

# A talajvíz klímaérzékenységének modellezése a NATÉR projekt keretei között

Kutatási jelentés

---

Szerzők:

Kovács Attila – Szócs Teodóra – Tóth György –  
Marton Annamária – Kun Éva – Kerékgyártó Tamás

---



2015. augusztus 14.

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1</b>	<b>BEVEZETÉS</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MÓDSZERTAN</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>KLÍMAADATOK</b> .....	<b>5</b>
3.1	ADATBÁZIS.....	5
3.2	KLÍMAVÁLTOZÁS .....	5
<b>4</b>	<b>KLÍMAZÓNÁK</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>BESZIVÁRGÁSI ZÓNÁK</b> .....	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>BESZIVÁRGÁS SZÁMÍTÁS</b> .....	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>VÍZFÖLDTANI MODELLEZÉS</b> .....	<b>13</b>
7.1	CÉLOK .....	13
7.2	A MODELLEZÉS MÓDSZERTANA.....	13
7.3	ALKALMAZOTT SZOFVER .....	14
7.4	MODELLGEOMETRIA .....	14
7.5	MODELLPARAMÉTEREK.....	14
7.6	AZ ALKALMAZOTT MODELLEK KORLÁTAI .....	15
7.7	MODELL-ELŐREJELZÉSEK.....	15
<b>8</b>	<b>KLÍMAÉRZÉKENYSÉG</b> .....	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓK</b> .....	<b>18</b>
<b>10</b>	<b>IRODALOM</b> .....	<b>20</b>
	<b>FÜGGELÉK</b> .....	<b>21</b>

## 1 BEVEZETÉS

Ez a tanulmány a NATÉR projektben az országos talajvíz eloszlás modellezésére alkalmazott módszertan ismertetését, és a modellezés eredményeit tartalmazza. A projekt célja olyan módszertan kidolgozása volt, melynek segítségével a sekély felszín alatti víztükör különböző klímaviszonyok mellett modellezhető. A módszertan célja, hogy a klímaváltozás talajvízre gyakorolt hatását vizsgálja, és jellemezze a sekély felszín alatti vizek klímaérzékenységét.

Ez a jelentés a tanulmány készítése során hozzáférhető adatok alapján készült. A vizsgálatok eredményei a felhasznált adatbázisok hibáit és hiányosságait is tartalmazzák. A modellezett eloszlások országos létekkü pontossággal készültek, ezért lokális vizsgálatok céljára nem alkalmasak. A projekt során kidolgozott modellezési módszertan és eszköztár alkalmas mind frissített és kibővített bemeneti adatbázisok, mind pedig nagyobb felbontás mellett az eredmények nagyobb pontosságú előállítására, így sokrétű eszközt jelent a sekély felszín alatti vizek eloszlásának és klímaérzékenységének a meghatározásához.

## 2 MÓDSZERTAN

A talajvíz országos eloszlásának különböző klímaviszonyok mellett történő meghatározásához dinamikus, moduláris módszert dolgoztunk ki, amelyik az alábbi komponenseket tartalmazza:

1. Klímazónák meghatározása klímparaméterek országos eloszlása alapján,
2. Beszivárgási zónák lehatárolása,
3. Beszivárgás meghatározása minden beszivárgási zónára egydimenziós hidrológiai modellek segítségével,
4. Talajvízeloszlás meghatározása numerikus vízföldtani modellek segítségével.

Vizsgálataink során interpolált napi klímparamétereket használtunk, melyeket a CarpatClim-Hu közép-európai adatbázisból, illetve az ALADIN klímamodell kimenő adataiból nyertünk ki. A klímazónákat a Thorntwaite klímazóna beosztás alapján állítottuk elő. A beszivárgási zónákat a geológia, területhasználat és lejtőszög alapján határoztuk le. A víztükör eloszlását a Modflow numerikus kóddal szimuláltuk.

A projekt során a talajvíztükröt több időintervallumra, azok átlagos klímparaméterei alapján számítottuk, amelyek a következők:

1. 1961–1965
2. 2005–2009
3. 1961–1990
4. 2021–2050
5. 2071–2100

A múltbeli talajvíz eloszlásokat mért bemenő adatok alapján határoztuk meg. Az előrejelzéseink az Országos Meteorológiai Szolgálat által szolgáltatott ALADIN klímamodellek eredményei (ILLY et al. 2015) alapján lettek szimulálva. A klímamodellek bizonytalanságai miatt megjelennek az előre jelzett beszivárgás és talajvíz eloszlásokban, ezért azok tájékoztató jellegűek.

A modellezés során feltételeztük, hogy a hozzáférhető adatsorok kezdeti 1961–1965-ös időszakában a talajvíz természetes egyensúlyi állapotban volt, és a bányászati vízszintsüllyesztések, illetve ivóvíz-kitermelések hatása ebben az időszakban elhanyagolhatónak tekinthető. A modellt erre a nyugalmi időszakra kalibráltuk, és az előrejelzések során ezen kalibrált modellparamétereket alkalmaztuk. Az előrejelzések a klímaváltozás hatására előálló hipotetikus vízszinteket mutatják, melyek nem tartalmazzák sem a jelenlegi, sem pedig a potenciális jövőbeni víztermelések depressziós hatásait.

## 3 KLÍMAADATOK

### 3.1 ADATBÁZIS

A jelen tanulmányhoz a CarpatClim-Hu (LAKATOS et al., 2013a) adatbázis szolgáltatta a fő bemeneti adatokat. A CarpatClim-Hu egy homogenizált raszteres adatbázis, amelyet a Kárpát-medence klíma-állomásainak adataiból állítottak elő interpolációval.

Az adatbázishoz 258 klímaállomás és 727 csapadékmérő állomás adatát használták fel. Magyarországon területére ebből 37 klímaállomás és 176 csapadékmérő állomás esik (SPINONI 2013).

Az adatbázis számos alapvető klímaparaméter és klímaindikátor 0,1 fokos (mintegy 10×10 km) felbontású homogenizált adathálóját tartalmazza napi, havi és éves felbontásban 1961-től 2010-ig (KOVÁCS et al. 2013).

A beszivárgás modellezése során a napi hőmérséklet- és csapadék-, havi besugárzási és féléves szélességi adatokat átlagoltuk klímazónák szerint.

A vizsgálati időszakok mért és számított átlagos hőmérséklet- és csapadékeloszlásait a Függelék 1–10. ábrája mutatja.

1. táblázat. A CarpatClim-Hu változók listája

Sz.	Indikátor rövidítés	Megnevezés	Időbeli felbontás
1.	TA	Átlagos középhőmérséklet	napi/havi/éves
2.	TMIN	Átlagos minimum levegő hőmérséklet	napi/havi/éves
3.	TMAX	Átlagos maximum levegő hőmérséklet	napi/havi/éves
4.	PREC	Csapadékösszeg	napi/havi/éves
5.	WS10	Átlagos, vízszintes szélesség 10 m-en	napi/havi
6.	WS2	Átlagos, vízszintes szélesség 2 m-en	napi/havi
7.	WD10	10 m-es szélirány	napi
8.	WMAX10	Maximális, vízszintes szélesség 10 m-en	napi
9.	SUN	Napfénytartam	napi/havi/éves
10.	CC	Átlagos felhőborítottság	napi/havi
11.	RG	Globálisugárzás	napi/havi
12.	RH	Átlagos relatív páratartalom	napi/havi
13.	PV	Átlag vízgőznyomás	napi/havi
14.	PA	Átlag felszíni légnyomás	napi/havi

### 3.2 KLÍMAVÁLTOZÁS

Minden szimulációs időszakra kiszámítottuk a klímaparaméterek átlagos eloszlásait. Ezen eloszlások felhasználásával készültek el a különböző időszakokhoz tartozó klímazóna-beosztások, és a számított beszivárgás eloszlások. A klímaparaméterek eloszlásának változásai — a beszivárgás megváltozásán

keresztül — a kvázi-egyensúlyi vízszintek megváltozását idézik elő. Az egyes vízföldtani egységek klímaérzékenysége kifejezhető a vízszintek klímaváltozás hatására történő megváltozásával.

Az egyes klímaparamétereknek a szimulációs időszakok közötti megváltozását a Függelék 11–18. ábrája szemlélteti.

A mért paraméterek alapján számított különbségtérképek a csapadék jelentős mérvű (mintegy 100 mm/év) csökkenését mutatják a nyugati országrészben, és mérsékelt növekedést mutatnak a keleti részekben. Ezek az adatok a hőmérséklet mintegy 1,8 °C fokos növekedését jelzik a kétezres éveket megelőző 45 év során.

A klímamodellek kimenetei alapján véve hasonló, ám területi eloszlását tekintve eltérő változásokat jeleznek. A hatvanas évektől a 21. század végéig előrejelzett változások a csapadék csökkenését jelzik mindenhol, és fokozott szárazulást jósolnak a keleti országrészben. Ezen modellek a hőmérséklet mintegy 3,5 fokos növekedését jósolják, melynek maximuma a délkeleti régióba tehető.

Habár a klímamodellek eredményeit jelentős bizonytalanság terheli, mind a múltbeli mért, mind pedig az előrejelzett szimulált eloszlások csökkenő éves csapadékot és növekvő középhőmérsékletet jeleznek. Mindez — figyelembe véve hogy az előrejezések szerint az egyedi csapadékesemények számának csökkenése és növekvő intenzitása várható — a beszivárgás és így a talajvízszintek hosszú távú csökkenését vetíti előre. A talajvízszintek változásának részletes kvantitatív előrejelzését a következő fejezetek tartalmazzák.

## 4 KLÍMAZÓNÁK

A klímazónák lehatárolásának célja olyan elemi egységek előállítása volt, amelyekben belül a klimatikus viszonyokat homogénnek feltételezhetjük. A beszivárgást ezen homogén egységekre egyenként, egydimenziós hidrológiai vízmérleg modellekkel végeztük el.

A nemzetközileg elfogadott biofizikai klímaosztályozási módszerek áttekintése után a THORNTWAITE (1948) módszert értékeltük a vizsgálataink céljára alkalmasnak. Thornthwaite módszerét más módszerekkel összehasonlítva SZELEPCSÉNYI et al. (2009) elemezték. E vizsgálatok alapján bebizonyosodott, hogy Thornthwaite módszere alkalmas Magyarország mezoléptékű klimatikus jellemzésére. Thornthwaite módszere a talaj és a növényzet vízforgalmát használta fel kímaindikátorként kifejezhető hidrofizikai index formájában. A modell fizikai jellegét a PET (potenciális evapotranszpiráció) és egy egyszerű „tartály” modell alkalmazása biztosítja, míg biológiai jellegét a hasznos vízkészlet alkalmazása adja.

Az ÁCS, BREUER (2013) által ismertetett metodológiát alkalmaztuk a Thornthwaite klímazónák számítása során. A módszer részletes leírása megtalálható Kovács et al. (2015) projektjelentésében.

A klímazónákat a következő időszakokra határoztuk meg átlagos havi klímaadatok felhasználásával:

1. 1961–1990
2. 1981–2010
3. 1961–1990
4. 2021–2050
5. 2071–2100

A számítások grid alapú eljárással történtek, a végső zónaeloszlás vektoros formába lett átalakítva.

A beszivárgást minden szimulációs időszakra és beszivárgási zónára az időben illeszkedő klímazónák felhasználásával számítottuk ki. A CarpatClim-Hu és ALADIN klímparaméter eloszlásokból számított klímazóna-beosztásokat a Függelék 19–23. ábrája szemlélteti.

Látható, hogy míg a mért adatok alapján meghatározott klímazónák viszonylag kismérvű — és elsősorban a hegyvidéki területekre korlátozódó — eltolódást mutatnak, a klímamodellek alapján szerkesztett klímazónák drasztikus változásokat jeleznek.

## 5 BESZIVÁRGÁSI ZÓNÁK

A jelen tanulmányban definiált beszivárgási zónák olyan vízföldtani egységek, melyeken belül a beszivárgási viszonyok nem mutatnak jelentős változékonyságot. A SWAT (NEITSCH et al. 2002) modellezési nomenklatúra ezeket az egységeket „Hydrological Response Unit”-ként definiálja. A beszivárgási zónákat három adatréteg szuperpozíciója határozta meg:

- területhasználat,
- felszíni geológia,
- lejtőszög,
- klíma.

A modellezéshez használt területhasználati beosztást az Európai CORINE (EEA 2006) adatbázis alapján állítottuk elő. A projekt igényeinek megfelelően a nagyszámú CORINE kategóriát hat osztályba soroltuk be a következők szerint:

- 111, 112, 121, 122, 123, 124, 131, 132, 133, 141, 142, 331, 332 → Lakott területek (1),
- 211, 212, 241 → Szántó (2),
- 231, 321, 333, 334 → Legelő (3),
- 221, 222, 242, 243, 244 → Gyümölcsös (4),
- 311, 312, 313, 322, 324 → Erdő (5),
- 213, 411, 412, 421, 422, 423, 511, 512, 521, 522, 523 → Víztestek (6).

Az eredeti CORINE kategóriák leírását az 1. diagram szemlélteti.



## MESTERSÉGES FELSZÍNEK

### LAKOTT TERÜLETEK

- 111 Összefüggő település szerkezet
- 112 Nem összefüggő település szerkezet

### IPARI, KERESKEDELMI TERÜLETEK ÉS KÖZLEKEDÉSI HÁLÓZATOK

- 121 Ipari vagy kereskedelmi területek
- 122 Út- és vasúthálózatok és csatlakozó területek
- 123 Kikötők
- 124 Repülőterek

### BÁNYÁK, LERAKÓHELYEK ÉS ÉPÍTÉSI MUNKAHELYEK

- 131 Nyersanyag kitermelés
- 132 Lerakóhelyek (meddőhányók)
- 133 Építési munkahelyek

### MESTERSÉGES, NEM MEZŐGAZDASÁGI ZÖLDTERÜLETEK

- 141 Városi zöldterületek
- 142 Sport-, szabadidő- és üdülő területek

### MEZŐGAZDASÁGI TERÜLETEK

#### SZÁNTÓFÖLDEK

- 211 Nem-öntözött szántóföldek

#### ÁLLANDÓ NÖVÉNYI KULTÚRÁK

- 221 Szőlők
- 222 Gyümölcsösök, bogyósok

#### LEGELŐK

- 231 Rét / legelő

### VEGYES MEZŐGAZDASÁGI TERÜLETEK

- 242 Komplex művelési szerkezet
- 243 Elsődlegesen mezőgazdasági területek, jelentős természetes formációkkal

### ERDŐK ÉS TERMÉSZETKÖZELI TERÜLETEK

#### ERDŐK

- 311 Lomblevelű erdők
- 312 Tülevelű erdők
- 313 Vegyes erdők

#### CSERJÉS ÉS / VAGY LÁGYSZÁRÚ NÖVÉNYZET

- 321 Természetes gyepek, természetközeli rétek
- 322 Törpecserjés, cserjés területek, fenyérek
- 324 Átmeneti erdős-cserjés területek

#### NYÍLT TERÜLETEK NÖVÉNYZET NÉLKÜL / KEVÉS NÖVÉNYZETTEL

- 331 Homokos tengerpartok, dűnék, homok
- 332 Csupasz sziklák
- 333 Ritkás növényzet
- 334 Leégett területek
- 335 Gleccserek, örök hó

#### VIZENYŐS TERÜLETEK

#### BELSŐ (SZÁRAZFÖLDI) VIZENYŐS TERÜLETEK

- 411 Szárazföldi mocsarak
- 412 Tőzeglápok

#### TENGERMELLÉKI VIZENYŐS TERÜLETEK

- 421 Tenger melléki mocsarak
- 423 Az ár-árpály által érintett területek

#### VÍZFELÜLETEK

#### KONTINENTÁLIS VIZEK

- 511 Folyóvizek, vízi utak
- 512 Állóvizek

#### TENGERI VÍZFELÜLETEK

- 521 Tengerparti lagúnák
- 522 Folyótorkolatok
- 523 Tenger és óceán

### 1. diagram. A CORINE földhasználati kategóriák leírása<sup>1</sup> (EEA 2006)

A projekt során alkalmazott területhasználati térképet a Függelék 26. ábrája szemlélteti.

A geológiai réteghez a MÁFI fedett földtani térképét használtuk fel. A felszíni formációkat hat litológiai típusba soroltuk be, úgymint:

- hasadozott kőzet (10),
- dolomit (20),
- mészkő (30),
- finom porózus (40),
- durva porózus (50),
- felszíni vizek (60).

Minden földtani kategóriához kétjegyű azonosítót rendeltünk. A beszivárgási zónák lehatárolásához használt földtani osztályozást a Függelék 24. ábrája mutatja.

A lejtőszög kategóriákat az 50 méteres felbontású Digitális Terepmodell alapján határoztuk meg (HM ZRINYI 2014). Két lejtőkategóriát különítettünk el az alábbiak szerint:

- 0 – 4,99% → lapos terület (100),

<sup>1</sup> Fordítás forrása: TEIR – [https://www.teir.hu/teir\\_adatmodszertan\\_uj/Corine.pdf](https://www.teir.hu/teir_adatmodszertan_uj/Corine.pdf)

- 5% → lejtő (200).

A modellezéshez alkalmazott lejtőkategória térképet a Függelék 25. ábrája mutatja.

A klímakategóriákat a 4. fejezetben ismertetett módon határoztuk meg.

A fenti tematikák szuperpozíciójaként előállított beszivárgási zóna térképet a Függelék 27. ábrája szemlélteti. A beszivárgási zónákat négyjegyű azonosítókkal láttuk el, ahol az első tag a klímazónát, a második a lejtőkategóriát, harmadik a geológiát, a negyedik a területhasználatot jelzi.

## 6 BESZIVÁRGÁS SZÁMÍTÁS

A talajvízszintek 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, SYKES 2007), és előzőleg már sikerrel alkalmazták hazai területeken beszivárgás számítás céljára. A HELP modell kimenetei könnyen alkalmazhatóak Modflow modell környezetbe, amit a víztükör numerikus előállítására 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 klímagenerátora az alábbi klímparamétereket használja:

- hőmérséklet,
- csapadék,
- szélesebesség,
- besugárzás.

A fenti adatokat általunk előállított scriptek segítségével nyertük ki a CarpatClim-Hu és ALADIN adatbázisokból a Thorntwaite klímazonákra, és előállítottuk a HELP számára szükséges bemeneti Weather fileokat.

A klímparamétereken kívül a HELP modellhez szükség van a talajprofilok definiálására, ami alapján a modell egydimenziós tranziens vízmérleget számít. A földtani kategóriákhoz típusprofilokat rendelünk, melyeket mintaterületeken gyűjtött szemcseeloszlási adatok alapján tipizáltunk. A profilok előállításának menetét KOVÁCS et al. (2015) részletesen ismerteti. Mivel az alkalmazott 3 méteres profilokon belül elhanyagolható vertikális litológiai változékonyságot tapasztaltunk, homogén profilokat alkalmaztunk a modellezés során, melyek alkalmasságát érzékenységvizsgálatokkal igazoltuk. A szimulált beszivárgási idősorokat a megfigyelő kutak vízszintidősoraival hasonlítottuk össze, és a talajprofilok paramétereit ezek alapján valamint mért és irodalmi beszivárgás adatokhoz kalibráltuk.

A felszínborítottság és a lejtőszög hatását összevontan a „*runoff curve number*” alkalmazásával reprezentáltuk. Az alkalmazott paramétereket az 1. táblázat és a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A HELP modellezés során alkalmazott talaj paraméterek

HELP profilok paraméterei	Profilok				Mértékegység
	Finom porózus	Durva porózus	Karszt	Hasadozott	
Total porosity	0,463	0,43	0,437	0,38	vol/vol
Field capacity	0,232	0,2	0,052	0,2	vol/vol
Wilting point	0,116	0,0825	0,024	0,033	vol/vol
Sat. hydr. conductivity	5	1	501,12	8	cm/day
Subsurface inflow	0	0	0	0	cm/day
Evapotranspiration zone depth	115	125	125	125	cm

2. táblázat. A HELP modellezés során alkalmazott, az egyes növényborítási kategóriákhoz és a jellemző földtani profilokhoz rendelt *curve number* értékek

Talajfajták	Finom porózus	Durva porózus	Karszt	Hasadozott
Területhasználati kategóriák	<i>Curve Number</i>			
2 Szántó	94	94	91	94
3 Legelő	93	93	91	93
4 Gyümölcsös	92	92	91	92
5 Erdő	91	91	91	91

A beszivárgás értékeket az alkalmazott talajprofilokra és az azokhoz tartozó klímazonákra a teljes adasorra szimuláltuk, majd a szimulációs időszakokra átlagokat képeztünk. Az átlagos beszivárgás eloszlásokat a Függelék 28–32. ábrája szemlélteti.

A különböző szimulációs időszakok között a beszivárgás eloszlásának a változásait a Függelék 33–34. ábrája szemlélteti.

A számított beszivárgások változása alapján elmondható, hogy a beszivárgás a hegyvidéki területeken (Alpokalja, Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység) az 1961–1965 és a 2005–2009 időszakok között mintegy 50 mm/éves csökkenése követhető nyomon.

Az ALADIN modelkimenetek alapján szimulált beszivárgások változása ugyancsak mintegy 50 mm/éves beszivárgás-csökkenést jósol a szárad hátralévő évtizedekre a hegyvidéki területeken, úgy mint a Mecsek, Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység területén.

## 7 VÍZFÖLDTANI MODELLEZÉS

### 7.1 CÉLOK

A projekt keretei között elvégzett vízföldtani modellezés elsődleges célja a talajvízszintek előrejelzésén keresztül a sekély víztestek klímaérzékenységének jellemzése volt. A klímaparaméterek változása a beszivárgás változásán keresztül a talajvíz szintjének megváltozásához vezet, ami mind ökológiai mind pedig gazdasági szempontból jelentős változásokat idézhet elő.

### 7.2 A MODELLEZÉS MÓDSZERTANA

A talajvíztükör természetes állapotának — a rendelkezésre álló értékelhető kalibrációs adatokat és a bányászati aktivitást figyelembe véve — az 1961–1965-ös időszakot tekintettük. Feltételeztük, hogy a mesterséges hatások, úgy mint a bányászati vízszint süllyesztések, illetve egyéb vízkitermelések hatása ebben az időszakban elhanyagolhatónak volt tekinthető. A modell kalibrációt erre az időszakra végeztük el, és a jövőbeni forgatókönyveket ezen paramétereloszlás mellett szimuláltuk.

