

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET

**MIRŐL MESÉLNEK A ZÁRVÁNYOK? - AVAGY A HAWAI'I-I KŪLAUEA IKI
KRÁTER ANYAGÁNAK ÁSVÁNYTANI VIZSGÁLATA**

Készítette:
VÁRADY VIOLA
GEOINFORMATIKA MSc

Témavezetők:
DR. KOVÁCS JÁNOS
egyetemi tanár
MYOVELA JUSTINE LEONARD
PhD hallgató



Pécs, 2025.

Tartalomjegyzék

I.	BEVEZETÉS	3
I.1.	CÉLKITŰZÉS	4
II.	KUTATÁSTÖRTÉNET	5
II.1.	HAWAI'I GEOLÓGIÁJA ÉS ÉGHAJLATA	5
II.2.	MÚLTBÉLI KUTATÁSOK	7
II.3.	JELLENLEGI KUTATÁSOK	8
III.	ANYAG ÉS MÓDSZEREK	10
III.1.	ANYAG	10
III.2.	MÓDSZEREK	11
IV.	EREDMÉNYEK.....	13
IV.1.	1-ES MINTA	13
IV.1.1.	<i>Kőzetmikroszkópia</i>	13
IV.1.2.	<i>XRD</i>	13
IV.1.3.	<i>SEM</i>	14
IV.2.	2-ES MINTA	15
IV.2.1.	<i>Kőzetmikroszkópia</i>	15
IV.2.2.	<i>XRD</i>	16
IV.2.3.	<i>SEM</i>	17
IV.3.	3-AS MINTA.....	18
IV.3.1.	<i>Kőzetmikroszkópia</i>	18
IV.3.2.	<i>XRD</i>	18
IV.3.3.	<i>SEM</i>	19
IV.4.	4-ES MINTA	20
IV.4.1.	<i>Kőzetmikroszkópia</i>	20
IV.4.2.	<i>XRD</i>	21
IV.4.3.	<i>SEM</i>	22
IV.4.4.	<i>Raman</i>	22
IV.5.	5-ÖS MINTA.....	23
IV.5.1.	<i>Kőzetmikroszkópia</i>	23
IV.5.2.	<i>XRD</i>	25
IV.5.3.	<i>SEM</i>	25
V.	DISZKUSSZIÓ.....	26
VI.	ÖSSZEFOGLALÁS	35
VII.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	37
VIII.	IRODALOMJEGYZÉK	38

Absztrakt

Hawai'i-szigetek geológiai értelemben is különlegesek, mivel az azokat kialakító hot-spot vulkanizmus mai napig aktív. A szigeteket felépítő kőzetek, melyek főleg bazaltból állnak, – de emellett andezit is megtalálható – egy szigeten belül különböző összetétellel rendelkezhetnek, annak függvényében, milyen összetételű a köpenyanyag melyből származik a magma, mennyi ideje és hogyan tört ki a vulkán, valamint mekkora mértékű az erodáltsága. A tanulmány bemutatja a Nagy Szigetről és O'ahuról származó saját minták által, milyen különbségek lehetnek egyes kőzetek közt, melyeket ugyanaz a köpenycsóva hozott létre. Emellett fő célja, hogy a Nagy Szigeten található Kīlauea Iki kráter anyagának petrográfiai vizsgálatával mit tudhatunk meg a köpenyanyagról. A gyűjtött minták közt tufa, piroklasztit, obszidián, salak, valamint andezinben gazdag andezit is található. A kutatás során ezek vékonycsiszolatait vizsgáltam polarizációs mikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal, valamint röntgen pordiffrakciót alkalmaztam, hogy megállapítsam az ásványtani összetételét, ezenkívül vastagcsiszolatok készültek, amelyeket Raman-spektroszkópiával elemeztem. A bazaltos kőzetekben eltérő mennyiségű piroxén, kőzetüveg és plagioklász figyelhető meg. Mindezek mellett mellékes elegyrészként található benne apatit, gránát, ilmenit, szmektit és zeolit. A piroklasztit mintában jellemző a szimplektites szövet az olivinben az ásvány körül, ezen kívül a salakban a zárvány piroxéneken belül is. A kitörő láva összetételét többek közt a köpenyben lezajló elegyedések vagy azok hiánya alakítja ki, ugyanakkor az ebből megszilárduló kőzet alkotóelemeinek kristályosodása már a felszínre kerülés előtt elkezdődik, így zárványok alakulhatnak ki. Ezek összetétele „mesél” a magma összetételéről. Ezen salakban számos eltérő nagyságú zárvány mutatkozott, bennük nitrogénnel, vízzel és ilmenittel.

Kulcsszavak: Hawai'i, vulkán, bazalt, ásványtan, zárvány, hot-spot, Raman, geológia

I. Bevezetés

Az USA legelkülönültebb állama, Hawai'i nem csak turisztikailag figyelemreméltó terület, hanem földtani értelemben is jellegzetes, hiszen a Csendes-óceán közepén helyezkedik el több ezer kilométerre a többi kontinenstől. Egyik legjobb példája a forrópont-vulkanizmusnak a Csendes-óceáni-lemezen. A szigeteket létrehozó köpenyből származó magma karakterisztikussá teszi a bazaltot ásványtani szempontból, zárványokat hoz létre és érdekes módon andezitet is kialakít. A motivációm, hogy tanulmányozzam és megértsem a Nagy Sziget és O'ahu felépítését, a magmatikus hátteret a Kīlauea Iki kráter anyagának mélyrehatóbb vizsgálatával, valamint, hogy készítsek egy magyar nyelvű tanulmányt minderről. Ezen célok eléréséhez lehetőségem adódott elutazni Hawai'ira 2022 decemberében, hogy kézipéldányokat gyűjthessek a szigetek különböző pontjairól. Először a Nagy Szigetet jártam körbe, ahol a különböző vulkáni pajzsokról gyűjtöttem mintákat (Mauna Kea, Mauna Loa, Kīlauea, Hualālai), vizsgáltam a földtani képződményeket, azok mállását, erodáltságát, és a hűlési formákat. A gyűjtést segítette, hogy nem a Nagy Sziget a turisztikai központja Hawai'inak, így a legtöbb hely ingyenesen látogatható, mindazonáltal figyelnek arra, hogy a kiemelt környezetvédelmi területek (pl.: Papakolea strand, mely a zöld homokjáról híres) nehezen megközelíthetőek legyenek. Céljaim közt szerepelt az is, hogy a 2022 november 27-én kitört Mauna Loa friss lávafolyásaiból mintákat gyűjtssek, de veszélyessége miatt lezártak minden oda vezető utat. Ezt követően O'ahura utaztam, itt a minták gyűjtését nehezítette a sziget beépítettsége, valamint számos helyszín látogatását a helyi törvények tiltják, azok veszélyessége, vagy természeti értéke miatt. Összesen 15 darab kőzetmintát gyűjtöttem, amelyek közt bazalt, bazalt salak, obszidián, tufa, agyag, mállott bazalt és andezit is található. Minden mintáról feljegyeztem, hogy milyen környezetben, pontosan mely koordinátákon találtam, valamint milyen tengerszint feletti magasságon (Várady, 2023). Majd néhány darabból vékonycsiszolat készült, melyeket utána nagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkóppal (HR-SEM), polarizációs kőzettani mikroszkóppal és Raman mikroszkóppal is megvizsgáltam, a maradék anyagon röntgen pordiffrakciót (XRD) végeztem. Ezen négy vizsgálat elvégzésével értelmeztem a szövetét és a kémiai összetételét, valamint vizsgáltam meg a zárványokat, hogy a magmás háttér milyenségére következtetni tudjak.

I.1. Célkitűzés

A tanulmány célja bemutatni a Hawai'i szigetek, specifikusabban a Hawaii-sziget „Nagy Sziget” és O’ahu példáján keresztül, hogy egyes területein milyen különbségek fordulnak elő a más vulkánipajzsokról származó kőzetek ásványtani összetételében és ez mivel magyarázható. A hot-spot vulkanizmus által létrehozott pajzsvulkánok, milyen egyediségeket mutatnak, kapcsolatba hozva a kitörések milyenségével, a vulkánok korával, és az ebből adódó pusztulásukkal. Továbbá a fő cél a Kīlauea Iki kráterből származó mintában található zárványok milyen magmatikus háttérre utalnak. A kutatás kitér az alkalmazott módszerekre, a szigetek általános geológiai felépítésre és a jövőben kialakuló vulkánok helyzetére. Geológiai szempontból érdemes vizsgálni a területet, hiszen mai napig aktív vulkanizmus folyik a Nagy Sziget több területén, mely folyamatosan növeli annak területét, újabb kőzettesteket létrehozva, ezáltal újabb információkhoz juthatunk a köpenyanyag összetételéről. A kutatás lehetőséget nyújt arra, hogy megismerjük a jövőben potenciálisan kialakuló kőzeteket, helyüket és ezek esetleges hasznosságukat.

II. Kutatástörténet

II.1. Hawai'i geológiája és éghajlata

A Hawai'i szigetív, melyet 8 sziget (Ni'ihau, Kaua'i, O'ahu, Moloka'i, Lāna'i, Maui, Kaho'olawe, Hawai'i avagy a Nagy Sziget) alkot, hot-spot vulkanizmus által jött létre (1. ábra). A szigetek a Csendes-óceáni-lemez közepén sorakoznak, legidősebb szigete Kauai, ami a legészaknyugatibb, legfiatalabb a Nagy Sziget, mely legdélkeletibb, és most is aktív. Kialakulásuk oka, hogy a Csendes-óceáni-lemez északnyugati irányba mozog, közel 8,5 centimétert évente, míg a hot-spot ugyanazon a ponton van, és „nyomja” át a magmát a litoszférán, folyamatosan építve a szigeteket. A Csendes-óceáni-lemez, melyen a szigetek fekszenek 90 millió éves, de a legidősebb sziget csupán 5 millió éves. Az Északnyugati-csendes-óceáni-hátság is ezen hot-spot vulkanizmus által alakult ki a késő-krétában, viszont az erózió miatt, ezek a hajdani szigetek víz alá kerültek. A Nagy Szigeten a legaktívabb vulkán a Kīlauea, valamint megindult egy új vulkán (Kama'ehuakanaloa-seamount avagy Kama'ehuakanaloa-hegy) keletkezése (Granshaw et al., 2014). A seamount kifejezés tenger alatti vulkáni hegy, későbbiekben tengeri hegyként hivatkozok rá (Várady, 2023).



1. ábra: Hawai'i szigetek, forrás: <https://www.worldatlas.com/maps/united-states/hawaii>

A Hawai'i szigetek több, mint 50 éves vizsgálata során, megfigyelhető egy „életciklus”, ami épülésből, majd pusztulásból áll. Ez általában 9 szakaszra osztható, azonban nem mindig szétválaszthatóak egyes szakaszok, vagy jelennek meg (Granshaw et al., 2014).

1. Mélytengeri szakasz, amikor a magma átnyomul a tengeraljzaton, és megszilárdul. A magma alkáli bazalttá válik, közel 47% SiO_2 tartalommal, és viszonylag magas

- nátrium (Na) és kálium (K) tartalommal, pl.: Kama'ehuakanaloa-hegy (Granshaw et al., 2014).
2. Sekélytengeri szakaszban további kitörések során az aljzatra nehezedő vízoszlop nyomása a magmában oldott állapotban tartja a gázokat (oxigén, szén-dioxid, hidrogén-szulfid), viszont ahogy a felszín közelébe ér és a nyomás csökken, így a gázok hólyagokat alkotnak a magmában. Ha a tengerszinthez elég közel ér, kőzet törmelék vagy gőzök törnek a felszínre. Jelenleg ilyen nem figyelhető meg a szigeteken (Granshaw et al., 2014).
 3. Szubareális pajzs építés közben a hot-spot közepe felett való mozgás miatt, a magma kemizmusa megváltozik. Kevesebb alkáli elem, illetve több szilikát található benne, tholeiites bazaltot hoz létre, amely a második legjelentősebb láva Hawai'ion. A sekély magma rezervoár gyorsan kiürül a sok egymást követő kitörés okán. Emiatt a vulkáni kúp csúcsán a kráter beszakad, jellegzetes nagy, meredek falú kalderát létrehozva, pl.: Kīlauea vulkán, mely 2018-ban omlott be (Granshaw et al., 2014).
 4. Kaldera utáni stádiumban feltöltődik a további kitörések során tholeiites lávával. A hot-spot közepétől távolodva ismét alkáli összetételű a láva (számos fenokristályt tartalmazva), mely kissé hevesebben tör ki. Az így keletkezett láva szökőkutak, később salakkúpokat alkotnak pl.: Mauna Kea, Pu'u Wa'awa'a salakkúp (Granshaw et al., 2014).
 5. Eróziós fázis abban a pillanatban elkezdődik, ahogy a vulkán a tengerszint fölé emelkedik, de akkor szembe tűnőbb, amikor az aktivitás alábbhagy. Az erózió és mállás során üledék, majd később talajok képződnek, patakok keletkeznek, utóbbi a bevágódásával jelentősen formálja a felszínt, pl.: Kohala, Haleakalā. (Granshaw et al., 2014)
 6. A zátonyépítés a trópusi környezetnek köszönhetően alakul ki, a szél védett oldalán a szigeteknek, ahol kis folyó torkollik az óceánba, pl.: Waikiki O'ahu (Granshaw et al., 2014).
 7. Az rejuvenilis erózió utáni kitörések általában újabb salakkúpokat alkotnak, emellett egyéb vulkanikus hamut halmoznak fel. Egy hipotézis szerint a késői aktivitás oka az lehet, hogy a jelentős tömeg veszteségtől, melyet az erózió okozott, csökkenti a nyomást a magmán, ami kitörésre készíti, pl.: Diamond Head (Granshaw et al., 2014).
 8. Atoll szakaszban a vulkán eltávolodik a hot-spottól, a litoszféra azon része, melyen a sziget nyugszik kihül, és sűrűbbé válik. Ennek következtében a nyomás

kiegyenlítés érdekében elkezd lassan süllyedni, felszíne már erősen mállott, erodált. Az idő előre haladtával a tengerszint alá süllyed, és csupán egy kör alakú korallzátony marad, ami atollt alkot, pl.: Kure Atoll (Granshaw et al., 2014).

