4D 80, 76–103. (2026)

DOI: HTTPS://DOI.ORG/10.56617/4D.80.7476

KECSKEMÉT VÁROSI TÁJ-DINAMIKÁJÁNAK ÉRTELMEZÉSE MŰHOLDAS VEGETÁCIÓS INDEXEK ALAPJÁN

INTERPRETATION OF THE URBAN LANDSCAPE DYNAMICS OF KECSKEMÉT BASED ON SATELLITE VEGETATION INDICES

ERDÉLYI REGINA

ABSZTRAKT

A települési tájdinamika vizsgálata kulcsfontosságú a városi zöldinfrastruktúra hosszú távú működésének, ellenállóképességének és klímaadaptációs szerepének megértésében. Kecskemét, mint gyorsan növekvő és klímaérzékeny középváros különösen alkalmas az urbanizációs folyamatok és a zöldfelületi változások összefüggéseinek értelmezésére. Jelen tanulmány célja a települési tájdinamika kvantitatív értékelése a 2017 és 2025 közötti időszak műholdas vegetációs indexeire alapozva. A kutatás a Sentinel–2 multispektrális adatain számított Enhanced Vegetation Index (EVI) idősorát alkalmazza, amely a városi környezetben is megbízhatóan tükrözi a vegetáció borítottságát és vitalitását, miközben csökkenti a talaj- és légköri hatások okozta torzításokat. Az elemzés a vegetációs időszakra korlátozott, hibaszűrt éves EVI-kompozitokra, valamint a 2017–2025 közötti ΔEVI különbségtérképre épül, amelyet zónastatisztikai módszerekkel egészítettünk ki a városrészi különbségek feltárása érdekében. Eredményeink szerint Kecskemét teljes városi EVI-átlaga 0,399-ről 0,337-re csökkent, ami mérsékelt, de következetes romlást jelez a vegetációs állapotban. A változások térben mozaikos mintázatot mutatnak: a negatív ΔEVI-értékek elsősorban a beépülő, átmeneti és elővárosi zónákban koncentrálódnak, ahol a burkolatnövekedés, az ipari terjeszkedés és a kertvárosi telkek átalakulása jelentős zöldfelületi veszteséggel jár. Ezzel szemben pozitív vagy stabil EVI-értékek a nagy összefüggő erdőtömbökben, rekreációs zöldterületeken, valamint bizonyos intézményi zónákban jelennek meg, ahol biológiai beérés, spontán revegetáció vagy célzott zöldfelület-fejlesztés történt. Az eredmények rámutatnak, hogy a zöldfelületi nyereség főként fragmentált, gyakran átmeneti jellegű, míg a zöldfelület-vesztés sok esetben tartós, szerkezeti átalakulásokból ered. A ΔEVI-alapú vizsgálat így nemcsak a vegetációs állapot változását, hanem a városi táj működésének mélyebb dinamikáit is feltárja, amelyek a jövőbeli zöldinfrastruktúra-tervezés és -priorizálás szempontjából kiemelt jelentőségűek.

Kulcsszavak: települési tájdinamika; zöldinfrastruktúra; vegetációs index; EVI; tájhasználat-változás; Kecskemét

1. BEVEZETÉS

A városi tájak gyors átalakulása napjainkra a településtervezés és a tájökológia egyik legfontosabb kutatási

ABSTRACT

The study of urban landscape dynamics is essential for understanding the long-term functioning, resilience, and climate adaptation role of urban green infrastructure. As a rapidly growing and climate-sensitive medium-sized city, Kecskemét is particularly well suited for examining the relationships between urbanization processes and changes in green space. The aim of this study is to quantitatively assess urban landscape dynamics using satellite-derived vegetation indices for the period between 2017 and 2025. The research employs the Enhanced Vegetation Index (EVI) time series calculated from Sentinel-2 multispectral data, which reliably reflects vegetation cover and vitality even in urban environments, while reducing distortions caused by soil and atmospheric effects. The analysis is based on error-filtered annual EVI composites restricted to the vegetation period, as well as a ΔEVI difference map for the 2017–2025 period. These were complemented with zonal statistical methods to reveal differences between city districts. According to our results, the average urban EVI for Kecskemét decreased from 0.399 to 0.337, indicating a moderate but consistent decline in vegetation condition. The observed changes exhibit a spatially heterogeneous, mosaic-like pattern: negative ΔEVI values are primarily concentrated in built-up, transitional, and suburban areas, where increased surface sealing, industrial expansion, and the transformation of garden-city plots have led to significant losses of green space. In contrast, positive or stable EVI values are found in large contiguous forest blocks, recreational green areas, and certain institutional zones, where biological maturation, spontaneous revegetation, or targeted green space development has occurred. The results indicate that gains in green space are generally fragmented and often temporary, whereas losses are, in many cases, permanent and driven by structural transformations. Thus, the ΔEVI-based analysis reveals not only changes in vegetation status, but also the underlying dynamics of how urban landscapes function, which are of critical importance for future green infrastructure planning and prioritization.

Keywords: urban landscape dynamics; green infrastructure; vegetation index; Enhanced Vegetation Index (EVI); land-use change; Kecskemét

1. INTRODUCTION

The rapid transformation of urban landscapes has become one of the most important research fields in contemporary urban planning and landscape ecology. The investigation of urban landscape dynamics enables a better understanding of the structural and functional changes occurring within urban environments, particularly those directly affecting the condition, extent, and ecosystem services of green infrastructure. As an interconnected and multifunctional system of landscape elements, green infrastructure plays a key role in urban climate regulation, mitigation of the urban heat island effect, water balance regulation, and the maintenance of ecological connectivity. Consequently, changes in its condition directly influence cities' sustainability and resilience (Erdélyi et al., 2021).

The microclimate of urban public spaces is strongly influenced by the proportion of sealed surfaces, vegetation cover, and built structures, all of which directly affect human thermal comfort (Erdélyi et al., 2025). The climate-modifying role of green infrastructure operates across multiple spatial scales: at the micro-scale, it directly improves user comfort, while at meso- and macro-scales, it favorably influences the climatic conditions of the surrounding urban fabric (Takácsné Zajacz et al., 2025).

In this study, the concept of urban landscape dynamics is applied as an urban-context adaptation of the classical interpretation of landscape dynamics. While traditional landscape dynamics primarily focus on the spatial and temporal changes of landscape-forming elements — such as topography, hydrology, soils, vegetation, and land use — mainly in rural or near-natural environments (Antrop, 2005; Bürgi et al., 2004), urban landscape dynamics interpret the structural, functional, and land-use transformations of urban space as an integrated system. Within this framework, green infrastructure represents not merely the physical presence of vegetation,

területévé vált. A települési tájdinamika vizsgálata lehetővé teszi a városi térben zajló szerkezeti és funkcionális változások megértését, különösen azokét, amelyek közvetlenül érintik a zöldinfrastruktúra állapotát, kiterjedését és ökoszisztéma-szolgáltatásait. A zöldinfrastruktúra mint összefüggő, multifunkcionális tájelem-rendszer meghatározó szerepet játszik a városi klíma, a hősziget-hatás mérséklése, a vízháztartás szabályozása és az élőhelyi kapcsolatok fenntartása szempontjából, ezért állapotának változása közvetlenül befolyásolja a városok fenntarthatóságát és ellenállóképességét (Erdélyi et al., 2021). A városi közterek mikroklímáját jelentősen befolyásolják a burkolt felületek, a növényzet és az épített környezet arányai, amelyek közvetlen hatással vannak a humán komfortérzetre (Erdélyi et al., 2025). A zöldinfrastruktúra klímamódosító szerepe több léptékben is érvényesül: mikroklimatikus hatása közvetlenül javítja a használók komfortérzetét, míg mezo- és makroléptékben a környező városi szövet klimatikus viszonyait is kedvezően befolyásolja (Takácsné Zajacz et al., 2025). A települési tájdinamika fogalmát jelen tanulmányban a klasszikus tájdinamika városi kontextusra adaptált értelmezéseként használjuk. Míg a tájdinamika hagyományosan a tájalkotó elemek – domborzat, vízhálózat, talaj, növényzet és földhasználat – térbeli és időbeli változásainak vizsgálatára irányul (Antrop, 2005; Bürgi et al., 2004), elsősorban rurális vagy természetközeli térségekben, addig a települési tájdinamika a városi tér szerkezeti, funkcionális és használati átalakulásait integrált rendszerként értelmezi. Ebben a megközelítésben a zöldinfrastruktúra nem csupán a vegetáció fizikai jelenlétét jelenti, hanem a városi táj működésének érzékeny indikátora is: állapotváltozásai tükrözik az urbanizáció, a beépítési nyomás, az infrastrukturális fejlesztések és a klimatikus hatások együttes eredőjét (Ahern, 2007; Hansen és Pauleit, 2014). A települési zöldinfrastruktúra elemei szoros kapcsolatban állnak a városszerkezeti és térhasználati változásokkal, amelyek hosszú távon alakítják a zöldfelületi rendszer térbeli mintázatát (Erdélyi – Sallay, 2023). A települési tájdinamika tehát a városi tájszerkezet időbeli alakulásának olyan értelmezési kerete, amelyben a zöldfelületi rendszer változásai a teljes városi működés kontextusában értelmezhetők (Pauleit et al., 2011; Kabisch et al., 2016).

Kecskemét az elmúlt évtizedben Magyarország egyik leggyorsabban növekvő középvárosává vált, ahol az ipari fejlesztések, az infrastrukturális bővülés és a lakóterületi expanzió együttesen jelentős felszínborítási átalakulásokhoz vezettek (Iváncsics és Filepné Kovács, 2020). A települési táj működésének megértése ebben a kontextusban nem csupán területfejlesztési, hanem klímaadaptációs kérdés is (Turner et al., 2001). A gyors városnövekedés szükségessé teszi olyan objektív, nagy térbeli lefedettségű és időben ismételhető módszerek alkalmazását, amelyek képesek érzékelni a zöldinfrastruktúra finomabb léptékű változásait ugyanúgy, mint a nagyobb területi átalakulásokat.

A zöldfelületek térbeli változásainak vizsgálatára a műholdas adatokon alapuló indexek – különösen az Enhanced Vegetation Index (EVI) – széles körben alkalmazott eszközök, amelyek lehetővé teszik a zöldfelület kiterjedésének és állapotának együttes értékelését (Jombach et al., 2023; 2024; Weng, 2010). Egyre szélesebb körben használatosak a városi környezet vizsgálatában is (Aryal et al., 2022), annak ellenére, hogy a városi zöldfelületek rendkívül heterogén térszerkezete komoly kihívást jelent a távérzékelési alapú vizsgálatok számára (Van Delm & Gulinck, 2011). Nemzetközi vizsgálatok rámutattak, hogy a vegetációs indexek nemcsak a zöldfelületi borítottság mennyiségi jellemzésére alkalmasak, hanem érzékenyen reagálnak a városszerkezeti különbségekre, az urbanizációs mintázatokra és a klimatikus viszonyokra is (D'Silva, 2025). Emellett a vegetációs indexek alkalmazása az elmúlt években a városi egyenlőtlenségek, az életminőség és a környezeti igazságosság vizsgálatában is egyre hangsúlyosabbá vált (González-Marín & Garrido-Cumbrera, 2025). Az EVI előnye, hogy a heterogén, mozaikos települési felszíneken is pontosabb visszajelzést ad, mivel jobban kezeli a városi felszíneket jellemző talaj- és légköri torzító hatásokat, mint a hagyományos NDVI (Huete et al., 2002). Az EVI különösen alkalmas a nagy biomasszájú vagy sűrű vegetációval rendelkező területek vizsgálatára, mivel kevésbé telítődik, mint az NDVI (Vijith & Dodge-Wan, 2020).

Jelen kutatásban az EVI-idősor elemzése lehetővé teszi Kecskemét zöldfelületi állapotának és tájdinamikai változásainak hosszabb idősoros értelmezését, valamint a zöldfelület-nyereség és -veszteség típusainak azonosítását különböző városi zónákban.

Tanulmányunk célja, hogy a 2017 és 2025 közötti időszak műholdas vegetációs adatai alapján feltárja Kecskemét zöldinfrastruktúrájának állapotváltozásait, és értelmezze azokat a települési tájdinamika fogalmi keretében. A vizsgálat három alapvető kérdésre keresi a választ: ① hogyan változott a város vegetációs állapota a vizsgált

but also provides a sensitive indicator of urban landscape functioning. Changes in its condition reflect the combined effects of urbanization, development pressure, infrastructural expansion, and climatic influences (Ahern, 2007; Hansen and Pauleit, 2014).

