatokat az egyesített európai uniós, ún. EN jelű szabványoknak, konkrétan a „Természetes kőzetek terminológiája” című (MSZ EN 12670:2019) „Kőzetek megnevezése” című (MSZ EN 12440:2000), „Az anyagsűrűség és testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása” című (MSZ EN 1936:2006), a légköri nyomáson történő vízfelvétel meghatározására vonatkozó MSZ EN 13755:2001, a hangterjedés sebességének meghatározására vonatkozó MSZ EN 14579:2004 és „Az egyirányú nyomószilárdság meghatározása” című (MSZ EN 1926:2006) szabványoknak megfelelően végeztem.

A laboratóriumi vizsgálatok során összesen 34 darab kőzetmintán végeztem el a méréseket, melyből 6 mórági gránit, 11 budai márga, és 17 darab a Citadellából származó durva mészkő próbatest. A kőzetek fizikai jellemzésekor meghatároztam a száraz-és nedves testsűrűségeket, utóbbihoz szükség volt vízfelvételi vizsgálatra is. Ezt követően a Geotron készülékkel lemértem P és S hullámok terjedési sebességét. A P és S hullámok terjedési sebességéből dinamikus Poisson-tényezőt, rugalmassági, nyírási és kompressziós modulusát számítottam. A roncsolásmentes vizsgálatokat követően roncsolásos egyirányú nyomószilárdságvizsgálatnak vettem alá a kőzetmintákat, ennek eredményéből pedig meghatároztam a statikus rugalmassági modulusát és a nyomószilárdságot. Minden vizsgálatot légszáraz és víztelített kőzetfizikai állapotú mintákon is végeztem, hiszen a kőzetek mind a csapadék, mind a talajból származó víz hatásának is ki vannak téve használatuk során. Általában a víz jelenléte lényeges mértékben csökkenti, azaz építőmérnöki szempontból rontja a kőzet szilárdságát, különböző fizikai, mechanikai paramétereinek értékeit.

A laboratóriumi mérések megkezdése előtt a vizsgált kőzetmintákat elő kellett készíteni. A mórági gránit mintákat a vizsgálatok elvégzésére megfelelő állapotban kaptam, nagyságrendileg 6,3 cm átmérőjű és 11,5 cm magasságú csiszolt hengerek formájában. A márga és durva mészkő mintáimat nekem kellett előkészítenem. A márga minták nagyjából 6 cm-es átmérőjű fúrásból származtak. A hosszabb-rövidebb darabokra esett fűrőmagból gyémántkorongos vágógéppel (3.1 ábra) a gránit próbatesteknek megfelelő magasságú mintákat vágtam. A minél egyenletesebb felület érdekében a levágott próbatestek sík lapjait a vágógép korongjának nyomtam, mintegy lecsiszolva azokat. A durva mészkő minták előkészítését még távolabbról kellett kezdenem, ugyanis a kőzetmintát a Citadellából származó 2 nagyméretű közettömb formájában kaptam. A két tömb kőanyaga nem teljesen azonos, szabad szemmel is látható, hogy az 1-es, 2-es, 10-es, 12-es, 13-as, 15-ös, 16-os és 17-es minták egyértelműen durvább tapintásúak. Mivel a minták magasságát meghatározta a közettömbök mérete korlátozott lehetőségeim voltak. Arra törekedtem, hogy ha méretében teljesen nem is, de arányaiban a durva mészkő minták is megfeleljenek a gránit és márga mintáknak. A közettömbökből 4,4 cm átmérőjű gyémántkoronás fűrővel (3.2 ábra) hengeres próbatesteket vágtam, majd a gyémántkorongos vágógéppel tengelyirányra merőlegesen félbe vágtam a

testeket. Hogy a hengereknek a vizsgálati módszerekhez szükséges sík alapjaik legyenek, a testek külső végeit is kiegyenesítettem, levágtam. A durva mészkő mintákat csiszolni nem lehetett. Az előkészítés után mind a márga mind a durva mészkő mintákat megmostam, ugyanis az előkészítésük során a fúrások és vágások következtében keletkező apró porszemcsék a vízhűtésnek köszönhetően jelen lévő víz hatására rátapadtak a kőzetmintákra.



3.1 ábra. Gyémántkorongos vágógép



3.2 ábra. Gyémántkoronás fúróval kivágott hengerek a durva mészkő tömbből

A vizsgálatok megkezdése előtt a márga és mészkő mintákat beszámoztam (3.3 ábra) (a gránit mintákat sorszámmal ellátva kaptam, ezeken nem változtattam).



3.3 ábra. Megszámozott durva mészkő minták

A közetek fizikai jellemzésekor meghatároztam a minták száraz-és víztelített testsűrűségét, utóbbihoz szükség volt vízfelvételi vizsgálatra is. Mindezt az érvényben lévő „Az anyagsűrűség és testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása” című MSZ EN 1936:2006 jelű és a légköri nyomáson történő vízfelvétel meghatározására vonatkozó MSZ EN 13755:2001 szabványokban foglalt iránymutatásokat követve végeztem, közzétípusonként elérve a minimálisan szüksége 6 mintát. A testsűrűség számításához a henger alakú minták átmérőjét és magasságát digitális tolómérővel, tömegét mérleggel mértem. Az adatokból kiszámítottam a minták testsűrűségét a $\rho = m/V$ képlet alapján. Az adatokat az 3.1 táblázat, a statisztikát a 3.2 táblázat tartalmazza.

3.1 táblázat. Vizsgált próbatestek adatai

Mintacsoport	Minta száma	Minta átmérője [cm]	Minta magassága [cm]	Minta térfogata [cm ³]	Minta szárított tömege [g]	Minta szárított testsűrűsége [g/cm ³]
Mórággyi Gránit	70	6,310	11,792	368,753	995,82	2,701
	77	6,321	11,770	369,350	998,37	2,703
	83	6,321	11,636	365,145	990,35	2,712
	92	6,335	11,483	361,941	972,73	2,688
	102	6,330	11,581	364,454	985,62	2,704
	121	6,313	11,518	360,527	978,11	2,713
Márga	1	6,073	11,555	334,708	798,59	2,386
	2	6,076	11,113	322,223	763,21	2,369
	3	6,072	10,961	317,398	766,64	2,415
	4	6,064	11,621	335,623	797,63	2,377
	5	6,073	11,543	334,361	807,52	2,415
	6	6,071	11,480	332,317	798,92	2,404
	7	6,078	11,169	324,060	772,63	2,384
	8	6,035	11,540	330,104	765,01	2,317
	9	6,071	10,994	318,248	742,29	2,332
	10	6,035	10,660	304,931	705,53	2,314
	11	6,033	11,825	338,032	800,70	2,369
Durva mészkő	1	4,374	9,329	140,179	233,66	1,667
	2	4,378	9,255	139,321	233,79	1,678
	3	4,389	9,495	143,653	234,05	1,629
	4	4,384	9,435	142,421	243,06	1,707
	5	4,380	9,137	137,671	232,97	1,692
	6	4,389	9,080	137,375	230,43	1,677
	7	4,379	9,351	140,831	238,78	1,696
	8	4,390	9,345	141,448	236,20	1,670
	9	4,384	9,303	140,428	226,83	1,615
	10	4,390	9,210	139,405	234,25	1,680
	11	4,381	9,295	140,115	226,21	1,614
	12	4,371	9,329	139,987	232,02	1,657
	13	4,378	9,212	138,674	229,13	1,652
	14	4,389	9,241	139,811	225,58	1,613
	15	4,387	9,363	141,527	231,34	1,635
	16	4,366	9,199	137,720	231,08	1,678
	17	4,379	9,325	140,439	231,83	1,651

3.2 táblázat. A szárított testsűrűség [g/cm^3] közettípusonként vett átlaga és szórása

	Gránit	Márga	Durva mészkő
Átlagos testsűrűség	2,703	2,371	1,660
Testsűrűség szórása	0,0093	0,0362	0,0295

A gránit minták átlagos testsűrűsége szárított állapotban $2,703 \text{ g/cm}^3$, ami közel azonos Lama & Vutukuri (1978) $2,667 \text{ g/cm}^3$ -es eredményével.

A kutatáson központi eleme a Geotron készülékkel (3.4 ábra) történő mérésorozat volt, amelyet az MSZ EN 14597:2004 szabványnak megfelelően végeztem el. A készülék és hozzá használandó program alkalmas mind a P, mind az S hullámok terjedési sebességének meghatározására a próbatestek magasságának (hosszának) ismeretében, emellett többek között számítja az E, G és K modulust, illetve a Poisson-tényezőt a próbatest sűrűségének ismeretében. A Geotronnal történő méréshez egy adófej és egy vevőfej közé kel a próbatesteket helyezni úgy, hogy a henger tengelye vízszintes. Ebből következik, hogy a próbatesteket be kell szorítani az adófej és a vevőfej közé, ami kézi pumpával történik. Mivel a próbatestek felülete sem teljesen sík, sem teljesen merőleges a tengelyre, az adófejnek és a vevőfejnek is kell hagyni némi „játékot”. Ez azért szükséges, hogy az adó- és vevőfej is a lehető legnagyobb felületen érintkezzen a próbatesttel, így a P és S hullámok szilárd közegben terjedjenek. Ellenkező esetben a kalibrált mérés nem ad értelmezhető eredmény. Ezt követően minden esetben meg kell adni a próbatest hosszát és testsűrűségét bemenő adatként.

Miután egy mintát sikerült megfelelő módon a készülékbe illeszteni és a szükséges adatokat bevinni a programba, a számítógép segítségével elindítható egy mérés, amely az 1.1 ábrán látható diagrammot szolgáltatja. A vízszintes tengelyen az eltelt idő látható μs -ben, a függőleges tengelyen az elektromos feszültség mV-ban. Fontos megjegyezni, hogy a program nem automatikusan a méréskor végzi el a számításokat, hanem először a felhasználónak kell értelmeznie a diagrammot, és a felhasználó által megválasztott időpillanatokra vonatkozóan fogja a program kiszámítani a keresett adatokat. Ugyanabban a szilárd közegben a longitudinális P hullámok sebessége nagyobb az S transzverzális hullámokénál, azonban az S hullámok nagyobb amplitúdóval rendelkeznek. Ahol a függvény kitér a zérus értékből, ott érkezik meg a vevőfejre a P hullám. Kinagyítva a diagramm megfelelő részét ezt az időpillanatot pontosan ki lehet jelölni (folytonos függőleges vonal). Ezt követően a program ad egy becslést, hogy mely időintervallumban várható az S hullám beérkezése a vevő fejre (szürke sáv). Tudjuk, hogy az S hullámok nagyobb amplitúdót fognak mutatni, így azt a pontot kell megkeresni a diagrammon, ahol nagyságrendileg megnő az amplitúdó. Ez nem mindig teljesen egyértelmű, be kell gyakorolni a függvények értelmezését. Általában egy inflexiós pont, vagy a függvény meredekségének hirtelen megváltozása adhat segítséget. Szintén nagyítást követően, ezt az időpillanatot is meg kell jelölni (szaggatott függőleges vonal). Ezt követően lehet menteni a mérés eredményeit. Én minden mérést külön pdf dokumentumba mentettem. A dokumentum tartalmazza a mérés dátumát, a kirajzolt diagrammot az alapbeállításokat és a számított adatokat (3.5 ábra). Minden mintát 6-6 alkalommal mértem szárított állapotban, ügyelve arra, hogy az adó- és vevőfejeket minden alkalommal néhány milliméterrel elmozdítsam, de ne kerüljek túl közel a próbatestek széléhez.

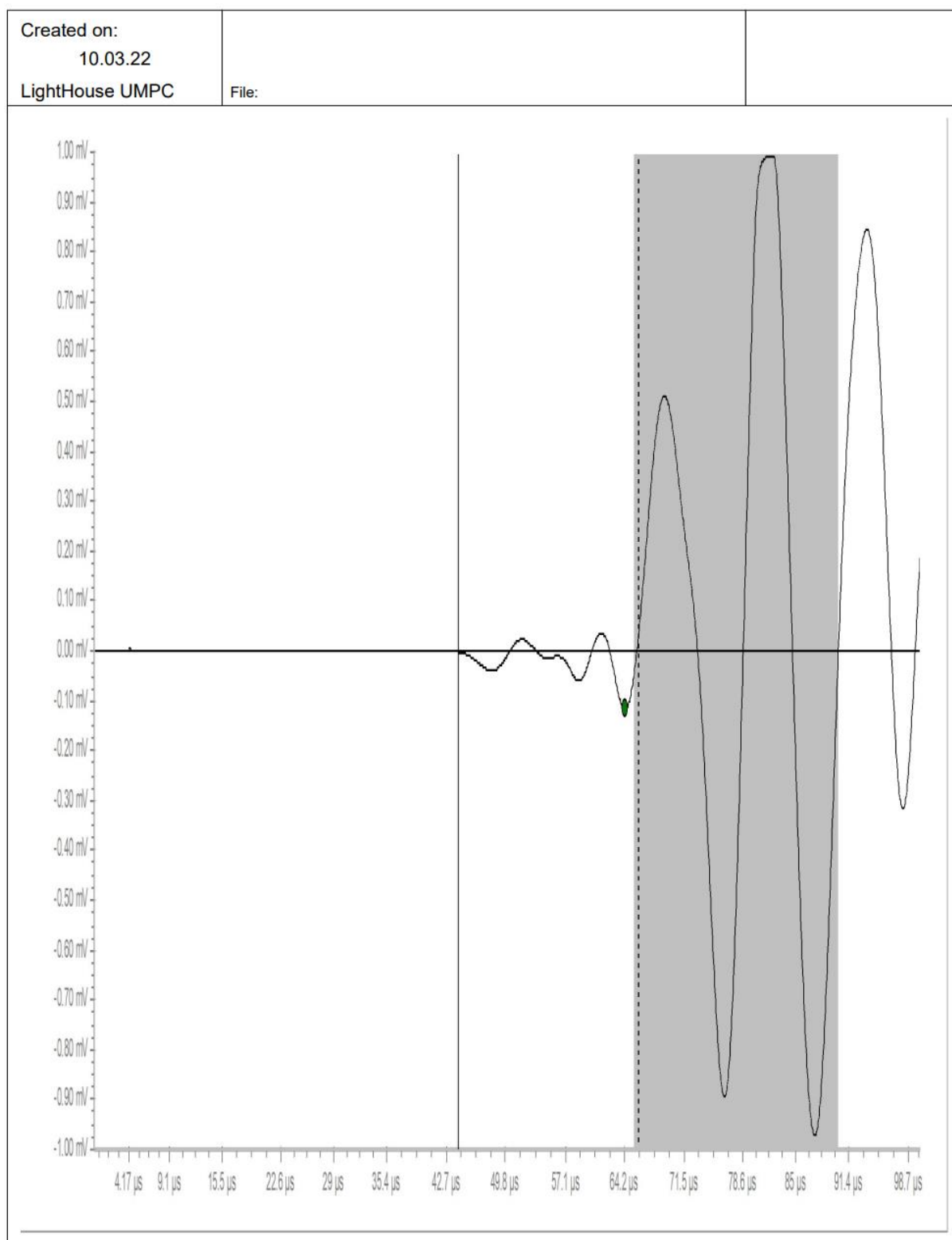


3.4 ábra. Geotron készülék és tartozékai

A P és S hullámok terjedési sebessége ismeretében a minták dinamikus mechanikai állandói – dinamikus Poisson tényezője (ϑ_{din}), dinamikus G modulusa (G_{din} [GPa]), és dinamikus K modulusa (K_{din} [GPa]) - az alábbi képletekkel számíthatók:

$$\vartheta_{din} = \frac{v_P^2 - 2v_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}$$
$$E_{din} = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2}$$
$$G_{din} = \frac{E_{din}}{2(1 + \vartheta_{din})}$$
$$K_{din} = \frac{E_{din}}{3(1 - 2\vartheta_{din})}$$

ahol E_{din} a dinamikus nyírási modulus GPa mértékegységben, v_P a P hullám terjedési sebessége km/s mértékegységben és v_S az S hullám terjedési sebessége szintén km/s mértékegységben. (Martinez-Martinez et al. 2012) A program automatikusan számolta ezeket az adatokat a bevitt testsűrűség és a hosszúságból számított hullámterjedési sebességek függvényében - ugyanezen képletek alapján -, azonban gyorsabbnak bizonyult Microsoft Excel segítségével sajátkezüleg kiszámítanom a paramétereket, mintsem kimásolni a PDF dokumentumokból.



Results:

Meas.time P: 44.115 μ s
 Sound velocity P: 2,733 km/s
 Run time: 42.515 μ s
 Meas. displace.: 116,21 mm
 Amplitude: -2,282 μ V
 G module: 7,77 kN/mm²
 E module: 17,28 kN/mm²
 A. Impedance: $6,5 \times 10^6$ kg/m

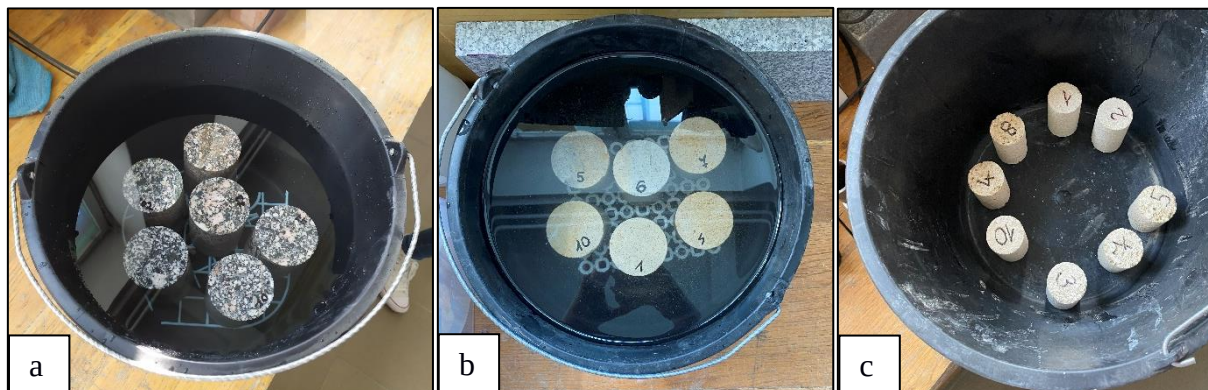
Meas.time S: 65.933 μ s
 Sound velocity S: 1,806 km/s

Informations:

Sampling rate: 15.63 MHz
 Voltage: 100 mV
 Date: 10.03.22 13:06:18
 Poisson value: 0,112
 Density: 2,38 g/cm³
 Probes: UP-SW/UP-SW *+n

3.5 ábra. Geotron készülékkel történő mérés eredménye PDF dokumentumban

A vízfelvételi vizsgálatot az MSZ EN 13755:2001 szabványnak megfelelően végeztem el, mintacsoportonként külön-külön. Mivel a továbbiakban egyirányú nyomószilárdság vizsgálatot is végeztem, a vízérzékeny márga és durva mészkő minták közül nem az összeset telítettem. Konkrétan a márgák közül az 1-es, 4-es, 5-ös, 6-os, 7-es és 10-es mintákat, a durva mészkő minták közül az 1-es, 2-es, 3-as, 4-es, 5-ös, 7-es, 8-as és 10-es mintákat telítettem (3.6 ábra).



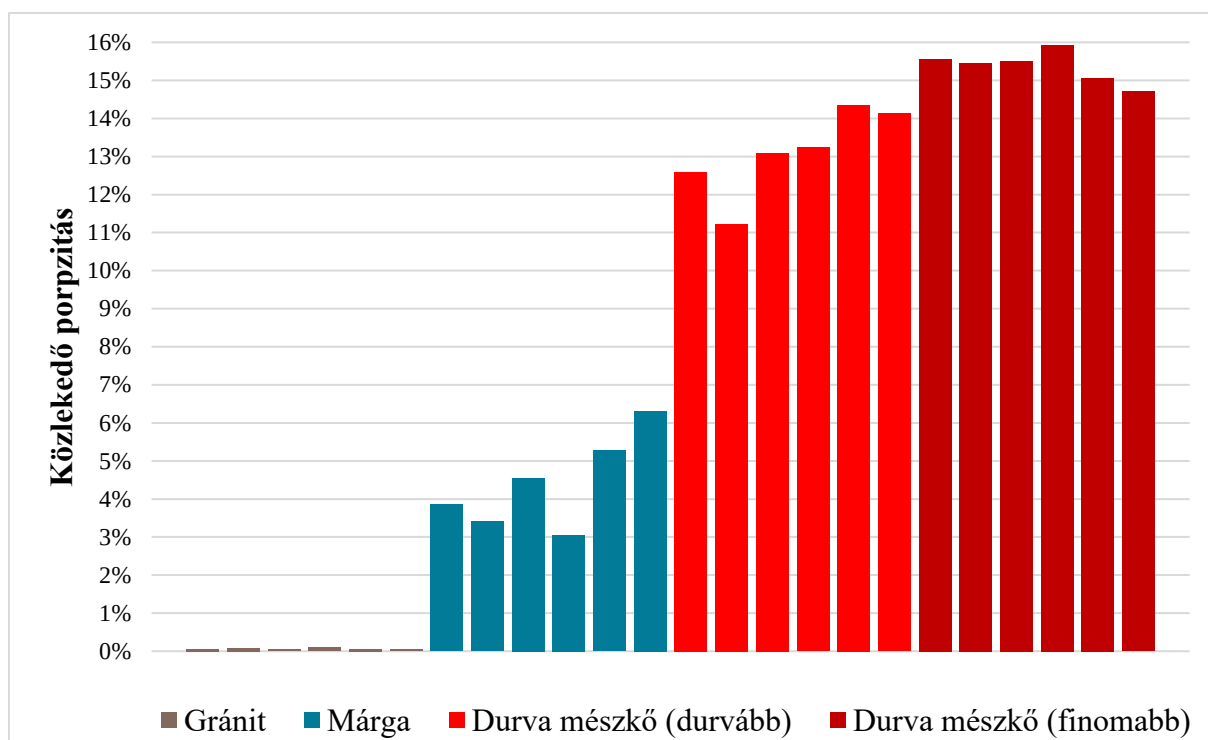
3.6 ábra. Vízrel telített a) Gránit, b) Márga, c) Durva mészkő minták

A próbatesteket $(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hőmérsékletű szárítószekrényben ismét tömegállandóságig szárítottam. Ez hőmérséklet a kémiaileg kötött vizet nem érinti, a szerves anyagokat nem károsítja. Állandónak tekinthető a tömeg, ha két egymást követő, (24 ± 2) órás időközönként végzett mérlegelés közötti különbség nem nagyobb, mint 0,1%. Ezt követően megvártam, amíg a próbatestek elérték a $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ -os szobahőmérsékletet. A minták tömegét szárítás után 0,01 g pontossággal megmértem (m_d).

Ezt követően alátámasztókat helyeztem egy vödörbe, hogy a minták teljes felületét érhesse a víz. Az alátámasztókra ráhelyeztem a próbatesteket úgy, hogy a szomszédos minták közötti távolság legalább 15 mm legyen. Az edénybe $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$ -os csapvizet engedtem a minták magasságának feléig, ezt tekintettem a $t_0=0$ időpillanatnak. $t_0+(60 \pm 5)$ percnél felengedtem a vizet a minták magasságának háromnegyedéig, $t_0+(120 \pm 5)$ percnél pedig addig engedtem a vizet az edénybe, hogy a próbatesteket 25 ± 5 mm magasan fedje el. A mintákat 48 ± 2 óra elteltével kivettem a vízből, nedves ruhával megtöröltem és 1 percen belül, lehetőség szerint minél gyorsabban 0,01 g pontossággal megmértem. A próbatesteket ismét vízbe helyeztem, és (24 ± 2) óránként megismételtem a mérést egészen addig, amíg két egymást követő mérlegelés közötti különbség nem nagyobb, 0,1%. Ezt az állandónak tekintett tömeget nevezzük a minta víztelített tömegének (m_s). A minta vízfelvételét A_b -vel jelölve %-ban számítottam a következő képlet alapján:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} * 100.$$

Az eredményeket a 3.7 ábra, az átlagos értékeket a 3.3 táblázat tartalmazza.



3.7 ábra. A vízfelvételi vizsgálat eredményei

3.3 táblázat. Átlagos vízfelvétel közettípusonként

	Gránit	Márga	Durva mészkő (durvább)	Durva mészkő (finomabb)
Átlagos vízfelvétel	0,06%	4,46%	13,11%	15,37%

Kiszámítottam a minták víztelített testűrűségét g/cm^3 mértékegységben, szintén Microsoft Excel program segítségével. A statisztikát a 3.4 táblázat tartalmazza.

