

Válasz Timár Gábor professzor úr

„A geodéziai, geodinamikai és atmoszféra kutatások a műholdas helymeghatározásban” c. MTA doktori értekezésem kapcsán kifejtett opponensi véleményére

Az opponensi véleményben megfogalmazott kérdésekre adandó válaszaim előtt szeretném megköszönni Professzor úr pozitív és támogató bírálatát!

Az opponensi vélemény első kritikai észrevétele a doktori mű címét érinti. Őszintén megvallom, hogy a címválasztás volt talán az értekezés megírásának a legnehezebb feladata. Alapvetően a kutatásaim a műholdas helymeghatározáshoz kapcsolódnak, a szélsőpontosságú GNSS helymeghatározás megvalósítása és a földtudományok terén lehetséges alkalmazási lehetőségeik képezik a kutatásaim vezérfonalát. Az új kutatási eredmények bemutatása és megfogalmazása mellett azt a célt is kitűztem magam elé, hogy az értekezésemben kísérletet teszek annak bemutatására, miként is hatnak egymásra a földtudományok új kutatási eredményei. Példának okáért a légköri hatások pontosabb modellezése javítja a helymeghatározás pontosságát és megbízhatóságát. Ily módon a meteorológia tudományos eredményei jól hasznosulnak a geodéziában. A nagy pontosságú műholdas helymeghatározó mérésekkel azonban a geodézia is új eredményekkel gazdagíthatja a meteorológia tudományát, hiszen egy új eszközt hozhatunk létre a légköri vízgőz mennyiségének a becslésére. Hasonló pozitív hatásokat láthatunk a geodinamika-geodézia vonatkozásában is. A tektonikai lemezek elmozdulásának pontos ismerete elengedhetetlen a globális geodéziai vonatkoztatási rendszerek létrehozásához. Ugyanakkor egy konzisztens geodéziai vonatkoztatási rendszer segítségével a szélsőpontosságú műholdas helymeghatározás új eredményekkel finomíthatja a tektonika lemezek mozgásáról alkotott képünket.

Mivel több tudományág határán mozogtak a vizsgálatok, ezért számomra különösen nehéz feladat volt a vizsgálatokat egyetlen, jól kifejező címmel jellemezni. Az opponensi véleményben megfogalmazott címjavaslat („Műholdas geodéziai alkalmazások a geodinamikában és az atmoszféra-kutatásban”) igazán kifejező és emellett tömör is, így egy kicsit bánom, hogy ez nem jutott eszembe az értekezés megírása során.

Professzor Úr tézisekkel kapcsolatos általános észrevétele, hogy azok inkább tematikus összefoglalásai az eredményeknek, nem tartalmazzák az értekezésben bemutatott új eljárások összefüggéseit, adott esetben az eredmények néhány jellemző numerikus értékét. Bár egyetértek a megállapítással, tudatosan ily módon fogalmaztam meg a téziseket. Egyrészt úgy gondoltam, hogy egyenleteket vagy ábrákat a tézisben nem adok meg, mert akkor azok magyarázata is a tézis részét kellene képezze. Az első tézishez kapcsolódó kinematikus modell vagy a 2. és 3. tézisben megfogalmazott eredmények összefüggései több oldal terjedelműek. Mivel az értekezés és a kapcsolódó publikációk tartalmazzák ezeket, ezért inkább a tömör, tematikus megfogalmazás mellett tettem le a voksom.

Az értekezéssel kapcsolatban az opponensi véleményben további három kérdést kaptam, amelyeket a következők szerint válaszolok meg.

