

# A KLÍMAVÁLTOZÁS SEKÉLY FELSZÍN ALATTI VIZEKRE GYAKOROLT KÖZVETLEN ÉS KÖZVETETT HATÁSAINAK A VIZSGÁLATA, MÓDSZERTANI FEJLESZTÉS ÉS ORSZÁGOS KITERJESZTÉS

---

Készítette a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat  
a KEHOP-1.1.0-15-2016-00007 azonosítószámú „NATÉR  
továbbfejlesztése” projekt keretében

---



**NAKFO**

NEMZETI ALKALMAZKODÁSI KÖZPONT FŐOSZTÁLY  
Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat

2019

**SZÉCHENYI** 2020



Európai Unió  
Kohéziós Alap



Készítette:

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat  
Nemzeti Alkalmazkodási Központ Főosztály  
Hidrogeológiai és Geokémiai Főosztály  
Geoinformatikai Főosztály

Témafelelős:

Tóth György  
Kun Éva

Szerzők:

Tóth György  
Kun Éva  
Homolya Emese  
Fejes Lilian  
Kovács Attila  
Maigut Vera  
Farkas Réka

2019

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1</b>	<b>Bevezető.....</b>	<b>1</b>
1.1	Feladatok általánosan .....	1
1.2	Részfeladatok .....	2
1.3	A NATÉR-2 projektben alkalmazott felszín alatti vízáramlási modellezések releváns előzményei .....	3
1.3.1	Előzmények 1: „A talajvíz klímaérzékenységének modellezése a NATÉR-1 projekt keretei között, feladatok” .....	3
1.3.2	Előzmények 2: NATÉR-1 első koncepció és koncepcionális modellek .....	3
1.3.3	Előzmények 3: NATÉR-1 klimatikus inputok beszivárgási modellhez.....	4
1.3.4	Előzmények4: NATÉR-1 beszivárgási egységek (HRU-k) fizikai tulajdonságai.....	5
1.3.5	Előzmények.5: NATÉR-1 Beszivárgási kimenő adatok, outputok a HRU egységekre a referencia időszak mért klímaadatra.....	5
1.3.6	Előzmények 6: NATÉR-1 Beszivárgási outputok a HRU egységekre az ALADIN klíma-projekció számított klímaadataira, a referencia időszak és a 2100-ig terjedő időszak klímaablakaira.....	5
1.3.7	Előzmények 7: NATÉR-1 A beszivárgási outputok megadása peremfeltételként az országos talajvízes áramlási modell részére.....	5
1.3.8	Előzmények 8: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell megcsapolási peremfeltételeinek megadása, (az állandó vizes területek elevációi, és átszivárgási tulajdonságai).....	6
1.3.9	Előzmények 9: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell hidrogeológiai egységeinek lehatárolása, fizikai paraméterek megadásával .....	6
1.3.10	Előzmények 10: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell kalibrációs objektumainak megadása 6	
1.3.11	Előzmények 11: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell outputjai: számított talajvízszintek a referencia időszakra és a klíma-projekciók klímaablakaira .....	7
1.3.12	Előzmények 12. A NATÉR-1 projekt keretében végzett értékelések és modellezések köztes eredményeinek további felhasználási területei .....	7
1.3.13	Előzmények 13. A NATÉR-1 eredmények jelentősebb vízgazdálkodási hasznosításai a NATÉR-2 projekt indulásáig .....	9
<b>2</b>	<b>Új feladatok, fejlesztések, innovációk .....</b>	<b>10</b>
2.1	Új koncepció és koncepcionális modellek.....	10
2.2	Klimatikus inputok beszivárgási modellhez, új referencia időszak, új klímaprojekciók, klímaablakok .....	10
2.3	A felszín alatti vízmérleg-számítási egységek, módosított középtájak kijelölése, a mérési adatokat megadó CARPATCLIM-HU és az új klímaprojekciók eltérő rácsponjtjai figyelembevételével .....	12
2.4	A referencia időszak (1973-2004) mért (CARPATCLIM-HU), és a klímaprojekciók számított csapadék és hőmérsékleti adatainak összevetése, a számított értékek bias korrekciója a beszivárgás-modellezés előkészítésére.....	13
2.5	A beszivárgási egységek (HRU-k) kialakítása, fizikai tulajdonságai .....	13
2.6	Beszivárgás modellezés a HELP-3 szoftver alkalmazásával (CARPATCLIM-HU: rácsponjtokra és középtájakra, klímaprojekciók: középtájakra).....	14
2.7	A beszivárgási modellben számított értékek, (outputok), a HRU egységekre a referencia időszak mért CARPATCLIM-HU klímaadataira, rácsponjtokra és a középtájakra .....	14
2.8	A beszivárgási modellben a középtájak HRU egységeire számított értékek, (outputok), a 4 klímaprojekcióban 128 évre (1973-2004, 2005-2052, 2053-2100 közötti időszakokra) .....	15

---

2.9	30 éves időtartamú klímaablakokra (1975-2004, 2023-2052 és 2071-2100) vonatkozó beszivárgási átlagértékek (mint peremfeltételek) megadása a XL Pannon v.3.0 (országos, 3D áramlási modell számára) .....	16
2.10	Az XL Pannon v.3.0 modell vázlatos ismertetése.....	16
2.11	A Pannon XL v.3.0 modellben a klímaablakokban számított értékek bemutatása.....	17
<b>3</b>	<b>Összefoglaló értékelés.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>MELLÉKLETEK.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	MELLÉKLET – Klímamodellek.....	5-1
5.2	MELLÉKLET – Beszivárgás számítás .....	5-4
5.3	MELLÉKLET – A középtájak centroidjára vonatkozó csapadék és hőmérséklet korrekciók szemléltetése országos áttekintő térképeken .....	5-16
5.4	MELLÉKLET – Vízföldtani modellezés .....	5-23

## ÁBRAJEGYZÉK

2-1. ábra: Az SRES, valamint az RCP forgatókönyvek sugárzási kényszer pályáinak összehasonlítása .	11
2-2. ábra: Hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható hőmérséklet-változást adja meg °C-ban, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható. ....	12
2-3. ábra: Csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható csapadék-változást adja meg mm-ben, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható. ....	12
5-1. ábra: A SRES, valamint az RCP forgatókönyvek alapján a sugárzási kényszer változása .....	5-1
5-2. ábra: Hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható hőmérséklet-változást adja meg °C-ban, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható. ....	5-2
5-3. ábra: Csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható csapadék-változást adja meg mm-ben, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható. ....	5-3
5-4. ábra: A CNRM-CM5 kapcsolt modell architektúrája .....	5-5
5-5. ábra: Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezései által megkívánt igényeknek. ....	5-6
5-6. ábra: Magyarország fedett földtani térképe alapján kialakított beszivárgási zónák és az ahhoz tartozó talajtípusok .....	5-7
5-7. ábra: Nemzetközi talajosztályozási háromszög, és a talajtípusonként használt színek kódok.....	5-8
5-8. ábra: A talajprofilok meghatározása során alkalmazott mintaterületek elterjedése .....	5-8
5-9. ábra: Modellezett éves beszivárgások időbeli változásai. RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímamodel szimuláció alapján, durva porózus üledékekre .....	5-10
5-10. ábra: Modellezett éves beszivárgások időbeli változásai. RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodel szimuláció alapján, durva porózus üledékekre .....	5-11
5-11. ábra: A CARPATCLIM-HU adatok alapján modellezett 30 éves (1975-2004) átlagos beszivárgás eloszlás .....	5-11
5-12. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodel szimuláció alapján számítva .....	5-12
5-13. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/CNRM-CM5/RCP8.5 klímamodel szimuláció alapján számítva .....	5-13
5-14. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 klímamodel szimuláció alapján számítva .....	5-13
5-15. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímamodel szimuláció alapján számítva .....	5-14
5-16. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2023-2052 időszakok között. RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodel szimuláció alapján számítva .....	5-14

5-17. ábra: A CARPATCLIM-HU mért klimatikus adatok rácspontjainak helyzete és Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezéseihez .....	5-16
5-18. ábra: Az RCA4 klímamodellre számított klimatikus adatok rácsponti helyzete és Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezéseihez .....	5-17
5-19. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt CARPATCLIM-HU csapadékatatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-17
5-20. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers csapadékatatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-18
5-21. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers csapadékatatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-18
5-22. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers csapadékatatok bias korekciós szorzói, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-19
5-23. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers csapadékatatok bias korekciós szorzói, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-19
5-24. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt CARPATCLIM-HU középhőmérsékletek sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-20
5-25. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers középhőmérsékletek sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-20
5-26. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers középhőmérsékletek sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-21
5-27. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers átlaghőmérsékletek bias korekciós delta értékei, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-21
5-28. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers átlaghőmérsékletek bias korekciós delta értékei, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve) .....	5-22
5-29. ábra: A modellterület és a ráfektetett rácsháló (zöld: inaktív zóna, fehér: aktív zóna) .....	5-23
5-30. ábra: Az első modellrétegben alkalmazott szivárgási tényező értékek, az ország keleti felében 5-25	
5-31. ábra: A közel jövő (2023-2052) RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) nettó vízforgalma a felszínen a hegységi területek elhagyásával [mm/év] .....	5-26
5-32. ábra: A referencia időszakra (1973-2004) CARPATCLIM-HU mért klimatikus adatok alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) talajvízszint eloszlás a hegységi területek elhagyásával [mBf] .....	5-26
5-33. ábra: A referencia időszakra (1973-2004) az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) talajvízszint eloszlás a hegységi területek elhagyásával [mBf] .....	5-27

# 1 BEVEZETŐ

A NATÉR továbbfejlesztése keretében elvégzett, "a klímaváltozás sekély felszín alatti vizekre gyakorolt közvetlen és közvetett hatásainak a vizsgálata, módszertani fejlesztés és országos kiterjesztés" című feladat eredményei lehetővé teszik az ország bármely területére a referencia-időszak mért klimatikus adatai alapján a beszivárgási területek havi talajvízszintjeinek-, repedésvízszintjeinek, és karsztvízszintjeinek szimulációját, melyhez rendelkezésre állnak:

- a beszivárgási területi egységek, HRU-k, a sekély víztartók térbeli egységei, a HGU-k megfelelő fizikai paramétereikkel, részletes ~ 50 méteres felbontással;
- a beszivárgás-számításokat és a felszín alatti áramlási rendszerek szimulációit lehetővé tevő módszerek és modellezési eljárások;
- olyan országos feldolgozások, modellezések bemutatásával, melyben a klimatikus és termelési tényezők egyidejűleg vizsgálhatók. és mindezek lehetővé teszik
- a sekély felszín alatti vizeknél várható változások numerikus modellezéseken alapuló becsléseit a részletes lokális vizsgálatoktól, a középtáji szintű mérettartományokon keresztül az országos léptékekig.

## 1.1 Feladatok általánosan

A hazai sekély felszín alatti vizek, — és rajtuk keresztül a mélyebb zónák — vízáramlási rendszereire jelentős hatással vannak a klimatikus tényezők. A vízáramlásokat döntő mértékben a csapadékból származó beszivárgások tartják fenn az utánpótlódási részekben, míg az áramlási rendszer megcsapolói a felszíni vizek, vizes ökoszisztémák, talajvíz-párolgási helyek és a különböző célú víztermelések. A felszín alatti vizeknek döntő szerepük van a hazai ivóvízellátásban, a termálvizek hasznosításainál, a vizes ökoszisztémák fenntartásánál, a mezőgazdaságban, különösen az öntözési lehetőségek esetében, az ipari célú hasznosításoknál, a bányászatot lehetővé tevő víztelenítéseknél. A felszín alatti vizek bizonyos időszakokban és helyeken nagymértékben meghatározói lehetnek a belvizek, karsztos árvizek kialakulásában.

A klímaváltozás hatására megváltozó csapadék- és hőmérsékletviszonyok jelentős mértékben érintik a felszín alatti vízkészleteinket, elsősorban az utánpótlásukat jelentő beszivárgások megváltozása következtében. A klimatikus tényezők hatására létrejövő beszivárgások alakulása azonban nagymértékben függvénye a talajképző kőzetek vastagságának, hidrofizikai tulajdonságainak és számos más felszíni (természetes, antropogén) tényezőnek (növényborítottságnak, földhasználatnak, lejtőviszonyoknak) is.

Az általánosan megfogalmazott feladat tehát annak vizsgálata, hogy térségünk felszínalatti vízáramlási rendszerei a klimatikus tényezők hatására hogyan alakulnak a jelenben, és alakultak az elmúlt évtizedekben, továbbá, hogyan fognak megváltozni a 21. század során. További szakmai kihívás annak megítélése, ill. értékelése, hogy a klímaváltozás és az emberi beavatkozások együttesen milyen hatásokat hoztak, hoznak létre a jövőben a felszínalatti vízáramlási rendszerekben, azok vízháztartási és vízszint viszonyaiban.

Fizikai alapú numerikus beszivárgási és áramlási modelleket használtunk e feladat megoldására, mely mind térben, mind időben változatos és innovatív munkamódszer-együttest igényelt. Ezeknek országos mértékben való alkalmazását az tette lehetővé, hogy az MBFSZ-nél rendelkezésre állnak a

"fizikai alap" adatbázisai, információs rendszerei, tudás-bázisai, korábbi értékelések, regionális modellezések tapasztalatai, módszerfejlesztései.

Mindezek alapján 2014 évben elkészült a NATÉR-1 keretében a talajvíz klímaérzékenységének modell-vizsgálata, melynek első eredményei beépültek országos méretű és jelentőségű feladatok megoldásába, például:

- Magyarország felülvizsgált, 2015. évi Vízyűjtő-gazdálkodási Terve (VGT2) felszín alatti vizekre vonatkozó mennyiségi állapotértékelések;
- a hazai öntözésfejlesztések tervezési munkái;
- a belvív-képződése felszín alól származó részének mennyiségi és minőségi értékelései.

Ezek az előzmények jelentették az alapot a NATÉR-2: „A klímaváltozás sekély felszín alatti vizekre gyakorolt közvetlen és közvetett hatásainak a vizsgálata, módszertani fejlesztés és országos kiterjesztés” című, 2017-ben induló projektnek, melyben új feladatok elvégzésre került sor, a hozzájuk tartozó módszertani fejlesztésekkel, innovációs megoldásokkal.

## **1.2 Részfeladatok**

A NATÉR-2 projekt bizonyos mértékben alapszik a NATÉR-1 projektben kifejlesztett módszerekre, eljárásokra és adatbázis-fejlesztésekre. A NATÉR-2 projekt sekély felszín alatti vizekre vonatkozó értékelését a NATÉR-1 releváns előzményeinek rövid ismertetésével kezdjük, melyek eredményeit az előzőekben említett országos jelentőségű víztermelési scenáriók döntés-támogatásához, már hasznostani lehetett.

A NATÉR-2 projektben a felszín alatti vizek modellezése során az alábbi munkafázisokat terveztük:

A jelenleg hozzáférhető legfrissebb klímaprojekciók és a NATÉR rendszerben, valamint az EURO-CORDEX adatbázisban elérhető szimulációk áttekintése, és a megfelelő projekciók kiválasztása a talajvíz modellezés aktualizálása céljából.

1. A jelenleg hozzáférhető legfrissebb klímaprojekciók és a NATÉR rendszerben, valamint az EURO-CORDEX adatbázisban elérhető szimulációk áttekintése, és a megfelelő projekciók kiválasztása a talajvíz modellezés aktualizálása céljából.
2. A vízmérleg modellek, és ezen keresztül a vízföldtani modell aktualizálása a kiválasztott regionális klímaprojekciók felhasználásával
3. A vízmérleg modellezés finomítása az alkalmazott beszivárgási zónák áttekintése és aktualizálása útján.
4. A kalibrációs adatok áttekintése és szükség szerinti kiegészítése.
5. A numerikus modell újra futtatása az aktualizált peremfeltételek és bemeneti adatok alapján.
6. A közvetett klímahatások (pl. öntözés) modellezési lehetőségeinek vizsgálata, javaslattétel integrált modellezési módszertan kialakítására.

### **1.3 A NATÉR-2 projektben alkalmazott felszín alatti vízáramlási modellezések releváns előzményei**

#### **1.3.1 Előzmények 1: „A talajvíz klímaérzékenységének modellezése a NATÉR-1 projekt keretei között, feladatok”**

A NATÉR-1 keretében a talajvíz klímaérzékenységének megítéléséhez módszertani fejlesztéseket végeztünk mind a beszivárgási értékek, mind a talajvízszintek közelmúltbeli és jövőbeli meghatározása érdekében. Ennek során kialakítottuk a feladtból fakadó koncepciót, koncepcionális modellt készítettünk annak érdekében, hogy a numerikus modell építéséhez, azaz az inputokhoz és kalibrációihoz szükséges alapadatbázisokat kialakítsuk, kiválasszuk a feladathoz megfelelő modellezési kódokat, szoftver-csomagokat, és az inputok, és kalibrációs objektumokat a modellezési kódok által megkívánt formára hozzuk. Ezt követően elvégeztük a modellfuttatásokat. Az első modellezési feladat a felszín alatti vizeket tápláló beszivárgások meghatározására irányult, majd annak outputjait — egy, a talajvízrendszert reprezentáló 2D országos modell inputjaként kezelve — számítottuk a talajvíztükör elevációs és mélységi helyzetét. Mindkét modellváltozatnál elvégeztük a lehetséges kalibrációkat is, majd a NATÉR-1 projekt klíma-projekciója keretében számított értékekkel prediktív modell-futtatásokat végeztünk.

#### **1.3.2 Előzmények 2: NATÉR-1 első koncepció és koncepcionális modellek**

A NATÉR-1 keretében a koncepció az volt, hogy a talajvizet tápláló beszivárgást meghatározó klimatikus és felszíni fizikai tényezőket egy vízháztartási modell felhasználásával jellemezzük. A feladathoz olyan modellezési kódot választottunk, melyet mind a hazai, mind a nemzetközi gyakorlatban beszivárgási feladatokhoz sikerrel alkalmaztak. Ez a HELP-3 szoftver volt, mely napi csapadékösszeg, átlag-hőmérséklet és globális sugárzási adatokat használ, egyéb évszakos (relatív nedvességtartalom és éves átlagos (szélsebesség) paraméterek mellett. A modellbe beépítették a beszivárgást meghatározó talajzónák, talajképző kőzetek széles skáláját, az azokra alkalmazható hidrofizikai paraméterekkel. Ezeket, és a beszivárgást befolyásoló további felszíni paramétereket, növényborítottságokat, lejtési viszonyokat jellemző értékeket a különböző kalibrációs eljárások során módosítani lehet. Ezeket a fizikai egységeket, (az angolszász szakirodalomban Hydrological Response Unit-okat, HRU-kat) láttuk el a modellezés eredményeképp kapott beszivárgási értékekkel, melyeket a konkrét feladattól függően napi, havi, évi értékekkel, illetve sokéves átlagokkal lehet megadni.

Ezt követően egy országos 2D talajvíz-áramlási modellt alakítottunk ki, (USGS által kifejlesztett MODFLOW véges differencia elven alapuló modellezési kód-csomag felhasználásával), melyben a HRU-kra számított sokéves átlagos beszivárgási értékek jelentették a felső peremfeltételt. Ebben a modellben a megcsapolási peremfeltételeket a terep mélyhelyzetű részei alapján adtuk meg, melyhez a MH 1:50E terepmodelljének általunk javított változatát hasznosíthattuk. A modellben meg kellett adni a hidrogeológiailag egységesen kezelhető vízadó egységeket, a "Hydrogeologic Unit"-okat, HGU-kat. melyeket korábbi modellezéseink alapján parametrizálhattunk, illetve az értékeket a kalibrációs fázisban pontosítottunk.

Végül az adott mért CARPATCLIM-HU<sup>1</sup> klimatikus adatok alapján, az 1961-65 közötti időszakra kalibrált permanens modellt alkalmaztuk a kapott, akkor még egyetlen klímaprojekció 30 éves klímaablakaira, meghatározva a talajvíztükör helyzetét. Az áttekintő jellegű, 250 méteres felbontású,

<sup>1</sup> <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>

("cellaméretű") modell eredményei alapján mind a beszivárgás-változások, mind a talajvíztükör változásai megadhatók, értelmezhetők és értékelhetők voltak.

A NATÉR-1-ben alkalmazott koncepció, illetve az azokon alapuló koncepcionális **modellek előnyei**:

- Az ország egészére le lehetett határolni mind a beszivárgási HRU-kat, mind a talajvízes HGU-kat, egyúttal megadni azok fizikai paramétereit;
- Az egyes beszivárgási HRU-kra meg lehetett határozni a beszivárgási adatokat, napi, havi és évi formátumokban, mellyel lehetőséget nyitottunk tranziens összehasonlító vizsgálatokra, hosszú idejű talajvízszint, vagy forrás vízhozam idősorokkal való összevetésekre, esetenként tranziens kalibrációkra.
- A sokéves átlagos viszonyok melletti permanens futtatások lehetővé tették országos léptékben is a talajvíztükör numerikus szimulációját, a referencia-időszakra való kalibrációt, és annak alapján klimatikus jövőképek, klíma-ablakaira vonatkozó vízszint-előrejelzéseket

A NATÉR-1-ben alkalmazott koncepció, illetve az azokon alapuló koncepcionális **modellek hátrányai**:

A NATÉR-1 keretében csak egyetlen klímaprojekcióra készült számítás, így még nem lehetett a különböző előrejelzések közötti különbségeket értékelni.

A mért és számított klimatikus paraméterek rácspontonkénti kezelése az adatok nagy száma miatt, és az adott szoftverek adott időben meglévő teljesítőképessége miatt még nem volt lehetséges.

A rácspontokra vonatkozó adatoknak nagyobb térrészekre, pontosabban a Thornthwaite zónákra vonatkozó átlagolása helyenként túlságosan elnagyolt volt, a zónák határain a valóságtól eltérően jelentős különbségek jelentkeztek, ugyanakkor a fiziográfiai hatások: mint az elevációs különbségek, a medencehatások és számos középtáji egyediség nem jutott érvényre kellő mértékben.

Mindezekon túl technikai nehézségek jelentkeztek azzal kapcsolatban, hogy a beszivárgási HRU-kra számított értékek olyan nagy számú eltérő egységet mutattak, melyek az utólagos és esetleges módosításokat ellehetetlenítették.

### 1.3.3 Előzmények 3: NATÉR-1 klimatikus inputok beszivárgási modellhez

Vizsgálataink során a Kárpát-medence több száz meteorológia és csapadékállomásának adataiból képzett CARPATCLIM-HU adatbázist használtuk. A jövőbeni talajvíz viszonyok meghatározásához az OMSZ által futtatott ALADIN-Climate regionális klímamodelljének eredményeit hasznosítottuk.

A CARPATCLIM-HU adatbázis alapján az 1961-2010 közötti időszakra így 10 x 10 km-es rácspontokra a HELP3 kód klimatikus input igényeinek megfelelő formátumokra alakítottuk az adatokat. Az adatoknak ilyen formátumú átalakításával már megteremtődött a lehetőség egy-egy adott térség talajvízszint-idősorának, vagy forrás-vízhozam idősorának számítására, természetesen, ha rendelkezésre állnak a lokális modell futtatásához szükséges HRU-k és HGU-k fizikai paraméterei. Az ilyen lokális modellezések egyúttal lehetőséget biztosítanak egy olyan kalibrációra, mely alapján a tranziens vizsgálatok paraméterei, (pl. a gravitációs hézagterefogat) a legjobban megadható.