A vízszintek előrejelzésére permanens modelleket alkalmaztunk, melyeket többéves átlagos beszivárgási viszonyok mellett szimuláltunk, feltételezve, hogy kvázi egyensúlyi állapot alakul ki.

Nyílt karsztos területeken azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a karsztvízszint hidraulikai kapcsolatban áll a határos sekély talajvízzel, így azok folytonos felülelettel közelíthetőek.

A modell peremfeltételeit a felszíni vízfolyások (river BC) és megcsapoló zónák (drainage BC) képezték. A mesterséges víztermelések nem szerepelnek a modellben, mivel annak célja a klímaváltozás közvetlen hatásának vizsgálata volt. Emiatt az előrejelzett víztükrök hipotetikus eloszlások, melyek nem tartalmazzák a mesterséges vízkitermelések hatásait.

A modellt a sekély monitoringkutak átlagolt vízszintjeihez, forrásszintekhez és a felszíni vizek terepi szintjeihez kalibráltuk. A kalibrációt a PEST autokalibrációs kóddal végeztük el. A PEST (WNC, 2005) egy nem-lineáris paraméterbecslő kód, amely a Gauss-Marquardt-Levenberg módszert alkalmazza a mért és számított értékek közötti eltérés minimalizálására.

Mivel a projekt elsődleges célja a módszertan kidolgozása és demonstrációja volt, a modellezés során elődjegesen a módszertan következetes alkalmazására törekedtünk. A jövőbeni beszivárgás eloszlások klíma-modell-adatokból lettek számítva, mely modellek nagyfokú bizonytalansággal terheltek. Ezek a bizonytalanságok átöröklődnek a vízföldtani modellekbe, így a szimulált eloszlások amellettt hogy országos léptékűek, tájékoztató jellegűnek tekintendőek. A jelen tanulmányban leírt modellek nem alkalmasak lokális léptékű vizsgálatokra, azonban a kidolgozott metodológia és eszköztár lehetőséget biztosít potosított bemeneti adatok és a felbontás növelése mellett a lokális talajvízszintek szimulációjára is.

### 7.3 ALKALMAZOTT SZOFVER

Az országos talajvíz modell előállításához a Modflow modellezési kódot használtuk, melyet Visual Modflow v.4.6 szoftver környezetben futtattunk (WATERLOO HYDROGEOLOGIC INC. 2005). A Modflow egy nemzetközileg elfogadott, és széles körben alkalmazott moduláris program, amelyik telített víz-áramlás modellezésére alkalmas három dimenzióban. A véges differenciás diszkretizáció és a könnyű kezelhetőség miatt, tekintve, hogy a felhasznált bemeneti adatok grid típusúak, a Modflow megfelelőnek bizonyult a feladat végrehajtásához.

### 7.4 MODELLGEOMETRIA

A numerikus stabilitás és elfogadható modellfuttatási idők biztosítása végett az országot két modellterületre (Ny, K) osztottuk, melyek határát a Duna vonalánál jelöltük ki.

A modell célja a sekély felszín alatti vizek szimulációja volt, ezért a modellezést kétdimenziós egyrétegű modellel végeztük el. A modell országos léptékű, melyhez 250 méteres cellaméretet alkalmaztunk. A modellezést kétdimenziós egyrétegű véges differencia ráccsal végeztük el.

A modellterület határait a 3–4. táblázatok tartalmazzák.

3. táblázat. A keleti modellterület határai

Modellperem	X (EOV)	Y (EOV)
Nyugat	620000	N/A
Kelet	940000	N/A
Észak	N/A	364000
Dél	N/A	54000

4. táblázat. A nyugati modellterület határai

Modell perem	X (EOV)	Y (EOV)
Nyugat	426000	N/A
Kelet	458000	N/A
Észak	N/A	41000
Dél	N/A	304000

### 7.5 MODELLPARAMÉTEREK

A modell kétdimenziós permanens jellege miatt a kalibráció során a transzmisszivitás eloszlás kalibrációja volt szükséges. Tekintve, hogy a sekély víztestek vastagsága bizonytalan, a transzmisszivitás-értékek elsősorban kalibrációs paraméternek tekinthetők. A transzmisszivitás-zónák meghatározásakor a víztesteket nagyobb egységekké vontuk össze, melyeket azonos hidraulikai paraméterrel láttunk el.

A kalibráció célja az volt, hogy a paraméterek adjusztálásával a mért és modellezett vízszintértékek minél jobb illeszkedését érjük el. A kalibráció módszertanát és a kalibrációs statisztikákat a KOVÁCS et al. (2015) jelentés tartalmazza.

A kalibrált transzmisszivitás-eloszlást a Függelék 35. ábrája mutatja. A modell előrejelzések során a kalibrált paraméter eloszlást alkalmaztuk.

## **7.6 AZ ALKALMAZOTT MODELLEK KORLÁTAI**

A projekt során előállított modellek számos korláttal rendelkeznek, és kizárólag a projekt célkitűzéseiben definiált célokra alkalmazhatók országos méretarányban. A modellek korlátai a következők:

- A modellek permanens állapotot feltételeznek, vagyis a szimulációs időszakok alatt a talajvíz feltételezett egyensúlyban van a klimatikus viszonyokkal.
- A kalibrációs adatok eloszlása egyenlőtlen, emiatt az eredmények térbeli bizonytalansága változó.
- A modell kétdimenziós, emiatt nem veszi figyelembe a mélyáramlás hatásait.
- A modell nem tartalmaz mesterséges vízkivételeket, ezért az előrejelzések hipotetikus vízszinteket takarnak, amelyek csak a klímaváltozás közvetlen természetes hatásait tükrözik.
- A modell felbontása 250 méter, emiatt nem alkalmas lokális vízszintek szimulációjára, kizárólag országos léptékű vizsgálatokra.
- A modellezés célja a kidolgozott módszertan tesztelése és bemutatása volt. Az eredmények ennek tükrében használhatóak fel,
- A modell előrejelzések az ALADIN klímamodellek eredményei alapján készültek. A klímamodellek kimenetek jelentős bizonytalansággal terheltek, melyek megjelennek a modellezett vízszintekben is.

## **7.7 MODELL-ELŐREJELZÉSEK**

A talajvíz szinteket az 1961–1965 és 2005–2009 időszakokra mért (CarpatClim-Hu), valamint az 1961–1990, 2021–2050, és 2071–2100 időszakokra számított (ALADIN) klímamodellek alapján szimuláltuk.

A számított talajvíz tükör eloszlásokat a Függelék 36–40. ábrái mutatják. Az 1961–1965 időszakra számított talajvíz mélységtérképet (telítetlen zóna vastagság) a Függelék 41. ábrája szemlélteti.

A klímaváltozás hatását a különböző szimulációs időszakokhoz tartozó talajvíz szintek különbsége jelzi. Az 1961–1965 és 2005–2009 különbségtérkép a talajvíz szintek jelentős (tíz métert is elérő) csökkenését mutatják a hegyvidéki területeken (Északi-középhegység, Dunántúli-középhegység, Alpokalja). A csökkenés a hegyperemi régiókban néhány méterre rúg (Függelék: 42. ábra).

A klímamodell-kimenetek alapján számított különbségtérképek hasonló mértékű vízszintcsökkenéseket jeleznek az elkövetkező évtizedekre, habár ezek eloszlása némileg eltérő. A legjelentősebb csökkenések az Északi-középhegység, Dunántúli-középhegység és Mecsek területén várhatók (Függelék: 42–45. ábra). Ugyanezek a modellek 1–2 méter közötti csökkenést mutatnak a Duna–Tisza közén és a Tiszántúl egyes területein.



## 8 KLÍMAÉRZÉKENYSÉG

A NATÉR projekt talajvízkomponensének fő célkitűzése a sekély felszín alatti vizek klímaérzékenységének meghatározása volt. A talajvízszintek — a beszivárgás változásain keresztül — érzékenyen követik a klímaviszonyok megváltozását, így felhasználhatóak a klímaérzékenység minősítésére.

Az ország talajvíztartóit érzékenységi osztályokba soroltuk be annak alapján, hogy a modellezett talajvízszintek milyen mértékben reagálnak a klímaváltozásra. Az érzékenységi térképet előállítottuk mind a mért adatokon alapuló szimulációk eredményei, mind pedig a klímamodell-kimenetek alapján előállított szimulációk eredményei alapján. Az érzékenységi térképeket a Függelék 46., 47. ábrája szemlélteti.

Az első térkép a 2005–2009 és az 1961–1965-ös talajvízszintek különbségei alapján, a második pedig a 2071–2100 és a 1961–1990 időszakok szimulált talajvízszintjeinek különbsége alapján készült.

A vízszintnövekedéssel, illetve a 0,5 métert meg nem haladó vízszintcsökkenéssel érintett területeket alacsony, a 0,5–5 méteres csökkenéssel érintett területeket közepes, az 5 métert meghaladó vízszintcsökkenéssel érintett teületeket pedig magas érzékenységi kategóriába soroltuk.

Mindkét térkép alapján a hegyvidéki területek (Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység) erősen klímaérzékenyek, míg ezeknek hegylábi területei közepes érzékenységűnek mondhatók. Az alapvető különbség a két szimuláció között, hogy míg a mért adatok alapján az Alpokalja területe érzékeny, addig az előrejelzések alapján e helyett a Mecsek sorolódik erősen érzékeny kategóriába.

## 9 ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓK

A talajvíz országos eloszlásának különböző klímaviszonyok mellett történő meghatározásához dinamikus, moduláris módszert dolgoztunk ki, amelyik az alábbi komponenseket tartalmazza:

1. Klímazónák meghatározása klíma paraméterek országos eloszlása alapján
2. Beszivárgási zónák lehatárolása
3. Beszivárgás meghatározása minden beszivárgási zónára egydimenziós hidrológiai modellek segítségével
4. Talajvíz eloszlás meghatározása numerikus vízföldtani modellek segítségével

Vizsgálataink során interpolált napi klímamutatókat használtunk, melyeket a CarpatClim-Hu közép-európai adatbázisból, illetve az ALADIN klímamodell kimenő adataiból nyertünk. A klímazónákat a Thorntwaite klímazóna-beosztás alapján állítottuk elő. A beszivárgási zónákat a geológia, területhasználat és lejtőszög alapján határoztuk le. A víztükör eloszlását a Modflow numerikus kóddal modelleztük. A talajvíztartók klímaérzékenységét a klímaváltozás hatására fellépő vízszintváltozások alapján állapítottuk meg.

A kidolgozott módszertan kvantitatív kapcsolatot teremt a klímamutatók, a beszivárgás és a talajvíztükör között, és sikeresen alkalmaztuk a klímaérzékenység jellemzésére.

A számított beszivárgások változása alapján elmondható, hogy a hegyvidéki területeken (Alpokalja, Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység) a beszivárgás mintegy 50 mm/éves csökkenése követhető nyomon a hatvanas évektől a kétezres évek végéig.

Az ALADIN modellkimenetek alapján modellezett beszivárgások változása ugyancsak mintegy 50 mm/éves csökkenést jósol a század hátralévő évtizedeire a hegyvidéki területeken, úgy mint a Mecsek, Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység területén.

A klímaváltozás hatását a különböző szimulációs időszakokhoz tartozó talajvízszintek különbsége szemlélteti. A szimulációk az elmúlt évtizedekben a talajvíz szintek jelentős csökkenését jelzik a hegyvidéki területeken (Északi-középhegység, Dunántúli-középhegység, Alpokalja). A csökkenés a hegyperemi régiókban kevésbé markáns.

A klímamodell-kimenetek alapján számított különbségtérképek hasonló mértékű vízszintcsökkenéseket jeleznek az elkövetkező évtizedekre, habár ezek eloszlása némileg eltérő: A legjelentősebb csökkenések az Északi-középhegység, Dunántúli-középhegység és Mecsek területén várhatók.

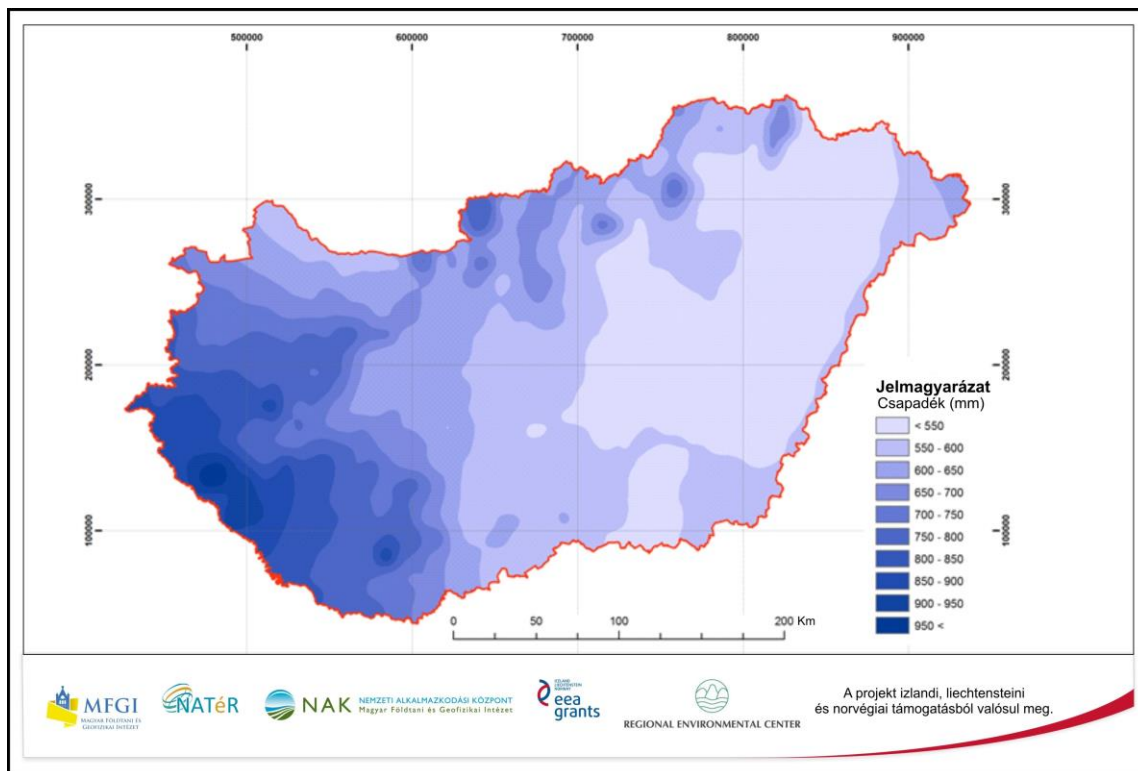
Az ország talajvíztartóit érzékenységi osztályokba soroltuk be annak alapján, hogy a modellezett talajvízszintek milyen mértékben reagálnak a klímaváltozásra. Az érzékenységi térképet előállítottuk mind a mért adatokon alapuló szimulációk eredményei, mind pedig a klímamodell-kimenetek szerint előállított szimulációk eredményei alapján.

Az érzékenységi térképek tanúsága szerint a hegyvidéki területek (Északi-középhegység és Dunántúli-középhegység) erősen klímaérzékenyek, míg ezeknek hegylábi területei közepes érzékenységűnek mondhatók. Az Alpokalja és a Mecsek klímaérzékenységét a kétféle szimuláció eltérően jelzi, ezért ezek besorolása bizonytalan.

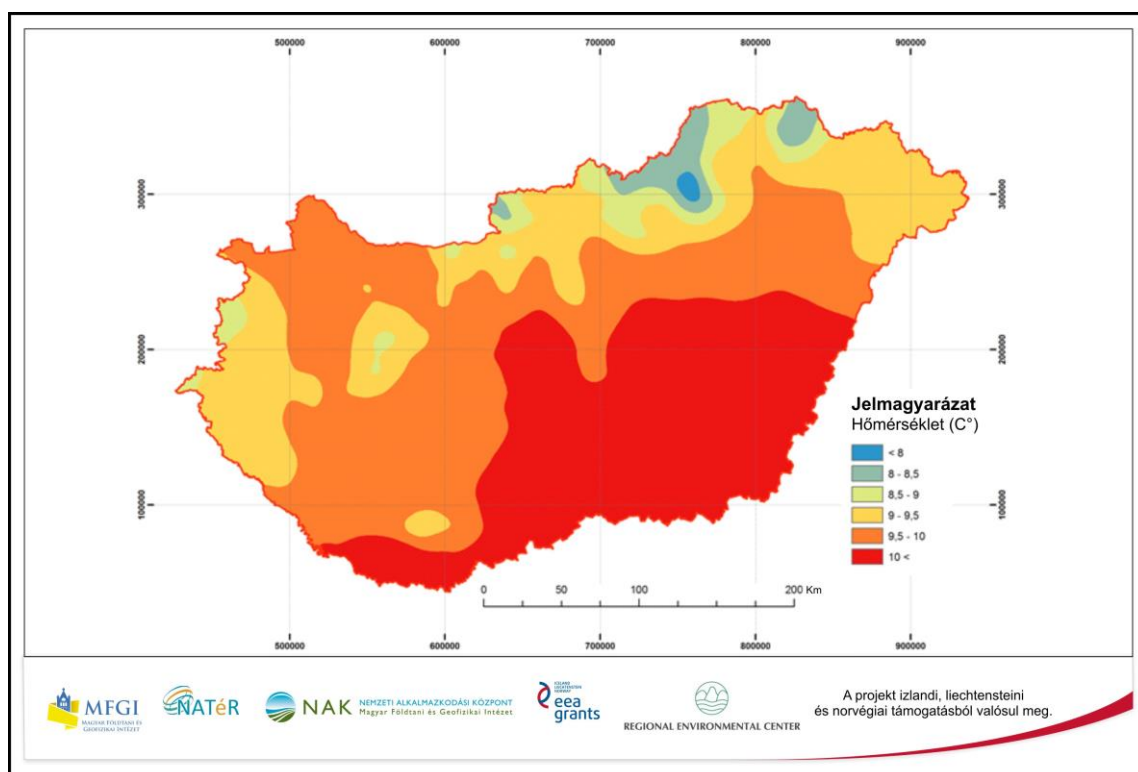
## 10 IRODALOM

- ÁCS, F., BREUER, H. 2013: Biofizikai éghajlat-osztályozási módszerek. — Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 131 p.
- European Environment Agency 2006: Corine Land Cover raster data.  
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster>
- GOGOLEV, M. I. 2002: Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. — *Environmental Geology* 42, 248–258.
- HOLDRIDGE, L. R. 1947: Determination of world plant formations from simple climatic data. — *Science* 105 (2727): 367–8. doi:10.1126/science.105.2727.367.
- ILLY, T., SÁBITZ, J., SZABÓ, P., SZÉPSZÓ G., ZSEBEHÁZI, G. 2015: A klímamodellekből levezethető indikátorok alkalmazási lehetőségei. — Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 2015. június.
- JYRKAMA, M. I., SYKES, J. F. 2007: The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). — *Journal of Hydrology* 338, 237–250.
- KOVÁCS, A., MARTON, A., SZŐCS, T., TÓTH, GY. 2015. Natural state water table modelling in the NAGIS project. — NAGIS project report.
- NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J. R. 2002: Soil & Water Assessment Tool. — Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Temple, Texas.
- SCHROEDER, P. R., AZIZ, N. M., 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.
- THORNTHWAITE, C.W. 1948: An approach toward a rational classification of climate. — *Geogr. Review*, XXXVIII, 55–93.
- Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005: Visual Modflow v.4.1 User's Manual 02/05.
- Watermark Numerical Computing Inc. 2004: PEST: Model Independent Parameter Estimation. User Manual: 5th Edition.