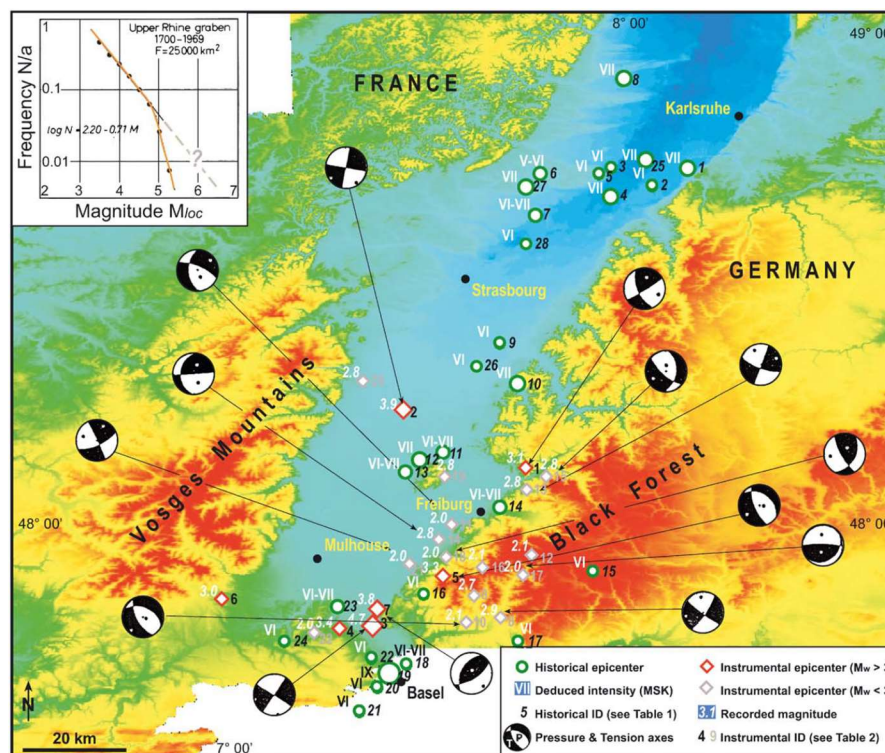
1. kérdés: „*A térségben kipattant földrengések fészekmechanizmusa mennyiben támasztja alá a 63. oldalon bemutatott kinematikai modellt és a 67. oldalon bemutatott, ebből levezetett deformációmezőt?*”

A térségben kipattant földrengések epicentrumainak elhelyezkedését és a rengések fészekmechanizmusait Fracassi és mtsai., (2005) munkája alapján mutatom be az 1. ábrán. Az ábrán jól látható a Felső Rajna-árok szeizmicitásának azon jellemzője, hogy a keleti oldali Fő Határoló vető mentén nagyobb a szeizmicitás, míg az árok nyugati oldalát alacsonyabb szeizmicitás jellemzi. A földrengések fészekmechanizmusait tekintve balos oldalvetők mentén kipattant földrengések adják a

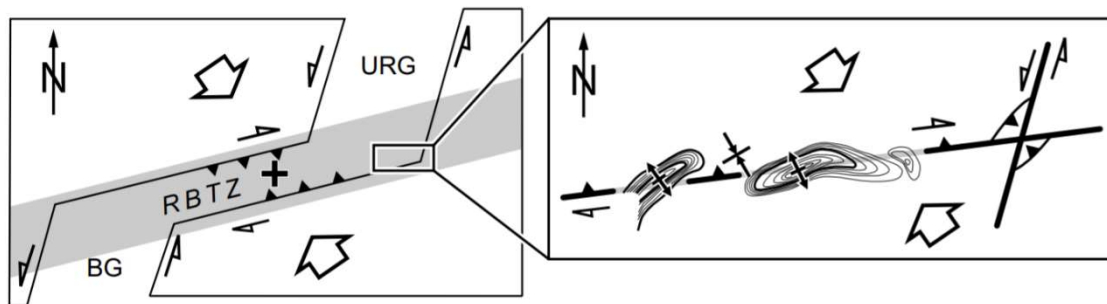
földrendések többségét, több esetben normál komponenssel. Feltolódásos vetőre utaló fészekmechanizmust az árok délkeleti sarkához közel találunk.

A fészekmechanizmusok jó összhangot mutatnak Ustaszewski és Schmid, (2007) által kialakított kinematikai modellel is, amely szintén kompressziós környezet jelenlétét feltételezi. Ezek az eredmények nem mondanak ellent az árok geológiai szerkezetének, hiszen az árokképződésre jellemző nyugat-északnyugat kelet-délkelet irányú dilatációs környezet a késői eocén korai oligocén időszakában zajlott. Ezt követően az Afrikai lemez ütközésének következtében a kialakult normál vetők kompressziós környezetben reaktiválódtak. Erre Ustaszewski és Schmid (2007) a már idézett munkájukban szerkezeti földtani bizonyítékot is bemutattak. A Felső Rajna-árok déli részén, a Sundgau-nak nevezett területen, ahol a Jura-hegység és a Rajna-árok találkozik, szeizmikus vizsgálatok segítségével feltérképezték a térség geológiai szerkezetét. Tanulmányukban a 4. és 5. ábrán látható szelvényt közölték. A szelvény helyének beazonosítását a 3. ábra alapján végezhetjük el. A szelvényen jól látható, hogy a mezozoikumban az ábrán látható baloldali vető normál vetőként alakult ki, míg a rupeli időszakban kialakult kőzetek ellenkező, feltolódásos elmozdulást mutatnak. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az árokképződést követően a rupeli időszakban már kompressziós környezet jellemezte a térséget, azaz a dilatációs környezetre jellemző normálvetők a kompressziós környezetben feltolódásos vagy oldalvetőként reaktiválódtak/reaktiválódnak.