9. Guyot-k alakulnak a további süllyedés miatt, a merülés az eddigi korallzátonyokat is olyan mélységbe húzza, hogy „megfulladnak”, és mindössze lapos tetejű tenger alatti hegyek maradnak, pl.: Északnyugati-csendesóceáni-hátság. A lemez szubdukálódása miatt évmilliók múlva a szigetek visszakerülnek a köpenybe (Granshaw et al., 2014).

A szigetek éghajlata alapvetően trópusi, keleti passzátszél az uralkodó. Két évszak különül el: az esős évszak, mely októbertől áprilisig tart és a száraz évszak májustól októberig. Az átlaghőmérséklet tengerszinten 23-27 °C, a legforróbb évszak az augusztus, a leghidegebb január. A magasabban fekvő területek (Mauna Loa, Mauna Kea) gyakran a téli hónapokban hó esik. Elmondható, hogy általánosságban a szigetek keleti oldala esősebb, míg a nyugati oldal száraz, naposabb és felhőzettel kevésbé borított. Maui keleti részén található a világ egyik legesősebb helye a Big Bog, ahol évente kb. 10300 mm csapadék is hullik. Ritkán sújtja a szigeteket hurrikán, csupán négyről tudunk az elmúlt 63 évben. Ennél gyakoribbak a trópusi viharok, minden 1-2 évben előfordulnak.

II.2. Múltbéli kutatások

Az első geológiai feljegyzést J. D. Dana írta meg Hawai’iról 1890-ben, az 1840-es években tett expedíciója során (Dana, 1891). Megállapította, hogy északnyugat felé idősödnek a szigetek, valamint a relatív korukat, viszont az abszolút kormeghatározással további 120 évet kellett várni, amíg elérhetővé nem vált a radioaktív kormeghatározás. Továbbá megfigyelte milyen hatással vannak a hullámok, és patakok a lávára, illetve hogyan erodálja azokból keletkezett kőzeteket (Decker & Decker, 1988).

Dana célja utazásával a Hawai’i szigetek összehasonlítása és szembe állítása a Vezúv megfelelő vonásaival, valamint tulajdonságaival. Egy általános értekezést írt a vulkánokról, és aktivitásukról, amely egyaránt megfelelő geológusok, és turisták számára. Tanulmányozta a bazalt láva mobilitását, áramlási szögeit a vízszintestől a függőlegesig, a láva tavakból távozó gőzöket és a hamu kibocsátás hiányát a kráterekben. Valamint a krátert, hogy kitöréstől az azt követőig milyen változásokon megy keresztül; a kitörést követő beszakadástól a lesüllyedt kráter lassú emelkedésig, mely kihasználja a beszakadás által keletkezett töréseket. Megfigyelte a gödöralakú kráterekben (karakterisztikusan a valódi bazalt vulkánok jellemzői) a láva-tavakat (szökőkút-szerűek, vagy fortyogóak), melyekben vékony, úszó szilárd szigetek az olvadás és hűlés oszcillációja következtében alakulhatnak

ki. A szolfatárás jelenségekre is kitért, ami során újrakristályosodhat a bazalt, alagutakat létrehozva, faluk üregeiben átlátszó augittel, labradorittal, az oktaéderes magnetit mellett. Bizonyította, hogy a legnagyobb kitörések nem járnak földrengésekkel, és a csapadékosabb évszakokban gyakoribbak (Dana, 1891) (Várady, 2023).

Később 1977-ben megjelent egy kutatás, mely a Kīlaueán lévő Makaopuhi lávató tholeiites bazaltjának hűlését és kristályosodását tanulmányozza. Három történelmi tó volt elérhető és elég hosszú életű ahhoz, hogy tanulmányozásra kerüljön; ezek 1959-ben (Kilauea Iki), 1963-ban (Alae) és 1965-ben (Makao puhi) alakultak ki. Ezek közül csak a Kilauea Iki lávató maradt fenn, a többi az 1969-ben és később kitört lávafolyamok fedték el (Wright & Okamura, 1977). A kutatás alatt – mely 1965 március és 1969 február közt zajlott - fúrásokkal vizsgálták a Makaopuhi lávató szilárd, félig olvadt és olvadt anyagát. Minden minta változó mennyiségű olivinból állt, és tartalmazott spinellt, klinopiroxént, plagioklász, Fe-Ti oxidokat, apatitot és üveget. A legtöbb mintában olivin (gyakori) és augit (ritka) fenokristályok vannak jelen (Wright & Okamura, 1977). A legfontosabb következtetések, amiket levontak az alábbiak:

- Az olvadék (lávató) kristályosodása csökkenő hőmérséklet (esetenként csökkenő nyomás) mellett történik.
- Különböző ásványfázisok jelennek meg e folyamat során (először olivin, aztán klinopiroxén, plagioklász, végül FeTi-oxidok), az ásványfázisok száma növekszik a hőmérséklet csökkenésével.
- Az ásványfázisok kristályosodása meghatározott sorrendben történik, a kristályosodás során azonban átfedés is megfigyelhető.
- Az elegykristályok (olivin, klinopiroxén, plagioklász) összetétele folyamatosan változik a hőmérséklet csökkenésével.
- A maradékolvadék kémiai összetétele szintén változik a kristályosodás előrehaladtával.
- A kristályosodó ásványfázisok, azok sorrendje és kémiai összetétele függ a hőmérséklettől és az olvadék összetételétől.
- Az illók és azok nyomása szintén befolyásolhatja a kristályosodás menetét (Harangi et al., 2013).

II.3. Jelenlegi kutatások

Napjainkban a kutatások specifikusabbak, főleg az szigeteken lévő egyetemek geológusai végzik. A legfrissebb tanulmányok egyike szeretné bemutatni ezen aktív vulkánok ciklikusságát, a köpenyforrás változását, illetve a jövőbeli viselkedésüket azon keresztül,

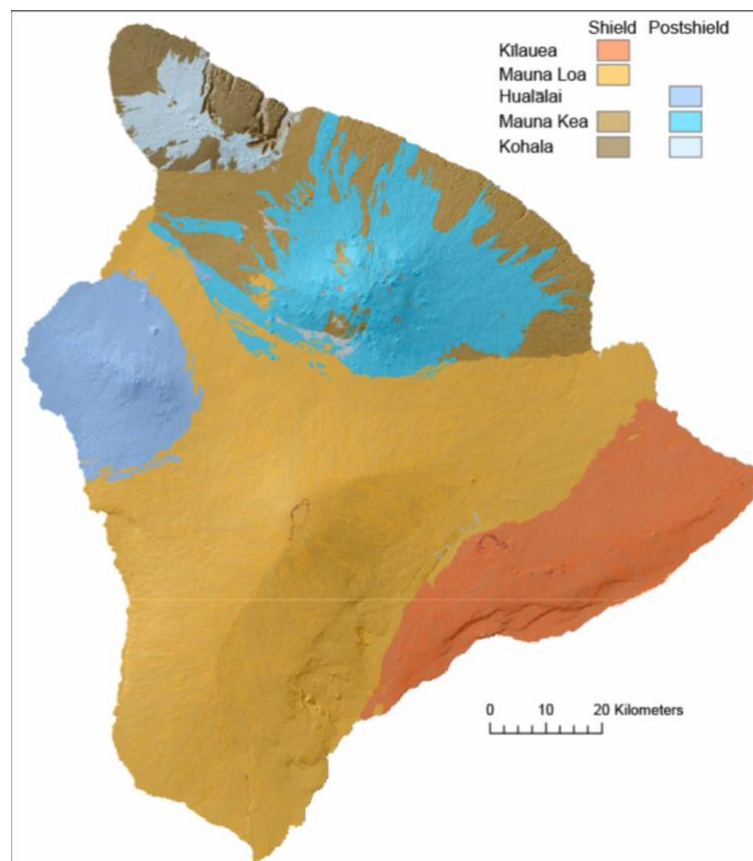
hogy megértjük a köpenyanyagban az intenzív paraméterek (hőmérséklet, nyomás, összetétel, olvadási fok) módosulását. Ehhez az olivinben található fő-, és nyomelemeket tanulmányozták, melyek a köpeny-litológiájára és a köpenyre idővel ható olvadási körülményeire enged következtetni. Az elsődleges olvadás időbeli változását vizsgálták a Kīlaueán, az utóbbi 500 évben bekövetkezett aktivitás tekintetében, mely explozív periódusa (~1500-1820) Keanakāko‘i Tephrán volt megfigyelhető, az utóbbi évtizedben zajló effuzív szakasza Lower East Rift Zone-on (LERZ-2018), Pu‘u‘ō‘ō kúpon (2015-2018), és Halema‘uma‘un (2020). Az olivin, szkandium (Sc) koncentrációjával meghatározható a köpenyforrás változás jellemzése 1500-2018 között, ez által megállapították, hogy a Pu‘u‘ō‘ō-t tápláló magma nem lépett jelentős kapcsolatba a LERZ-en kitört magmával. Az olivin nyomelemeinek elemzése Kīlaueán fontos támpontokat adhat a köpenyben fellépő apró változásokról, amelyek a vulkáni viselkedés változásait jelezhetik (Mourey et al., 2022) (Várady, 2023).

Számos geoinformatikai kutatás folyik, mely a szigetekhez kapcsolható. Például kisebb drónok (sUAS) segítségével légi megfigyeléseket tesznek és képeket gyűjtenek, térképeznek és monitoroznak, veszélyhelyzetet mérnek fel vagy akár még minta gyűjtésre is alkalmasak lehetnek (bár ez még némi fejlesztést igényel), emellett a kibocsájtott gázok mérésére is alkalmas lehet (Jordan, 2019).

III. Anyag és módszerek

III.1. Anyag

A szigeteken való utazás során, szem előtt tartottam látszólag különböző habitusú kőzetek gyűjtését, különböző pajzsokról. Összesen 15 mintát gyűjtöttem, ebből 13 darabot a Nagy Szigeten - melyből egy porózussága miatt széttört, - ezek főleg mállott bazalt és salak (üregekkel teli bazalt) a Mauna Loáról, Kīlaueáról és a Kīlauea Iki kráterből (2. ábra), a Mauna Keáról pedig andezitet. Továbbá tufát, illetve obszidiánt a Pu'u Wa'awa'a salakkúpáról, ami a Hualālai része. Emellett 2 darabot O'ahu szigetén a Diamond Head kráterből (Várady, 2023). A gyűjtés során feljegyeztem az összes minta GPS-el meghatározott koordinátáját és a tengerszint feletti magasságot.



2. ábra: Hawai'i Nagy Szigetet alkotó öt vulkán, forrás: Field Guide, John Sinton

A pályamunka magyar és külföldi, elsősorban angol nyelvű publikációk elemzésén és feldolgozásán alapul, továbbá minták előkészítésén, vizsgálatán, és értelmezésén, melyeket a O'ahun és a Nagy Szigeten gyűjtöttem.