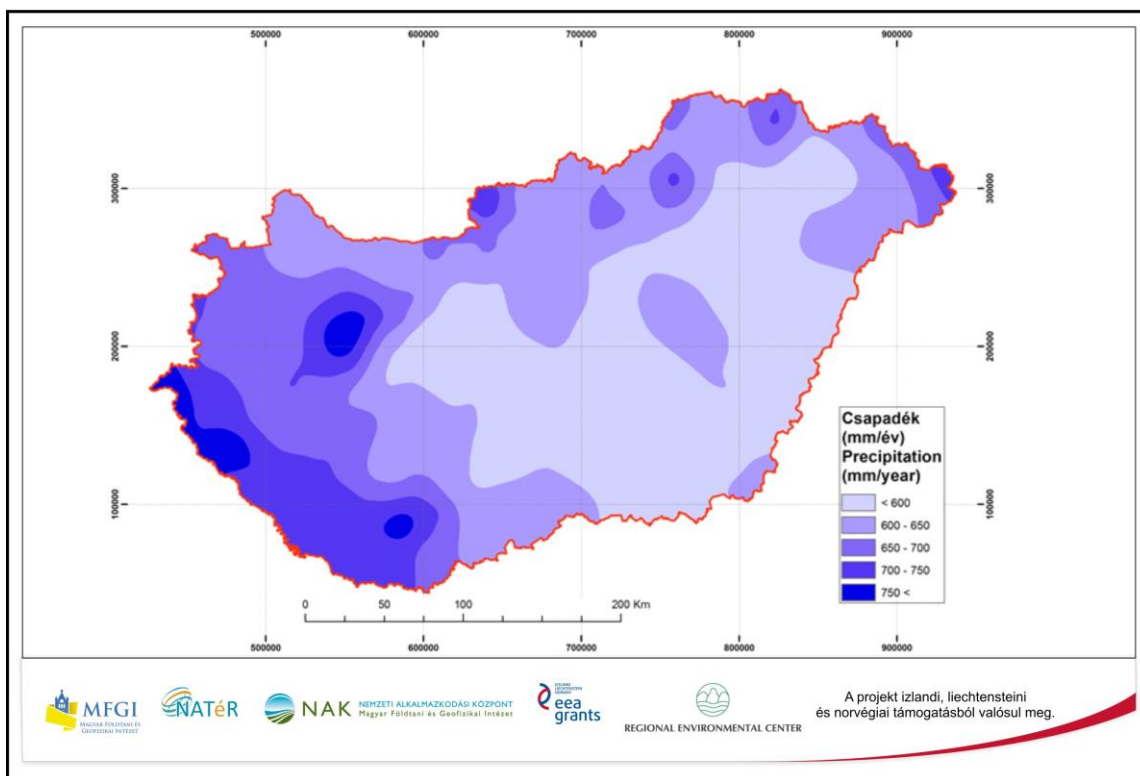
## FÜGGELÉK



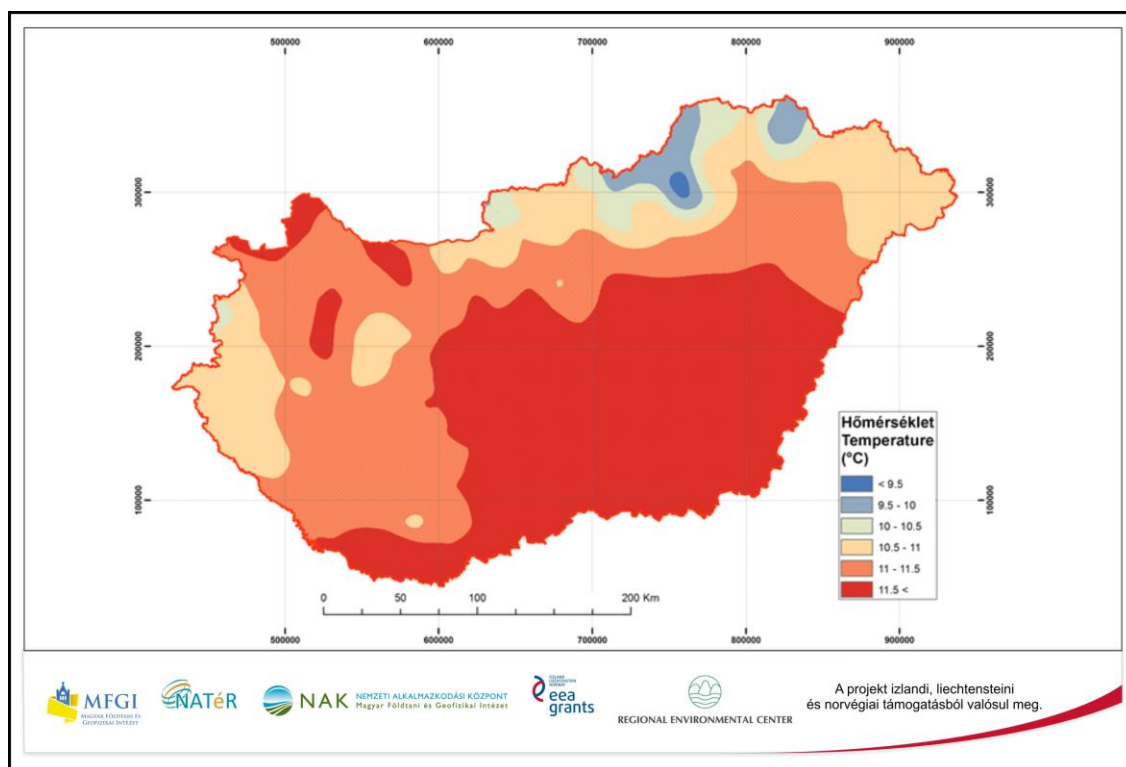
1. ábra. Éves csapadék átlagos eloszlása az 1961–1965 időszakra. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával



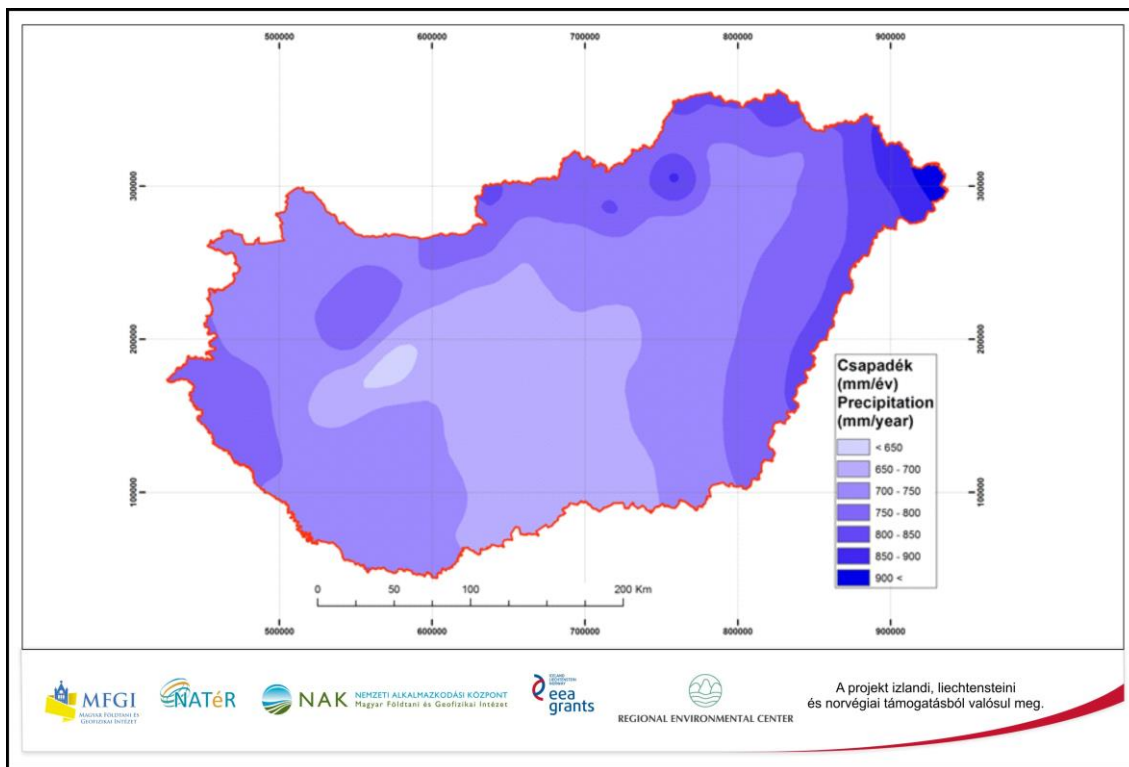
2. ábra. Napi középhőmérséklet átlagos eloszlása az 1961–1965 időszakra. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával



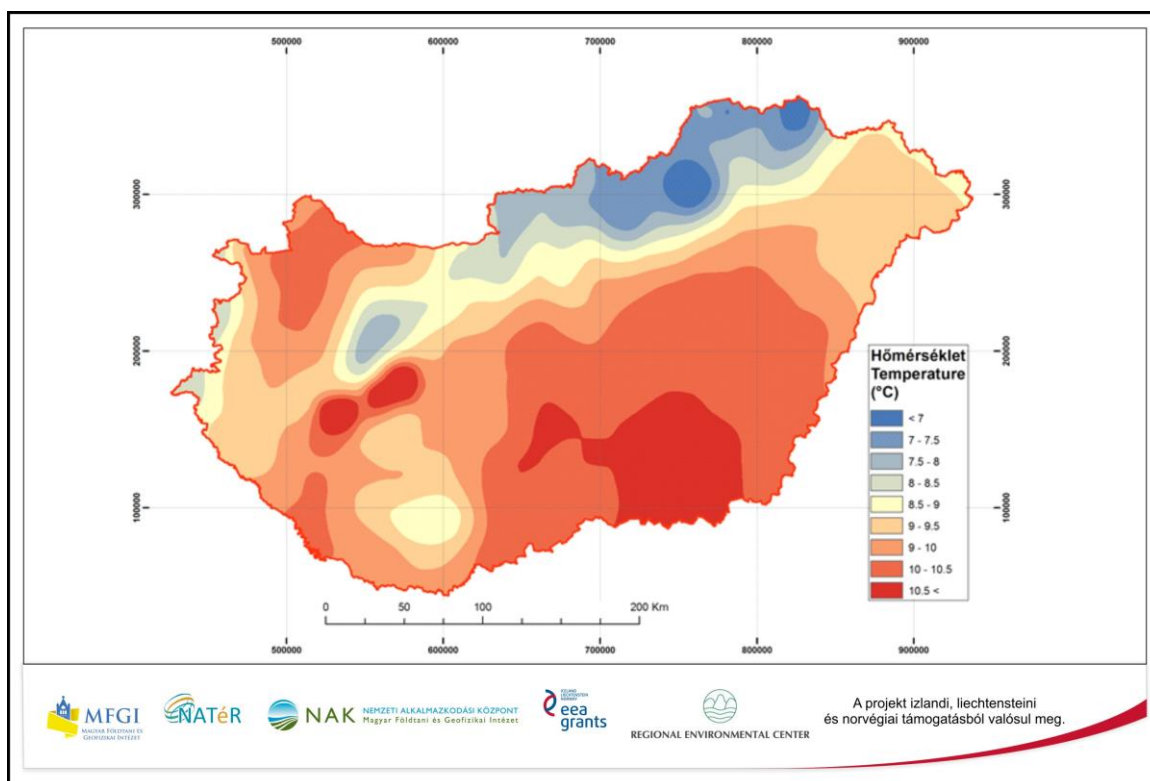
3. ábra. Éves csapadék átlagos eloszlása a 2005–2009 időszakra. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával



4. ábra. Napi középhőmérséklet átlagos eloszlása a 2005–2009 időszakra. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával

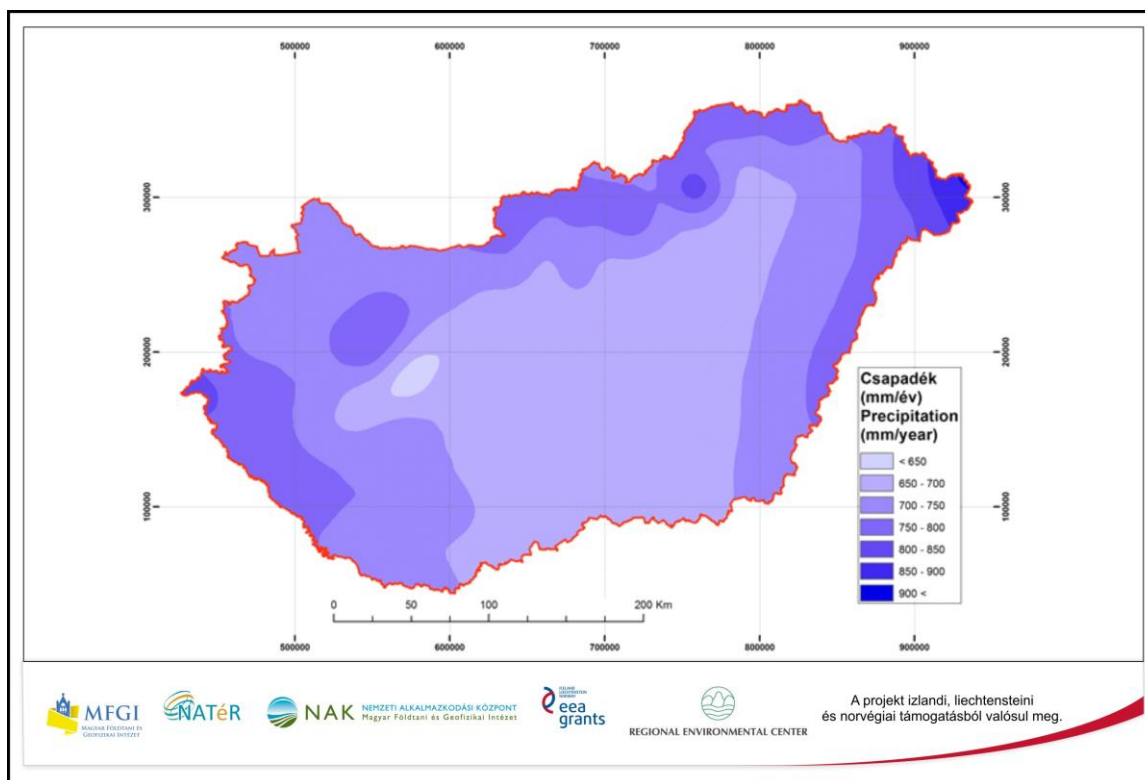


5. ábra. Éves csapadék átlagos eloszlása az 1961–1990 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával

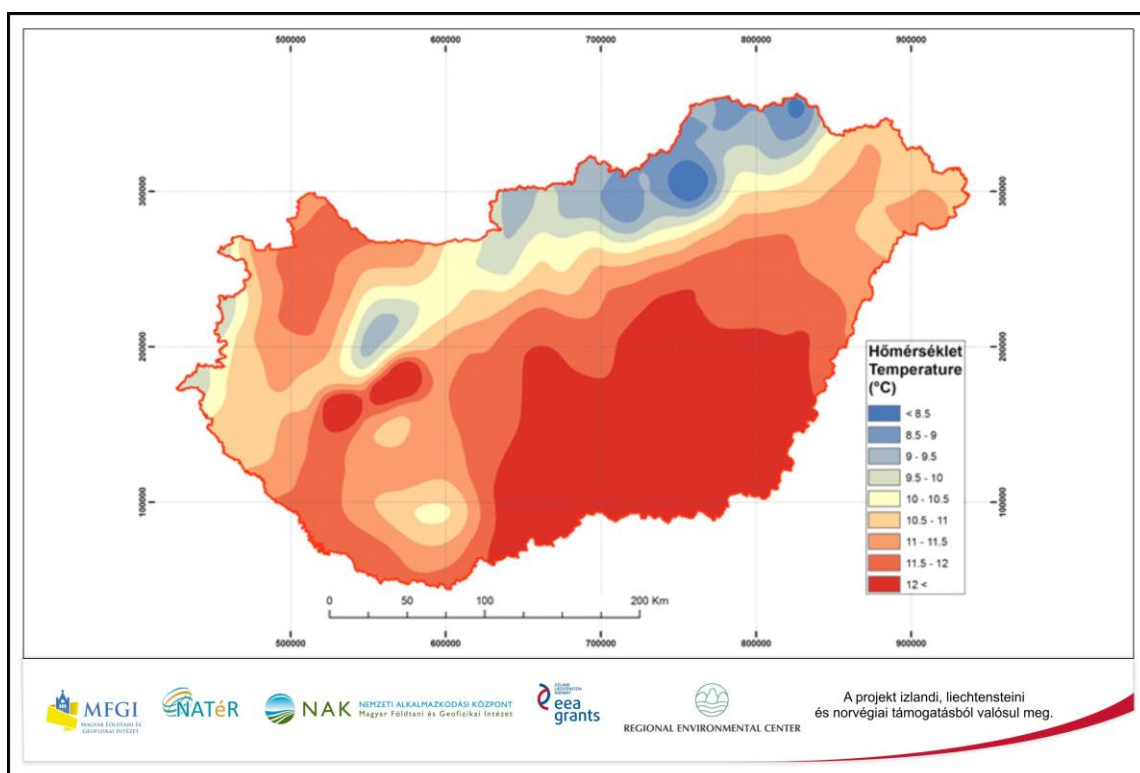


6. ábra. Napi középhőmérséklet átlagos eloszlása az 1961–1990 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával

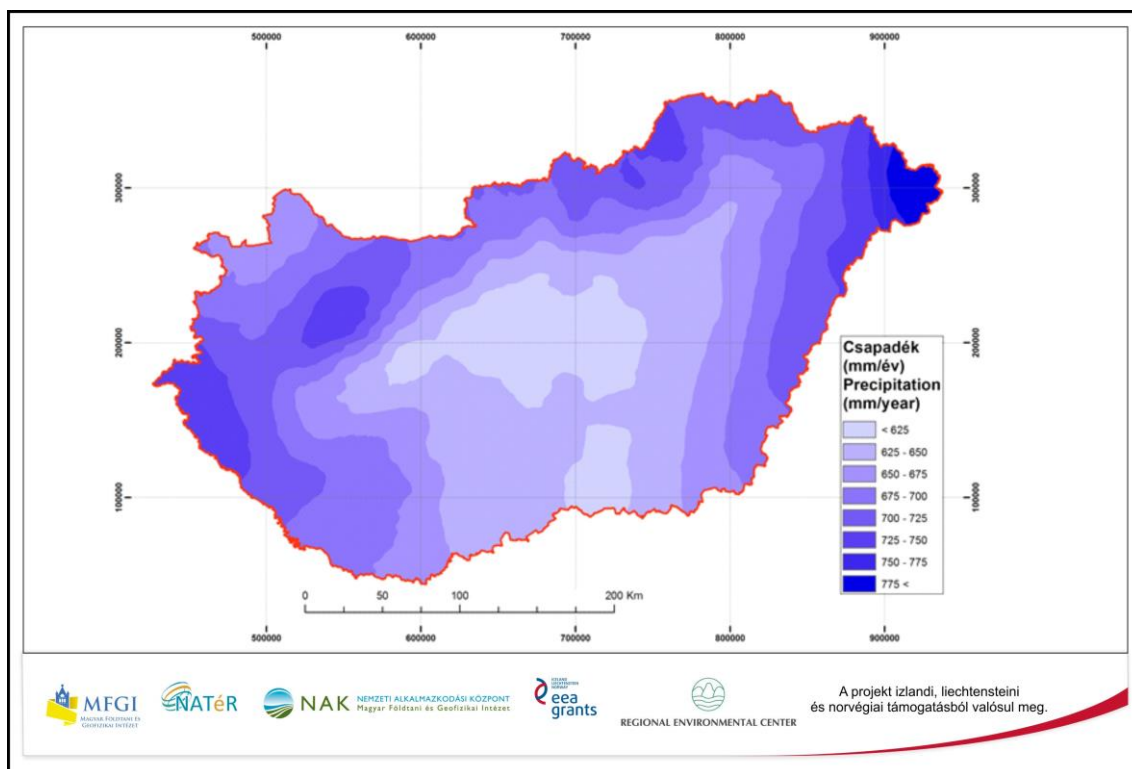




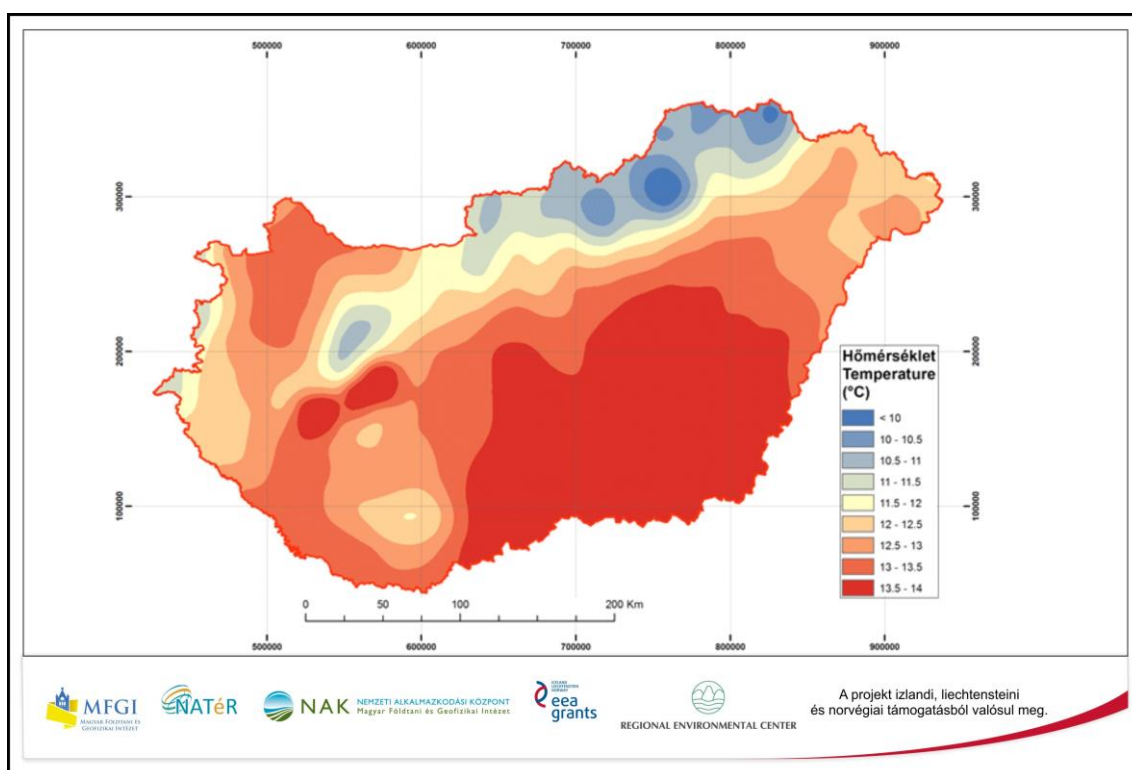
7. ábra. Éves csapadék átlagos eloszlása a 2021–2050 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával



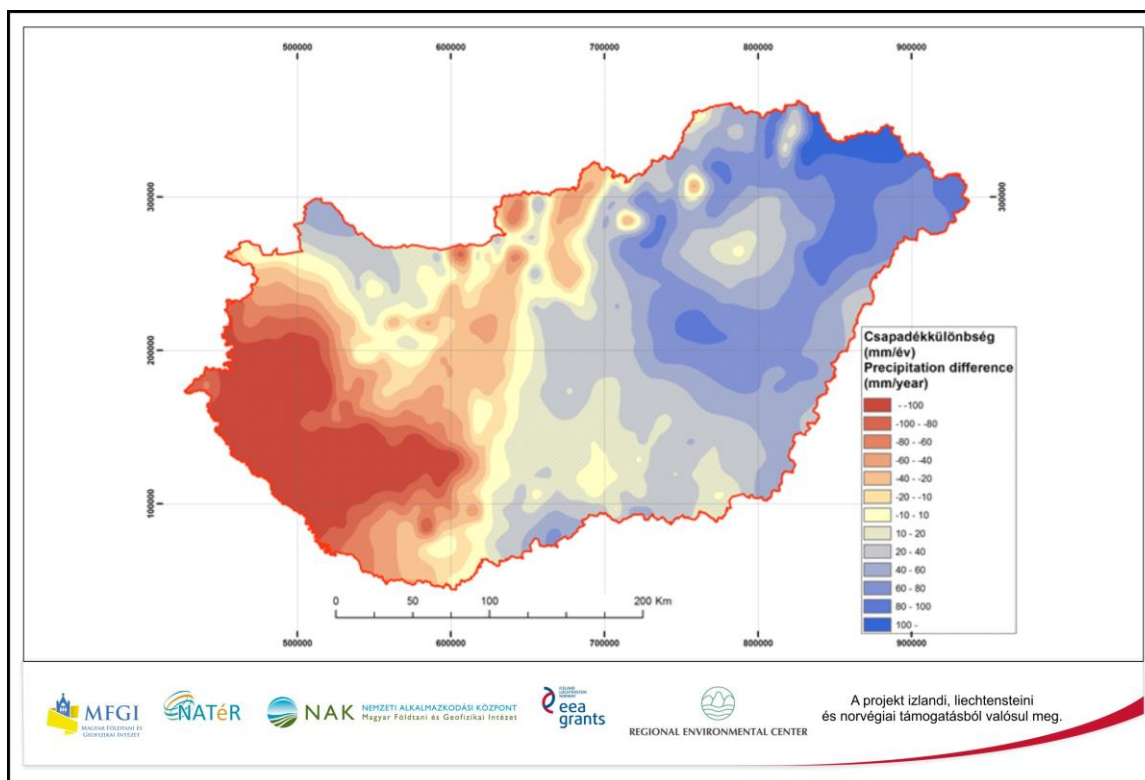
8. ábra. Napi középhőmérséklet átlagos eloszlása az 2021–2050 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával