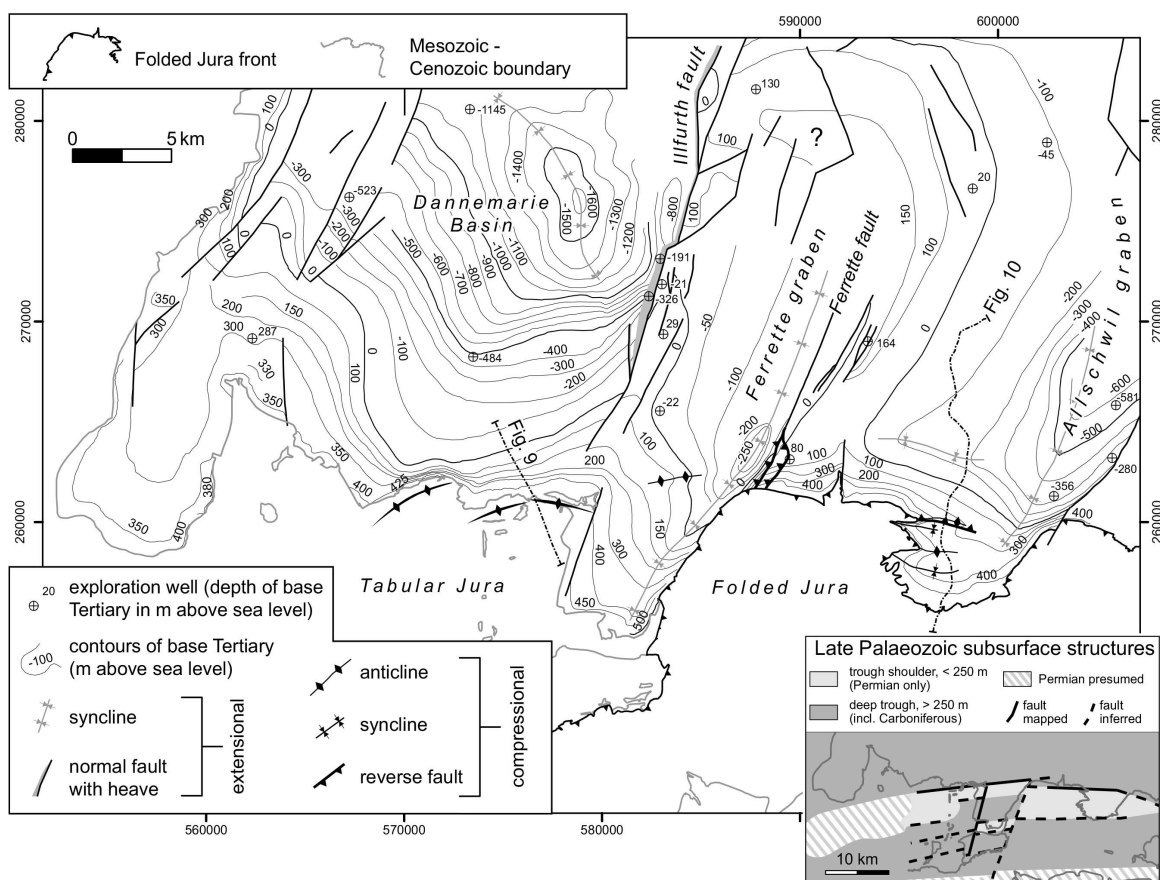
Ustaszewski és Schmid (2007) eredményei azért is érdekesek, mert tanulmányukban a deformáció mértékére $2 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ értéket becsültek, ami megközelítőleg 6 nm/m/év értéknek felel meg. Az értekezésben a GNSS adatok elemzésével hasonló, 5 nm/m/év körüli deformációkat mutattam ki.