3. ábra: A feldolgozott minták gyűjtésének helyei OSM és QGIS segítségével ábrázolva; forrás: saját térkép

III.2. Módszerek

A gyűjtött minták egy részéből (5 darabból) vékonycsiszolatot készítettem technikus segítségével. 5 mintából, 3-at a hólyagossága vagy porózussága miatt epoxigyantába (összetevői: Struers gyártmányú EpoFix készlet, mely tartalmaz: hardener, resin; acetone; ezeket fele-fele arányban kevertük) impregnáltuk vákuum alatt Struers CitoVac vákuum-impregnáló készülék segítségével, hogy a légbuborékok távozzanak belőlük, valamint megerősítsék a közetek szerkezetét, hogy a további munkálatok során kevésbé roncsolódjanak. Logitech vágógéppel méretre vágtuk, Struers szilikon-karbid (SiC) csiszolóporokat alkalmaztunk, 320-as, 600-as méretben, majd felragasztottuk T-E-Klebertechnik Crystalbond 509-1 ragasztóval „standard slides” üveglapra. Ezt követően vékonycsiszolatok készültek a mintákból System Abele polírozó-csiszológéppel, melyhez Struers csiszolókorongot (MD Mezzo 200) használtunk. Miután a csiszolatokon áthatolt a fény ismét SiC csiszolóporokat alkalmaztunk, 320-as, 600-as, és 1000-es méretben. Végül megpolíroztuk a mintákat, oly módon, hogy a csiszológépre Struers MD Dur csiszolókorongot helyeztünk, Struers DP-Lubricant Blue folyadékkal biztosítottuk a megfelelő hűtést és síkosítást, ezt követően 15 mikronos Struers DP-Spray P gyémánt

polírozó sprayt permeteztünk rá, majd 6-os , 3-as és végül ¼-es. A kapott vékonycsiszolatokon a minták vastagsága kb. 30 µm.

A csiszolatokat megvizsgáltam Nikon Eclipse E600 POL mikroszkóp alatt, keresztezett és párhuzamos nikolok alatt egyaránt. Így meg tudom állapítani, hogy milyen ásványok találhatóak benne, a kristályok saját alakúak-e, ebből kifolyólag enged következtetni azok kikristályosodási sorrendjéről, ezenkívül arra, hogy a litoszférából felkapott ásvány-e.

A polírozott mintákat tanulmányoztam Jeol JSM IT-500 HR pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) alatt, a mikroszkóp kezelését technikus végezte az útmutatásom alapján. A vizsgálat 15 kW csőárammal folyt, 30 Pa nyomás alatt, alacsony vákuumban. Ez a vizsgálat segít meghatározni egyes elemek és azok arányát a vizsgált területen, ebből „térképet” készít, így kapható egy kémiai összetétel, melyből következtethetünk az ásványra. Emellett a SEM alkalmas nagy felbontású és mélységélességű képek alkotására, így a sajátalakúság és a törések vagy hasadások is vizsgálhatóak.

Az eddig vizsgált kőzetek maradékát, 4 mikron nagyságú szemcsékre porítottam achát mozsárban. Majd röntgen pordiffrakciónak (XRD) vetettem alá, annak érdekében, hogy még egyértelműbb képet kapjak a kőzetekben lévő elemekről, ennek következtében a bennük lévő ásványokról. Rigaku MiniFlex600 röntgen pordiffraktométerbe helyeztem a porított mintákat. 3-70° közötti tartományban, 0,02°-ként érkeztek a sugarak a mintára, 40 kV feszültségen. Az így kapott diagrammot elemeztem és megkerestem EVA Bruker értékelőszoftverrel a csúcsokra illeszkedő ásványokat (Váradý, 2023).

A részletesebb vizsgálatok, különösen a zárványok kvalitatív jellemzőinek megállapítása érdekében, vastagcsiszolatokat készítettem technikus segítségével a fent említett módszerhez hasonlóan. Ezeket a témavezetóm segítségével Thermo Scientific DXR Raman mikroszóppal vizsgáltam, mely DXR 532 nm-es lézerrel, valamint DXR 532 nm-es filterrel volt felszerelve. A vizsgálatnál használt beállítások az alábbiak voltak: lézer erősség: 10,0 mW; rácssűrűség: 900 vonal/mm; igazítás: spektográf (horizontálisan: 393; vertikálisan: 330), lézer: (Max: 9120; horizontálisan: 314; vertikálisan: 272); nyílás: 50 µm.

IV. Eredmények

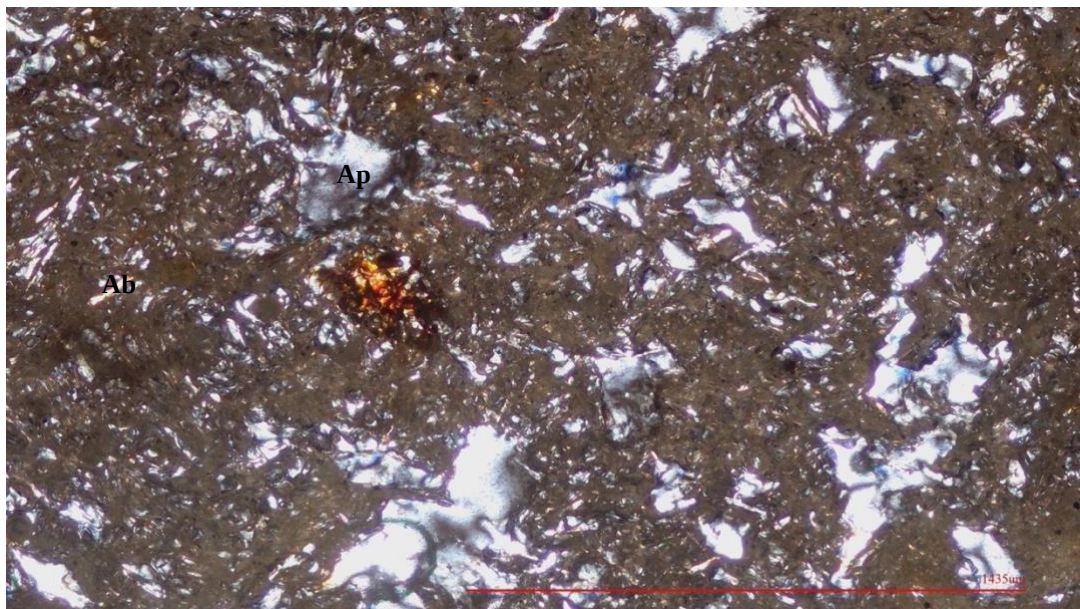
Ebben a fejezetben ismertetem az 5 db vizsgált minta pontos lelőhelyét, ezek makroszkópos és mikroszkópos vizsgálatának eredményét. A 4-es minta esetében Raman-spektroszkópiával egészül ki a vizsgálat és a talált zárványok leírásával. Az ábrákon feltüntetett mikroszkóp alatt készített felvételeken lévő felíratok a 2021-ben IMA–CNMNC által elfogadott ásványok hivatalos rövidítései (Warr, 2021).

IV.1. 1-es minta

A kézi példányt a Nagy Szigeten 1092 méter magasan gyűjtöttem a Pu'u Wa'awa'a salakkúp (É.sz. 19,77013° Ny.h. 155,83052°) egyetlen útbevágásának falából. A kőzet megtalálását nehezítette, hogy a salakkúpot talaj és növényzet borítja. Makroszkopikusan megvizsgálva egy könnyű, szürkés-barna tufa, ami afanitos szövetű, azaz szemcsék nem láthatók benne.

IV.1.1. Kőzetmikroszkópia

A mikroszkóp alatt vizsgálva enyhe irányítottság figyelhető meg a tús albit ásványok tekintetében (5%), méretük körülbelül 150 mikron. Az irányítottságot a szabálytalan 250-300 mikronos apatit (10%) nem követi. A legtöbb része kőzetüveg (80%), mely amorf. A vöröses-barna részek oxidációs elszíneződések, a mállás miatt jöttek létre (Várady, 2023).

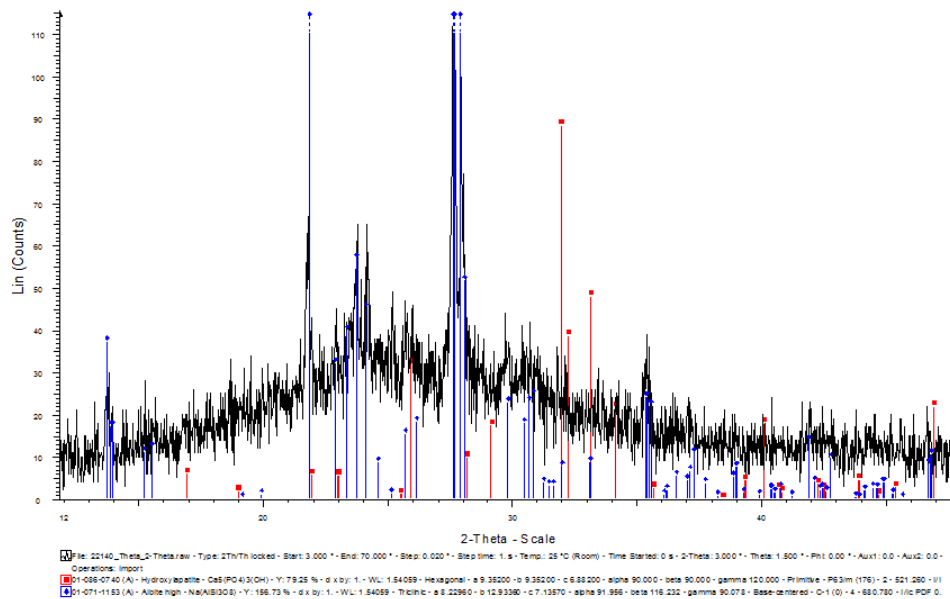


4. ábra: Tufa vékonycsiszolat keresztezett nikolok alatt; szövet; forrás: saját felvétel

IV.1.2. XRD

Az XRD görbe amorf púpot mutat, mely a kőzetüveg. A földpát 01-071-1153 felső-albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), melyben az alumínium (Al) és szilícium (Si) rendezetlen. Emellett 01-086-

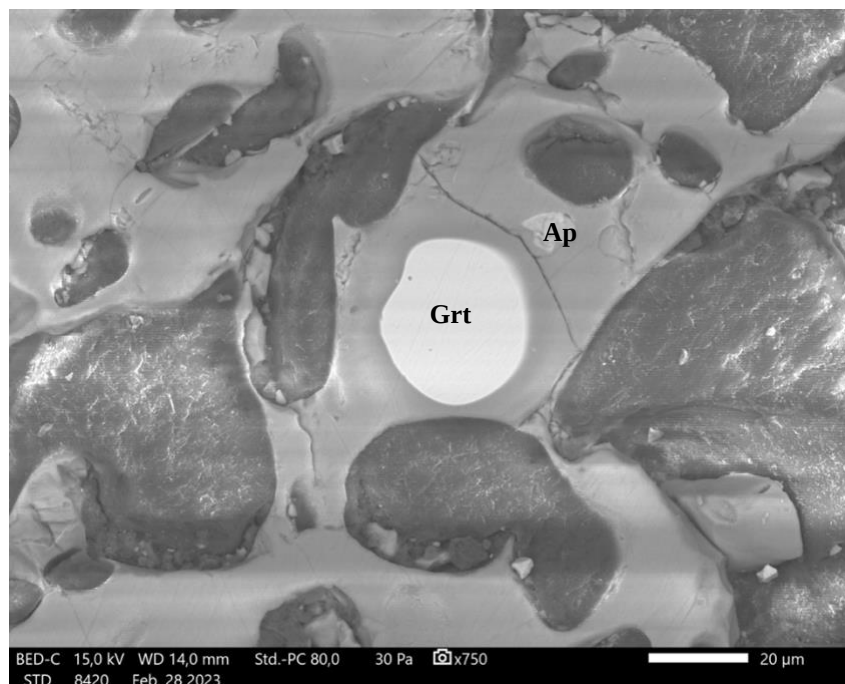
1203 apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}/\text{F}/\text{OH})$) ásvány is található benne. A többi csúcs az amorf üveg miatt jelent meg (Várady, 2023).



5. ábra: Tufa XRD görbe; forrás: saját felvétel

IV.1.3. SEM

Megállapítható, hogy sok a kőzetüveg és a plagioklász (albit) jelenléte, egyes helyeken a káliföldpátok dominánsok. Néhol igen kis méretű gránát (20 mikron) található és apatit (5 mikron) ásvány (Várady, 2023).



