

B 4224

***A karsztvíz beszivárgás éghajlati adottságainak
vizsgálata a Dunántúli-középhegységben 1950-2000***

Doktori (PhD) értekezés tézisei

FOGARASI SÁNDOR



Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi Kar
Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék

Szeged, 2005

1. Előzmények, célkitűzések

A karbonátos kőzetekben tárolt víz elégíti ki az emberiség mintegy $\frac{1}{4}$ -ének lakossági és ipari szükségleteit. A karsztokat kétségtelen természet- és környezetvédelmi értékeik mellett elsősorban ez teszi kutatási szempontból fontossá. Az elmúlt évtizedekben egyrészt világszerte jelentősen növekedtek a vízigények, a felhasználható készletek jelentősége tehát megnövekedett. Másrészt a túlhasználat következményeként a karsztok szolgáltatták az emberi fogyasztásra alkalmas felszín alatti vizek csökkenésének (mennyiségi fogyás és minőségi romlás) talán leglátványosabb példáit.

Mára egyértelművé vált a felszín alatti vízkészletek fenntartható hasznosításának igénye. Ez egy karsztos víztároló esetében a vízmérleg pontosítását jelenti, mind a bevételi, mind a kiadási oldalak tisztázását a kitermelhető vízmennyiség meghatározása érdekében.

A Dunántúli-középhegység „mélykarszt”-ja Közép-Európa legjelentősebb ivóvízbázisát, a hazai karsztvíz készlet mintegy 70%-át rejt. Jelenleg mintegy 1,5 millió ember teljes vízellátását oldják meg innen, de a vízrendszer elméletileg ennél nagyobb (kb. kétszeres) terhelést is elbírna, mivel legalább 10 m³/perc körüli vízbevétellel rendelkezik. Ugyanakkor bizonyos szempontból már most is túlhasználnak tekinthető a víztest: egyrészt az elmúlt évtizedek tudatos vízszint süllyesztésének még mindig jelen vannak a következményei, másrészt a források olyan felszíni vizeket táplálnak vagy remélhetőleg táplálni fognak, melyek megőrzése társadalmi érdek. A vízhasználat körül kialakult konfliktushelyzetben elengedhetetlen tisztázni azt a vízmennyiséget, amely megosztható a különböző felhasználók között.

A hazai karszttudomány világviszonylatban is kiemelkedőnek, a Dunántúli-középhegység pedig megkutatottnak számít, a vízmérleg teljes tisztázása azonban mindezidáig nem történt meg. Ennek véleményem szerint az a fő oka, hogy a kérdéssel főleg hidrogeológusok foglalkoztak, akik kimerítve szakterületük lehetőségeit, a lehetséges legnagyobb mértékben pontosították a kiadási oldalt. Ezzel azonban nem sikerült szinkronba hozni a vízbevételeket, tehát a beszívárgás mennyiségének egzakt meghatározása elmaradt.

Ezt tűztem ki alap célnak: a beszívárgás éghajlati feltételeinek vizsgálatát, ezek időbeli változását. A disszertáció tehát alapvetően klimatológiai munka, mely egy hidrogeológiai probléma megoldását szerette volna elérni. A vizsgálatok során kapott eredmények hatására azonban belevettem a klímaváltozás kérdését is, hiszen ez a vízhasználat jövőbeli lehetőségeit nagymértékben befolyásolhatja.

Célkitűzéseim voltak:

- a csapadékhullás súlypontjainak meghatározása, ezek kapcsolatának vizsgálata a makroszinoptikus helyzetekkel
- a beszivárgás meghatározásához a legmegfelelőbb beszivárgás számítási módszer megtalálása
- a beszivárgás és az azt meghatározó éghajlati paraméterek területi rendszerének elemzése
- a beszivárgás és éghajlati tényezőinek, illetve ezek területi rendszerének változása az elmúlt 50 évben, illetve történelmi távlatokban
- az éghajlat változási tendenciájának, fázisainak megállapítása
- csapadék és a hőmérséklet orográfiai változásának tanulmányozása a térségben
- a fentiek alapján a vízmérleg bevételi oldalának pontosítása, és az így kidolgozott hipotézis alátámasztása

2. Alkalmazott módszerek

2.1. Csapadék vizsgálat hely kiválasztásával

A munkát a beszivárgás legfontosabb elemének, a csapadéknak a részletes vizsgálatával kezdtem. Egy állomás, Bakonybél-Somhegypuszta (350 m) 1991-95 közötti tehát 5 éves csapadék adatait dolgoztam fel. Az említett állomás reprezentatívnak tekinthető a Dunántúli-középhegység karsztos vízgyűjtőjére. A kiválasztott időszakban szerepel mind az 1970-80-as évek száraz periódusának vége, mind az 1990-es évek második harmadától megfigyelhető csapadékosabb évek eleje. Mindezek alapján a vizsgálatok kiterjeszthetők térben és időben egyaránt. Ezt az eredmények (pl. csapadékos napok száma) időbeli stabilitása is alátámasztja.