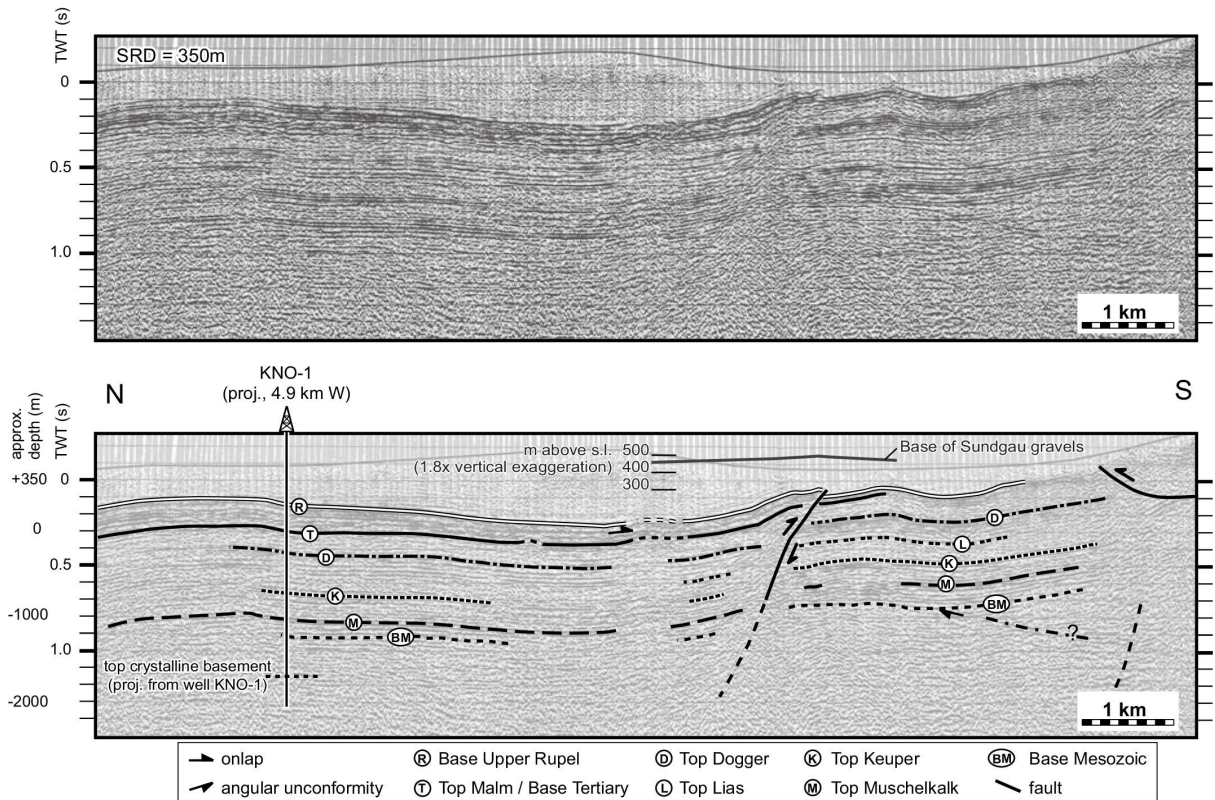
1. ábra. A Felső Rajna-árok főbb historikus és instrumentális földrengése (Fracassi és mtsai., 2005 nyomán). A szürke rombuszok a $2 < Mw < 3$, míg a piros rombuszok az $Mw > 3$ magnitúdójú földrengéseket jelölik. A fészekmechanizmusok megoldásai Bonjer (1997) nyomán.



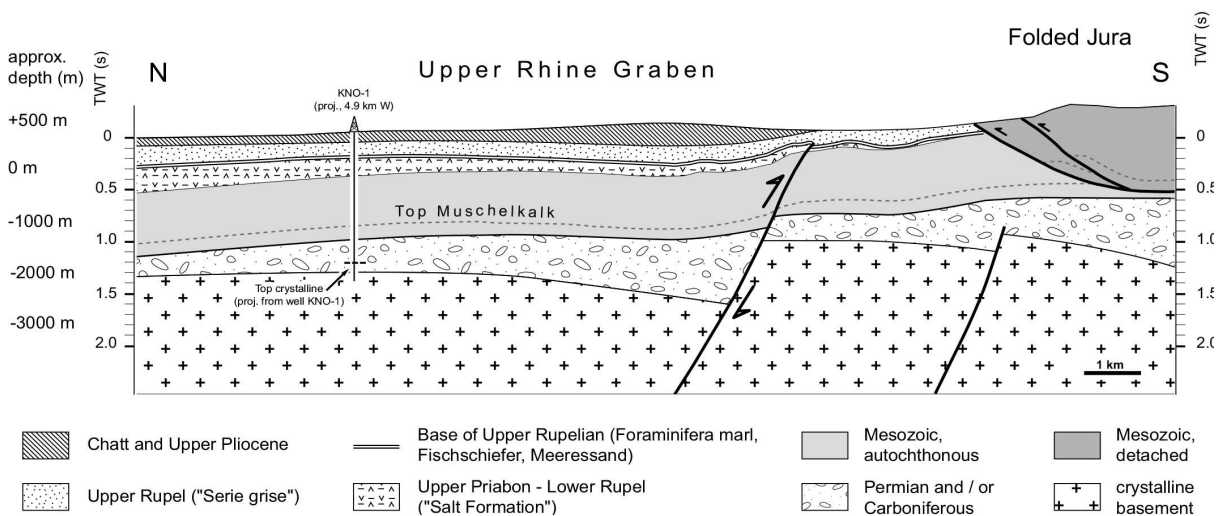
2. ábra A Felső Rajna-árok, a Bresse-árok és a Rajna-Bresse Átmeneti Zóna (RBTZ) jelenkori kinematikája (Ustaszewski & Schmid, 2007)