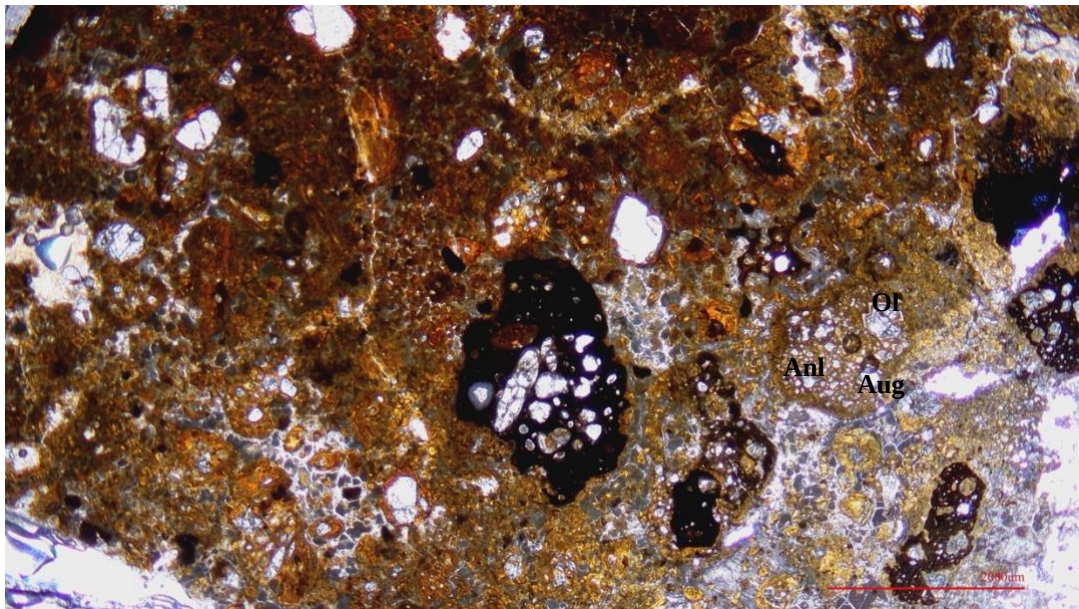
6. ábra: Tufa SEM; gránát és apatit; forrás: saját felvétel

IV.2. 2-es minta

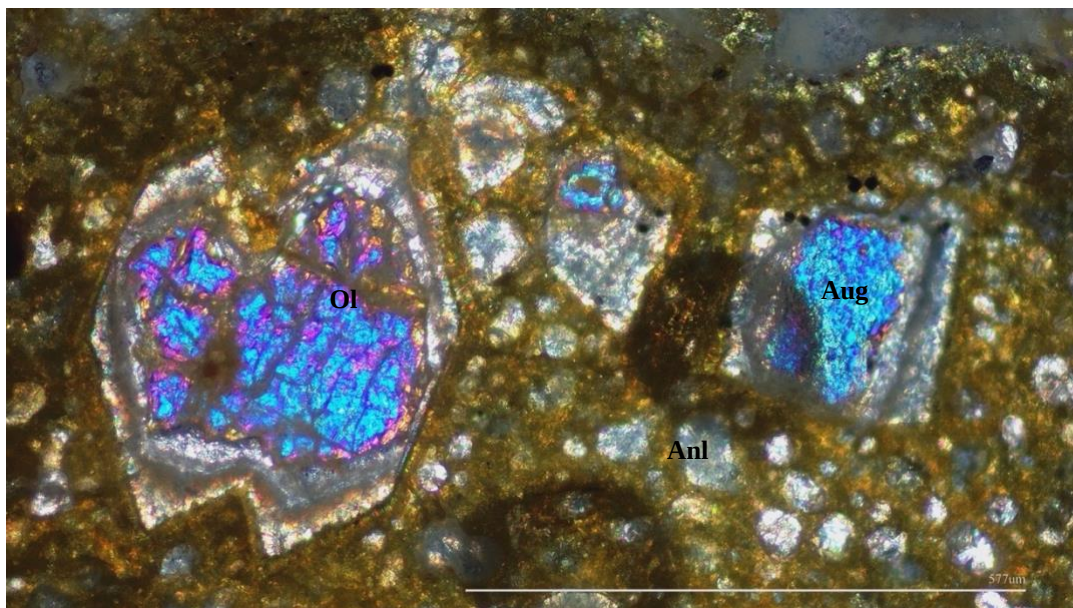
A mintát O'ahun a Diamond Headről (É.sz. 21,2607°, Ny.h. 157,81096°) 176 méter magasan a kráter belső peremén felvezető ösvény melletti falból törtem ki. Barnás-szürke erősen mállott kőzet, a legnagyobb benne látható szemcse mérete 1 mm, melyek barna színűek, a mátrixa fehér, megállapítható, hogy piroklasztit.

IV.2.1. Kőzetmikroszkópia

Párhuzamos poláros fénynél sárgás színű, a hintett vas-oxid miatt. A 400-450 mikronos saját alakú olivinek mállásnak indultak. 50-60 mikronos analcim kristályok észlelhetők. Szintén látható egyes helyeken 200 mikronos mállott augit. Megfigyelhetők benne 1,5 mm-es fekete aggregátumok, melyekben különböző akcesszóriák halmozódtak fel. Arányaik nehezen megmondhatóak, mert a szövet nem egységes a mállás miatt (Várady, 2023).



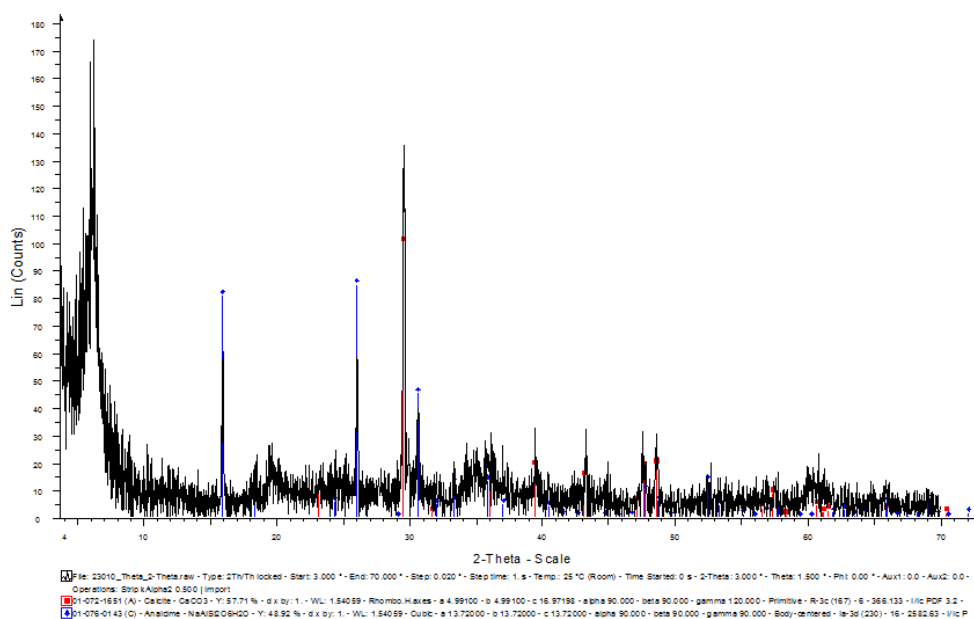
7. ábra: Piroklasztit szövete párhuzamos nikolok alatt; szövet aggregátumokkal; forrás: saját felvétel



8. ábra: Piroklasztit vékonycsiszolat keresztezett nikolok alatt; mállott olivin és augit, izotróp analcimkristályok; forrás: saját felvétel

IV.2.2. XRD

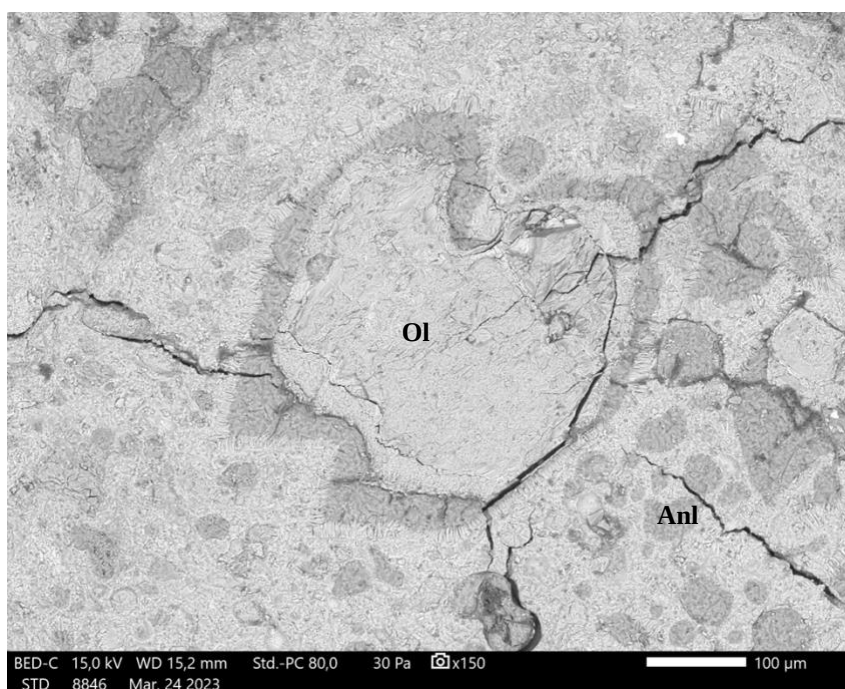
A görbe elején látható csúcsok a szmektit csoport egy trioktaéderes tagját mutatja, mely Miller-indexe (060). Olvasott cikkek alapján valószínűleg szaponit a keresett agyagásvány (Dalrymple et al., 1981) (Wilkins et al., 1993). A kőzetben a zeolitcsoportból 01-076-0143 analcim ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) található. Ezen kívül 01-072-1651 kalcit (CaCO_3) csúcsai is egyértelműen kirajzolódnak (Várady, 2023). Olivint a kis mennyiségéből és mállásából fakadóan az XRD vizsgálat nem talált.



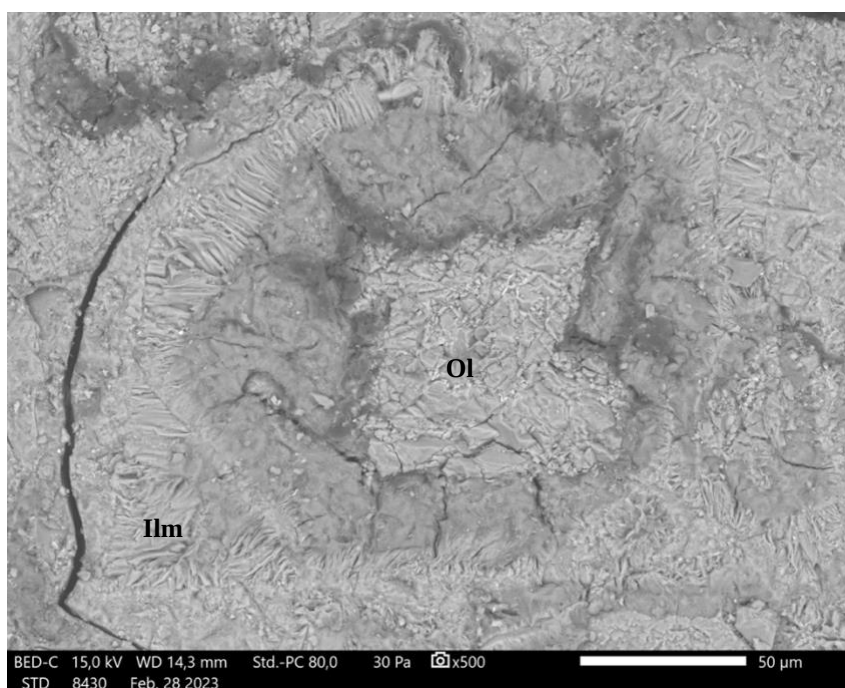
9. ábra: Piroklasztit XRD; forrás: saját felvétel

IV.2.3. SEM

Az elektronmikroszkópos vizsgálat során megkerestem a 8. ábra mállott olivinjét, mely körül vékony ortopiroxén perem látható, melyen kívül szimplektit átalakulás történt, ahol a sugarasan befelé mutató ásvány ilmenit. A mintában a sötétebb, izotróp szemcsék analcim kristályok (10. ábra) (Várady, 2023).



10. ábra: Piroklasztit SEM, mállott olivin; forrás: saját felvétel



11. ábra: Piroklasztit SEM, mállott olivin; forrás: saját felvétel

IV.3. 3-as minta

Szintén a Nagy Szigeten Pu'u Wa'awa'a salakkúpáról (É.sz. 19,77115° Ny.h. 155,83166°) szedtem 1121 méter magasan ugyanabból az útbevágásból, mint az 1-es mintát. Fekete, fényes obszidián éles, kagylós törésekkel (Várady, 2023).