The elements of urban green infrastructure are closely linked to changes in urban structure and spatial use, which over the long term shape the spatial configuration of the urban green infrastructure system (Erdélyi and Sallay, 2023). Accordingly, urban landscape dynamics can be understood as an interpretative framework for analyzing the temporal evolution of urban landscape structure, in which changes in the green infrastructure system can be evaluated within the broader context of overall urban functioning (Pauleit et al., 2011; Kabisch et al., 2016).

Over the past decade, Kecskemét has become one of the fastest-growing medium-sized cities in Hungary, with industrial development, infrastructure expansion, and residential growth resulting in significant land-cover transformations (Iváncsics and Filepné Kovács, 2020). In this context, understanding the functioning of the urban landscape is not only a spatial development issue, but also a matter of climate adaptation (Turner et al., 2001). Rapid urban growth requires the application of objective, spatially extensive, and temporally repeatable methods capable of detecting both fine-scale changes in green infrastructure and large-scale land transformation processes.

Satellite-based vegetation indices — particularly the Enhanced Vegetation Index (EVI) — are widely used tools for analyzing the spatial dynamics of urban green spaces, enabling the simultaneous assessment of vegetation extent and condition (Jombach et al., 2023; 2024; Weng, 2010). These methods are also increasingly applied in urban studies (Aryal et al., 2022), despite the fact that the highly heterogeneous spatial structure of urban green spaces presents significant challenges for remote sensing-based analyses (Van Delm and Gulinck, 2011). International studies have demonstrated that vegetation indices are not only suitable for quantifying vegetation cover, but also respond sensitively to differences in urban structure, urbanization patterns, and climatic conditions (D'Silva, 2025). In recent years, vegetation-index-based approaches have also become increasingly important in studies addressing urban inequality, quality of life, and environmental justice (González-Marín and Garrido-Cumbrera, 2025).

One of the main advantages of EVI is its improved performance over heterogeneous and fragmented urban surfaces, as it is less affected by soil background and atmospheric distortions than the traditional NDVI (Huete et al., 2002). Furthermore, EVI is particularly suitable for the analysis of areas characterized by dense or high-biomass vegetation, because it is less prone to saturation effects than NDVI (Vijith and Dodge-Wan, 2020).

In this study, EVI time-series analysis enables the long-term interpretation of the condition and landscape dynamic changes of Kecskemét's green infrastructure system, while also supporting the identification of different types of green space gain and loss across distinct urban zones.

The aim of this study is to investigate the condition changes of Kecskemét's green infrastructure between 2017 and 2025 using satellite-derived vegetation data and to interpret these changes within the conceptual framework of urban landscape dynamics. The analysis addresses three main research questions: ① how did the vegetation condition of the city change during the study period? ② what types of green space gains and losses can be identified? and ③ which land-use and structural processes underlie the observed ΔEVI patterns? The results provide not only a comprehensive assessment of the condition of Kecskemét's green infrastructure, but also valuable insights for future urban planning and climate adaptation interventions.

2. MATERIALS AND METHODS

The analysis was based on multispectral imagery acquired from the Sentinel-2 satellite constellation, which, due to its 10–20 m spatial resolution and frequent revisit time, is well suited for monitoring temporal changes in urban vegetation. Data covering the 2017–2025 period were downloaded from the Copernicus Open Access Hub, with cloud-free or low-cloud-cover scenes selected for each year. To minimize seasonal distortions and ensure comparability between years, the analysis was restricted to the main vegetation period, extending from early May to mid-October.

The condition of urban green spaces was quantified using the Enhanced Vegetation Index (EVI), calculated from the spectral information of the blue (B_2), red (B_4), and near-infrared (B_8) bands. Compared to NDVI, EVI provides a more reliable representation of vegetation conditions in urban environments because it more effectively

1. táblázat/Table 1: A tanulmányban felhasznált Sentinel-2 képek dátumai (2017–2025) / *Dates of the Sentinel-2 images used in the study (2017–2025)*

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
2017-07-19	2018-08-28	2019-08-28	2020-07-28	2021-05-04	2022-05-19	2023-06-03	2024-05-13	2025-05-03
2017-06-24	2018-09-27	2019-09-12	2020-08-12	2021-06-23	2022-06-23	2023-07-23	2024-07-12	2025-06-22
2017-10-02	2018-08-08	2019-09-22	2020-08-22	2021-09-11	2022-07-23	2023-08-22	2024-07-27	2025-07-14
2017-05-20					2022-08-17	2023-08-27	2024-08-31	2025-08-13
					2022-08-27	2023-09-06		2025-09-15
					2022-10-16	2023-09-11		
						2023-09-26		
						2023-10-06		
						2023-10-16		

időszakban; ② milyen zöldfelületi nyereség- és veszteségtípusok azonosíthatók; és ③ milyen tájhasználati és szerkezeti folyamatok állnak a ΔEVI mintázatok mögött. A kapott eredmények nemcsak a város zöldinfrastruktúrájának állapotáról adnak átfogó képet, hanem támpontot nyújtanak a jövőbeli várostervezési és klímaadaptációs beavatkozások számára is.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kutatás alapját a Sentinel–2 műholdcsalád multispektrális felvételei képezik, amelyek 10–20 méteres térbeli felbontásukkal és rendszeres visszatérési idejükkel jól alkalmazhatók a városi vegetáció időbeli változásainak követésére. A 2017 és 2025 közötti időszak adatai a Copernicus Open Access Hub felületéről kerültek letöltésre, minden évben a felhőmentes vagy alacsony felhőborítottságú jelenetek kiválasztásával. A vizsgálat kizárólag a vegetációs időszakra (május elejétől október közepéig) korlátozódott annak érdekében, hogy a szezonális lombtalan periódus ne torzítsa az éves összehasonlításokat.

A zöldfelületi állapot kvantifikálására az Enhanced Vegetation Index (EVI) mutató került alkalmazásra, amely a kék (B2), vörös (B4) és közeli infravörös (B8) sávok spektrális információi alapján számítható. Az EVI előnye, hogy a városi környezetben jellemző légköri aeroszolok, talajháttér és árnyékolási hatások által okozott torzulásokat hatékonyabban kezeli, mint az NDVI, így a heterogén felszínekről is stabilabb vegetációs visszajelzést ad. Az EVI raszterek elkészítése a standard képlet alapján történt, ahol G =2.5 (gain factor), C1 = 6.0, C2 = 7.5, L = 1:

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)}$$

Ezután minden évben cellaszintű átlagolással éves, vegetációs szezonra jellemző kompozit EVI-térképek készültek QGIS környezetben. Az egyes években felhasznált felvételek száma 3 és 9 között változott, a felhasznált felvételek pontos időpontjait az 1. táblázat tartalmazza.

A nyers EVI-raszterek feldolgozását hibaszűrés követte: az ökológiailag értelmezhetetlen, −1 alatti vagy +1 feletti pixelértékek NoData kategóriába kerültek, mivel ezek jellemzően feldolgozási hibákhoz, maszkprobléмákhoz vagy árnyékhatásokhoz köthetők. A hibaszűrés célja az volt, hogy a városrészi statisztikák csak valid értékekre épüljenek, elkerülve a lokális extrém értékek által okozott torzítást. A logikai szűrést a QGIS Raster Calculator eszközével végeztük, minden érintett évre egységes eljárással.

A tájdinamikai folyamatok feltárásához két alapvető megközelítés alkalmazása történt: ① idősoros elemzés, amely az éves vegetációs állapot alakulását vizsgálta 2017 és 2025 között, valamint ② ΔEVI különbségtérképek előállítása, amelyek a 2017 és 2025 közötti változás irányát és mértékét mutatják. A ΔEVI-értékek pozitív tartománya zöldfelület-növekedést, a negatív tartomány zöldfelület-vesztést vagy vegetációs gyengülést jelöl; a nulla közeli értékek stabil állapotot jeleznek. A különbségtérképek előállítása egységes vetületi és felbontási paraméterek mellett, a raszterek cellaszintű kivonásával történt. Az EVI-változások osztályozása divergens színskálával, ökológiailag értelmezhető osztályhatárok (−0,3; −0,1; +0,1; +0,3) alapján valósult meg, amely lehetővé tette a markáns és mérsékelt változások elkülönítését.

A városrészi léptékű értelmezéshez zónastatisztikai elemzéseket végeztünk, a Kecskemét városrészeit lehatároló vektoros állomány felhasználásával. Minden év EVI-rasztere alapján kiszámításra került a városrészek átlag-, medián-, szórás-, minimum- és maximumértéke, amelyek együttesen jellemzik a zöldfelületi állapot szerkezeti és térbeli heterogenitását. A városrészi értékek

compensates for atmospheric aerosols, soil background effects, and shading caused by heterogeneous urban surfaces. Consequently, EVI offers a more stable vegetation response over fragmented and complex urban land-cover patterns.

The EVI rasters were generated using the standard equation, where G = 2.5 (gain factor), C1 = 6.0, C2 = 7.5, and L = 1:

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)}$$

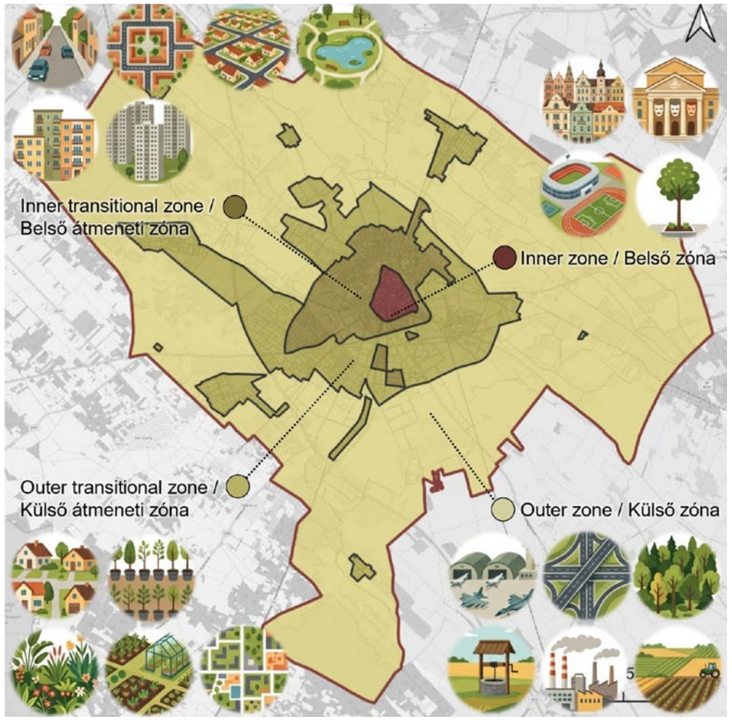
Subsequently, annual composite EVI maps representing the vegetation season were generated in the QGIS environment by calculating cell-based mean values for each year. The number of satellite scenes used annually varied between 3 and 9 depending on data availability and cloud conditions. The exact acquisition dates of the imagery used in the analysis are presented in Table 1.

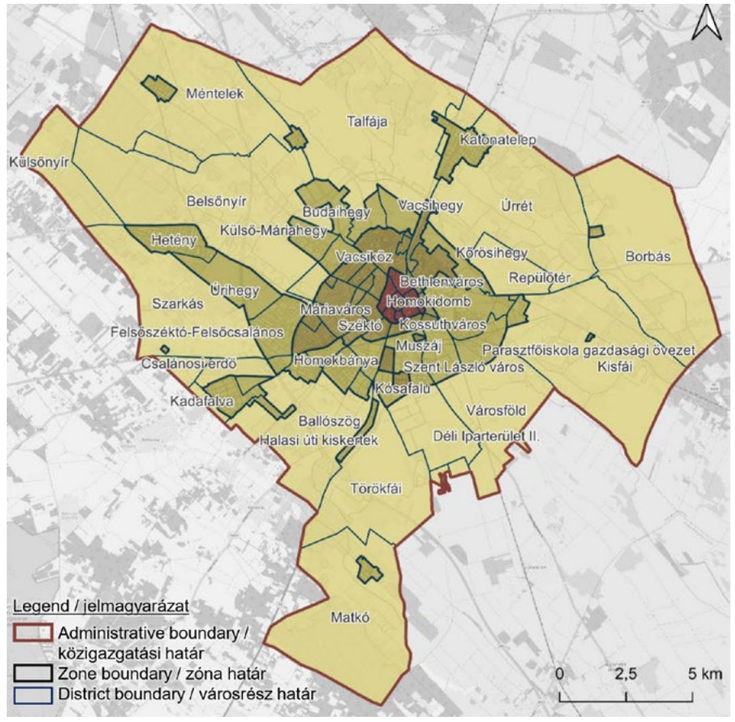
The processing of the raw EVI rasters was followed by an error-filtering procedure. Pixel values below −1 or above +1, considered ecologically non-interpretable, were reclassified as NoData, as these values are typically associated with processing errors, masking inaccuracies, or shadow effects. The aim of the filtering process was to ensure that the urban district-level statistics were calculated exclusively from valid values, thereby reducing distortions caused by local extreme outliers. Logical filtering was performed uniformly for all years using the Raster Calculator tool in QGIS.