Meghatároztam a csapadék időbeli és makroszinoptikus helyzetek szerinti eloszlását. Utóbbiak egy részét más kategóriába kellett tennem, miután a Péczely-féle besorolási eljárás véleményem szerint nem mindig alkalmas a kárpát-medencei időjárási helyzet megállapítására. Végül megállapítottam a száraz és a csapadékos évek csapadékeloszlás és intenzitás, valamint makroszinoptikus helyzetek (előfordulás, csapadékszolgáltatás, stb.) szerinti különbségeit.

2.2. A beszivárgás és elemeinek térbeli és időbeli változása

2.2.1. Beszivárgás számítási módszer

A korábbi vizsgálatok és szakirodalmi adatok alapján egyértelműnek tűnt, hogy *Maucha László „éghajlat-kapcsolati” módszere* a leginkább alkalmazható vizsgálatom esetében. A szakirodalmi adatok, illetve saját vizsgálatok alapján két rész eljárását azonban módosítottam:

- a *téli csapadék korrekció* esetében a bázis értéket Jósvafő téli csapadékatlagára jelentette, nem az aktuális Dunántúli mérőhely hasonló adata; a számítás ugyanis így érzékeny a terület Aggteleknél magasabb téli csapadéértékeire
- a *tárolási korrekciót* az éves csapadék helyett a beszivárgás alapján számítottam; ez logikus, hiszen itt a korábban a karsztba került vízmennyiség meghatározása a cél, melyet nyilván a korábbi beszivárgások döntenek el, melyek a korábbi évi csapadékoknak változó hányadai)

2.2.2. A beszivárgáshoz szükséges adatok

A számítási módszeren kívül *csapadék* adatok, illetve *beszivárgási folt* adatok kellettek.

- A beszivárgás bázis értékeit a vizsgált terület 23, a karsztos területekhez leginkább hasonló *éghajlatú állomásának havi bontású, 50 éves csapadékadatai* jelentették. Bizonyos vizsgálatok időtartama, illetve a felhasznált állomások csoportja ettől eltért, ezeket a disszertációban jeleztem.
- A beszivárgási területek megállapítására az *ALUTERV-FKI 1980-as években kidolgozott térképét* használtam. Az egyes mérő állomásokhoz szubjektív módon rendeltem hozzá a beszivárgási foltokat (összesen 370-et, 1492 km² kiterjedésben), a területre vonatkozó éghajlati ismereteimet felhasználva.

2.2.3. A beszivárgás és egyes paramétereinek időbeli változása

Az éves csapadékokat, a téli csapadékokat és az éves beszivárgás értékeit *Excel* programmal számoltam ki, az eredményeket grafikonokon, diagramokon, illetve *térképeken* ábrázoltam.

2.2.4. A beszivárgás területi rendszerének időbeli változása

Ennek a külön vizsgálatnak az ötletét az előző vizsgálat eredményei adták: egyértelműnek tűnt, hogy mind a csapadék, mind a beszivárgás területi eloszlásában változások történtek a vizsgált 50 év során.

A változások kimutatására egy *saját számítást* dolgoztam ki, mely kifejezetten a területi változásokra érzékeny. Eredménye egy hányados, melynek értéke negatív anomália esetében 1 alatti, pozitív eltérésnél 1 feletti. Ez a vizsgálat az 1950-1997 közötti időszakot ölelte fel, 23 állomás esetében határoztam meg az éves beszivárgást, és ezt évenként térképen ábrázoltam.

2.2.5. A beszivárgási elemek változási tendenciáinak kontroll vizsgálata

2.2.5.1. Mediterrán Index vizsgálat

A megelőző két vizsgálat alapján szükségesnek tűnt a vélt módosulásokat viszonylag egzakt módon kimutatni képes „*mediterrán index*” (MI) vizsgálat elvégzése a területre. A számítások a regionális megfeleltetés, illetve a megbízhatóság, valamint az adatsorok hossza alapján 3 csoportban történtek:

- 25 állomás 1950-2002 közötti
- Budapest 1910-2003 közötti
- Buda, majd Budapest 1780-2003 közötti adatai alapján

A számítási módszer havi bontású csapadékadatokat igényel, tehát lényegében a beszivárgás számításhoz hasonló adatbázissal határoztam meg az MI értékeket is, szintén Excel programban.

2.2.5.2. A kimutatott változások megfeleltetése globális és regionális tendenciákkal

Ez a vizsgálat a különböző, klímaváltozással, illetve módosulással kapcsolatos szakirodalmak átvizsgálását, eredményeik párhuzamba állítását jelentette a disszertáció Dunántúli-középhegységre vonatkozó vizsgálati eredményeivel.