A klímazónákra vonatkozóan az alábbi klímaablakokra készült beszivárgás számítás. A referencia időszakon belüli részekre ekkor még nem készült a mért és számított összevetése utáni bias korrekció, így elsősorban a nyers adatok alapján a becsülhető, számítható változásokat lehetett megadni az egyes jövőbeli klímaablakokra:

1. 1961-1990
2. 1981-2010
3. 1961-1990

4. 2021-2050

5. 2071-2100

A NATÉR-1 vizsgálatánál alkalmazott 1 klímaprojekció használatával előállított beszivárgások arra voltak csak elegendőek, hogy demonstrálni lehetett a klímaprojekciókban számított napi értékekből is beszivárgási adatokat, azonban más klímaprojekciók nélkül a várható hatások jövőbeli változatosságait nem lehetett bemutatni.

#### 1.3.4 Előzmények4: NATÉR-1 beszivárgási egységek (HRU-k) fizikai tulajdonságai

A beszivárgási egységek 4 talaj típusát különítettük el hidrofizikai paraméterekkel, vagyis a HELP kód által igényelt teljes porozitás, szántóföldi vízkapacitáshoz, holtvíztartalomhoz tartozó porozitás értékekkel, valamint az evaporációs zóna mélységével, míg a felszín állapotát a felszíni lefolyás-számításhoz használt curve number (CN) értékkel jellemeztük. A 4 talajtípust a 1:100 E méretarányú hivatalos MBFSZ felszíni földtani térkép alapján vontuk össze a következő kategóriákba: finom porózus, durva porózus, repedezett és karsztos felszíneket jellemzett és ezekkel az ország valamennyi részén számolni lehetett. Miután a karsztos területen a felszíni lefolyás elhanyagolható, ott csak egy CN értékkel számoltunk, így összesen 13 HRU egységgel kellett dolgozni. (Országos léptékben már ennek a 13 kategóriának a használata is soknak bizonyult, különösen az esetleges hibák kiszűrése vált nehézkessé.)

#### 1.3.5 Előzmények.5: NATÉR-1 Beszivárgási kimenő adatok, outputok a HRU egységekre a referencia időszak mért klímaadatra

A beszivárgási outputok egy-egy klímazónán belüli értékei a referencia időszak mért klimatikus értékeivel kiszámításra kerültek, de mint említettük a klímazónák helyzete és mérete miatt csak az ottani hosszúidejű átlagértékeknek néhány hazai terület adatival való összevetésére kerülhetett sor. Így a Bábaapáti, a Déli- Bakony és az Aggteleki karszt-területek eredményeivel és tapasztalataival végeztük el ezt a „durvahangolást”. Mindezek mellett előzetesen kísérletet tettünk néhány talajvízszint megfigyelő kút idősorával történő kalibrációra, azaz a "finomhangolás"-ra is.

#### 1.3.6 Előzmények 6: NATÉR-1 Beszivárgási outputok a HRU egységekre az ALADIN klímaprojekció számított klímaadataira, a referencia időszak és a 2100-ig terjedő időszak klímaablakaira

Az előző pontokban említett korlátok figyelembevételével végül el lehetett végezni az ALADIN-Climate klíma-modell alapján a referencia időszaktól a 2100 év végéig terjedő időszak klímaablakaira vonatkozó beszivárgási értékek számítását. Az ezekkel kapcsolatos eredményekről a NATÉR-1 keretében készített zárójelentésben és néhány publikációban számoltunk be.

#### 1.3.7 Előzmények 7: NATÉR-1 A beszivárgási outputok megadása peremfeltételként az országos talajvízes áramlási modell részére

A referencia-időszak mért, valamint a klíma-modell számított klimatikus inputjai alapján, az egyes klímazónák, HRU-ira számított beszivárgási értékeket peremfeltételként adtuk meg egy országos, horizontális 2D-s, (egy-rétegű), 250 méteres felbontású rácshálóval rendelkező, MODFLOW kóddal készített talajvíz-áramlási modell részére.

### 1.3.8 Előzmények 8: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell megcsapolási peremfeltételeinek megadása, (az állandó víz területek elevációi, és átszivárgási tulajdonságai)

A beszivárgási peremfeltételek mellett az országos talajvízmodell megcsapolási peremeit a relatív mélyfekvésű területek szintjeivel adtuk meg, természetesen azzal a pontossággal, amelyet a rácsháló felbontása és a rendelkezésre álló elevációs adatok lehetővé tettek. A munka ebben a fázisában permanens modellel számoltunk a klímaablakok utolsó 30-30 év átlagos viszonyai mellett. A 30 éves átlagos viszonyok mellett már csak az állandó vízfolyásokon, a szivárgó felszíneken kiáramló, avagy a talajvízpárolgással megcsapolódó vizek együttes értékét lehetett megadni. Természetesen részletesebb térbeli felbontás mellett, lokálisan, további paraméterek bevonásával a megcsapolási viszonyok tranziens vizsgálata is megoldható.

Itt jegyezzük meg, hogy ezen első 2D talajvíz modellezés során még termelés nélküli állapotokkal számoltunk, azzal, hogy a továbbiakban mind a talajvízből, mind a vele egy hidraulikai rendszert alkotó rétegvízről való termelési adatokat is figyelembe vesszük

### 1.3.9 Előzmények 9: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell hidrogeológiai egységeinek lehatárolása, fizikai paraméterek megadásával

Az országos talajvíz áramlási modellek számított vízszintjeihez el kell különíteni a talajvízadó egységeket, HGU-kat, és el kell látni azokat megfelelő szivárgási tényező adatokkal, vagy legalább transzmisszivitási adatokkal. Korábbi országos és regionális modellezéseink tapasztalatait alapján végeztük a talajvízes HGU-k lehatárolását vagy diszkretizációját. A hegy- és dombvidéki területeken a völgytalpak körzeteit kivéve az 1:100E fedetlen földtani térképváltozatok formációit vízföldtani tulajdonságai szerint minősítettük, a völgytalpi és síkvidéki részekre a fúrt kutak létesítés-kori hidraulikai vizsgálatai alapján, pontosabban a fajlagos vagy a kettős fajlagos vízhozamok térben interpolált értékei alapján különítettünk el zónákat. Ez utóbbiakra már így a szivárgási paraméterek is megadhatók voltak, míg a hegy- és dombvidéki részekre ezeket előzetes modellezés kalibrációi során számítottuk.

### 1.3.10 Előzmények 10: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell kalibrációs objektumainak megadása

Az országos talajvíz-áramlási modell kalibrációjához felhasználtuk a talajvíz-megfigyelő kúthálózat adatait, a hegy és dombvidéki területeken pedig a megcsapoló vízfolyások térbeli helyzetét. Ez utóbbi innovatív eljárást az MBFSZ jogelődjében, a MÁFI-ban dolgoztuk ki regionális rendszerek kalibrációjához. Adott beszivárgások mellett változtatva a talajvíztartók szivárgási tulajdonságait, a "drén" típusú felszínként kezelt terepmodell mélyebb részei megcsapolási helyzetet jelezhetnek. Amennyiben ezek összevágának az állandó vízfolyások, források, szivárgó felszínek pontos topográfiai térképeken ábrázolt helyszíneivel, akkor a használt szivárgási paraméter már megfelelő lehet. Ehhez hozzá kell tenni, hogy a mélyhelyzetű, vagy az állandó vízfolyások feletti száraz völgyek esetében a modellezés során a számított talajvízdomborzatnak e völgyek szintjei alatt kell maradniuk, melyet szintén egyfajta fél-quantitatív kalibrációs lehetőségként is kezelhetünk.

### 1.3.11 Előzmények 11: NATÉR-1 Az országos talajvíz áramlási modell outputjai: számított talajvízszintek a referencia időszakra és a klíma-projekciók klímaablakaira

A referencia időszakra és a klímaablakokra a 2D talajvíz-áramlási modell szimuláció során számítottuk a talajvíztükör tengerszint feletti, elevációs értékeit, és terep alatti mélységértékeit. A szimulációk permanens állapotra és a klímaablakok utolsó 30 éves átlagos beszivárgási értékeire vonatkoztak. A modellezésnél feltétel volt, hogy a talajvíztartó szivárgási tényező eloszlása vertikális értelemben állandó. Ebben az esetben két scenárió számított talajvízszintjei közötti különbség megfelelően megadható. A domb- és hegyvidéki talajvíztartókban a horizontális vízvezető-képesség legtöbbször folyamatosan és lefelé tendenciózusan csökken, ezért ezeken a helyszíneken a talajvízszintek változása nem lineárisan arányos a beszivárgás változásaival. Ugyanis, ha csökken a beszivárgás, akkor a talajvízszintek csökkenésével a transzmisszivitás értéke is csökken, és fordítva. Ezeken a helyeken tehát a rendszer sokkal kisebb tartományban változik, mint a vertikálisan állandó szivárgási tényezőjű talajvíztartók esetében. Erre az interpretációknál figyelemmel kell lenni. Megfelelőbbnek tűnik tehát, hogy ezeken a helyeken inkább a vízháztartási viszonyok változásaival jellemezzük a klímaváltozások hatásait.

### 1.3.12 Előzmények 12. A NATÉR-1 projekt keretében végzett értékelések és modellezések köztes eredményeinek további felhasználási területei

Az elvégzett feladatok közül az országos talajvízdomborzat–modellezéshez kialakított harmonizált háttéradatbázisok, térinformatikai rendszerek, számítási módszerek, vagyis a **köztes eredmények** is olyanok, amelyeket a talajvízdomborzat felhasználásán kívül is számos más szakterületen is alkalmazni lehet. Ez összefoglalóan egy olyan alaptérkép-együttes, térinformatikai háttércsomag, mely vetületében, részletességében, egymáshoz igazítottóságában mindezedig a legteljesebb az országban, és amely alapját képezheti különböző további feladatok lokális, szubregionális és regionális hidrogeológiai értékeléseinek, modellezéseinek. A további feladatok közül kiemelhetjük vízbázis-védelmi munkákat, a felszín alatti víztest méretű vízmérlegek készítését, a mennyiségi igénybevételi korlátok meghatározását a víztestek elkülönített részeire, a szennyezett területek kármentesítési modellezéseit, felszín alatti vizektől függő ökoszisztémák állapotértékeléseit és esetenként revitalizációs munkáit, — mindezeket különböző klimatikus scenáriók figyelembevételével.

A köztes eredmények részei:

1. Az MH 1:50 E digitalizált szintvonal-adataiból az ArcHydro lehetőségeivel interpolált új terepmodell. (Numerikus tereplépcső-, terasz-mentes felszínek, vízhálózat menti felszín-mélyítésekkel ~ stream-carving, ~river burning)
2. Az MH 1:50 E digitalizált, vízügy által kiegészített felszíni vízfolyásrajza, mely harmóniában van a terepmodellel, továbbá ezt a változatot használta és fejlesztette tovább a környezetvédelmi-vízügyi ágazat is a VGT1 térképváltozataihoz, például a felszíni víztestek kijelölésénél. Jelentősége a talajvízdomborzat meghatározásánál abban van, hogy ezek az állandó vízfolyást jelölő vonalak egyúttal jelzik a talajvíz térbeli helyzetét, magassági értékei közvetlenül felhasználhatók a talajvízdomborzat szerkesztésénél vagy modellezésénél, mint kalibrációs pontok.
3. A CORINE LULC térinformatikai rendszer és az abból szakértői összevonásokkal készített változatok
4. Az MFGI hivatalos 1:100E digitalizált földtani térképváltozata, melyet az MH 1:50E terepi és vízrajzi adataival összhangba hoztak. Különösen jól megítélhető ez a morfológiailag markánsan

jelentkező földtani egységhatároknál, (például az allúviumok elterjedésénél, teraszhatároknál, a laza és konszolidált kőzetek határainál, stb.). A földtani térkép ez esetben a felszínen előforduló képződményeket mutatja. Ezt szokták "fedett földtani térkép"-nek is nevezni, tekintettel arra, hogy a hegy- és dombvidéki részeken is tartalmazza a kvarter fedőképződményeket. A litológiai jelentést tartalmazó, "földtanilag térképezhető egységek": a formációk felszínen lévő képződményeit szakértői becslésekkel, illetve korábbi regionális backward típusú modellezésekkel, értékelésekkel, további paraméterekkel is el lehetett, és el lehet látni. Ilyenek: a talajképző kőzet, mint a beszivárgás intenzitását meghatározó fő faktor, a talajképző kőzet, melyen a beszivárgás és más felszíni folyamatok során kialakul a talajtani értelemben vett talajzóna a földtani alapoktól meghatározott fizikai tulajdonságaival, miközben a rajta áthaladó csapadék minősége beszivárgása során átalakul,— a szintén a földtani jellemzőktől függő, — elsődleges talajvízminőséggé. (Ez jól tanulmányozható a szennyeződésektől mentes, egységes felszíni földtani vízgyűjtővel rendelkező, leszálló források vízminőségi vizsgálataival). A talajképző kőzetek térképi egységei képezik alapját a beszivárgási egységeknek, ("Hydrological Response Unit"-oknak, "HRU"-knak

5. A talajvíz-domborzat modellezésénél, függően annak részletességétől, méretétől, ezek a képződmények egyedileg is, és összevontan is elláthatók elsődleges beszivárgási adatokkal, például mm/év egységben, vagy az éves csapadék százalékában. Ehhez használatos modellezések kalibrációjához a források, forrásvízfolyások alap-vízhozam adatait, a források vízminőségi adatait, a talajnedvesség és talajvíz trícium profilját, adott talajvíz monitoring-kút vízszint-idősorát, források vízhozam, hőmérséklet vagy vízkémiai idősorait lehet használni.
6. Az MFGI 1:100E fedetlen földtani térképváltozata. Ez a térkép jelkulcsa a fedett változattal megegyező jelkulcsot tartalmaz. A litológiai karakter és a backward típusú értékelések, modellezések lehetővé teszik a hidrogeológiai tulajdonságok (vízvezető-képesség és porozitások) becslését azokon a helyeken, ahol ezek az egységek képezik az összefüggő freatikus zónát. Ilyenek általában a hegyvidéki és dombvidéki területeken fordulnak elő.
7. A hegy és dombvidéki területek kombinált, fedett-fedetlen térképe, az előző pontokban felsorolt földtani egységekből készült. Alapja a fedetlen változat, mely a völgyoldalak, domb és hegytetők alatt a talajvíztartó egységeket reprezentálja. A völgytalpaknál és a csatlakozó alacsony teraszos részekenél a fedett térképváltozathoz tartozó negyedidőszaki üledékekben alakul ki a legfelső kétfázisú zóna, ezért ott ezeket a képződményeket használjuk a talajvíztartó megadásához, jellemzéséhez.
8. A negyedidőszaki medenceterületeink talajvíztartóinak jellemzésére országosan és egységesen az országos kútkataszter sekély kútjaiban mért hidraulikai vizsgálatokból lehetett megadni. (A fajlagos vízhozam egységnyi szűrőzött szakaszra vonatkoztatott értéke, a kettős fajlagos vízhozam nemcsak közvetlenül arányos a szivárgási tényező lokális értékével, de ezek térbeli eloszlása egyúttal utal a vízáadó képződmények litofáciájára is.)
9. Az 5.), 6.) és 7.) pontokban ismertetett szakanyagok térinformatikai részeiből össze lehetett állítani a legfelső összefüggő kétfázisú rendszer hidrosztratigráfiai, hidrogeológiai egységeit, ("HydroGeological Unit"-okat, "HGU"-kat), vagyis a talajvíz-, repedésvíz- és karsztvíz-tartó egységeket. A előző és jelenlegi regionális modellezésből meg lehetett adni a transzmisszivitás regionális értékeit, melyek részletesebb és más célú hidrogeológiai modellezésnél, mint kiindulási alapadatok is jól használhatók. A NATÉR-1 keretében készített országos talajvízdomborzat modellezés egyik legfontosabb produktumának ezt tartjuk.
10. A talajvízdomborzat modellezéséhez szükség volt a talajvíztartók vízföldtani tulajdonságainak megadása mellett a beszivárgási értékek megadására is. Ehhez külön vízháztartási modell

készült, melyet megalapozó, —a fentiekben említett térinformatikai háttéradatbázisok mellett, egy 1961-2010 között részletes meteorológiai adatbázis is támogatott. (Kiegészített Carpatclim. Mo+CC). Az adatokat a modellezési szoftverek által megkívánt formában állítottuk elő, lehetővé téve egyúttal nemcsak a permanens talajvíz szimulációk elvégzését, de számos további, klímaváltozással kapcsolatos értékelést is. Ilyenek többek között a további beszivárgási, talajvízháztartási, felszíni lefolyási, párolgási, talajnedvesség-alakulási modellek, melyeket a vízbázisok, ökoszisztémák, biomassza-termékek értékelésénél, a települési, belvízképződéssel, aszályal, esetenként árvizekkel kapcsolatos értékeléseknél is használni lehet majd. Ez a háttéradatbázis szintén fő produktuma a NATÉR-1 talajvíz-modellezési projektnek.

11. Az országos talajvíz-domborzati modellezés módszerfejlesztései, innovatív megoldásai, a kidolgozott, vagy hasznosított modellezési know-how-k, eljárások szintén fontos termékei a NATÉR-1 modellnek. Másképpen kifejezve: az országos talajvíz-domborzati kép sikeres "előállítás" jól reprezentálja a héttér informatikai termékek használhatóságát, természetesen a hozzáadott hidrogeológusi, meteorológusi szakértői értékekkel együtt.

### 1.3.13 Előzmények 13. A NATÉR-1 eredmények jelentősebb vízgazdálkodási hasznosításai a NATÉR-2 projekt indulásáig

(Országos Vízyűjtő-gazdálkodási Terv = OVGT2 felszín alatti vizes állapotértékelése, vízmérleg; Öntözésfejlesztési scenáriók vizsgálata, Belvízminőség előrejelzései)

A NATÉR-1 projekt eredményeképpen a CARPATCLIM-HU adatbázis alapján számított beszivárgási értékeket több országos modellezésnél hasznosítani lehetett. Ezek a modellek a Pannon XL országhatáron túlnyúló, eredetileg a medencebeli felső pannóniai vízadókban lévő termálvizekkel való gazdálkodás támogatására készültek, permanens víztermelés scenáriókra, avagy termelések nélküli helyzetekre. Miután a modellekben a felszíni utánpótlódási és megcsapolásokat is figyelembe vettük, ráadásul folyamatokat a sekély porózus, a porózus és a porózus termál víztestek valamennyi termelési adatát, ezért felvetődött, hogy a NATÉR program keretében a mért klimatikus adatokból számított átlagos beszivárgási adatokat beépítsük a modell peremfeltételeként.

Ez a megoldás három országos jelentőségű feladatban megfogalmazott kérdések megválaszolását is lehetővé tette, ezek a következők:

- Országos Vízyűjtő-gazdálkodási Terv = OVGT2 felszín alatti vizes állapotértékelése, a medencebeli porózus víztestek vízmérlegének készítése, és az EU Víz Keret-irányelv szerinti állapotértékelése;
- Felszín alatti vízből történő öntözésfejlesztési scenáriók vizsgálata, hatásvizsgálatok a felszínalatti vizektől függő ökoszisztémákra, és a már meglévő ivóvíztermelésekre;
- Azon belvizes területek vizsgálata mennyiségi és minőségi vizsgálata, ahol, (és amikor) a felszín alatti víz hozzájárulása a meghatározó tényező a belvizek alakulásában.

Ezek a sikeres és országos 3D-s modellfejlesztések ráirányították a figyelmet arra is, hogy a felsorolt feladatoknál érdemes lenne a klímaváltozások hatását is figyelembe venni. A NATÉR-2 projekt keretében folyó tervezéseknél erre az igényre is figyelemmel voltunk, és célul tűztük ki az újabb kiválasztott klímaprojekciók alapján számított beszivárgás-változások hatásvizsgálatát az Pannon XL v.3.0 országos 3D országos modelljeinkben.

## 2 ÚJ FELADATOK, FEJLESZTÉSEK, INNOVÁCIÓK

### 2.1 Új koncepció és koncepcionális modellek

A NATÉR-1 tervezési ciklusát követően, a talajvízre vonatkozó eredmények és tapasztalatok országos áttekintése után, — az újabb kihívások, és az újabb klímaprojekció változatok ismeretében, — újabb feladatokat fogalmaztunk meg a NATÉR-2 keretében.

A fő feladatot továbbra is a klímaváltozás hatásának értékelése jelentette a sekély felszín alatti vizekre vonatkozóan, pontosabban az azok szintjében és vízmérlegében várható változások előrejelzése.

A vízió ezzel kapcsolatban az volt, hogy alakítsunk ki olyan módszertant és információs bázist, mely

- a felszín alatti vizek klímfüggő állapotváltozásait országos. áttekintő példákön mutatja be, egyúttal, hogy
- ezek az alapozó anyagok hasznosítható bázisát jelenthetik a térben és időben részletesebb értékelések számára.

Az elképzelés, pontosabban vízió ezzel kapcsolatosan az volt, hogy az említett részletesebb értékelések a különböző ágazatok vízgazdálkodási feladatainál felmerülő kérdésekre adhassanak megfelelő választ. Itt elsősorban az EU Víz-keretirányelve alapján kidolgozásra kerülő Vízgyűjtő-gazdálkodási tervek alapfeladatait kell kiemelni, azaz a felszín alatti víztestek

- jellemzéseit,
- állapotértékeléseit,
- az állapotok megőrzését, vagy azok javításait célzó intézkedéseket
- és az ezekkel kapcsolatos ágazati vízügyi politikákat, stratégiákat és más döntéseket.

Mindezeket természetesen a klímaváltozásoknak a jelenlegi szinten elérhető legkorszerűbb előrejelzései alapján szükséges megtenni.

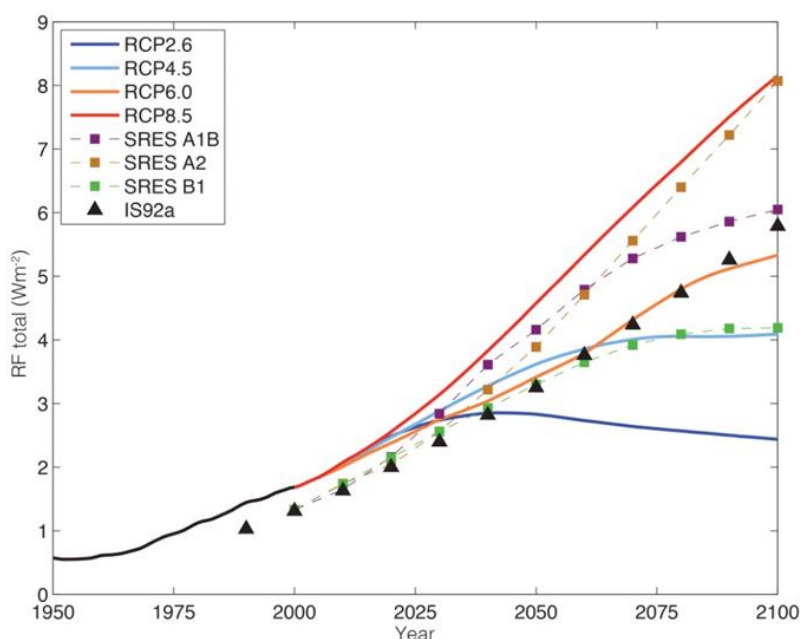
Miután az egyes ágazatokat, (pl. a természetvédelmet, mező- és erdőgazdaságot, ivóvízellátást, turizmust, területfejlesztést, bányászatot stb.) a felszín alatti vizekre gyakorolt klímaváltozások különféleképpen is, és összetetten is érintik, ezért célul tűztük ki, hogy az országos, áttekintő vízkészlet-gazdálkodási modell kialakításához vezető lépcsőfokokként megadjuk, azokat az ott megnyíló és javasolható értékeléseket is.