3.4 táblázat. A víztelített testsűrűség [g/cm^3] közettípusonként vett átlaga és szórása

	Gránit	Márga	Durva mészkő
Átlagos testsűrűség	2,705	2,499	1,911
Testsűrűség szórása	0,0088	0,0166	0,0318

A vízzel telített mintákon ismét elvégeztem Geotronnal történő méréseket. A márga minták esetében az jelentette a nehézséget, hogy a márga rétegzettsége, illetve a rétegek közé behatoló víz hatására a 10-es próbatest tönkrement, kettévált, de a többi mintán is nehéz volt értelmezhető méréseket végrehajtani. Az addig alkalmazott 100 mV-os feszültséget 10 és 20 mV-ra kellett csökkenteni, hogy a szükséges mértékben megnöveljem az amplitúdókat.

A roncsolásmentes vizsgálatokat követően roncsolásos nyomószilárdságvizsgálatnak vettem alá a próbatesteket az MSZ EN 126:2006 szabványnak megfelelően. Megelőzően a 77-es, 102-es és 121-es gránit mintákat ismét tömegállandóságig szárítottam szárítószekrényben.

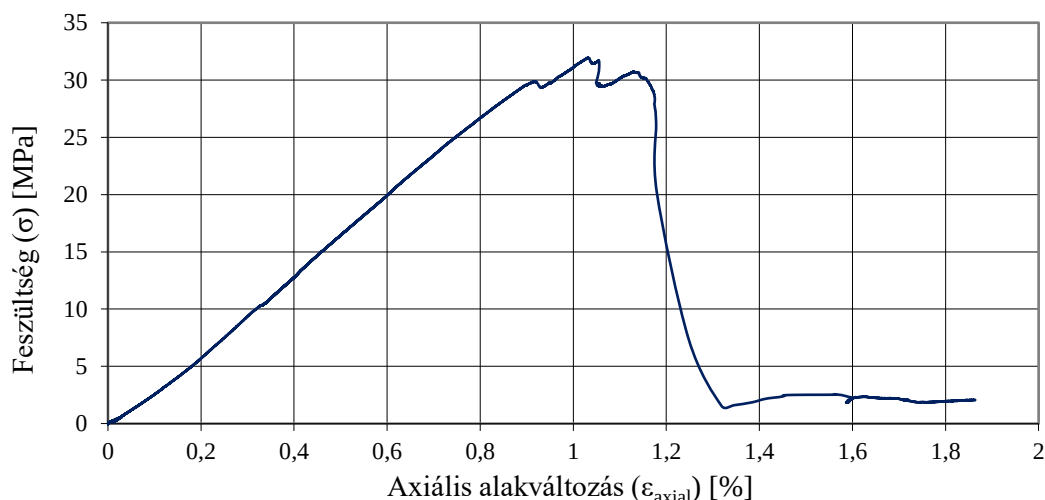
Minden minta vizsgálata előtt a vizsgálógép (3.8 ábra) felületeit tisztára töröltem, illetve eltávolítva a laza szemcséket a próbatestek sík felületeiről. Ezt követően a próbatestet függőleges tengellyel beillesztettem a vizsgálógép közepébe, és a felső tárcsát óvatosan addig engedtem, hogy éppen érintse a próbatest felső síkját. A vizsgálógép a próbatestet folyamatosan terhelte ($1 \pm 0,5$) MPa/s állandó feszültséggel, a próbatest tönkremenetelének bekövetkeztéig (3.9 ábra). A vizsgálógéphez tartozó program rögzítette a törése vizsgálat feszültség-alakváltozási diagramját, amelyet Excelbe importálva dolgoztam fel (3.10 ábra).



3.8 ábra. Egyirányú nyomószilárdság vizsgálat



3.9 ábra. A a) 92-es gránit, b) 7-es márga, c) 15-ös durva mészkő próbatest törésképe



3.10 ábra. Feszültség-alakváltozási diagram

A próbatest átmérőjének (terhelt felületének) és magasságának ismeretében kirajzoltatható az alábbi diagram. A magasság változását (csökkenését) százalékban mérjük, ez az úgynevezett axiális alakváltozás (ϵ_{axial}). A feszültség a terhelési erő és a terhelési felület hányadosaként adható meg. A függvény maximuma, azaz a maximálisan elérhető feszültség, ahol a tönkremenetel bekövetkezik, a próbatest nyomószilárdsága ($R = F_{max}/A$). A görbe érintőjének meredeksége a próbatest rugalmassági modulusa, amelyet a feszültség felénél állapítunk meg. Gyakorlatban ez úgy történik, hogy a görbe felénél kiválasztunk egy közel lineáris szakaszt, ennek végpontjaiban feljegyezzük a feszültség és alakváltozás értékeit, majd ebből számítjuk a rugalmassági modulusot az alábbi módon:

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\frac{\epsilon_1}{100} - \frac{\epsilon_2}{100}}$$

Mivel a feszültséget MPa-ban mértem, de a rugalmassági modulusot GPa-ban adtam meg, a kapott értéket minden esetben megszoroztam 10^{-3} -al. Az egyirányú nyomószilárdság és a statikus rugalmassági modulus közöttípusonként vett átlagát és szórását szárított, illetve víztelített állapotban a 3.5 és 3.6 táblázatok tartalmazzák.

3.5 táblázat. Az egyirányú nyomószilárdság [MPa] közöttípusonként vett átlaga és szórása szárított és víztelített állapotban

	Gránit		Márga		Durva mészkő	
	szárított	víztelített	szárított	víztelített	szárított	víztelített
Átlag	95,19	105,12	35,46	13,21	3,10	2,28
Szórás	19,89	15,47	11,81	4,52	0,52	0,83

3.6 táblázat. A statikus rugalmassági modulus [GPa] közöttípusonként vett átlaga és szórása szárított és víztelített állapotban

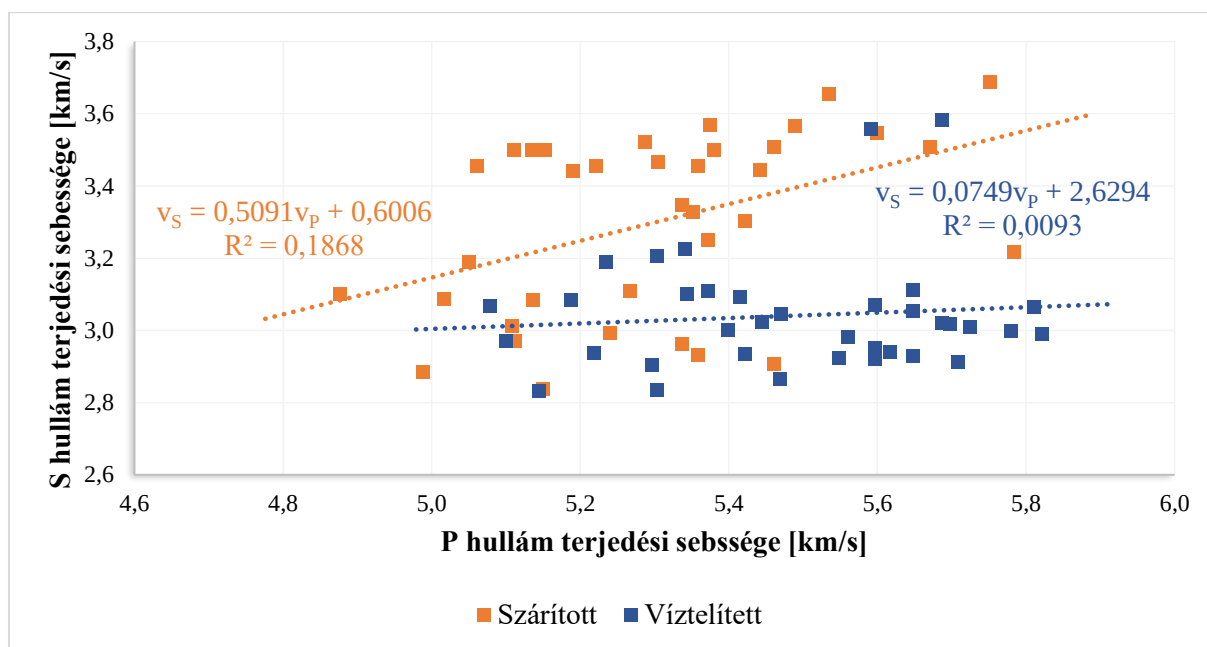
	Gránit		Márga		Durva mészkő	
	szárított	víztelített	szárított	víztelített	szárított	víztelített
Átlag	35,24	36,35	4,10	1,89	1,00	1,63
Szórás	6,03	12,24	0,4229	2,04	0,42	0,49

4. EREDMÉNYEK

A következőkben közzétípusonként, szárított és víztelített kőzetfizikai állapotban, a kőzetminták testsűrűsége, a Geotronnal mért P és S hullámterjedési sebességek, az ezekből számított dinamikus Poisson-tényező, rugalmassági, nyírási, és kompressziós modulusa, illetve az egyirányú nyomószilárdság vizsgálat alapján meghatározott statikus rugalmassági modulus és egyirányú nyomószilárdság, azaz 9 különböző paraméter összefüggéseit mutatom be lineáris korrelációval és determinációs együtthatóval ellátott diagramok formájában.

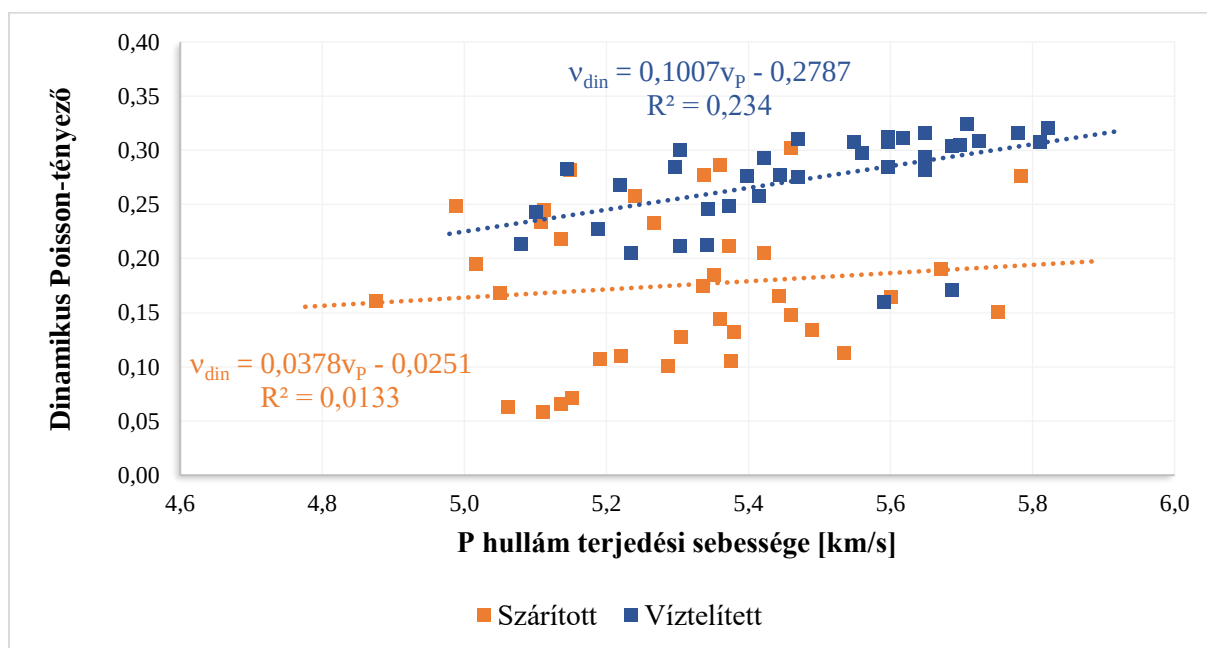
GRÁNIT

A P és S hullám terjedési sebessége között a gránit esetében gyakorlatilag nem találtam összefüggést (4.1. ábra).

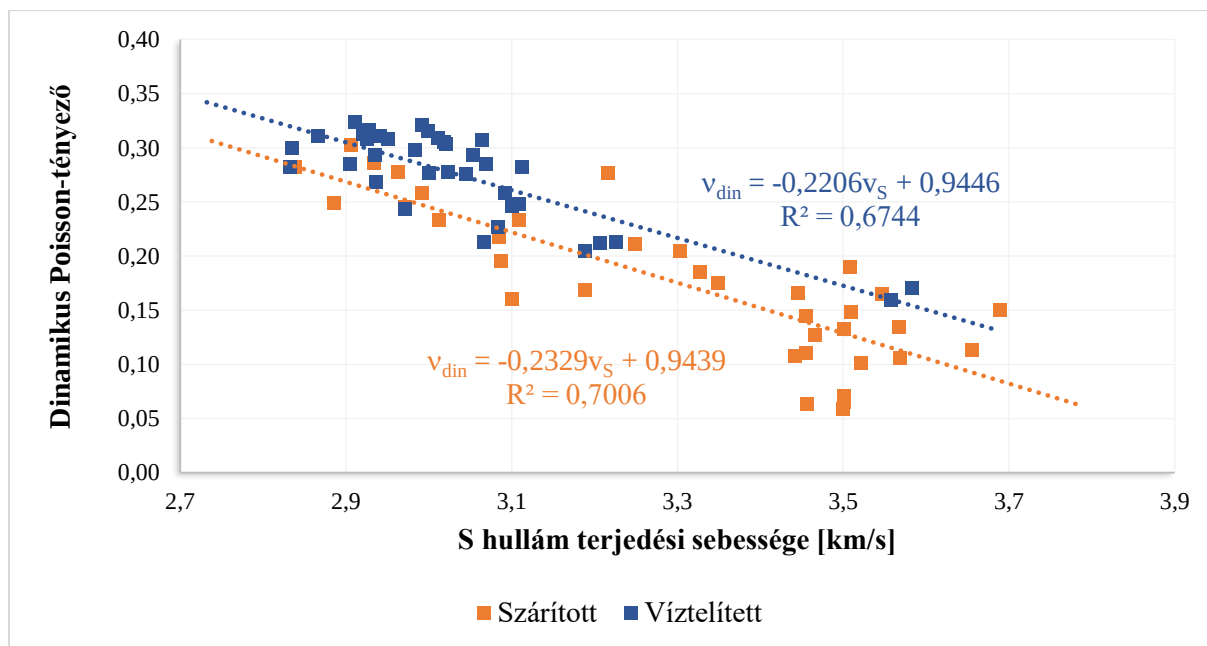


4.1 ábra. A P és S hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

A 4.2 és 4.3 ábrák mutatják, hogy bár a gránit esetében a dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebessége között nem találtam kapcsolatot, az S hullám terjedési sebességével gyengébb korrelációt mutat mind szárított, mind víztelített állapotban. A 4.3 ábráról az is leolvasható, hogy a dinamikus Poisson-tényező az S hullám terjedési sebességének növekedésével csökken, illetve, hogy víztelített állapotban a gránit dinamikus Poisson-tényezője nagyobb, mint szárított állapotban.

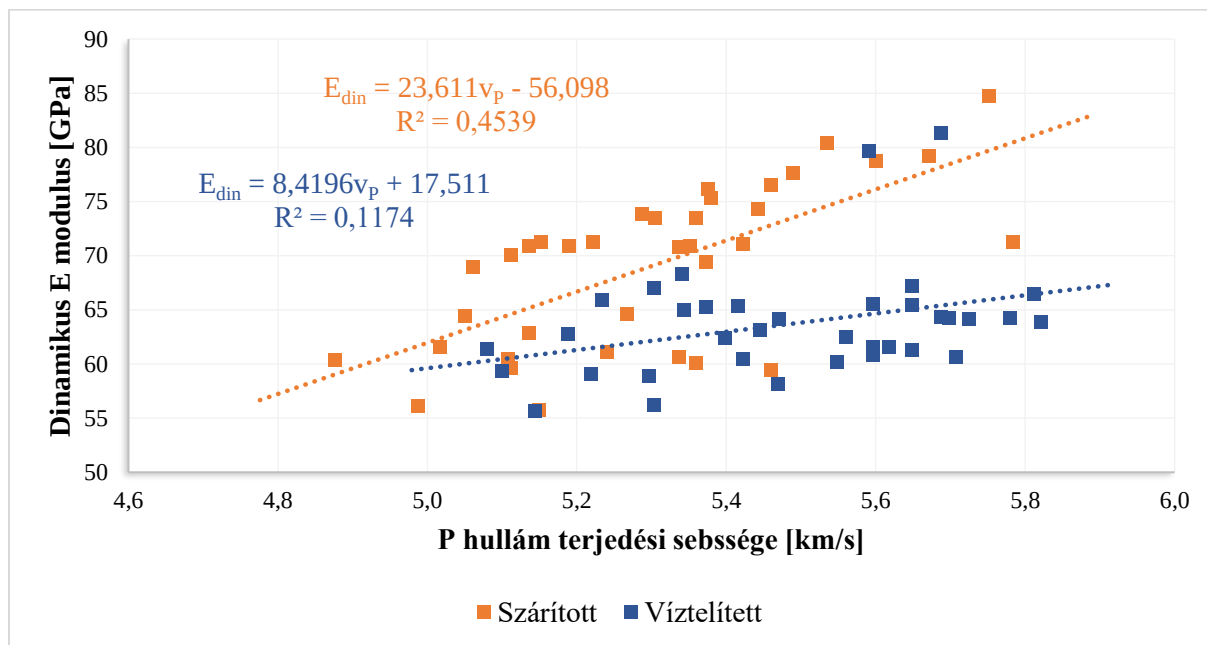


4.2 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

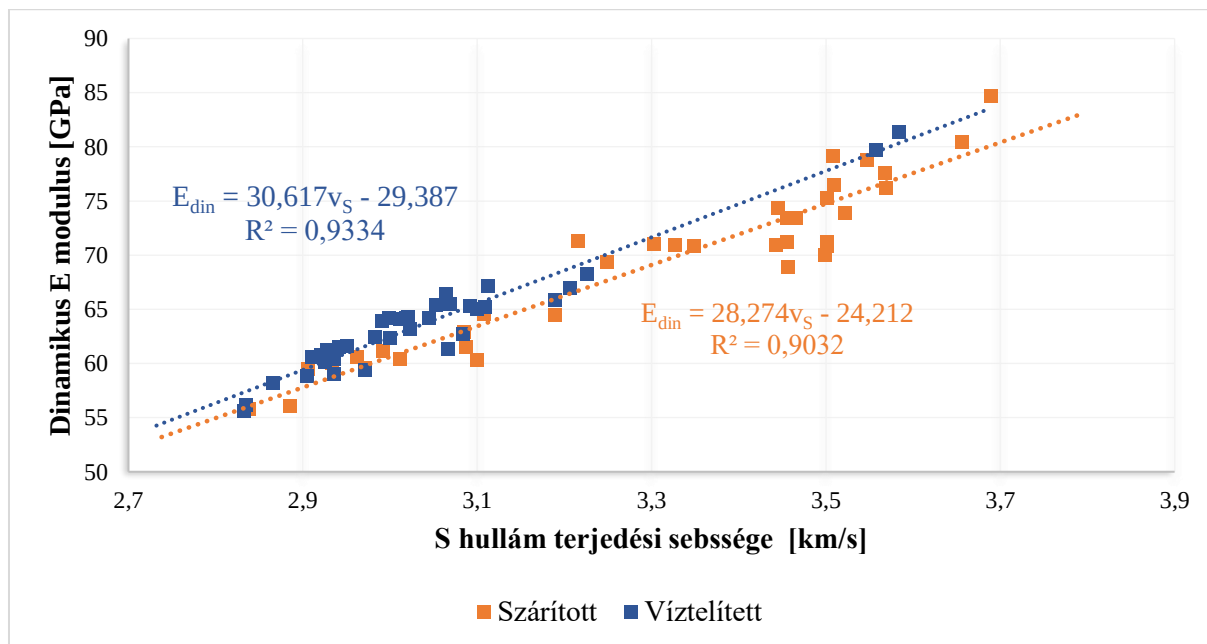


4.3 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

A 4.4 és 4.5 ábrák alapján megállapítható, hogy míg a dinamikus E modulus a P hullám terjedési sebességgel jelentéktelen, addig az S hullám terjedési sebességével erős korrelációt mutat szárított és víztelített állapotban egyaránt. Az S hullám terjedési sebességének növekedésével a dinamikus E modulus is nő. Víztelített állapotban az E modulus értéke nagyobb, mint szárított állapotban.

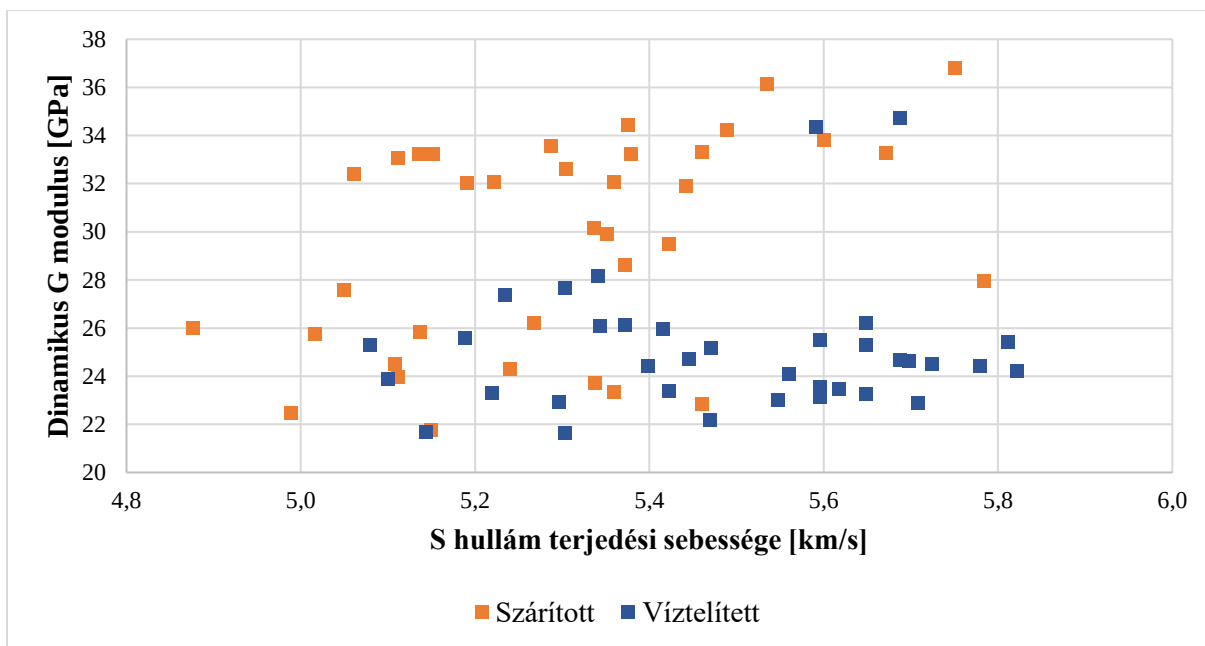


4.4 ábra. A dinamikus E-modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

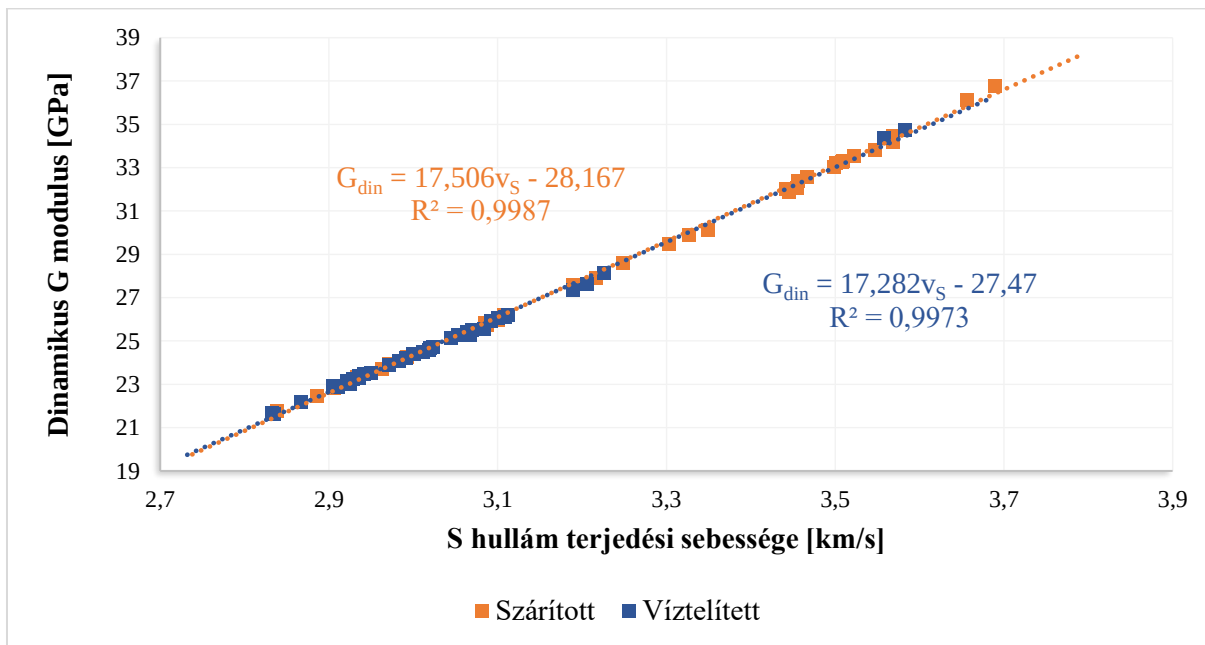


4.5 ábra. A dinamikus E-modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

A dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebessége között nem találtam kapcsolatot (4.6 ábra), azonban az S hullám terjedési sebességével szinte tökéletes korrelációt mutat szárított és víztelített állapotban egyaránt, ráadásul a 4.7 ábra alapján a két összefüggés gyakorlatilag nem függ a telítettségtől.