To identify urban landscape dynamic processes, two complementary analytical approaches were applied: ① time-series analysis examining the annual evolution of vegetation conditions between 2017 and 2025, and ② the generation of ΔEVI difference maps representing the direction and magnitude of vegetation change between 2017 and 2025. Positive ΔEVI values indicate vegetation gain or improving vegetation conditions, whereas negative values represent vegetation loss or vegetation decline. Values close to zero were interpreted as relatively stable conditions. Difference maps were generated using raster subtraction under identical projection and spatial resolution parameters. The classification of ΔEVI values was carried out using a divergent color scale with ecologically interpretable threshold values (−0.3; −0.1; +0.1; +0.3), enabling the separation of moderate and substantial vegetation changes.

For urban district-scale interpretation, zonal statistical analyses were performed using the vector boundaries of Kecskemét's urban districts. Based on the EVI raster of each year, mean, median, standard deviation, minimum, and maximum values were calculated for every urban district. Together, these indicators characterize the structural and spatial heterogeneity of vegetation conditions. The comparison of district-level values allowed the identification of relationships between green infrastructure characteristics and land-use processes, as well as the delineation of different vegetation gain and vegetation loss zones.

An additional component of the analysis focused on the temporal stability of vegetation conditions. For each urban district, a Stability Index (SI) was calculated using the normalized coefficient of variation (CV) of annual EVI values and the mean annual change amplitude (MAC). The coefficient of variation reflects the relative fluctuation of annual vegetation conditions, while the MAC indicator expresses the average magnitude of year-to-year EVI changes. Both variables were normalized to a 0–1 scale and combined into a composite Stability Index, where higher values indicate more temporally stable vegetation dynamics. Based on SI values, urban districts





1. ábra/Fig. 1: Kecskeméti szerkezeti zónáinak körülhatárolása és azok viszonya a kerület-szintű térbeli struktúrához / *Delineation of urban structural zones in Kecskemét and their relation to district-level spatial structure*
SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

összevetése lehetővé tette a zöldfelületi karakterek és a tájhasználati folyamatok összefüggéseinek feltárását, valamint a különböző típusú nyereségi és veszteségi zónák azonosítását.

A módszer értelmezési korlátai közé tartozik, hogy az EVI a vegetáció mennyiségi spektrális visszaverődését méri, de nem képes különbséget tenni a vegetáció ökológiai minősége vagy funkcionális állapota között. További korlátot jelent a műfüves sportpályák magas spektrális visszaverése, valamint a mezőgazdasági területek – különösen a szántók – erős fenológiai ingadozása, amelyek eltérő értelmezést igényelnek a zöldinfrastruktúra kontextusában. Ennek megfelelően a mezőgazdasági ΔEVI-mintázatok nem közvetlenül a városi zöldfelületi állapot változását tükrözik, hanem a termesztési ciklusok és művelési módok időbeli dinamikáját, ezért külön kezelendők.

A városi tér elemzését zónák szerinti bontásban végeztük, amely a városszerkezeti helyzet, a területhasználat jellege és a beépítettség mértéke alapján került kialakításra. Ennek megfelelően három fő zónát különítettünk el: belső, átmeneti és külső zónát, azzal, hogy az átmeneti zóna további belső és külső átmeneti egységekre bontható (1. ábra).

A belső zóna a kompakt, sűrű beépítésű városi szövetet foglalja magában, amelyet zártsorú, illetve félig zártsorú beépítés, magas burkolt felületi arány és intenzív területhasználat jellemez. Ide tartoznak a történeti városközpont és a nagyobb beépítési sűrűségű történeti polgárvárosi lakóterületek, ahol a zöldfelületek aránya alacsony, térben erősen fragmentált, és elsősorban közparkokhoz, fasorokhoz vagy kisebb intézményi zöldfelületekhez kötődik.

Az átmeneti zóna mozaikos szerkezetű, vegyes használatú területeket foglal magában, ahol a beépítettség mértéke és a zöldfelületek aránya jelentős térbeli változatosságot mutat. A belső átmeneti zóna a városközponthoz kapcsolódó, részben már átalakuló lakó- és vegyes funkciójú területeket jelenti, ahol a zöldfelületek jelenléte növekvő, de még töredezett. Ide tartoznak a nagyobb, magasabb beépítési sűrűségű lakótelepi területek (pl. Széchenyiváros, Hunyadiváros), valamint a kertvárosias jellegű, alacsonyabb beépítési intenzitású, módosabb lakóövezetek (pl. Petőfiváros, Vacsihegy), amelyek eltérő zöldfelületi karakterrel, de egyaránt mozaikos felszínborítással jellemezhetők. Emellett ebben a zónában jelennek meg a városi léptékben is jelentős, összefüggő rekreációs

were classified into four categories: stable, moderately stable, dynamic, and unstable. In parallel, the year of the largest annual EVI change was also identified for each urban district by determining the maximum absolute year-to-year difference within the time series. This approach enabled the detection of temporally concentrated landscape transformation periods and abrupt vegetation changes related to climatic extremes or rapid land-use transformations.

The combined interpretation of the Stability Index and long-term ΔEVI change enabled the identification of four fundamental types of vegetation dynamics within the urban green infrastructure system: ① stable improvement (high SI and positive ΔEVI), ② stable decline (high SI and negative ΔEVI), ③ fluctuating improvement (low SI and positive ΔEVI), and ④ unstable decline (low SI and negative ΔEVI). This typology provides a more nuanced interpretation of urban vegetation dynamics by distinguishing between persistent long-term trends and highly variable or disturbance-driven changes.

The methodological limitations of the study should also be noted. Although EVI effectively captures the spectral intensity of vegetation, it does not directly reflect ecological quality or functional ecosystem conditions. Artificial turf sports fields may produce high spectral reflectance values, while agricultural areas — especially arable land — exhibit strong phenological fluctuations that require different interpretation within the context of urban green infrastructure. Consequently, agricultural ΔEVI patterns primarily reflect cultivation cycles and land management dynamics rather than direct changes in urban vegetation quality.

The analysis of urban space was conducted through a zonal classification system based on urban structure, land-use characteristics, and built-up intensity. Three principal zones were identified: the inner zone, the transitional zone, and the outer zone, while the transitional zone was further subdivided into inner transitional and outer transitional units (Figure 1).

The inner zone comprises the compact and densely built urban fabric characterized by continuous or semi-continuous building structures, high proportions of sealed surfaces, and intensive land use. This category includes the historic city center and the dense traditional residential neighborhoods, where green spaces are limited, highly fragmented, and primarily associated

zöldfelületi egységek, mint például a Széktó szabadidőközpont térsége a Benkó Zoltán Szabadidőközponttal, a Széktói Stadionnal és a Kecskeméti Fürdővel, amelyek a városi zöldinfrastruktúra kiemelt elemeit képezik.

A külső átmeneti zóna ezzel szemben inkább kertvárosias, alacsonyabb beépítési intenzitású vagy szuburbán jellegű térségeket foglal magában, ahol a családi házas beépítés, a kertek, valamint a beépítetlen vagy átmenetileg hasznosított területek együttes jelenléte jellemző. A zóna sajátosságát tovább növeli, hogy itt találhatók a nagyobb kertészeti és faiskolai területek, valamint a speciális kertségi formák, a zártkertek is, amelyek átmenetet képeznek a városi és a külterületi tájhasználat között. E területeken emellett markáns ipari és gazdasági átalakulási folyamatok is zajlanak: a nyugati iparterület egyes részei rozsdaövezeti jelleggel, részben spontán vegetációval borítva vannak jelen, míg a Szent László-város és a déli iparterület intenzív beépülés alatt áll, elsősorban ipari csarnokok és logisztikai létesítmények formájában. A zónára így a funkcionális kevertség és a gyors térbeli átalakulás együttes jelenléte jellemző.

A külső zóna az alacsony beépítettségű, jellemzően gazdasági, mezőgazdasági vagy természetközeli területeket foglalja magában. Ide tartoznak a nagyobb kiterjedésű szántók, gyepterületek, erdők, valamint egyes ipari és logisztikai funkciójú területek. A zöldfelületek aránya itt magasabb lehet, azonban azok jellege jelentősen eltér a városi zöldinfrastruktúra elemeitől, és erősen függ a mezőgazdasági műveléstől, illetve a természetes vegetációtól. A zónában meghatározó szerepet játszanak a történeti múltra visszatekintő, nagy kiterjedésű erdőterületek – például a Nyíri-erdő és a Matkói erdő –, amelyek a város ökológiai hálózatának kulcselemei. Emellett ide sorolhatók a kiterjedt, speciális használatú területek is, mint a katonai repülőtér, valamint a kiemelt jelentőségű zöldfelületi és természetvédelmi egységek, például az Arborétum és a mellette található, helyi védettség alatt álló Kápolna-rét.

A zónák lehatárolása térképi értelmezés és a domináns felszínborítási jellemzők figyelembevételével történt, amely lehetővé teszi a zöldfelületi változások differenciált, tájdinamikai szempontú értelmezését, különös tekintettel a városszerkezeti helyzetből fakadó eltérésekre.

A kutatás során alkalmazott elemzések egyik kiemelt eleme a zöldinfrastruktúra időbeli stabilitásának és változási dinamikájának vizsgálata volt a 2017–2025 közötti időszakban, amely a városrészek többéves EVI idősorain alapult. Az elemzés alapját az egyes városrészekre számított éves átlagos EVI (Enhanced Vegetation Index) értékek képezték, amelyek lehetővé tették a vegetáció állapotának és időbeli alakulásának kvantitatív értékelését. A többéves idősorok alapján minden városrész esetében meghatároztuk az átlagos EVI értéket, valamint az idősor szórását, amely az abszolút ingadozás mértékét fejezi ki. A különböző nagyságrendű területek összehasonlíthatósága érdekében a szórást a variációs együttható (coefficient of variation, CV) formájában is vizsgáltuk, amely az átlaghoz viszonyított relatív változékonyságot mutatja. A magasabb CV érték nagyobb időbeli ingadozásra, azaz alacsonyabb stabilitásra utal. Az időbeli változások intenzitását az egymást követő évek EVI értékei közötti abszolút különbségek alapján határoztuk meg (Mean Absolute Change, MAC). Ez a mutató az éves változások nagyságát ragadja meg, függetlenül azok irányától, így alkalmas a rendszer dinamikájának jellemzésére. Az egyes városrészekre számított éves MAC értékek átlagát használtuk a változási intenzitás összegző mérőszámaként. A stabilitás komplex értékelése érdekében a variációs együtthatót és a változási intenzitást normalizáltuk, majd ezek kombinációjával stabilitási indexet képeztünk. Az index magasabb értékei stabilabb, alacsonyabb értékei pedig instabilabb működést jeleznek. Az így kapott értékek alapján a városrészeket négy kategóriába soroltuk: stabil, mérsékelten stabil, dinamikus és instabil. A hosszú távú változás irányát a 2017 és 2025 közötti EVI értékek különbségével határoztuk meg, amely lehetővé tette a zöldfelületi növekedés vagy csökkenés azonosítását. Ezzel párhuzamosan minden városrész esetében meghatároztuk azt az évet is, amikor a legnagyobb mértékű éves változás következett be. Ennek során az egymást követő évek közötti abszolút EVI-különbségek (MAC értékek) közül kiválasztottuk a maximumot, majd hozzárendeltük azt az évet, amelyben ez a változás realizálódott. Ez a megközelítés lehetővé tette az egyes városrészekre jellemző „legkritikusabb” változási pontok azonosítását, valamint az ilyen események időbeli koncentrációjának vizsgálatát városi léptékben. A stabilitási index és a hosszú távú változás együttes értelmezése érdekében a két mutatót koordináta-rendszerben ábrázoltuk, ahol az x tengelyen a stabilitási index, míg az y tengelyen a 2017 és 2025 közötti EVI-változás szerepelt. A változókat azok mediánértékei mentén osztottuk négy kvadránsra, így biztosítva az adatok kiegyensúlyozott felosztását. Az így létrejövő négy csoport a következő működési típusokat reprezentálja: ① stabil javulás, ② stabil romlás, ③ instabil

with parks, tree-lined streets, or small institutional green areas.