### 2.2 *Klimatikus inputok beszivárgási modellhez, új referencia időszak, új klímaprojekciók, klímaablakok*

A NATÉR-1 projekt esetében mindössze egy klimatikus projekció mellett vizsgáltuk, számítottuk a sekély felszín alatti vizeket közvetlenül tápláló beszivárgási értékeket. Az utóbbi években egyre gyakrabban felmerült igény volt, hogy lehetőleg több egymástól különböző alapon nyugvó klímapmodell beszivárgásra hatással lévő adataira készítsünk előrejelzéseket, Indokolt ez azért is, mert az egyes projekciók esetében más, és más kritikus következmények jöhetnek elő, melyekre, az előzetes elővigyázatosság mellett készülnünk kell, megfelelő alkalmazkodási stratégiák kidolgozásával.

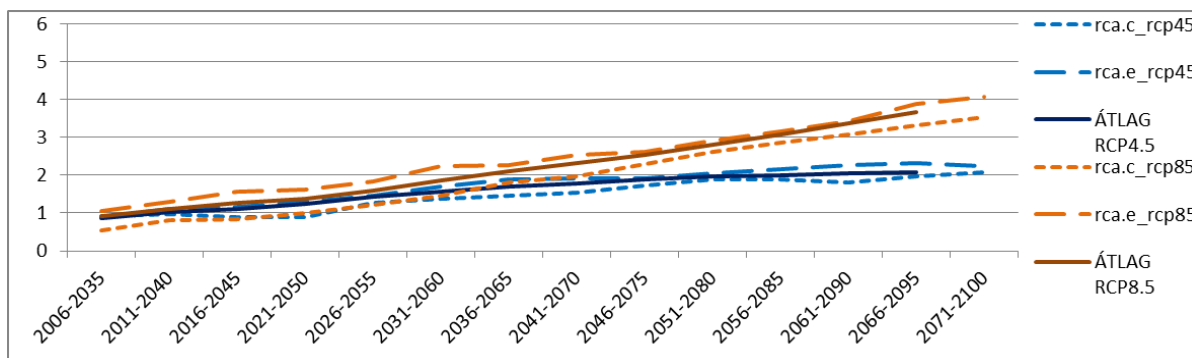
Áttekintve a jelenleg hozzáférhető klíma-projekciókat, végül is a mostani NATÉR-2 projektben 4 változat előrejelzéseit vettük figyelembe. Ezek részletesebb bemutatása az 1. mellékletben található.

Itt most csak annyit említünk meg, hogy ezek a klímaprojekciók az EURO-CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, EC-EARTH globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációi, és a hidrológiai-hidrogeológiai vizsgálatainknál az ezekben számított adatokat használtuk. Mind az RCA4\CNRM-CM5, , mind az RCA4\EC-EARTH klímamodel kombináció esetében feltételezték a 2100-ra elért teljes sugárzási kényszer változását: 8.5 W/m<sup>2</sup>, 6.0 W/m<sup>2</sup>, 4.5 W/m<sup>2</sup>, vagy 2.6 W/m<sup>2</sup>. (Sugárzási kényszer alatt a troposzférában elnyelt nettó sugárzási energia megváltozását értjük.) Ezek közül a "közepes" változást feltételező, tükröző 4.5 W/m<sup>2</sup> változat, illetve a jelentősebb, drasztikusabb főként hőmérsékletváltozást, növekedést reprezentáló 8.5 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszer melletti előrejelzések felszín alatti vizekre gyakorolt hatásait vizsgáltuk.



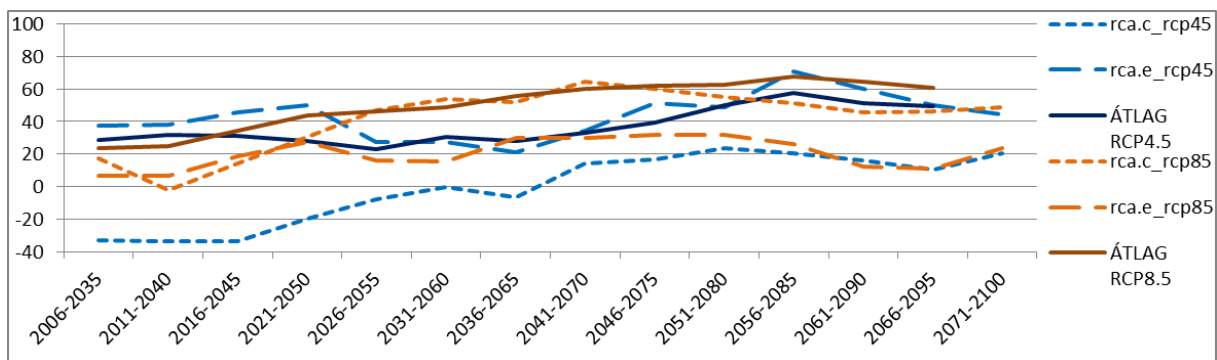
2-1. ábra: Az SRES, valamint az RCP forgatókönyvek sugárzási kényszer pályáinak összehasonlítása

Általánosságban elmondható, hogy a hőmérsékleti előrejelzések mind az RCA4\CNRM-CM5, mind az RCA4\EC-EARTH klímamodel szimuláció alapján egyértelműen növekvők, az utóbbinál jelentősebbek.



**2-2. ábra: Hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodell kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható hőmérséklet-változást adja meg °C-ban, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.**

A csapadék esetében a kép változatosabb, bár az évszázad végére mindegyik esetben magasabb a referencia időszakra számítottnál. Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimulációi esetében a csapadék éves átlagok harmincéves átlagolásával készített előrejelzés a referencia-időszakhoz képest, — a többi klíma-projekciótól eltérően, — az évszázad első felére csapadék csökkenést prognosztizál.



**2-3. ábra: Csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodell kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható csapadék-változást adja meg mm-ben, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.**

Végül hangsúlyozzuk, hogy a felszín alatti vizekre gyakorolt klímaváltozási hatásoknál olyan eljárásokat alkalmaztunk, melyek lehetővé teszik bármilyen más klimatikus előrejelzés vizsgálatát is, legyenek azok újabb klímaprojekciók, avagy időjárás generátorokból kapott értékek.

### **2.3 A felszín alatti vízmérleg-számítási egységek, módosított középtájak kijelölése, a mérési adatokat megadó CARPATCLIM-HU és az új klímaprojekciók eltérő rácspontjai figyelembevételével**

A NATÉR-2 felszín alatti vizes értékelésnél módosítottuk a NATÉR-1 ben alkalmazott, Thornthwaite zónákra alkalmazott területi egységeket, azok ugyanis az egyes klímaprojekciókban már nem kellő mértékben tükrözték a beszivárgás-változások fiziográfiai, elevációs, medencebeli, geológiai, geomorfológiai, hidrogeológiai, növényföldrajzi, földhasznosítási tényezőit, valamint nem elég hangsúlyosan jellemzik a medencebeli helyzetüket. Ezért a jelenleg elfogadott hazai középtájakat választottuk vizsgálati területi egységekkül, melyek mind a klimatikus, mind az említett egyéb tényezőkre is figyelemmel vannak, ugyanakkor eltérőek, megkülönböztethetőek a többi középtáj hasonló jellemzőitől.

Mindemellet a középtájak használata lehetővé teszi azt is, hogy a CARPATCLIM-HU, valamint az EURO-CORDEX adatbázisból nyert rácsponti adatsorok elemei a területi átlagolásra elegendő számban álljanak rendelkezésre. A CARPATCLIM-HU 0.1° × 0.1° felbontású adatbázisából 1104 rácspont fedi le Magyarország területét, míg az EURO-CORDEX régióra vonatkozó, — 0.11° × 0.11° felbontású, — klímamodell adatok esetében a rácspontok száma 759 (1. Melléklet). További előnyt

jelent ez esetben, hogy a középtájak centroidjához mind a mért, mind a számított értékekből lehet megfelelő, elegendő számú, és egymással összevethető értékeket, idősorokat előállítani. (A kistájak szerinti részletesebb bontást éppen ezért sem lehetett alkalmazni.)

## **2.4 A referencia időszak (1973-2004) mért (CARPATCLIM-HU), és a klímaprojekciók számított csapadék és hőmérsékleti adatainak összevetése, a számított értékek bias korrekciója a beszivárgás-modellezés előkészítésére**

A vizsgálatok referencia-időszakára vonatkozóan az 1973-2004 időszakot választottuk. (Az 1973-as kezdőévet determinálta az a tény, hogy a beszivárgás-számításokat végző HELP szoftver indulónapjaként egy szökőévet követő január 1-jét kell megadni.)

Az adott időszakra vonatkozóan valamennyi középtáj centroidjára, a napi adatokból számított sokéves átlagokat képeztünk, és ezeket vetettük össze. Az eltérések mind a csapadékösszegek, mind a középhőmérsékletek esetében is olyan mértékűek voltak, amelyek közvetlen beépítése a HELP beszivárgás-számításokban irreális értékeket produkáltak volna, tekintettel, hogy a klímaváltozók és a beszivárgások közötti kapcsolat nem-lineáris, továbbá a vízmérleg elven működő modell esetében mindenképpen szükséges a realisztikus, vagyis az ismert adatokon alapuló tartományban biztosítani a talajzóna nedvességviszonyaiban bekövetkező változásokat. Éppen ezért minden egyes középtájra vonatkozóan képeztük a klímaprojekciókban kapott és a mért sokéves átlagok arányait a csapadékösszegek esetében, illetve a különbségeket a középhőmérsékletek esetében. Ezeket felhasználva a napi csapadékok esetében szorzóként, a napi középhőmérsékletek esetében addícióként a referencia-időszak korrekcióját végre tudtuk hajtani. A beszivárgás-számításokat végül is ezen kiegészítő, addicionális "bias" korrekció alapján kapott értékekkel végezhetjük el, mind a referencia-időszakra, mint klimatikus projekciók 2100-ig terjedő szakaszára. (3. melléklet) Korábbi vizsgálataink során szerzett tapasztalataink alapján a beszivárgás kellő pontosságú megadásához további korrekcióra már nem volt szükség. (Ennek oka az, hogy a beszivárgás döntő mértékben a téli félévben végbenő tartósabb folyamatok következménye, melyben a rövidebb idejű extrém nagy, vagy kis, — párolgással csökkentett csapadékok hatása elhanyagolható).

A HELP modell által igényelt formában megadott klimatikus adatok ("weather" fájlok a csapadék, hőmérséklet, sugárzási és evapotranszpirációt befolyásoló értékekkel), mind a CARPATCLIM-HU mért, mind az új klímaprojekciók korrigált viszonyaira megtalálhatók az elkészült adatbázisban.

## **2.5 A beszivárgási egységek (HRU-k) kialakítása, fizikai tulajdonságai**

A középtájak területére eső felszíni földtani képződmények poligonjait használtuk a beszivárgási egységek („Hydrological Response Unit”-ok, HRU-k) lehatárolásánál. Tettük ezt elsősorban azért, mert a talajképző kőzetek a beszivárgási területeken alapvetően meghatározzák a talaj hidrofizikai paramétereit is, természetesen a felszíni hatásoknak kitett módosulásoknak megfelelően. Ezeket a felszíni következményeket azonban a HELP-be épített empirikus algoritmusok képesek kezelni. A jelen fázisban 4 fő talajképző kőzet csoportot különítettünk el: finom porózus, durva szemcsés („durva porózus”), repedezett talajképző kőzeten kialakult talajzóna, és karsztos felszínen kialakult talajzóna, (~rendzina). A HELP modell vízmérleg modelljének lényege a „bucket” ~ "virágos cserépedény" típusú megközelítés. E megközelítésben, az „edény”-ben lévő talaj napi nedvesség tartalmát a megelőző időszakban felhalmozott nedvességtartalom mellett, a csapadék és a felszíni lefolyás — és ezzel együtt, az evapotranszpirációs veszteség, — különbsége határozza meg.

Csapadéktöbblet esetén a tárolt nedvességekészlet addig nő, míg az a szántóföldi vízkapacitást meg nem haladja, ekkor megindul a telített zóna felé irányuló leszivárgás, ez adja a tényleges, freatikus vizet elérő beszivárgást. Amikor csapadékhiány van, akkor csak a párolgás általi készletfogyás jelentkezik, mindaddig, amíg a csökkenés hatására a nedvességtartalom eléri a holtvíztartalmat jelző hervadásponthoz. A modell által használt hidrofizikai paraméterek a következők: teljes porozitás, szántóföldi vízkapacitás, holtvíztartalom, továbbá a telített állapotra vonatkozó hidraulikus szivárgási tényező, valamint az edény tárolókapacitását jellemző talajvastagság érték.

A HRU-k említett alapvető beszivárgást meghatározó tényezői mellett további módosító tényezők még a növényborítottság mértéke és állapota, a terep lejtőszöge, és irányultsága, és más, földhasználati (LULC) és adatok is. Ezeket a HRU-k tovább-bontásánál érdemes alkalmazni, elsősorban azoknál a térben és időben részletesebb lokális feladatoknál, amelyek ezeket igénylik, és amelyeknél a szükséges egyéb adatok is rendelkezésre állnak.

Az általunk most végzett középtáji szintű, regionális jellegű vizsgálatoknál csak a felszíni lefolyás modellezéseknél alkalmazott CN összefoglaló értékeket alkalmaztuk, HRU típusonként egyet. A részletesebb ismertetés megtalálható a 2. számú mellékletben.

## ***2.6 Beszivárgás modellezés a HELP-3 szoftver alkalmazásával (CARPATCLIM-HU: rácspontokra és középtájakra, klímaprojekciók: középtájakra)***

A HELP beszivárgási modellezést a 2. mellékletben ismertetjük részletesen. A NATÉR-1-ben végzett modellezéshez képest a jelen vizsgálatainknál jelentős változást jelentett az, hogy itt valamennyi középtájra el kellett végezni az ott található valamennyi HRU-ra a HELP modellezést a bemenő klimatikus napi paraméterekkel. A referencia-időszak esetében a CARPATCLIM-HU adatai alapján emellett még a rácsponti adatokra is külön-külön meghatározásra kerültek a beszivárgási értékek, biztosítva ezáltal a lehetőséget középtájnál szűkebb lokális problémák jelen idejű vizsgálatára.

A fent említett egyszerűsítések ellenére is rendkívüli nagyszámú HELP futtatást kellett végezni, melyhez kidolgozott módszertani fejlesztést a 2. mellékletben mutatjuk be.

## ***2.7 A beszivárgási modellben számított értékek, (outputok), a HRU egységekre a referencia időszak mért CARPATCLIM-HU klímaadataira, rácspontokra és a középtájakra***

A beszivárgási modellhez rendelkezésre állt valamennyi szükséges input, vagyis a CARPATCLIM-HU napi felbontású klimatikus adatai a HELP szoftver által megkövetelt formában, továbbá a talajzónákra vonatkozó fizikai paraméterek és az egyéb felszíni hatásokat reprezentáló komplex paraméterek, a Curve Number (CN) értékek. Ez utóbbiak azonban jó közelítéssel, és ebben a középtáji regionalitásban, hozzácsatolhatók voltak az említett 4 talajtípushoz.

A 44 középtájra, azon belül 4-4 talajtípusra a mért klimatikus adatokat reprezentáló CARPATCLIM-HU adatokkal végeztük el a futtatásokat az újonnan kifejlesztett nagyszámú realizációt lehetővé tevő szoftver segítségével. A modellben számítottuk a beszivárgások, a felszíni lefolyások és az evapotranszpiráció napi értékeit az 1961-2010 közötti időszakra.

Ezek a kimenő adatok (outputok) gyakorlatilag 50 méteres pontossággal biztosítanak kiinduló bemenő adatokat — az 1961-2010 évek intervallumában, — olyan lokális idősoros vizsgálatokhoz, melyek a felszín alatti vizektől függő ökoszisztémák ("FAVÖKO"-k) értékeléséhez nélkülözhetetlenek. Ezek közül a jelentősebbeket említve, ilyen időszakok:

- a leszálló (hideg-vizes) forráshozamok, környezetük felszín alatti vízszintjei,
- domb és hegyvidéki területek forrásvízfolyásai, vagy alapvíz-hozamai, környezetük vízszintjei,
- síkvidéki területek vizes élőhelyeinek és környezetük felszín alatti vízszintjei, a FAVÖKO-kat tápláló, odaáramló felszín alatti vízhozamok.

Természetesen ezeket a beszivárgási idősorokat az adott helyszínre készített lokális áramlási modellekbe kell, (és lehet is) illeszteni, kiegészítve további, a megcsapolási környezetnél jelentkező olyan folyamatokkal, mint a magas talajvízállású területek talajvízpárolgása, a megcsapoló vízfolyások vagy csatornák vízszintjének megváltozása, esetenként a vizes területet érintő felszíni lefolyások értékei. (Országos értékelésünk esetében ilyen pontosságú vizsgálatok végzése nem volt feladat, viszont mindenképpen fel kívántuk hívni a figyelmet, hogy a munkafolyamat ebben a fázisában kapott eredmények megnyitották az időben és térben részletesebb (~ havi és ~ 50 m-es felbontású) értékelések előtt az utat.

Azonban itt kell megjegyezni azt is, hogy a jelentősebb felszín alatti vízkivételekkel érintett regionális felszínalatti vízáramlási rendszereinknél, — mint amilyen Dunántúli Középhegységi karsztos, vagy a Pannon-medencebeli porózus rendszer is, — a részletesebb vizsgálatoknál már nem hagyhatók figyelmen kívül az országos értékelésekben, modellezésekben számítható termelési hatások sem.

## **2.8 A beszivárgási modellben a középtájak HRU egységeire számított értékek, (outputok), a 4 klímaprojekcióban 128 évre (1973-2004, 2005-2052, 2053-2100 közötti időszakokra)**

A klímaprojekciókban, számított napi klimatikus értékek középtáji bias korrekció után megkapott napi adatait alkalmaztuk a HELP hidrológiai modell beszivárgás számításainál is. A számításokat 3 idő-intervallumban végeztük: az 1973-2004 közötti 32 évre (referencia-időszakra), valamint a 2005-2052, 2053-2100 közötti 48-48 évi időszakokra. A HELP szoftverrel szerzett korábbi tapasztalataink azt mutatták, hogy 50 évnél hosszabb periódusok első évtizedére számított értékek még nem reálisak, a nedvesség-tartályok feltöltődései még "nem álltak be". Ezt a sajátosságot úgy kezeltük, hogy a bemenő napi csapadék, hőmérsékleti és sugárzási idősorokat (weather-1, weather-2 és weather-3 fájlok adatait) egymás után kétszer építettük a modellbe, majd a számított outputokat csak a második periódusból vettük figyelembe) (2. melléklet).

Itt is, hasonlóan a CARPATCLIM-HU esetében számítottakhoz, a freatikus zónát tápláló beszivárgás mellett, számítottuk a felszíni lefolyás és az evapotranszspiráció napi értékeit is, közölve a csapadék napi értékeit is.

A számítások eredményeként így kapott napi értékekből havi, évi csapadék-, beszivárgás-, felszíni lefolyási- és evapotranszspirációs- összegek is megadhatók. A felszín alatti vizek szintjének és hozamának értékelésénél ezek használatosak, eltérően a lefolyás-számításokra összpontosító más hidrológiai vizsgálatoktól.

A 44 középtáj 4-4 HRU-jára vonatkozóan a napi adatokat tartalmazó output-fájlok mellett, ezeket a havi és évi idősorokat is előállítottuk mind a három időintervallumban, mind az 1973-2100 közötti 128 évre, egyben.

Ezek az idősorok megnyitották további értékelések felé az utat, többek között az átlagtól jelentősebb eltérések mértéke és gyakorisága becsülhető alakulásának elemzését a különböző klímaprojekciók esetében.

## **2.9 30 éves időtartamú klímaablakokra (1975-2004, 2023-2052 és 2071-2100) vonatkozó beszivárgási átlagértékek (mint peremfeltételek) megadása a XL Pannon v.3.0 (országos, 3D áramlási modell számára)**

A klímaprojekciókban számított napi, havi és évi értékeket nem lehet olyan klasszikus folyamatos idősnak tekinteni, mint amilyen a CARPATCLIM-HU mért adatainál rendelkezésre állnak, és amelyeknek hidrológiai, vagy hidrogeológiai következményei vízszint-, vagy hozam-idősorokban megjelennek. Varga György, a "Balaton vízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változása" című, az RCMTÉR 2016-ban tartott hatásvizsgálói konzultációs workshopon tartott előadásában így fogalmazott:

"Klasszikus értelemben vett 'hosszútávú előrejelezhetőség' az éghajlati modellekkel nem valósítható meg. Éghajlati időskálán a klímamodellek eredményeit, mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs prognosztikai jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát a szerint osztályozzuk, hogy kiválasztott időszak statisztikai jellemzőit milyen pontossággal képesek visszatükrözni".

A beszivárgási előrejelzéseinknél több megoldás is kínálkozott arra, hogy a klíma-modellek alapján várható hatásokat bemutassuk, illetve azokat országos 3D-s termeléseket is tartalmazó numerikus áramlási modelleken alkalmazzuk. Mi a következő 30 éves "klímaablakokra" vonatkozó átlagértékeket választottuk: 1975-2004, 2023-2052 és 2071-2100 közötti intervallumokra.

## **2.10 Az XL Pannon v.3.0 modell vázlatos ismertetése**

Az MBFSZ-nél (és jogelődjeinél, a MÁFI-ban, és az MFGI-ben) több országos 3D-s áramlási modell készült, mely célirányos fejlesztésekkel, — áttekintő jelleggel, — alkalmasnak bizonyult különböző vízgazdálkodási kérdések megválaszolására, vagy feladatok megoldására. Itt utalunk az előzőekben említett országos vízmérleg-számításokra, az öntözésfejlesztéssel kapcsolatos hatások előrejelzésére, vagy a belvizek felszín alól származó szennyezőanyagainak tömegáram-hozam becsléseire. Ezen esetekben az alap az országhatáron átnyúló Pannon XL permanens áramlási modell volt, melyekben Mindemellett meg kell jegyezni, hogy az MBFSZ és jogelődjei, a Pannon XL nagyregionális modell tapasztalatai alapján számos nagy-regionális és regionális modellt is készített, folyamatosan fejlesztve a módszereket, frissítve a bemenő adatokat is, sőt szükség esetén a modellt a további, pontosabb kalibrációi érdekében kiegészítő geofizikai, hidrogeokémiai, izotóphidrológiai felmérésekkel és értékelésekkel támogatta. Külön kiemelandő, hogy a határokon átnyúló víztestek esetében a szomszéd országok (Szlovákia, Ausztria, Szlovénia) hasonló geológiai szolgálataival közösen harmonizált adatbázisokon alapuló modellfejlesztésekre is sor került, a TRANSENERGY és a T-JAN projektek keretében. Jelenleg a Pannon XL frissítése folyamatban van MODRI néven, továbbá további határokon átnyúló egyeztetés, modellezés is folyik a DARLING-e nemzetközi projekt keretében Horvátország, Szerbia és Románia felé is.

A különböző klímaprojekciók 30 éves klímaablakaira számított sokéves átlagos beszivárgási értékeit a Pannon XL vízgazdálkodási alkalmazásokra továbbfejlesztett változatának frissítésére használtuk.

A Pannon XL részletes bemutatását a 4. melléklet tartalmazza.

## **2.11 A Pannon XL v.3.0 modellben a klímaablakokban számított értékek bemutatása**

A Pannon XL v.3.0 modellben a klímaablakokban számított beszivárgási értékeket új peremfeltételként mind a CARPATCLIM-HU, mind a különböző klímaprojekciók 3-3 db 30 éves klímaablakára alkalmaztuk, mind a 2008-2013 évek átlagos víztermelése mellett, mind termelések nélküli, "szűz" változatokra.