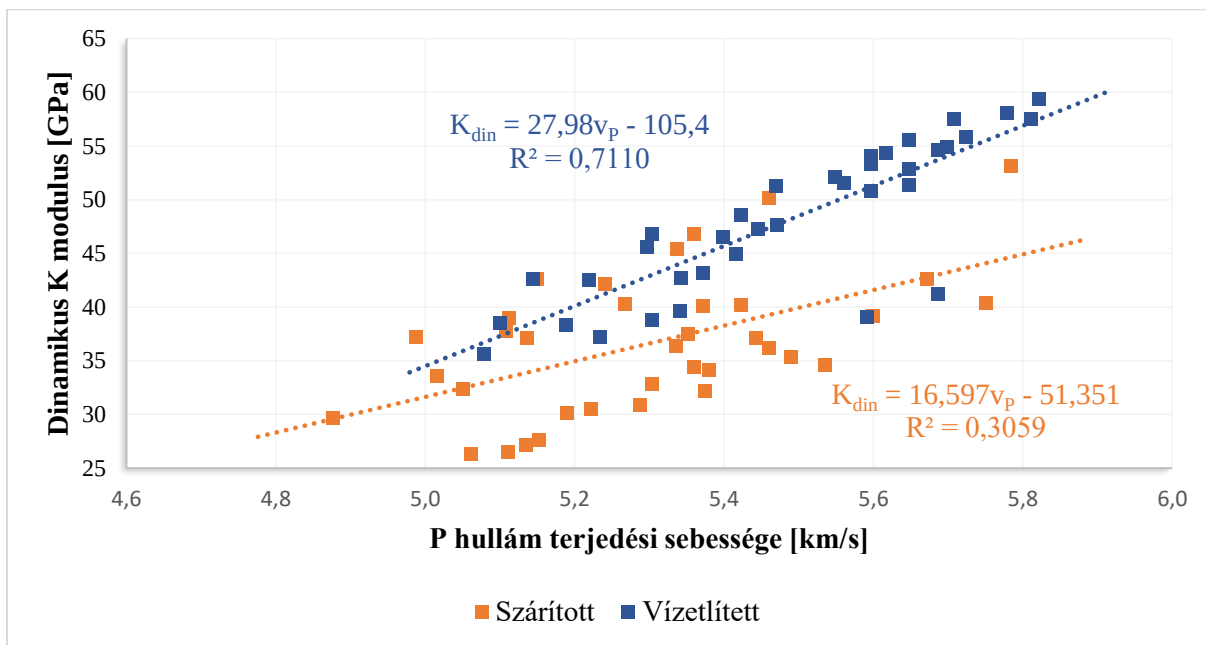


4.6 ábra. A dinamikus G-modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

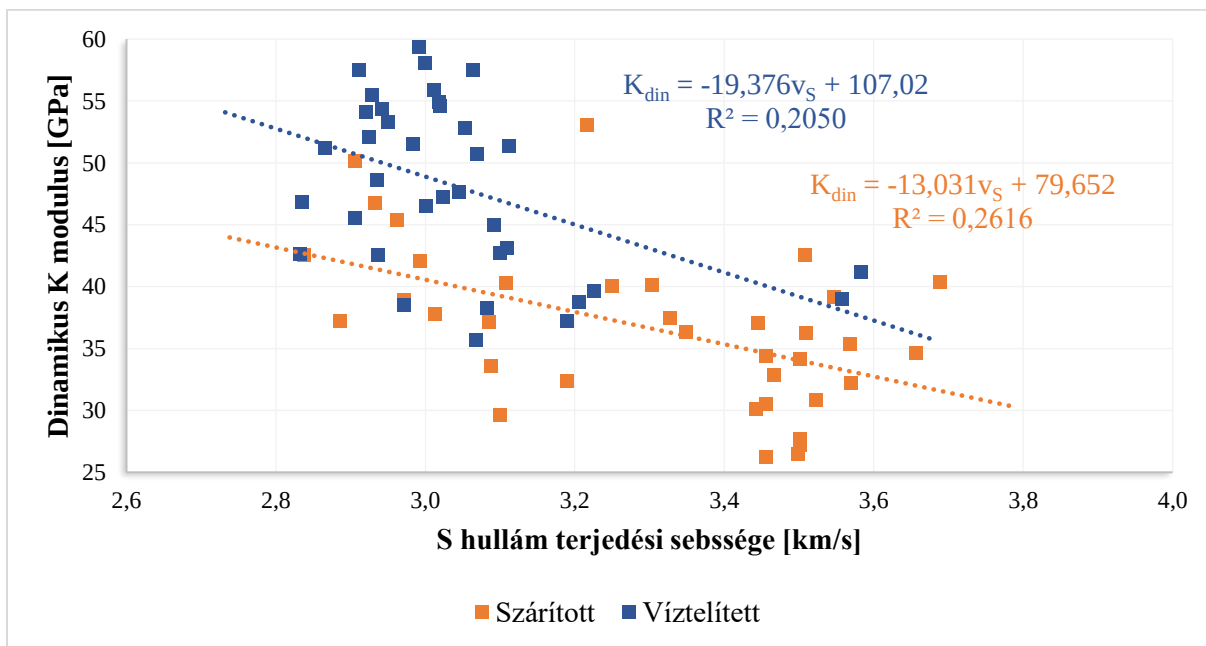


4.7 ábra. A dinamikus G-modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

Az eddigiekkel ellentétben, a 4.8 és 4.9 ábrák alapján, a dinamikus K modulus nem az S, hanem a P hullám terjedési sebességével korrelál, de csak víztelített állapotban.



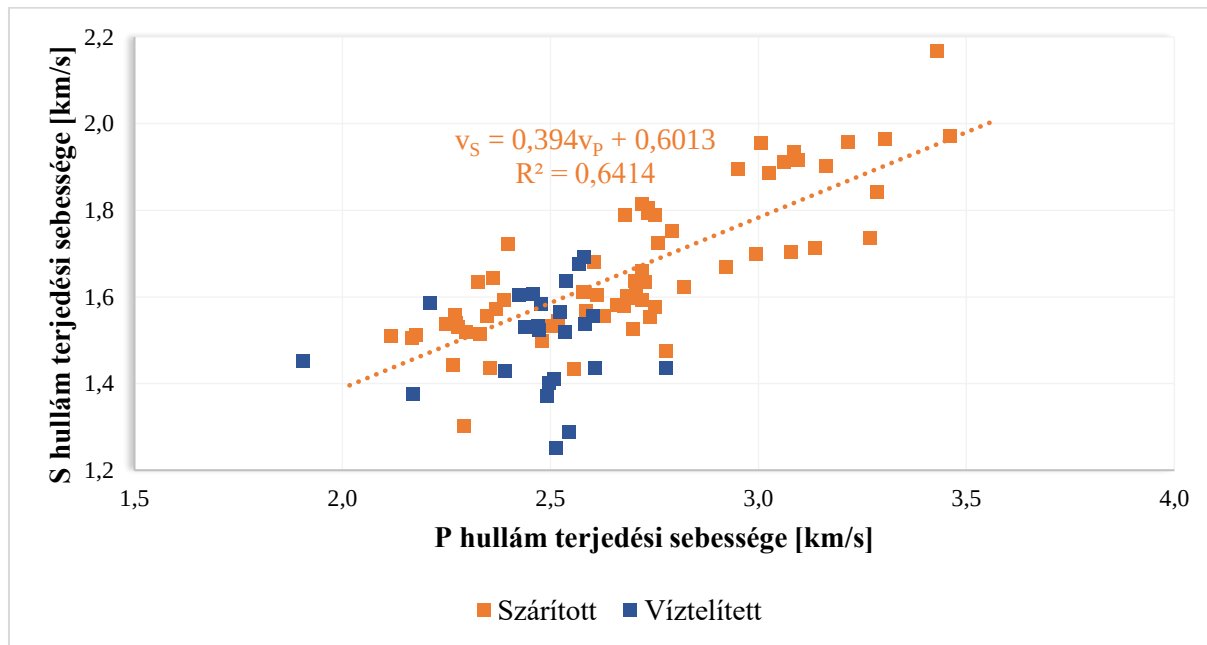
4.8 ábra. A dinamikus K-modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban



4.9 ábra. A dinamikus K-modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata gránitban szárított és víztelített állapotban

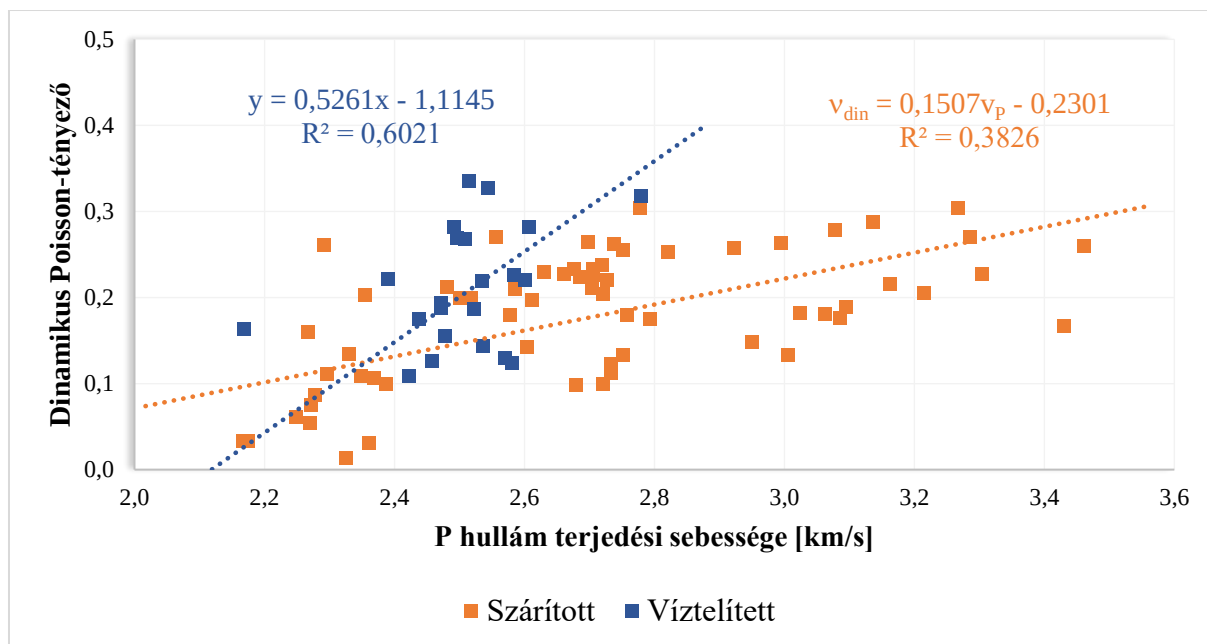
MÁRGA

A 4.10 ábra alapján márga esetében szárított állapotban a P és az S hullám terjedési sebessége gyengén korrelációt mutat, míg víztelített állapotban semmilyen kapcsolat nem látható a két érték között.

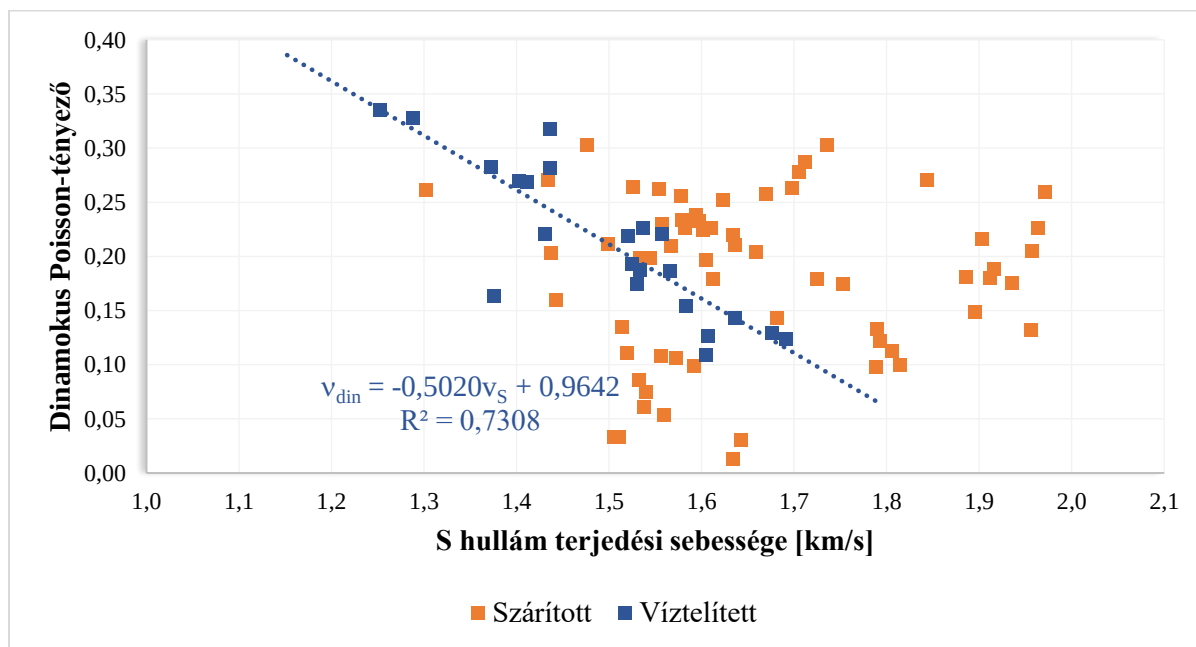


4.10 ábra. A P és S hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

Márga esetében a 4.11 és 4.12 ábrák alapján a dinamikus Poisson tényező csak víztelített állapotban korrelál a P és S hullámok terjedési sebességével, úgy is csak gyengén. Alapvetően az S hullám terjedési sebességének növekedésével a dinamikus Poisson-tényező csökken víztelített állapotban.

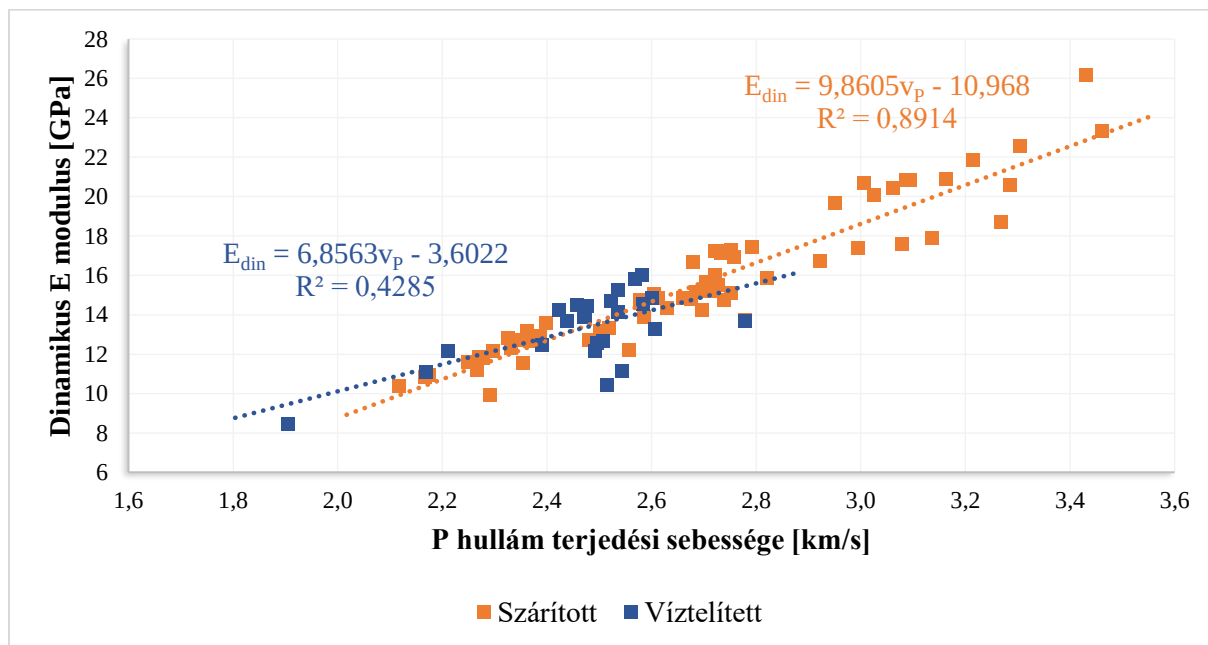


4.11 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

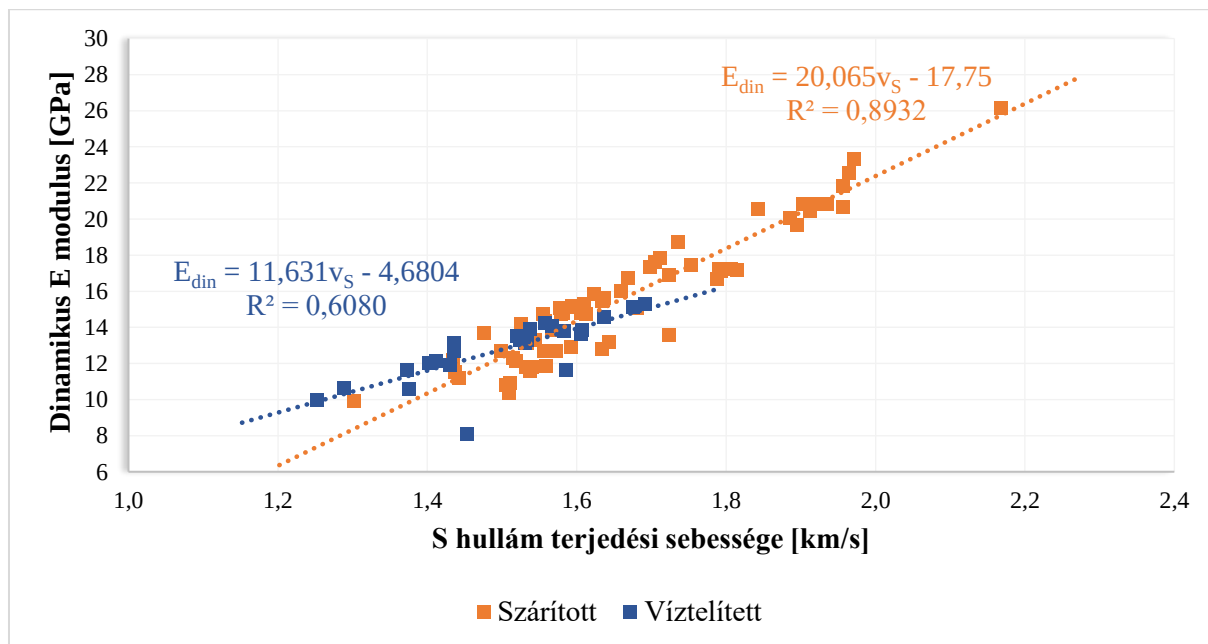


4.12 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

Márga esetében a 4.13 és 4.14 ábrák alapján megállapítható, hogy szárított állapotban a dinamikus E modulus mind a P, mind az S hullám terjedési sebességével korrelál, víztelített állapotban gyenge korrelációt mutat az S hullámmal. Az ábrákról alapvetően leolvasható, hogy a hullámterjedési sebességek növekedésével a dinamikus E modulus értéke is nő mind szárított, mind víztelített állapotban.

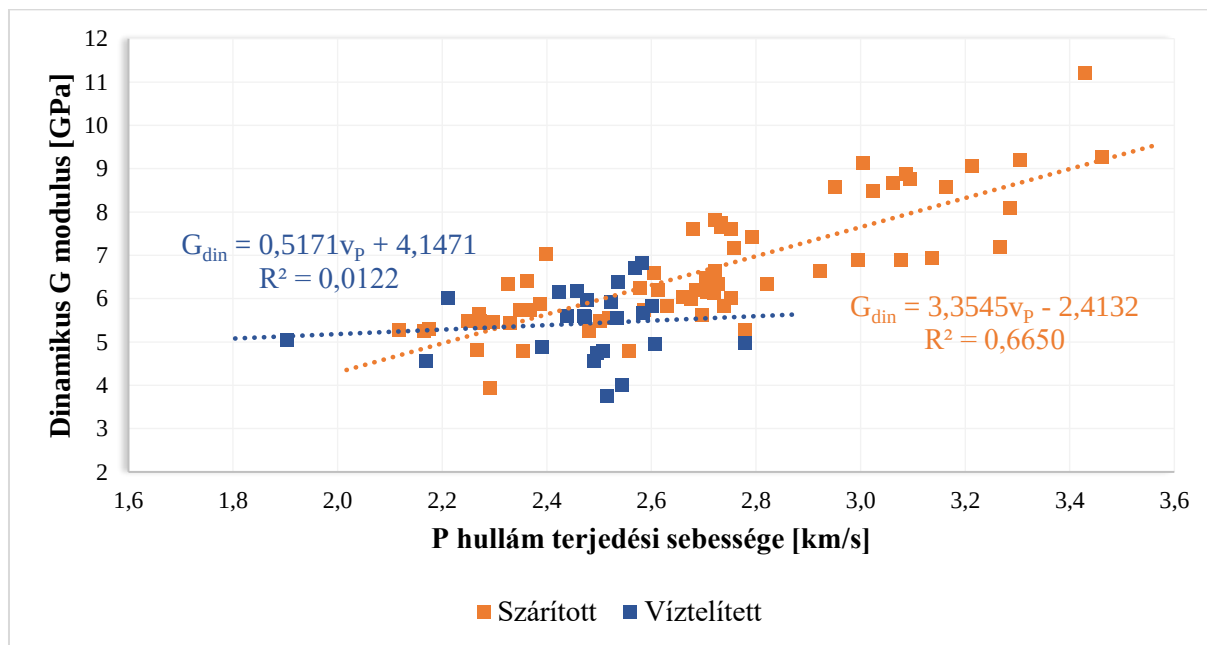


4.13 ábra. A dinamikus E modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

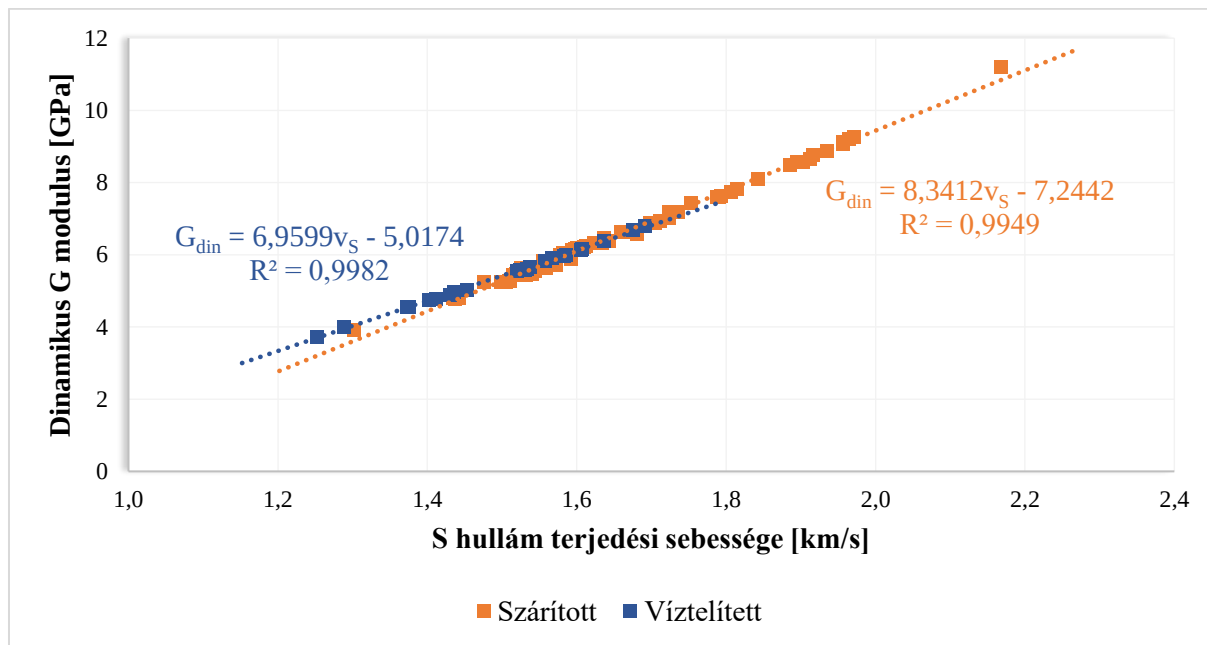


4.14 ábra. A dinamikus E modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

A 4.15 és 4.16 ábrák alapján a gránithoz hasonlóan a dinamikus G modulus az S hullám terjedési sebességével márga esetén is szinte tökéletes korrelációt mutat, míg a P hullám terjedési sebességével mindössze száritott állapotban is csak gyengén korrelál. Szintén hasonlóság a gránittal, hogy az S hullám terjedési sebességének növekedésével a dinamikus G modulus is növekszik, valamint, hogy a dinamikus G modulus az S hullám terjedési sebessége közötti kapcsolatot nem befolyásolja a vízzel való telítés, azonban víztelített állapotban csak kisebb S hullám terjedési sebességek állapíthatók meg a kőzetben.