3. A beszivárgás és elemeinek orográfiai változása

A szakirodalmi tájékozódást követően megindultak az extrapolációs eljárás kidolgozásának lépései. Alapvetően három dolgot kellett tisztázni: a megvizsgálandó terület kiterjedését, a legmegfelelőbb vonatkoztatási intervallumot és a leghatékonyabb számítási módszert.

3.1. A terület kijelölése

Nyilvánvaló volt, hogy az extrapolációt a Dunántúli-középhegység egy részvizgyűjtőjére kell kipróbálni.

- Emellett szólt az, hogy a Tatai-források vízforgalmi elemei a legismertebbek a térségben és ebből következik, hogy leginkább itt ellenőrizhetők a kapott eredmények.
- A vízgyűjtő terület egyébként nagyjából reprezentálja az egész Dunántúli-középhegységet, a módszer beválása esetében tehát nem lesz nehéz kiterjeszteni azt.
- Amennyiben viszont nem bizonyul helytállónak az eljárás, felesleges a teljes karsztos vízgyűjtőre elvégezni.

3.2. A vonatkoztatási intervallum meghatározása

Vonatkoztatási intervallum szempontjából egy év tűnt legcélravezetőbbnek.

- A vizsgálatok során azt állapítottam meg, hogy egy év adatában az egyes csapadék események során fellépő gyakran jelentős (és nehezen interpolálható) különbségek elmosódnak, ugyanakkor megmaradnak olyan karakterek, melyek a sokévi átlagban már nincsenek jelen.
- Megerősíti a használt periódus helyességét, hogy a területen a fennsíkok jellemzőek (melyeken belül jelentős módosulások nincsenek), és hogy illeszkedik a beszivárgási eljárás időegységéhez is.

3.3. A számítási módszer

- Számítási módszernek nem az először kiválasztott AURELHY eljárást alkalmaztam, mert a részletesebb vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy a Dunántúli-középhegység esetében az egyszerű extrapoláció a célravezetőbb. Ennek alapvető oka az volt, hogy az AURELHY-t lényegesen magasabb, bonyolultabb felszínű és nagyobb területi kiterjedésű hegységre (Massife Central) dolgozták ki. Amennyiben ezt használtam volna, többszörös mennyiségű, felesleges adatot igénylő eljárást kellett volna kiviteleznem, melynek során valószínűleg elvesztek volna a vizsgált terület halványabb, de sajátos orográfiai jellemvonásai. Így lényegében egyszerű extrapolációra került sor.
- Az alkalmazott, kriggelésnek nevezhető módszerhez szükséges volt az alapadatok megfelelő összeválogatása, hiszen az egyszerű extrapoláció csak megfelelően homogén adatcsoportra ad reális összefüggést.
- Ezt követően megállapítottam a nagyobb beszivárgási foltok átlagos tengerszint feletti magasságait, és összesen öt területi csoportban elvégeztem az extrapolációkat. Ez 100 év csapadékanak, téli csapadékanak, majd beszivárgásának megállapítását jelentette az említett öt területre. (Gerecse, Vértes1, Vértes2, Vértes3, Bakony)

3.4. Tesztelés, felhasználás, kiterjesztés és ennek ellenőrzése

- A kapott éghajlati- és beszivárgási adatokat a vízmérleg egyes elemeivel történő megfeleltetés igazolta.
- Az extrapolált csapadék adatok alapján számolt beszivárgás segítségével több, eddig vitatott hidrogeológiai kérdést is tisztáztam. A kialakított modell segítségével megfelelő prognózisok készíthetők a Tatai-források vízgyűjtőjére.
- A tesztelés eredményei alapján az extrapolációkat kiterjesztettem a teljes Dunántúli-középhegységi vízgyűjtőre. Az így kapott beszivárgási értékek alapján meg tudtam indokolni a szakirodalmak kiadási tételeit, gyakorlatilag teljes volt az összhang az általam számított bevétellel. Az extrapoláció helyessége tehát itt is megerősítést nyert.

4. Eredmények

A disszertáció a Dunántúli-középhegység beszívargási viszonyaival, ezek térbeli, magassági és időbeli változásaival foglalkozik a vízmérleg pontosítása céljából.

A téma jelentőségét, a kitűzött célokat a bevezetőben fejti ki, majd a kutatástörténeti részben mindkét érintett tudományterület (mezometeorológia, karszthidrológia) kutatási lehetőségeit, nemzetközi és hazai fejlődését áttekinti. A fejezet alapján egyértelmű, hogy mindkét terület eredményei lehetővé teszik a kitűzött célok megvalósítását. Az alkalmazott módszereket az aktuális fejezetek, alfejezetek elején ismerttettem.