The transitional zone contains mosaic-like mixed-use areas where the degree of built-up intensity and the proportion of vegetation show considerable spatial variability. The inner transitional zone includes partly transforming residential and mixed-function areas connected to the city center, where green infrastructure is becoming increasingly present but remains fragmented. This zone includes large-scale housing estates with relatively high building density (e.g. Széchenyiváros and Hunyadiváros), as well as suburban residential neighborhoods with lower building intensity and larger private gardens (e.g. Petőfiváros and Vacsihegy). In addition, major urban recreational green infrastructure units are located within this zone, such as the Széktó recreational area, including the Benkó Zoltán Leisure Center, the Széktó Stadium, and the Kecskemét Spa complex.

In contrast, the outer transitional zone is characterized primarily by suburban, low-density residential areas where detached housing, gardens, vacant plots, and temporarily utilized land coexist. This zone also contains extensive horticultural and nursery areas, as well as traditional allotment garden systems functioning as transitional landscapes between urban and rural land use. Simultaneously, the zone is strongly affected by industrial and economic transformation processes. Certain parts of the western industrial zone exhibit brownfield characteristics with spontaneous vegetation cover, while the Szent László urban district and the southern industrial zone are undergoing intensive development dominated by industrial halls and logistics facilities. As a result, the outer transitional zone is characterized by functional heterogeneity and rapid spatial transformation.

The outer zone includes sparsely built areas dominated by agricultural, industrial, or semi-natural land uses. Large arable fields, grasslands, forests, and industrial-logistics areas are characteristic of this zone. Although vegetation cover may be relatively high here, its ecological and functional character differs substantially from urban green infrastructure, and depends strongly on agricultural practices and natural vegetation dynamics. Historically significant forest complexes — such as the Nyíri Forest and the Matkó Forest — represent key elements of the city's ecological network. The outer zone also includes large special-use areas such as the military airport and important protected green infrastructure units including the Arboretum and the adjacent locally protected Chapel Meadow.

The delineation of the urban zones was carried out through cartographic interpretation and the evaluation of dominant land-cover characteristics. This classification framework enables a differentiated urban landscape-dynamic interpretation of vegetation changes, while taking into account the structural differences associated with urban spatial position.

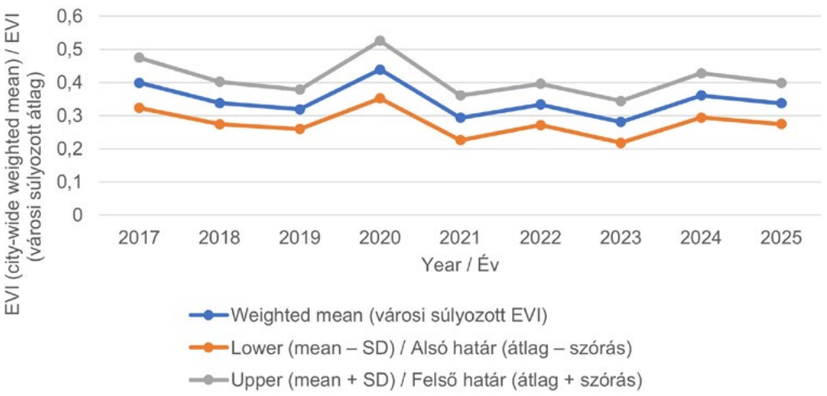
One of the key components of the research was the investigation of the temporal stability and change dynamics of the urban green infrastructure system between 2017 and 2025, based on multi-annual EVI time series calculated for each urban district. The analysis was based on annual mean Enhanced Vegetation Index (EVI) values, which enabled the quantitative assessment of vegetation condition and its temporal evolution. For each urban district, the multi-year time series was used to calculate the mean EVI value and the standard deviation of the series, the latter expressing the magnitude of absolute temporal fluctuation. In order to ensure comparability between urban districts with different vegetation characteristics and spatial structures, variability was also evaluated using the coefficient of variation (CV), representing relative fluctuation normalized by the mean value. Higher CV values indicate stronger temporal variability and consequently lower stability.

The intensity of temporal changes was quantified using the absolute differences between consecutive annual EVI values, expressed through the Mean Absolute Change (MAC) indicator. This metric captures the magnitude of year-to-year changes independently of their direction, making it suitable for characterizing the overall dynamism of the vegetation system. For each urban district, the average of annual MAC values was used as a summary indicator of change intensity. To provide a more comprehensive evaluation of vegetation stability, both the coefficient of variation and the MAC indicator were normalized and combined into a composite Stability Index (SI). Higher SI values indicate more stable vegetation dynamics, whereas lower values represent increasingly unstable behavior. Based on the resulting SI values, urban districts were classified into four categories: stable, moderately stable, dynamic, and unstable.

The direction of long-term vegetation change was determined using the difference between EVI values in 2017 and 2025, allowing the identification of areas

2. ábra/Fig. 2: Városszintű súlyozott átlagos EVI idősor (2017–2025) a kerületek közötti szórással (átlag ± SD) / *City-wide weighted mean EVI time series (2017–2025) with between-district standard deviation (mean ± SD)*

SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*



▸▸2. táblázat/Table 2: Az éghajlati háttér indikátorok, amelyek a kecskeméti éves EVI dinamika értelmezéséhez nyújtanak segítséget (2017–2024) / *Climatic background indicators supporting the interpretation of annual EVI dynamics in Kecskemét (2017–2024)*

SZERZŐK SZERKESZTÉSE A KECSKEMÉTI VÁROSFEJLESZTŐ KFT. ÁLTAL BIZTOSÍTOTT ADATOK ALAPJÁN / *EDITED BY THE AUTHORS BASED ON DATA PROVIDED BY KECSKEMÉTI VÁROSFEJLESZTŐ LTD.*

	Year	Dry periods (n)	Longest dry period (days)	Potential evapotranspiration (mm)	Wet-period precipitation (mm)	Wet-period mean temperature (°C)
Climate indicators supporting EVI interpretation (Kecskemét „Airport" station)	2017	47	20	1019,7	580,1	12,1
	2018	48	26	944,8	508,2	11,2
	2019	48	31	1004,5	466,6	12,1
	2020	50	27	873,9	572,5	14,1
	2021	54	22	996,2	450	12,2
	2022	39	55	1164,1	345,3	12,6
	2023	55	16	991,1	574,8	12,3
	2024	42	40	1157,2	416,1	14,1
Climate indicators supporting EVI interpretation (Kecskemét „K-Puszta" station)	2017	45	22	921,4	638,1	12
	2018	46	26	914,4	470,4	11,1
	2019	61	20	920,1	538,3	11,2
	2020	50	27	819,8	574,9	13,6
	2021	49	23	931,2	456	12,5
	2022	41	30	1062,3	436,8	12,7
	2023	53	16	925,8	635	12,3
	2024	44	40	973,4	408,1	13,5

javulás és ④ instabil romlás. Ez az eljárás lehetővé teszi a zöldinfrastruktúra változásainak nemcsak mérték, hanem dinamikai viselkedés szerinti differenciált értelmezését is.

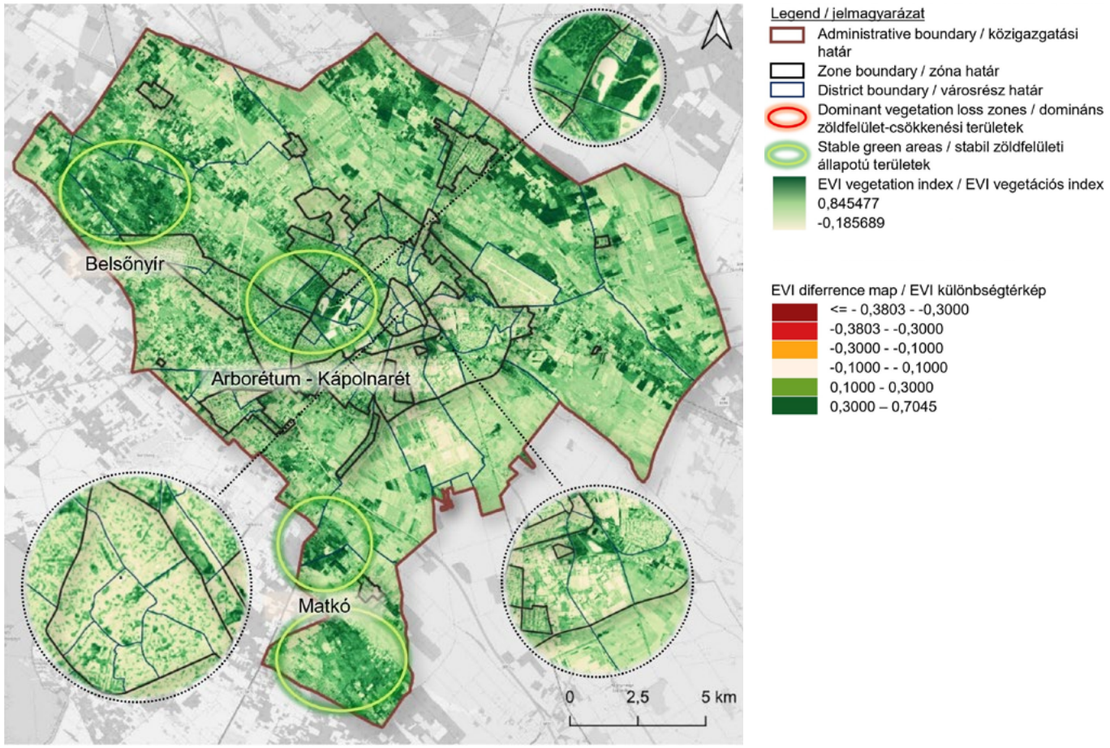
A városrészek zöldfelületi állapotának és annak időbeli dinamikájának együttes értékelése érdekében egy kétdimenziós, integrált elemzési keretet alkalmaztunk, amely az átlagos vegetációs állapot és a stabilitás együttes vizsgálatán alapul. Az elemzés kiindulópontját a 2017 és 2025 közötti időszakra számított átlagos EVI értékek képezték. Ezzel párhuzamosan minden városrészre stabilitási index került meghatározásra, amely az EVI idősorok ingadozását, ezáltal a zöldfelületi rendszer dinamikáját és változékonyságát fejezi ki. A két mutató együttes értelmezése érdekében a városrészeket egy érték–stabilitás mátrixban ábrázoltuk, ahol az X tengelyen az átlagos EVI értékek, míg az Y tengelyen a stabilitási index szerepel. A mátrix kvadránsait az EVI és a stabilitási index mediánértékei határozták meg, amelyek referenciaértékként szolgáltak a városrészek relatív pozíciójának meghatározásához. Ez a megközelítés lehetővé tette, hogy a vizsgált térségek ne abszolút értékek, hanem egymáshoz viszonyított helyzetük alapján kerüljenek értelmezésre. A mátrix alapján a városrészek négy alapvető típusba sorolhatók. A magas EVI-vel és magas stabilitással jellemezhető területek a stabil zöldfelületi magterületek, amelyek a városi zöldinfrastruktúra leginkább kiegyensúlyozott és hosszú távon is fenntartható elemeit képviselik. Ezzel szemben a magas EVI, de alacsony stabilitás kombinációja az értékes, de sérülékeny területeket jelöli, ahol a jelentős zöldfelületi borítottság ellenére erős dinamika és potenciális kitettség figyelhető meg. Az alacsony EVI és magas stabilitás együttese a tartósan alacsony zöldfelületi értékkel rendelkező, ugyanakkor viszonylag állandó állapotú térségekre jellemző. Végül az alacsony EVI és alacsony stabilitás együttes előfordulása az instabil, átalakuló területeket jelöli, ahol a zöldfelületi rendszer mind állapotában, mind dinamikájában kedvezőtlen képet mutat. Az eredmények vizualizálása szórásdiagram segítségével történt, ahol a városrészek pontként jelennek meg, és a kategorizálásnak megfelelően külön színkódot kaptak. A mediánértékek szerint meghúzott tengelyek vizuálisan is elkülönítik a mátrix kvadránsait, így a zöldinfrastruktúra szerkezeti és dinamikai mintázatai egyértelműen azonosíthatóvá válnak. Az alkalmazott módszer jelentősége abban áll, hogy a zöldfelületi rendszert nem kizárólag statikus állapotként, hanem időben változó, dinamikus rendszerként értelmezi.