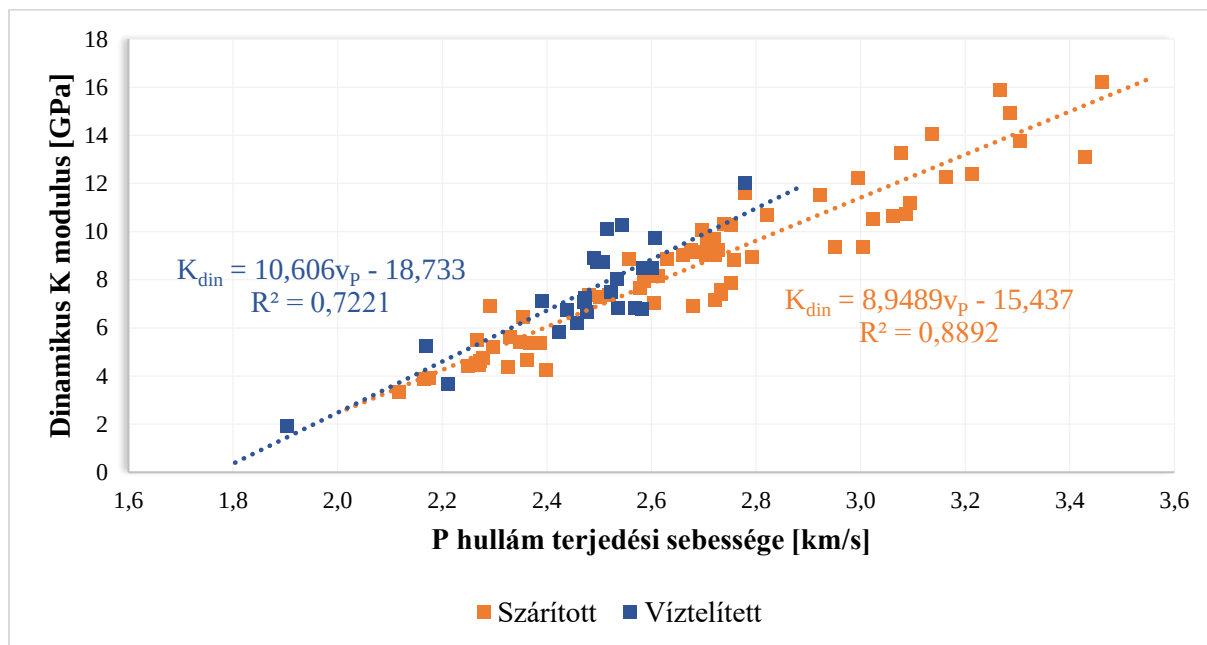


4.15 ábra. A dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában száritott és víztelített állapotban

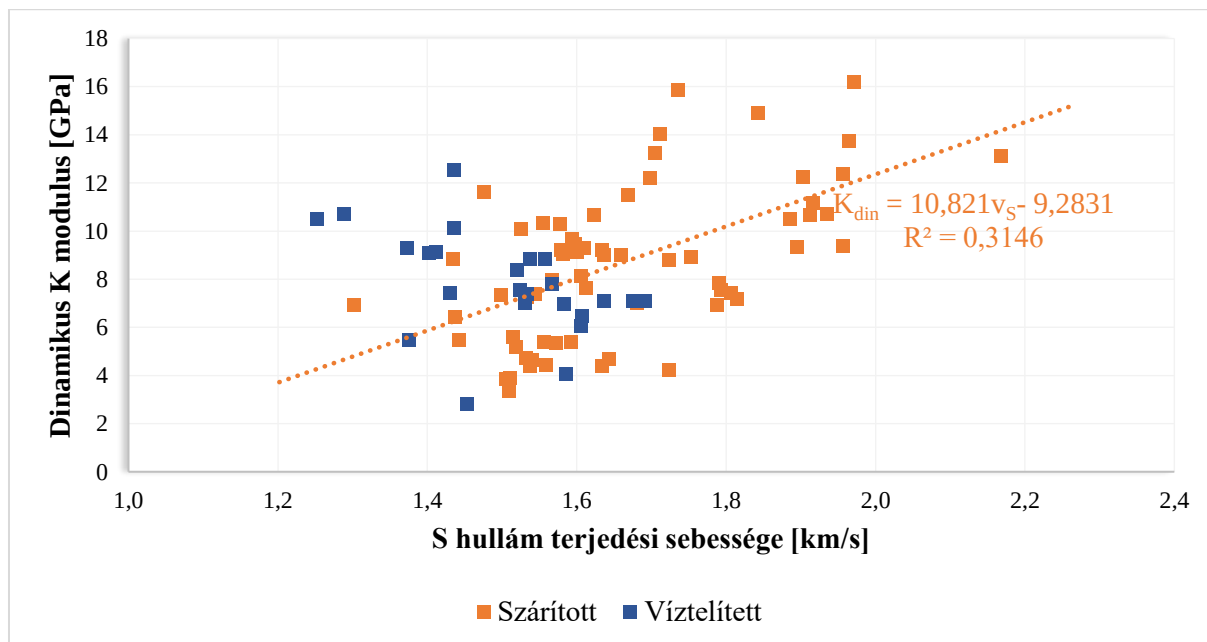


4.16 ábra. A dinamikus G modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában száritott és víztelített állapotban

A 4.17 ábra alapján megfigyelhető a korreláció a dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebessége között mind szárított, mind víztelített állapotban. Alapvetően a P hullám terjedési sebességének növekedésével a dinamikus K modulus értéke is növekszik, szintén mindkét közetfizikai állapotban. A 4.18 ábra alapján a dinamikus K modulus gyakorlatilag nem függ össze az S hullám terjedési sebességével, sem szárított, sem víztelített állapotban.



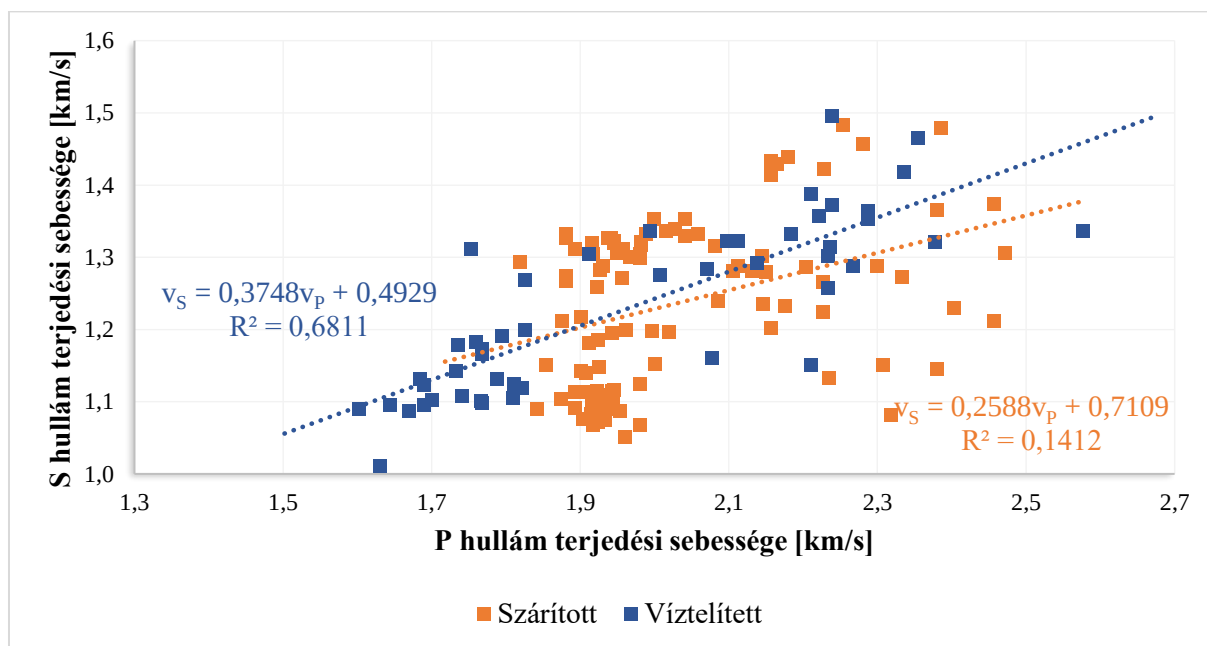
4.17 ábra. A dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban



4.18 ábra. A dinamikus K modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata márgában szárított és víztelített állapotban

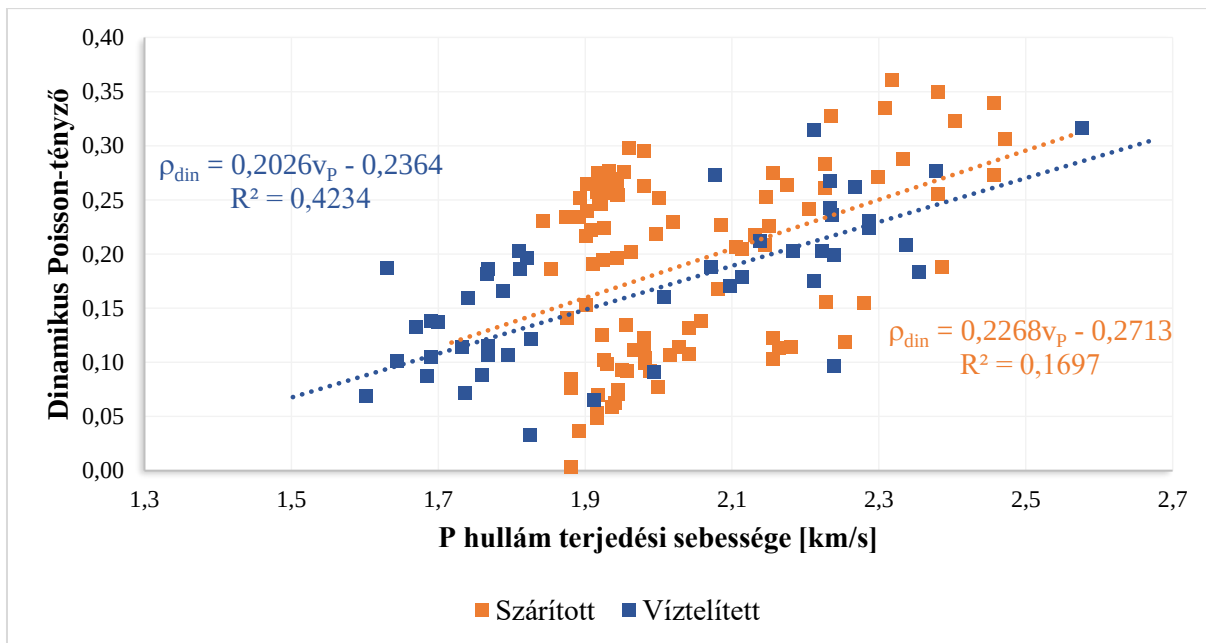
DURVA MÉSZKŐ

Durva mészkő esetén a 4.19 ábra alapján a P és S hullámok terjedési sebessége között mindössze víztelített állapotban figyelhető meg gyenge korreláció.

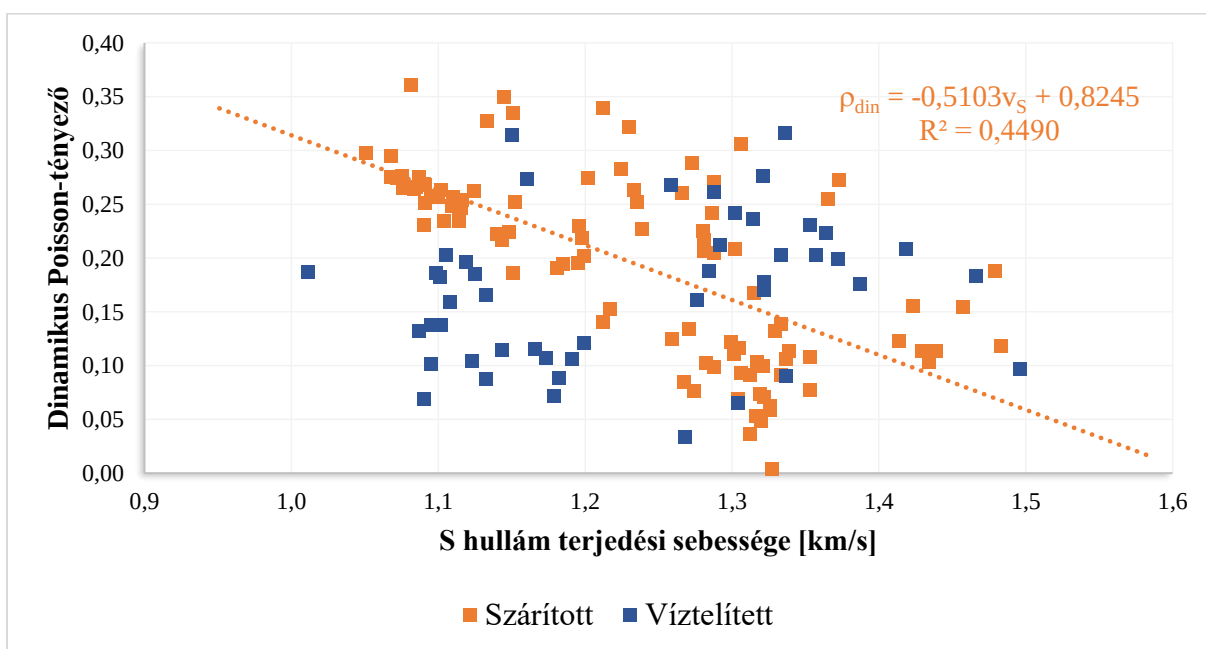


4.19 ábra. A P és S hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

Durva mészkő esetében a 4.20 és 4.21 ábrák alapján a dinamikus Poisson-tényező gyakorlatilag semmilyen kapcsolatot nem mutat a P és S hullámok terjedési sebességével sem szárított, sem víztelített állapotban.

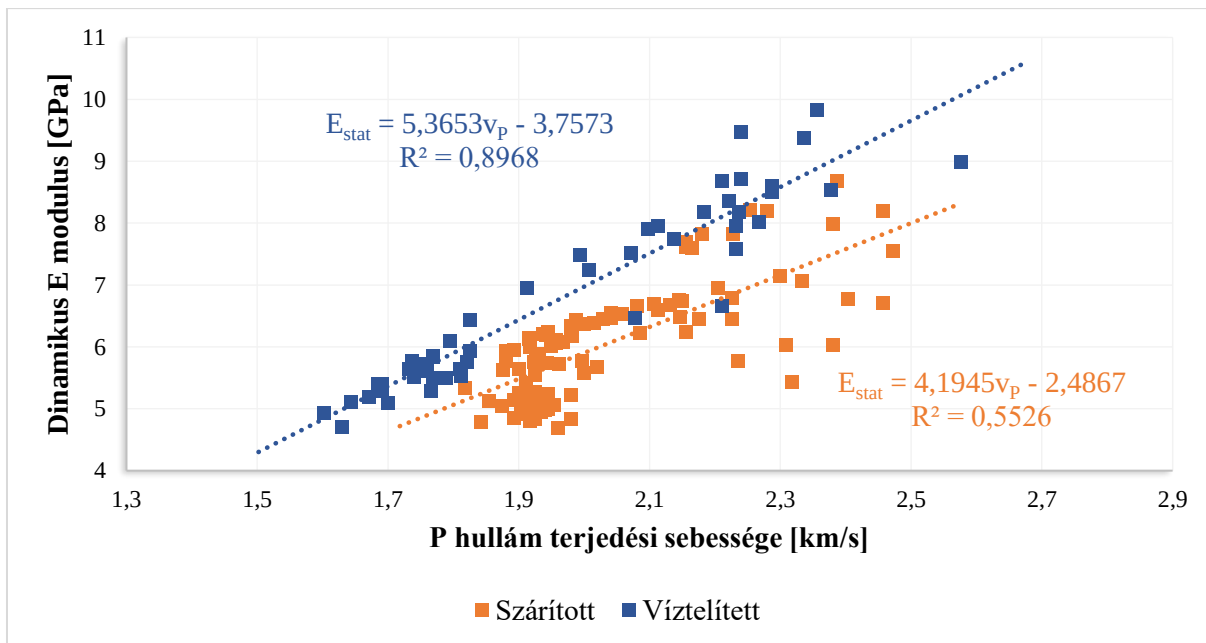


4.20 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

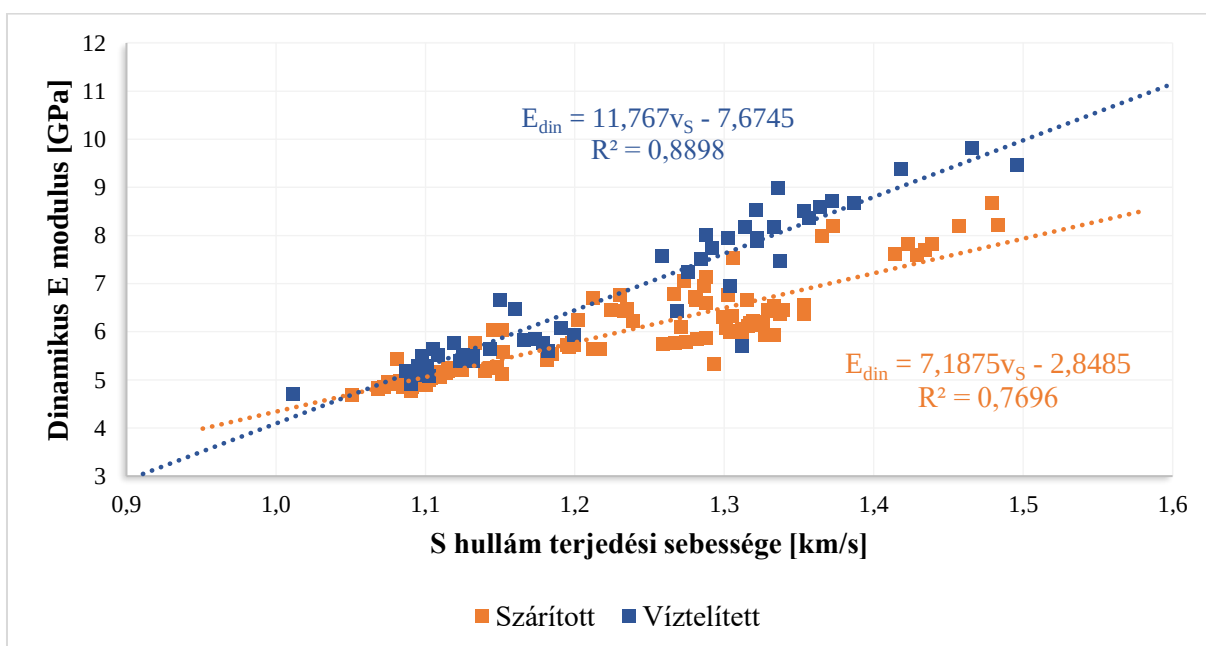


4.21 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

A 4.22 és 4.23 ábrákon minden esetben, azaz szárított és víztelített állapotban, P és S hullám esetén is lineáris kapcsolat látható a dinamikus E modulussal. Alapvetően a hullámterjedési sebességekkel a dinamikus E modulus értéke is növekszik.

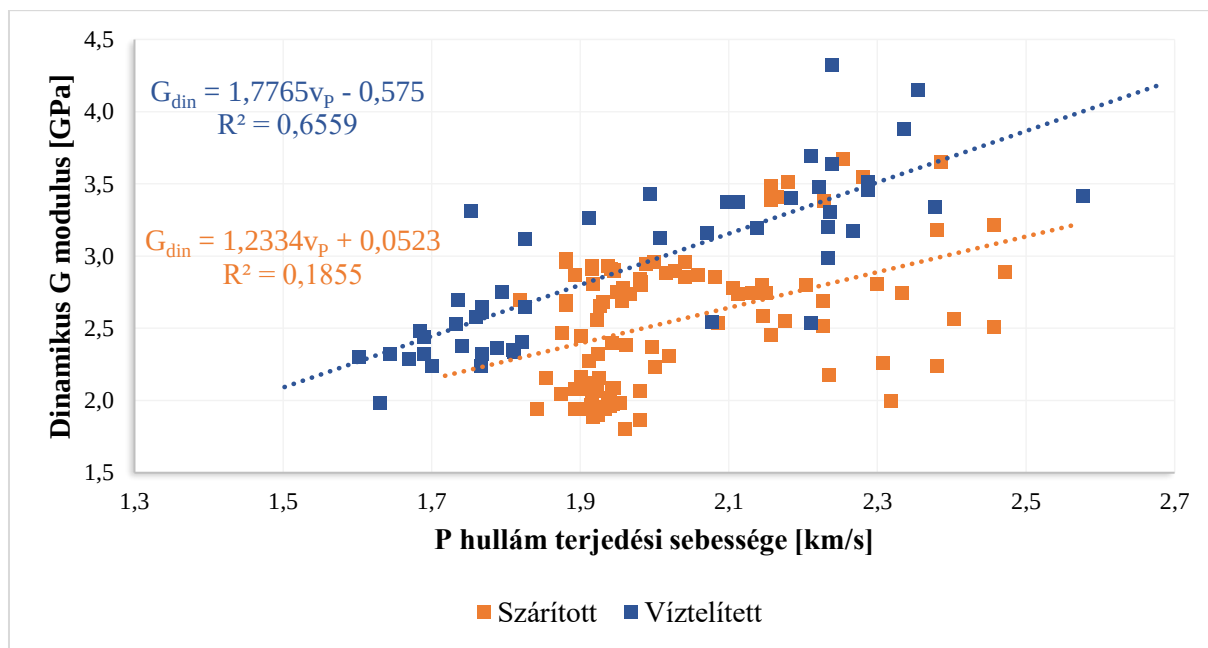


4.22 ábra. A dinamikus E modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

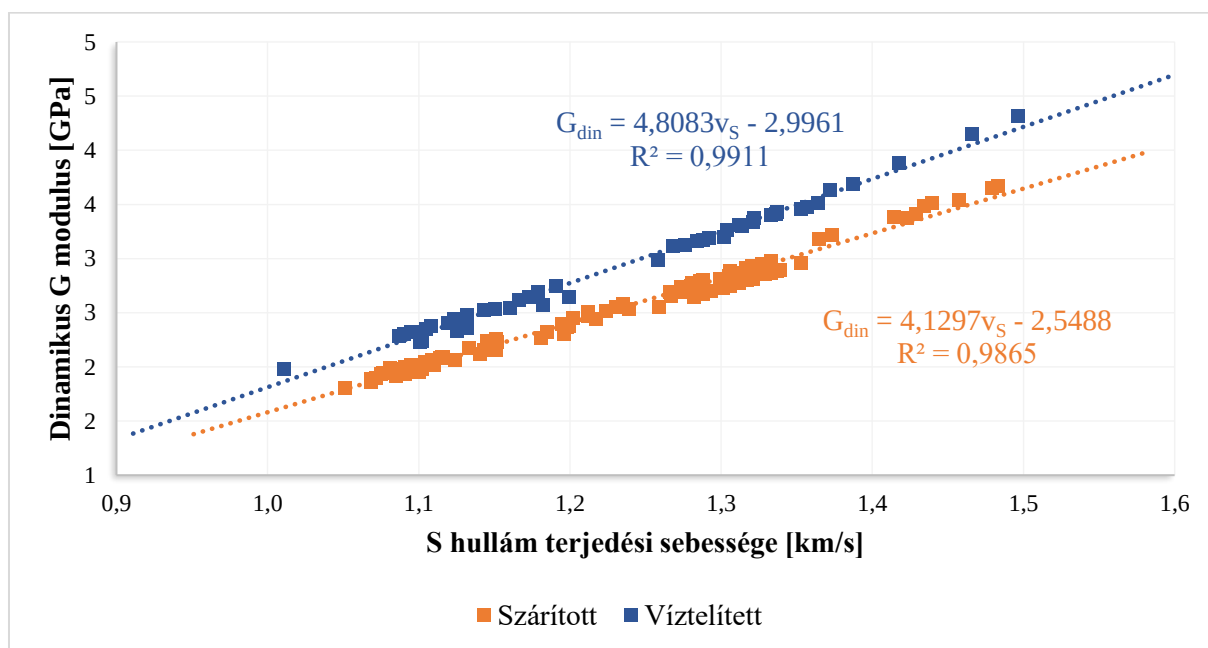


4.23 ábra. A dinamikus E modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

Ahogy a 4.25 ábrán látható, a gránithoz és a márgához hasonlóan durva mészkő esetén is megfigyelhető az S hullám terjedési sebessége és a dinamikus G modulus közti szinte tökéletes korreláció szárított és víztelített állapotban is. Itt is igaz, hogy az S hullám terjedési sebességének növekedésével a dinamikus G modulus értéke is növekszik. Az eltérés abban mutatkozik meg, hogy víztelített állapotban nagyobb a dinamikus G modulus értéke, mint szárított állapotban. Ennek oka, hogy a durva mészkő 13% feletti vízfelvétele már jelentős befolyással van a kőzetminták rugalmas tulajdonságaira. A P hullám terjedési sebességével gyenge korrelációt mutat a dinamikus G modulus víztelített állapotban (4.24 ábra).