A 44 középtáj 4-4 HRU-jára számított beszivárgási értékek, melyek, — mint az előzőekben említettük, — időben és térben részletesebb értékeléseket is lehetővé tesznek. Az országos méretű Pannon XL v.3.0 modellben azonban a középtájak HRU-ire számított konkrét értékek nagy száma miatt beszivárgási kategóriákba soroltuk azokat és a modellben az egyes kategóriák középértékeivel számoltunk. A modellezések a Visual Modflow szoftvercsomag felhasználásával készült, melynek említett változatait az adatbázis tartalmazza. A klímaváltozások szempontjából legfontosabb változatokat országos webtérképeken mutatjuk be.

A Pannon medenceterületre eső részekre a következő változatok kerültek bemutatásra a NATÉR-2 projekt web-es felületén:

- A referencia időszakra vonatkozó számítások, talajvízszintek:
  - A CARPATCLIM-HU mért klímaadatok alapján számított talajvízdomborzat mBf
  - RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 1 klímaablakára számított talajvízdomborzat mBf;
  - A referencia időszakra vonatkozó számítások, net fluxusok:
    - A CARPATCLIM-HU mért klímaadatok alapján számított net fluxus mm/év
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 és RCA4/CNRM-CM5/RCP8.5 klímaprojekciók 1 klímaablakára számított net fluxus mm/év
    - Az RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 és RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekciók 1 klímaablakára számított net fluxus mm/év
  - A klimatikus jövőképekre vonatkozó net fluxus számítások:
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 2 klímaablakára számított net fluxus mm/év
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 3 klímaablakára számított net fluxus mm/év
    - Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 2 klímaablakára számított net fluxus mm/év
    - Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 3 klímaablakára számított net fluxus mm/év
  - A klimatikus jövőképek számított talajvízszint értékei közötti különbségek:
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP8.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben
    - Az RCA4/CNRM-CM5/RCP8.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben (C\_85\_3\_bol\_1\_Head\_OH\_Pa.grd)
    - Az RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben

- Az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben (E\_45\_3\_bol\_1\_Head\_OH\_Pa.grd)
- Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben
- Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított talajvízszintek közötti különbségek m-ben
- A klimatikus jövőképek számított net fluxus értékei közötti különbségek:
  - Az RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított net fluxusok közötti különbségek mm/évben
  - Az RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított net fluxusok közötti különbségek mm/évben
  - Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 2. klímaablakára és a referencia időszakra számított net fluxusok közötti különbségek mm/évben
  - Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímaprojekció 3. klímaablakára és a referencia időszakra számított net fluxusok közötti különbségek mm/évben

### 3 ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

A klímaváltozás sekély felszín alatti vizekre gyakorolt hatásának elemzésére 4 klímaprojekció által szolgáltatott klimatikus adatok álltak rendelkezésünkre. A felszín alatti beszivárgások szempontjából a két legfontosabb paraméter a hőmérséklet és a csapadék, így ezek, valamint az orográfiai adatok és a származtatott klimatológiai változók területi eloszlásainak vizsgálatával kerültek kiválasztásra a projekt során felhasznált klímaprojekciók. A NATÉR-2 továbbfejlesztése egy közepesen konzervatív becslés felé irányult, a statisztikai sokaság átlagát leginkább reprezentáló projekciók adatsorainak felhasználásával. Az éghajlati forgatókönyvek közül a két legnagyobb számban elérhető, közepesen optimista RCP4.5 és a magas sugárzási kényszert reprezentáló RCP8.5 scenáriók kerültek kiválasztásra. Mindezek két globális klímamodell, (az CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 és az ICHEC-EC-EARTH) alapján készültek. Az 1. mellékletben részletesebb is bemutatott értékelés alapján a hőmérsékleti idősorokon jól látható, hogy az évszázad végéig emelkedő tendencia jelentkezik. Az RCP8.5 esetében a várható hőmérséklet-változás becslése magasabb, az RCP4.5 esetében alacsonyabb mértékű hőmérsékletemelkedés projektálható. Az RCA4/CNRM-CM5 szimulációk alacsonyabb, az RCA4/EC-EARTH modelledmények pedig magasabb mértékű változást vetítenek előre mind a hőmérséklet, mind a csapadék tekintetében. A csapadék alapú klimatológiai indikátorok esetében kevésbé hangsúlyos a differencia, mint a hőmérséklet esetében. A csapadék-változás idősorok közül a RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció adatsora - a többi kiválasztott szimulációval ellentétben - az évszázad első felére csapadék csökkenést vetít előre. A másik három szimuláció a csapadék mennyiségének pozitív eltolódását becsli és az általunk megvizsgált modell szimulációk átlagához jobban közelítenek.

A historikus beszivárgási modellek készítésénél, az 1961-2010 közötti időszak mért adataira: a CARPATCLIM-HU napi csapadékösszeg, középhőmérséklet, sugárzás adataira támaszkodhattunk, ennek 1104 rácspontja fedte le az ország területét. A NATÉR-1 vizsgálatai alapján, — különös tekintettel a beszivárgást meghatározó hidrogeológia, geomorfológiai, felszín-borítottsági és fiziográfiai (elevációs és medencebeli) helyzetekre, — vizsgálatunk területi alapegységéül a középtájakat választottuk. A CARPATCLIM-HU rácspontok klimatikus mért adatait a középtájak centroidjára átlagolt értékekkel adtuk meg. Ennek alapján a beszivárgások számára területileg megfelelőbb, és a további értékelésekhez kezelhetőbb mennyiségű, és ezért áttekinthetőbb és ellenőrizhetőbb input állt rendelkezésünkre.

A hiteles 1:100 E méretarányú felszíni földtani térkép foltjait 4 talajképző kőzet kategóriába sorolva előállítottuk a HRU egységeket, melyekhez, —jó közelítéssel ebben a mérettartományban és a beszivárgási viszonyok robusztussága miatt, — a felszíni lefolyást befolyásoló felszíni tényezőket is hozzárendelhettük.

Ezt követően elvégeztük a HELP szoftverrel a beszivárgás számításokat a HRU-kra, a CARPATCLIM-HU mért klimatikus adatai alapján, mind a rácsponti, mind a középtáji egységekre.

Az 1973-2004 közötti referencia időszakra mind a 4 klíma-projekciók esetében a kapott nyers adatok a mérthez képest eltérést mutattak, ezért a csapadék és hőmérsékleti adatok tekintetében bias korrekciót végeztünk, legfőképp azért, hogy ezeket az inputokat a beszivárgási modellek futtatásához szükséges érvényességi tartományban tartva végezhessük a HELP modellezést. Az EURO-CORDEX és a CARPATCLIM-HU rácspontjainak eltérő száma és helyzete miatt, a korrekciót jelen munka során még csak a középtájak centroidjára megadott átlagok alapján lehetett elvégezni.

A HELP futtatások eredményeként valamennyi középtáj valamennyi HRU-jára a 4 klímaprojekció 128 éves időszakára napi beszivárgási értékek kerültek kiszámításra. Ezekből a gyakorlati felhasználásra alkalmasabb havi és éves összegek és sokéves átlagok is kiszámításra kerültek. (A HELP modell mindemellett a számítja a vízháztartás további elemeit is, így a felszíni lefolyás és evapotranszspiráció értékeit is, ezek használhatósági körének megadása még további vizsgálatokat igényel).

A számítások eredményei már alkalmasak a sekély felszín alatti vizek térben részletesebb vizsgálataira. Itt olyan lokális, szubregionális előrejelzési feladatokat kell megemlíteni, melyek a felszínalatti vizektől függő ökoszisztémákkal, a forrásokkal, forrásvízfolyásokkal, a belvizekkel, öntözésekkel, ivóvíztermelésekkel kapcsolatban merülnek fel.

Tekintettel a hazai nagy-regionális felszín alatti áramlási rendszereinkre, szükségesnek tartottuk, hogy a munka során számított beszivárgások hatását a felszín alatti vizek vízháztartására és vízszintjeire ezen rendszereink egészére is értékeljük. Természetesen a vizsgált terület mérete miatt további egyszerűsítéseket kellett alkalmazni. Az értékeléshez felhasználtuk a PANNON XL v. 3.0, 3D-s határokon túlnyúló numerikus áramlási modellt, mely a USGS által kifejlesztett, a hidrogeológiai gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott MODFLOW kód felhasználásával készült az MBFSZ (és jogelődei, a MÁFI és az MFGI) keretében, (és különböző újabban jelentkező feladatokhoz való továbbfejlesztése jelenleg is folytatódik.). A modellben azt vizsgáltuk, hogy a 2008-13 közötti időszak felszín alatti víztermelési viszonyai mellett, a klímaváltozási jövőképekre számított beszivárgások milyen vízszint-, és vízháztartás-változásokat eredményeznek. A modell-eredmények használhatóságánál figyelembe kell venni, hogy annak horizontális felbontása 2x2 km-es, és alapvetően a hazai pannóniai és negyedidőszaki sekély porózus, porózus és porózus termál víztestek múltbeli, jelenlegi és jövőbeni vízföldtani viszonyainak leírására irányul.

A Pannon XL v.3.0 változatnál peremfeltételként alkalmaztuk a 4 klímaprojekcióban számított beszivárgások sokéves átlagát a következő 30 éves időszakokra, "klímaablakok"-ra: az 1975-2004 közötti referencia-időszakra, valamint 2023-20523 és 2071-2100 közötti intervallumokra.

A modellben, — többek között számítottuk a termelések és a beszivárgások együttes hatására alakuló átlagos vízszintváltozásokat, valamint a megcsapolási területeken való kiáramló vízhozamokat is. Külön vizsgáltuk az "1. klímaablak"-hoz, vagyis referencia időszakhoz képest bekövetkező változásokat a 2. klímaablak, vagyis a 2023-2052 közötti "közeljövő", és a 2071-2100 közötti "távolabbi jövő" eseteire.

Általánosságban elmondható, hogy az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klíma modell szimuláció szerint, a közeljövőben a talajvízszintek, és a megcsapolási körzetekben kiáramló vizek csökkenésére lehet számítani, ami az ottani felszín alatti víztől függő ökoszisztémákat, és a felszín alatti vízből történő öntözési lehetőségeket érintheti kedvezőtlenül. A másik három klímaszimuláció esetében a

talajvízszintek is, és a megcsapolási körzeteknél kiáramló vízhozamok is növekednek, a közeli jövőben kevésbé, a távolabbi jövőben markánsabban. E változások egyaránt járhatnak pozitív és negatív hatásokkal is, ez utóbbira csak példaképp említhetjük a belvizek felszín alól származó részének, vagy egyes területeken a karszt-árvizek növekedését.

A különböző jövőképek hatásaihoz való alkalmazkodás tervezését célszerűen középtáji szinten kell elvégezni, figyelembe véve a havi, évszakos éves értékeket, azok változékonyságából fakadó következményeket. A középtáji vizsgálatokhoz célszerű felhasználni a CARPATCLIM-HU mért adatait, a beszivárgási és talajvíz-párolgási idősorok számításával és ezeknek meglévő talajvízszint-idősorok segítségével történő kalibrációjával. A középtájakon ezt követően részletes numerikus áramlási modellek készítése szükséges az elmúlt évtizedek klimatikus, termelési és egyéb beavatkozási viszonyainak leírására, kalibrációk utáni megértésére, értékelésére, figyelemmel a nagy regionális rendszerbeli helyzetre is. (Ez esetben a PANNON XL modellverziók adhatnak segítséget). Mindezen modellek egyúttal megfelelően alkalmazhatók lesznek a felszín alatti vizek védelméről szóló 2019/2004 kormányrendelet előírásai között szereplő (Mi) mennyiségi igénybevételi korlátok meghatározásához is. Az (Mi) értékek azok, — kiegészítve néhány más jogszabályi előírással, — melyek egyedül korrekt alapjai lehetnek a felszín alatti vizekkel való gazdálkodásnak, ideértve az engedélyezéseket és a különböző beavatkozások tervezését is. A középtáji, vagy víztest szintű ("szub-regionális") mérettartomány modelljeiben vizsgálhatók a klimatikus jövőképek is, és kialakíthatók a megfelelő alkalmazkodási stratégiák, területei fejlesztések, intézkedések is, melyeket összefoglalóan adaptív vízgazdálkodásnak nevezhetünk.

## 4 IRODALOMJEGYZÉK

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.G. (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Gogolev, M.I., 2002: Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. *Environmental Geology* 42, 248–258.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report

Jyrkama MI, Sykes JF, 2007: The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *J Hydrology* 338, 237–250.

Jacob, D. et al.: EURO-CORDEX: new high resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* (2014), 14:563-578

J.L.Richardson, M.J.Vepraskas: *Wetland soils Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification* CRC Press LLC 2001

Schroeder, P. R., Aziz, N. M. and Zappi, P. A., 1994: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide Version 3*, EPA/600/R-94/168a, U.S Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington D.C.

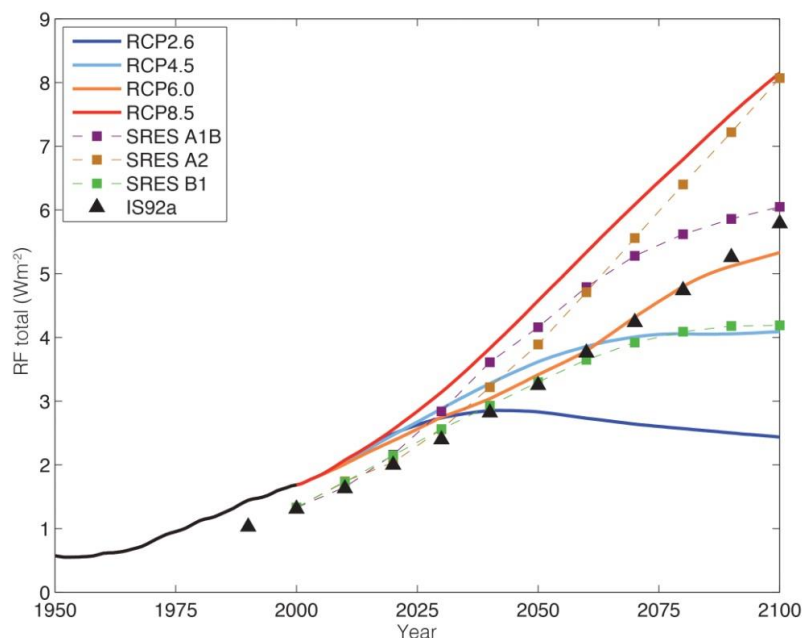
Spinoni, J, et al. 2014: Climate of the Carpathian Region in the period 1961-2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology* 35(7); Published online in Wiley Online Library, ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)) DOI: 10.1002/joc.4059

## 5 MELLÉKLETEK

### 5.1 MELLÉKLET – Klímamodellek

A NATÉR adatbázisában a CARPATCLIM-HU klimatológiai mérésekből rácsra interpolált adatai, valamint az ALADIN-Climate és a RegCM klímamodellel futtatott szimulációk eredményeként előállított adatok álltak rendelkezésre. A NATÉR továbbfejlesztése projekt keretében új klímamodell szimulációk adatai kerültek feldolgozásra.

A korábbi SRES (Special Report on Emission Scenarios) forgatókönyvek helyett az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ötödik értékelő jelentésében (AR5) a legújabb generációs RCP (Representative Concentration Pathways) forgatókönyvek, a kutatói közösség által kifejlesztett scenáriók közül kerültek kiválasztásra.



5-1. ábra: A SRES, valamint az RCP forgatókönyvek alapján a sugárzási kényszer változása

A sugárzási kényszer szintjének és pályaalakjának függvényében négyféle forgatókönyv típust határoztak meg a szakértők, amelyeket az alapján különböztetjük meg, hogy mekkorának feltételezzük a 2100-ra elért teljes sugárzási kényszer változását: 8.5 W/m<sup>2</sup>, 6.0 W/m<sup>2</sup>, 4.5 W/m<sup>2</sup>, vagy 2.6 W/m<sup>2</sup>. Sugárzási kényszer alatt a troposzférában elnyelt nettó sugárzási energia megváltozását értjük<sup>[2]</sup>.

Az általunk felhasznált adatbázis a CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) kezdeményezés regionális klímamodell szimuláció közül – figyelembe véve a projekciók számát, illetve a térbeli felbontást – a Magyarország teljes területét lefedő EURO-CORDEX adatbázis.

A vizsgálatok céljait figyelembe véve kerültek kiválasztásra a felhasznált projekciók, melyekről fontos megjegyezni, hogy a modellek bizonytalanságaival terheltek, ezáltal nem várható el az éghajlat jövőbeli alakulásának pontos becslése. A NATÉR hatásvizsgálataiban a két legfontosabb paraméter a hőmérséklet és a csapadék, így ezek, valamint az orográfiai adatok és a származtatott klimatológiai változók területi eloszlásainak vizsgálatával kerültek kiválasztásra a projekt során felhasznált klíma

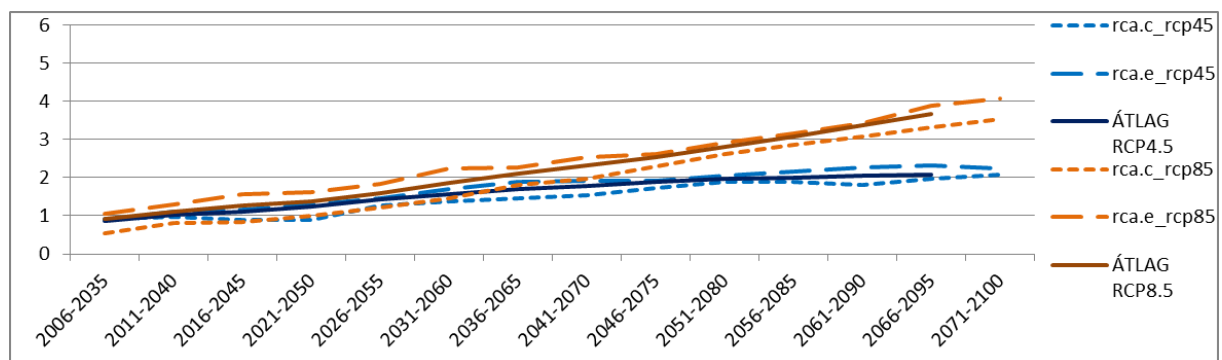
projekciók. A NATÉR továbbfejlesztése egy közepesen konzervatív becslés felé irányult, a statisztikai sokaság átlagát leginkább reprezentáló projekciók adatsorainak felhasználásával. Az éghajlati forgatókönyvek közül a két legnagyobb számban elérhető, közepesen optimista RCP4.5 és a magas sugárzási kényszert reprezentáló RCP8.5 scenáriók kerültek kiválasztásra.

1. táblázat: A kiválasztott klímamodellek és forgatókönyvek

Regionális klímamodell	Globális klímamodell	Forgatókönyv
RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	historical RCP4.5 RCP8.5
RCA4	ICHEC-EC-EARTH	historical RCP4.5 RCP8.5

Az ábrákon láthatók a Magyarország területi átlagára vonatkozó hőmérséklet- és csapadék-változás idősorok a kiválasztott modell-kombinációkra, valamint a több mint 30 megvizsgált szimulációból készített átlag. Az idősorok éves átlagok harmincéves átlagolásával álltak elő, az egyes ensemble tagok összehasonlítása céljából.

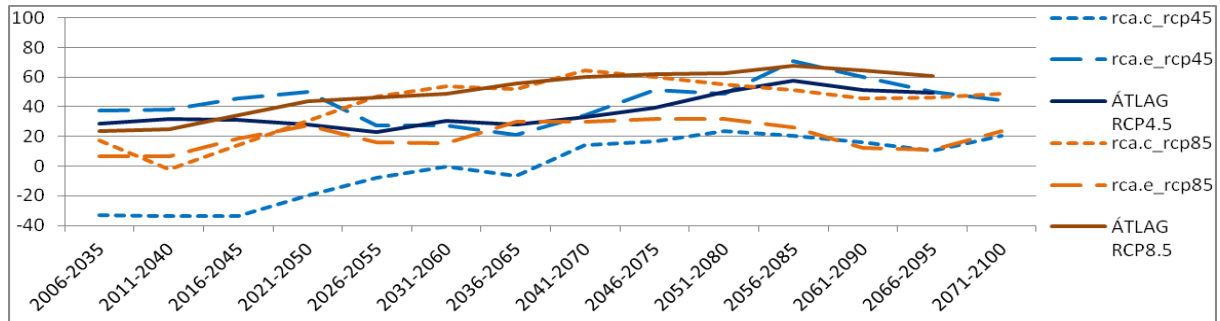
A hőmérsékleti idősorokon jól látható az évszázad végére emelkedő tendencia, illetve a két forgatókönyv közötti különbség. A két scenárió közül az RCP8.5 várható hőmérséklet-változás becslése a magasabb, az RCP4.5-ös forgatókönyvvel meghajtott modell-kombinációk ennél alacsonyabb mértékű hőmérséklet emelkedését projektálnak. Az RCA4/CNRM-CM5 szimulációk a sokaság átlagához mérten alacsonyabb, az RCA4/EC-EARTH modelledmények pedig magasabb mértékű változást vetítenek előre.



5-2. ábra: Hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodell kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható hőmérséklet-változást adja meg °C-ban, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.

A csapadék alapú klimatológiai indikátorok esetében kevésbé hangsúlyos a differencia, mint a hőmérséklet esetében. <sup>[3]</sup> A csapadék-változás idősorok közül az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció adatsora alapján - a többi kiválasztott szimulációval ellentétben - az évszázad

első felére csökkenést projektál. A másik három szimuláció a csapadék mennyiségének pozitív eltolódását becsli és az általunk megvizsgált modell szimulációk átlagához jobban közelítenek.



**5-3. ábra: Csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodell kombinációjának adatai alapján. A függőleges tengely a várható csapadék-változást adja meg mm-ben, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.**

A CARPATCLIM-HU egy nagyfelbontású, klimatológiai mérésekből előállított, szabályos rácsra interpolált adatbázis, az EURO-CORDEX régió elforgatott pólusú koordinátarendszerben definiált téglalap mely adatsorai 0,44°-os és 0,11°-os felbontással érhetők el. A klímamodell szimulációk kiválasztása során a felbontás mértéke is szempontként szerepelt, így a kisebb felbontású 0,11°-os szimulációk kerültek előtérbe. Az adatbázisok alaptulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

**2. táblázat: A felhasznált adatbázisok alaptulajdonságai**

Adatsor	CARPATCLIM-HU	EURO-CORDEX
Lefedett időszak	1961-2010	1971-2100
Térbeli felbontás	0.1° x 0.1°	0.11° x 0.11° 0.44° x 0.44°

A regionális beszivárgási számításokhoz megfelelő átlagos klímaadatok előállítása FORTRAN nyelven íródott programokkal történt. Az adatok előálltak a CARPATCLIM-HU, valamint az EURO-CORDEX adatbázisból nyert adatsorok felhasználásával is. A CARPATCLIM-HU adatbázisból 1104 rácspont fedi le Magyarország területét, klímamodell adatok esetében a rácspontok száma 759.

A bemenő adatként szolgáló négy fájl közül az első három tartalmazza a csapadék, hőmérsékleti és besugárzási napi adatokat, illetve azok havi átlagát. A negyedik fájlban szerepel a földrajzi szélesség, a tenyészidőszak első és utolsó napja, a levélfelületi index (LAI), az éves átlagos szélesebség, valamint a negyedéves relatív páratartalom adatai.

## 5.2 MELLÉKLET – Beszivárgás számítás

A talajvíz-szintek numerikus modellezéséhez szükséges beszivárgási intenzitásokat egydimenziós vízmérleg modellek segítségével számítottuk ki minden egyes beszivárgási zóna típusra. A projekt során a HELP modellt (Schroeder et al., 1994) alkalmaztuk, tekintve, hogy ez a módszer jól ismert (Gogolev, 2002; Jyrkama and Sykes, 2007), és előzőleg már sikerrel alkalmazták hazai területeken beszivárgás számítás céljára. A HELP modell futtatását a WHI UnSat Suite Plus 2.2 grafikus interfész segítségével végeztük. A HELP modell kimenetei könnyen alkalmazhatóak MODFLOW modell környezetbe, amit a hidraulikus potenciál eloszlás numerikus szimulációjára használtunk.