IV.3.1. Kőzetmikroszkópia

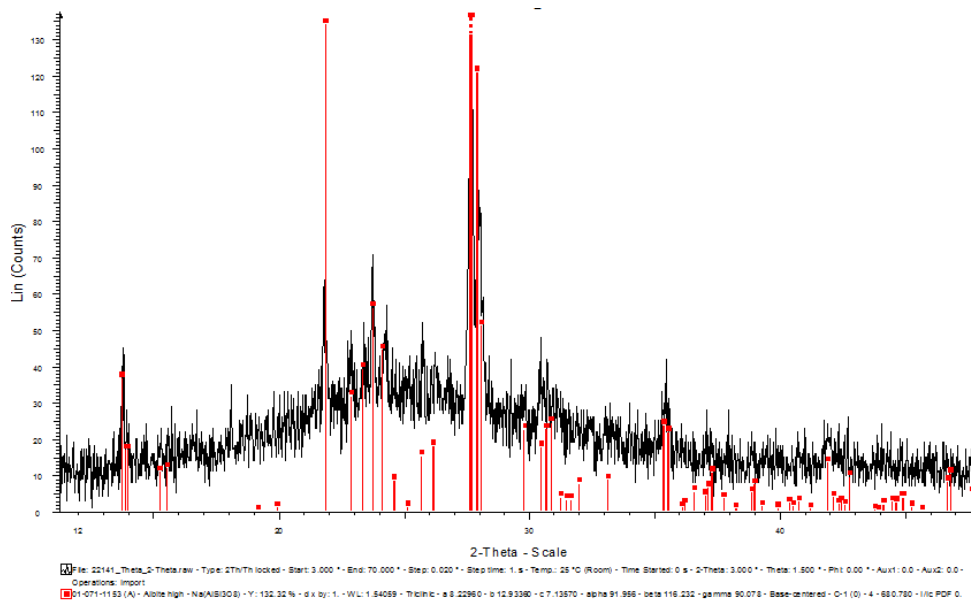
Enyhe irányítottságú 250-300 mikronos albit tűk (15%) a kőzetüvegben (80%) (Várady, 2023).



12. ábra: Obszidián vékonycsiszolat keresztezett nikolok alatt; szövet; forrás: saját felvétel

IV.3.2. XRD

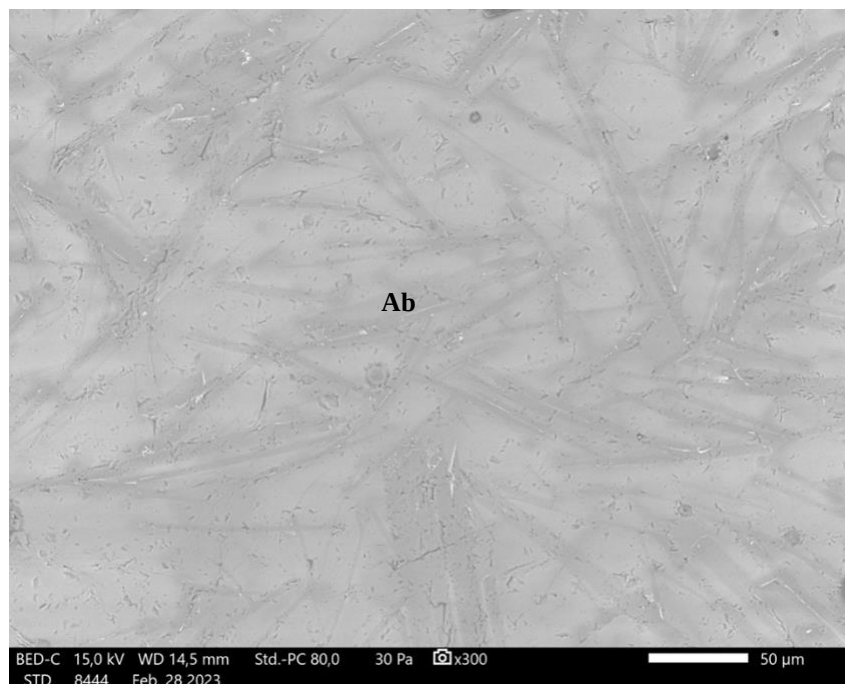
A kőzetüveg mennyisége miatt, szintén megjelenik az amorf púp, mint az 1-es mintán. A 01-071-1153 felső-albit egyértelműen megállapítható a diffraktogram alapján (Várady, 2023).



13. ábra: Obszidián XRD; forrás: saját felvétel

IV.3.3. SEM

Szintén az albit és a kőzetüveg domináns. Néhol egy-egy kis gránát és kevés apatit van jelen (5%) (Várady, 2023).



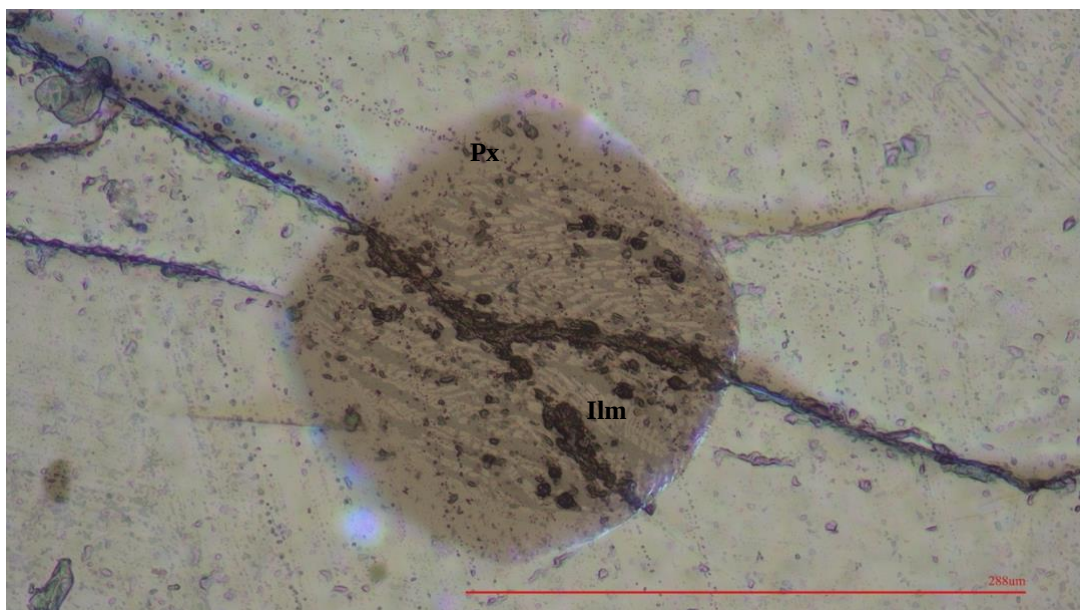
14. ábra: Obszidián SEM; albit tűk a kőzetüvegben; forrás: saját felvétel

IV.4. 4-es minta

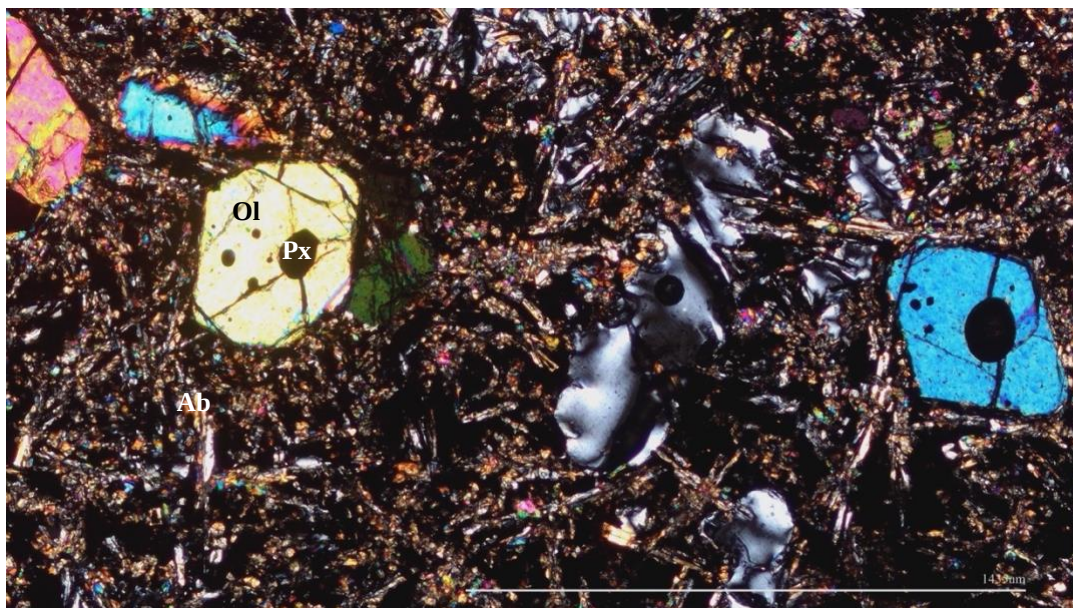
Vulkáni salakot gyűjtöttem a Kīlauea Iki kráterből (É.sz. 19,41277° Ny.h. 155,24452°) 1064 méter magasból, mely a Nagy Sziget Hawai'i Volcanoes Nemzeti Park területén található. A kőzet fekete porfíros, üreges, fehér lerakódással, 2 mm-es olivin fenokristályokkal.

IV.4.1. Kőzetmikroszkópia

A kőzetüvegben (40%) 200 mikronos albit (30%) és változó méretű augit (10%) van, irányítottságuk nincs. Emellett magas interferencia színű 600 mikronos olivinek (15%), melyekben 230 mikronos „opak” piroxén jelenik meg szimplektit szövettel (az szimplektit csak felső megvilágításnál látszik, mert benne az ilmenit dominál). Néhol további ilmenit (5%) található (Várady, 2023).



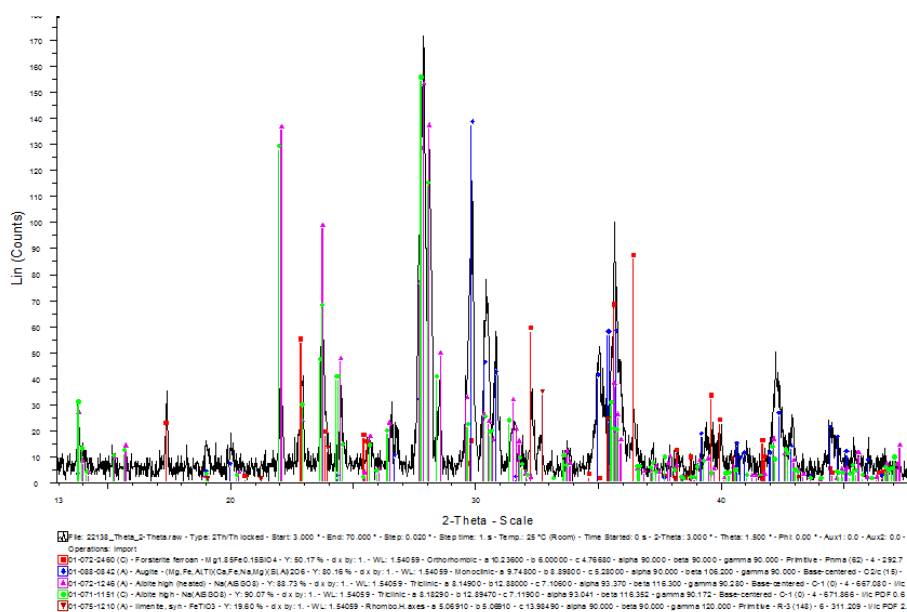
15. ábra: Salak vékonycsiszolat; felső megvilágítás; szimplektit piroxén; forrás: saját felvétel



16. ábra: Salak vékonycsiszolat keresztezett nikolok alatt; szövet olivinben piroxén; forrás: saját felvétel

IV.4.2. XRD

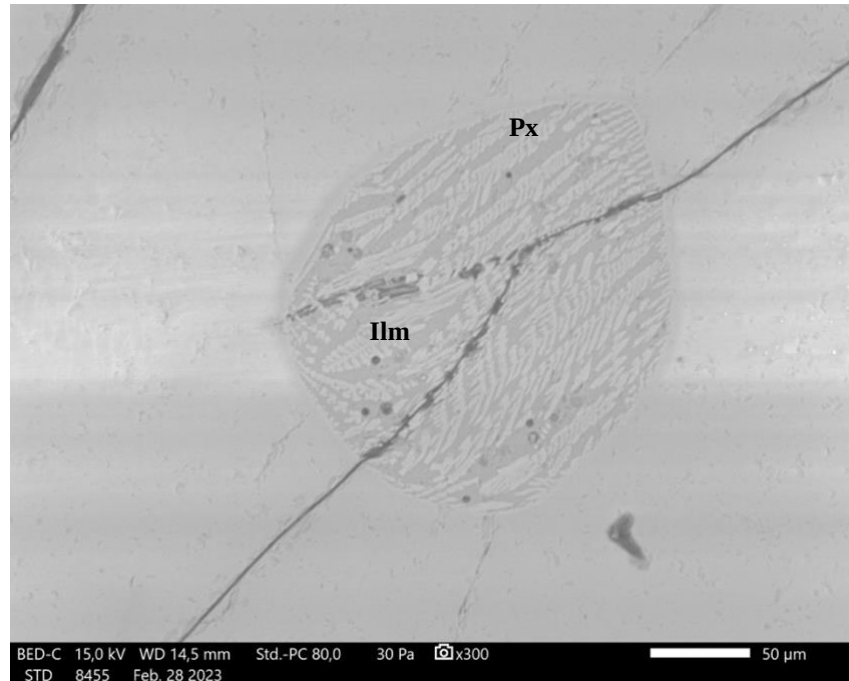
Az előző mintákhoz hasonlóan 01-072-1246 felső-albit észlelhető. Különbség azonban a 01-072-2460 vasas forsterit ($\text{Mg}_{1.85}\text{Fe}_{0.15}\text{SiO}_4$) megjelenése a csúcsok közt. Ezeken felül 01-088-0842 augit, és 01-075-1210 ilmenit (FeTiO_3) csúcsok egyértelműek (Várady, 2023). Hematit és magnetit nincs benne.