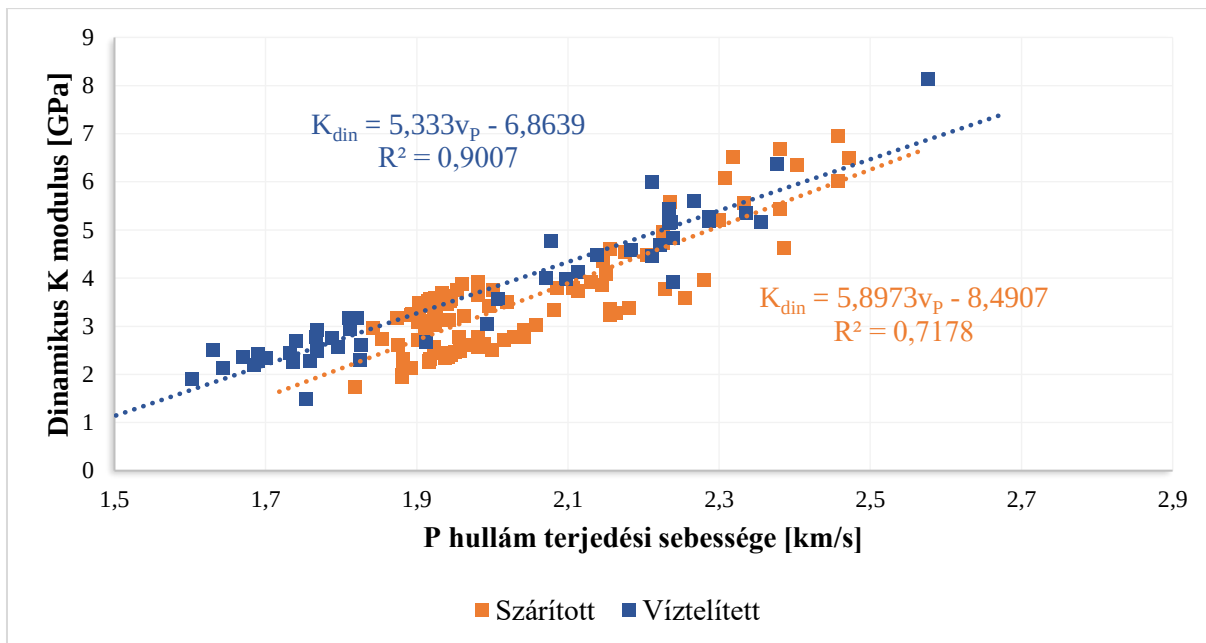


4.24 ábra. A dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

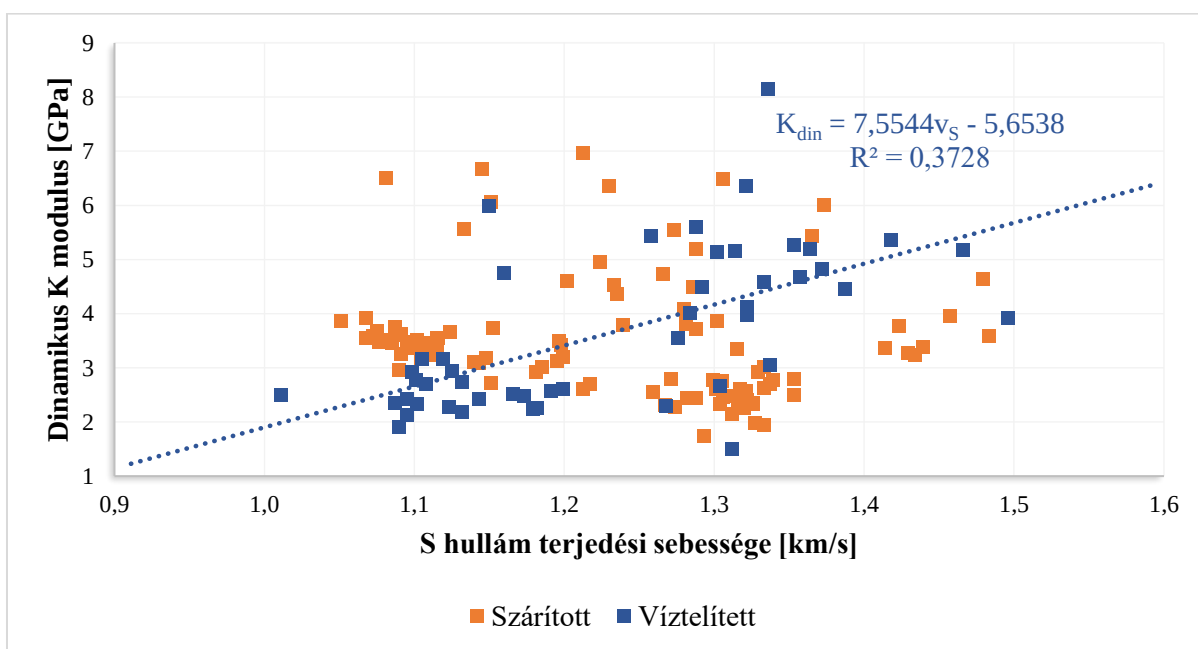


4.25. ábra. A dinamikus G modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

A dinamikus K modulus a 4.26 ábra alapján mind szárított, mind víztelített állapotban lineáris korrelációt mutat a P hullám terjedési sebességével, míg az S hullám terjedési sebességével gyakorlatilag nem mutat összefüggést (4.27 ábra).



4.26 ábra. A dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

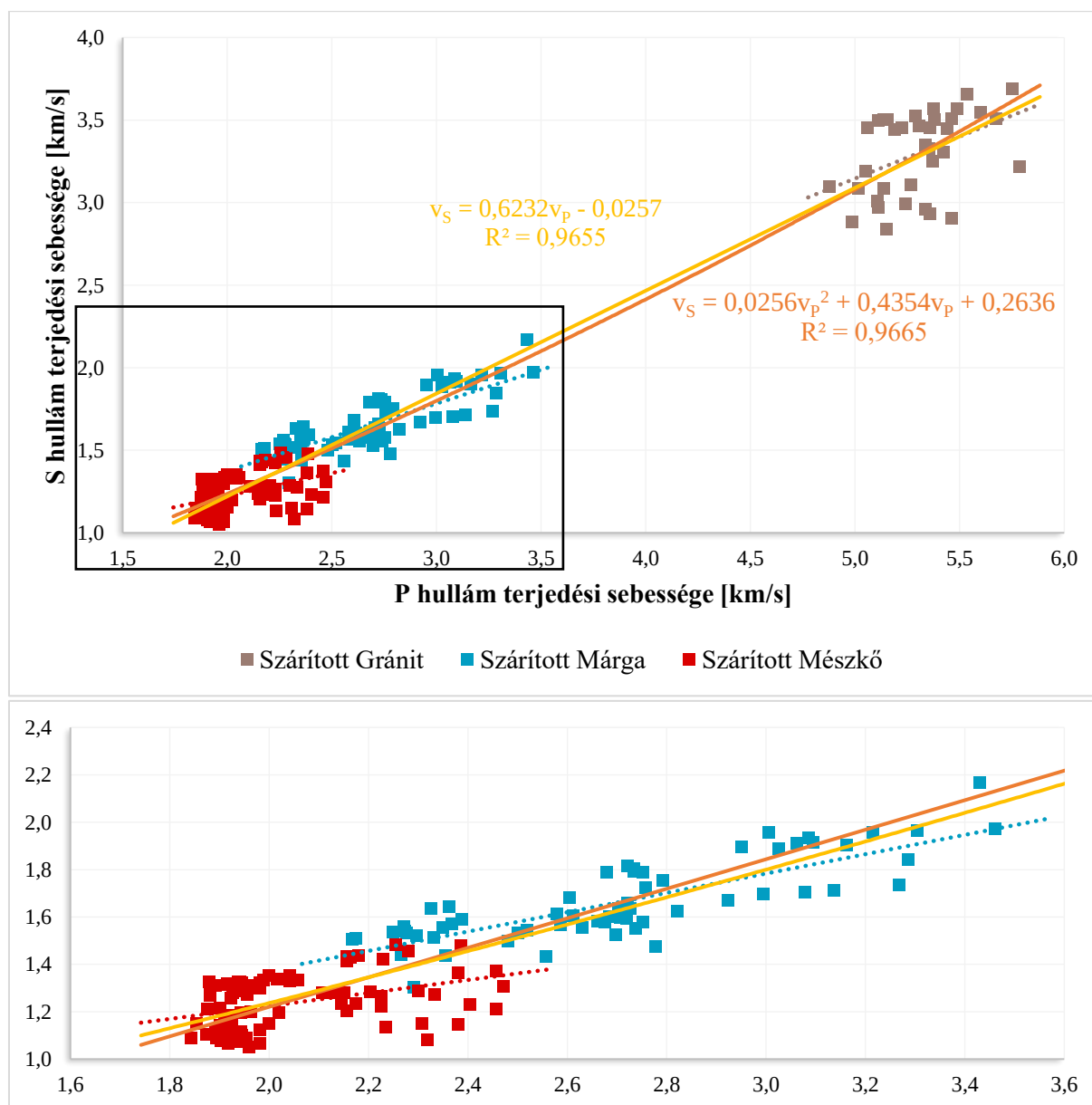


4.27 ábra. A dinamikus K modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata durva mészkőben szárított és víztelített állapotban

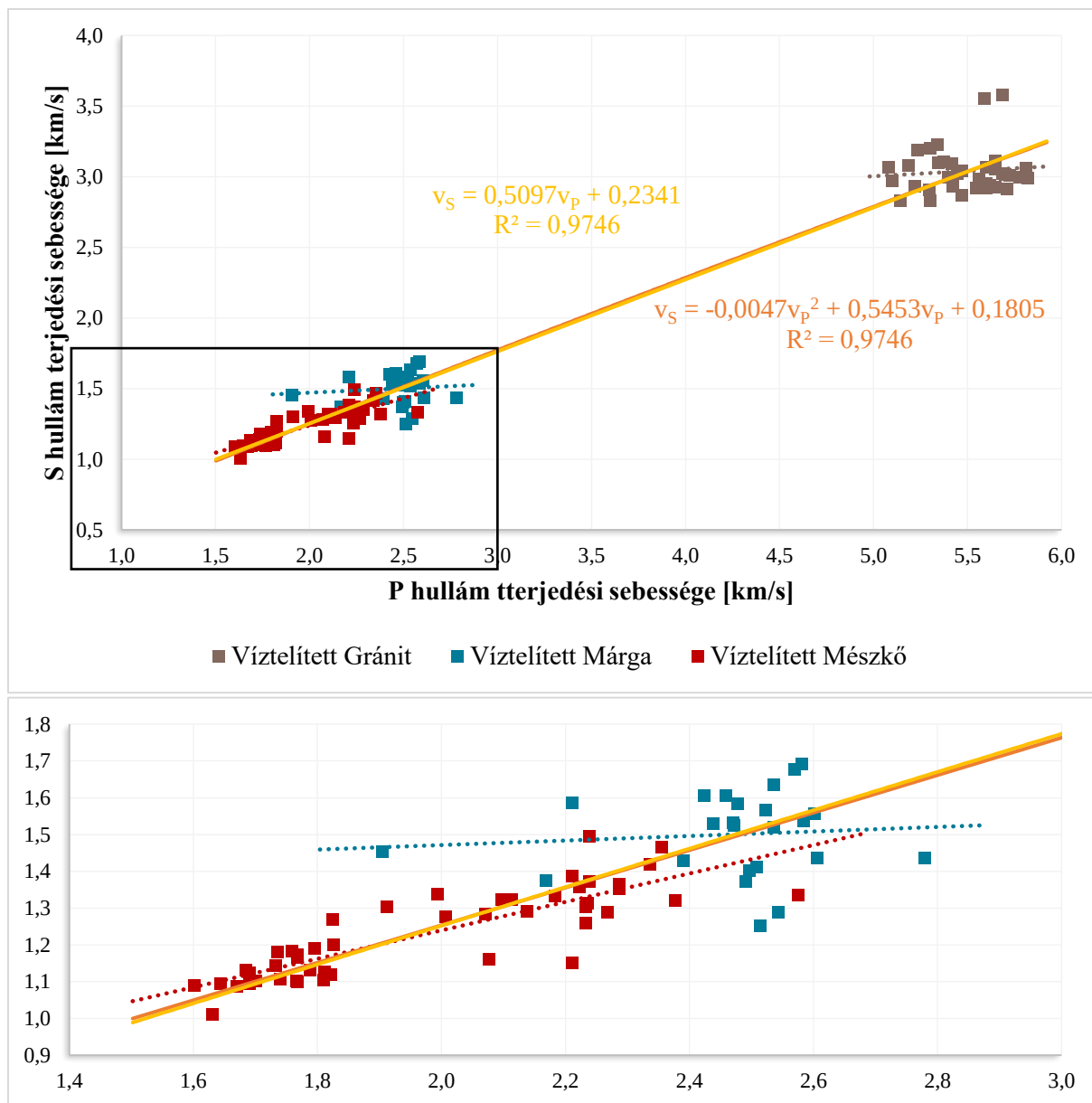
5. EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE

A következőben a közzétípusonként bemutatott eredményeimet fogom összesíteni, és az összesített adatsoron fogok különböző összefüggéseket bemutatni a különböző paraméterek között külön szárított és víztelített állapotban. Amennyiben szükséges, az ábrák átláthatóságának érdekében a megfelelő részleteket ki is nagyítom ugyanazon ábra részeként.

A 5.1 és 5.2 ábrák alapján a P és S hullámok terjedési sebessége között erős, lineárisnak tekinthető korreláció áll fenn mind szárított, mind víztelített állapotban.

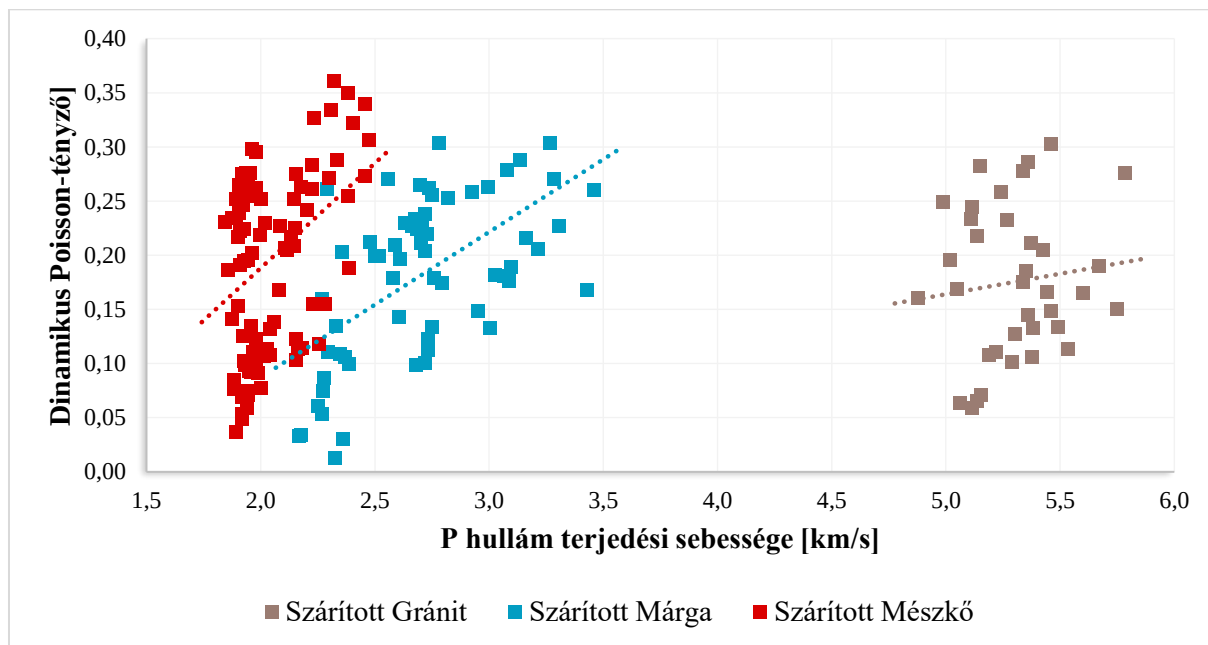


5.1 ábra. A P és S hullámok terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább

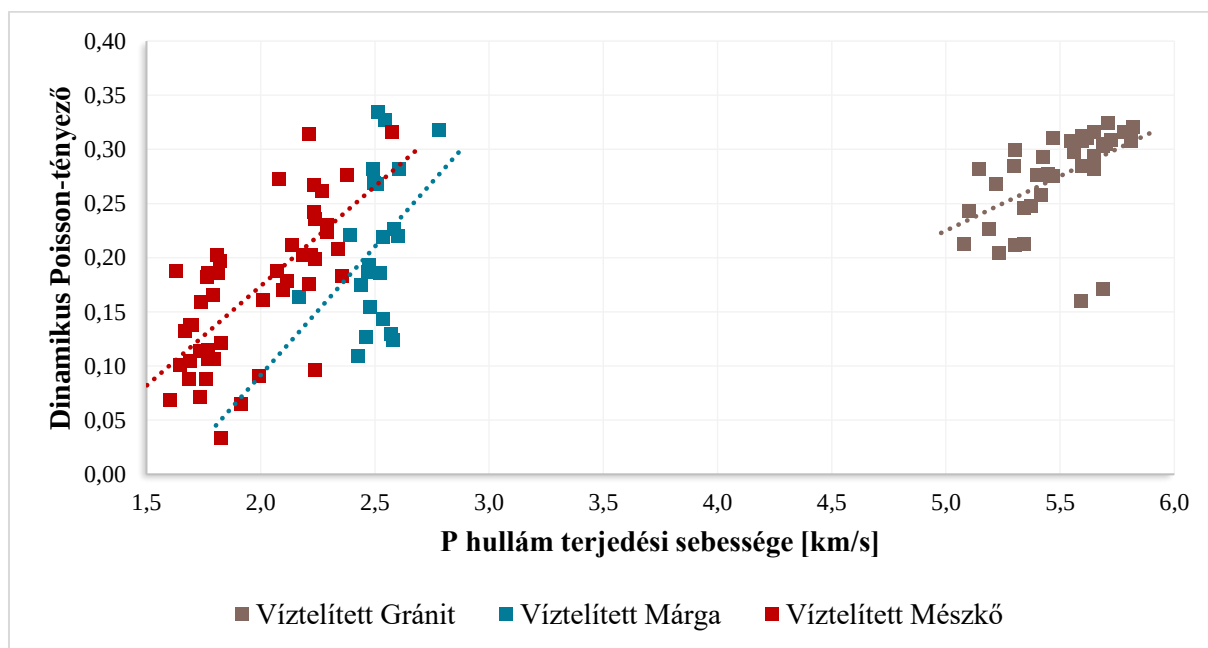


5.2 ábra. A P és S hullámok terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább

Az 5.3 és 5.4 ábrák alapján a P hullám terjedési sebességének növekedésével nő a dinamikus Poisson tényező száritott és víztelített állapotban egyaránt.

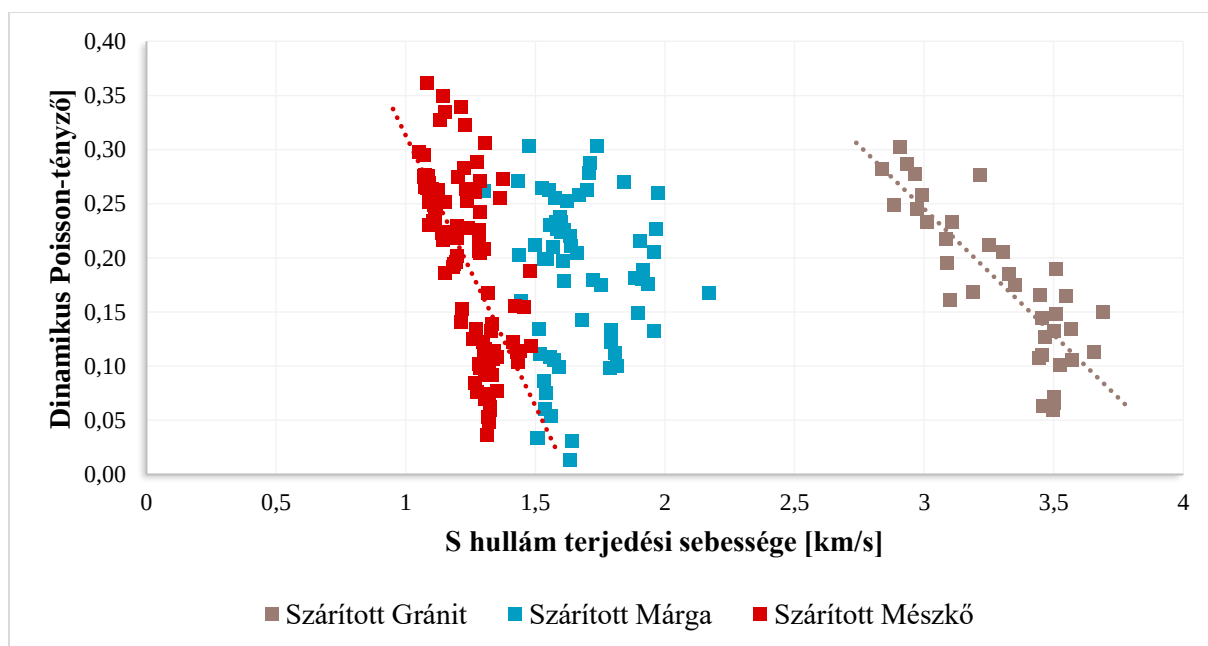


5.3 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata száritott állapotban

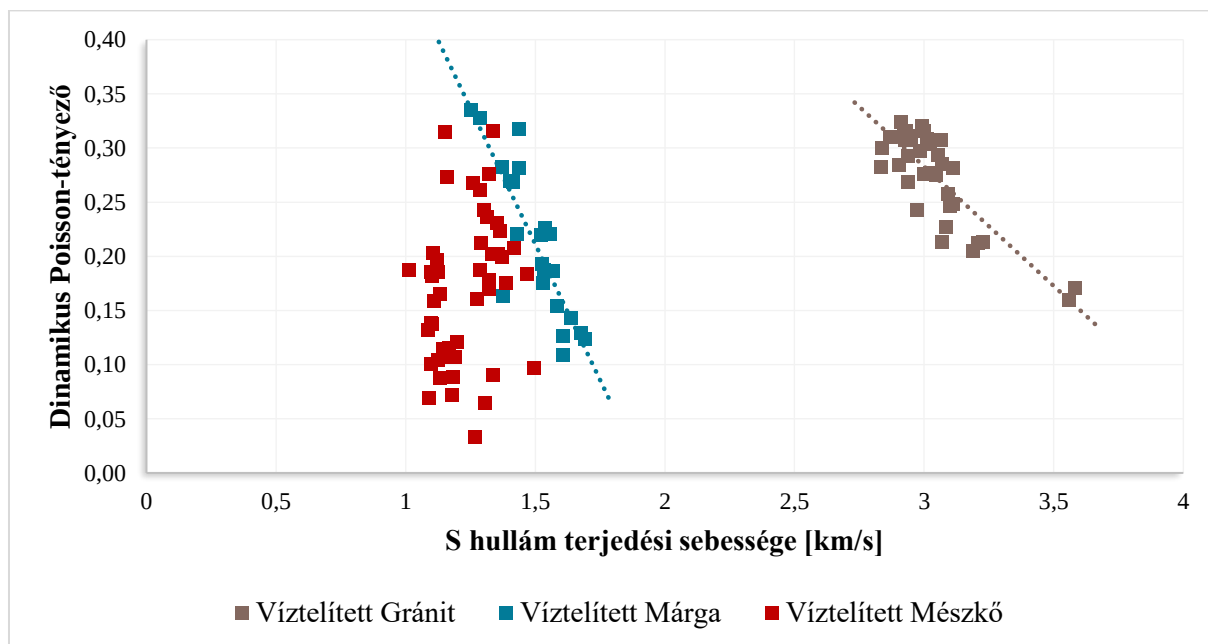


5.4 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban

A 5.5 és 5.6 ábrák alapján a P hullámhoz hasonlóan az S hullám terjedési sebességének növekedésével nő a dinamikus Poisson-tényező szárított és víztelített állapotban egyaránt. A különbség abban figyelhető meg, hogy a lineáris korrelációk egyenletei köztípusonként ebben az esetben negatív főegyütthatójúak, míg P hullám esetén minden esetben pozitívok.