Először a csapadékhullást napi szinten vizsgáltam, 5 éves időtartamra, egy, a teljes beszívargási területre reprezentatívnak tekinthető állomás, Bakonybél adatai alapján. A megfigyelés során megállapítottam, hogy:

- A Dunántúli-középhegység karsztos vízgyűjtőin – szemben az országos átlaggal (1/3) – csaknem minden másnap számíthatunk csapadékra, meglehetősen nagy biztonsággal.

- A csapadékos napok nagy száma ellenére a ténylegesen lehulló vízmennyiség 4/5-e a vizsgált időszak 1/8-a alatt hullott le, tehát meglehetősen koncentrált jelenségről beszélhetünk.

- Ha a csapadék tevékenység makroszinoptikus helyzetek szerinti eloszlását vizsgáljuk, még koncentráltabbnak találjuk: a csapadék 95%-a az időszak nem egészen 1/3-a alatt előforduló ciklonális helyzetek során hullik, melyek közül kiemelkedik az Péczely 1-es, 6-os és 13-as. (Összesen csaknem 2/3-át adják a csapadéknak!)

- A disszertáció véleménye szerint a vizsgált terület időjárási helyzeteinek meghatározására legjobban a Hess-Brezowsky-módszer használható.

- A napi szinten vizsgált időszak során a csapadék mennyiségének növekedését nem a csapadékot adó makroszinoptikus helyzetek gyakoribb előfordulása, hanem azok intenzívebbé válása okozta. (Azaz több alkalommal adtak jelentős csapadékot.) Az egy alkalommal lehullott csapadékok intenzitása viszont csökkent. Úgy tűnik, hogy előbbi megállapítások a csapadékos időszakokra általában vonatkoznak. Ez azt jelenti, hogy a több csapadék az egyenletesebb eloszlás következtében jobban tud hasznosulni mind a vegetáció, mind a karsztvíz-rendszer szempontjából, míg a száraz évekre a ritka, de heves csapadékok jellemzőek. (Illetve az 5 mm alatti napi értékek nagy száma.) Ez a tétel a további vizsgálatok során is megerősítést nyert.

A következő lépés a beszívargás és paramétereinek időbeli vizsgálata volt egy viszonylag hosszú, alapján véve 50 éves időtartamra. A cél a rendelkezésre álló, hiteles adatok alapján

történő értékek, ezek területi és időbeli változásainak meghatározása volt. A kutatás eredményei:

- A vizsgált beszivárgási területek 1950-2000 közötti átlagos évi csapadéka a felhasznált állomások adatai alapján 691 mm, téli csapadéka 293 mm, beszivárgása 195 mm ($9,5 \text{ m}^3/\text{perc}$) volt.

- A beszivárgás éghajlati paramétereiben az 1970-es évektől kezdve jelentősnek nevezhető változások voltak megfigyelhetők, és ez a folyamat az 1990-es években felgyorsult.

- Az évi csapadék az 1970-es évek szárazságát követően az utolsó évtizedben átlagosan növekedett, de jellemzőbb rá a bizonytalanság fokozódása. A téli félévi csapadék az 1990-es években egyértelműen növekedett. Utóbbi tény és a csapadék-anomáliák területi eloszlása (déli, délkeleti területek fokozott csapadéknövekedése), valamint más éghajlati paraméterek (pl. évi középhőmérséklet) alakulása a mediterrán jelleg erősödésére utalnak. Ez a beszivárgás szempontjából alapvetően kedvező.

- A csapadék változékonyság említett növekedése a területen az utolsó 10 évben felgyorsulni látszik. Az 1990-es években mind a beszivárgás egyes paramétereiben, mind magában a beszivárgásban korábban nem tapasztalt értékek, illetve ingadozások fordultak elő. Bizonyos meteorológiai jelenségek korábban nem tapasztalt időbeni egymásra következése, illetve egyidejű egymásra halmozódása a beszivárgás nagy mértékű évenkénti ingadozásához vezetett, amit a vízgazdálkodásnak figyelembe kell vennie. (Például az újra induló források hozamát időlegesen - alacsonyabb szinteken fakadók -, vagy tartósan - magasabb tengerszint feletti magasságban elhelyezkedők - erősen ingadozóvá teheti.) Az 1990-es évtizedben a korábbi 40 év során rendkívül stabil beszivárgási értékeket mutató helyek váltak egyre labilisabbá.