17. ábra: Salak XRD; forrás: saját felvétel

IV.4.3. SEM

Az olivinben lévő piroxén belső szerkezete azt mutatja, hogy a világosabb részei kalcium (Ca) gazdag, sötétebb nátriumosabb (Na). A minta egy részén 10 mikronos ilmenit kristályok szételegyedése látható földpátos anyagban (Várady, 2023).



18. ábra: Salak SEM; szimplektites mikroszövet átalakulás piroxénben szételegyedő ilmenit ásvánnyal; forrás: saját felvétel

IV.4.4. Raman

Az olivin kristályokban, melyek saját alakúak elszórva igen kicsi (kb. 1-5 mikron) nagyságú ilmenit ásványok találhatóak. Valamint az euhedrális és szubhedrális olivin kristályokba nagyrészt az opak, közel izomorf ásványok klinopiroxének, ilmenittel. Található benne augit zárvány, mely augitban van, ám kicsit más összetétellel. Emellett olvadékszárvány is fellelhető benne, ahol a bezáró ásvány olivin, benne nitrogén, víz, metán és ilmenit (20. ábra). Augit bezáró kőzetben diopszid is fellelhető, valamint a kőzet mátrixában ilmenit elszórtan.



19. ábra: Salak Raman-felvétele: Ilmenit olivin bezáró ásványban (0.0-10.0=1 mikron); forrás: saját felvétel



20. ábra: Salak Raman: Olvadékszárvány: nitrógen (2327), metán (2913), víz (3250); forrás: saját grafikon

IV.5. 5-ös minta

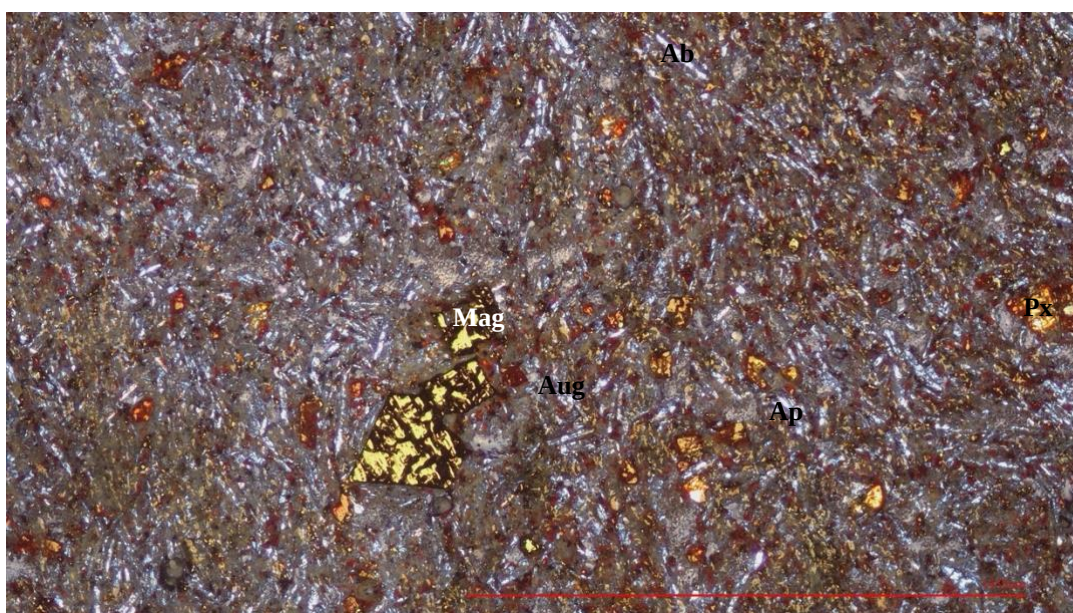
A Mauna Kea észak-keleti lejtőjéről a Laupahoehoe Beach Park (É.sz. 19,99393° Ny.h. 155,24087°) területéről 21 méter magasságban szedtem, egy óceán által hullámokkal vert sziklából (Várady, 2023). Barna, nehéz, kissé csillámos kőzet andezin andezitként határozható meg.

IV.5.1. Kőzetmikroszkópia

Irányított 100-150 mikronos albit tűk (25%) mellett 100 mikronos augit (20%) látszik, utóbbinak magas interferencia színe van. A vöröses-barna ásványok 100-150 mikronos piroxének (5%), a szabálytalan fehér részek apatit (5%) ásványok. Láthatóak 200-250 mikron nagyságú opak, titán tartalmú magnetit (5%) ásványok. A kőzetüveg (40%) elkezdett a hidratáltság miatt átkristályosodni, ezek a részek szürkés-barna pöttyösen jelennek meg. Egyes helyeken hintetten vas-oxid figyelhető meg (Várady, 2023).



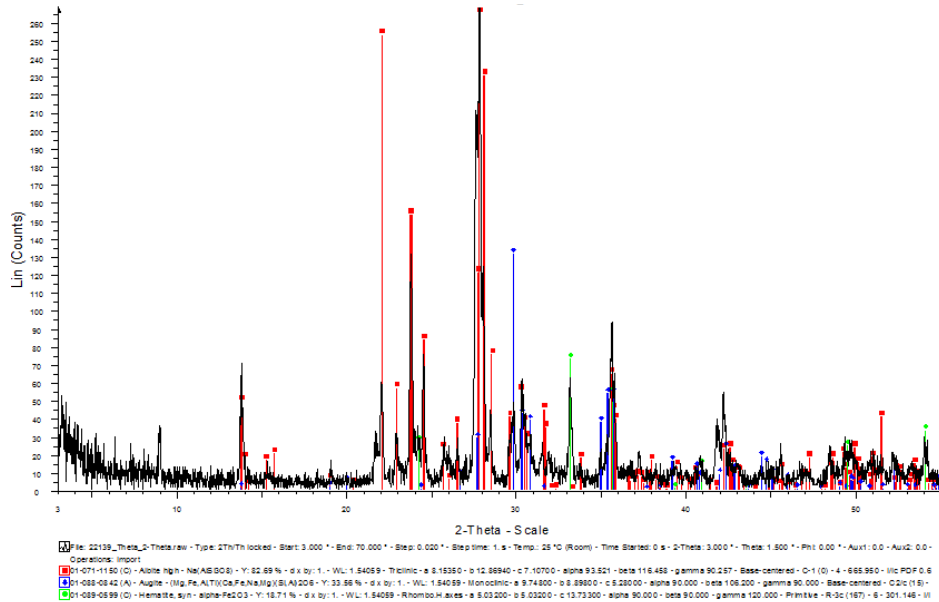
21. ábra: Andezin andezit vékonycsiszolat; keresztezett nikolok alatt; szövet titán tartalmú magnetittel; forrás: saját felvétel



22. ábra: Andezin andezit; titán tartalmú magnetit; felső megvilágítással; forrás: saját felvétel

IV.5.2. XRD

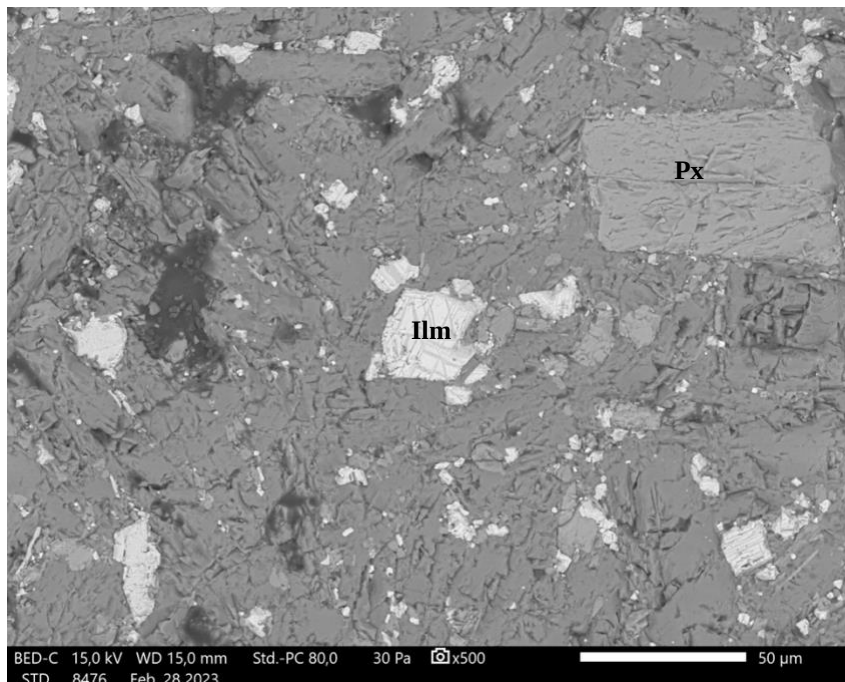
Főleg 01-071-1150 felső-albit van jelen plagioklászként, viszont kevés piroxén. A 01-088-0842 augit mellett 01-086-0740 apatit illeszthető a csúcsokra. Található benne 01-089-0599 hematit, ám olivint nem tartalmaz (Várady, 2023).



23. ábra: Andezin andezit XRD; forrás: saját felvétel

IV.5.3. SEM

A SEM által készített elemterképek igazolják a titán tartalmú magnetit jelenlétét. Ikresedő ilmenit és piroxén szintén található benne.



24. ábra: Andezin andezit SEM; ikresedő ilmenit; forrás: saját felvétel

V. Diszkusszió

A diszkusszió során a szakdolgozatomban (Várad, 2023) kapott eredményeket ismertetem kiegészítve az új kutatási eredményekkel. A Nagy Szigeten gyűjtött mintákat (1-es, 3-as, 4-es, 5-ös) egyértelműbben be lehet sorolni egyes közettani osztályokba a vizsgálatok után, mivel nem lettek még olyan szintű mállásnak kitéve, mint az O'ahui (2-es). Egyes anyagvizsgálati módszerek nem tudják kimutatni ugyanazokat az ásványokat, amelyeket a másik igen, ennek oka, hogy a kézi példányokon belül is lehetnek eltérések, valamint például az XRD-vel az 1% alatti elegyrészeket nem lehet meghatározni (Várad, 2023).

Az 1-es minta egyértelműen a tufa szövet jellegzetes vonásait mutatja, míg a 3-as kétségtelenül az obszidián textúrát. Ezen minták a - Nagy Sziget nyugati (Észak-Kona) részén fekvő - Hualālai posztpajzsvulkánjának északi lejtőjén kialakult monogenetikus Pu'u Wa'awa'a salakkúpáról származnak, később a vulkán egy részét a Mauna Loából származó lávafolyások betemették (MacDonald, 1949). A Pu'u Wa'awa'a salakkúpon (25. ábra) a heves kitörések trachitos magmát hoztak magukkal körülbelül 110 ezer éve. A másnéven Piroklasztit-kúpként (Pyroclastic cone) is ismert vulkán tefrát (hamu, vulkáni salak és tufa) bocsátott ki. A vulkán patkó alakja (nyitott része dél-keletnek néz) annak köszönhető, hogy a szél valószínűleg dél-keletről fűjt, így a nyugati részére halmozta fel a piroklaszt anyag (Shea & Owen, 2016). Legutóbbi aktivitása a XVIII. században történt, ekkor számos kisebb lávafolyás jelent meg az észak-nyugati lejtőjén a Hualālai vulkánnak (MacDonald, 1949). A tufában az apatit másodlagos elegyrész, magmás környezetben magas hőmérsékleten kristályosodik (900-1100 °C között), a Hawai'i-i vulkánok általában 1200 °C-os magmával törnek ki. A minta mátrixa a kitört láva gyors hűlése következtében amorf, közetüveg. A benne lévő felső-albit (létre jöhet alsó-albit 750 °C fölé melegedésével) jellemzője, hogy a benne lévő szilícium és alumínium rendezetlen az újra olvadás miatt. Termeti irányítottsága azzal magyarázható, hogy a közetüveg előtt kristályosodott ki, ám közel azzal egyidejűleg, mivel az ásványra jellemző habitus nem teljesen fejlődött ki. A SEM által megállapított kis káliföldpát tartalom azzal magyarázható, hogy a kristályosodás folytatódott a szanidin irányába, ám a magma gyors hűlése következtében a folyamat nem folytatódott. Köpeny eredetű gránát tartalmú xenolitok a magma litoszférán való átnyomulása során kerülhetett bele. Az oxidációs elszíneződések a mállás során keletkeznek. Az obszidián minta döntően homogén szövetű, de található benne kristályos albit. A benne található kevés apatit szintén

azzal magyarázható, hogy korán kialakult a magmában. A felső-albit irányítottága egyidejű a hirtelen hűléssel. A gránát jelenléte értelmezhető xenolitiként vagy lehetséges, hogy a SEM vizsgálat során talált gránátok ebben az esetben azért vannak jelen, mert egyes fajtái képesek csupán 600 °C-on kristályosodni, oly módon, hogy a forró környezetből - mely jelen esetben a kitört magma - a gázok kiszöknek és fémes elemek (pl.: vas, alumínium) ott maradnak és a más kondenzálható elemekkel kristályosodni kezdenek (Hunter, 2019). Így a már a majdnem kőzetüveggé szilárdult részben, a lassabban hűlő területeken apró gránátok alakulhatnak ki.