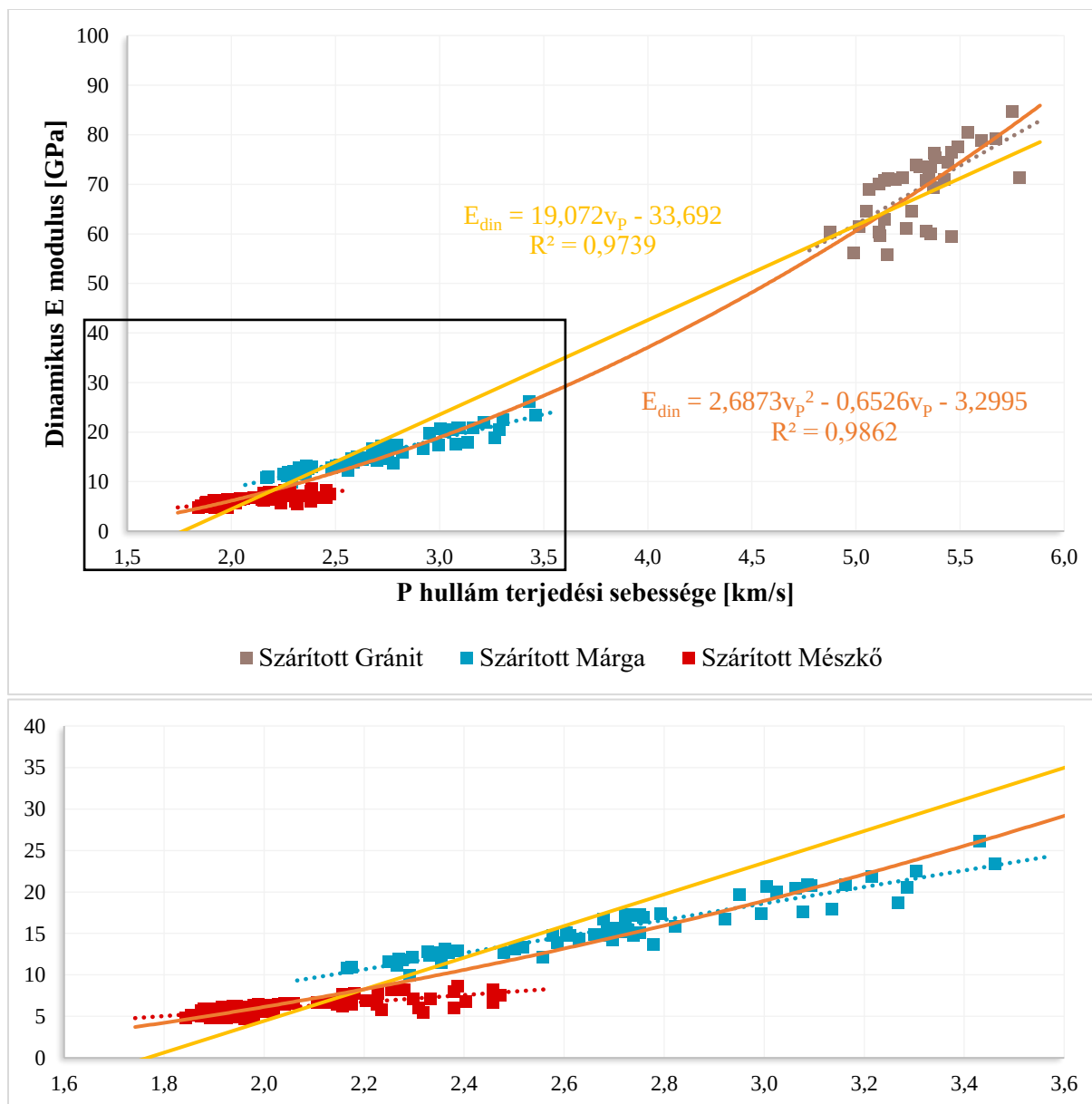


5.5 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban

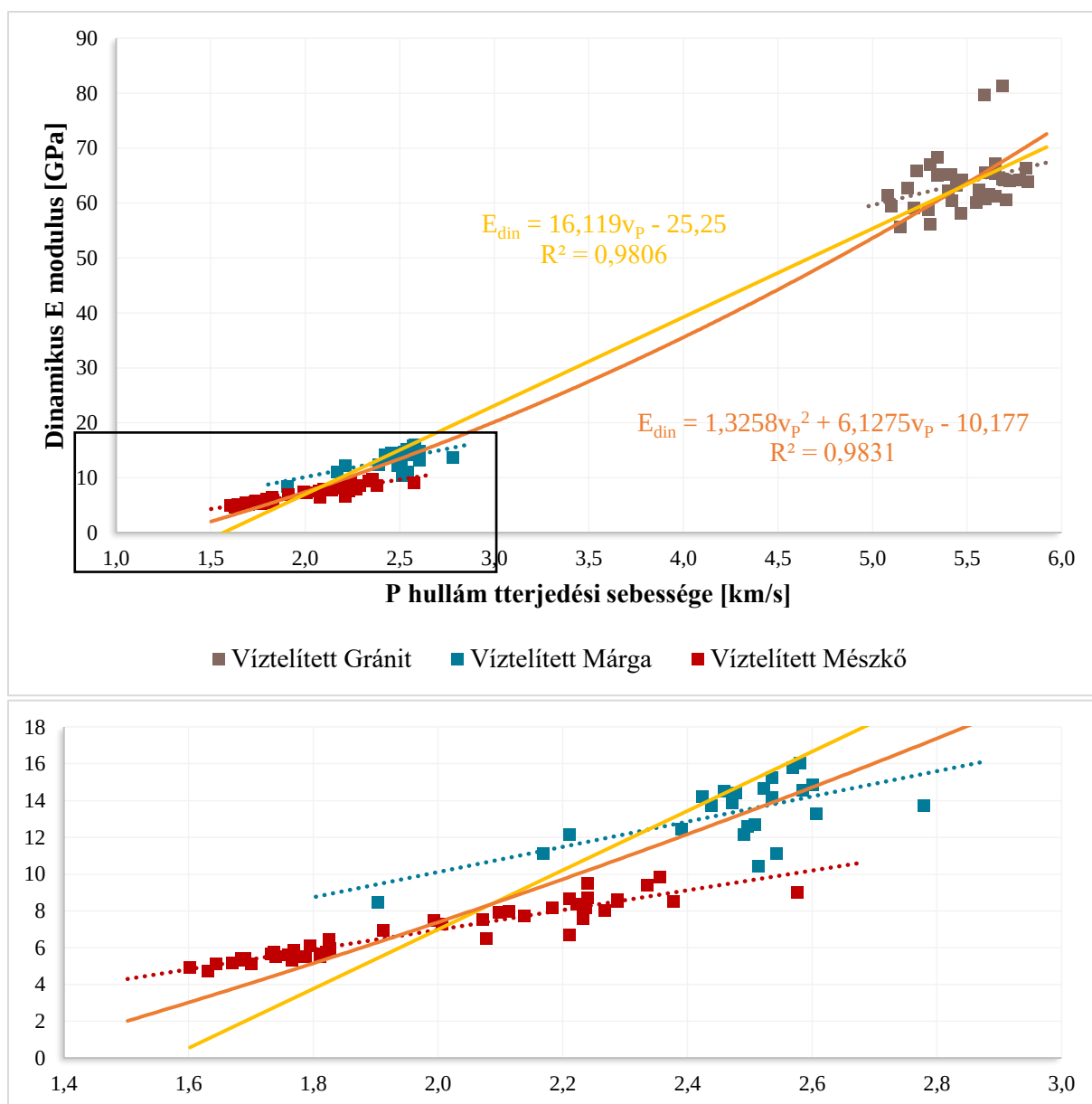


5.6 ábra. A dinamikus Poisson-tényező és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban

A 5.7 és 5.8 ábrákon látható összesített korreláció a P hullám terjedési sebessége és a dinamikus E modulus között szárított és víztelített állapotban már közelebb áll a parabolikus összefüggéshez, de még mindig közel lineárisnak tekinthető.

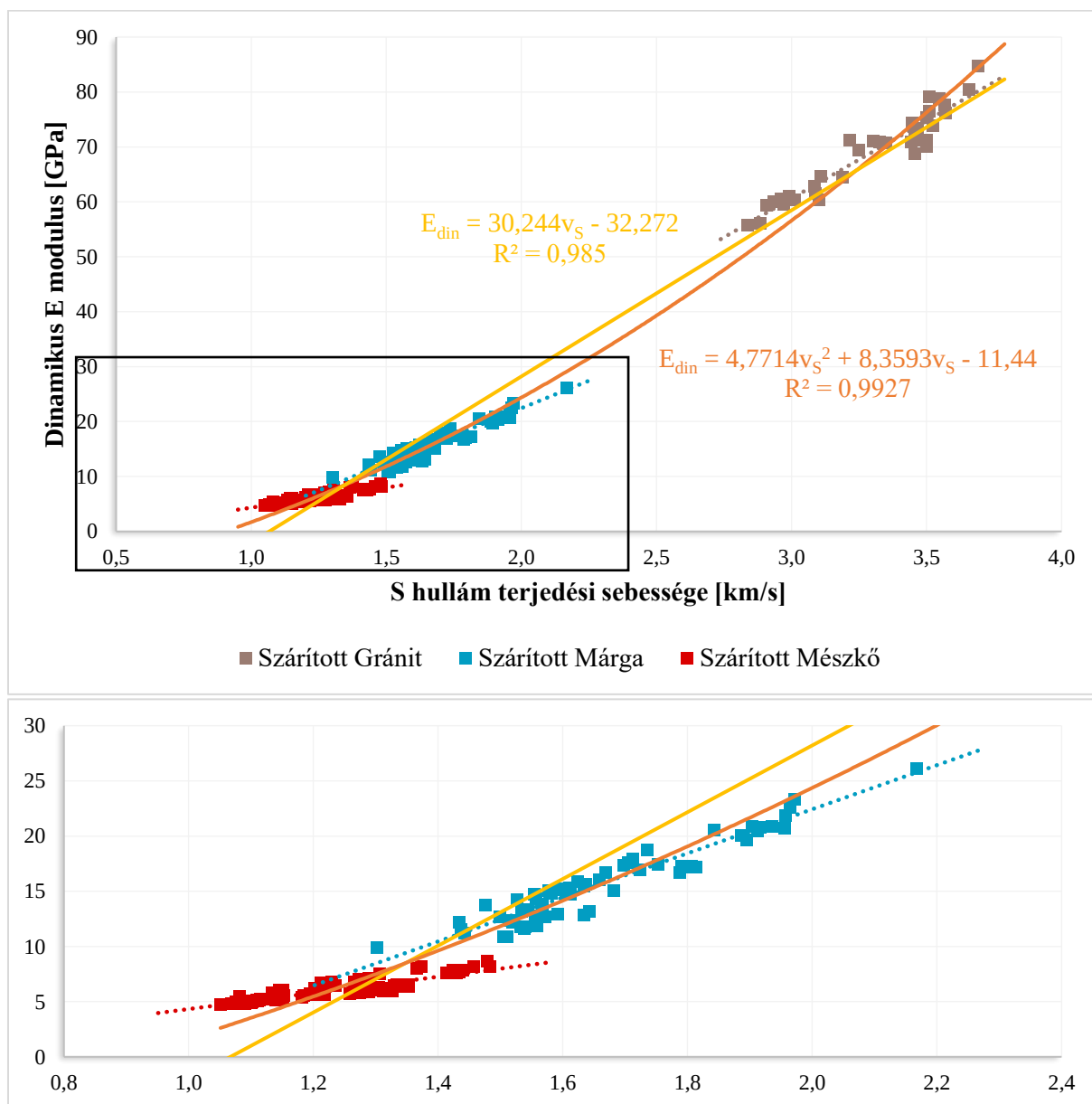


5.7 ábra. A dinamikus E modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább

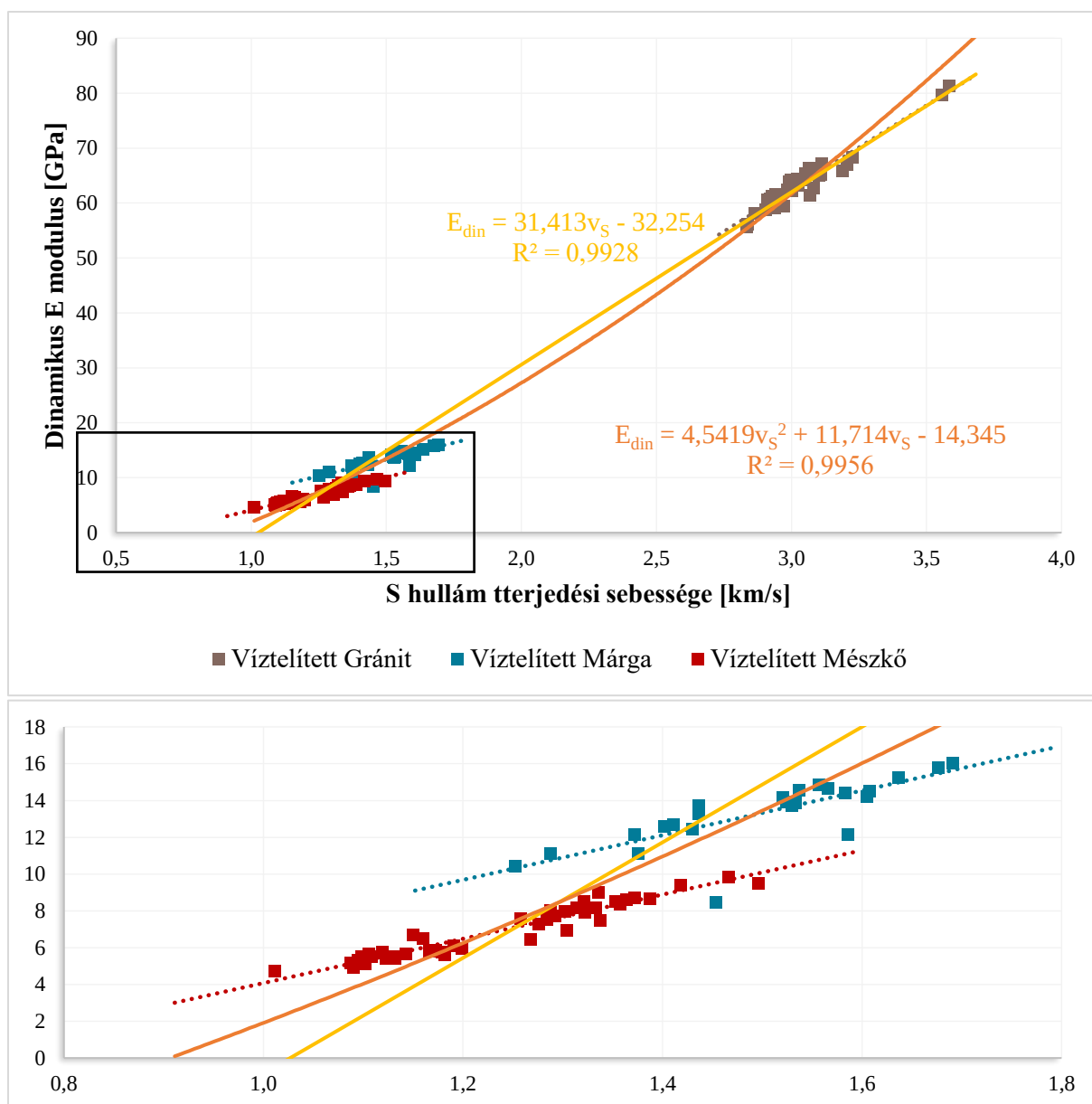


5.8 ábra. A dinamikus E modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

A dinamikus E modulus és az S hullám terjedési sebességének korrelációja, ahogyan a 5.9 és 5.10 ábrákon látható, még erősebb, mint a P hullámmal vett korrelációja, de a kapcsolat hasonlóan lineáris.

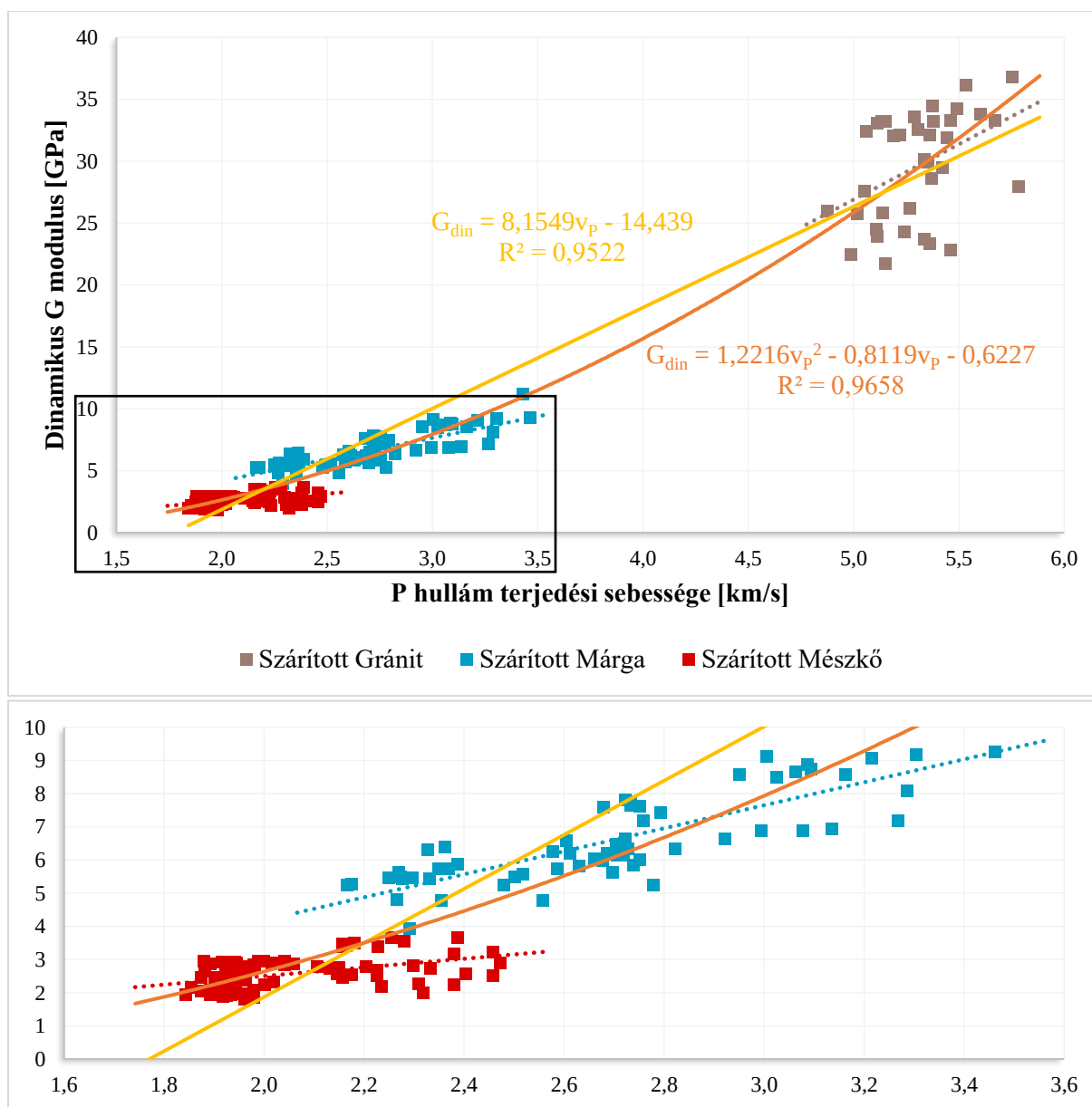


5.9 ábra. A dinamikus E modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata száritott állapotban fent, kinagyított részlet alább

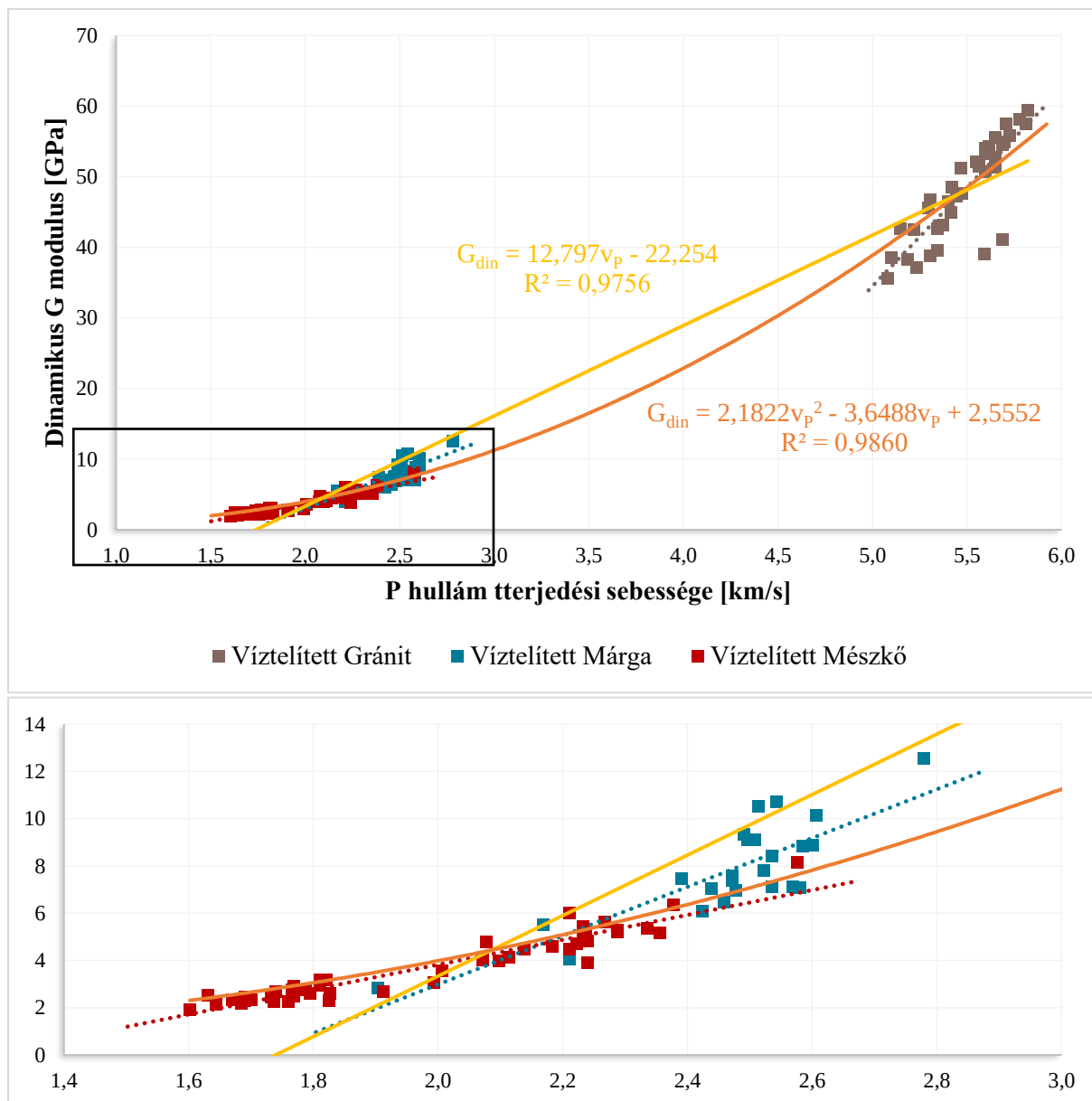


5.10 ábra. A dinamikus E modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

A 5.11 és 5.12 ábrák alapján elmondható, hogy erős, a parabolikushoz már közelebb álló korreláció áll fenn a Dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebessége közt. Víztelített állapotban a közetek dinamikus nyírási modulusa egyértelműen nagyobb, mint szárított állapotban.