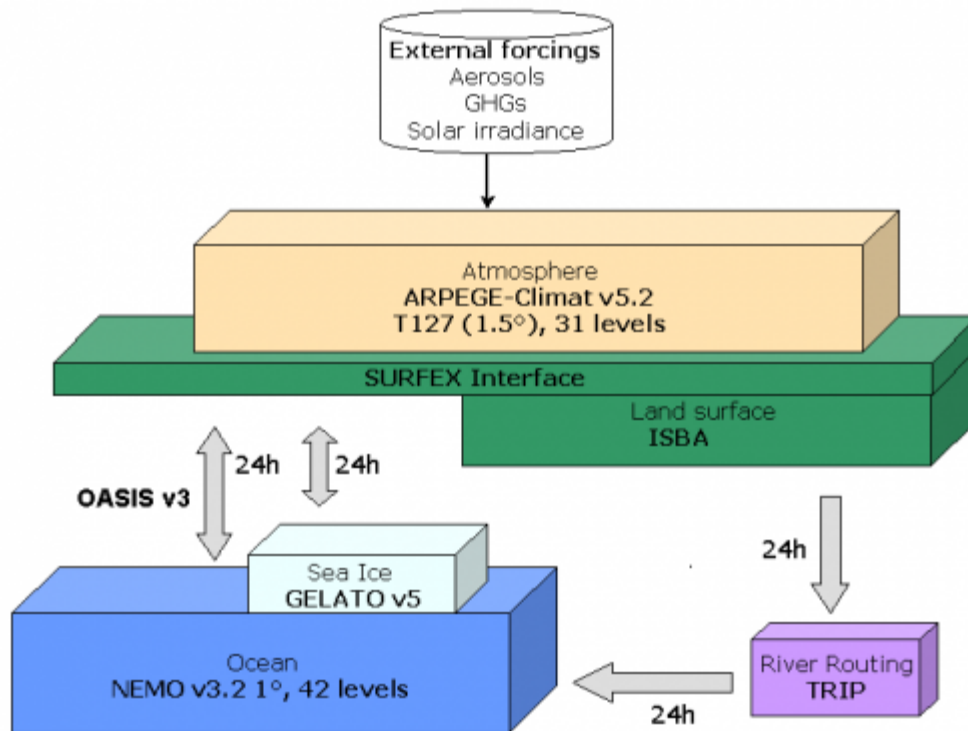
A HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) egy numerikus egydimenziós modell, amit az USA Környezetvédelmi Hivatala fejlesztett ki hulladéklerakók szigetelésének a méretezésére. A modell kitűnően alkalmas bármilyen talajprofil dinamikus vízmérlegének a számítására, így gyakran alkalmazzák klímaviszonyok hatásának vizsgálatára. A modell az alábbi klímaparamétereket használja a vízmérleg számítás során:

- hőmérséklet
- csapadék
- szélesebesség
- besugárzás

A fenti adatokat scriptek segítségével területileg átlagoltuk a CARPATCLIM és EuroCordex adatbázisokból származó gridekből a középtájakra, és előállítottuk a HELP számára szükséges bemeneti WEATHER file-okat. A weather fájlok a fenti klímaparamétereket tartalmazzák napi illetve féléves bontásban.

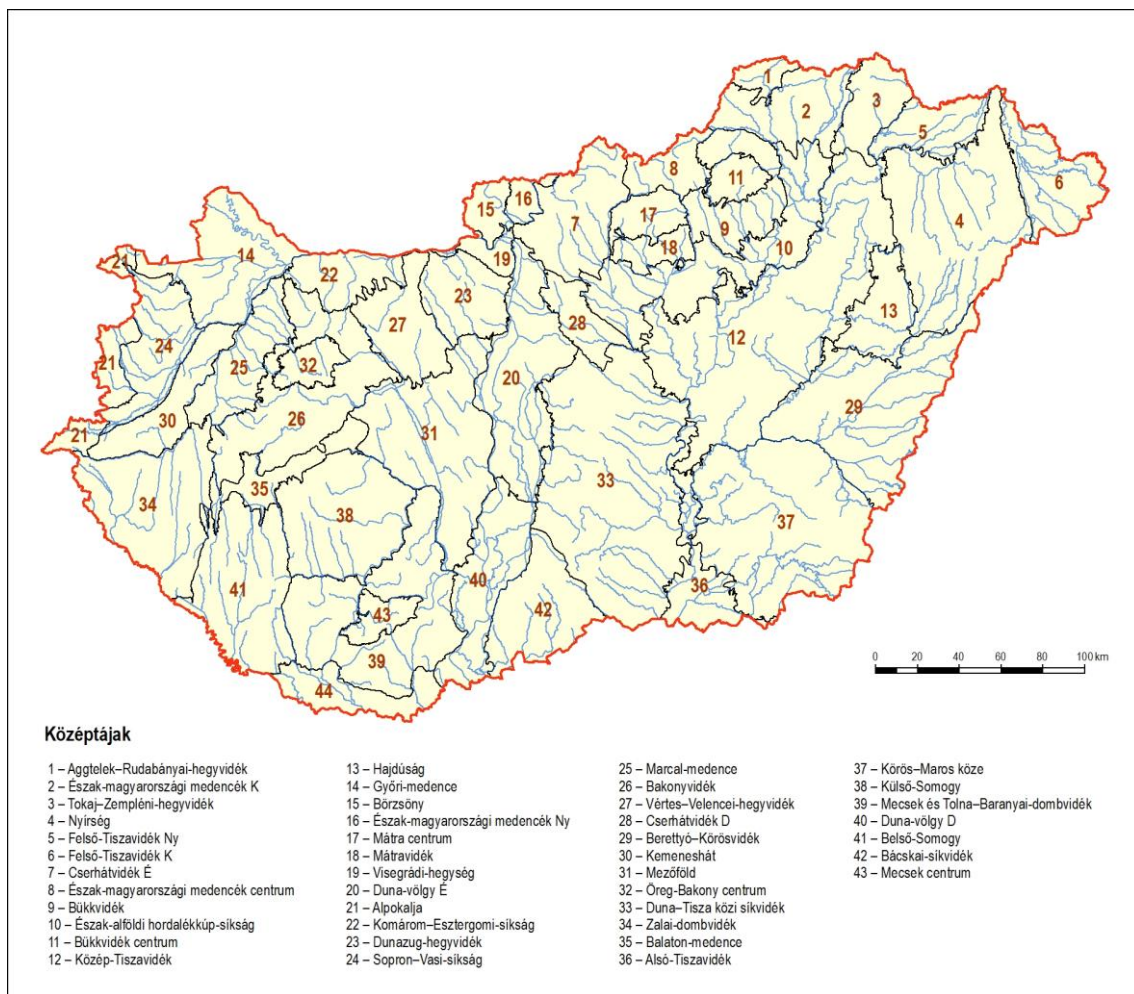
A vízmérleg modellezést az alábbi klímaadatok alapján végeztük el:

- CARPATCLIM-HU: A CARPATCLIM-HU egy homogenizált raszteres adatbázis, amelyet a Kárpát-medence klímaállomásainak adataiból állítottak elő interpolációval. Az adatbázishoz 258 klímaállomás és 727 csapadékmérő állomás adatát használták fel. Magyarország területére ebből 37 klímaállomás és 176 csapadékmérő állomás esik (Spinoni, 2013). Az adatbázis az országhatárig lett kiterjesztve a Országos Meteorológiai Szolgálat által.
- RCA4/CNRM-CM5 (RCA-C): A Francia Nemzeti Meteorológiai Kutató Központ föld-rendszer modellje több független részrendszer-modell összekapcsolásából áll
- RCA4/EC-EARTH (RCA-E): AZ EC-EARTH Föld-rendszer modellt az EC-EARTH konzorcium fejlesztette ki a svéd SMHI és egyéb svéd együttműködők segítségével.
- Ez utóbbi két modellnek mind az RCP4.5 mind pedig az RCP8.5 forgatókönyvekre lefuttatott eredményeit felhasználtuk. Összességében tehát 1 mért, és 4 különböző modellezett klímaszimuláció során számítottuk a beszivárgás tér- és időbeli változásait.



5-4. ábra: A CNRM-CM5 kapcsolt modell architektúrája

Tekintve, hogy a bemeneti adatok közelítőleg 10 kilométeres felbontású grid formájában állnak rendelkezésre, és a beszivárgás számítását egydimenziós modellek segítségével végezzük, szükségessé vált a klímaadatok területi átlagolása. A nemzetközi gyakorlatnak megfelelően ez klímazónák kialakítása útján lehetséges. Jelen feladat keretében a hazánkban alkalmazott középtáj beosztást alkalmaztuk, melyeken belül a klímparamétereket területileg átlagoltuk, és a számításokat ezen átlagolt értékekkel végeztük el. A középtájak területi elterjedését a szemlélteti.



**5-5. ábra: Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezései által megkívánt igényeknek.**

Ahhoz, hogy szimulált adatsorok valósághű eredményeket mutassanak, szükséges, hogy a szimulációs időszak elejére a talajprofil vízháztartása kvázi egyensúlyi állapotban legyen. Ezt úgy értük el, hogy minden adatsort kétszer egymásután futtatunk le, és csak a második futtatás eredményeit használtuk fel. Mivel a HELP szoftver egyszerre száz év klímaadatainak a feldolgozására alkalmas, ezért a teljes szimulációs időszakot (1973-2100) három szakaszra bontottuk fel az alábbiak szerint:

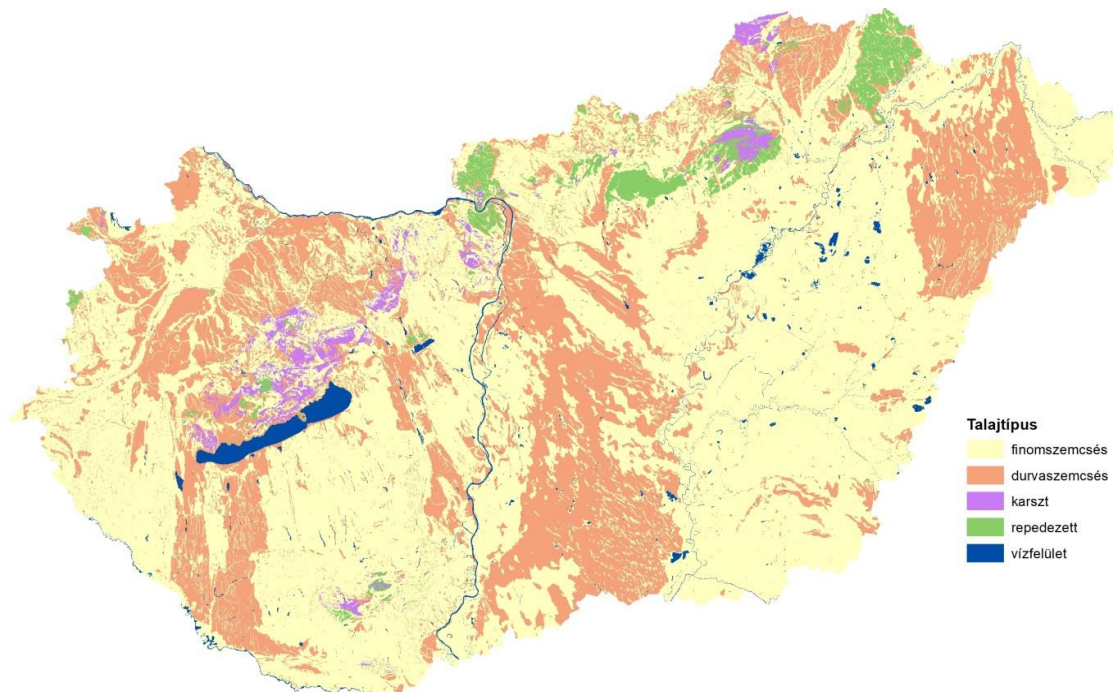
- 1973-2004;
- 2005-2052;
- 2053-2100.

Az így elvégzett vízmérleg szimulációk utolsó harminc évét használtuk fel az átlagos klímaállapot jellemzésére úgy, hogy a szimulált beszivárgás értékek 30 éves átlagát képeztük ezen időszakokra. Vagyis a permanens vízföldtani modellek az alábbi időszakok meteorológiai viszonyait tükrözik:

- 1975-2004
- 2023-2052
- 2071-2100

A klímamutatók mellett a HELP modellhez szükség van talajprofilok definiálására, ami alapján a modell egydimenziós tranziens vízmérleget számít. A talajprofilokat négy alaptípusba soroltuk:

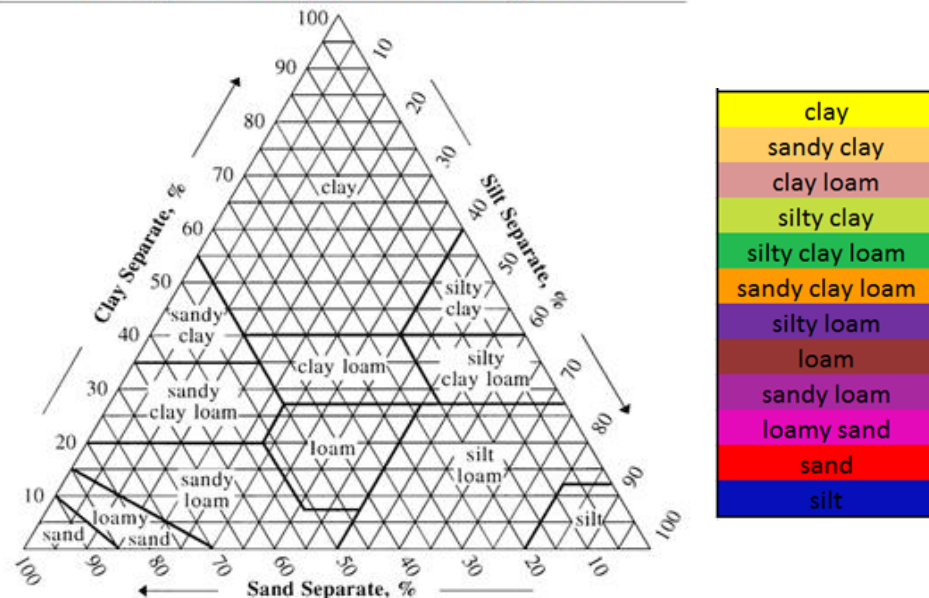
finomszemcsés, durvaszemcsés, hasadozott, és karsztos. Az alaptípusok térbeli eloszlását Magyarország fedett földtani térképe alapján határoztuk meg, és a felszíni üledékeket és kőzeteket a fenti alaptípusok szerint kategorizáltuk.



**5-6. ábra: Magyarország fedett földtani térképe alapján kialakított beszivárgási zónák és az ahhoz tartozó talajtípusok**

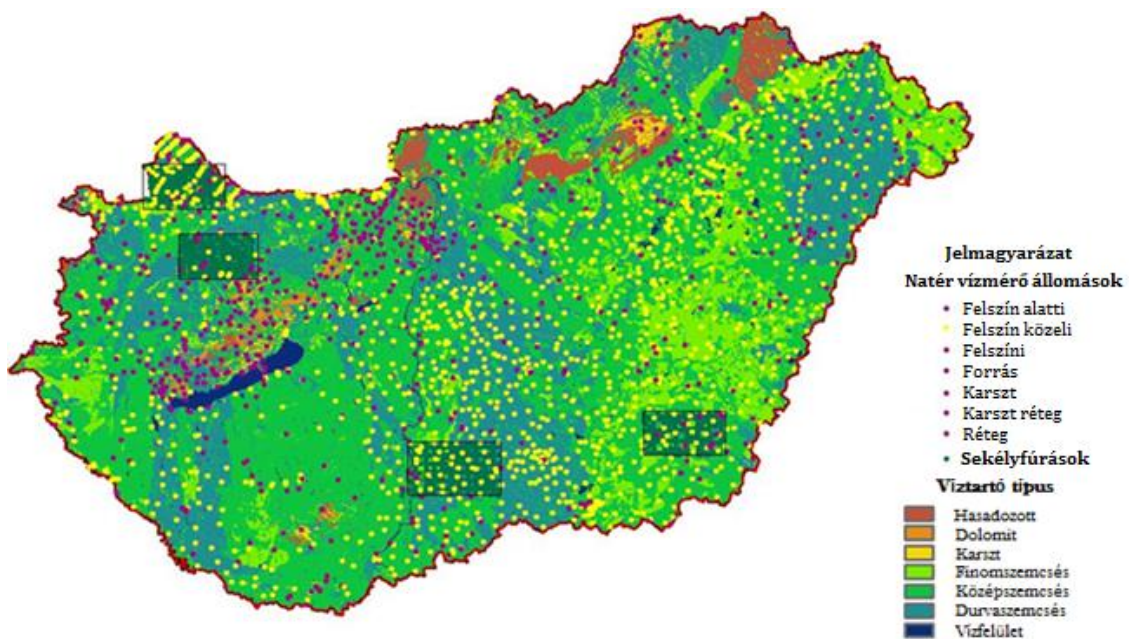
A földtani kategóriákhoz típusprofilokat rendeltünk, melyeket mintaterületeken gyűjtött szemeloszlási adatok alapján tipizáltunk. Az egyes földtani kategóriákhoz tartozó típusprofilokat a sekélyfúrási adatbázisból származó szemeloszlási adatok alapján határoztuk meg. A kapott eredményeket az általánosan használt Nemzetközi Talajosztályozási Háromszög alapján soroltunk be üledékes csoportokba (Richardson és Vepraskas, 2001). Az egyes kategóriákhoz tartozó hidraulikai paramétereket a HELP adatbázisából rendeltük hozzá. A paramétereket a modellezett beszivárgás idősorok és a mintaterületekre jellemző talajvízszint idősorok összehasonlítása útján finomítottuk.

## Talajosztályozási diagram



5-7. ábra: Nemzetközi talajosztályozási háromszög, és a talajtípusonként használt színek kódok.

Még a NATÉR-1 kutatási fázisában típusprofilok meghatározása érdekében négy mintaterületet jelöltünk ki (Kisalföld, Kalocsa, Orosháza térségeiben). Az MBFSZ GeoBank adatbázisból a 4 mintaterületre gyűjtöttük ki a fúrési adatokat, majd egymás mellé rendeztük úgy, hogy a megfelelő rétegek korreláljanak. Ez alapján látható, hogy a sekélyfúrési adatok alapján az üledéktípusok a földtani-beszivárgási egységeken belül viszonylag kis változékonyságot mutatnak, és jól tipizálhatóak.



5-8. ábra: A talajprofilok meghatározása során alkalmazott mintaterületek elterjedése

**3. táblázat: Jellemző talajprofilok a vizsgált mintaterületeken  
(A típusprofilok kialakítása során a telítetlen zónára jellemző, átlagosan 3 méternél  
sekélyebb üledékeket vettük alapul)**

Rétegek			Jellemző földtani profil földtani foltok szerint, mintaterületenként											
Minta- szám	Alsó réteghatár (m)	Felső réteghatár (m)	Kisalföld _1 Hgeo_4	Kisalföld _1 Hgeo_5	Kisalföld _1 Hgeo_6	Kisalföld _2 Hgeo_4	Kisalföld _2 Hgeo_5	Kisalföld _2 Hgeo_6	Kalocsa Hgeo_4	Kalocsa Hgeo_5	Kalocsa Hgeo_6	Orosháza Hgeo_4	Orosháza Hgeo_5	Orosháza Hgeo_6
1	0.2	0												
2	0.4	0.2												
3	0.6	0.4												
4	1.1	0.9												
5	1.6	1.4												
6	2.1	1.9												
7	3.1	2.9												
8	4.1	3.9												
9	5.1	4.9												
10	6.1	5.9												
11	7.1	6.9												
12	8.1	7.9												
13	9.1	8.9												
14	10.1	9.9												

A vizsgált megfigyelő kutak a beszivárgási értékek modellezésénél meghatározó 3 m-es talajszelvényeket értékeltük. Mivel az alkalmazott 3 méteres profilokon belül elhanyagolható vertikális litológiai változékonyságot tapasztaltunk, homogén profilokat alkalmaztunk a modellezés során, melyek alkalmazását érzékenységvizsgálatokkal igazoltuk. A szimulált beszivárgás idősorokat megfigyelő kutak vízszint idősoraival hasonlítottuk össze, és a talajprofilok paramétereit ezek alapján valamint mért és irodalmi beszivárgás adatokhoz kalibráltuk.

**4. táblázat: A HELP modellezés során alkalmazott talaj paraméterek**

Hidraulikai paraméterek	Profil típusa				Mérték- egység
	Finom porózus	Durva porózus	Karszt	Hasadozott	
Porozitás	0,463	0,430	0,437	0,380	vol/vol
Szántóföldi kapacitás	0,232	0,200	0,052	0,200	vol/vol
Hervadáspon	0,116	0,0825	0,024	0,033	vol/vol
Szivárgási tényező	5	10	500	8	cm/day
Evapotranszpirációs zóna mélysége	115	125	125	125	cm

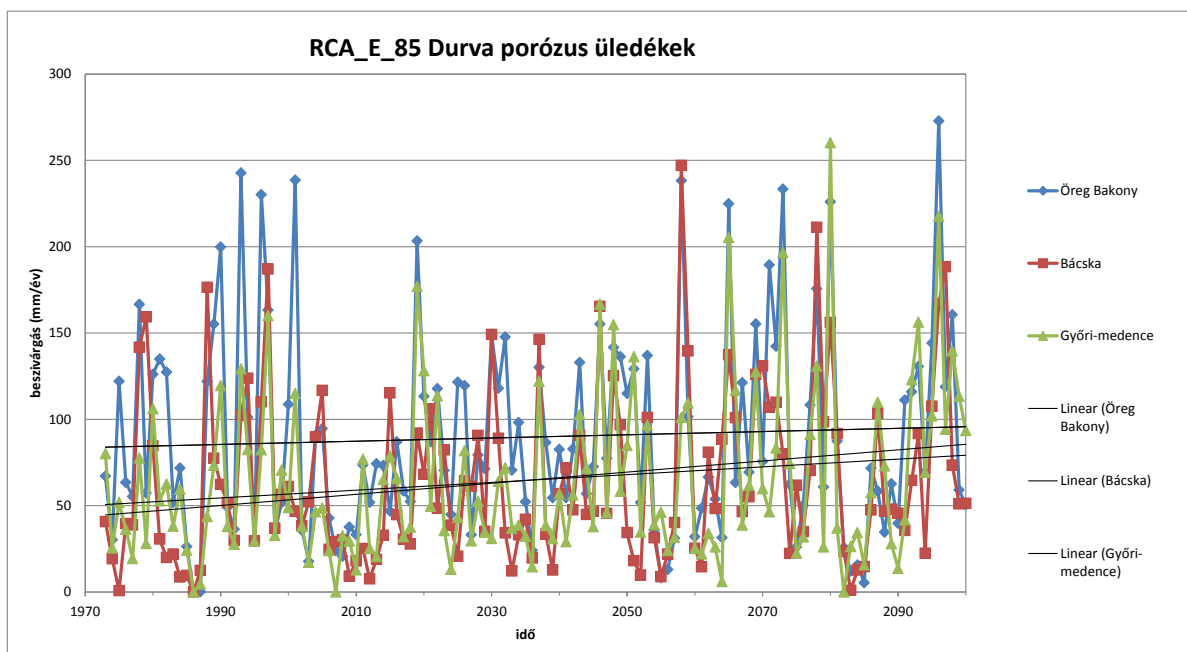
Vizsgálataink során a vízmérleg modellezést 44 középtájr, négy modellezett és egy mért klímaablakra végeztük el. A klímaszimulációk esetén – az adatsor hossza miatt – a modellezést három időszakaszra bontva lehetett csak elvégezni. Mindez nagyszámú modellfuttatással járt, ami automatizált adatfeldolgozás alkalmazását tette szükségessé.