25. ábra: Pu'u Wa'awa'a salakkúp; 1-es és 3-as minta gyűjtési helye, neve „Barázdás dombot” jelent; forrás: saját felvétel

A 2-es minta a többitől eltérően O'ahuról való, a Diamond Head vulkánról. O'ahu szigete 4-2,5 millió éve kezdett formálódni, és 2 pajzsvulkánt hozott létre (Ko'olau és Wai'anae). Több, mint 1,3 millió év inaktivitás után, körülbelül 300 ezer éve, a Ko'olau délkeleti része kitört az óceán alatt, ahol a magma a víz alatt hamuvá és kisebb részecskékre esett szét, kitörve piroklasztitá alakult (26. ábra) és tufa gyűrűt hozott létre. A kráter egy freatomagmás kitörés következtében alakult ki monogenetikus vulkánként. Az időjárás és az óceán hatására piroklasztit anyaga mállásnak indult (Department of Land & Natural Resources, 2012). A piroklasztit mintán belüli olivin ásványok korai kristályosodás során keletkeztek a köpenyben 1200-1300 °C-on. Részletesebb vizsgálattal az olivin ásványoknál szimplektites szerkezetet fedeztem fel, ami a stabil és instabil fázisok között lezajló kémiai reakció során alakult ki. A hőmérséklet csökkenésével kisebb piroxének (augit) formálódtak.

A kitörést követően, a mállási folyamatok elkezdődtek, ennek következtében alakulhatott ki a szmektit, de a heves kitörés miatti litoszférán való átnyomulással magával hozott törmelékből is származhat, mint xenolit, ennek kiderítéséhez további műszeres vizsgálatokra van szükség. A zeolit a kőzetben analcim ($\text{Na (AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$) zárvány, mely kistekvő „metamorfózison” (autometaszomatózis) esett át. Keletkezésük során magmás fluidum is szegregálódott, ami az elsődleges magmás ásványok (pl. albit) deutérikus átalakulásához vezetett. A mállás miatt egyfajta mállási kéreg figyelhető meg több helyen, főleg olivin kristályok körül. Az olivin ásvány zónássá vált, ami úgy alakul, hogy a mállott vasas forszterit ($\text{Mg}_{1.85}\text{Fe}_{0.15}\text{SiO}_4$) körül ortopiroxénre módosul a kémiai összetétel és az ásvány eredeti körvonalától sugarasan befelé mutató ilmenit (FeTiO_3) pálcikák képződnek. Az opak aggregátumok, melyek mátrixának kémiai összetétele alapján piroxénes fluidum volt jelen a magmakamrában, ami ultrabázikus környezetre utal. Annak oka, hogy az olvadék opak ásványt hozott létre, nem más mint, hogy a köpenyben egy erősebb hot-spot jellegű hozzáadódás történt és fragmentálódott, mivel a kürtőben való gyors szállítás következtében nem tudott kikristályosodni. Az aggregátumban jelen lévő akcesszóriás xenokristályok szintén köpeny eredetűek. Ezen ásványok már a magmakamrában kiváltak a fluidumból és különböző Fe-Mg tartalmú piroxéneket alkottak, pl.: anortites földpát (Várady, 2023).



26. ábra: Diamond Head piroklaszt rétegződés; forrás: saját felvétel

Az 5-ös minta a Nagy Sziget Mauna Kea vulkánja által létrehozott kisebb félszigetéről, a Laupahoehoe Beach Park (27. ábra) területéről származik. A park nevét elsősorban a fonatosan hűlő pahoehoe láva adta, mely folyása következtében „levél” formát hozott létre, ennek Hawai’i-i neve „lau”. A Mauna Kea legidősebb felszíni kőzetei a minta származási területéhez közel találhatóak, a vulkán észak-keleti lejtőin. Ezek körülbelül 250 000-200 000 évvel ezelőtt keletkeztek és Hamakua vulkanitoknak nevezik. Mindazonáltal a vulkán legalább 1 millió éves, valamint térfogatának több, mint 90%-át a szubareális pajzs fázisban építette. A Mauna Kea kőzeteinek összetétele a kaldera utáni stádiummal korrelálnak, ekkor a láva viszkozitása nagyobb volt, mint a pajzs építő fázisban, emiatt kétszer annyira meredek lejtői vannak (kb. 16°), mint a szomszédos Mauna Loa vulkánnak, továbbá abban is eltér, hogy számos salakkúp tarkítja felszínét jellemzően tengerszint feletti 1000 m magasságban. Megközelítőleg 65 000 éve kezdődött a Laupahoehoe vulkanitok keletkezése, ezek kémiai összetétele eltérő az eddigiekhez képest, illetve további salakkúpokat alkottak 2000 m magasság felett. Az egyik salakkúpból távozó láva folyás alakította ki a parkot (Wolfe et al., 1997). A vulkán érdekessége, hogy a pleisztocén ideje alatt kisebb gleccser borította a felső részét, mely alatt továbbra is zajlott az aktivitás (MacDonald, 1949). Az albit tűk az

eddigiekhez hasonlóan a kőzetüveggel közel egyidejűleg alakultak ki. Irányítottságát a láva folyás pahoehoe módja is magyarázza, hiszen ezen folyamat során a láva teteje gyorsabban hűl, míg az alsóbb része folyik tovább. A vékonycsiszolatban kisebb mennyiségben augit látható, - mely szintén irányított – ez a hőmérséklet egyenletes csökkenése miatt alakult ki. A magma forrás valószínűleg piroxén dominanciájú lehetett, ami magas SiO_2 tartalmat indikál, a köpenyben mindeközben érintkezett az alacsony SiO_2 tartalmú magmával, mely a sekély tengeri pajzsvulkánt építette. A magas-, és alacsony SiO_2 tartalmú magmák érintkezése a köpenyben nem keveredést idéz elő, hanem a kristályosodást segíti (Herzberg, 2011). A piroxének fajtáját XRD vizsgálattal nem tudtam megállapítani. Az apatit ásványok a korai kristályosodás eredményeképp a köpenyben már jelen voltak. A hematit és az ikresedő ilmenit körülbelül $950\text{ }^\circ\text{C}$ -on alakult ki (Klein et al., 1993). Félig saját alakú magnetit ásványok alakultak ki végül alacsonyabb hőmérsékleten. A titán tartalom mennyisége további vizsgálatokkal megállapítható, jelenléte a kőzetben azzal magyarázható, hogy a 2Fe^{3+} kicserélődik $\text{Ti}^{4+} + \text{Fe}^{2+}$ -ra (Moskowitz et al., 2015). A kőzetüveg egyedisége az, hogy az óceáni hullámverés hatására hidratált lett, így szöveti változásokon megy keresztül. Recens folyamat a kőzetben a hintett vas-oxid megjelenése is. Összességében a minta mind keletkezésében, mind összetételileg is eltér a többitől, ebből következtettem, hogy a kőzet nem valószínű, hogy bazalt, összetétele inkább az andezitre hasonlít. További szakcikkeket olvasva sejtésem beigazolódott (Várady, 2023). A Laupahoehoe vulkanitok általában andezin andezitek, ritkább esetben olivint tartalmazó bazaltok (MacDonald, 1949).



27. ábra: Laupahoehoe Beach Park szikla; forrás: saját felvétel

A 4-es Kīlauea Iki kráterből a felszíni bazalt táblákból (28. ábra) származó minta egy hólyagos bazalt, avagy bazalt salak olivin fenokristályokkal effuzív kitörés eredménye. A Kīlauea kráter Hawai’ion az egyetlen hely, ahol jelenleg lávató található és napjainkban is táplálja a köpenyből származó magma, ez a kráter 2018-ban egy hatalmas robbanás során beszakadt, így nem látogatható. A Kīlauea Iki ettől keletre található, neve azért kapta az „Iki” jelzöt, mert ez kicsit jelent és területe körülbelül tizede a nagy kráternek. A Kīlauea Iki legutóbb 1959-ben tört ki, egy viszonylag rövid periódusig (november 14-december 20). A kitörése 17 epizódból állt, mely első szakaszában a láva-szökőkút magassága a 380 métert is elérte, majd ennek végeztével a láva elkezdett visszaáramlani a kürtőbe. A többi 16 epizódban ez ismétlődött kisebb intenzitással, a visszaáramlásoknál gyakran örvények alakultak ki, melyek lehúzták a már megszilárdult szigeteket, valamint egyes részei a láva-szökőkúttól távolodva magaslatokat hoztak létre a láva-tó felszíne felett (Richter et al., 1970). A jellegzetes üregességét annak köszönheti, hogy a magmában magas nyomás miatt oldott gázok vannak, a kitörést követően a nyomás lecsökkenésével és a láva megszilárdulásával a kőzetből kiválnak a gázok pórusokat alkotva. A salakban általában a főbb ásványok a plagiklászok, piroxének és az olivinek, ritkább az ilmenit, ez egyezik a

Wright & Okamura (1977) által leírt petrográfiával. A mintában az olivin szabadszemmel látható és mikroszkóp alatt számos saját alakú kristály található. Az olivin kialakulása magas hőmérsékleten kezdődik el, így az ásványok tudnak növekedni míg le nem csökken a diszkontinuális sor következő tagjának kristályosodási hőmérsékletéig, melyek a piroxének. A forszteritben ($\text{Mg}_{1.85}\text{Fe}_{0.15}\text{SiO}_4$) – anyaásvány - látható izotróp zárvány képződése, oly módon történhetett, hogy a rajta átmenő fluidum csatorna táplálta és megváltoztatta a kemizmusát, emiatt klinopiroxén ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) alakult ki, a további magma fluidum hozzáfolyás következtében szimplektit átalakulás történt és ilmenit kezdett szételegyedni a piroxénben. A szimplektit ásványai alapján a keletkezés P-T körülményei (ilmenit-piroxén Fe-Mg megoszlás) meghatározhatók, de ehhez részletes kémiai vizsgálat szükséges (Litasov & Ohtani, 2003). A másik lehetséges esetben az olivin csapdázott egy spinellt, ami a fluidum csatorna miatt érintkezett a magas vastartalmú magmával és lebomlott, így alakulhatott ki a piroxén-ilmenit szételegyedés, valamint a spinell eredeti alakjával magyarázható a zárvány alakja. A harmadik lehetséges eset, hogy az olivinben található piroxén zárványok kialakulása annak köszönhető, hogy a mélyben a piroxén és olivin összetételű magma találkozott, magas hőmérsékleten az olivin kialakult ennek köszönhető, hogy idiomorf vagy hipidiomorf olivinekről beszélünk. A kezdeti kikristályosodás csapdázta a piroxén összetételű magmát, majd alacsonyabb hőmérsékleten ($950\text{ }^\circ\text{C}$) az ilmenit kikristályosodott, ennek köszönheti dendrites ágazatát a piroxénen belül, mivel a magas Ca-tartalmú klinopiroxének (augit) kristályosodása csupán $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ -on történik (Reynard et al., 2006). Ez a folyamat valószínűleg kis nyomáson mehetett végbe. Annak érdekében, hogy megállapítható legyen mely eset felel meg a valóságnak mikroszondás vizsgálatra van szükség. A szöveten belüli augit ásványok ezzel egyidejűleg alakultak ki. A hőmérséklet drasztikus csökkenésével az albit kristályosodása megkezdődött, méretük ebből fakadóan kisebb.