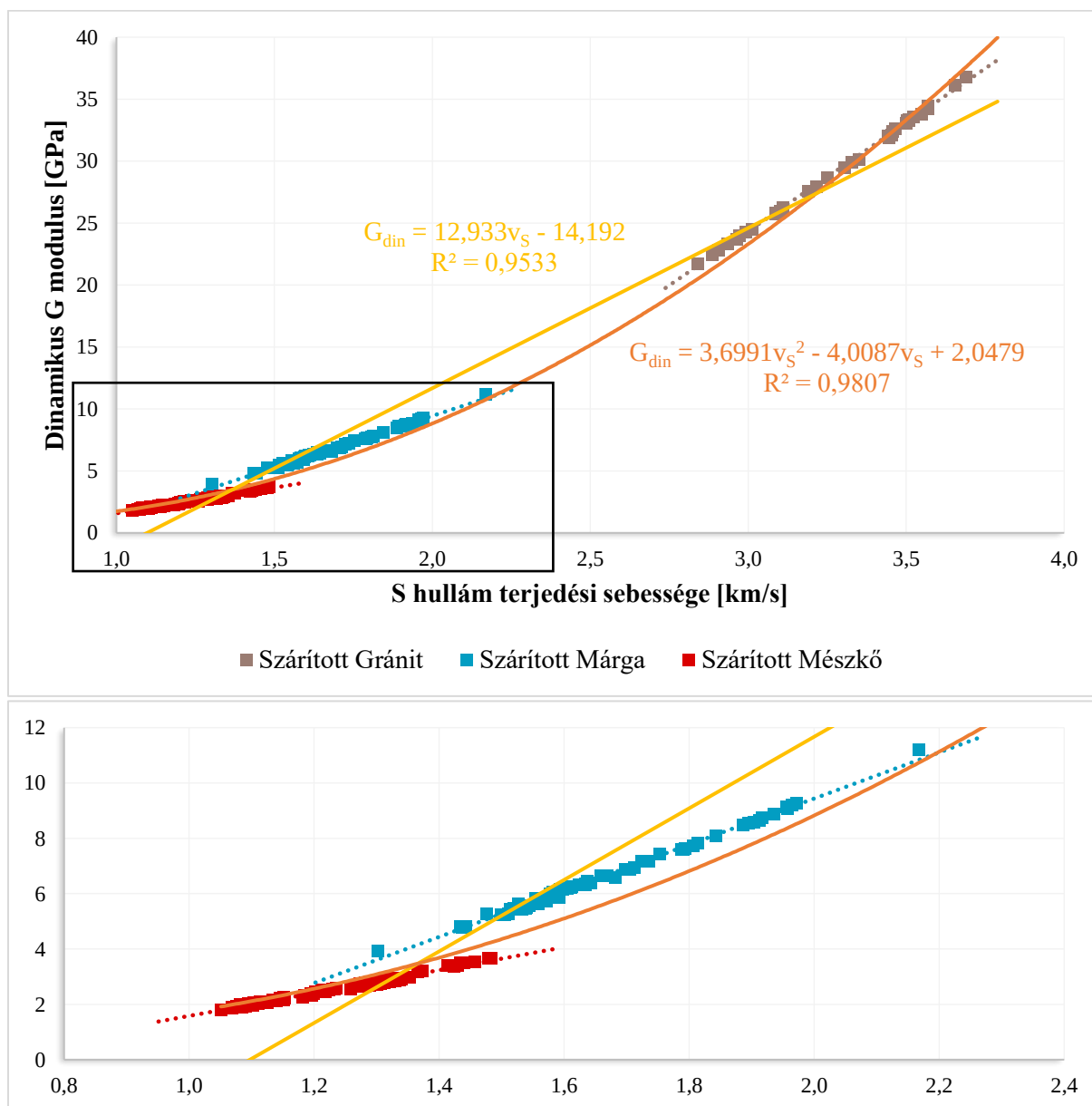


5.11 ábra. A dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább

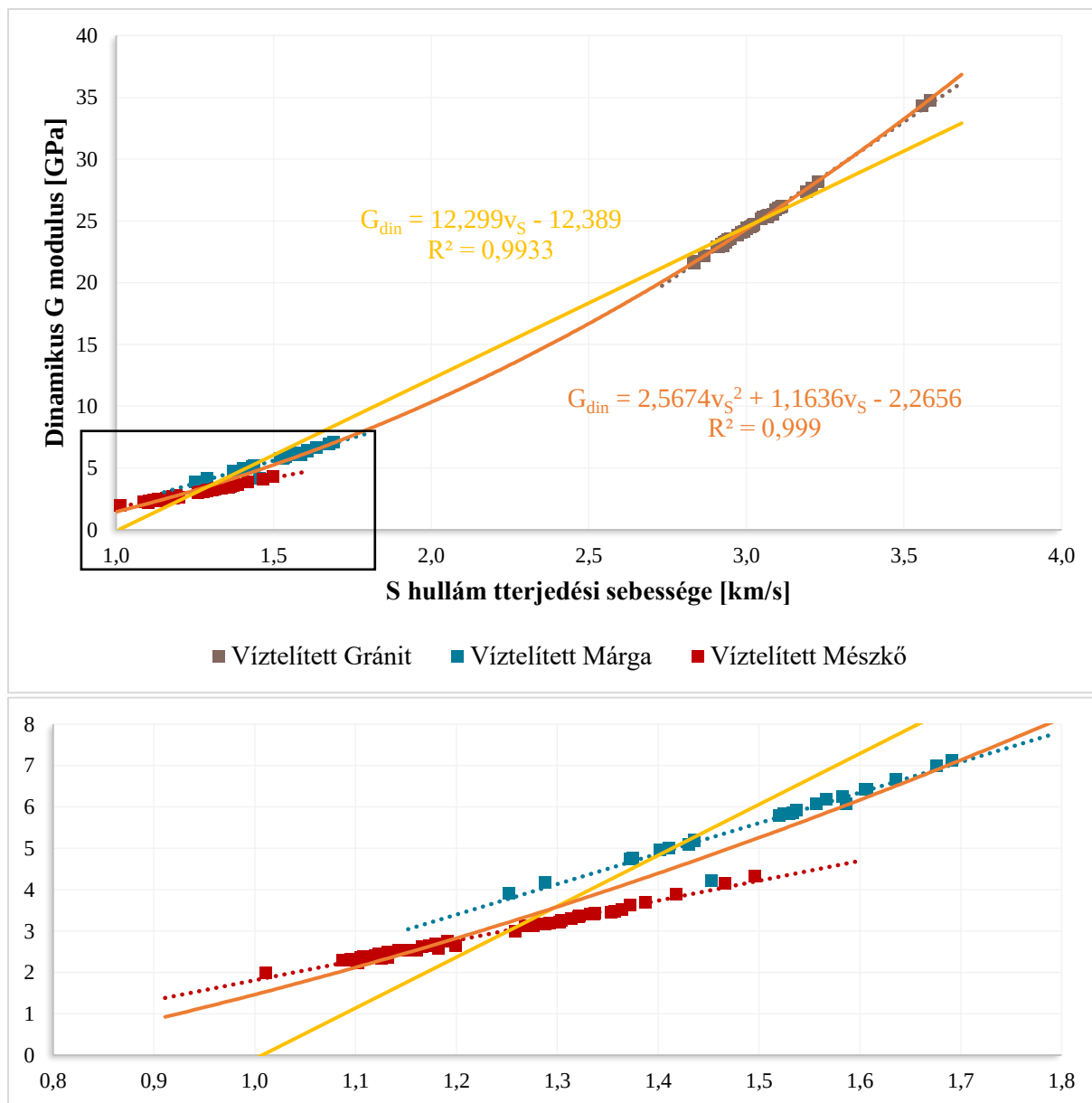


5.12. ábra. A dinamikus G modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

A 5.13 és 5.14 ábrákon megfigyelhető korrelációk már egyértelműen inkább parabolikusak, mint sem lineárisok, bár a determinációs együttható lineáris kapcsolat esetén is igen magas. A 5.14 ábrán parabolikus korreláció esetén a determinációs együttható 0,999, azaz az adatok szinte pontosan illeszkedik a görbére, de száritott állapotban (5.13 ábra) is rendkívül erős korrelációt mutat a dinamikus G modulus és az S hullám terjedési sebessége.

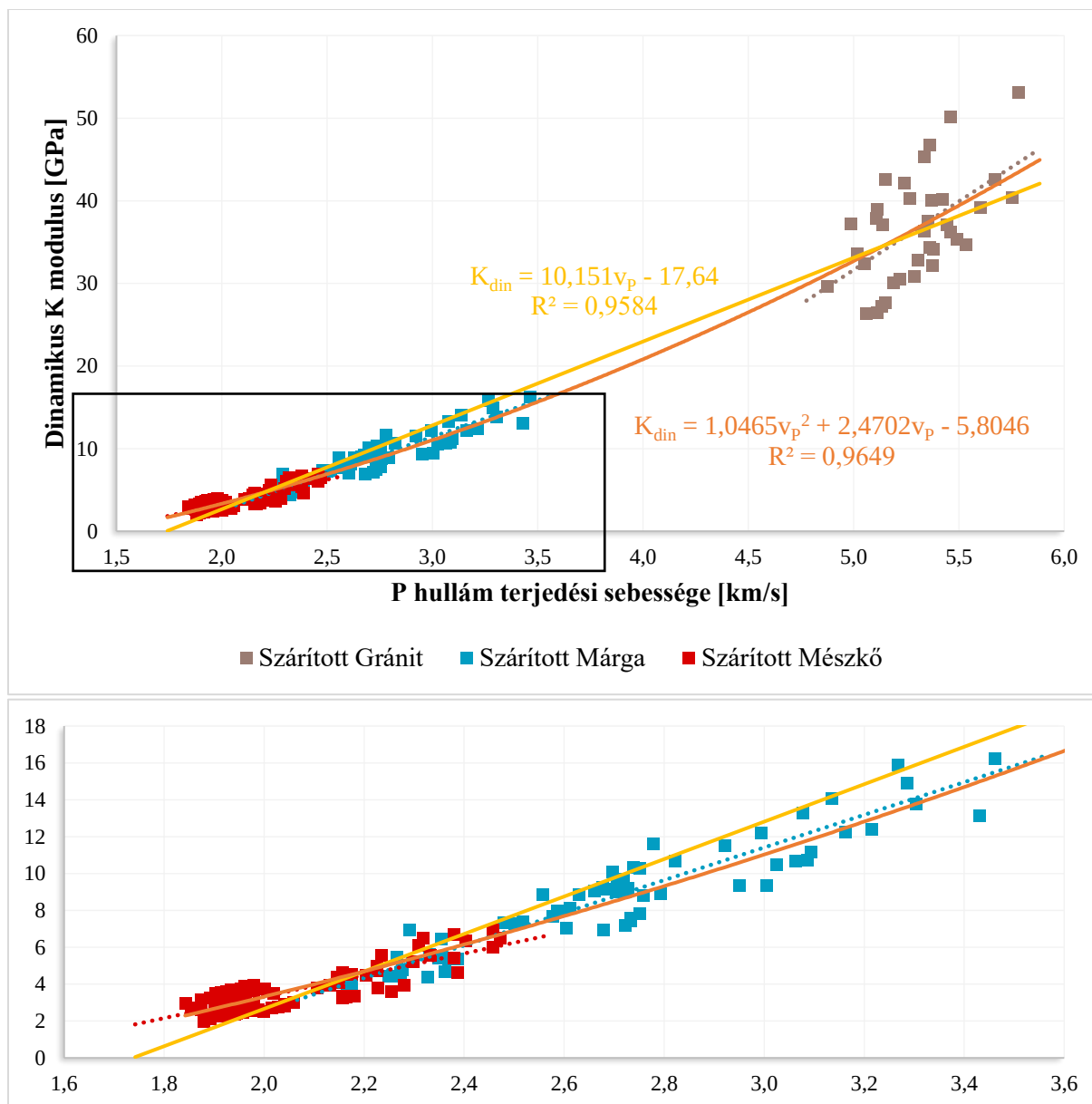


5.13 ábra. A dinamikus G modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata száritott állapotban fent, kinagyított részlet alább

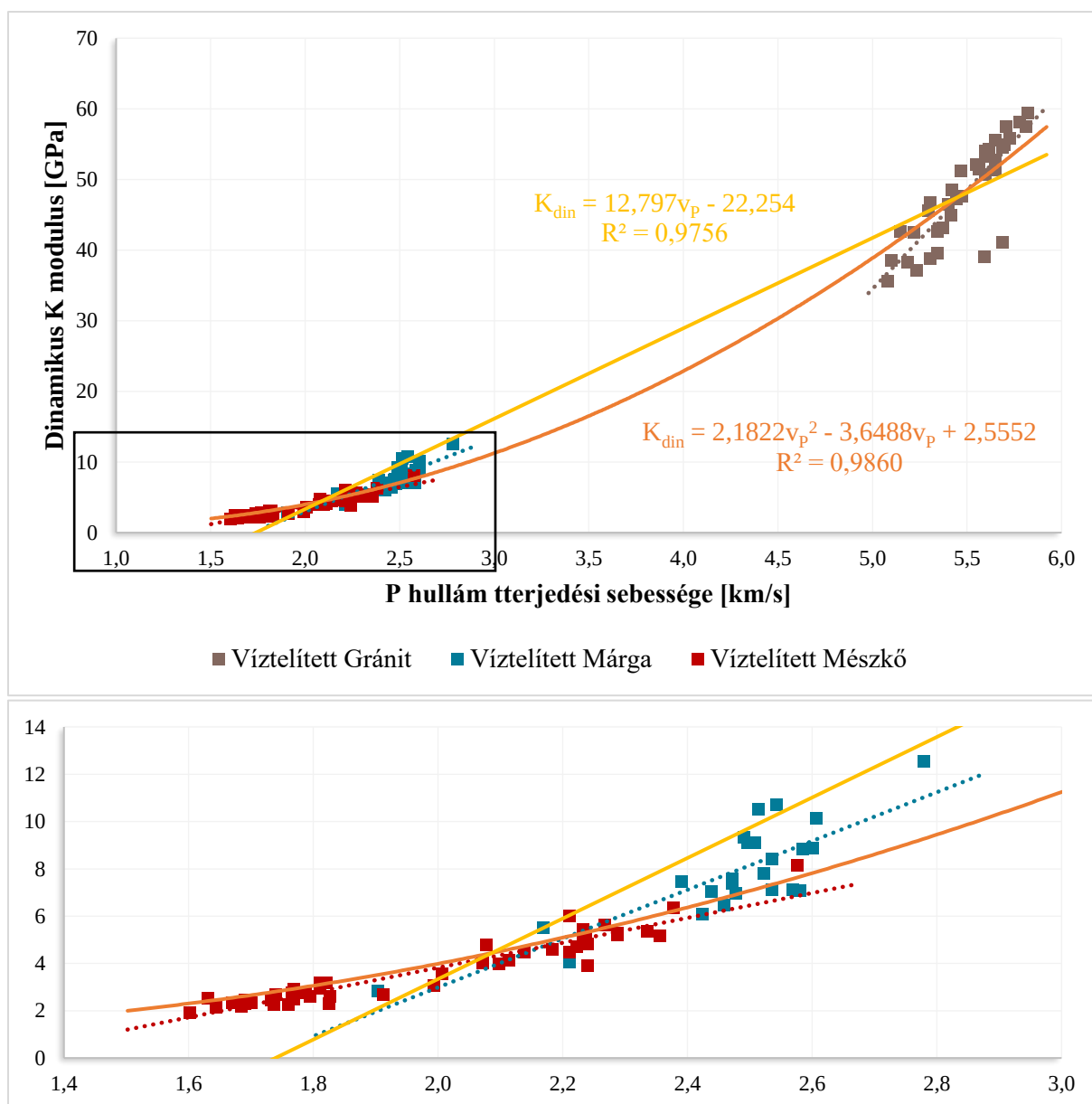


5.14 ábra. A dinamikus G modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

A 5.15 és 5.16 ábrákról szintén az állapítható meg, hogy a dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebessége közti korreláció erős és lineárisnak tekinthető szárított és víztelített állapotban egyaránt. Víztelített állapotban a közetek dinamikus K modulusa egyértelműen nagyobb, mint szárított állapotban

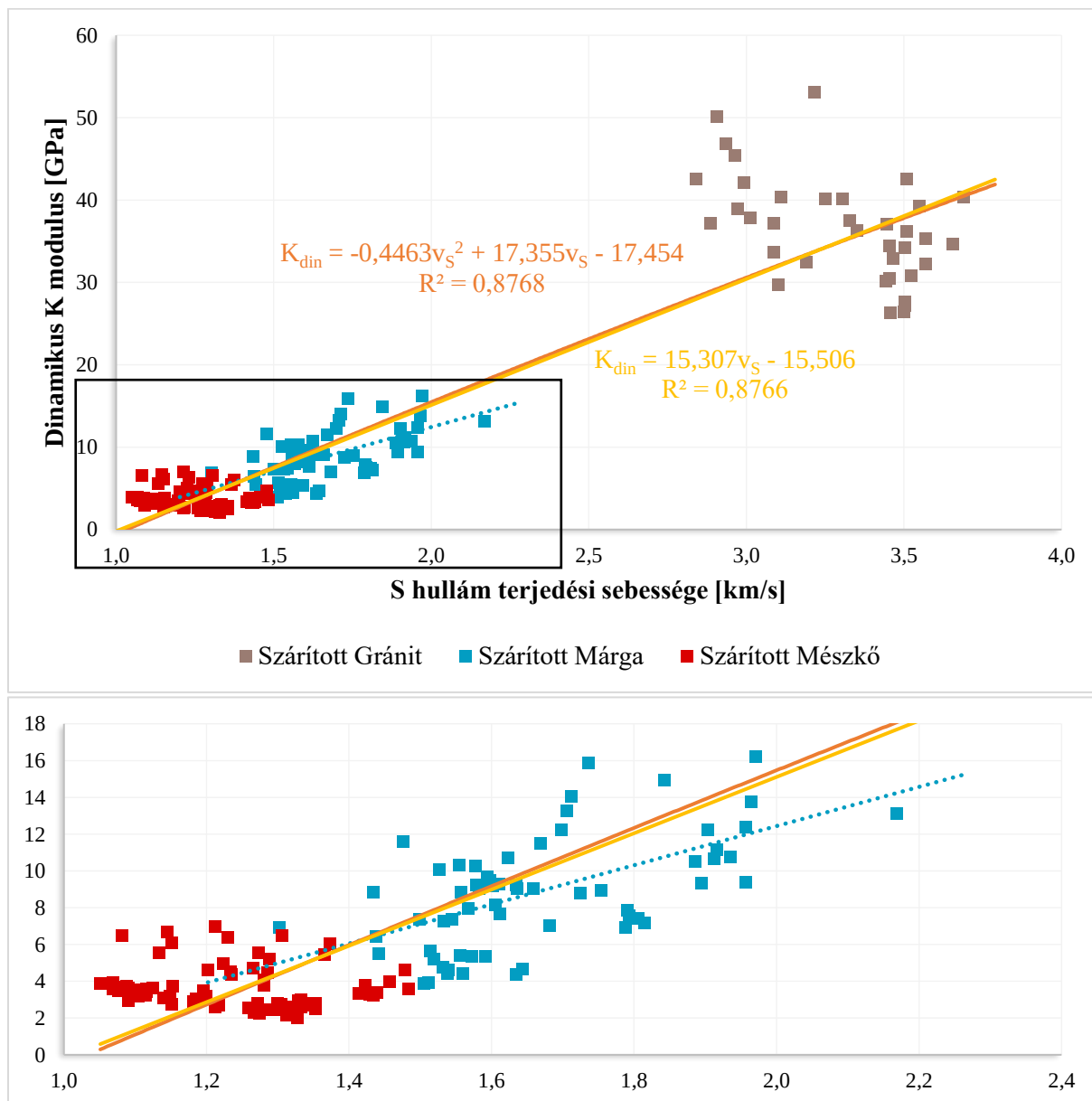


5.15 ábra. A dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább

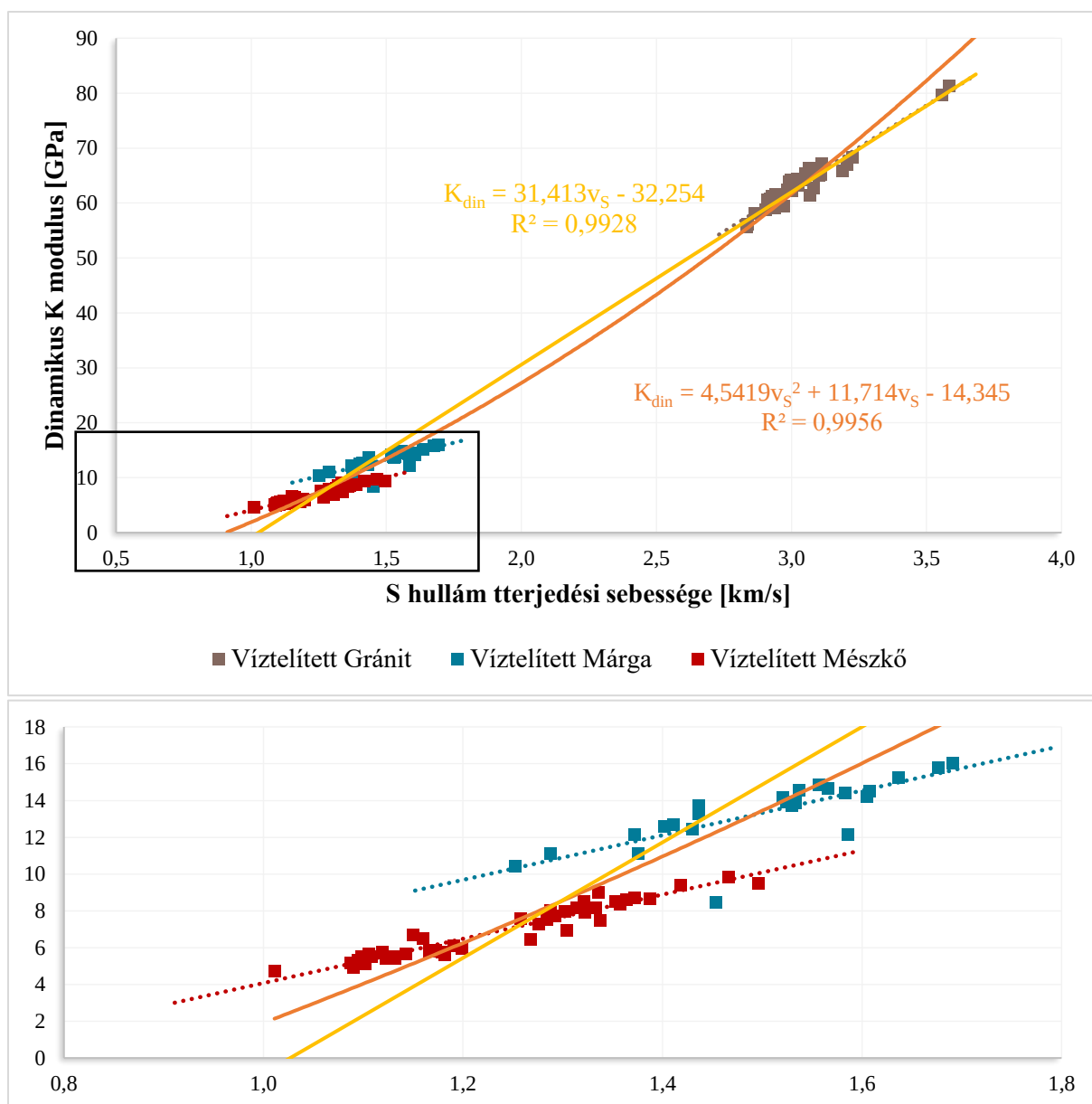


5.16 ábra. A dinamikus K modulus és a P hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

Az 5.17 ábra és 5.18 szintén erős, lineáris összefüggést mutat a dinamikus K modulus és az S hullám terjedési sebessége közt víztelített állapotban, szárított állapotban viszont az eddigi összegzett eredményekhez képest gyengébb korrelációt láthatunk, elsősorban a gránit mintákra vonatkozó adatok nagy szórása (6,37 GPa) miatt, de a márga és durva mészkő minták esetében sem tapasztaltam erős összefüggést.