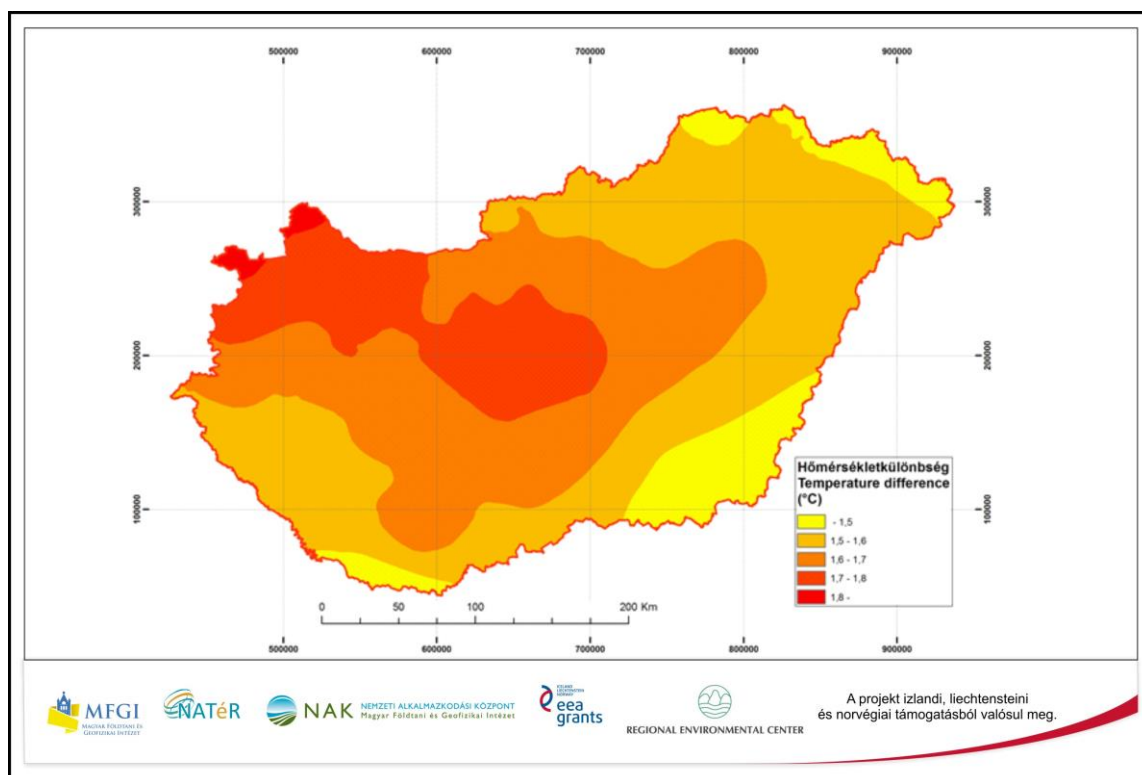
9. ábra. Éves csapadék átlagos eloszlása a 2071–2100 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával



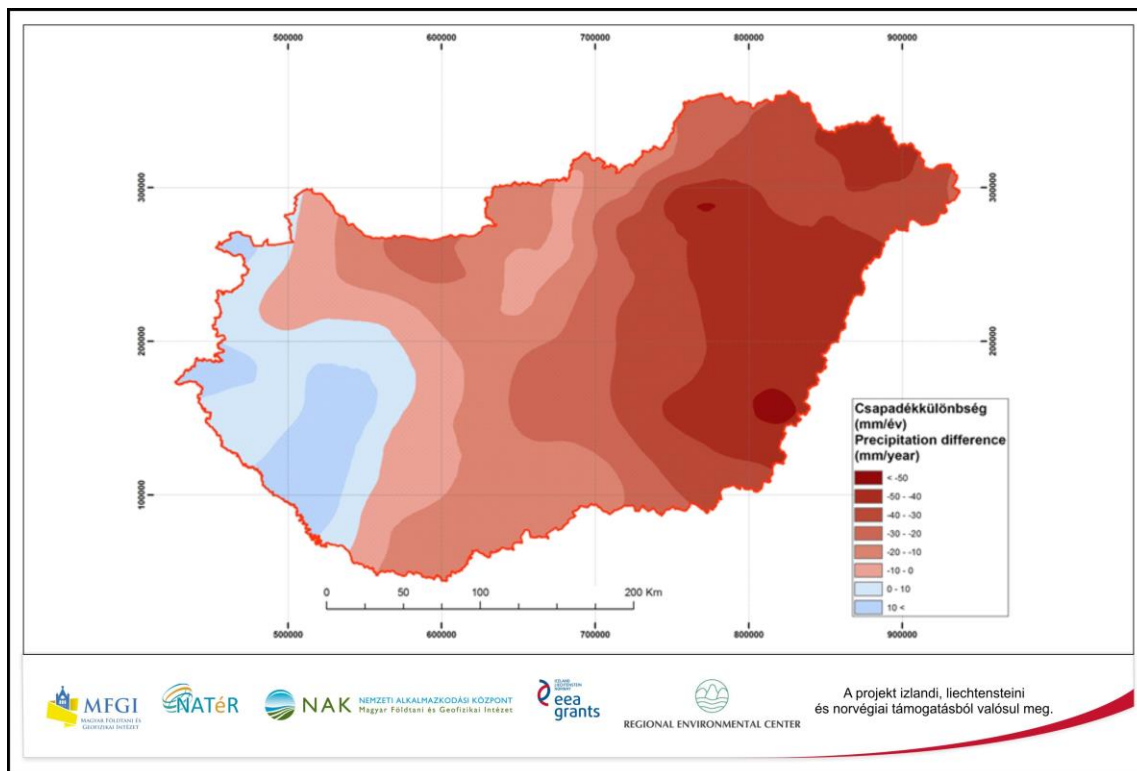
10. ábra. Napi középhőmérséklet átlagos eloszlása az 1971–2100 időszakra. Készült az ALADIN modell kimeneti adatainak felhasználásával



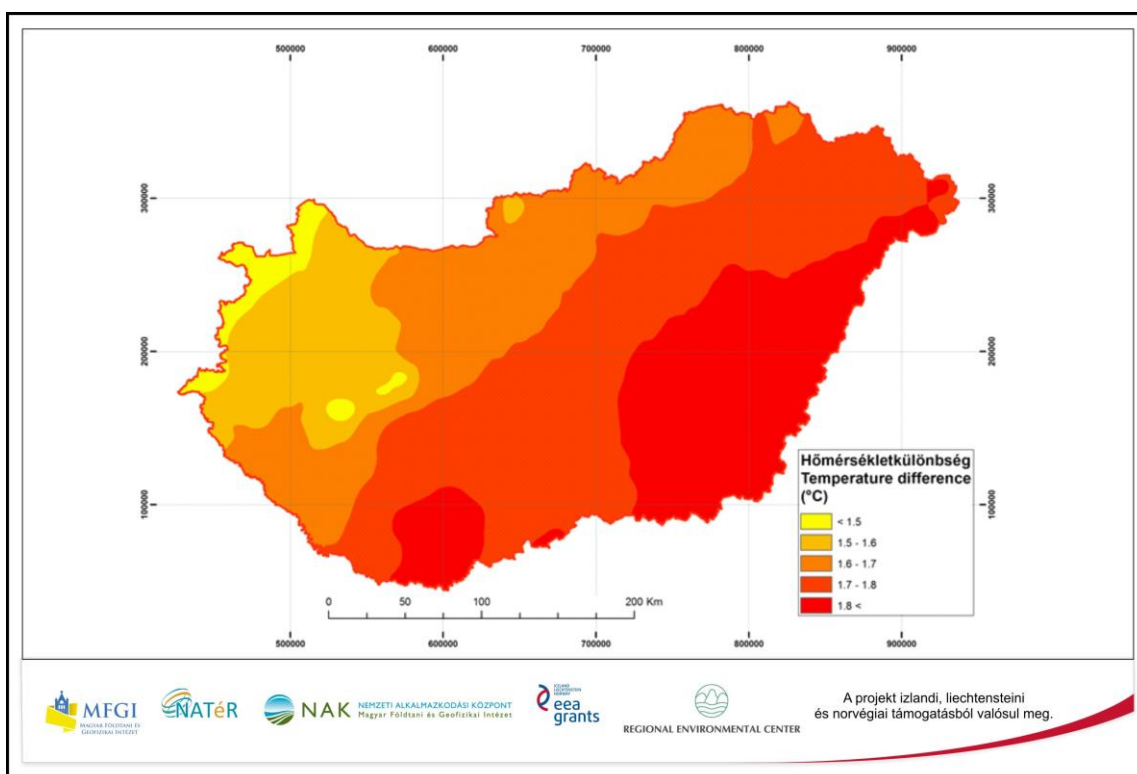
11. ábra. A 2005–2009 és 1961–1965 szimulációs időszakok csapadék eloszlásának különbségtérképe. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával



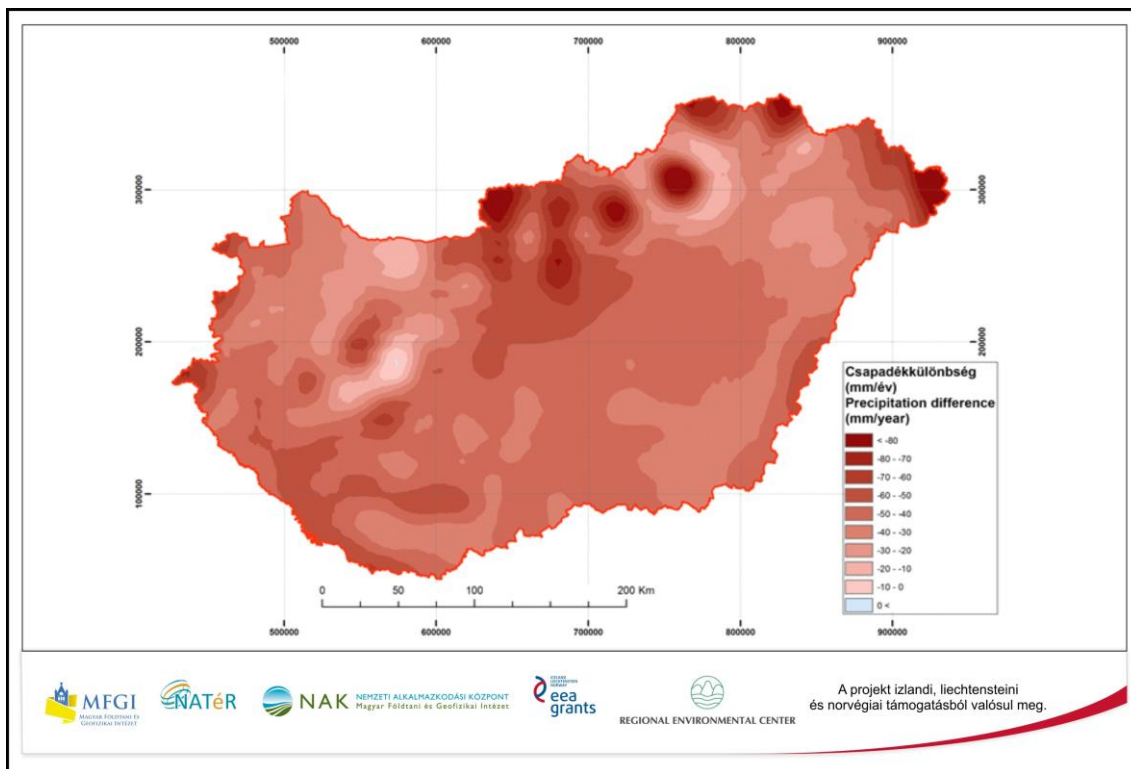
12. ábra. A 2005–2009 és 1961–1965 szimulációs időszakok hőmérséklet eloszlásának különbségtérképe. Készült a CarpatClim-Hu adatbázis adatainak felhasználásával



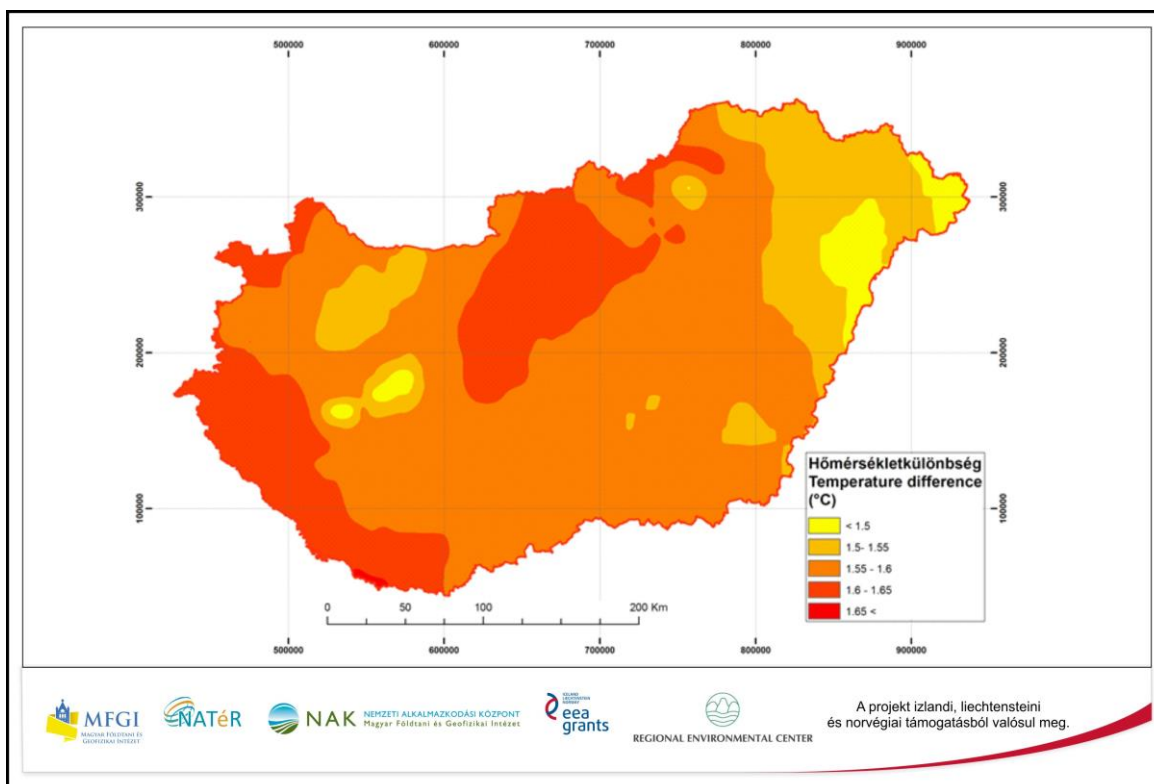
13. ábra. A 2021–2050 és 1961–1990 szimulációs időszakok csapadék eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



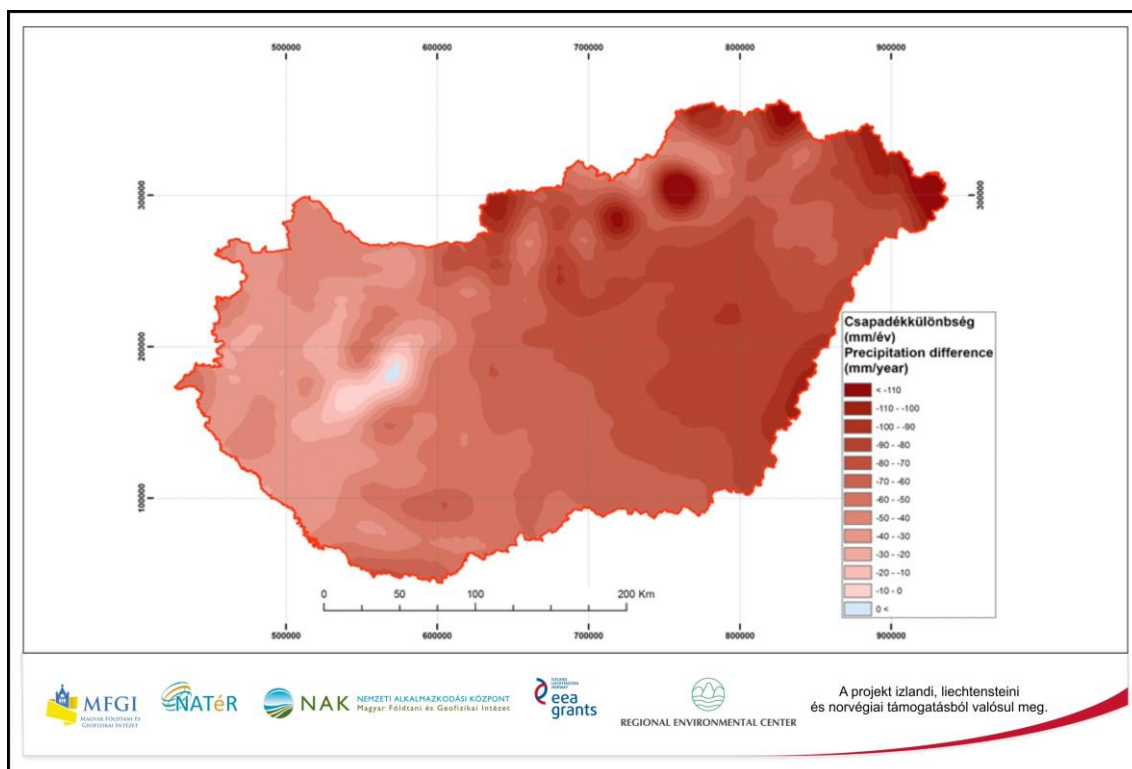
14. ábra. A 2021–2050 és 1961–1990 szimulációs időszakok hőmérséklet eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



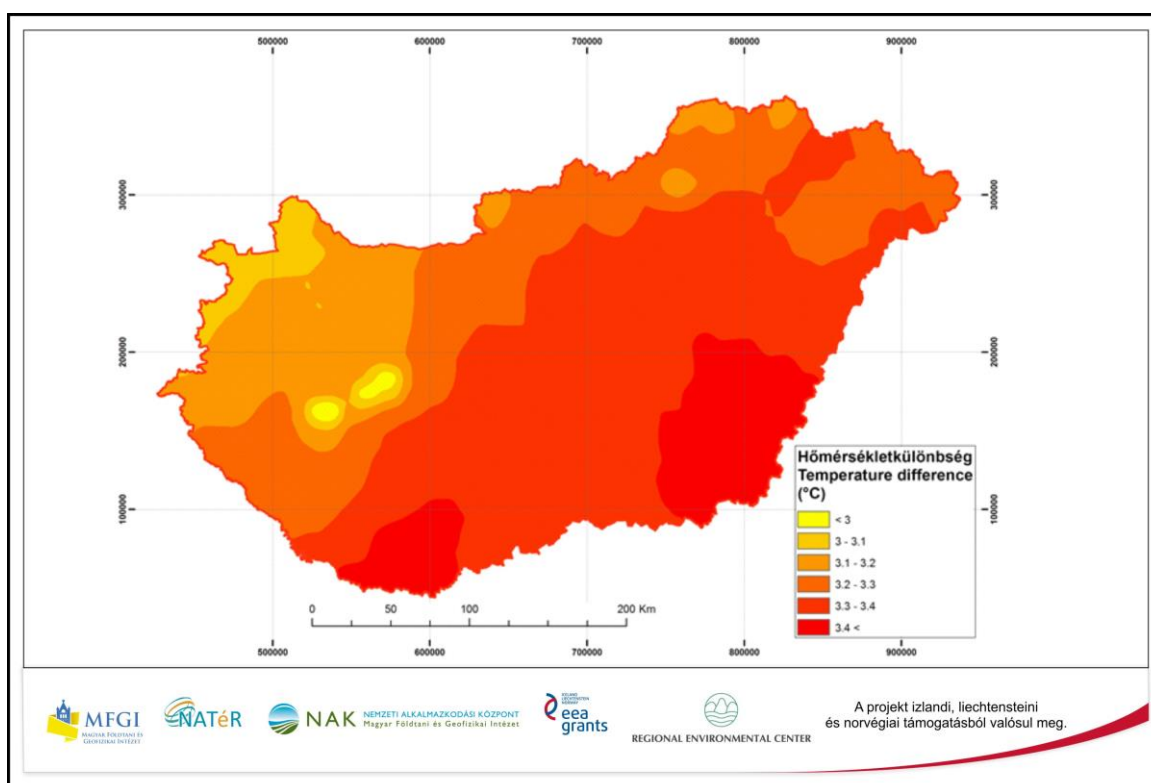
15. ábra. A 2071–2100 és 2021–2050 szimulációs időszakok csapadék eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