- Az éves csapadék, a téli csapadék és a beszivárgás ingadozása a tengerszint feletti magassággal, illetve délnyugat felé is csökken, tehát a nagyobb átlaggal rendelkező területek értékei egyúttal stabilabbak is. A változékonyság ilyen eltérése a hegylábi, illetve hegyvidéki állomások esetében megkérdőjelezi a hegylábi állomások adatainak extrapoláció nélküli felhasználását a hegytetőn kialakuló beszivárgás számításánál. Megbízható extrapoláció csak a hegység délnyugat-északkelet irányban egymás után következő „szektorain” belüli hegyoldali mérőállomások esetén lehetséges.

- A beszivárgás már említett paramétereinek fokozódó instabilitása a nagy magasságú állomásokon is megfigyelhető volt, különösen az 1990-es években.

- A beszivárgási vizsgálatok alátámasztották a hidrogeológiai érvek alapján már szintén korábban megfogalmazott feltevést (Böcker, T. 2000) (Fogarasi, S. 2001), hogy a Bakony a középhegység karsztvízrendszerének fő utánpótlási területe. Ez a beszivárgási területek

eloszlására, illetve az évi csapadékatlagokra vonatkozó feltételezés a részletes csapadék- és beszivárgás vizsgálatok alapján egyértelmű megerősítést nyert. A Bakony vidéke nem egyszerűen nagy csapadékaival (és különösen téli csapadékaival) jelenti a teljes karsztvízrendszer legjelentősebb betápláló területét: nagy beszivárgási hozamai rendkívül stabilak is.

- A disszertáció szerint a Móri-árok hidrogeológiai határa (Böcker, T. 1976) egyben éghajlati-beszivárgási választót is jelent, azzal a különbséggel, hogy a Tési-fennsík már a száraz, észak-keleti területekhez tartozik, a határvonal tehát észak-déli irányú. Hidrogeológiai érv is szól az előbbi terület Vérteshez sorolása mellett: az itt beszivárgó vizek a Móri-árokban törtek felszínre.

Az előző pontban említettek indokolták a beszivárgás területi rendszerének 50 éves vizsgálatát, mely megerősítette a korábbi eloszlások megváltozásáról alkotott feltételezést. A beszivárgás területi eloszlásának változása tűnt a klíma kilengések kimutatására a legérzékenyebb indikátornak. A beszivárgás – miután több éghajlati elem eredője – hatványozottan érzékeny ezek változására. Különösen igaz ez a területi anomáliák alakulására. Megállapítások:

- Az utóbbi napfoltciklus két, eltérő jellegű szakaszát a beszivárgás korábbi területi rendjének teljes megváltozása vezette be.

- A beszivárgás területi eloszlásában már akkor elkezdődött a korábbi rendszer felborulása (1950-es évek vége), amikor még senki nem beszélt klímaváltozásról. A korábbi anomália-eloszlás teljes megszűnése illetve a korábban nem tapasztalt hosszúságú száraz periódus kialakulása (kb. 1970) egybe esik a globális felmelegedés kimutathatóvá válásával. Az 1990-es évek közepétől tapasztalt, korábban elő nem forduló anomália-mezők, illetve a nagyobb csapadék értékek szintén a globális felmelegedésnek egy új szakaszával függnek össze, mely Európában (és Észak-Amerikában) a Golf-áramlat gyengülésével és a mediterrán típusú csapadékeloszlás északabbra húzódásával, az évi középhőmérséklet emelkedésének megtorpanásával jellemezhető. A korábbi csapadékszállítási irányok áthelyeződése a vizsgált területen az 1990-es években kimutathatóvá vált.

- A beszivárgás területi anomáliáinak időbeli alakulása jellegében hasonló az abszolút beszivárgási értékek változásaihoz: nem állapítható meg egyértelmű tendencia, az eloszlások rendezetlensége viszont nő. Ez megerősíti az éghajlat és így a beszivárgás nagyobb mértékű kilengését a térségben.

- Az anomália mezők rendezetlenségének fokozódása a csapadék csökkenésével függ össze.

- A szakirodalmakban megjelenő véleményt, mely szerint az aszályhajlam fokozódása a nagytérési makrocirkuláció csökkenésével, illetve megváltozásával van összefüggésben, a dolgozat eredményei alátámasztják. A beszivárgás egyes paraméterei – így maga a beszivárgás is – időben is, térben is nagyságrenddel vált instabilabbá 50 év alatt. A részletes területi vizsgálat alapján ez egyre gyorsuló folyamatnak tűnik.

- A beszivárgási anomália mezők alakulása valóban a legérzékenyebb indikátora az éghajlati ingadozásoknak.