A Raman-spektroszópós vizsgálat során az olivinben lévő olvadékszárvány (29. *ábra*) széndioxidot, nirogént (2327 cm^{-1}), metánt (2913 cm^{-1}), vizet (3250 cm^{-1}) és ilmenitet (681 cm^{-1}) tartalmaz (20. *ábra*). Kīlauea Iki kitörés korai szakaszából származó olivin $<6\text{ km}$ mélységben kristályosodott, az olivin többsége az $1\text{--}3\text{ km}$ -es mélységtartományban található. Ezek a mélységek összhangban vannak azzal az értelmezéssel, hogy a Kīlauea Iki magmát a Kīlauea csúcsmagmatárolójából ($\sim 2\text{--}5\text{ km}$ mélység) táplálta (Tuohy et al., 2016) és itt csapdázódhatott a zárvány. Ezt a rezervoárt a felsőköpenyből származó magma táplálhatta. A felsőköpenyben általánosan jellemző fluidumösszetétel, a CO_2 -gazdag zárványok H_2O - ($<3,5\text{ mol. \%}$) és N_2 - ($<0,2\text{ mol. \%}$) tartalma nem specifikus a geodinamikai

környezetre vagy a metasztatizáló fluidum forrására, így azok eredete kizárólag a fluidumok összetételére alapozva nem határozható meg (Aradi et al., 2019).

Olivin anyaásványban az izotróp ilmenit kristályzárvány a spinell magmával való érintkezésével, lebomlásával, majd átalakulásával magyarázható.

Az augitben lévő augit endogén zárványnak tekinthető, mivel a bezáró kőzettel közel azonos összetételű, azzal kogenetikus kőzetzárvány, amely a magma feltörése előtt, a magmakamrában már kikristályosodott (Harangi et al., 2013). A mátrixában megfigyelhetők igen kis méretű ilmenit kristálykezdemények, valamint diopszidot ásványok, ez utóbbi lehetséges felsőkőpenyből származó xenolit. Az ilmenit kristályosodása a kitörés utánra tehető, emiatt alig pár mikronos és nem teljesen kifejlett, mivel a kőzetüveg kialakulása akadályozta a további növekedését.



28. ábra: Kīlauea Iki kráter hűlési törések; forrás: saját felvétel



29. ábra: Olvadékszárvány olivinben (0.0-10.0=1 mikron); forrás: saját felvétel

VI. Összefoglalás

A bazalt a Földön a leggyakoribb kőzet, ez alkotja tengeraljzatainkat, az azokon fekvő hot-spot vulkánokat, az óceánközépi-hátságokat és riftesedő területeket. A kutatások során nyert eredmények megerősítették azon feltételezésemet, hogy a Hawai'i szigeteket kialakító hot-spot vulkanizmus különböző típusú és összetételű bazaltok keletkezéséhez vezet. Nem csupán bazalt, hanem andezit is fellelhető a szigeteken, így nem zárható ki, hogy a jövőben további andezit kőzetek alakulnak ki, különösen, ha a Mauna Kea ismét kitör, ez a közeljövőben igen valószínű (USGS, 2023).

A köpenycsóva által okozott kivékonyodás és a litoszférán való átnyomulás során számos xenolit kerülhet a magmába (pl.: gránát, apatit), melyek akár részben asszimilálódhatnak és megváltoztathatják kémiai összetételét. A freatomagmás kitörés esetében gyakori, hogy az aggregátumok a már megszilárdult tengeraljzat anyagából valók, ám ezek nem olvadtak vissza, ahogy az a 2-es minta esetében megfigyelhető. Valamint gyakori a már litoszférában vagy magmakamrában kialakult ásványok jelenléte, ezek közös jellemzői, hogy méretük nagyobb (akár 2 mm) és sajátalakúak. A további hűlés és magma csatornákon való táplálás megváltoztathatja ezeket az ásványokat, mint például az olivinben kialakult piroxén szimplektit átalakulása, ahol a hozzáfolyó fluidum ilmenitet hoz létre. A vulkánok effuzív kitörése esetében viszkózusabb lávánál igen gyakori, hogy irányított ásványok (augit) alakulnak ki, ugyanekkor heves robbanással járó kitörésnél a tufában és obszidiánban is megfigyelhető enyhe irányítottság (albit). Kevés szabadszemmel látható ásvány figyelhető meg, hisz a kitörést követően hatalmas hőmérséklet differencia lép fel, ezzel jelentős mennyiségű kőzetüveg képződik, ami gátolja a lávában már meglévő kristályok növekedését, mint például a salakban az ilmenit kristálykezdeményeket.

A talált zárványok jelentős illótartalmú (főleg CO_2 , de mellette H_2O , N_2) tholeiites összetételre utalnak. A peridotit parciális olvadásnak következtében jön létre a nyomás csökkenés következtében, körülbelül 30 km-es mélységben. A magma sűrűsége kisebb lesz, mint a környezetének és a felhajtóerő miatt elkezd felfelé haladni, a kristályosodás elkezdődik, átalakulások történhetnek (pl.: olivinben). A Kīlauea Iki esetében a magmakamrában (<6 km) is folytatódott a kristályosodás a nyomás és hőmérséklet csökkenés következtében, így további kristályok is kialakulhattak, ám kisebb méretben. A kitörés utáni sokszori kürtőbe való visszaáramlás során a magma csapdázhatta a kristálykezdeményeket. A végleges felszínre kerüléskor a kis viszkozitású láva kőzetüveggé szilárdult.

A hawai'i-i bazaltokban található értékes, apró ásványok, mint az apatit, bár fontos információval szolgálnak a kutatók számára, mennyiségük nem elegendő bányászati célokra, mindazonáltal néhány bánya mégis található Kauai és Maui területén, ahol elsősorban homokot, alumíniumot, vasat és vizet termelnek ki, emellett titán és szilícium-dioxid bányászata is folyik. Az USA rangsorában Hawai'i a 48. helyet foglalja el a bányászati termelés tekintetében (USGS, 2021). A bazalt többféle módon felhasználható, ám elsősorban az építőipar hasznosítja, mint díszítőelem, de gyakori hasznosítása zúzott állapotban aszfaltba és betonba. A kőzet továbbá alkalmas szén-dioxid (CO₂) megkötésére, viszonylag kis idő elteltével képes azt karbonát kőzetté alakítani (Lewis et al., 2021). Érdeemes lenne további vizsgálatokat folytatni a Kīlauea kráterben lévő lávató kapcsán, akár geoinformatikai módszereket alkalmazva, mely monitorozza és vizsgálja, hogy periodikus-e a lávató szilárd felszínének változása, lehet-e számítani újabb beszakadásra. Ebből következik, hogy további kutatási lehetőség lehet vizsgálni a szeizmikát, pontosabban, a földrengések és aktivitás viszonyát ezen a területen, ezzel megelőzve a lehetséges baleseteket.

VII. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Kovács Jánosnak, konzulensemnek, akinek szakmai tanácsaival, indoklásaival, javaslataival és a konzultációk során nyújtott segítségével elkészülhetett ez a pályamunka.

Szintén szeretném megköszönni Myovela Justine Leonardnak, a laborban töltött eredményes órákat és a magyarázatokat!

Külön köszönet Dr. Németh Tibornak, hogy segítségemre volt és biztatott a fejlődésre.

Köszönöm Miklósy Ákosnak és Dr. Szabó Péternek, hogy a laborban segítették a munkámat.

A szakdolgozat nem valósult volna meg Édesanyám segítségével nélkül, aki lehetőséget adott arra, hogy eljuthassak a szigetekre, és testközelből láthassam a kőzeteket és gyűjthessek mintákat, emiatt köszönetet szeretnék mondani neki.

Továbbá köszönöm Édesapámnak, hogy amíg köztünk volt biztatott, és arra tanított, hogy az életben minél több élményt kell szerezni, és minél több helyre ellátogatni.

Köszönöm a Nagyszüleimnek, hogy támogattak és nélkülük, ez az utazás nem jöhetett volna létre.

És végül köszönettel tartozom minden barátomnak, hogy segítségemre voltak!

VIII. Irodalomjegyzék

- Aradi, L. E., Berkesi, M., & Szabó, C. (2019). Felsőköpeny fluidumok összetétele és eredete fluidumzárvány-vizsgálatok alapján a Stájer-medence amfibolgazdag harzburgit xenolitjában. *Földtani Közlöny*, 35-49.
- Dalrymple, G. B., Clague, D. A., Garcia, M. O., & Bright, S. W. (1981). *Petrology and K-Ar Ages of Dredged Samples from Laysan Island and Northampton Bank Volcanoes, Hawaiian Ridge, and Evolution of the Hawaiian-Emperor Chain*. Geological Society of America Bulletin.
- Dana, J. D. (1891). *Characteristics of volcanoes : with contributions of facts and principles from the Hawaiian Islands*. New York: Dodd, Mead and Co.
- Decker, R., & Decker, B. (1988). Volcanology in Hawaii. *Earthquakes & Volcanoes (USGS)*.
- Department of Land & Natural Resources. (2012). Diamond Head (Le‘ahi) State Monument. Honolulu, Hawai‘i, USA.
- Granshaw, F. D., Moore, A., & Lewis, G. (2014). Geologic history of the Western US. In *The Teacher-Friendly Guide to the Geology of the Western US*. Paleontological Research Institution.
- Harangi, S., Szakmány, G., Józsa, S., Lukács, R., & Sági, T. (2013). *Magmás kőzetek és folyamatok - gyakorlati ismeretek magmás kőzetek vizsgálatához*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Herzberg, C. (2011. január 1). Identification of Source Lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for Origins. *Journal of Petrology*, 113–146.
- Hunter, D. (2019. január 31). The Astonishing Origin of Garnets in Rhyolite. *Scientific American*.
- Jordan, B. R. (2019. november 1.). Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, old.: 231-241.
- Klein, C., Hurlbut, C. S., & Dana, J. D. (1993). *Manual of mineralogy : (after James D. Dana)*. New York: Wiley.
- Lewis, A. L., Sarkar, B., Wade, P., Kemp, S. J., Hodson, M. E., Taylor, L. L., . . . B. (2021, szeptember). Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. *Applied Geochemistry*.

- Litasov, K., & Ohtani, E. (2003. november 19.). Hydrous solidus of CMAS-pyrolite and melting of mantle plumes at the bottom of the upper mantle. *Geophysical Research Letters*.
- MacDonald, G. A. (1949). *Petrography of the Island of Hawaii*. Washington: United States Government Printing Office.
- Moskowitz, B. M., Jackson, M., & Chandler, V. (2015). 11.05 - Geophysical Properties of the Near-Surface Earth: Magnetic Properties. *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, 139-174.
- Mourey, A. J., Shea, T., Lynn, K. J., Lerner, A. H., Lambart, S., Costa, F., . . . Gansecki, C. (2022, október 1.). Trace elements in olivine fingerprint the source of 2018 magmas and shed light on explosive-effusive eruption cycles at Kīlauea Volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, 595.
- Reynard, B., Beck, P., Barrat, J.-A., & Bohn, M. (2006). Pyroxene crystal chemistry and the late cooling history of NWA 2737. *Lunar and Planetary Science*.
- Richter, D. H., Eaton, G. P., Murata, K. J., Ault, W. U., & Krivoy, H. (1970). *Chronological narrative of the 1959-60 eruption of Kilauea Volcano, Hawaii*. Washington: United States Government Printing Office.
- Shea, T., & Owen, J. (2016. március 26). Discovery of a trachyte ignimbrite sequence at Hualālai, Hawaii. *Bull Volcanol*.
- Tuohy, R. M., Wallace, P. J., Loewen, M. W., Swanson, D. A., & Kent, A. J. (2016). Magma transport and olivine crystallization depths in Kīlauea's east rift zone inferred from experimentally rehomogenized melt inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 232-250.
- USGS. (2021. február 16.). *USGS science for a changing world*. Forrás: The Mineral Industry of Hawaii: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-industry-hawaii>
- USGS. (2023. november 18). *USGS science for a changing world*. Forrás: Mauna Kea Will Erupt Again: <https://www.usgs.gov/volcanoes/mauna-kea/mauna-kea-will-erupt-again>
- Várady, V. (2023. május). A Hawai'i-i Nagy Sziget és O'ahu közeteinek ásványtani vizsgálata. Pécs, Baranya, Magyarország.
- Warr, L. N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

- Wilkins, R. H., Firth, J., & Bender, J. (1993). 11. Low-temperature alteration of basalts from the Hawaiian arch, LEG 136. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 133-146.
- Wolfe, E. W., Wise, W. S., & Dalrymple, G. B. (1997). *The Geology and Petrology of Mauna Kea Volcano, Hawaii— A Study of Postshield Volcanism*. Washington: United States Government Printing Office.
- Wright, T. L., & Okamura, R. T. (1977). Cooling and Crystallization of Tholeiitic Basalt, 1965 Makaopuhi Lava Lake, Hawaii. *GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1004*.