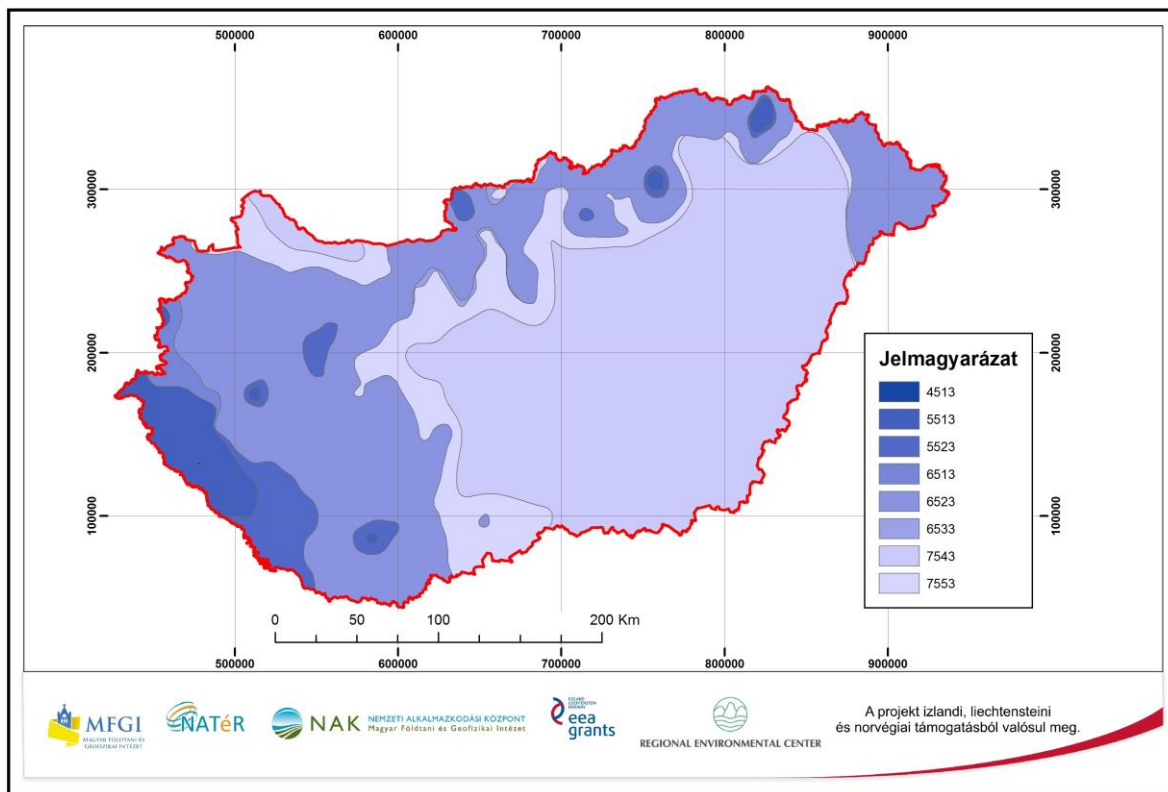
16. ábra. A 2071–2100 és 2021–2050 szimulációs időszakok hőmérséklet eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



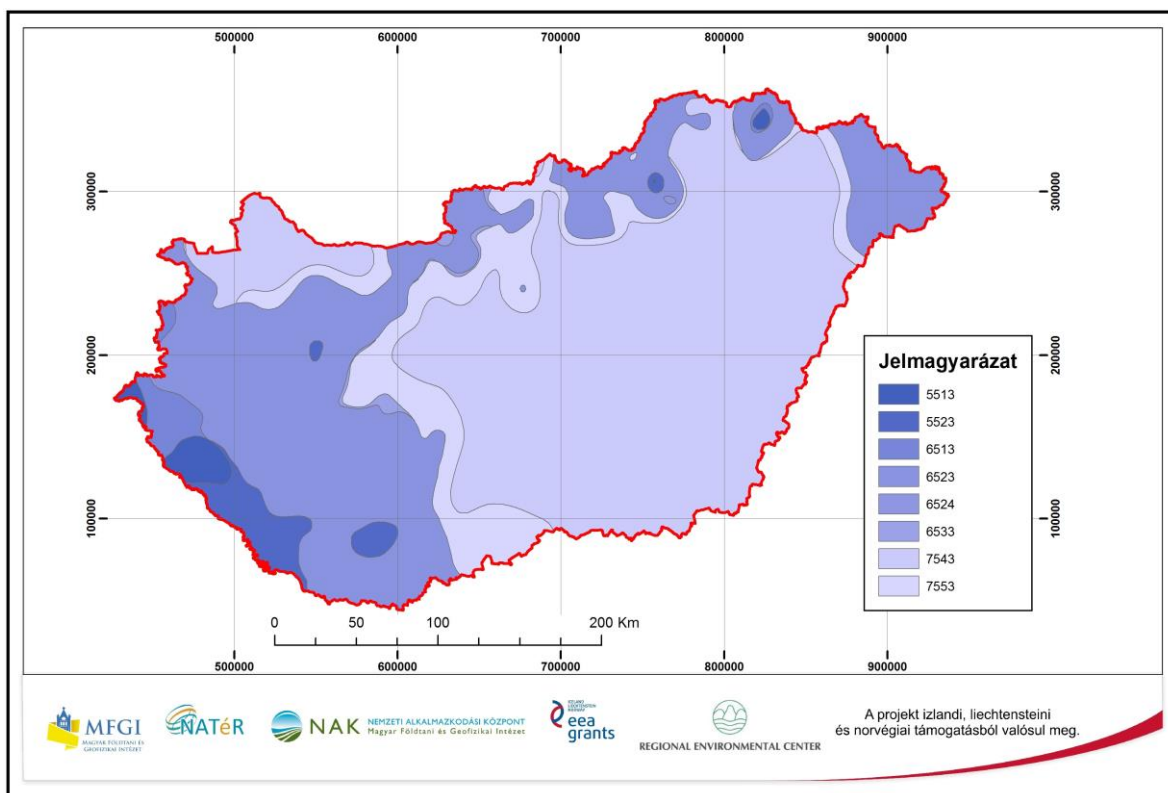
17. ábra. A 2071–2100 és 1961–1990 szimulációs időszakok csapadék eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



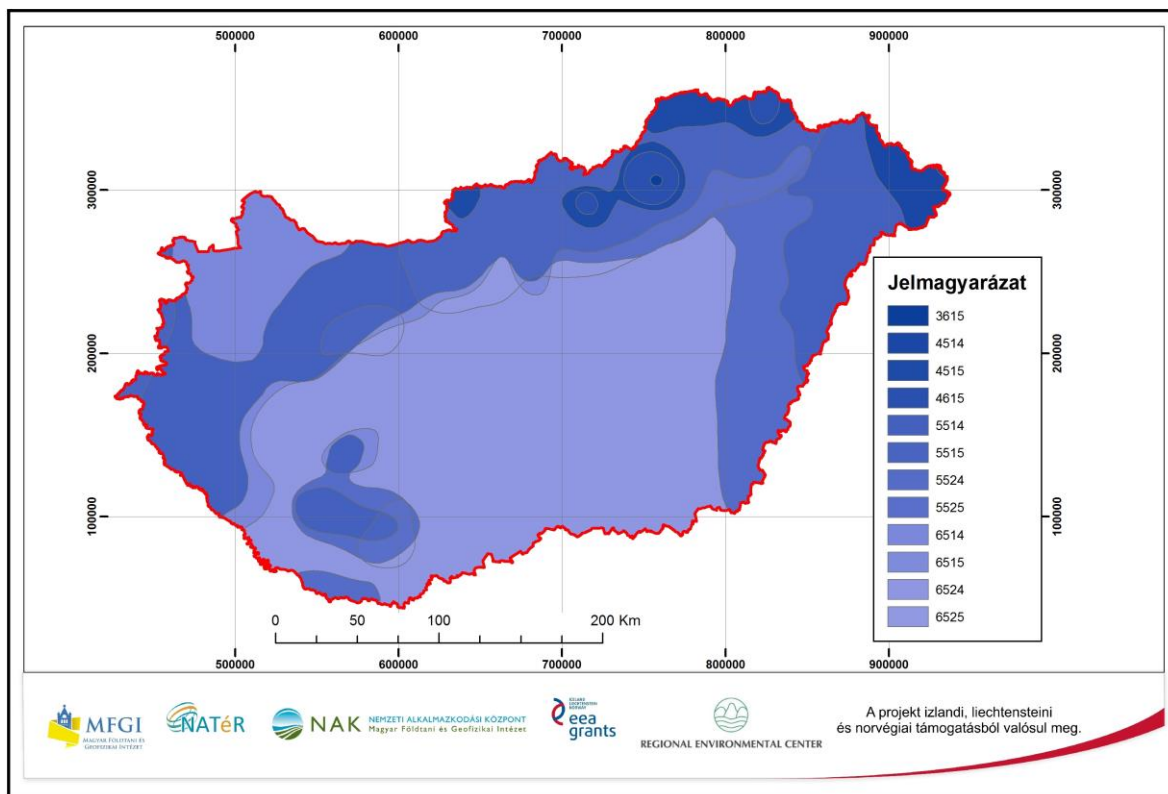
18. ábra. A 2071–2100 és 1961–1990 szimulációs időszakok hőmérséklet eloszlásának különbségtérképe.  
Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatainak felhasználásával



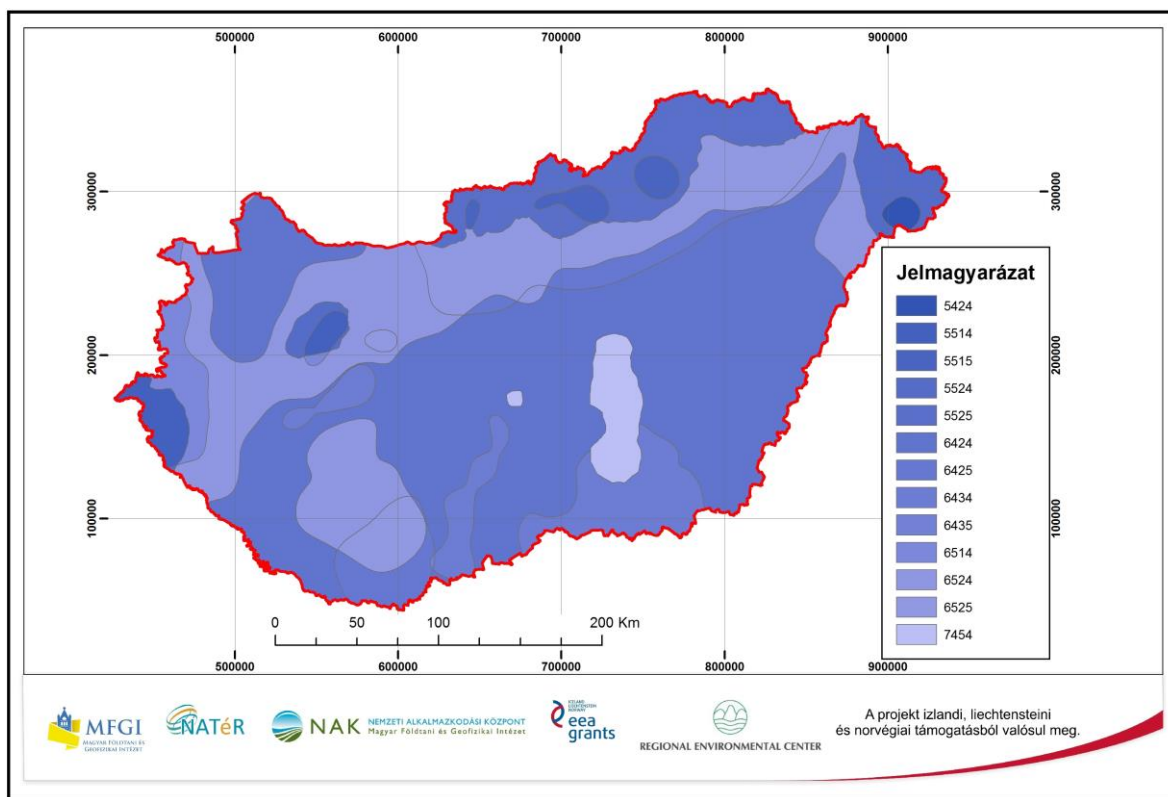
19. ábra. Thorntwaite-féle klímaosztályozás az 1961-1990-es időszakra a CarpatClim-Hu adatok felhasználásával



20. ábra. Thorntwaite-féle klímaosztályozás az 1981-2010-es időszakra a CarpatClim-Hu adatok felhasználásával

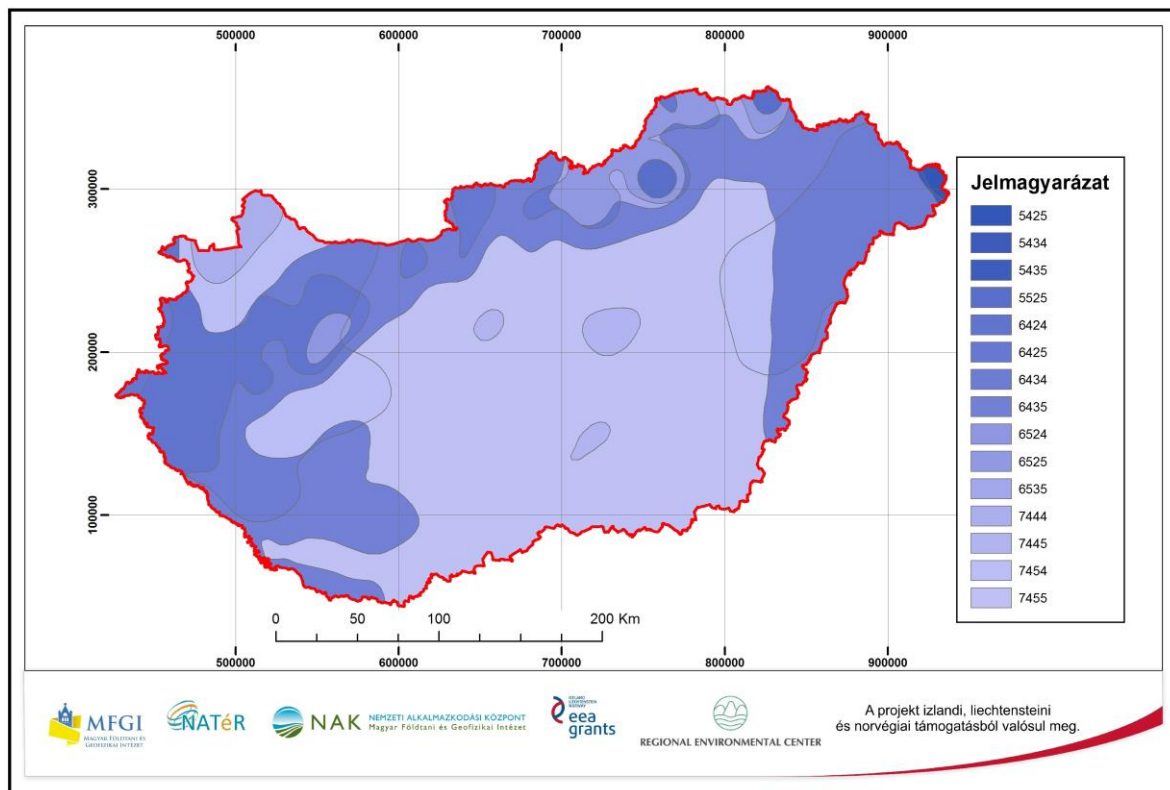


21. ábra. Thorntwaite-féle klímaosztályozás az 1961–1990-es időszakra az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján

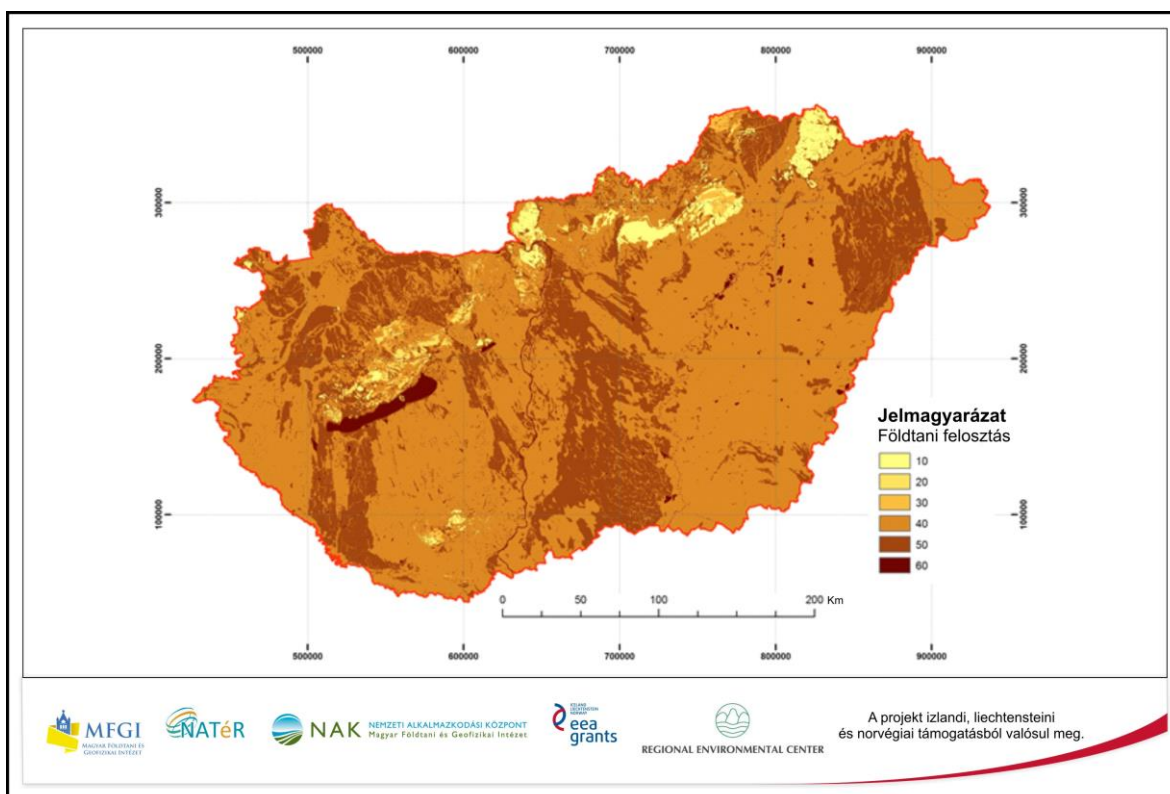


22. ábra. Thorntwaite-féle klímaosztályozás az 2021–2050-es időszakra az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján

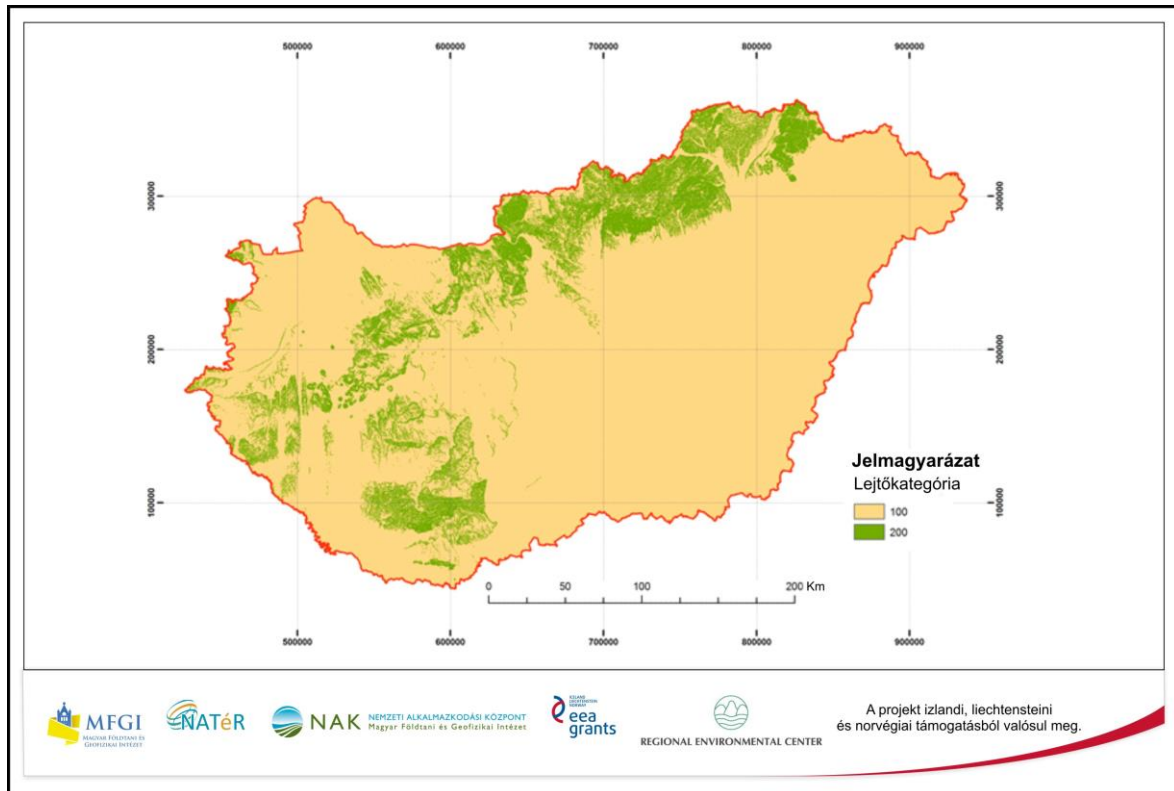




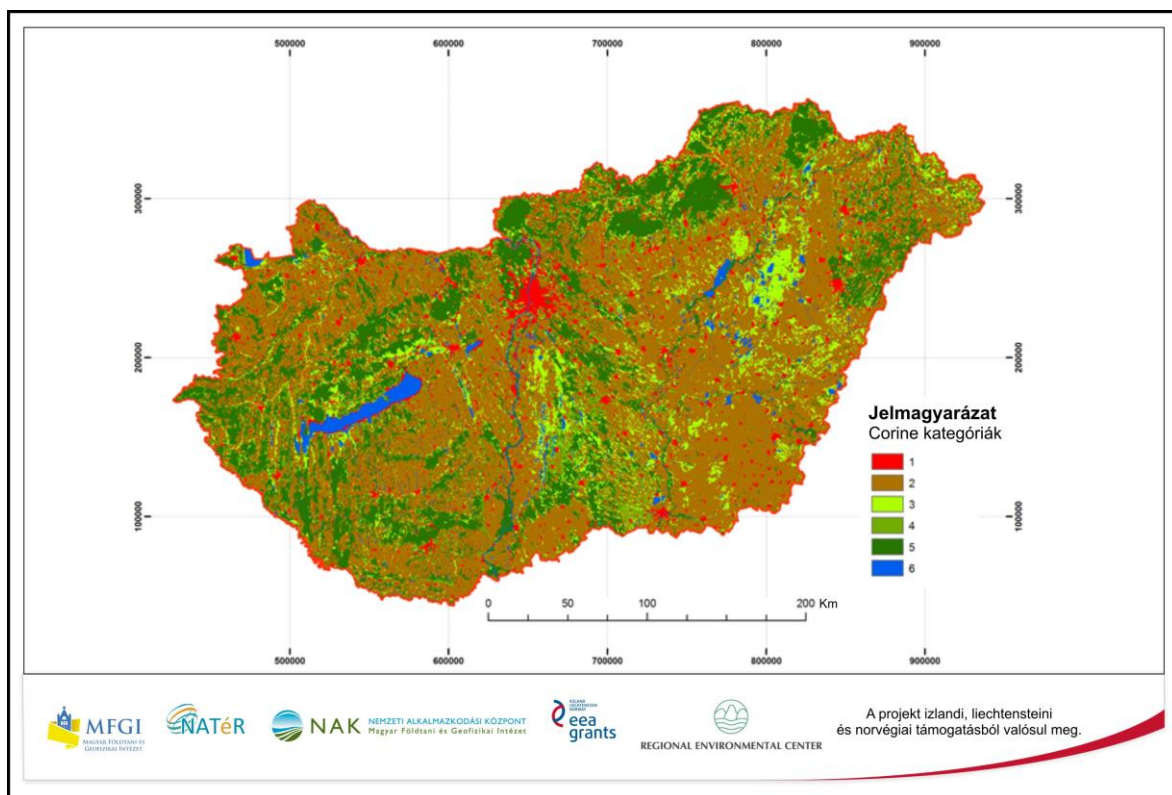
23. ábra. Thorntwaite-féle klímaosztályozás az 2071–2100 -es időszakra az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