3. ábra A harmadidőszaki alapkőzet szintvonalas térképe. Az ábra jobb oldalán található a 4. és 5. ábrán bemutatott szeizmikus szelvény (Fig. 10.). Ustaszewski és Schmid (2007) nyomán.



4. ábra. A 3. ábrán Fig. 10. felirattal azonosított szeizmikus szelvény és interpretációja. Ustaszewski és Schmid (2007) nyomán.



5. ábra. A 4. ábrán bemutatott szeizmikus szelvény interpretációja. Ustaszewski és Schmid (2007) nyomán.

2. kérdés: Ha az időjárásvédő kupolák hatása egy sima offszet, akkor a mozgásvizsgálatoknál fontos differencia-számításokban miért érdekes ez?

Az értekezés 3.4 fejezetében bemutatott eljárás kidolgozásának előzménye, hogy a Felső Rajna-árok területén végrehajtott ismételt mozgásvizsgálati GNSS kampányok eredményeinek összevetése során jelentős koordinátaváltozásokat tapasztaltam azokon állomásokon, ahol a GNSS antennákat kicserélték. A meghatározott elmozdulásvektorokban ezek az ugrások jelentős hibákat okoztak. A hiba kijavítására alkalmazott egyik eljárás az, hogy egy hosszabb időszakra elvégezzük az állomás koordinátáinak meghatározását az antenna csere előtt és után, majd – feltételezve, hogy időközben a pontjel mozdulatlan

maradt – a két koordinátamegoldás különbségeként előállítjuk az antenna cseréhez köthető offszeteket. Az értekezésben egy másik megoldást alkalmaztam, az antennák egyedi abszolút kalibrálásával előállított fáziscentrum modellekkel hajtottam végre a koordinátabecsléseket. Bemutattam, hogy ezekkel a modellekkel az antennacseréből eredő látszólagos koordinátaugrás eltávolítható a helymeghatározás eredményéből.

A mozgásvizsgálati kampányok megszervezésének egyik alapvető szabálya, hogy az egyes mozgásvizsgálati pontok mindig ugyanazokkal az antennákkal hajtsuk végre a méréseket. Ily módon a különböző időpontokban mért koordinátákból számított differenciákból kiejthetjük a fáziscentrum külpontosságának a hatását.

Ez a szabály azonban hosszú távon (több évtizeden keresztül) végzett kampány jellegű mozgásvizsgálati mérések esetén egyre nehezebben tartható be. Példának okáért a hazai GPS Geodinamikai Hálózat ismételt méréseit már évtizedek óta ugyanazokkal az antennákkal mérik e követelmény miatt, ami ahhoz vezet, hogy sem a GLONASS, sem a Galileo, sem a Beidou műholdakat nem tudjuk kihasználni a hálózat mérése során. Emellett egyre inkább nő annak a kockázata, hogy egy-egy antenna meghibásodik és egy másik antennával kell mérnünk egy-egy ponton. Ez óhatatlanul koordinátaugrásokhoz vezetne, ami nagy nehézséget okozna az eredmények értelmezése során. Ráadásul az antenna meghibásodása esetén az a lehetőség sem áll fenn, hogy a mozgásvizsgálati ponton a régi és az új antennával mérve meghatározzuk a látszólagos koordinátaváltozás mértékét.

Annak érdekében, hogy évtizedeken átívelő kampány jellegű mozgásvizsgálatok eredményeit konzisztens módon tudjuk összehasonlítani és a mozgásokat ki tudjuk mutatni, az antennák egyedi, abszolút kalibrációjával előállított fáziscentrumainak a modelljeire van szükség.