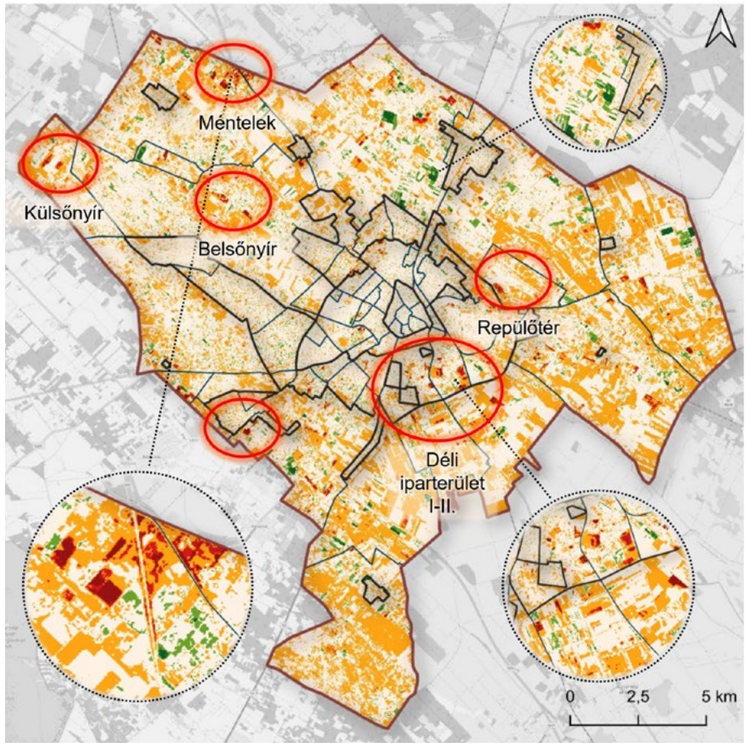
characterized by vegetation gain or vegetation decline. In parallel, the year associated with the largest annual vegetation change was identified for each urban district. This was achieved by selecting the maximum value among the annual absolute EVI differences (MAC values) and assigning it to the year in which the change occurred. This approach enabled the identification of the most critical temporal change points within each urban district, as well as the assessment of the temporal concentration of these events at the city scale.

To interpret the relationship between vegetation stability and long-term vegetation change, the two indicators were visualized within a coordinate system in which the Stability Index was represented on the x-axis and the EVI change between 2017 and 2025 on the y-axis. The variables were divided into four quadrants using their median values, ensuring a balanced distribution of the dataset. The resulting quadrants represent four characteristic types of vegetation dynamics: ① stable improvement, ② stable decline, ③ unstable improvement, and ④ unstable decline. This framework not only enables vegetation changes to be quantified, but also allows their dynamic behavior to be interpreted.

In addition to change-direction analysis, a second integrated analytical framework was developed to jointly evaluate vegetation condition and temporal stability. This approach combined the average vegetation condition and the stability characteristics of each urban district within a two-dimensional value–stability matrix. The mean EVI values calculated for the 2017–2025 period served as indicators of overall vegetation condition, while the Stability Index represented the temporal variability and dynamic behavior of the green infrastructure system. Within the matrix, mean EVI values were plotted along the x-axis and Stability Index values along the y-axis. The quadrants were defined using the median values of both variables, which served as relative reference thresholds. Consequently, urban districts were interpreted not according to absolute values, but according to their relative position within the urban system.

Based on this framework, four principal urban district types were identified. Urban districts characterized by high EVI values and high stability represent stable green infrastructure core areas, forming the most balanced and sustainable elements of the urban green infrastructure network. In contrast, urban districts with high EVI values





3. ábra/Fig. 3: A vegetáció állapotának és változásának térbeli mintázatai az EVI alapján Kecskeméten / *Spatial patterns of vegetation condition and change based on EVI in Kecskemét*
SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

but low stability were classified as valuable but vulnerable areas, where significant vegetation cover coexists with strong temporal dynamism and potential exposure to disturbances. Areas with low EVI values but high stability represent persistently low-green urban districts characterized by relatively constant but structurally weak vegetation conditions. Finally, urban districts with both low EVI values and low stability were interpreted as unstable transitional areas, where both vegetation condition and temporal dynamics indicate an unfavorable and rapidly changing landscape structure.

The results were visualized using scatter plots in which urban districts appear as individual points colored according to their assigned category. The median-based axes visually separate the quadrants of the matrix, allowing the structural and dynamic patterns of the urban green infrastructure system to be identified clearly. The significance of the applied methodology lies in its interpretation of green infrastructure not as a static phenomenon but as a temporally dynamic system. This approach enables the identification of stable green infrastructure cores, the separation of vulnerable yet valuable areas, and the detection of dynamically transforming urban zones, thereby contributing to a deeper understanding of urban landscape dynamics.

3. RESULTS AND INTERPRETATION

The annual EVI time series calculated for the vegetation period indicate that the overall vegetation condition of Kecskemét exhibited a moderate but clearly detectable decline between 2017 and 2025 (Figure 2). The mean EVI value calculated for the entire urban area decreased from 0.399 in 2017 to 0.337 by 2025, suggesting a reduction in overall vegetation activity and vegetation cover during the investigated period.

The temporal pattern of the EVI series was not uniform throughout the investigated period. The exceptionally high EVI values observed in 2020 reflected a temporarily favorable vegetation condition. This interpretation is partly supported by the climatic background data, as both the Kecskemét Airport and Kecskemét-Puszta meteorological stations recorded relatively high precipitation totals during the vegetation period alongside moderate evapotranspiration values in 2020 (Table 2). In contrast, the year 2022 was characterized by substantially lower precipitation totals, higher potential evapotranspiration, and longer dry periods, indicating less favorable conditions for vegetation development.

However, the period between 2021 and 2025 again exhibited lower and more convergent EVI values, suggesting that the peak observed in 2020 should be interpreted as a short-term climatic anomaly rather than a persistent trend reversal. At the same time, the comparison between the EVI time series and the climatic parameters indicates that the relationship cannot be considered fully linear. This suggests that, in addition to climatic drivers, vegetation dynamics are also strongly influenced by urban structural characteristics, land-cover composition, and the spatial fragmentation of the green infrastructure system.

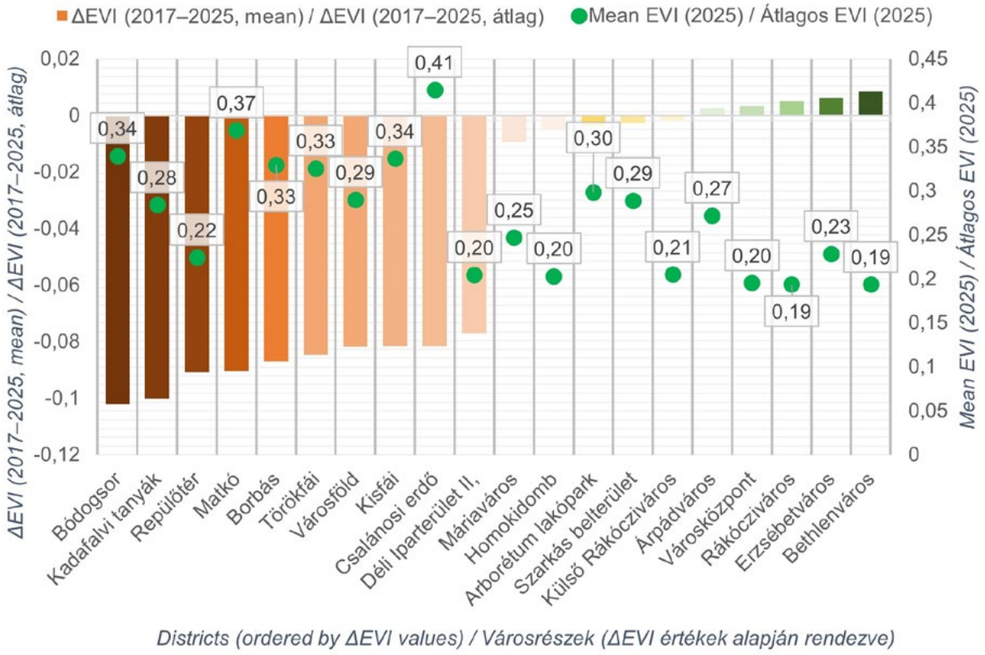
The ΔEVI difference map representing changes between 2017 and 2025 reveals a mosaic-like yet clearly structured spatial pattern (Figure 3). The spatial distribution of vegetation changes largely follows the logic of the urban structure: compact and densely built urban areas remained mostly stable, whereas peripheral and transitional zones exhibit both vegetation gains and losses with varying intensities. Vegetation increase is primarily concentrated within larger continuous forest areas, recreational zones, and certain institutional environments, where biological maturation, increasing canopy biomass, or targeted green infrastructure developments contributed to improving vegetation conditions. These positive changes generally appear as localized but persistent patches within the ΔEVI patterns.

In addition, signs of spontaneous revegetation can also be detected in areas where previous land use was temporarily interrupted and pioneer vegetation colonized exposed surfaces. Such processes are often short-lived; however, from the perspective of urban landscape dynamics, they represent important transitional stages in vegetation succession and land-cover transformation.

In contrast, vegetation loss is associated with more extensive and generally more persistent transformation processes. Industrial and logistics developments emerging in the southern and eastern peripheral zones of the city, together with residential expansion and the extension of transport infrastructure, all contribute to negative ΔEVI values. In these areas, increasing built-up intensity, the expansion of impervious surfaces, and the fragmentation of ecological connectivity generate structural transformations that lead to long-term deterioration in vegetation conditions.

4. ábra/Fig. 4: A kerületszintű vegetációváltozás szélsőséges csoportjai (ΔEVI) 2017 és 2025 között, valamint a megfelelő átlagos EVI értékek 2025-ből (saját szerkesztés): a 10 kerület a legnagyobb csökkenéssel és a 10 kerület a legkisebb csökkenéssel vagy stabil állapotokkal. A negatív értékek a vegetáció hanyatlását jelzik, míg a pozitív vagy nullához közeli értékek az stabilabb állapotokat jelzik / *Extreme groups of district-level vegetation change (ΔEVI) between 2017 and 2025, and corresponding mean EVI values for 2025 (own editing): the 10 districts with the largest decrease and the 10 with the smallest decrease or stable conditions. Negative values indicate vegetation decline, while positive or near-zero values indicate more stable conditions*

SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*
OWN EDITING



Ez lehetővé teszi a stabil zöldinfrastruktúra-magterületek azonosítását, a sérülékeny, de értékes zónák elkülönítését, valamint a dinamikusan átalakuló térségek feltárását, ezáltal közvetlenül hozzájárul a települési tájdinamika folyamatainak mélyebb megértéséhez.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉS

Az éves, vegetációs időszakra számított EVI-idősorok azt mutatják, hogy Kecskemét összváros szintű vegetációs állapota 2017 és 2025 között mérsékelt, de jól érzékelhető csökkenést mutat (2.ábra). A város teljes területére számított átlagos EVI-érték 2017-ben 0,399 volt, míg 2025-re 0,337-re mérséklődött, ami arra utal, hogy a városi növényzet átlagos vitalitása és borítottsága gyengült a vizsgált időszakban.

Az idősor alakulása ugyanakkor nem egyenletes: a 2020-as év kiugróan magas EVI-értéke átmenetileg kedvező vegetációs állapotot tükrözött. Ezt a klimatikus háttéradatok is részben alátámasztják, mivel a 2020-as évben mind a Kecskemét Repülőtér, mind a Kecskemét-Puszta állomás adatai alapján viszonylag magas vegetációs időszaki csapadékösszeg és mérsékelt evapotranszspirációs értékek voltak jellemzők. Ezzel szemben 2022-ben jelentősen alacsonyabb csapadékösszeg, magas potenciális evapotranszspiráció és hosszabb száraz periódusok jelentkeztek, amelyek kedvezőtlenebb vegetációs feltételekre utalnak. A 2023-ban megfigyelt viszonylag alacsony EVI-értékek ugyanakkor arra utalnak, hogy az időjárási tényezők önmagukban nem magyarázzák teljes mértékben a megfigyelt időbeli mintázatokat, mivel az éves EVI-értékeket a termesztett növényzet vitalitása és fenológiai állapota is befolyásolhatja. A 2021 és 2025 közötti időszak ugyanakkor ismét alacsonyabb, egymáshoz közelítő EVI-értékeket eredményezett, ami arra utal,

Within the city center and large housing-estate districts, vegetation decline appears to be on a smaller scale in spatial terms, but remains clearly detectable, mainly as a consequence of pavement expansion, parking developments, and increasingly intensive land use.

The district-level EVI statistics provide further opportunities for refining the interpretation of urban landscape dynamic patterns. The Arboretum–Chapel Meadow area and the larger forest blocks — particularly the Nyíri Forest and the Csalánosi Forest — consistently exhibited high EVI values throughout the investigated period, although even these areas showed a moderate decline within the time series.