A beszivárgás és területi elemeinek időbeli és térbeli változásai alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a feltételezett folyamatokat az ún. „Mediterrán Index” vizsgálatával lehet a legegyszerűbb módon kimutatni. A munka során tett megállapításaim:

- Az MI vizsgálatok alapján szintén megerősítést nyert a szakirodalom korábbi vélekedése: a csapadékjárás összefüggésben áll a napfolt-ciklusokkal. A 30 év körüli periódus még a történelmi időkben is megállja a helyét. (pl. 1780, 1960, 1990)

- Az MI értékek alakulásának megfigyelése alátámasztotta azt a feltételezést is, hogy a Dunántúli-középhegység csapadékklimájában az 1970-es évektől kezdve jelentős anomáliák tapasztalhatók a korábbiakhoz képest, melyek az 1990-es években nagy mértékben erősödtek. Az időszak éghajlatának főbb vonásait (magas MI index, átlag feletti évi középhőmérséklet és átlag alatti évi csapadék, forró, száraz nyarak, az éghajlati elemek szélsőséges értékei, ezek váltakozása) úgy tűnik, sikerült meghatározni, analógiáit a vizsgálat kimutatta a történelmi időkben is. Az előbb leírt jelenségek következményeként egyértelműen instabilabbakká váltak a beszivárgás egyes elemei, abszolút értékeikben és területi eloszlásukban egyaránt.

- Elsősorban a téli csapadékok határozott megnövekedése alapján jelenthető ki a mediterrán jelleg határozott erősödése a területen.

- A kimutatott változások nemcsak a karsztvíz beszivárgás mennyiségét, időbeli- és területi eloszlását módosíthatják, hanem a teljes karsztrendszer degradációját, a karsztfejlődés dinamikájának megváltozását okozhatják. (Erózió fokozódása, talaj lemosása, karsztos ökoszisztéma megváltozása, vízi- és vízhez kötődő életközösségek degradációja, stb.)

A Dunántúli-középhegység karsztterületein kimutatott éghajlati változások alapvetően párhuzamba állíthatók a globális, illetve európai klímaváltozásra vonatkozó regionális megállapításokkal, megfigyelésekkel.

- Ez egyrészt bizonyos jelenségek (makrocirkuláció áthelyeződése, csapadék és más klímaelemek bizonytalanságának, instabilitásának növekedése) hasonlóságában nyilvánul meg. (Mindez természetesen nem jelent teljes egyezést, hiszen minden terület más és más.)

- A régió éghajlatában megfigyelt változások időben is megfeleltethetők a globális klímaváltozás feltételezhető kezdetével (1950-es évek) kimutathatóvá válásával (1970-es évek), illetve jelentős felgyorsulásával (1990-es évek).

A Dunántúli-középhegységnek a karsztos beszivárgási területekhez leginkább hasonló mérőállomások alapján számított beszivárgási értékei sem adták ki a vízmérlegnek a kiadási oldal alapján elfogadható minimális bevételi értékeit. (A hegylábi és hegyoldali állomások erősen különböző beszivárgási körülményeit a 4. fejezet is kimutatta.) Ez indokolta az 5. fejezet kutatásait, melyek során megpróbáltam matematikai módszerrel meghatározni a fennsíkok csapadék, illetve beszivárgási értékeit.

Ez a rész kutatás azért került a disszertáció végére, mert extrapolációkat alkalmazott, módszere így vitatható, jóllehet véleményem szerint a bemutatott érvek és kontroll vizsgálatok megfelelően alátámasztják helyességét. Eredményei a következők:

- A vizsgált terület specifikus okoknál fogva különlegesen jó példája az éghajlat magassággal történő változásának. Részben az előbb említett tényezők okozzák, hogy a csapadék kialakulását meghatározó ún. „meleg-nedves szállítószalag” gyakran halad át a területen a nagy mértékű kihullatáshoz kedvező, a hegység csapására merőleges vagy közel merőleges iránnyal.

- A téma kutatásának jelentőségét az adja, hogy a klíma elemek magassággal történő változása a karsztvíz bevételt is módosítja, kapcsolatuk exponenciális függvénnyel írható le.

- A magassági csapadéknövekedés kimutatására a Dunántúli-középhegység esetében nem az AURELHY módszer, hanem az egyszerű extrapoláció a leghatékonyabb, az összefüggés szempontjából homogén, hegyoldali állomások kiválasztásával.

- Az extrapoláció számítás időintervallumának az előzetes vizsgálatok alapján az éves egység tűnt.

- A disszertáció a Dunántúli-középhegység három fő területére (Bakony, Vértes három csoportban, Dunazug-hegység) dolgozott ki extrapolált csapadék adatokat, melyek alapján éves szinten megállapította a nyílt karsztos területekhez tartozó tényleges beszivárgási értékeket összesen 100 éves időtartamra.

- A csapadék magasság szerinti változása lényegesen eltér a Péczely által megfigyeltektől: alapján mintegy kétszerese utóbbiaknak, értékei nyáron magasabbak, a déli területeken és az északias oldalakon határozottabb a jelenség. Az eltérés oka valószínűleg az, hogy Péczely a hegylábi-völgyi állomásokat is belevette vizsgálatába, ezek viszont nem mutatnak orografikus csapadékeloszlást, sokkal inkább a helyi hatásokat tükrözik.