A modellfuttatások automatizálását Autoit script környezetben végeztük el alvállalkozó bevonásával. Az Autoit egy olyan programozási nyelv, ami a Windows felhasználói felület automatizálását és általános programozást tesz lehetővé billentyűzet lenyomás, egérmozgatás és ablakműveletek szimulációja révén. Az Autoit a BASIC programnyelvhez hasonló szintaxist használ.

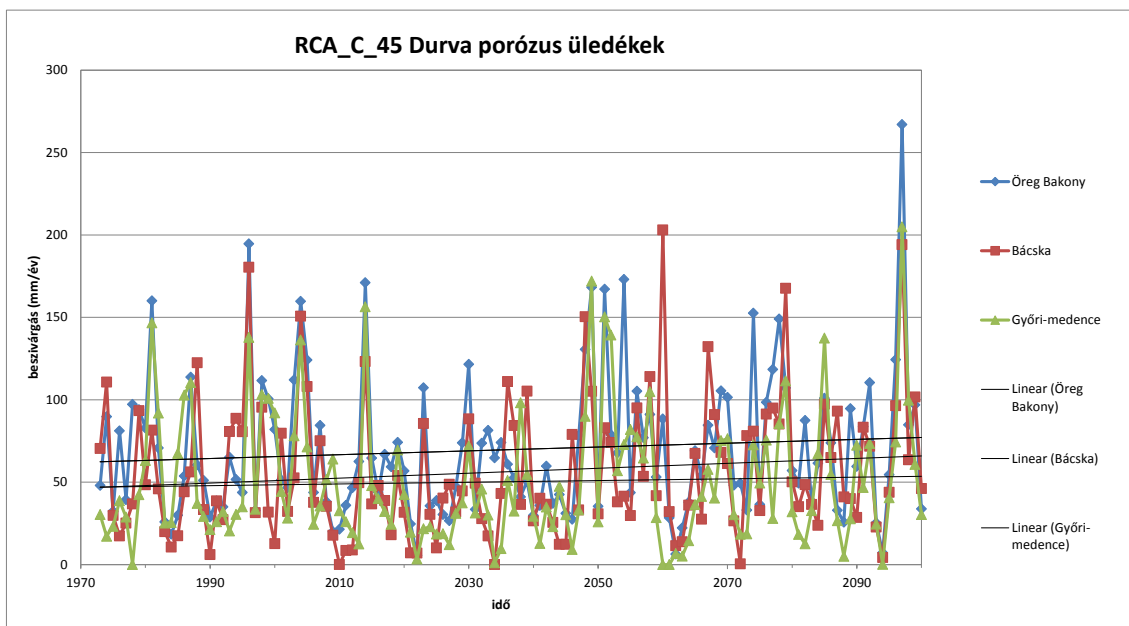
A létrehozott automatizáló script a legenerált nagyszámú WEATHER fájlt egyenként bemásolja a HELP munkakönyvtárba, majd elvégzi a HELP szoftver futtatását. Miután a modell lefutott, az eredményfájlokat az előre definiált könyvtárba kimásolja, és a soron következő input fájlokkal folytatja mindaddig, amíg az összes megadott inputfájl szimulációja meg nem történik.

Az RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímamodell szimuláció alapján 3 db kiválasztott mintaterületre szemléltetjük a modellezett beszivárgás változásait. Az összehasonlíthatóság végett mindhárom területen a durva porózus talajtípushoz tartozó modellezett éves beszivárgások alakulását mutatjuk be. A klímaszimulációk alapján, mindhárom területen a beszivárgások növekedése várható a hosszútávú trendillesztés alapján. Mindazonáltal, az is jól látható, hogy a beszivárgás változásai több éves időszakokat átölelő ingadozásokat mutatnak, melyek során adott évben a korábbi hosszútávú beszivárgási értékeknél jóval alacsonyabb éves beszivárgások is előfordulhatnak.

Ugyancsak a 3 db kiválasztott mintaterületre szemléltetjük a modellezett beszivárgás változásait az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján. Ezen klímaszimuláció alapján szintén mindhárom területen a beszivárgások növekedése várható a hosszútávú trendillesztés alapján. Itt azonban megfigyelhető, hogy a század első felére vonatkozóan még a beszivárgások enyhe csökkenésével kell számolni, melyek a 30 éves átlagos periódusokat bemutató térképek esetében még markánsabban nyomon követhetők. Az ábrán az is jól látható, hogy a beszivárgás változásai több éves időszakokat átölelő ingadozásokat mutatnak, melyek során adott évben a korábbi hosszútávú beszivárgási értékeknél jóval alacsonyabb éves beszivárgások is előfordulhatnak. Ez egybevág a nemzetközi klímamodellezések eredményeivel, amik alapján a klimatikus extrémítások amplitúdójának növekedése várható, ami a beszivárgás értékeinek az fokozott változásait idézheti elő.

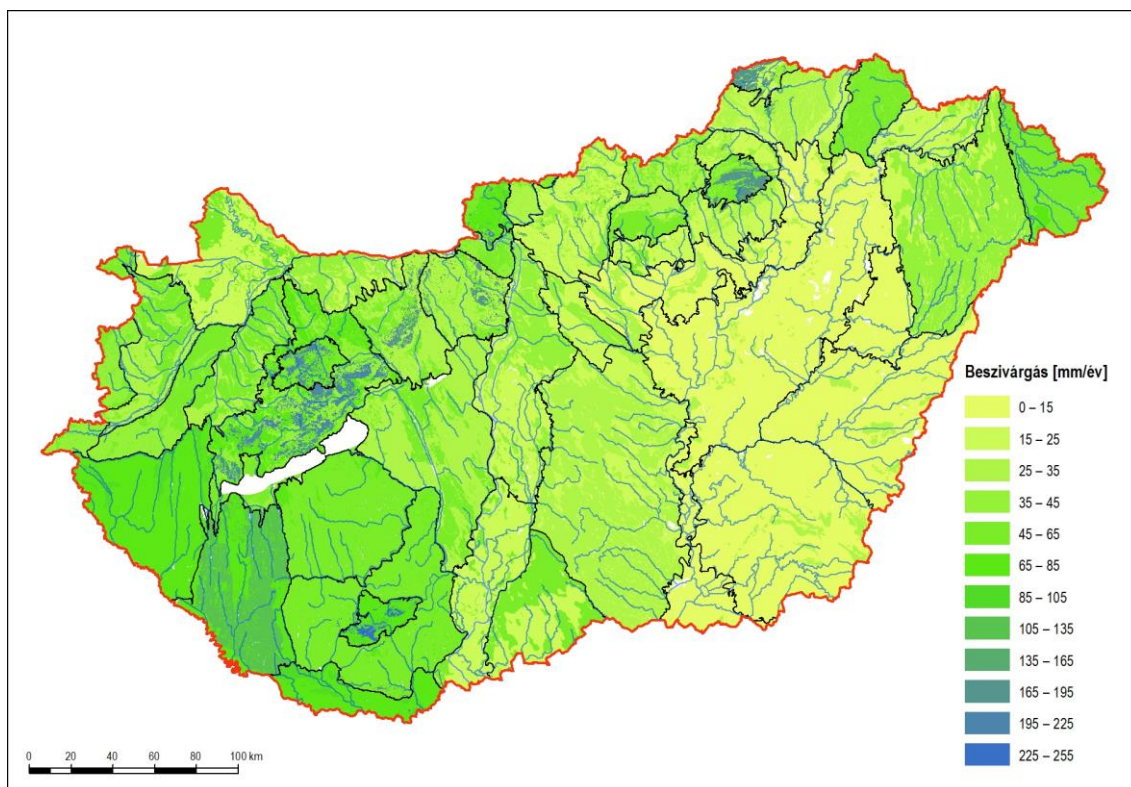


5-9. ábra: Modellezett éves beszivárgások időbeli változásai. RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímamodell szimuláció alapján, durva porózus üledékekre



5-10. ábra: Modellezett éves beszivárgások időbeli változásai. RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján, durva porózus üledékekre

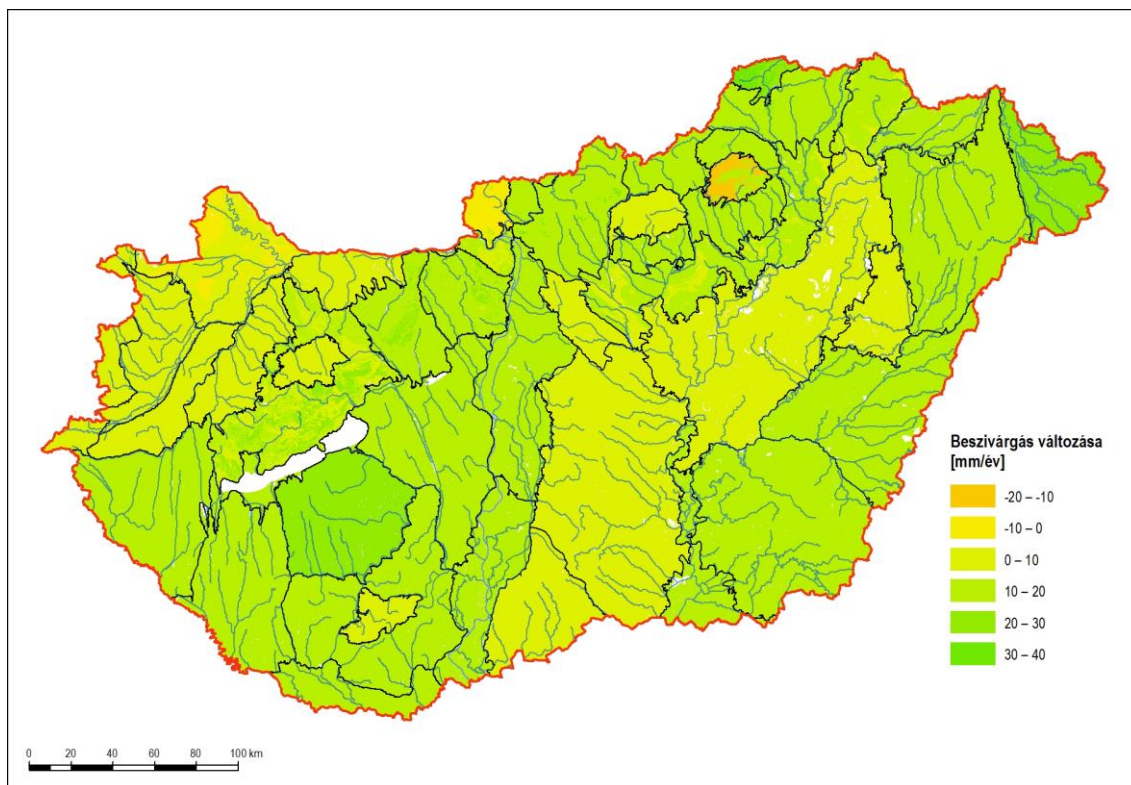
A beszivárgás értékeket az alkalmazott talajprofilokra és az azokhoz tartozó klimatikus egységekre (középtájak) a teljes adatsorra napi felbontással szimuláltuk, majd a szimulációs időszakokra átlagokat képeztünk. A CARPATCLIM-HU adatok alapján szimulált átlagolt beszivárgás eloszlást az alábbi szemlélteti.



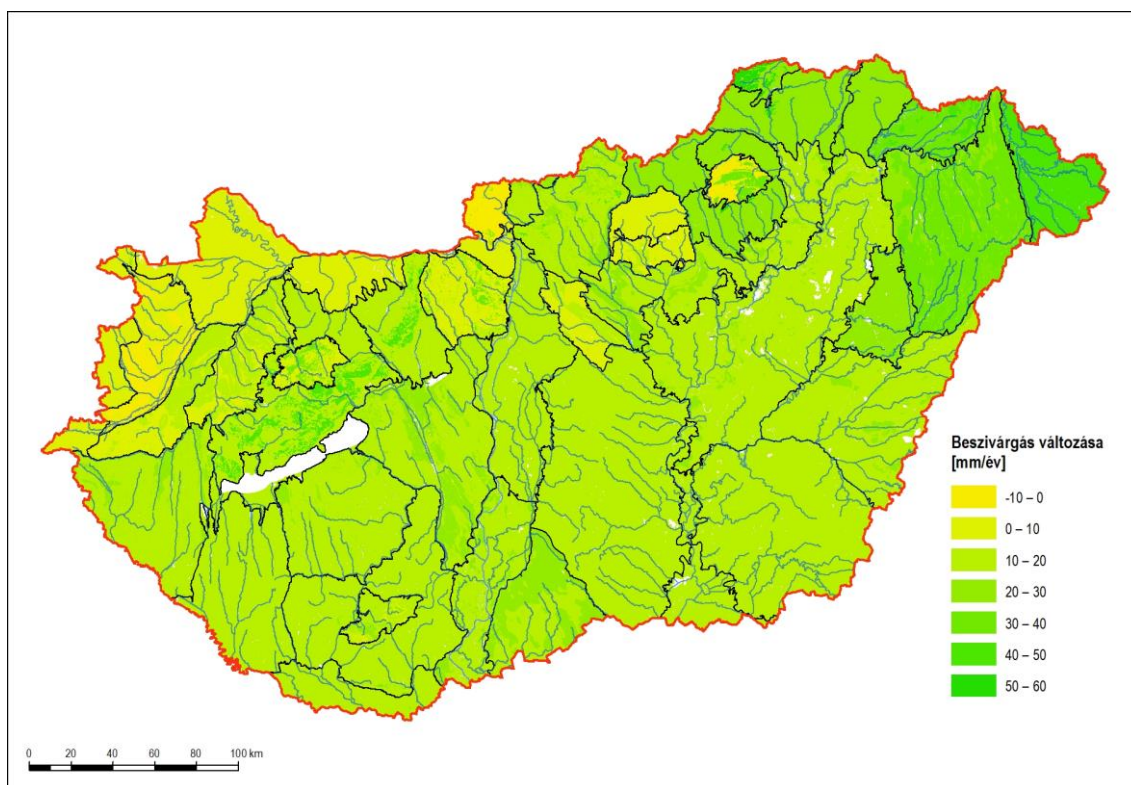
5-11. ábra: A CARPATCLIM-HU adatok alapján modellezett 30 éves (1975-2004) átlagos beszivárgás eloszlás

Látható, hogy a mért adatokból végzett szimulációk alapján a hegységi régiókban (Dunántúli- és Északi Középhegység, Mecsek) valamint az Alpokalja régióban magasabb, míg az alföldi régiókban (Nagy-Alföld, Kisalföld) alacsonyabb beszivárgás értékek jellemzőek.

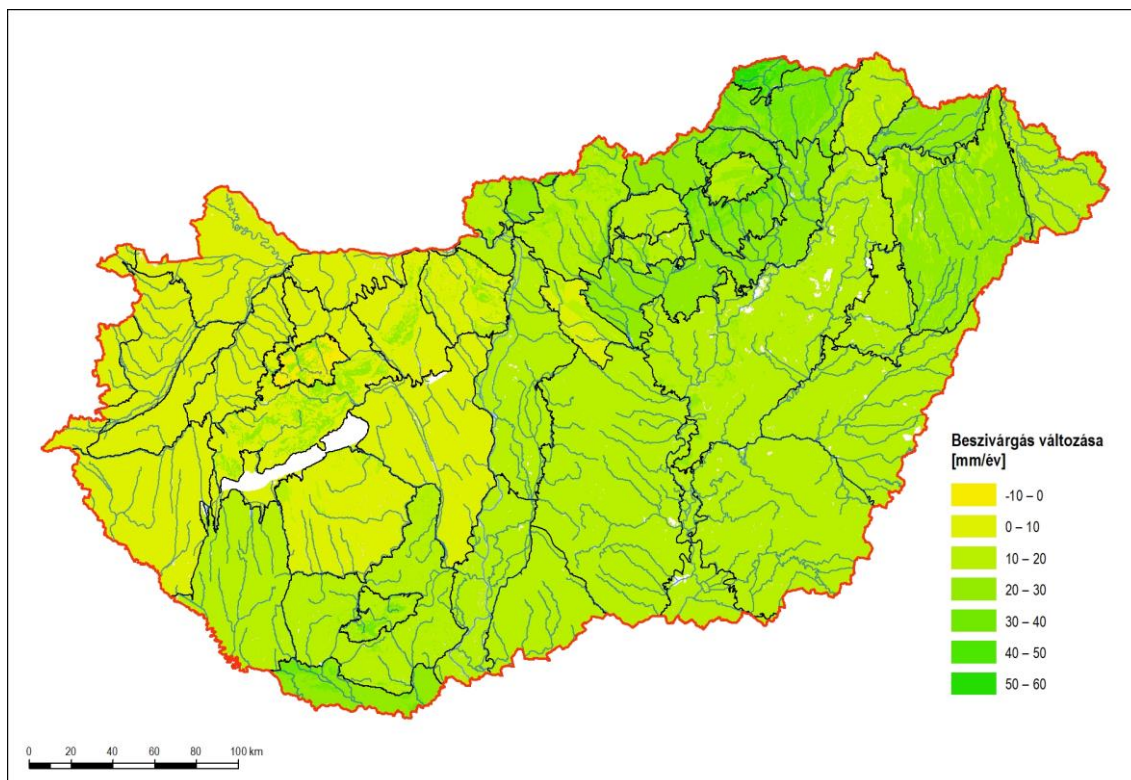
A különböző szimulációs időszakok között a beszivárgás eloszlásának a változásait az alábbi ábrák szemléltetik.



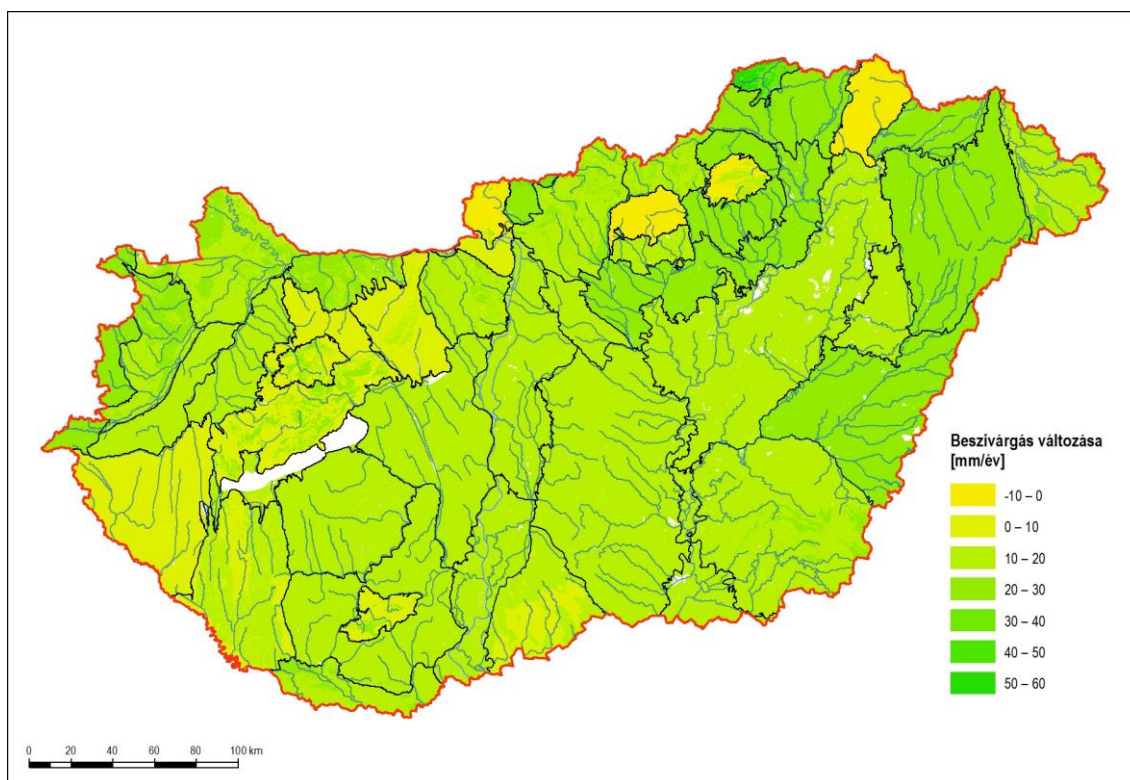
**5-12. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között.  
RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján számítva**



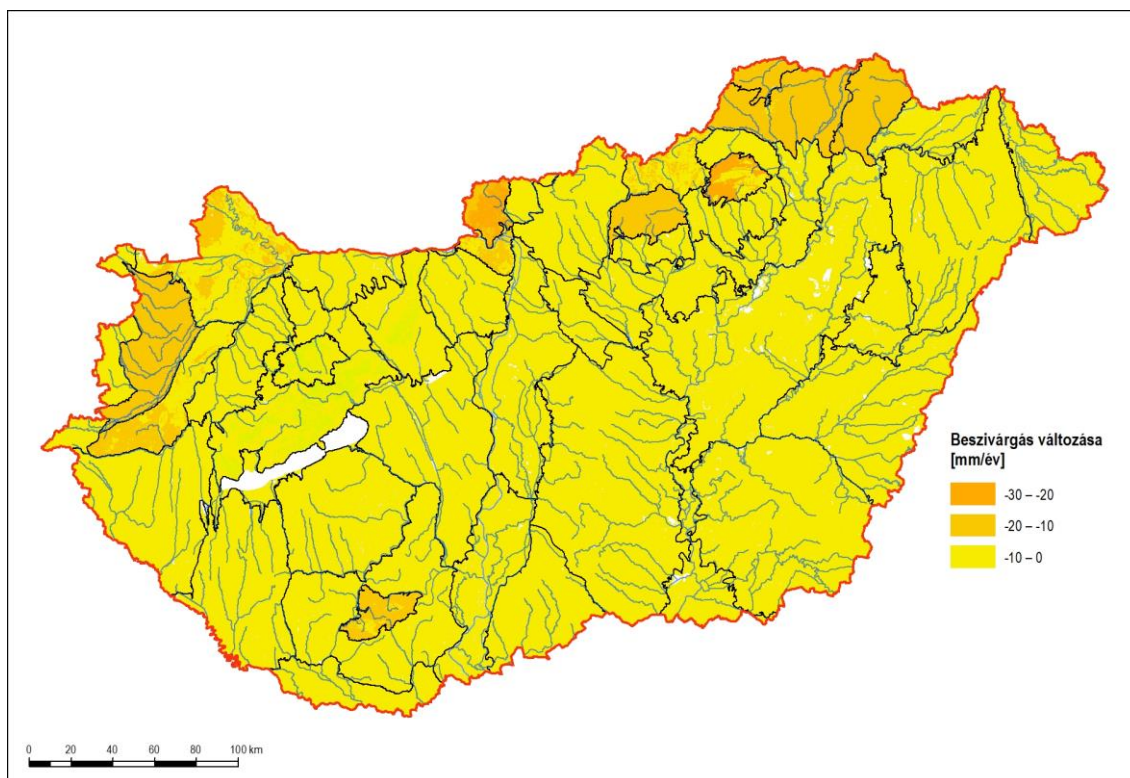
5-13. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/CNRM-CM5/RCP8.5 klímamodell szimuláció alapján számítva



5-14. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/EC-EARTH/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján számítva



5-15. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2071-2100 időszakok között. RCA4/EC-EARTH/RCP8.5 klímamodell szimuláció alapján számítva



5-16. ábra: A 30 éves átlagos beszivárgás változása az 1975-2004 és 2023-2052 időszakok között. RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján számítva

A különbség térképek alapvetően az összes klímaszimuláció esetén a beszivárgás növekedését mutatják az első és utolsó szimulációs időszak között az ország legnagyobb területére. A növekedés átlagos mértéke 10-30 mm/év, de a keleti országrészben 40 mm/év is lehet. Mindemellett a hegyvidéki régiókban – elsősorban a Bükk és Börzsöny területén - az RCA4/CNRM-CM5 szimulációk a beszivárgás mintegy 10 mm/éves csökkenését mutatják. Az RCA4/EC-EARTH szimulációk eltérően prognosztizálják a beszivárgás változást a hegyvidéki régiókban. Míg az RCP4.5 scenárió szerint a beszivárgás itt is növekedést mutat, addig az RCP8.5 scenárió szerint az Északi-középhegység területén a beszivárgások csökkenése várható.