3. kérdés: „Hogyan ítéli meg a jelölt. a 2.5 altézisben megfogalmazott idő- és térbeli modellfelbontás mennyiben alkalmas a légiforgalom számára történő gyakorlati alkalmazásra? Másképp kérdezve: van-e ma – vagy pláne a módszer eredeti, 2014-es publikálásakor – hasonló tér- és időbeli felbontást adó módszer a vízgőztartalom és a késleltetések becslésére?”

A 2.5 altézisben megfogalmazott egy órás időbeli felbontás a troposzférikus késleltetések és az integrált vízgőztartalom meghatározására vonatkozik. A térbeli felbontás ebben az esetben megegyezik a GNSS állomáshálózat közepes ponttávolságával, azaz megközelítőleg 70 km. Az eljárás és a közel valósídejű feldolgozórendszer célja elsődlegesen a légköri vízgőztartalom monitorozása és ezen értékek biztosítása az időjárás előrejelző modellek számára. Az adatok közvetlen felhasználása a légi navigációban eddig nem merült fel.

A léginavigációs gyakorlatban a troposzférikus késleltetések modellezése döntően az értekezésben bemutatott ún. vak RTCA modellel történik. Mivel ez a modell historikus meteorológiai adatokból levezetett paramétereken alapul, nem igényli a meteorológiai paraméterek mérését. Nagyobb pontossági igények esetén általában földfelszíni meteorológiai paraméterek mérésével a troposzférikus késleltetés modellek tovább pontosíthatók, de ekkor valósídejű kommunikációs kapcsolatot kell kiépítenünk a meteorológiai mérőállomás és a légijárművek között.

Az elmúlt években az Általános és Felsőgeodézia Tanszék egy nemzetközi konzorcium tagjaként részt vett egy K+F projektben, melyben az Európai Űrügynökség számára új, a légi navigációban is alkalmazható troposzféra késleltetés modellt fejlesztettünk ki. Az alapelv itt is az volt, hogy a modell akár in situ meteorológiai mérések nélkül, akár azzal is használható legyen. A meteorológiai paraméterek szezonális változásait egy $1^\circ \times 1^\circ$ -os globális rácsra határoztuk meg.

Ennek fényében a közel valósídejű troposzférikus késleltetés becslését végző rendszer megközelítőleg 70 km-es térbeli felbontása az előbb említett légi navigációban alkalmazandó modellel egyenértékűnek tekinthető. Az időbeli felbontást tekintve azonban figyelembe kell vennünk a becslések látenciáját is.

Míg a földi meteorológiai mérésekkel kiegészített RTCA modellhez a meteorológiai paramétereket gyakorlatilag valós időben el lehet juttatni a légi járműre, addig a közel valós idejű GNSS feldolgozórendszer mintegy 1 órás látenciával határozza meg a troposzférikus késleltetést. Első látásra úgy tűnik, hogy emiatt az ily módon becsült troposzférikus késleltetések nem alkalmazhatók a léginavigációban. Napjainkban azonban egyre több kutatás foglalkozik azzal, hogy a mesterséges intelligencia eszköztárát miként lehet felhasználni a közel valós idejű GNSS feldolgozásból származó troposzférikus késleltetések idősorainak extrapolálására a valós idejű alkalmazások számára. E téren még nem végeztem vizsgálatokat, de a kutatási terveim között szerepel ilyen vizsgálatok elvégzése.

Bízva abban, hogy a fentiekkel kellően megalapozott válaszokat sikerült adnom az opponensi véleményben feltett kérdésekre szeretném ismét megköszönni a bíráló értékes gondolatait!

Budapest, 2022. szeptember 16.



Rózsa Szabolcs
habilitált egyetemi docens

Felhasznált irodalom

- Bonjer, K. P. (1997). Seismicity pattern and style of seismic faulting at the eastern borderfault of the southern Rhine Graben. *Tectonophysics*, 275(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00015-2)
- Fracassi, U., Nivière, B., & Winter, T. (2005). First appraisal to define prospective seismogenic sources from historical earthquake damages in southern Upper Rhine Graben. *Quaternary Science Reviews*, 24(3–4 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.05.009>
- Ustaszewski, K., & Schmid, S. M. (2007). Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction. *Swiss Journal of Geosciences*, 100(2), 293–312. <https://doi.org/10.1007/s00015-007-1226-0>