- Az orografikus csapadékképződés a területen a völgyek feletti hegyoldalakon, átlagosan 200 m-en indul meg, de a zárt medencékben, ellentétes lejtőkön gyors csökkenés figyelhető meg. (Pl. Tardos.) Ezért van az, hogy a lee-oldal gradiensei magasabbak.

- A dolgozat szerint a Bakonyban az mCc helyzetet kivéve a fennsíkok térségében alakul a csapadékmaximum, ritkán csúszik át a luv vagy a lee oldalra. Ez párhuzamba állítható más, kárpát-medencei analógiákkal.

- A fennsíkok, tetőrégiók meglehetősen homogének a csapadékeloszlás szempontjából, ugyanez igaz a hasonló kitettségű oldalalakra is. A Dunántúli-középhegységben – valószínűleg csekély magassága miatt – ritka a kitett oldalakon a csapadék visszacsökkenése.

- A disszertáció szerint a korábbi szakirodalmi álláspont, mely szerint a Dunántúli-középhegységben az észak-nyugati oldalak csapadékosabbak valóban fennállt az elmúlt 100 év során. Ennek oka a csapadék szállító rendszerek nyugatias iránya lehet. Ez a többlet azonban csak töredéke a korábban gondoltaknak és az utóbbi években valószínűleg eltűnt, a nagyobb csapadéértékek áttevődtek a délies oldalakra.

- Az elmúlt évtizedekben változás figyelhető meg a magassági gradiens alakulásában is: alapvetően csökkent, a nagyobb értékek áthelyeződtek az észak-nyugati oldalakra. A csökkenés a téli félévben kevésbé jelentős. Mindezek azt támasztják alá, hogy a csapadék kialakításában megnőtt a mediterrán, délies légtömegek és a helyi hatások szerepe. A gradiens általános csökkenése kedvezőtlen a beszivárgás szempontjából.

- Az extrapolált csapadékadatok helyességét a beszivárgás számolásában a Tatai-források területén az egyes vízmérleg elemek összhangba kerülése, illetve a vízgyűjtő kiterjedésének korrekt megállapítása bizonyította. Mindezek mutatják a hasonló vizsgálatok létjogosultságát.

A kapott csapadéértékekkel pontosított beszivárgás segítségével a korábbi szakirodalomban vitatott vagy nem megoldott hidrogeológiai kérdéseket is tisztázni lehetett:

- A Tatai-források vízbevétele természetes állapotban átlagosan 103, 5 m³/perc lehetett, melyből 25 m³/perc a felszín alatt távozott, 78 m³/perc a forrásokat táplálta. A beszivárgás 1/2-e a Bakonyból, 1/3-a a Vértesből, 1/6-a a Gerecséből származott.

- Sikertült meghatározni a források vízgyűjtőjét, mely véleményem szerint 193,5 km² karsztos beszivárgási területet jelent. Nem tartozik bele a Gerece nagy része, mely a külön egységet képező Dunaalmási-forrásokat táplálja. Ugyanígy elkülönül Dorog környéke is (Esztergom-Sárisápi-források). Az Oroszlány térségi fedőkarsztok viszont a Tatai-források vízgyűjtőjéhez tartoznak.

- Miután a rendelkezésre álló mért adatok (vízhozamok, vízszintek) megerősítették a csapadék extrapolációk és az így kapott vízmérleg helyességét, a munka kísérletet tett a vízszint

emelkedés előrejelzésére is a területen. Eszerint a jelenlegi kitermelés mellett Tata környékén a vízszint 139 m Bszf magasságig emelkedik fel 2020-25-re, a források eredeti hozamuk kb. 70%-át produkálják majd.

A munka további részében a hócsapadék, valamint más klímaelemek orográfiai változását vizsgáltam, a következő megállapításokra jutva:

- A beszivárgásban különösen jelentős hócsapadék magassággal történő növekedése meghaladja a teljes csapadék hasonló változásának mértékét. Ennek specifikus okai is vannak, melyek részben csak a vizsgált területen figyelhetők meg, következményük, hogy ez az ország leghavasabb vidéke.

- A munka keretében háromdimenziós csapadék séma került kidolgozásra, mely a csapadék mennyiségének változásával a front haladására merőleges irányban is számol (a párhuzamos irányú és a magasság szerinti különbségek mellett).

- A vizsgált területen a hőmérséklet magassággal történő csökkenése is kiemelkedő, télen valószínűleg itt található a legmagasabb gradiens a Kárpát-medencében.