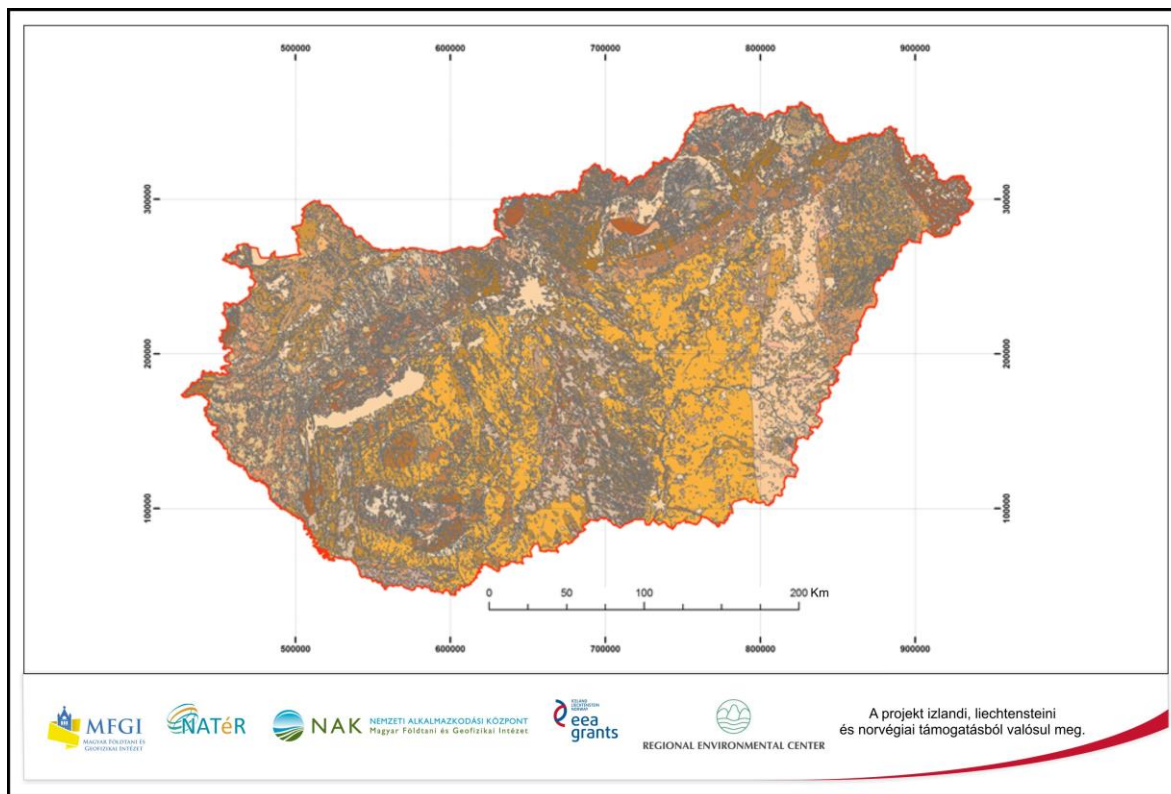
24. ábra. A beszivárgási zónák meghatározásához használt földtani felosztás



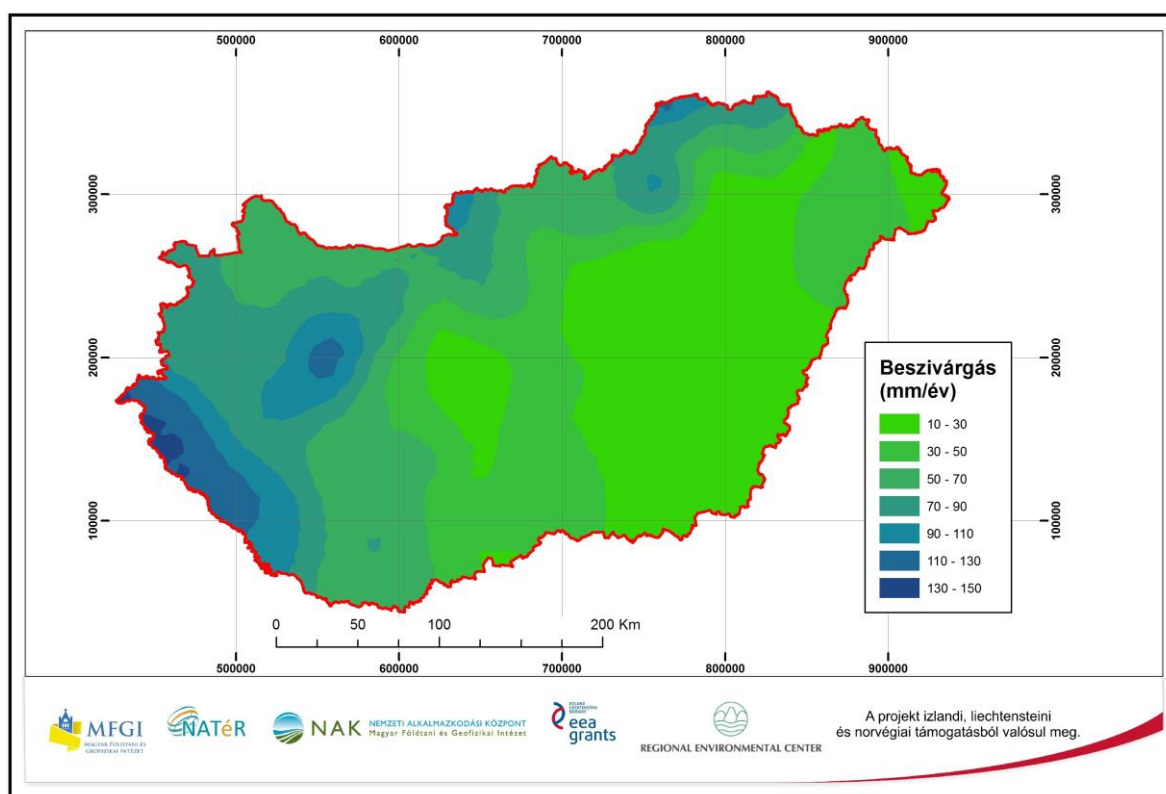
25. ábra. A beszivárgási zónák meghatározásához használt lejtőbeosztás



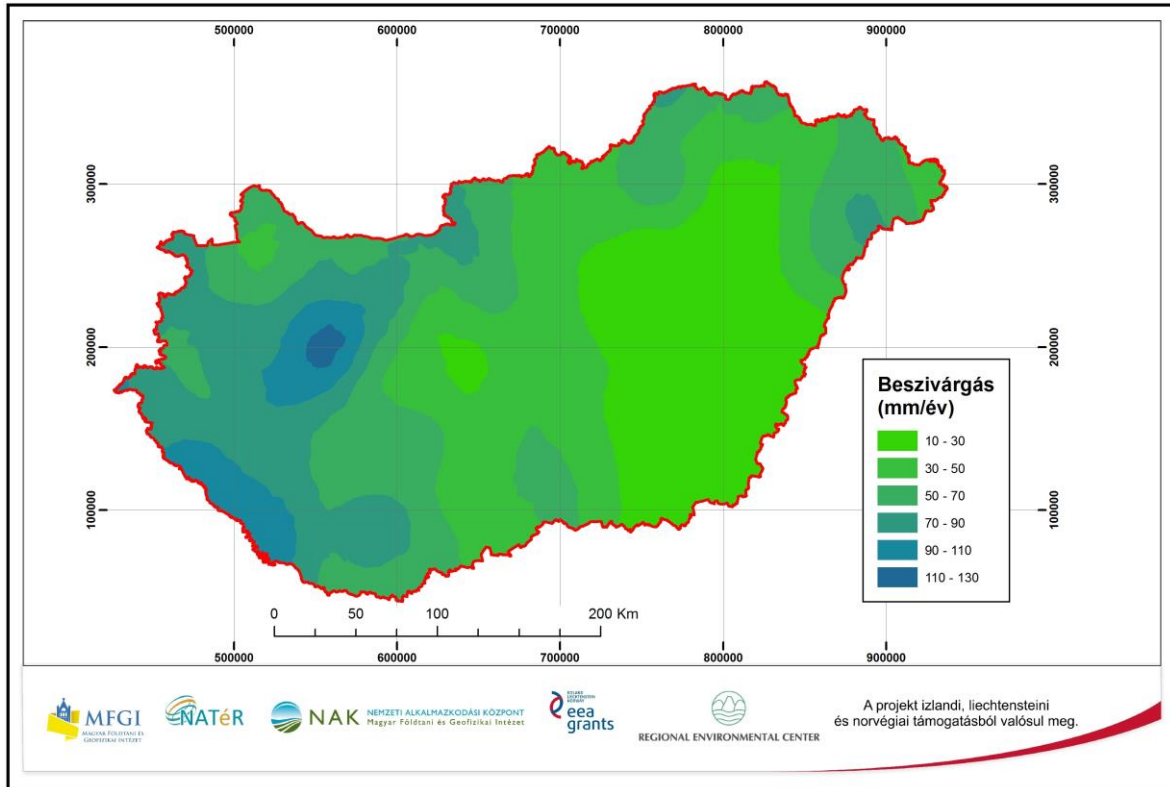
26. ábra. A beszivárgási zónák meghatározásához használt területhasználati beosztás



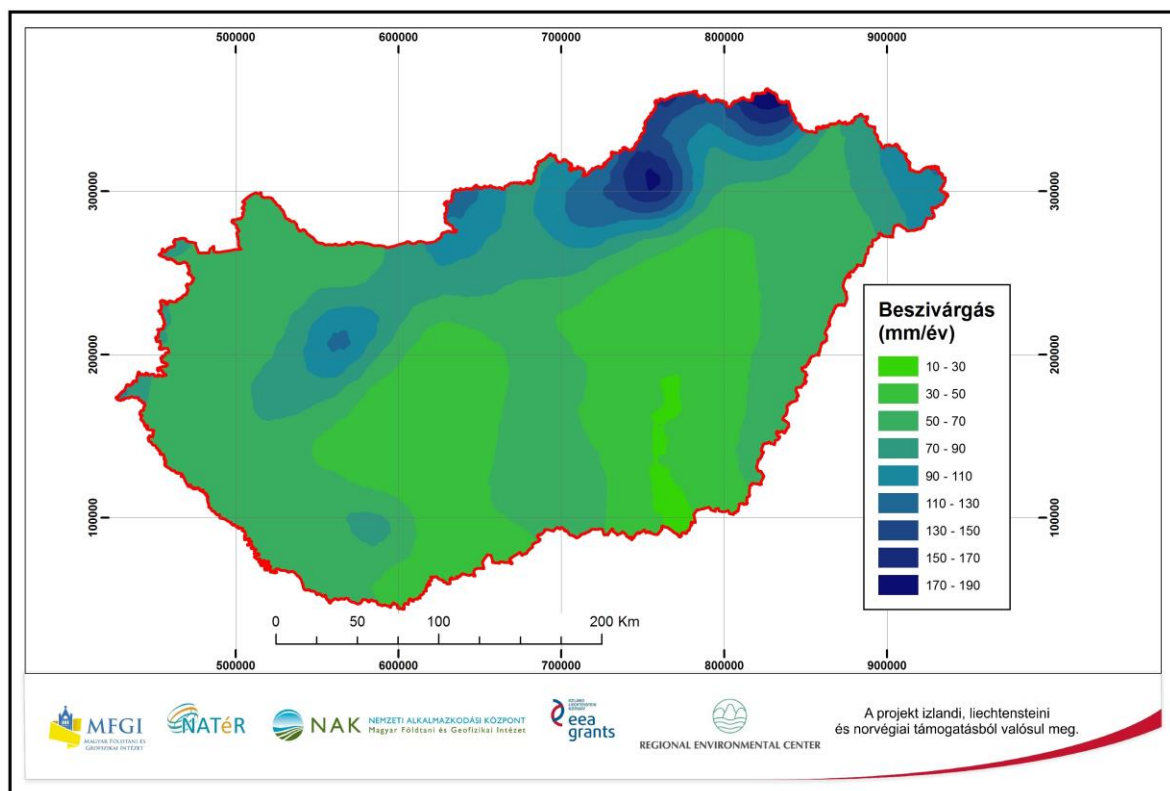
27. ábra. A NATÉR projektben alkalmazott beszivárgási zónák



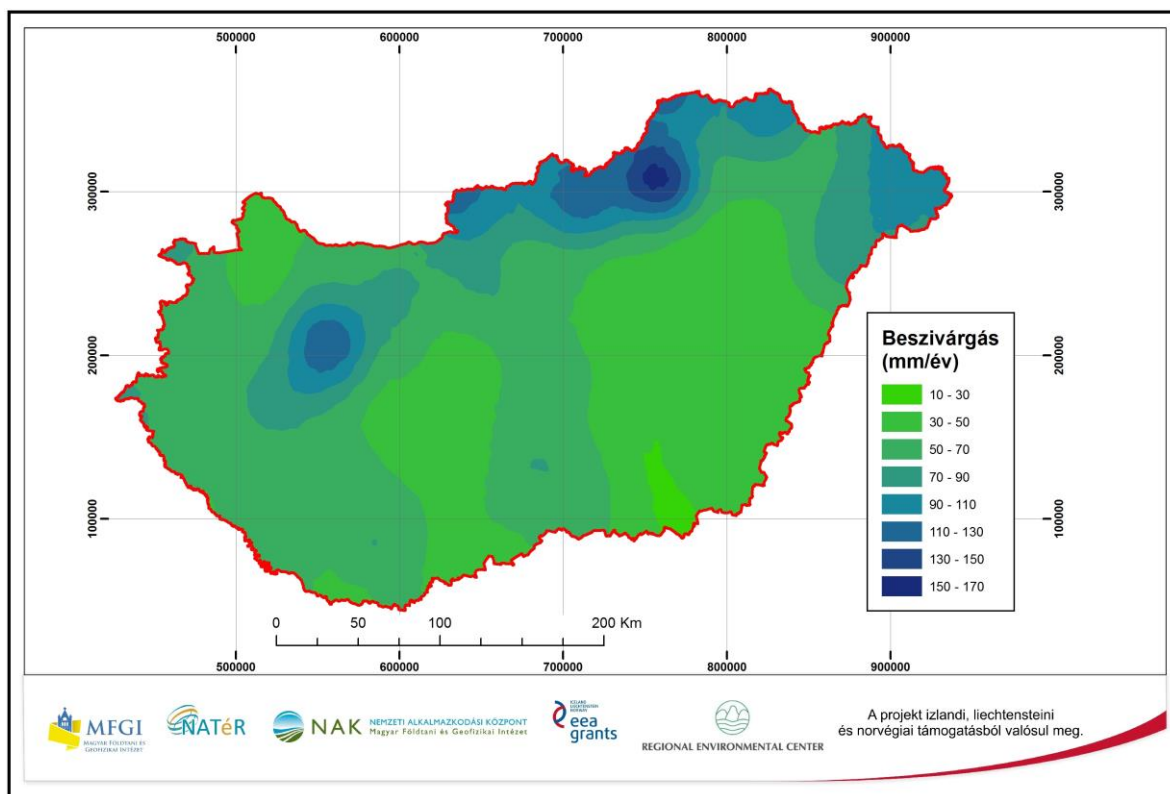
28. ábra. Az 1961–1965 időszakra számított átlagos beszivárgás eloszlás a CarpatClim-Hu adatok alapján



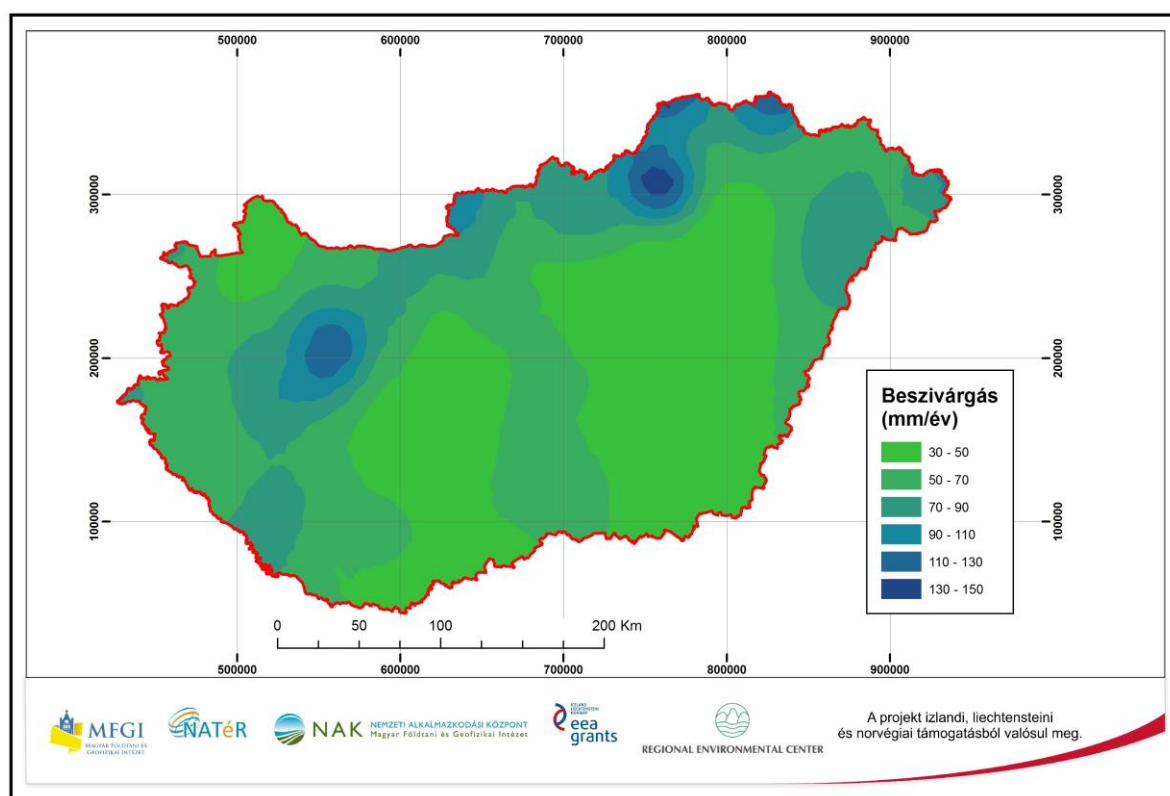
29. ábra. A 2005–2009 időszakra számított átlagos beszivárgás eloszlás a CarpatClim-Hu adatok alapján



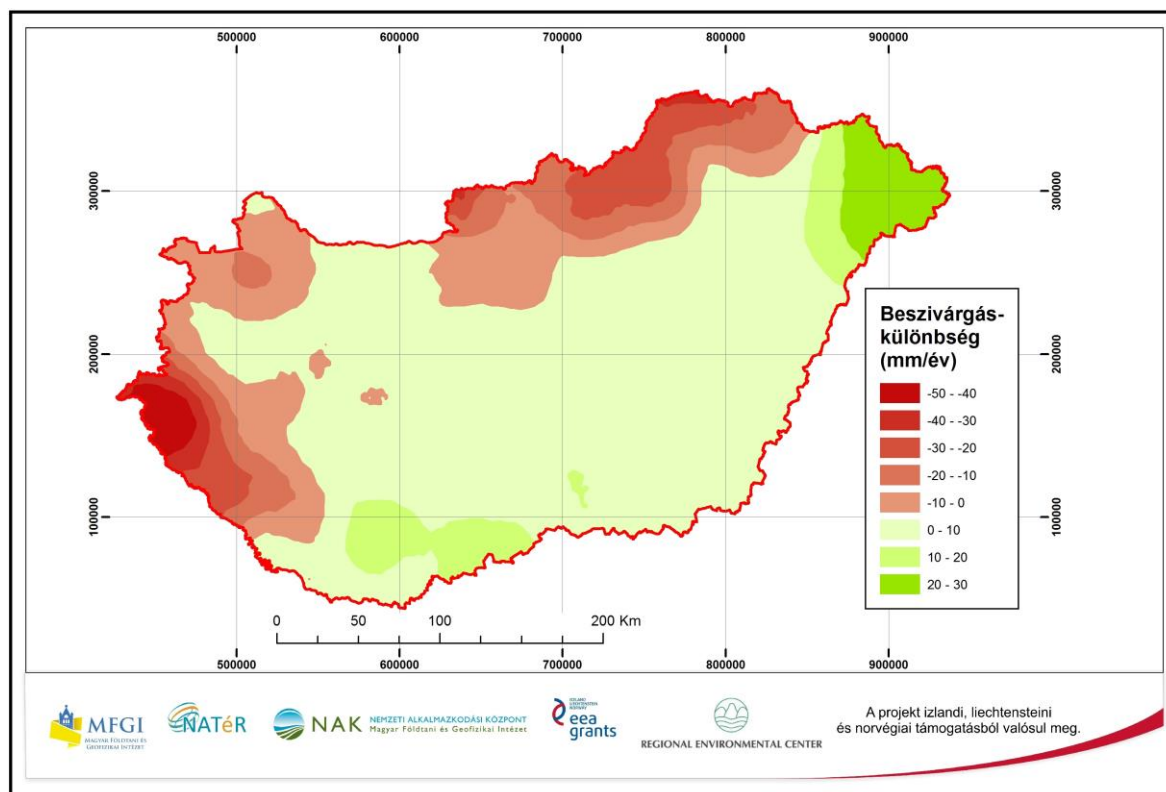
30. ábra. Az 1961–1990 időszakra számított átlagos beszivárgás eloszlás az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