Külön és kiemelten felhívjuk a figyelmet arra a térképváltozatra, amelyik az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján számított, 30 éves átlagos beszivárgás változásokat szemlélteti az 1975-2004 és 2023-2052 időszakok között, vagyis a közelebbi jövőre. Ennél a változatnál jól látható, a többi jövőképtől eltérően az általános beszivárgás-változás, és amely alapján ez a változat mértékadó mind a felszín alatti vizektől függő ökoszisztémák védelme, mind az öntözési igények és lehetőségek szempontjából.

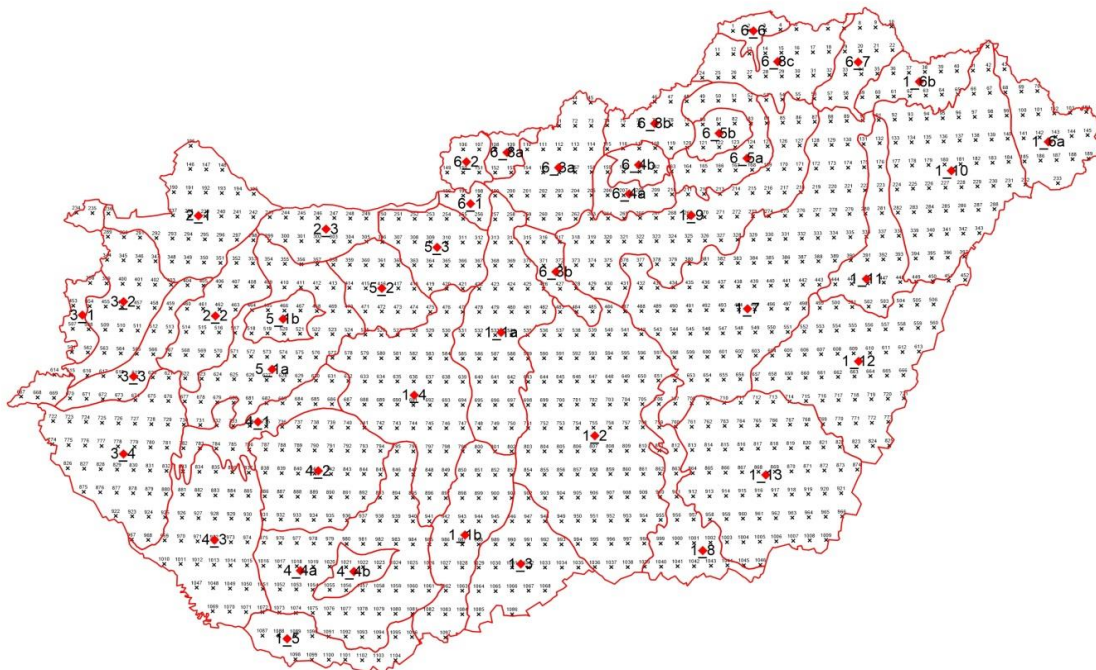
A számított beszivárgások változása alapján elmondható, hogy a vizsgált klímaszimulációk alapján a beszivárgás hosszú távú növekedése várható. Meg kell azonban jegyezni, hogy mind a jelenleg vizsgált modell scenáriók, mind pedig egyéb Ensemble modellezések rámutattak a klímamodellekben rejlő nagyfokú bizonytalanságra, és vannak olyan klímaszimulációk is, amelyek a csapadék hosszútávú csökkenését vetítik előre, vagy annak területileg változó trendjére utalnak. Azt is ki kell hangsúlyoznunk, hogy az elvégzett vizsgálatok rámutatnak a csapadék és egyéb klimatikus paraméterek tér- és időbeli ingadozásaira, tehát a hosszútávú trend rövid vagy akár középtávon akár ellentétes változásokat is eredményezhet.

### 5.3 MELLÉKLET – A középtájak centroidjára vonatkozó csapadék és hőmérséklet korrekciók szemléltetése országos áttekintő térképeken

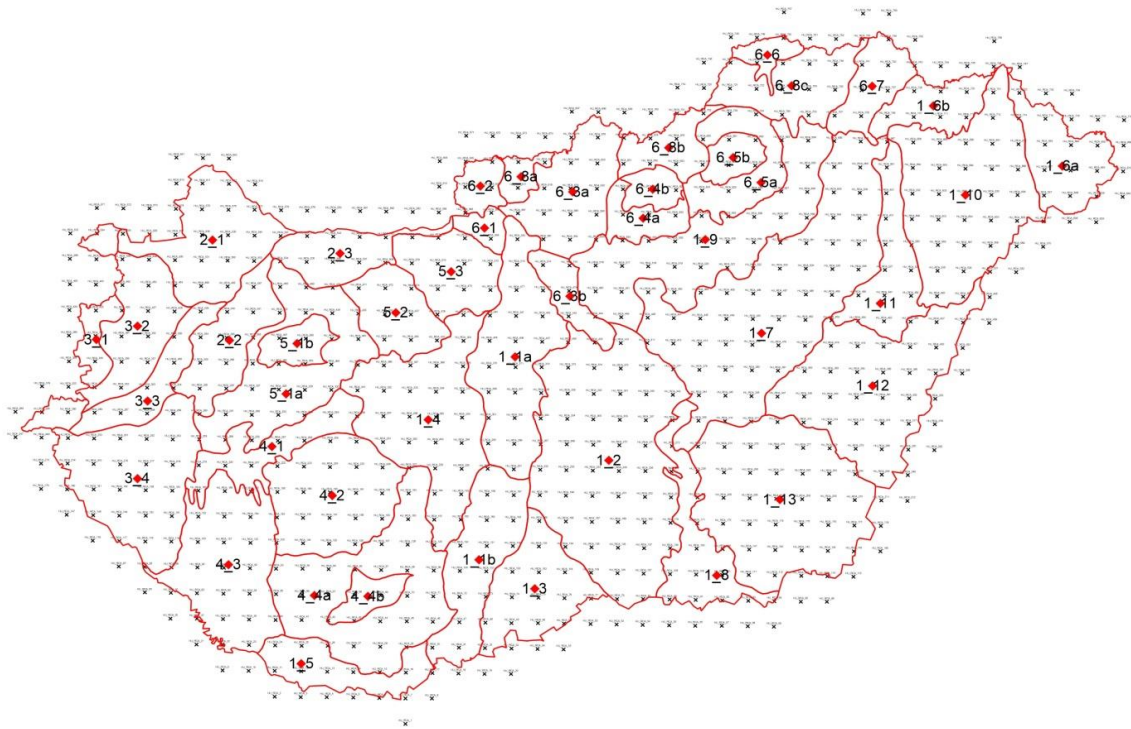
A középtájak súlypontjaira, a középtájakra eső rácsponthoz tartozó értékeiből átlagolt sokéves csapadékösszegek és középhőmérsékletek mért, (CARPATCLIM-HU) és számított, (RCA4/CNRM-CM5 és RCA4/EC-EARTH) eloszlását a referencia-időszakra, 1973-2005 határoztuk meg. A csapadékösszegeknél az arány, a középhőmérsékleteknél a különbség került meghatározásra. A számított értékeket a csapadékösszegek esetében a CARPATCLIM-HU - RCA4/CNRM-CM5, illetve a CARPATCLIM-HU - RCA4/EC-EARTH arányt kifejező szorzó használatával lehet normalizálni, és ezeket aztán a klímaablakokra számított értékeknél is használni. Az éves átlaghőmérsékleteknél ugyanez az eljárás, csak ott a CARPATCLIM-HU - RCA4/CNRM-CM5, illetve a CARPATCLIM-HU - RCA4/EC-EARTH különbséget, mint addíciós értéket, (deltát) kell a számított értékekhez hozzáadni.

Mindezeket a beszivárgás modellezéshez elegendő pontosságú, a felszíni lefolyáshoz képest térben és időben jóval egyszerűbb LC (Lineáris Correction) típusú bias műveleteket a napi adatok esetében kell a HELP modell csapadék, és hőmérsékleti (Weather 1 és Weather 2) input fájljainál alkalmazni.

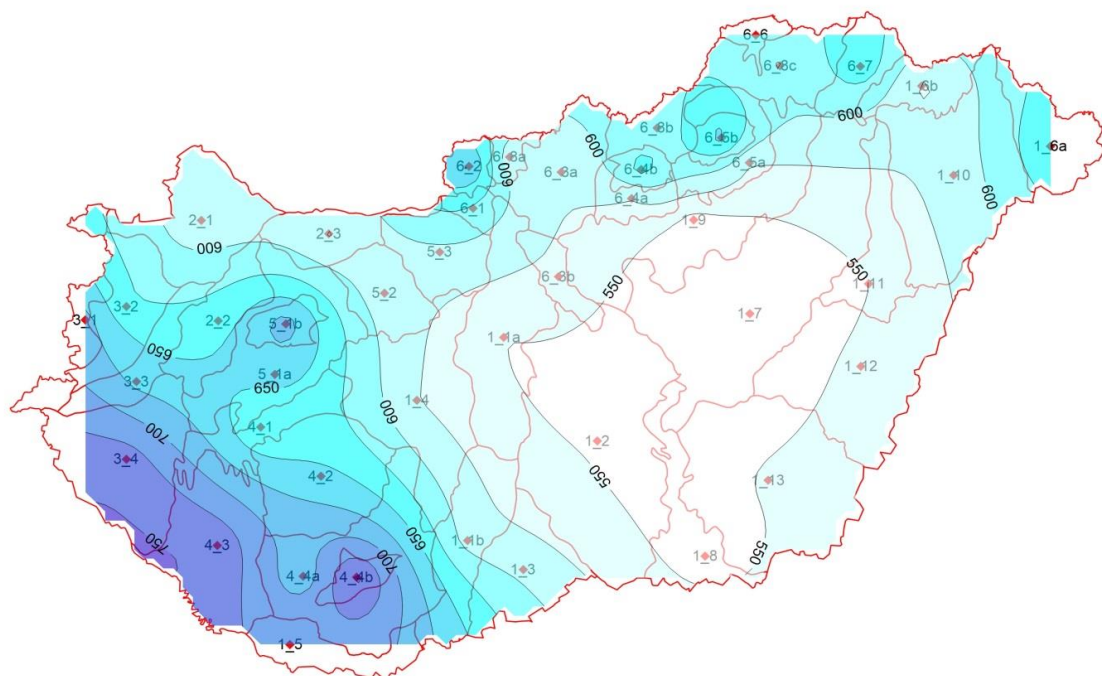
Mindezeket az alábbi tájékoztatást segítő ábrák reprezentálják. (Az izovonalas reprezentáció azért csak tájékoztató jellegű, mert a súlypontokban megadott értékek alapvetően a középtáj teljes területén lévő beszivárgási egységekre (HTU-kra) vonatkoznak, és nem csak a súlypontjára vonatkoznak. Mindazonáltal látható, hogy a referencia-időszakra számított értékek eltérésének magyarázatánál az elevációs - és medencehatásokat lehet gyanítani. De szerepet játszhat bizonyos kisebb területű hegyvidéki középtájaknál az is, hogy ott a CARPATCLIM-HU és RCA4 rácsponthoz száma is kevesebb és térben is eltérőek. Mindezeket a középtájakat és a rácsponthoz együttesen ábrázoló térképváltozatok mutatják.



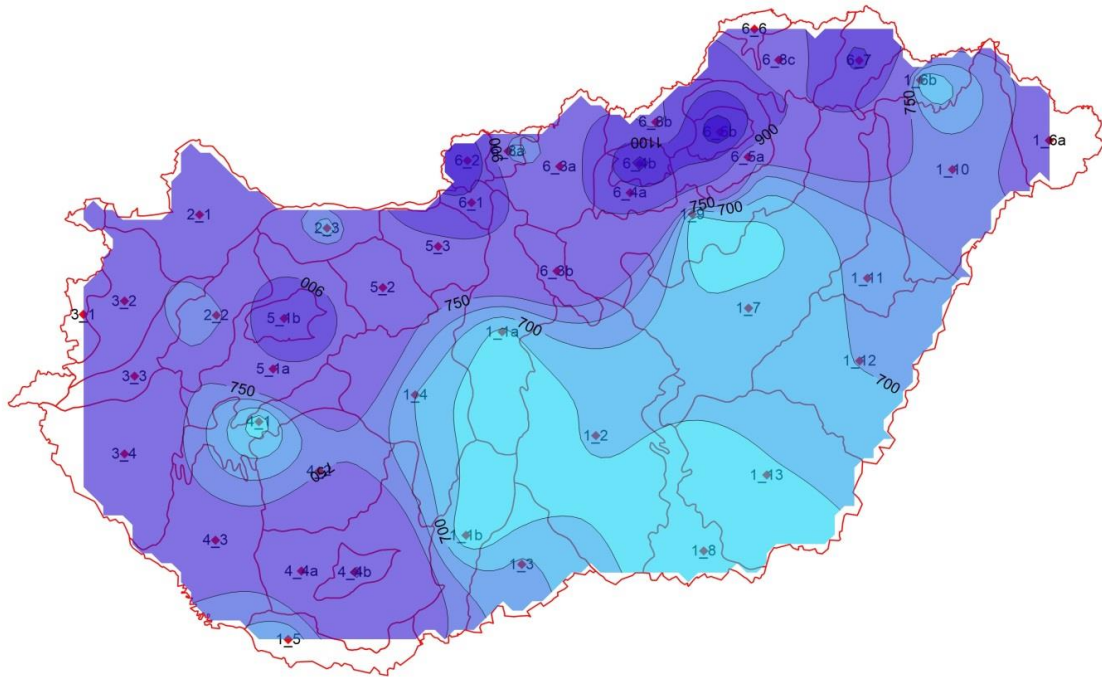
5-17. ábra: A CARPATCLIM-HU mért klimatikus adatok rácsponthoz helye és Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezéséhez



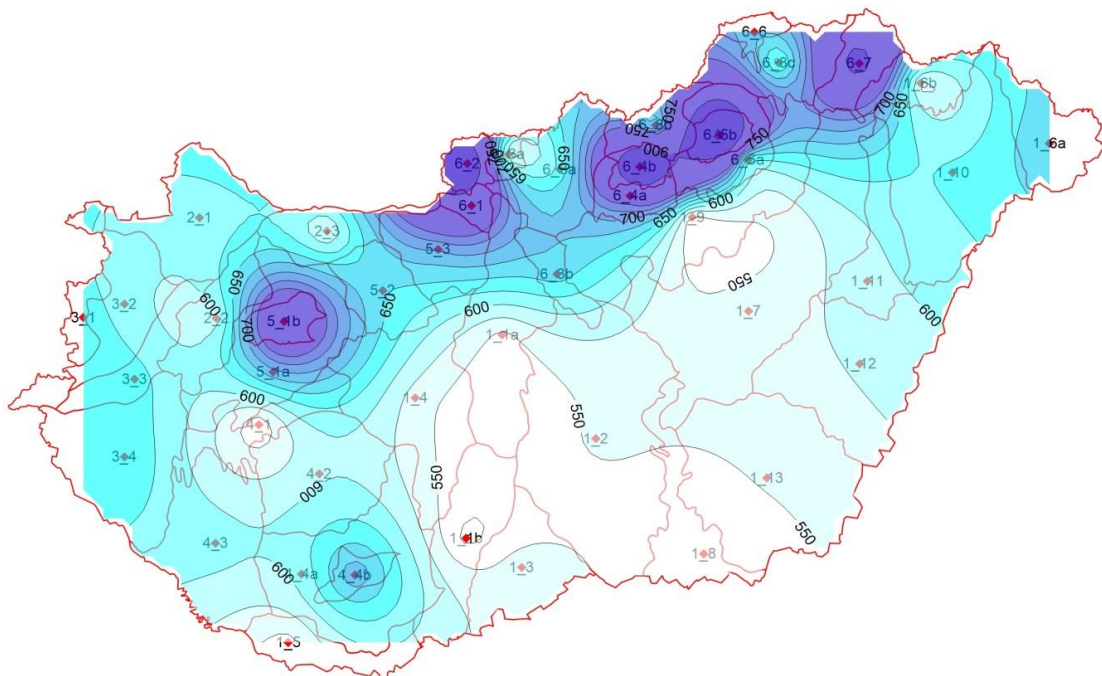
5-18. ábra: Az RCA4 klímamodellre számított klimatikus adatok rácsponti helyzete és Magyarország középtáji egységei, kismértékben módosítva a sekély felszín alatti vizek beszivárgási modellezéséhez



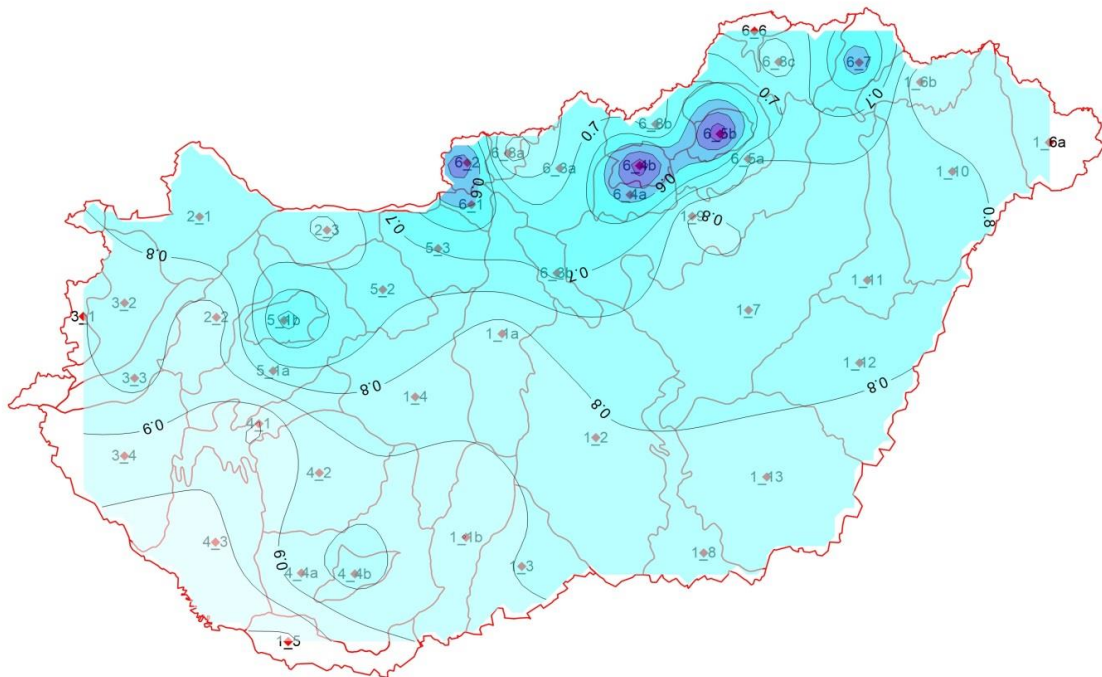
5-19. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt CARPATCLIM-HU csapadékatatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)



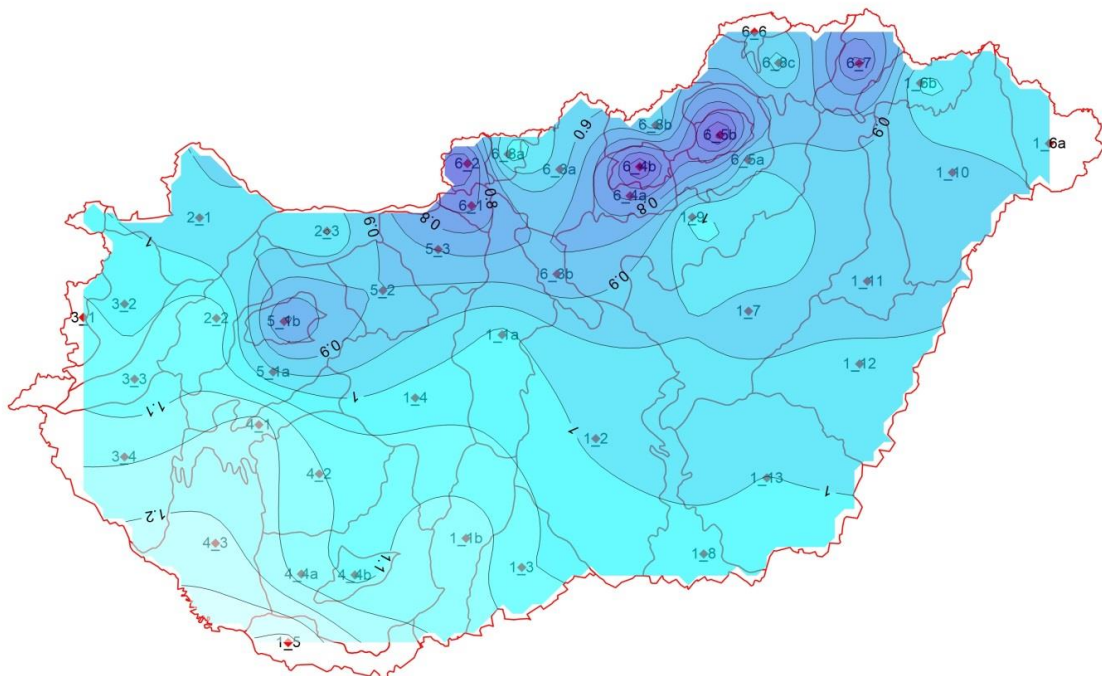
5-20. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers csapadékadatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)



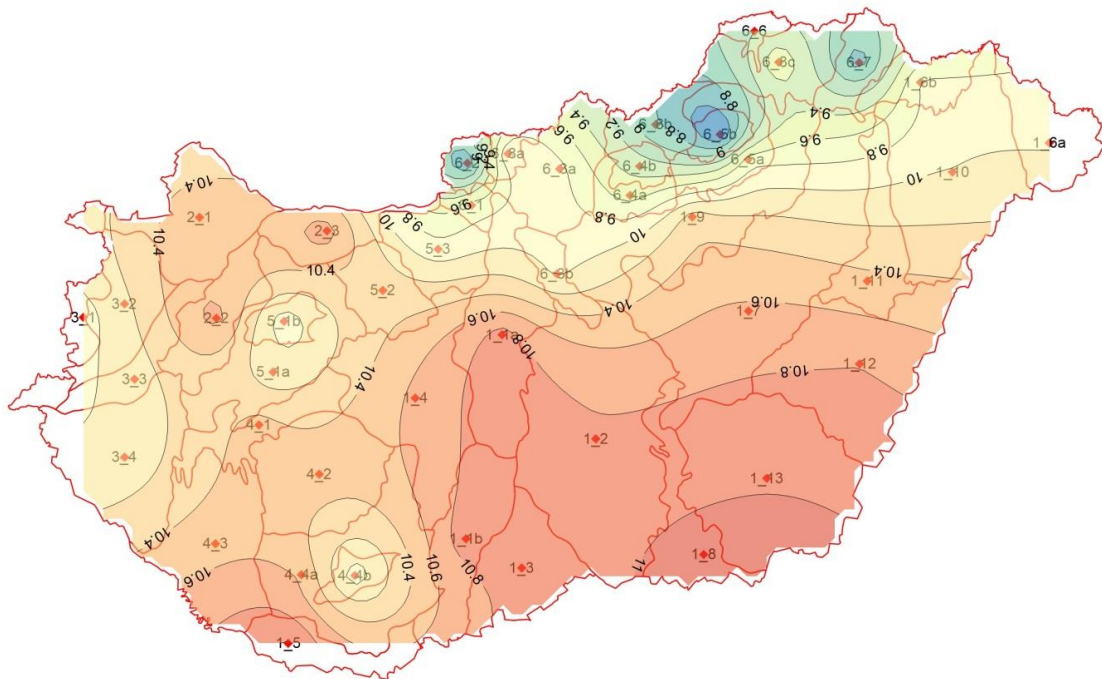
5-21. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers csapadékadatok sokéves átlaga az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)