- Az evapotranszspiráció csökkenése a magassággal nagyobb az eddig gondoltnál, mert a folyamat fő időszakában (nappali órák) a hőmérsékleti gradiens lényegesen magasabb a napi átlagnál.

Miután a csapadék extrapoláció helyességét a Tatai-források esetében a vizsgálat alátámasztotta, kiterjesztettem a teljes Dunántúli-középhegységi karsztvízgyűjtőre. Ennek a munkának az volt a célja, hogy a főkarszt vízmérlegét pontosítsa. Eredményei:

- Az 1492 km²-nyi beszivárgási terület átlagos tengerszint feletti magassága 450,9 m, a lehullott (extrapolált) átlagos csapadék 851 mm, az átlagos téli csapadék 373 mm volt. (1901-2000)

- A Dunántúli-középhegység főkarsztjának 100 éves (1901-2000) átlagos beszivárgása 225 mm/év (az évi csapadék 34%-a), 750 m³/perc volt.

- A Bakony szerepe a beszivárgásban még a korábban gondoltaknál is jelentősebb.

- Az így kiszámított beszivárgás összhangban van legújabb hidrogeológiai szakirodalmak vízkiadási tételeivel, feloldja vízmérlegeiknek az alábecsült beszivárgásból eredő ellentmondásait. Az extrapolációs módszer tehát itt is megerősítést nyert.

A témában eddig megjelent publikációk

1. *Fogarasi, S.* (1995): A Dunántúli-középhegység karsztvízrendszerének modellje; Modellek a természetföldrajzban, Acta Geographica Szegediensis Különszáma, Szerk. Mezősi Gábor, JATE, Szeged, pp. 32-37.
2. *Fogarasi, S.* (1997): A Tatai-források vízrendszere (Bányászati és Kohászati Lapok Közlésre elfogadta)
3. *Fogarasi, S.* (1998): A Dunántúli-középhegység karsztvízrendszerének modellje II.; VI. Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia, Budapest, 1998. május 27-29; Program, Előadások összefoglalói pp. 128.
4. *Fogarasi, S.* (1999): Infiltration in the Transdanubian mountains, Hungary; Essays in the Ecology and Conservation of Karst; Edited by Ilona Bárány-Kevei and John Gunn; International Geographical Union, Commission Sustainable Development and Management of Karst Terrains, Szeged-Budapest-Miskolc, Hungary, pp. 212-218.
5. *Fogarasi, S.* (1999): A Dunántúli-középhegység éghajlati vizsgálata a karsztvízrendszer szempontjából; Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 13., Szerk: Kircsi, A.-Pongrácz, R., Meteorológus PhD hallgatók II. Országos Konferenciája, Bp., pp. 9-13.
6. *Fogarasi, S.* (1999): A karsztvíz szerepe az Által-ér vízrendszerében; „A táj és az ember geográfus szemmel”- Geográfus PhD hallgatók II. Országos Konferenciája, Szeged (CD publikáció)
7. *Unger, J. - Botlyán, Zs. - Sümegi, Z. - Gulyás, Á. - Fogarasi, S. - Sódar, I.* (1999): A Model for the Maximum Urban Heat Island in Szeged, Hungary; A Szombathelyi Berzsenyi Dániel Tanárképző Főiskola Tudományos Közleményei, Természetudományi Füzetek 4., Szerk.: Veress, M. - Puskás, J. Szombathely, pp. 31-39.
8. *Fogarasi, S.* (2000): A karsztvízbeszivárgás mezőinek módosulásai a Dunántúli-középhegység területén; Karsztfejlődés V., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, pp. 195-211.
9. *Fogarasi, S.* (2001): Analysis of Precipitation in the Bakony mountains; Acta Climatologica Et Chronologica Tomus XXXIV-XXXV., Curat: Ilona Bárány-Kevei, Szeged (Hungary), pp. 69-81.
10. *Fogarasi, S.* (2001): A beszivárgás változásának éghajlati okai a Dunántúli-középhegységben; Karsztfejlődés VI., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, pp. 71-81.

11. *Fogarasi, S. (2001): Vízellátás és vízvédelem: az Észak-Dunántúli Vízmű Részvénytársaság tevékenysége; Karsztfejlődés VI., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, pp. 83-102.*

12. *Fogarasi, S. (2001): Visszatérnek-e a Tatai források? II. Magyar Földrajzos Konferencia poszterelőadása, Szeged (CD-publikáció)*

13. *Fogarasi, S. (2002): A Katona-forrás feltörésével kapcsolatos kérdések; Karsztfejlődés VII., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, pp. 129-139.*

14. *Fogarasi, S. (2004): A Mediterrán Index változása és kapcsolata más éghajlati elemekkel a Dunántúli-középhegység karszterületein; Karsztfejlődés IX., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, pp. 251-268.*