In suburban residential and garden-city districts characterized by medium EVI levels, interannual fluctuations were considerably stronger. Beyond the mosaic-like nature of land cover, this variability also reflects higher climate sensitivity and the rapid responsiveness of these areas to land-use changes. In densely built urban districts, such as the City Center or Bethlenváros, low EVI values are primarily structural in origin, while the amplitude of temporal changes remains relatively limited due to the restricted opportunities for creating or expanding green spaces (Figure 5).

Dynamic transitional zones — particularly the Airport area, Homokbánya, and the economic-industrial districts — clearly function as "indicator spaces" of urban landscape dynamics. These areas simultaneously experience development pressure, spontaneous revegetation, continuous land-cover transformation, and increasing green-space fragmentation, all of which result in pronounced fluctuations within the EVI time series. Consequently, these zones provide a clear spatial imprint of urban processes and economic development dynamics.

The zone-based EVI time series quantitatively reinforce these observed patterns. The inner urban zone remained practically stable throughout the investigated period (ΔEVI ≈ +0.003), whereas the transitional zones exhibited moderate decline, with the outer zone showing a more pronounced decrease (ΔEVI ≈ −0.126) (Figure 6).

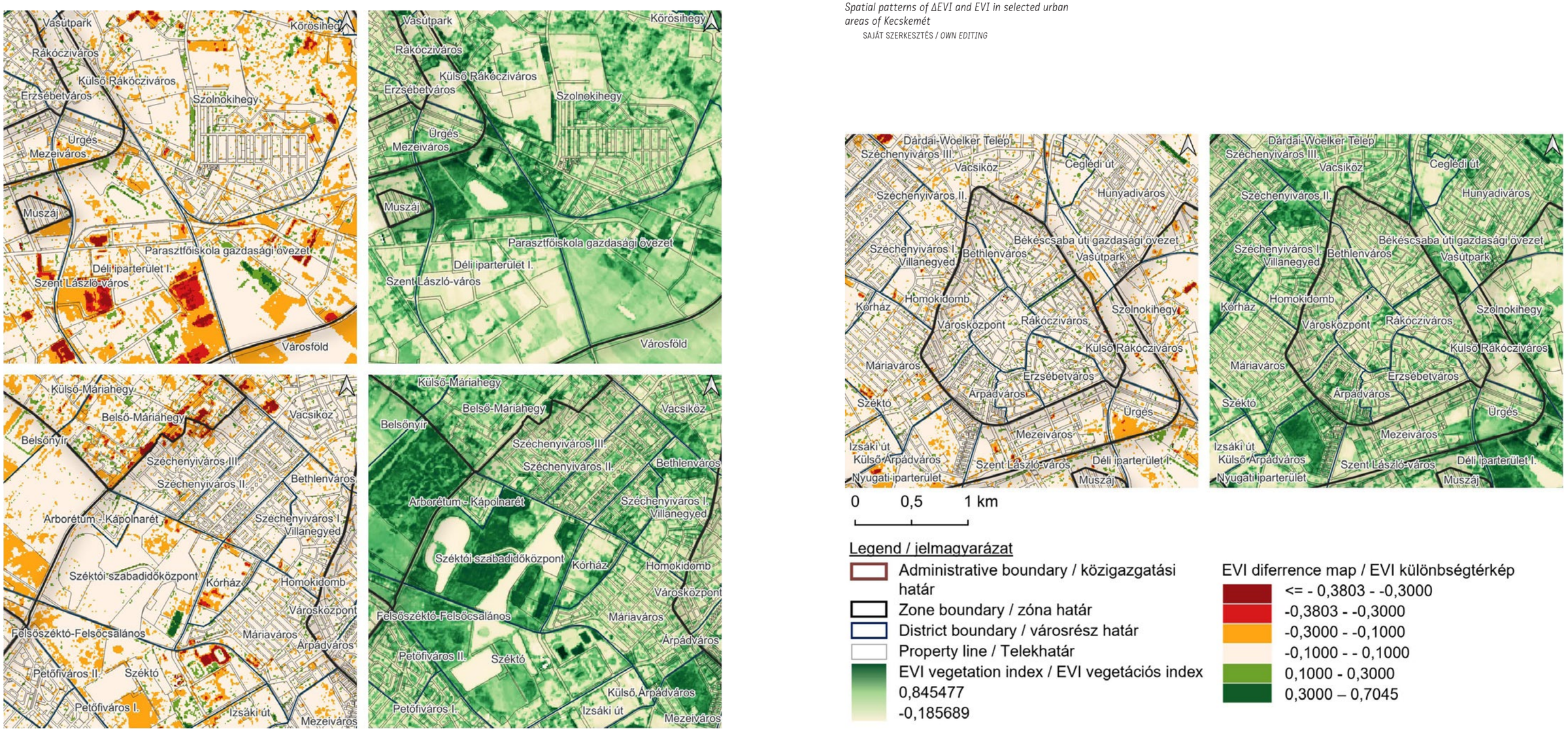
Overall, the ΔEVI-based analysis highlights that the urban landscape dynamics of Kecskemét can be interpreted as the result of complex, multi-layered processes. While vegetation gain typically appears as fine-scale, mosaic-like, and often temporary change, vegetation loss is generally associated with more structural and persistent transformations. Positive changes are mostly linked to biological maturation processes or localized green infrastructure developments, whereas negative trends are primarily connected to large-scale urbanization processes. Accordingly, vegetation indices reflect not only vegetation conditions themselves, but also function as sensitive indicators of urban spatial processes and environmental pressures. This enables the identification of both development potentials and vulnerability hotspots within the urban green infrastructure system, as well as the spatial expansion or contraction of vegetated areas.

Based on the Stability Index, the urban districts of Kecskemét exhibited substantial differences in the temporal behavior of their EVI time series. Of the 83 investigated districts, 33 were classified as stable, 30 as moderately stable, 18 as dynamic, and two as unstable (Figure 7). These results indicate that the majority of districts did not display chaotic temporal behavior, but rather relatively balanced temporal patterns. However, such stability does not necessarily imply favorable ecological processes.

The combined evaluation of stability categories and net EVI change between 2017 and 2025 revealed four principal vegetation change trajectories. The largest group was represented by stable decline, comprising 60 urban districts. In these districts, EVI values decreased over time, but the decline occurred in a relatively balanced and consistent manner. This suggests that vegetation deterioration in many parts of the city was not driven by sudden episodic events, but rather by persistent structural processes.

A total of 18 districts belonged to the unstable decline category. In these areas, negative vegetation trends were accompanied by stronger temporal fluctuations, indicating more intensive land-use transformation, higher climatic sensitivity, or rapid land-cover changes. This category includes, among others, Bódogsor, the Airport district, Matkó, Törökfái, Városföld, Kisfái, Belsőnyír, Széktó, Szeleifalu, Kósafalu, Izsáki Road, Kossuthváros, and the Alsószéktó allotment garden area.

Positive vegetation trends were identified in only five districts. Of these, three exhibited stable improvement: Árpádváros, the City Center, and Erzsébetváros. Two districts — Rákócziváros and Bethlenváros — were classified as areas of fluctuating improvement, meaning that positive net vegetation change was accompanied by stronger interannual variability. The low number of positively changing districts indicates that vegetation decline represented the dominant overall trend within the city during the investigated period.



5. ábra/Fig. 5: A ΔEVI és EVI térbeli mintázatai Kecskemét kiválasztott városi területein / *Spatial patterns of ΔEVI and EVI in selected urban areas of Kecskemét*
SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

hogy a 2020-as kiugrás inkább rövid távú klimatikus anomáliaként, semmint tartós trendfordulóként értelmezhető. Az EVI-idősor és a klimatikus paraméterek összevetése alapján ugyanakkor a kapcsolat nem tekinthető teljesen lineárisnak, ami arra utal, hogy a vegetációdinamikát a klimatikus tényezők mellett a városszerkezet, a felszínborítás és a zöldfelületi fragmentáció térbeli sajátosságai is jelentősen befolyásolják.

A 2017 és 2025 közötti ΔEVI különbségtérkép mozaikos, de jól strukturált mintázatot rajzol ki (3. ábra). A városi zöldfelületi változások térbeli eloszlása követi a városszerkezet logikáját: míg a kompakt, sűrű beépítésű területek többnyire stabilak maradtak, addig a peremi és átmeneti övezetekben egyaránt megjelennek a növekedés és csökkenés foltjai, eltérő intenzitással. A zöldfelület-nyereség leginkább a nagyobb összefüggő erdőterületeken, rekreációs zónákban és egyes intézményi környezetekben jelentkezik, ahol a biológiai beérés, a meglévő állományok lombtömeg-gyarapodása vagy a célzott zöldfelület-fejlesztések éreztetik hatásukat. Ezek a változások többnyire foltszerűen, de tartósan jelennek meg a ΔEVI-értékekben. Emellett a spontán revegetáció

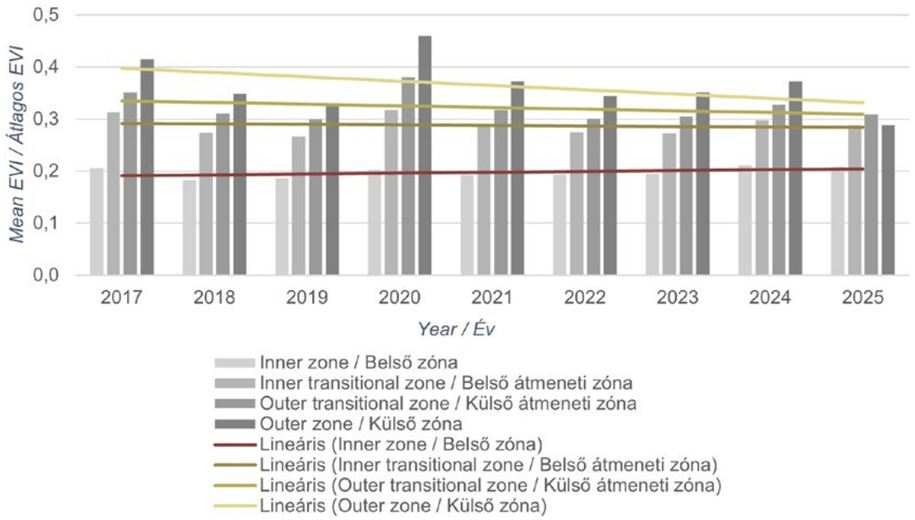
The strongest net EVI declines were observed in Bódogsor (−0.102), Kadafalvi tanyák (−0.100), the Airport district (−0.091), Matkó (−0.090), Borbás (−0.087), Törökfái (−0.085), Városföld (−0.082), Kisfái (−0.082), the Csalánosi Forest (−0.082), and Southern Industrial Area II (−0.077). These results indicate that the most significant vegetation losses are primarily associated with outer and transitional zones characterized by agricultural, forested, industrial, or economic land-use functions.

The temporal distribution of the largest annual EVI changes also displayed a strongly concentrated pattern. In most districts, the largest annual change occurred in 2021 (30 districts), followed by 2020 (21 districts) and 2022 (20 districts). This means that the major breakpoints within the district-level EVI time series were predominantly concentrated within the 2020–2022 period. In 71 out of the 83 investigated districts, the most significant annual change occurred during these three years, suggesting the influence of city-scale or regional drivers such as climatic extremes, drought events, and rapid land-use transformations.

In addition to these broader-scale processes, several micro-scale and point-like urban structural changes could

6. ábra/Fig. 6: Átlagos EVI idősor (2017–2025) kecskeméti város szerkezeti zónái szerint / *Mean EVI time series (2017–2025) by urban structural zone in Kecskemét*
SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

▸▸7. ábra/Fig. 7: A vegetációdinamika stabilitása Kecskeméti városi kerületei között / *Stability of vegetation dynamics across urban districts of Kecskemét*
SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

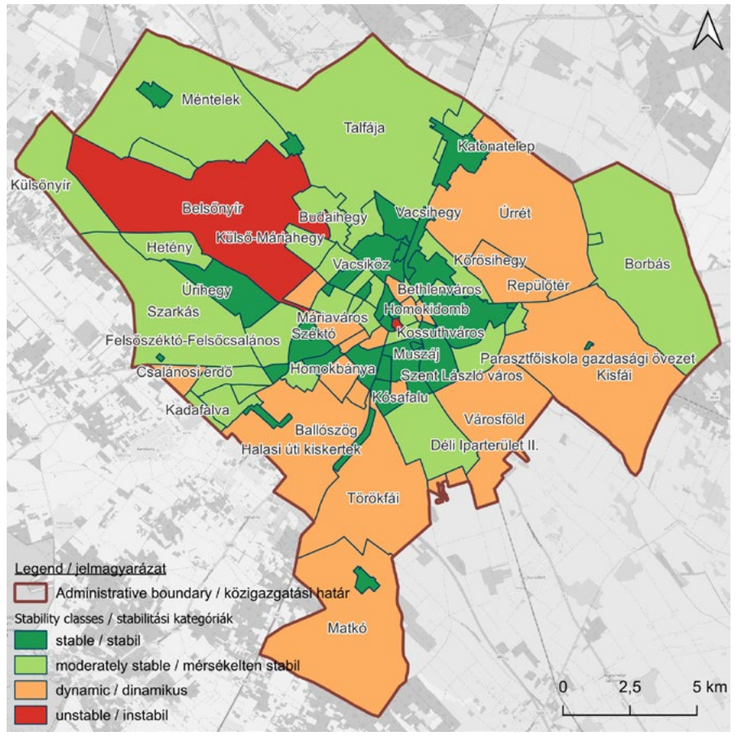


is érzékelhető olyan területeken, ahol a korábbi használat átmenetileg megszakadt, és a felszínt pionír növényzet foglalta el; ezek a változások gyakran rövid életűek, de a tájdinamika szempontjából fontos átmeneti állapotokat jeleznek.