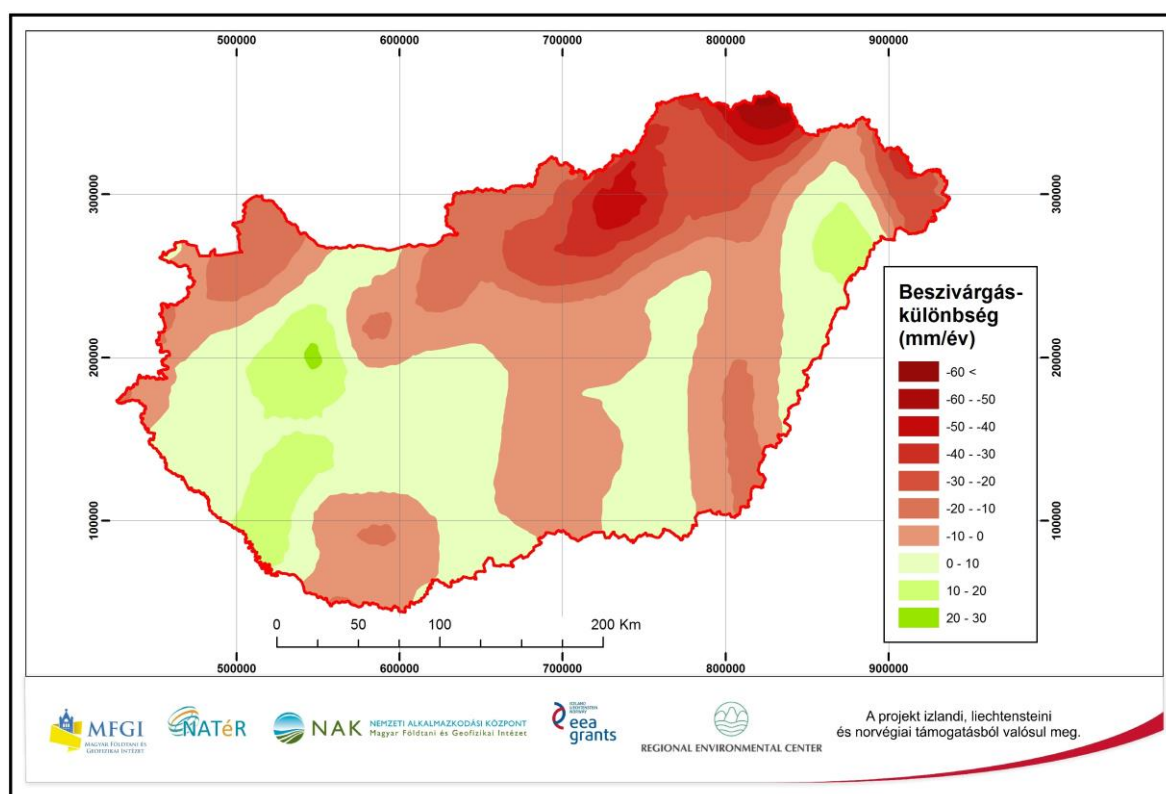
31. ábra. A 2021–2050 időszakra számított átlagos beszivárgás eloszlás az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



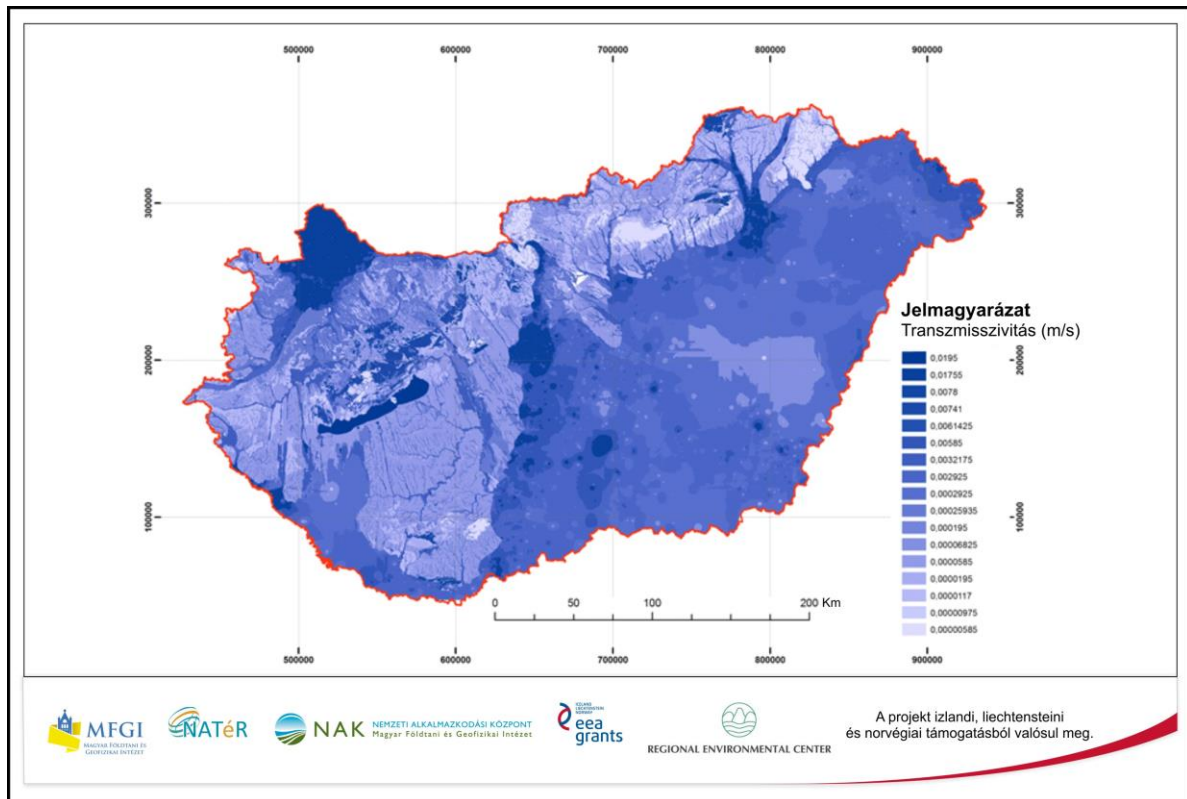
32. ábra. A 2071–2100 időszakra számított átlagos beszivárgás eloszlás az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



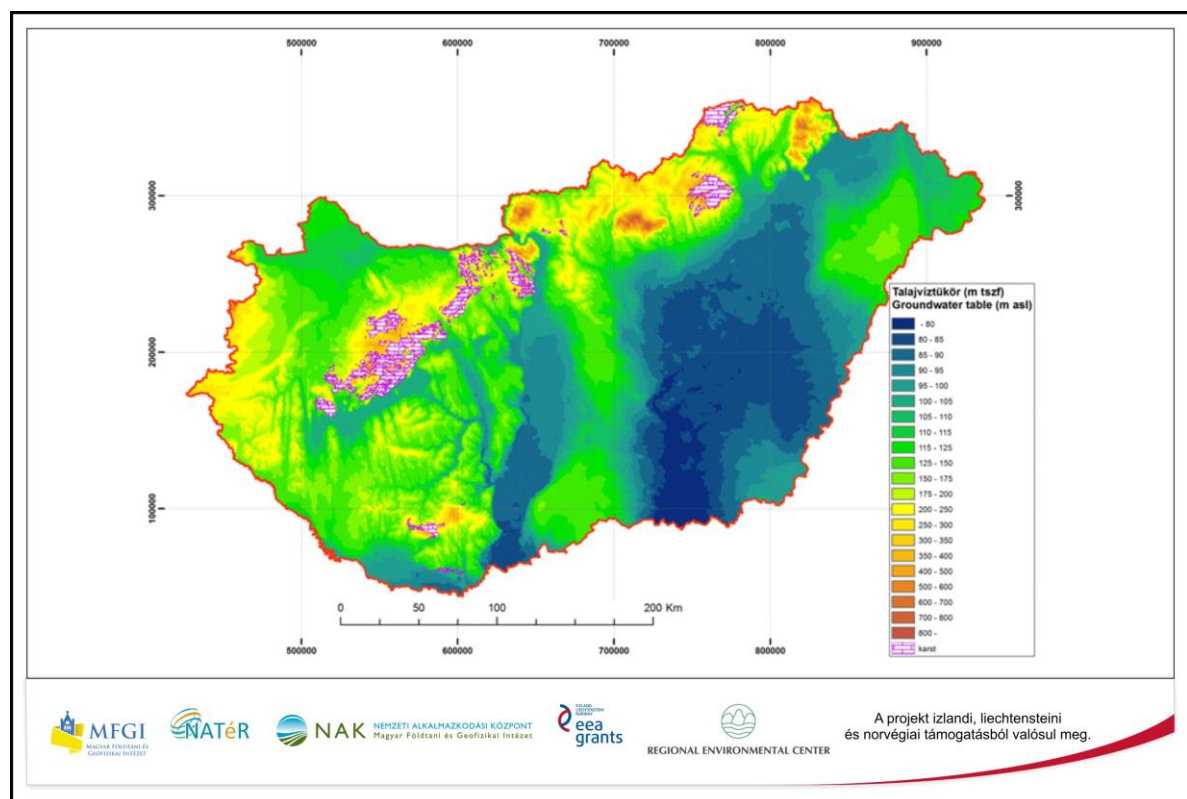
33. ábra. Az 2005–2009 és 1961–1965 időszakok számított átlagos beszivárgásainak különbsége



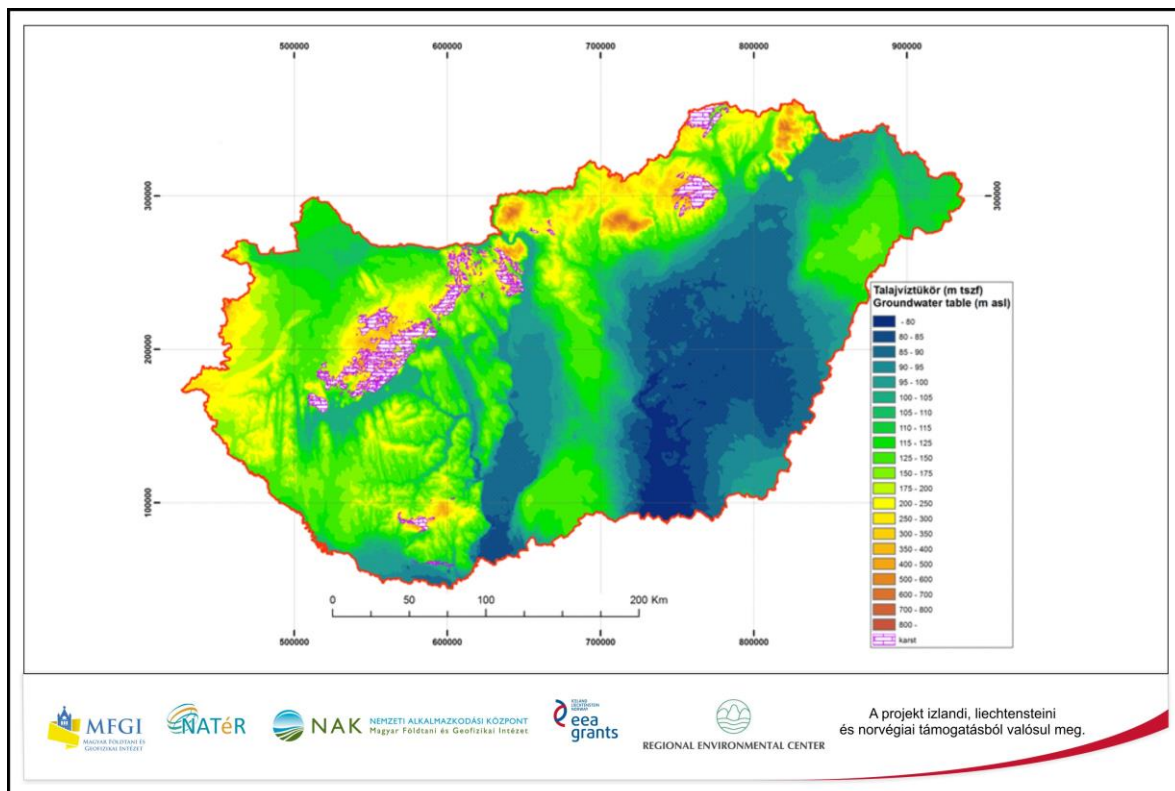
34. ábra. Az 2071–2100 és 1961–1990 időszakok számított átlagos beszivárgásainak különbsége



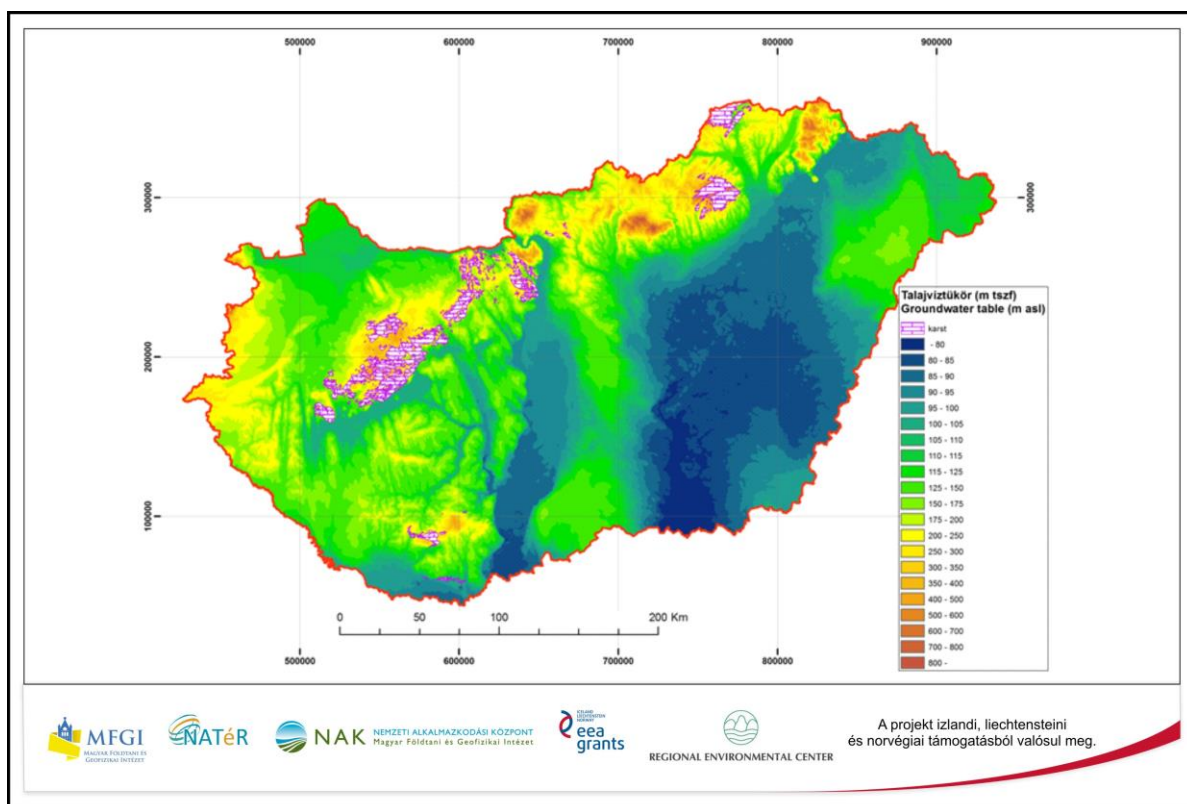
35. ábra. Az 1961–1965 időszakra kalibrált transzmisszivitás-eloszlás



36. ábra. Az 1961–1965 időszakra számított talajvíztükör. Készült a CarpatClim-Hu klímaadatok alapján

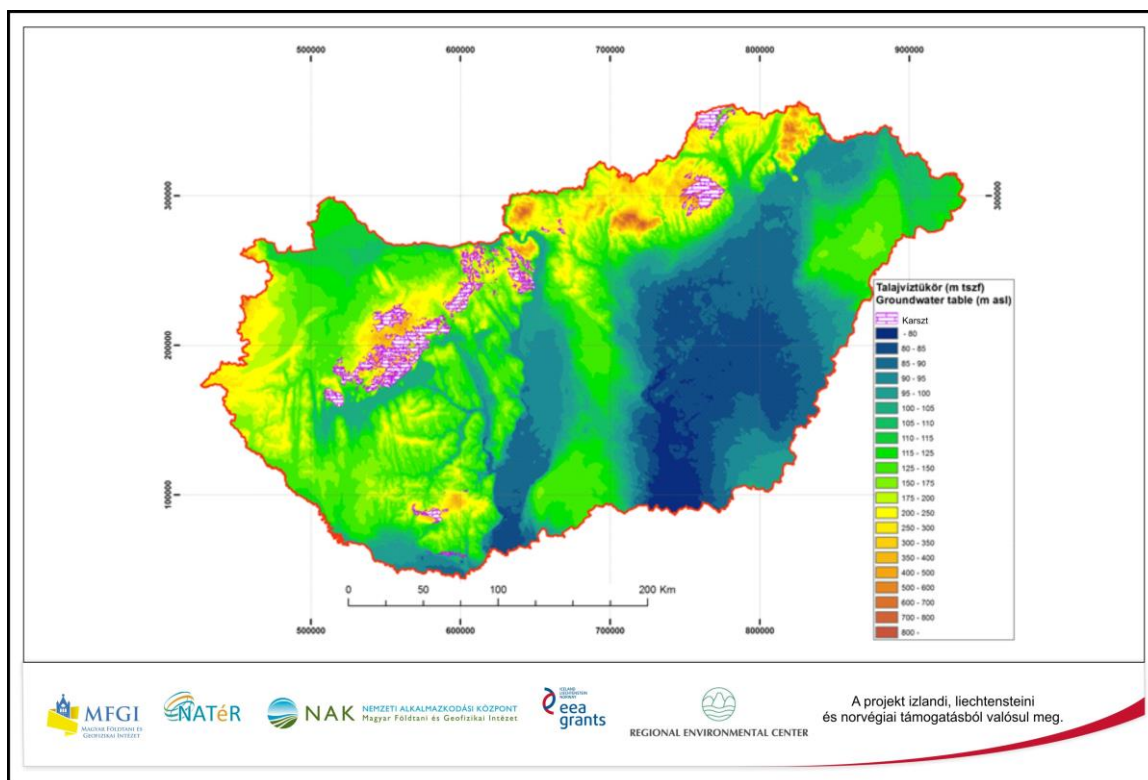


37. ábra. Az 2005–2009 időszakra számított talajvíztükör. Készült a CarpatClim-Hu klímaadatok alapján

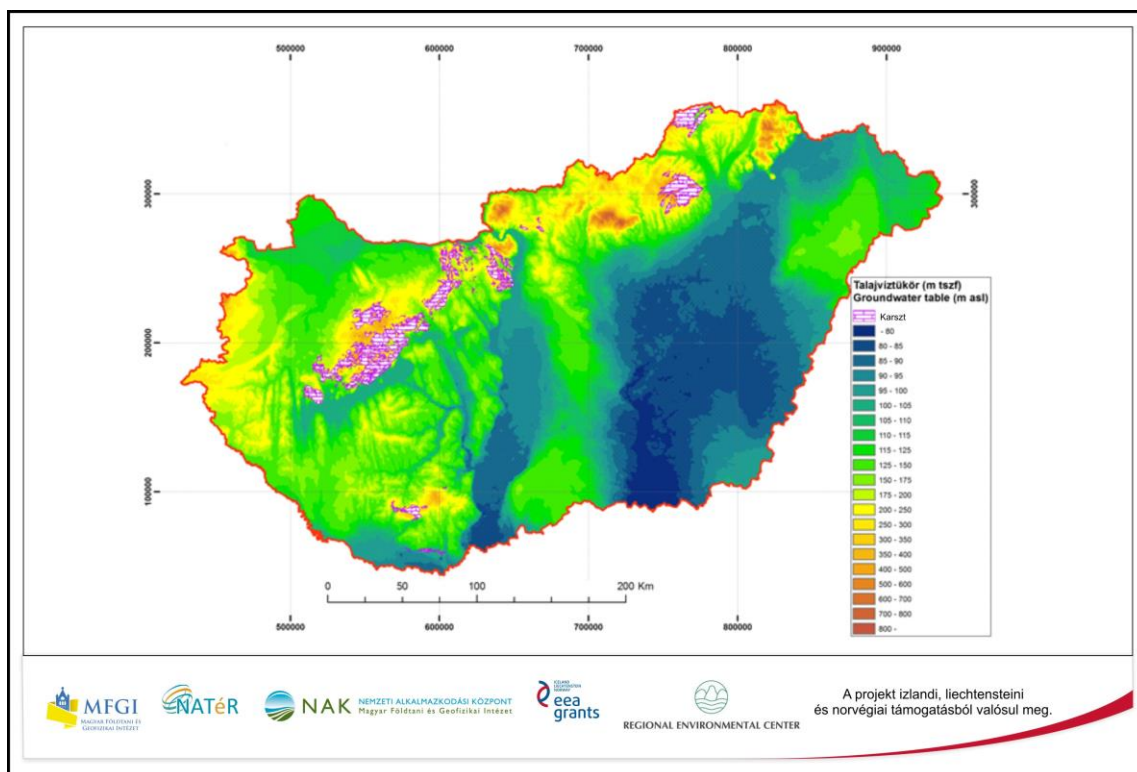


38. ábra. Az 1961–1990 időszakra számított talajvíztükör. Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján

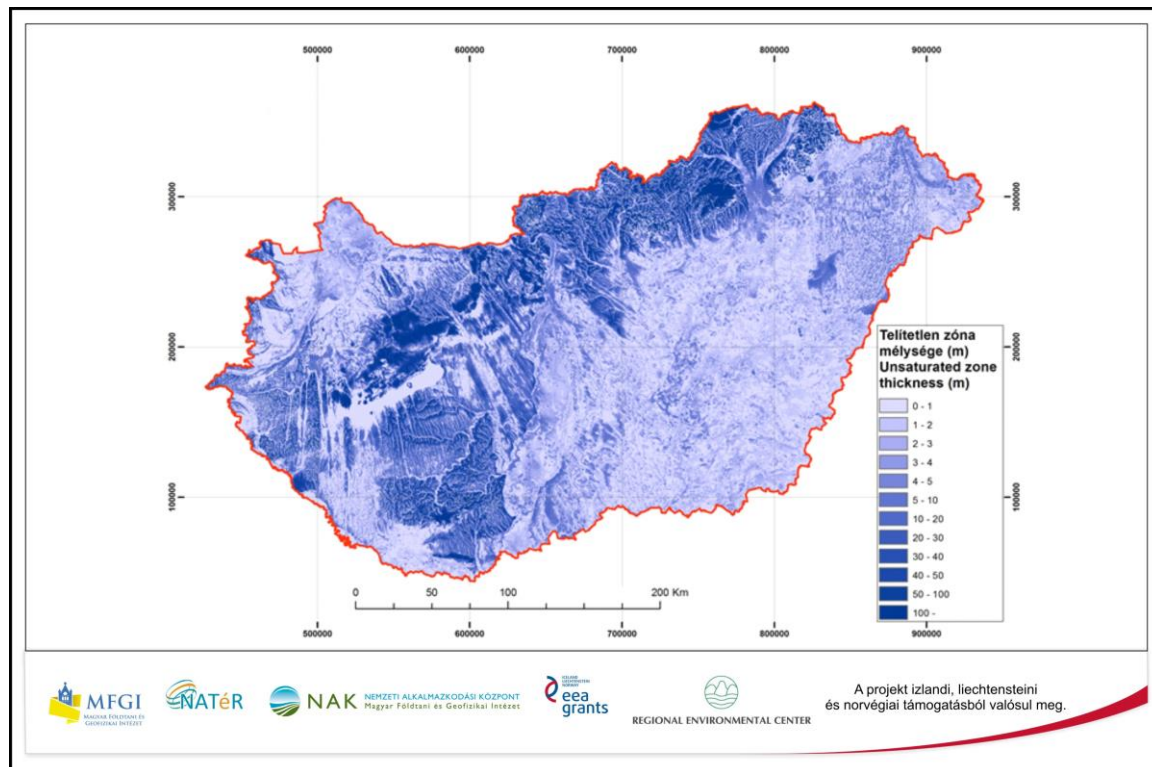




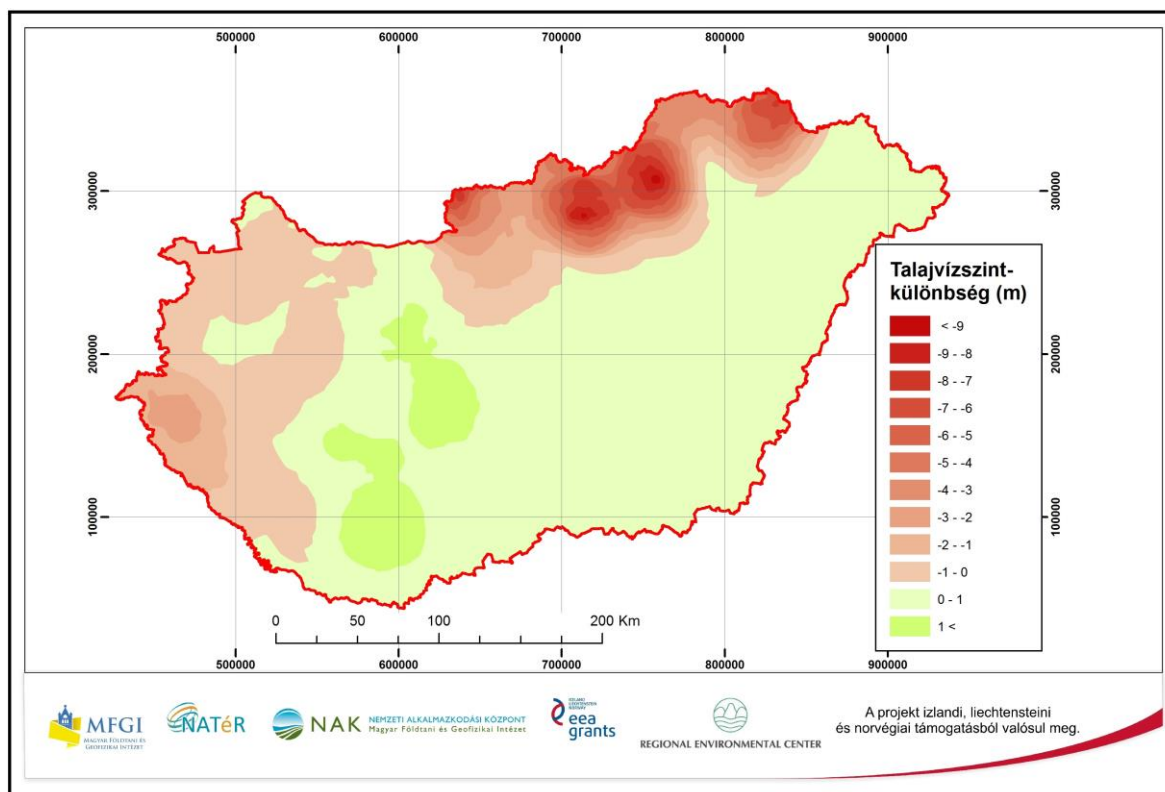
39. ábra. Az 2021–2050 időszakra számított talajvíz tükör. Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



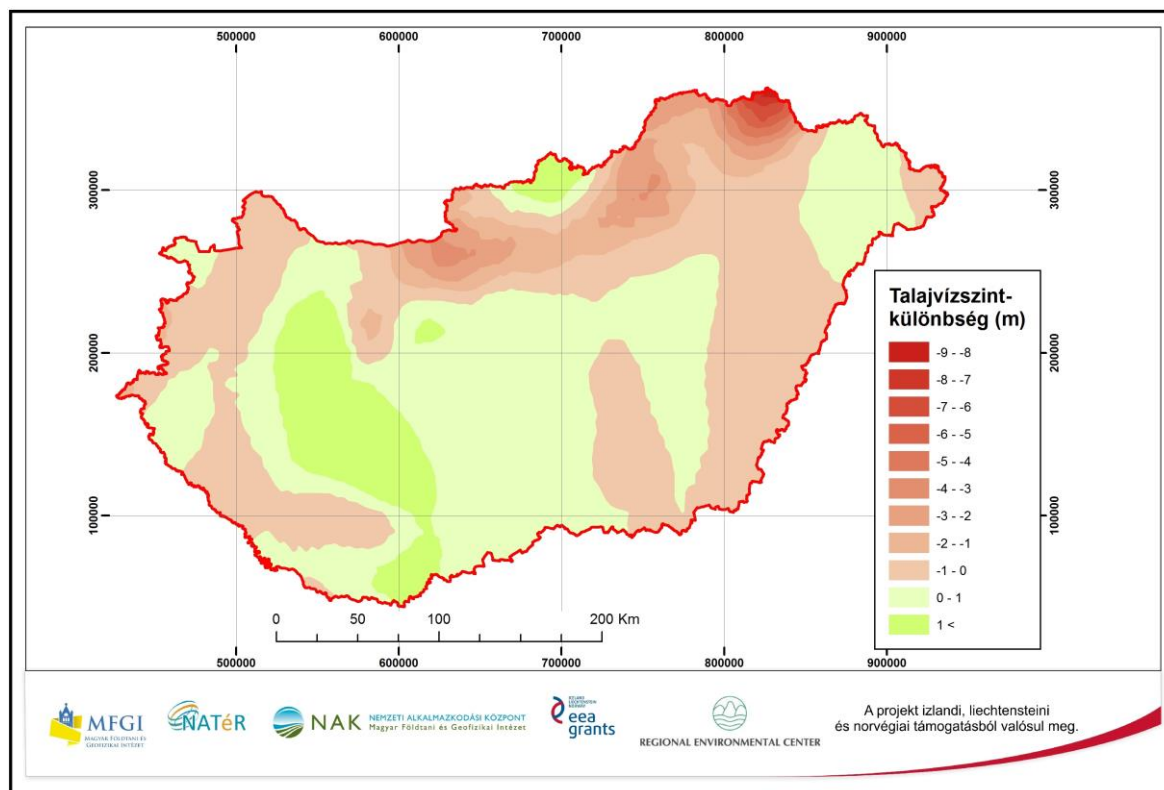
40. ábra. Az 2071–2100 időszakra számított talajvíz tükör. Készült az ALADIN klímamodell kimeneti adatai alapján



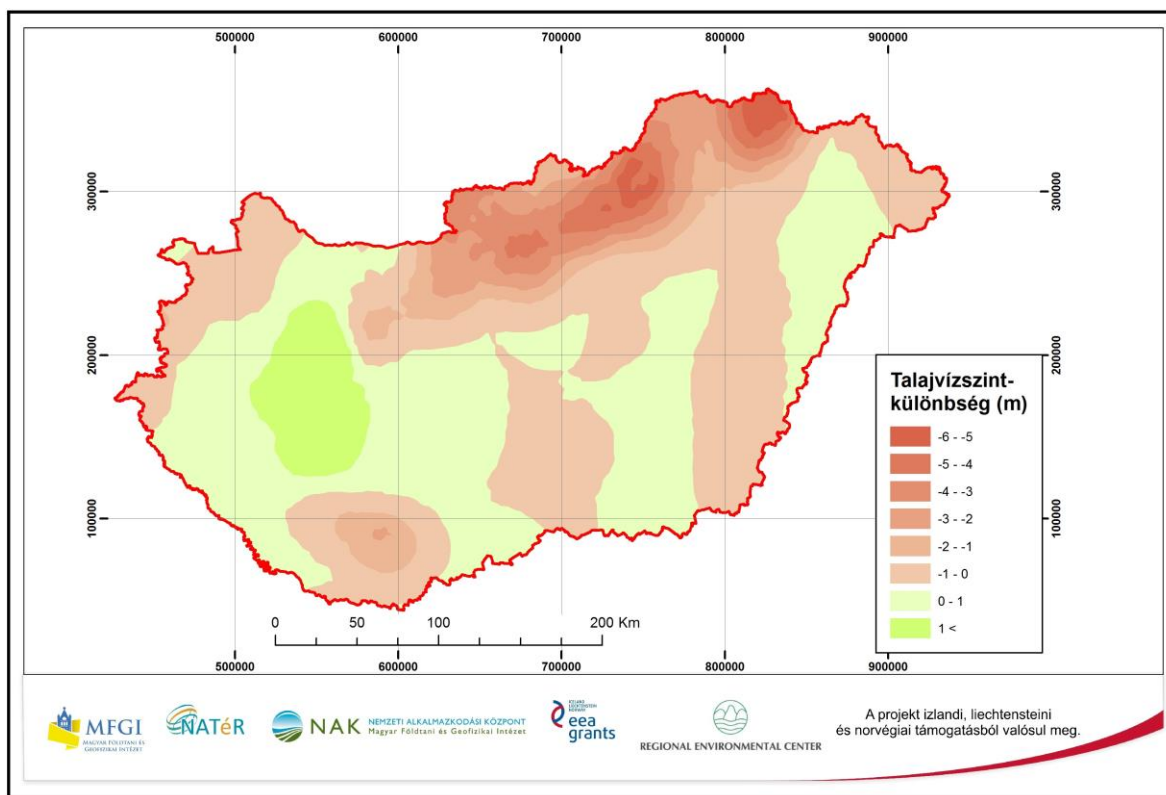
41. ábra. A telítetlen zóna szimulált vastagsága az 1961–1965 időszakra



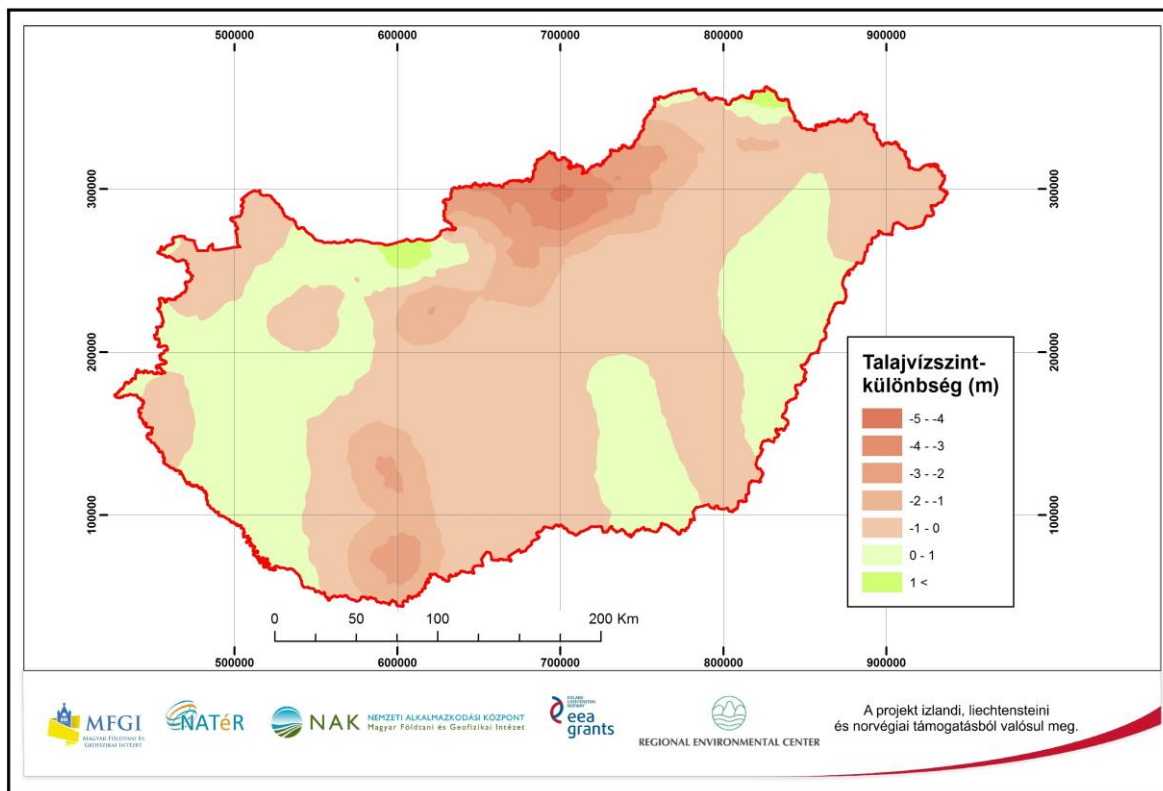
42. ábra. Az 2005–2009 és 1961–1965 időszakok számított talajvízszintjeinek különbségtérképe



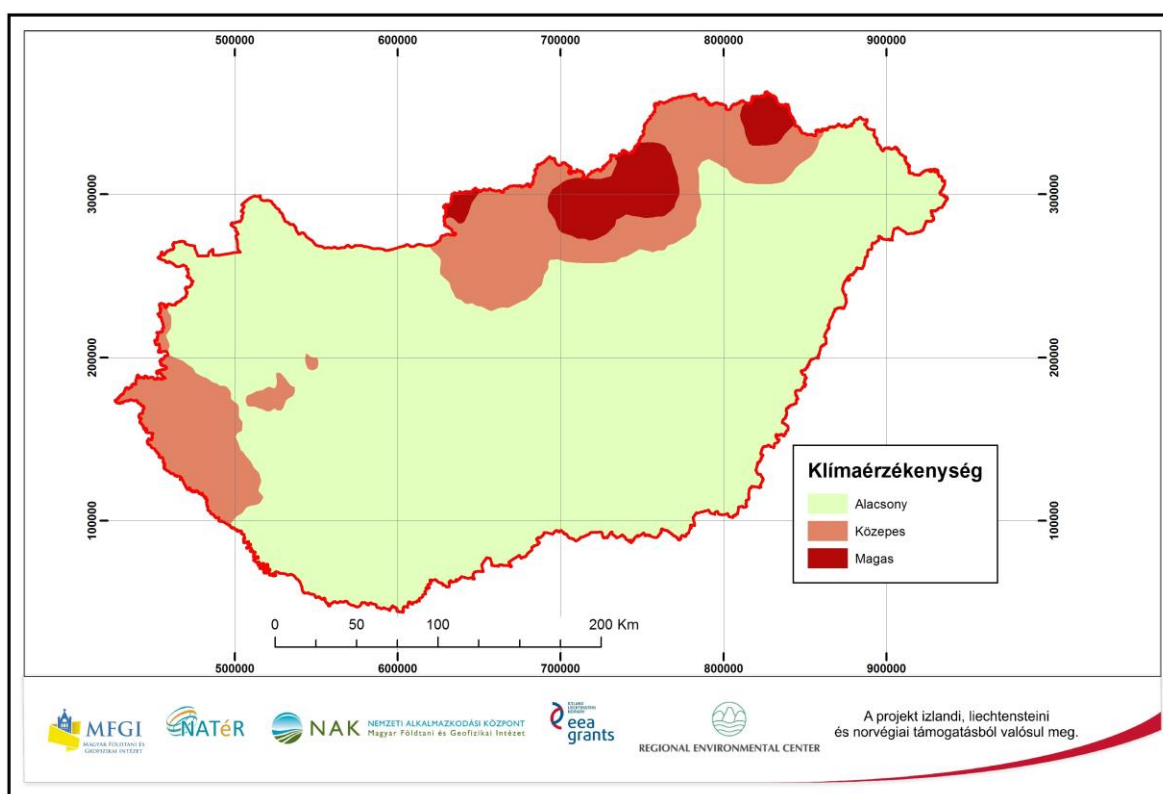
43. ábra. Az 2021–2050 és 1961–1990 időszakok számított talajvíz szintjeinek különbségtérképe



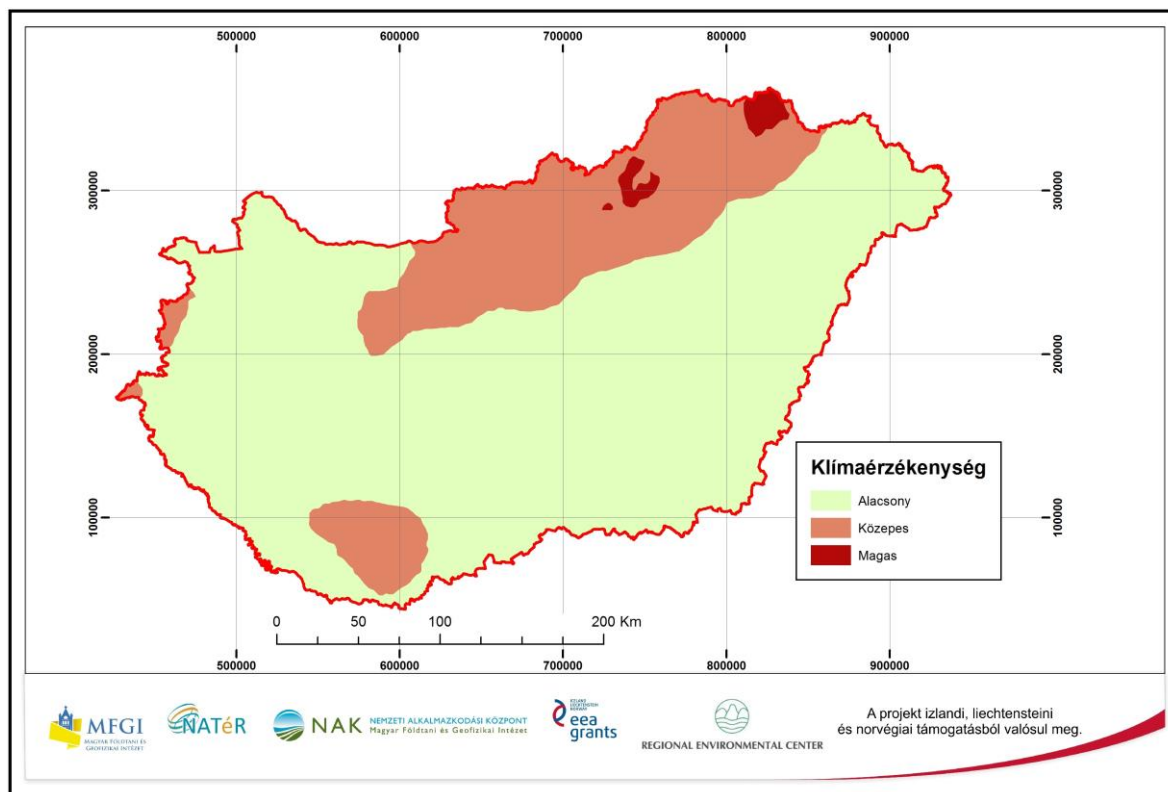
44. ábra. Az 2071–2100 és 2021–2050 időszakok számított talajvíz szintjeinek különbségtérképe



45. ábra. Az 2071–2100 és 1961–1990 időszakok számított talajvíz szintjeinek különbségtérképe



46. ábra. A talajvíz országos klímaérzékenységi térképe a mért adatok alapján modellezve



47. ábra. A talajvíz országos klímaérzékenységi térképe a klímamodell-kimenetek alapján modellezve

A NATÉR projekt izlandi, liechtensteini és norvégiai támogatásból valósul meg.

A jelen szakmai munkaanyag Izland, Liechtenstein és Norvégia EGT-támogatásokon és a REC-en keresztül nyújtott anyagi hozzájárulásával valósult meg. A jelen dokumentum tartalmáért a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet felelős.

További információk a támogatási programról:

[www.nagis.hu](http://www.nagis.hu)

[eea.rec.org](http://eea.rec.org)

[eeagrants.org](http://eeagrants.org)