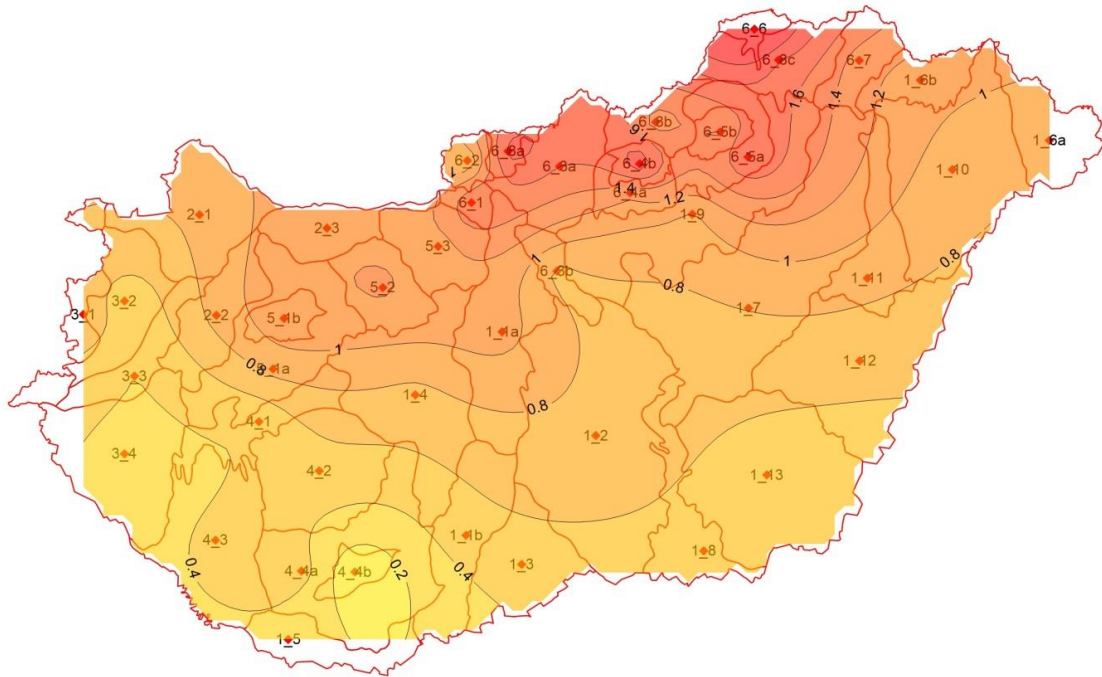
5-22. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/CNRM-CM5 nyers csapadékatatok bias korekciós szorzói, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)



5-23. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers csapadékatatok bias korekciós szorzói, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)







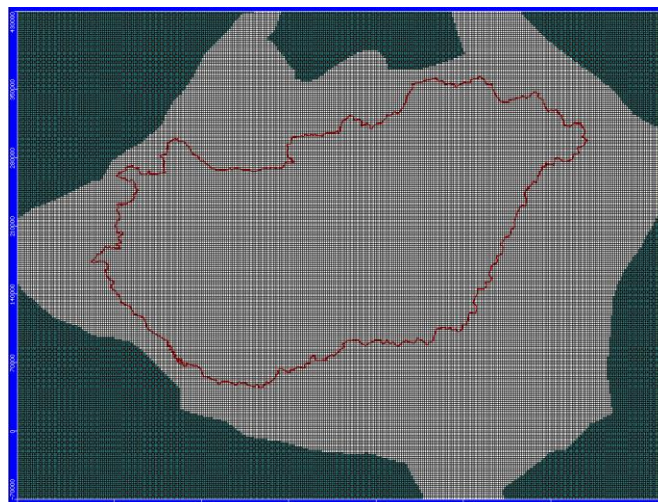
5-28. ábra: A középtájak centroidjára átlagolt RCA4/EC-EARTH nyers átlaghőmérsékletek bias korekciós delta értékei, az 1973-2005 közötti referenciaidőszakra, (interpolált eloszlással szemléltetve)

## 5.4 MELLÉKLET – Vízföldtani modellezés

A modellezéshez olyan szoftvert választottunk, mely

- képes kezelni a feladat teljesítéséhez elvárt országos méretű viszonyokat,
- könnyen kezelhető, közérthető, könnyen áttekinthető, azaz robosztus;
- használata elterjedt a hazai hidrogeológiai tudományos vizsgálatoknál, mint a mérnöki tervezéseknél,
- világszerte elismert, alkalmazott és folyamatosan fejlesztett,
- hasonló regionális léptékben rendelkezzen hazai és nemzetközi alkalmazási referenciákkal,
- lehetőséget biztosít a továbbfejlesztésre a térben részletesebb, időben változó problémák megoldása felé
- kereskedelmi forgalomban beszerezhető,
- bizonyos mértékű ismerete elvárható a hidrogeológiai szakterületen hatósági és igazgatási szakembereitől
- összekapcsolható legyen a felszín alatti kétfázisú térhez kapcsolódó felszíni vizek, vagy háromfázisú zóna hidrológiai modelljeivel

Az ezen feltételeknek legjobban a USGS által kifejlesztett véges differencia elven működő MODFLOW áramlási modellező kód, kódcsalád felelt meg, ezért ezt alkalmaztuk. Előzetes regionális, hazai és országhatárainkon átnyúló modellezési munkáink is ezzel a kóddal készültek, jelezve azt is, hogy alkalmas eszköz valamint különböző régiók és országok szakemberei közötti együttes munkára is. A modellezett terület túlterjedt az országhatáron (a Pannón-medence teljes területére), azzal a megkötéssel, hogy a határon túli, esetleg hidrodinamikailag kapcsolódó területeket ebben a modellezési ciklusban csak közelítő vagy szakirodalom alapján felvett input adatokkal kezeltük. A négyszög alapú modellterületen belül a Pannon-medence áramlási rendszeréhez közvetlenül nem kapcsolódó részeket inaktív zónaként választottuk le.



5-29. ábra: A modellterület és a ráfektetett rácsháló  
(zöld: inaktív zóna, fehér: aktív zóna)

A vertikális kiterjedés a felszíntől a regionális áramlási rendszer, azaz a termálvíz áramlási rendszer, vagyis az Újfalui Formáció fekéjéig terjed. Ez alatt a modellváltozatban egy, a -8000 méter mélységig lenyúló inaktív zóna található, mely a jelen modellezés célját képező vizsgálatok elvégzéséhez 'szükségtelen' hidrosztratigráfiai egységeket tartalmazza. Ezen alsó-pannoniai, miocén, és a prekainozoos alaphegységi hidrosztratigráfiai egységek aktiválására a modell más irányú fejlesztéseinél, például a mélységi pórusterekkel való gazdálkodás feladatainál lesz szükség.

A modellterület koordinátái (ez az egész Pannon-medencét magában foglalja):

EOV Y(x)	EOV X(y)
351 000	-69 000
351 000	429 000
1 019 000	429 000
1 019 000	-69 000

A modellezett terület nagysága 668\*498 km, melyet 250\*335 (sor\*oszlop) darab cellára osztottunk, így a modell felbontása 2\*2 km.

A modell 11 modellrétegből épül fel, ahol a legalsó, vagyis a 11. réteg inaktív, mely a termálvíz-áramlási rendszerben részt vevő felső-pannon rétegek fekéje alatt helyezkedik el.

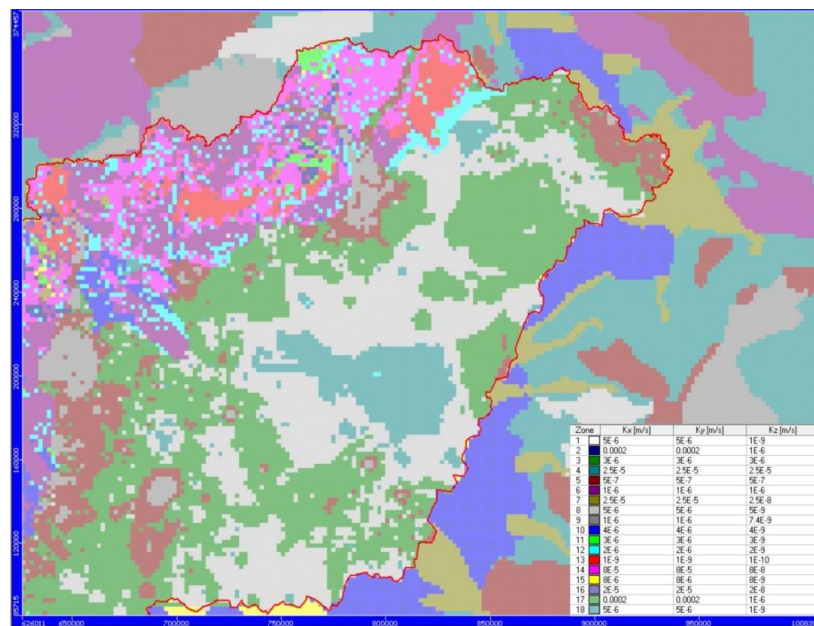
A modellbe épített hidrosztratigráfiai egységek és fontosabb hidraulikai paraméterek:

- talajvíztartók (sp-tv): A modellben a néhány méteresre, - tízméteresre becsülhető talajvíztartó képződmény tényleges vastagságát országosan nem lehetett pontosan megadni, ezért a modellezés során jelentősebb effektív vastagság mellett annak megfelelő effektív szivárgási tényező értékeket felvéve, ily módon a talajvíztartó transzmisszivitás-értékeit adtuk meg.
- sekély rétegvíz tartó (p-sr): Az első közelítéssel számított összefüggő talajvízdomborzat alatt, azzal párhuzamosan fölött 30 méter vastagságú felület.
- ivóvíztartó (p): A sekély rétegvíz víztartó- és az MFGI hivatalosan elfogadott kvarter-fekéje közötti egység.
- termálvíztartó (pt): A kvarter korú képződmények fekéje és az Újfalui Formáció fekéje közé eső egység.

A továbbfejlesztett nagy regionális Pannon XL 3.0 v nevű hidrodinamikai modell, a NATÉR 1-hez képest többretegű, minden irányban túlnyúlik az országhatáron és 2 x 2 km-es felbontású. Ez a modellváltozat a VGT2, valamint az öntözésfejlesztés és belvízvédelmi munkákban tovább "csiszolódott", naprakész termelési adatokkal rendelkezik, valamint a jelenleg legújabb modellezési verzió alatt fut.

A NATÉR2 A6 munkacsomagban nagy volumenű beszivárgás számítás történt az ország teljes területére, melyet a korábban részletesen kifejtettünk. A különböző klímaszcenáriók, időablakok és termelési állapotok (nem termelő - eredeti/termelő (2018-2016 átlag értékeire) kombinációjával 22 modellváltozat futtatására került sor.

A modellben a freatikus víztartó hidrosztratigráfiai egységeire a transzmisszivitás értékeket használtuk. A hegy- és dombvidéki részeken ezek elkülönítési alapja a kvarter mentes, fedetlen földtani térkép volt. Ugyanitt a völgytalpi részekre, és a helyenként jelentkező alacsony teraszokra a fedett földtani térképváltozatról vettük át a határokat. Végül a negyedidőszaki medenceterületeken a sekély-kutakban végzett hidraulikai vizsgálatok eredményei alapján adtuk meg az ott számításba veendő transzmisszivitási adatokat, majd ennek térbeli interpolációja után határoltunk le azokat a zónákat, melyekre egységes jellemző paraméterekkel láttunk el.



5-30. ábra: Az első modellrétegben alkalmazott szivárgási tényező értékek, az ország keleti felében

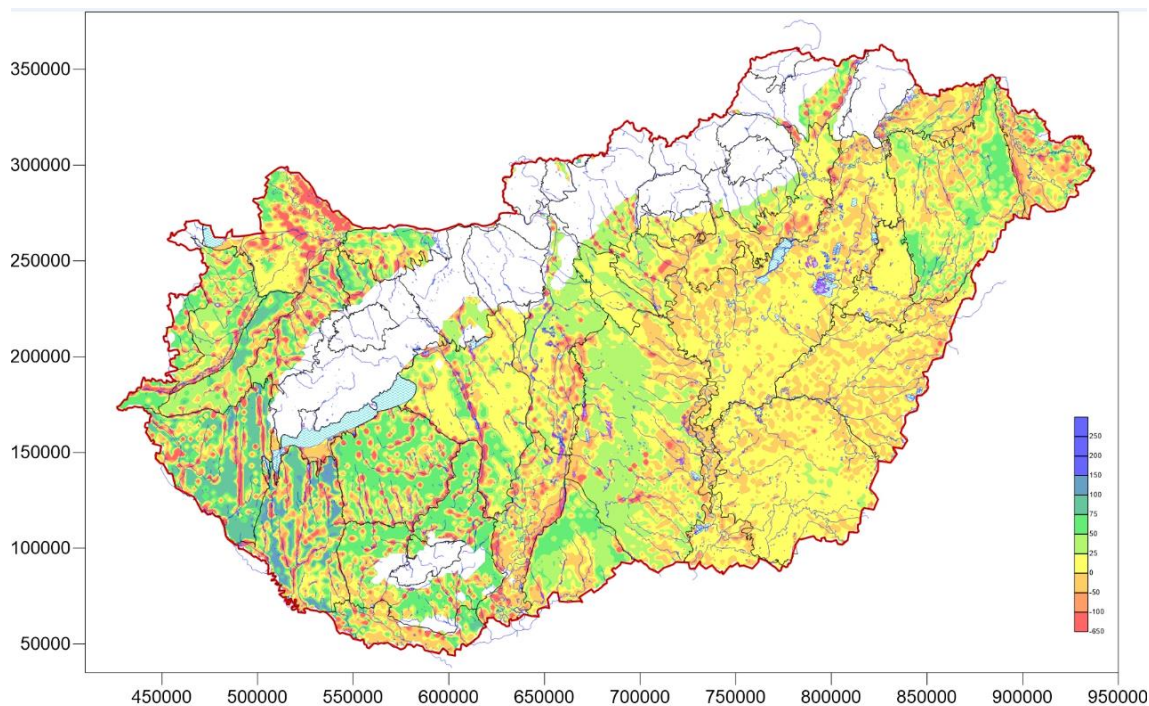
Az országos modell felső peremfeltétele a beszivárgási érték volt. Ezt a HELP hidrológiai modellben CARPATLIM-HU adatai és a CORDEX adatbázis négy RCP forgatókönyvre alapozott szimulációi számított értékek, melyek részletezése a főszövegben illetve a 2. mellékletben található.

Megcsapolási peremfeltételként a teljes területre vonatkozó DTM értékeket adtuk meg, mint a szivárgó felszínt. A szivárgó felszínnek vertikális conductance értékére egységesen magas értéket választottunk. A modellfuttatások során a beszivárgási és a transzmisszivitási értékek változtatása során annál a realizációnál érzük el a megfelelő talajvízdomborzatot, amelyiknél a számított aktív szivárgású felszínrészek egybeesnek az állandó vizes, vízfolyásos részekkel. A talajvízdomborzat szintvonalainak alakulását a vízfolyáshálózattal és a vízfolyásmentes mély völgyek helyzetével összevetve, ezek megfeleltetésével már egy fél-quantitatív kalibrációt is elvégezhetünk.

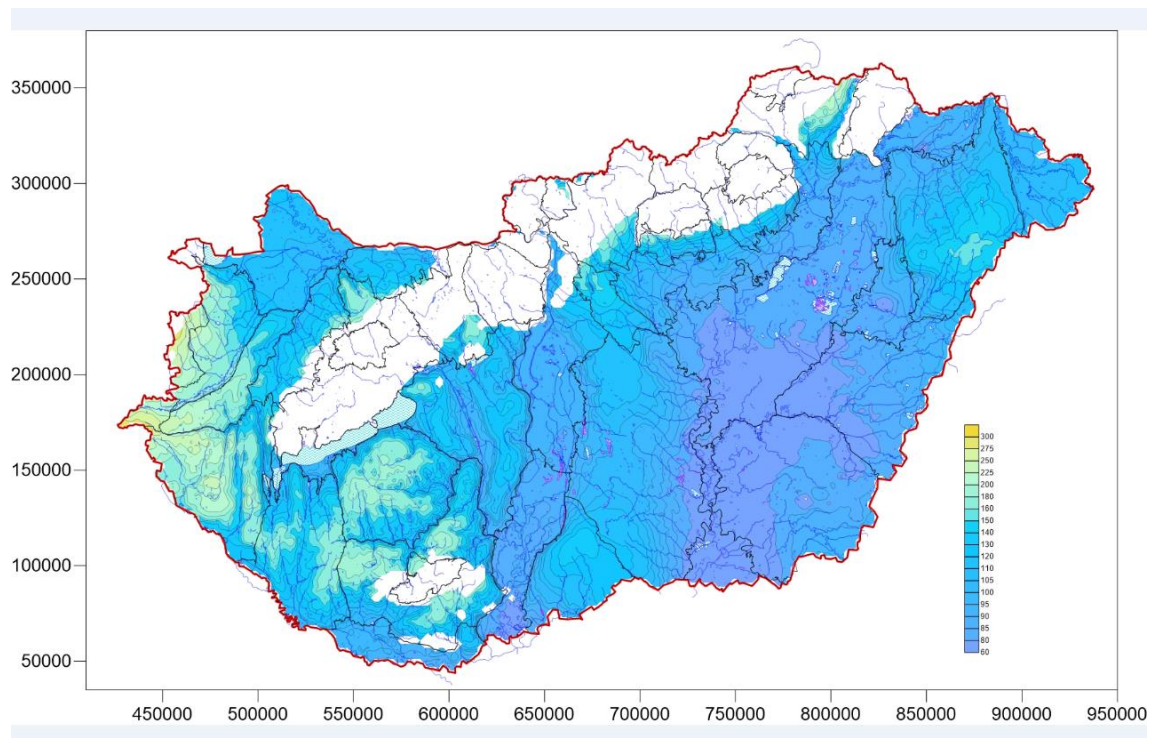
A nagyobb folyók mentén a terepmodell szolgáltatott szintadatok nem elegendően pontosak és általában több méterrel magasabban találhatók, mint a folyók középvízszintjei. Ezeken a helyeken a modellben az úgynevezett folyó peremfeltételt alkalmaztuk, a felszíni vízmércék középvízi szintadatai megadásával, úgy, hogy két szomszédos vízmérce közötti folyószakaszra lineárisan interpolált értékeket alkalmaztuk. A nagyobb folyók kavicsos allúviumánál ez a megoldás különösen fontos, tekintettel arra, hogy a folyó középvízszintje több kilométeres távolságra is a fő meghatározója a talajvíz domborzatnak.

A talajvíz szintjét síkvidéki területeken a felszíni szivárgások, (csatornák, drének) szintjei és a folyók vízszintjei mellett a talajvíz-párolgás is szabályozza. A felszíni szintek pontos ismerete, a párolgásba résztvevő növényzet típusának megadása segítségével a talajvíz-párolgás számítható a modellben. Tekintettel azonban a modell 4 km<sup>2</sup> nagyságú cellaméretére, ebben a mérettartományban csak hozzávetőleges aggregálódott értékekről beszélhetünk.

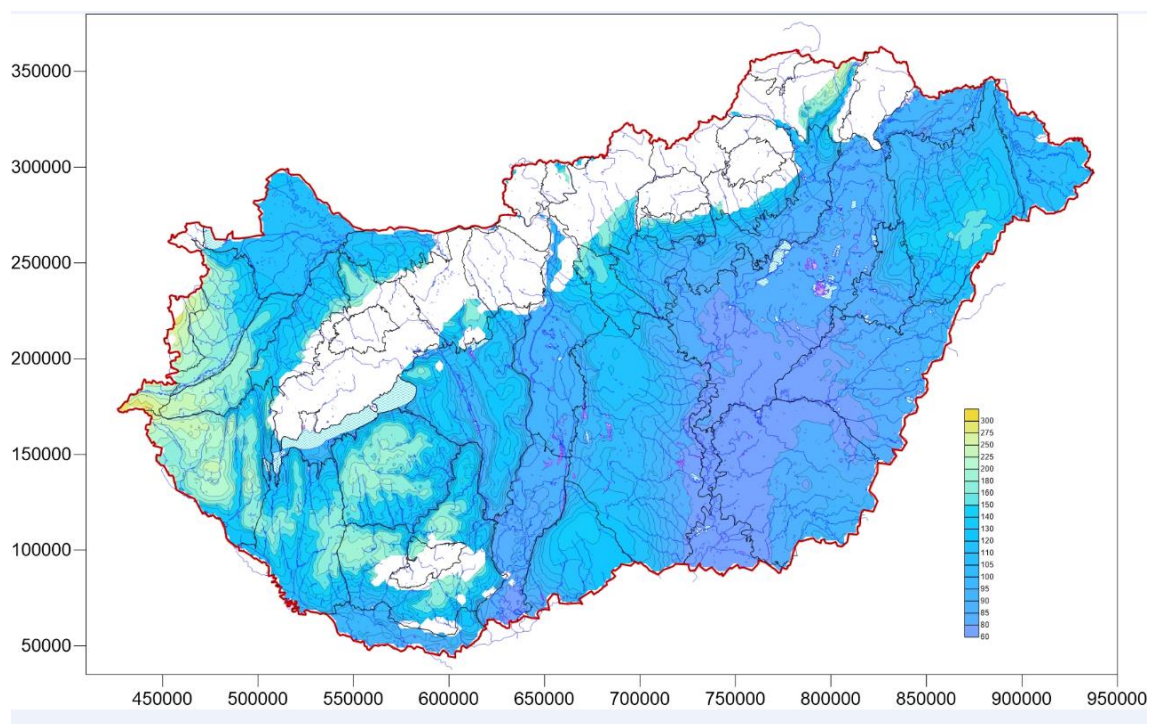
A Pannon XL v.3.0 alkalmazásával 22 db futtatást végeztünk a fent ismertetett beszivárgások eloszlások alapján termelés nélküli („természetes”) valamint termeléses (2008-15 átlagos értékei) mellett. Az eredmény-térképek tartalmazzák a különböző klímaszcenáriók és időszakokra számított felszín alatti vízáramlások rendszereinek szintjeit és vízháztartási elemeit (felszíni nettó vízforgalom – beszivárgás, megcsapolás [mm/év]). Ezen térképek sorozatából néhány jellemző változatot szemléltetünk:



5-31. ábra: A közel jövő (2023-2052) RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) nettó vízforgalma a felszínen a hegységi területek elhagyásával [mm/év]



5-32. ábra: A referencia időszakra (1973-2004) CARPATCLIM-HU mért klimatikus adatok alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) talajvízszint eloszlás a hegységi területek elhagyásával [mBf]



5-33. ábra: A referencia időszakra (1973-2004) az RCA4/CNRM-CM5/RCP4.5 klímamodell szimuláció alapján modellezett (Pannon-XL v.3.0 - termeléses változat) talajvízszint eloszlás a hegységi területek elhagyásával [mBf]