Ezzel szemben a zöldfelület-veszteség kiterjedtebb és többnyire tartósabb folyamatokhoz kötődik. A város déli és keleti peremzónáiban megjelenő ipari és logisztikai fejlesztések, a lakóterületi terjeszkedés, valamint a közlekedési infrastruktúra bővítése egyaránt hozzájárulnak a negatív ΔEVI-értékek megjelenéséhez. Ezekben a térségekben a beépítés, a burkolt felszínek növekedése és az ökológiai kapcsolatok megszakadása olyan szerkezeti változásokat eredményez, amelyek a vegetációs állapot tartós romlását idézik elő. A belvárosi és lakótelepi területeken a zöldfelületek csökkenése kisebb léptékben, de érzékelhetően jelenik meg, főként burkolatbővítések, parkolófejlesztések vagy intenzívebb térhasználat következtében.

A városrészi EVI-statisztikák további finomításra adnak lehetőséget a tájdinamikai mintázatok értelmezésében. Az Arborétum – Kápolna-rét területe és a nagy erdőtömbök (különösen a Nyíri-erdő és a Csalánosi erdő) tartósan magas EVI-értékeket mutattak, ugyanakkor az idősorban ezekben a térségekben is érzékelhető volt egy mérsékelt visszaesés. A közepes EVI-szintet mutató kertvárosias és lakóövezetekben az évek közötti ingadozás jóval erősebb, ami a felszínborítás mozaikosságán túl a klímaérzékenység és a területhasználati változások gyors reakcióképességét is tükrözi. A sűrűn beépített városrészek (például a Városközpont vagy Bethlenváros) esetében az alacsony EVI-értékek szerkezeti eredetűek, és a változási amplitúdó is kisebb, mivel a zöldfelület-teremtés lehetősége korlátozott (5. ábra).

A dinamikus átmeneti zónák – különösen a Repülőtér, a Homokbánya térsége és a gazdasági övezetek – egyértelműen a települési tájdinamika „indikátor-terei". Itt egyszerre jelentkezik a beépítési nyomás, a spontán revegetáció, a felszínborítás folyamatos változása és a zöldterület-fragmentáció, ami az EVI-idősorban is markáns ingadozásokat eredményez. Ezek a zónák jól mutatják a városi működés és a gazdasági fejlesztések térbeli lenyomatait. A zónák szerinti EVI-idősorok kvantitatív módon is megerősítik a leírt folyamatokat: a belső zóna gyakorlatilag stabil maradt (ΔEVI ≈ +0,003), míg az átmeneti zónákban mérsékelt csökkenés figyelhető meg, amely a külső

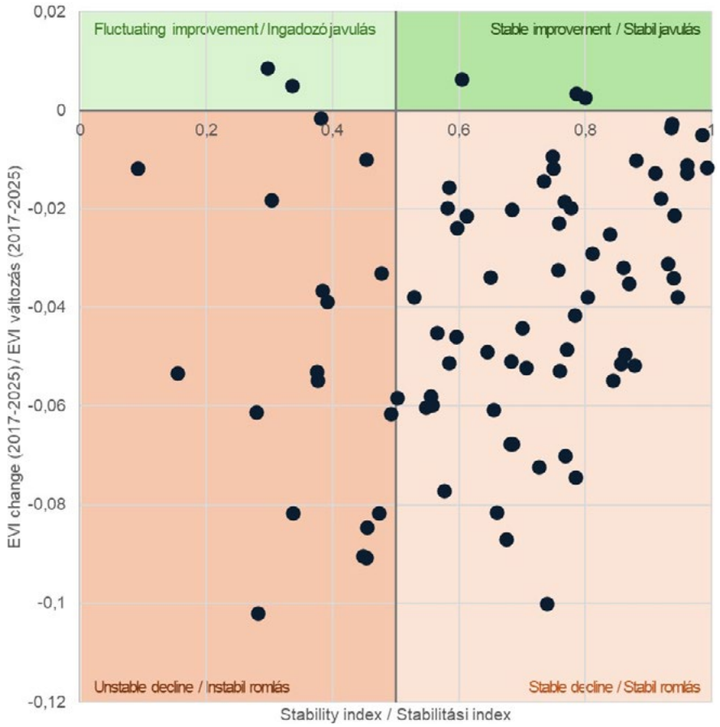


also be identified. In densely built inner-city districts — such as Bethlenváros and Erzsébetváros — even the development of individual vacant lots resulted in clearly detectable changes in annual vegetation values. In such compact urban fabrics, even relatively small vegetation losses appear as proportionally significant changes within the EVI statistics. Similarly pronounced but more linear changes were observed along the Izsáki Road, associated with its widening into a four-lane road, as well as in the Belsőnyír area, owing to the construction of the Hetény connector road. In other districts — including Szeleifalu, Alsószéktó, and Ballószög — the observed EVI changes were closely related to newly developed residential complexes, such as the Ózon Residential Park and the Green Residential Park, together with the intensive land-use transformations associated with these developments.

One particularly important result is that stability does not necessarily correspond to favorable ecological conditions. For example, Southern Industrial Area I was classified as stable despite exhibiting negative EVI change between 2017 and 2025. This indicates that vegetation decline in the district did not occur through irregular fluctuations, but rather as a relatively uniform and persistent process. This "stable decline" type is especially important from the perspective of urban landscape dynamics, as it may indicate ongoing structural degradation.

Based on the value–stability matrix, the 83 investigated urban districts can be classified into four clearly distinguishable types. The majority of districts belonged either to the "valuable but vulnerable" or the "persistently low" categories, each comprising 24 districts. Stable green infrastructure core areas accounted for 18 districts, while 17 districts were classified as unstable/transitional areas. These results suggest that the urban green infrastructure system of Kecskemét is not differentiated solely by high or low EVI values but is also significantly structured by temporal stability patterns.

The stable green infrastructure core areas include districts characterized by both relatively high average EVI values and high stability indices. These include, among others, Külsőnyír, Kisfái belterület, the Halasi Road allotment gardens, Katonatelepi tanyák, Talfája, Úrihegy, Vacsihegy, Széchenyiváros I, and the Széktó recreational area. These districts not only exhibit comparatively high vegetation values, but also display balanced temporal behavior, allowing them to be interpreted as stable

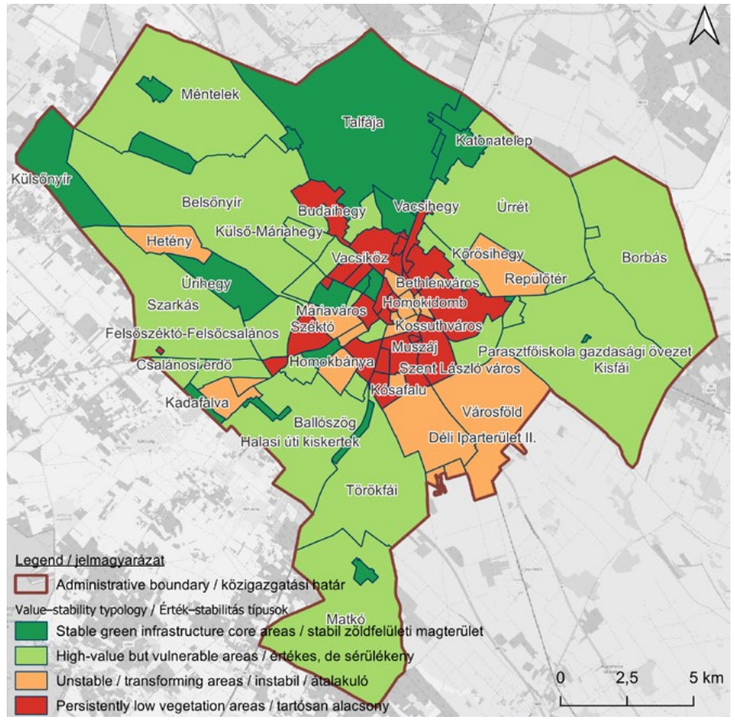


zónában markáns visszaeséssé erősödik (ΔEVI ≈ −0,126) (6. ábra).

Összességében a ΔEVI-alapú vizsgálat rávilágít arra, hogy Kecskemét települési tájdinamikája összetett, többszintű folyamatok eredőjeként értelmezhető. Míg a zöldfelület-nyereség jellemzően finommozaikos és sok esetben átmeneti, addig a zöldfelület-veszteség gyakran szerkezeti és tartós. A pozitív változások többnyire biológiai vagy lokális fejlesztési eredetűek, a negatív tendenciák pedig nagyléptékű urbanizációs folyamatokhoz kapcsolódnak. Ennek megfelelően a vegetációs indexek nemcsak a növényzet állapotát tükrözik, hanem a városi tér működésének és terhelésének érzékeny indikátorai is, amelyek lehetővé teszik a zöldinfrastruktúra fejlődési és sérülékenységi pontjainak, valamint térbeli növekedésének és csökkenésének (területi kiterjedésének, illetve visszahúzódásának) azonosítását.

A stabilitási index alapján Kecskemét városrészei jelentős különbségeket mutattak az EVI-idősorok időbeli viselkedésében. A 83 vizsgált városrész közül 33 stabil, 30 mérsékelten stabil, 18 dinamikus, míg 2 instabil kategóriába került (7.ábra). Ez azt jelzi, hogy a városrészek többsége nem hektikus, hanem viszonylag kiegyenlített időbeli mintázatot mutatott, ugyanakkor ez nem feltétlenül jelent kedvező ökológiai folyamatot.

A stabilitási kategóriák és a 2017–2025 közötti nettó EVI-változás együttes vizsgálata alapján négy fő változási pálya különíthető el. A legnagyobb csoportot a stabil romlás alkotta: 60 városrész tartozott ide. Ezekben a városrészekben az EVI csökkent, de a csökkenés viszonylag kiegyenlített módon zajlott. Ez arra utal, hogy a vegetációs állapot romlása sok esetben nem hirtelen, epizodikus esemény, hanem tartós, szerkezeti jellegű folyamat. Az instabil romlás kategóriába 18 városrész került. Ezekben a negatív irányú változás erősebb időbeli ingadozással párosult, ami intenzívebb területhasználati átalakulásra, klimatikus érzékenységre vagy gyors felszínborítás-váltásokra utalhat. Ide sorolható többek között Bódogsor, Repülőtér, Matkó, Törökfái, Városföld, Kisfái, Belsőnyír, Széktó, Szeleifalu, Kósafalu, Izsáki út, Kossuthváros, valamint az Alsószéktói kiskertek. Pozitív irányú változás mindössze 5 városrészben jelent meg. Ezek közül 3 stabil javulást mutatott: Árpádváros, Városközpont és Erzsébetváros. Két városrész – Rákócziváros és Bethlenváros – az ingadozó javulás kategóriába került, vagyis ezekben a pozitív nettó változás erősebb éves kilengésekkel társult.



◂◂**8. ábra/Fig. 8:** A vegetációdinamika stabilitása és a hosszú távú EVI változás (2017–2025) közötti kapcsolat Kecskeméti kerületei között. A kék pontok az egyes kerületek értékeit reprezentálják / *Relationship between vegetation dynamics stability and long-term EVI change (2017–2025) across Kecskemét's urban districts. Blue points represent the individual values of the urban districts*

SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

9. ábra/Figure 9: Érték–stabilitás tipológia a zöld infrastruktúráról Kecskeméti város kerületei között az átlagos EVI (2017–2025) és a stabilitási index alapján / *Value–stability typology of green infrastructure across the urban districts of Kecskemét based on mean EVI (2017–2025) and stability index*

SAJÁT SZERKESZTÉS / *OWN EDITING*

structural elements of the urban green infrastructure network.