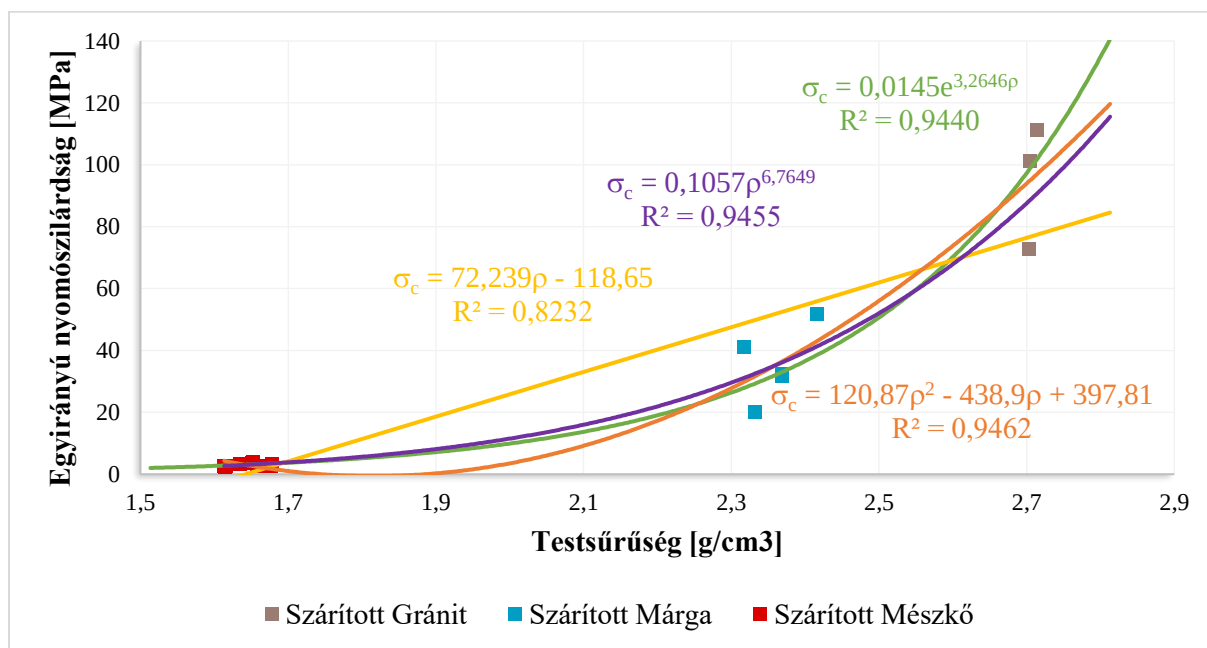


5.17 ábra. A dinamikus K modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata szárított állapotban fent, kinagyított részlet alább



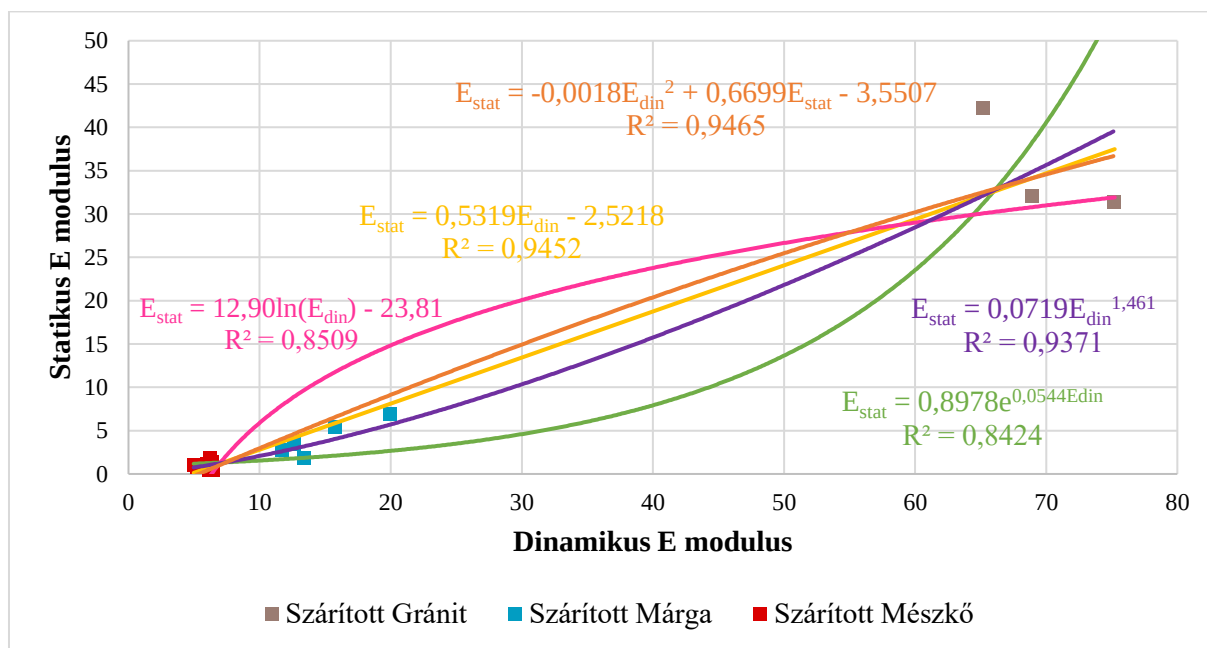
5.18 ábra. A dinamikus K modulus és az S hullám terjedési sebességének kapcsolata víztelített állapotban fent, kinagyított részlet alább

Az egyirányú nyomószilárdság és a testsűrűség közötti kapcsolatot (5.19 ábra) szárított állapotban közel azonos determinációs tényezőjű parabolikus és exponenciális összefüggések írják le.



5.19 ábra. Az egyirányú nyomószilárdság és a testsűrűség kapcsolata szárított állapotban

A statikus és dinamikus rugalmassági modulus kapcsolata a 5.20 és ábrán látható módon számos különböző összefüggéssel leírható szárított állapotban. A lineáris, parabolikus, exponenciális és logaritmikus korrelációk közel azonos determinációs tényezőt eredményeztek. Az ezen kutatás során mért adatokra leginkább a parabolikus összefüggés illik.



5.20 ábra. A statikus és dinamikus E modulus kapcsolata szárított állapotban

6. ÖSSZEVETÉS A NEMZETKÖZI IRODALOMMAL

Gránit esetében a P hullám terjedési sebességére, márga és mészkő esetén az S hullám terjedési sebességére kapott értékeim teljes mértékben megfelelnek Lama & Volarovics (1978) eredményeinek. Gránitban az S hullám terjedési sebességére némileg magasabb értékeket is kaptam, márgában és mészkőben viszont a P hullám terjedési sebességére jelentősen kisebb értékeket is mértem (6.1. táblázat)

6.1 táblázat. Hullámterjedési sebességek összehasonlítása Lama & Volarovics (1978) adataival

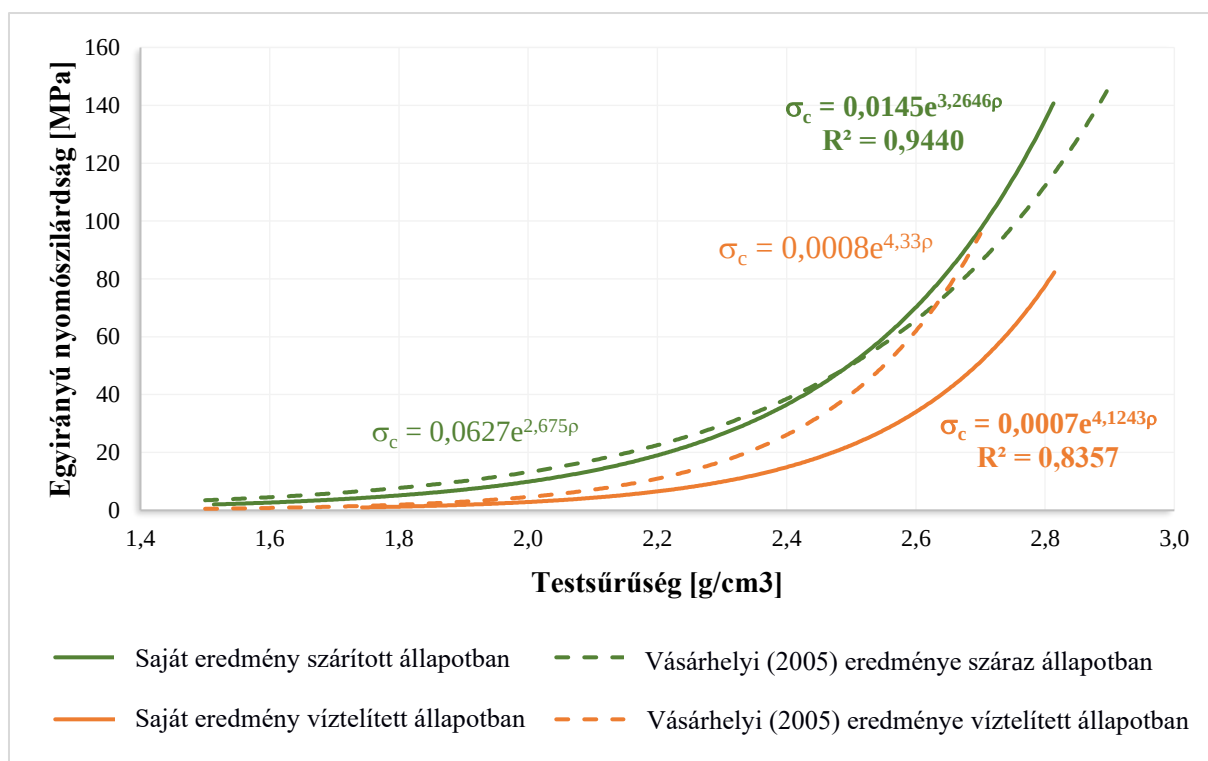
		P hullám terjedési sebessége [km/s]	S hullám terjedési sebessége [km/s]
Gránit	Lama & Volarovics (1978) alapján	3,96-5,4	2,55-3,32
	a saját eredményem	5,193-5,408	3,090-3,483
Márga	Lama & Volarovics (1978) alapján	2,6-7-0	1,3-4,0
	a saját eredményem	2,228-3,336	1,484-1,903
Mészkő	Lama & Volarovics (1978) alapján	2,3-8,0	1,0-5,5
	a saját eredményem	1,905-2,383	1,098-1,425

Besharatinezhad et al. (2022) a P és S hullámok terjedését vizsgálta a kőzetekben a szárított és víztelített testsűrűségek függvényében. Minden esetben erős lineáris kapcsolatot állapítottak meg, az én eredményeimből azonban hasonló összefüggés nem olvasható ki.

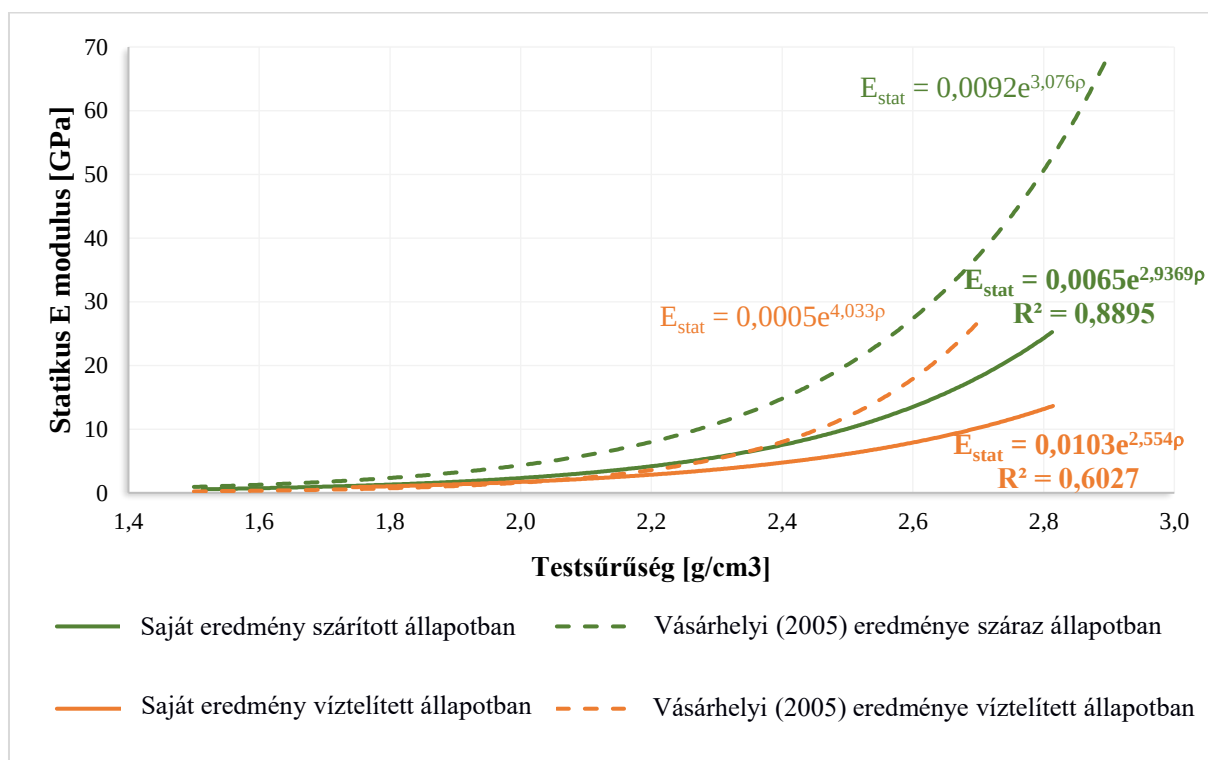
Vásárhelyi (2005) miocén kori durva mészkő vizsgálata alapján állapított meg exponenciális kapcsolatot a testsűrűség és az egyirányú nyomószilárdság ($\sigma_c = ae^{b\rho}$), illetve a testsűrűség és a rugalmassági modulus ($E = ae^{b\rho}$) között mind légszáraz, mind víztelített állapotban. Kizárólag a durva mészkő mintáimra nem illettek az összefüggések, így kiterjesztettem azokat nagyobb testsűrűségű kőzetekre is, majd összehasonlítottam a saját eredményeimmel (6.1 és 6.2 ábrák). Az együtthatókat a 6.2 táblázat tartalmazza. Megjegyzendő, hogy Vásárhelyi légszáraz és víztelített, én pedig szárított és víztelített állapotú kőzetmintákon végeztem a vizsgálatokat.

6.2 táblázat. Az egyirányú nyomószilárdság és a statikus rugalmassági modulus kapcsolata a testsűrűséggel Vásárhelyi (2005) és a saját eredményeim alapján

	Szerző	a		b	
		száraz	telített	száraz	telített
Egyirányú nyomószilárdság	Vásárhelyi (2005)	0,0627	0,0008	2,675	4,330
	Saját eredmények	0,0145	0,0007	3,2646	4,1243
Rugalmassági modulus	Vásárhelyi (2005)	0,0092	0,0005	3,076	4,033
	Saját eredmények	0,0065	0,0103	2,9369	2,554



6.1 ábra. Az egyirányú nyomószilárdság és a testsűrűség kapcsolata Vásárhelyi (2005) és a saját eredményeim alapján



6.2 ábra. A statikus E modulus és a testsűrűség kapcsolata Vásárhelyi (2005) és a saját eredményeim alapján

A saját összefüggéseim inkább az egyirányú nyomószilárdság és a testsűrűség kapcsolatára vonatkozóan hasonlítanak Vásárhelyi (2005) összefüggéseire.

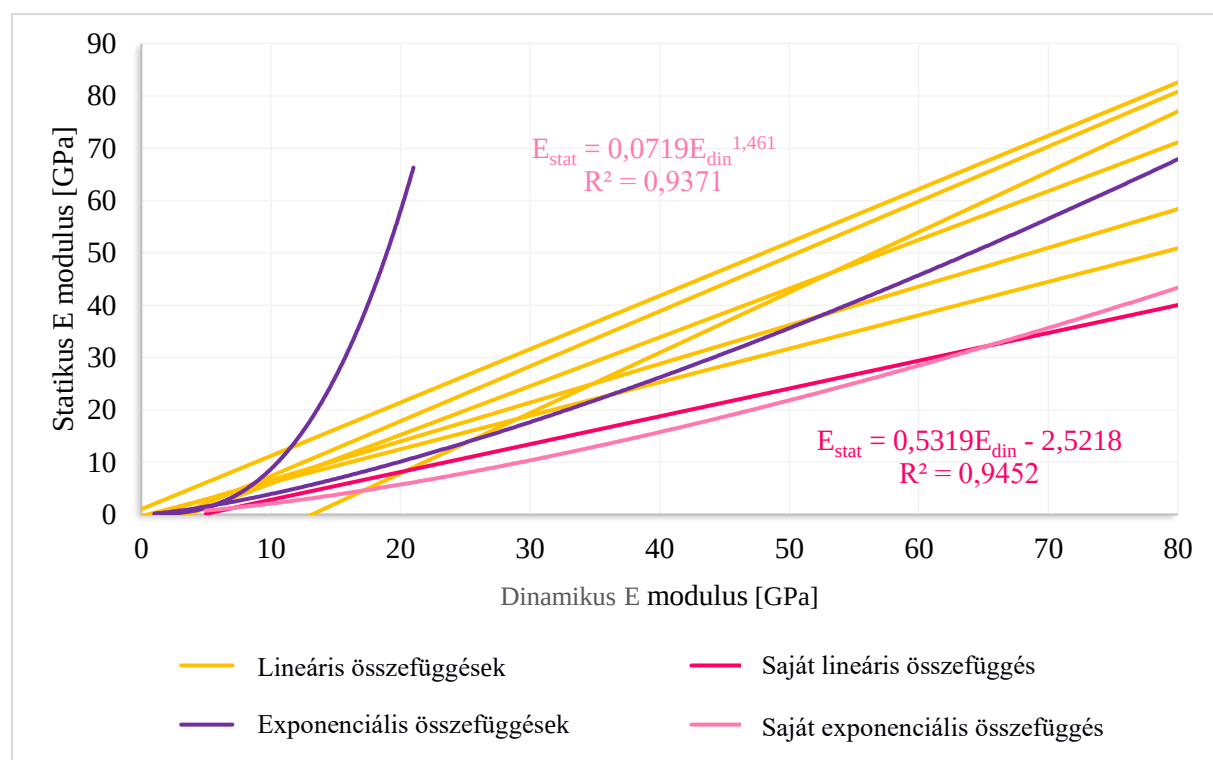
A statikus és dinamikus rugalmassági modulus összefüggéseire kapott egyenleteimet szintén összehasonlítottam a nemzetközi szakirodalommal. A lineáris összefüggéseket ($E_{stat} = aE_{din} - b$) az 6.3 táblázat, az exponenciális összefüggéseket ($E_{stat} = eE_{din}^f$) az 6.4 táblázat foglalja össze.

6.3 táblázat. Lineáris kapcsolat a statikus és dinamikus rugalmassági modulus közt kiegészítve a saját eredményemmel

a	b	Vizsgált közettípus	Referencia
0.64	0.32	Különböző közetek	Eissa és Kazi (1988)
0.74	0.82	Különböző közetek	Eissa and Kazi (1988)
1.05	3.16	Különböző közetek	Christaras et al. (1994)
1.153	15.2	Különböző közetek	Nur and Wang (1999)
0.932	3.42	Különböző közetek	Brotons et al. (2016)
0.8951	5.2654	Különböző közetek	Davarpanah, Ván, Vásárhelyi (2020)
0,5319	2,5218	Különböző közetek	Saját eredmény (2022)

6.4 táblázat. Exponenciális kapcsolat a statikus és dinamikus rugalmassági modulus közt kiegészítve a saját eredményemmel

e	f	Vizsgált közettípus	Referencia
0.0158	2.74	Különböző közetek	Ohen (2003)
0.1649	1.3739	Különböző közetek	Davarpanah, Ván, Vásárhelyi (2020)
0,0719	1,461	Különböző közetek	Saját eredmény (2022)



6.3 ábra. A statikus és dinamikus E modulus összefüggései a nemzetközi szakirodalom és a saját eredményem alapján

7. ÖSSZEGZÉS

A jelen kutatás során gránit, budai márga és durva mészkő próbatesteket vizsgáltam laboratóriumi körülmények között. Testsűrűséget, P és S hullámok terjedési sebességét mértem, amelyből dinamikus Poisson-tényezőt, rugalmassági, nyírási és kompressziós modulust számítottam. Az egyirányú nyomószilárdság vizsgálatból meghatároztam a statikus rugalmassági modulust és a nyomószilárdságot. Összesen több mint 2020 mérési adatot dolgoztam fel. A mérési eredményeim alapján összefüggéseket állapítottam meg a különböző közetfizikai paraméterek között, száraz és vízzel telített állapotokra vonatkozóan. Ezeket összevetettem a hazai és nemzetközi szakirodalmi adatokkal.

A mérések alapján igazolható, hogy általában lineárisnak tekinthető összefüggés áll fenn a P és S hullámok terjedési sebessége, illetve a hullámterjedési sebességek és a dinamikus rugalmassági, nyírási és kompressziós modulusok közt mind szárított, mind víztelített állapotban. Ezek közül kiemelkedik az S hullám és a Dinamikus G modulus kapcsolata, amely minden vizsgált közettípus esetén 0,991 feletti determinációs együtthatójú lineáris korrelációt mutatott szintén szárított és víztelített állapotban egyaránt. A hullámterjedési sebességek növekedésével a deformációs modulusok, illetve a dinamikus Poisson-tényező értéke is növekszik.

A testsűrűség és az egyirányú nyomószilárdság eredményei (azaz a statikus rugalmassági modulus és az egyirányú nyomószilárdság) közötti kapcsolatot leginkább egy exponenciális összefüggés írja le Vásárhelyi (2005) eredményeivel összhangban.

A statikus és dinamikus E modulus között egyértelműen felfedezhető az összefüggés, azonban ahogyan a nemzetközi szakirodalomban is látható, egyáltalán nem egyértelmű, hogy a kapcsolat milyen típusú egyenlettel írható le. A lineáris, parabolikus és exponenciális korreláció is igen erős közelítésnek bizonyult szárított és víztelített állapotban, de logaritmikus kapcsolat is megállapítható volt.

8. IRODALOM LISTA

- Aliabdo A. A. E., Elmoaty A. E. M. A. (2012): Reliability of using nondestructive tests to estimate compressive strength of building stones and bricks, *Alexandria Engng J*, **51**: 193-203.
- Besharatinezhad, A.; Khodabandeh, M.A.; Rozgonyi-Boissinot N.; Török Á. (2022): The Effect of Water Saturation on the Ultrasonic Pulse Velocities of Different Stones. *Periodica Polytechn. Ser. Civil Engng.* **66**(2): 532–540,
- Brotons V., Tomás R., Ivorra S., Grediage A., Martinez-Martinez J., Benavente D., Gomez-Heras M. (2016): Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Mater Struct* **49**(8): 3021–3037.
- Cerrillo C., Jiménez A., Rufo M., Paniagua J., Pachón F.T. (2014): New contributions to granite characterization by ultrasonic testing. *Ultrasonics*, **54**: 156-167.
- Christaras B., Auger F., Mosse E. (1994) Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Mater Struct* **27**: 222–228.
- Davarpanah M., Ván P., Vásárhelyi B. (2020): Investigation of the relationship between dynamic and static deformation moduli of rocks. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour* **6**, 29
- Eissa EA, Kazi A (1988) Relation between static and dynamic Young's Moduli of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci* **25**: 479–482.
- Lama R.D.; Vutukuri V.S. (1978): Mechanical properties of rocks, *Trnas. Tech.* 406.
- Gyalog L (ed) 2015. Magyarázó Magyarország fedett földtani térképéhez, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 189p.
- Gyalog et al. 2005. Magyarország földtani térképe, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest
- Martinez-Martinez J., Benavente D., Garcia-del-Cura M.A. (2012) Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bull Eng Geol Environ* **71**(2): 263–268.
- Nur A., Wang Z. (1999) Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks: recent developments. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, No. 19
- Ohen HA (2003) Calibrated wireline mechanical rock properties method for predicting and preventing wellbore collapse and sanding. SPE-82236-MS
- Soete J., Kleipool L.M, Claes H., Claes S., Hamaekers H., Kele S., Özkul M., Foubert A., Reijmer J.J.G., Swennen R. 2015. Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types. *Marine and Petroleum Geology*, **59**, 320-335.
- Török Á. (2007): Geológia mérnököknek, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 384 p.
- Vásárhelyi B. (2005): Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mech. Rock Engng.* **38**(1): 69-76.

Vásárhelyi B. (2016): Az alkalmazott közetmechanika alapjai, 47, 54, 65.

Wong L.N.Y.; Maruvanchery V.; Liu G. (2016): Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotech.* **11**: 713-737.