The valuable but vulnerable category includes several districts with high EVI values but pronounced temporal variability. Particularly notable is the Arboretum–Chapel Meadow area, which exhibited the highest average EVI value within the entire dataset while simultaneously displaying lower stability. Similar characteristics were observed in the Csalánosi Forest, Kőrösihegy, Szarkás, Ürrét, Homokbánya, Belsőnyír, and the Alsószéktó allotment gardens. These areas represent highly valuable vegetation systems, but can be considered more vulnerable due to their stronger temporal fluctuations.

The persistently low category includes districts characterized by relatively low average EVI values but comparatively stable temporal behavior. Examples include the City Center, Árpádváros, Hunyadiváros, Petőfiváros I–II, Széchenyiváros II–III, Rendőrfalu, Máriaváros, Homokidomb, as well as several industrial and transitional areas. In these districts, the dominant pattern is not rapid vegetation decline, but rather a persistently low baseline level of green infrastructure.

Finally, the unstable/transitional category represents the most dynamically changing and landscape-dynamically active districts. This group includes the Airport district, Városföld, Southern Industrial Area II, Széktó, Kadafalva, Szeleifalu, the Békéscsaba Road economic zone, Mezeiváros, Izsáki Road, Kossuthváros, Külső Rákócziváros, Rákócziváros, Erzsébetváros, and Bethlenváros. In these districts, relatively low EVI values are accompanied by low stability, indicating more intensive transformation processes, changing land use, and structural modification within the green infrastructure system.

Overall, the results demonstrate that high EVI values alone do not necessarily indicate stable green infrastructure conditions. Several areas with outstanding vegetation values — such as the Arboretum–Chapel Meadow area and the Csalánosi Forest — were classified as valuable but vulnerable due to their stronger temporal variability. In contrast, some districts with more moderate EVI values exhibited considerably more stable temporal behavior. These findings confirm that the evaluation of urban green infrastructure conditions requires the combined assessment of both average vegetation indices and temporal stability patterns.

A pozitív változások alacsony száma arra utal, hogy a vizsgált időszakban a város egészében a zöldfelületi állapot romlása dominált.

A legerősebb nettó EVI-csökkenést Bódogsor (–0,102), Kadafalvi tanyák (–0,100), Repülőtér (–0,091), Matkó (–0,090), Borbás (–0,087), Törökfái (–0,085), Városföld (–0,082), Kisfái (–0,082), Csalánosi erdő (–0,082) és Déli Iparterület II. (–0,077) mutatta. Ezek alapján a legerősebb veszteségek elsősorban a külső, átmeneti, mezőgazdasági, erdős és ipari-gazdasági karakterű térségekhez kapcsolódnak. A legnagyobb éves ugrások időbeli eloszlása szintén koncentrált mintázatot mutatott. A legtöbb városrészben a legnagyobb változás 2021-ben jelentkezett (30 városrész), ezt követte 2020 (21 városrész) és 2022 (20 városrész). Ez azt jelenti, hogy a városrészi EVI-idősorok legnagyobb töréspontjai döntően a 2020–2022 közötti időszakra koncentrálódtak. A 83 városrészből 71 esetében ebben a három évben történt a legnagyobb éves változás, ami városszintű vagy regionális hatások – például klimatikus szélsőségek, aszály, illetve gyors területhasználati átalakulások – szerepére utalhat. A nagyobb léptékű folyamatok mellett ugyanakkor több esetben mikroléptékű, pontszerű városszerkezeti változások is azonosíthatók voltak. A belvárosi, magas beépítettségű városrészekben – például Bethlenvárosban vagy Erzsébetvárosban – akár egy-egy foghíjtelek beépülése is jól érzékelhető változást eredményezett az éves vegetációs értékekben, mivel ezekben a kompakt városszövetű területekben már kis zöldfelület-veszteség is aránylag jelentős relatív változásként jelenik meg. Hasonlóan markáns, de lineáris jellegű változás figyelhető meg az Izsáki út négysávosításához kapcsolódó útszélesítés esetében, illetve a Belsőnyír térségében a Hetényi bekötőút kiépítésével összefüggésben. Más városrészekben – például Szeleifalu, Alsószéktó vagy Ballószög esetében – az EVI-változások hátterében új lakópark-fejlesztések (pl. Ózon Lakópark, Green Lakópark) és az ezekhez kapcsolódó intenzív területhasználati átalakulások azonosíthatók.

Különösen fontos eredmény, hogy a stabilitás nem azonos a kedvező állapottal. Például a Déli iparterület I. stabil kategóriába került, ugyanakkor 2017 és 2025 között negatív EVI-változást mutatott. Ez azt jelenti, hogy a zöldfelületi állapot romlása nem ingadozó, hanem viszonylag egyenletes, tartós folyamatként jelent meg. Ez a „stabil romlás" típus a települési tájdinamika szempontjából különösen fontos, mert szerkezeti degradációra utalhat.

Az érték–stabilitás mátrix alapján a vizsgált 83 városrész négy, jól elkülöníthető típusba sorolható. A legtöbb városrész az „értékes, de sérülékeny" és a „tartósan alacsony" kategóriába került, mindkét csoport 24–24 városrészt foglal magában. A stabil zöldfelületi magterületek száma 18, míg az instabil / átalakuló kategóriába 17 városrész tartozik. Ez arra utal, hogy Kecskemét városrészi zöldfelületi rendszere nem egyszerűen magas vagy alacsony EVI-értékek szerint tagolódik, hanem az időbeli stabilitás alapján is jelentősen differenciált. A stabil zöldfelületi magterületek közé azok a városrészek kerültek, amelyek az átlagos EVI és a stabilitási index alapján egyaránt kedvező helyzetűek. Ide tartozik többek között Külsőnyír, Kisfái belterület, Halasi úti kiskertek, Katonatelepi tanyák, Talfája, Úrihegy, Vacsihegy, Széchenyiváros I. és a Széktói szabadidőközpont. Ezek a területek nemcsak viszonylag magas vegetációs értékeket mutatnak, hanem időben is kiegyensúlyozottabbak, ezért a városi zöldinfrastruktúra stabil elemeiként értelmezhetők.

Az értékes, de sérülékeny kategóriába több magas EVI-értékű, ugyanakkor erősen változékony városrész került. Különösen kiemelkedik az Arborétum – Kápolnarét, amely a teljes adatsor legmagasabb átlagos EVI-értékét mutatja, ugyanakkor stabilitási indexe alacsonyabb. Hasonlóan ebbe a csoportba tartozik a Csalánosi erdő, Kőrösihegy, Szarkás, Úrrét, Homokbánya, Belsőnyír és Alsószéktói kiskertek. Ezek a területek zöldfelületi szempontból kiemelkedő értéket képviselnek, de az idősoros ingadozás miatt sérülékenyebbnek tekinthetők. A tartósan alacsony kategória olyan városrészeket foglal magában, ahol az EVI-átlag alacsonyabb, ugyanakkor az állapot viszonylag stabil. Ide sorolható például a Városközpont, Árpádváros, Hunyadiváros, Petőfiváros I–II., Széchenyiváros II–III., Rendőrfalu, Máriaváros, Homokidomb, valamint több ipari vagy átmeneti jellegű terület. Ezek esetében nem elsősorban gyors romlás, hanem inkább tartósan alacsony zöldfelületi alapállapot figyelhető meg. Az instabil / átalakuló kategória a leginkább problémás, tájdinamikailag aktív városrészeket jelöli. Ide tartozik többek között a Repülőtér, Városföld, Déli Iparterület II., Széktó, Kadafalva, Szeleifalu, Békéscsabai úti gazdasági övezet, Mezeiváros, Izsáki út, Kossuthváros, Külső Rákócziváros, Rákócziváros, Erzsébetváros és Bethlenváros. Ezekben a városrészekben az alacsonyabb EVI-értékek alacsonyabb stabilitással társulnak, ami a zöldfelületi rendszer erőteljesebb átalakulására, használati vagy szerkezeti változásokra utalhat.

4. DISCUSSION

One of the most important limitations of this study is related to the temporal resolution of the applied dataset. Although annual EVI composites are suitable for identifying general trends, the number and temporal distribution of observations within individual years may significantly influence the accuracy of the results. In some years — particularly in 2018 — the number of available cloud-free images was limited, especially during the early part of the vegetation period, which may reduce the representativeness of the annual mean values. Therefore, the density and temporal uniformity of sampling within the vegetation season are critical factors affecting the reliability of the analysis.

An additional methodological challenge arises from the differing behavior of various land-use categories. In agricultural areas, EVI values strongly depend on crop type and phenological cycle. For example, winter wheat may maintain green cover outside the main vegetation season, potentially distorting annual averages when the analysis is restricted to the growing season only. Furthermore, bare soil and surfaces covered by dead or desiccated vegetation often exhibit similar spectral characteristics, meaning that low EVI values cannot always be interpreted as complete vegetation loss.

This issue is particularly relevant in the agricultural outskirts of Kecskemét, where drought and heat-stress conditions have increasingly caused crops such as wheat and maize to dry out completely or become partially scorched by the end of the summer season. Under these conditions, the spectral response of the surface may resemble that of bare soil, resulting in a significant decrease in EVI values. However, the surface is not entirely devoid of vegetation, since plant residues — including stems and leaf material — remain present. Although these remnants no longer contribute to photosynthetic activity, they may still provide certain ecological functions, such as partial soil protection, reduction of dust emission, and mitigation of surface erosion. This phenomenon highlights that low EVI values do not necessarily indicate complete ecological degradation, but may instead reflect a specific transitional or stress-induced surface condition.

In urban environments, additional uncertainties arise from the spectral behavior of certain artificial surfaces. Some building roofs — particularly those with unusual colors or materials, such as the turquoise roof structure of the Katona József Library — may produce distorted EVI values that fall outside the theoretical –1 to +1 range or influence the surrounding pixels.

Another important source of uncertainty is the strong influence of annual weather conditions on mean EVI values. Drought periods — such as the extreme conditions observed in 2022 — may lead to substantial decreases in EVI, whereas wetter years can temporarily increase vegetation activity. Consequently, changes observed in the time series cannot always be attributed solely to land-use or structural transformations, but are partly driven by climatic variability.

Similarly, ΔEVI values cannot always be interpreted unambiguously. Negative values do not necessarily indicate permanent green-space loss, while positive values may also reflect short-term or temporary vegetation growth. This is particularly characteristic of transitional urban zones, where construction activities and spontaneous revegetation may occur simultaneously.

One of the most important directions for further research is the combined application of multiple vegetation and surface indicators. In addition to EVI, the integration of indices such as NDVI, NDBI, NDMI, or NDWI could provide a more comprehensive interpretation of land-cover and environmental conditions. Because of their different sensitivities, these indices would allow more precise differentiation between built-up surfaces, moisture conditions, and vegetation types. Their combined application could improve the reliability of the results and support a more complex assessment of processes such as green-space transformation, land-cover change, and urban heat island effects.

Moreover, the use of datasets with higher temporal resolution — involving more observations within individual years — could significantly improve the accuracy of the analyses, especially in agricultural and transitional areas. In some cases, extending the analysis beyond the vegetation period may also be justified for certain land-use categories.

Additional improvements could be achieved through the integration of high-resolution satellite imagery, field observations, and photographic documentation, which would support the validation of the spectral-based results.

Overall, EVI-based analysis provides an effective tool for investigating urban landscape dynamics; however, it must be recognized that remote sensing indicators are

Összességében az eredmények azt mutatják, hogy a magas EVI-érték önmagában nem feltétlenül jelent stabil zöldinfrastruktúra-állapotot. Több kiemelkedő vegetációs értékű terület — például az Arborétum – Kápolnarét vagy a Csalánosi erdő — az értékes, de sérülékeny kategóriába került. Ezzel szemben egyes mérsékeltebb EVI-értékű városrészek stabilabb időbeli viselkedést mutatnak. Ez megerősíti, hogy a városrészi zöldfelületi állapot értékeléséhez az átlagos vegetációs index és az időbeli stabilitás együttes vizsgálata.

4. VITA

A vizsgálat egyik legfontosabb korlátja az alkalmazott adatok időbeli felbontásához kapcsolódik. Bár az éves EVI-kompozitok alkalmasak az általános trendek kimutatására, az egyes éveken belüli megfigyelések száma és időbeli eloszlása jelentősen befolyásolhatja az eredmények pontosságát. Egyes években – például 2018 esetében – a rendelkezésre álló felvételek száma korlátozott volt, különösen a vegetációs időszak elején, ami csökkentheti az éves átlagértékek reprezentativitását. A vegetációs időszakon belüli mintavételezés sűrűsége és egyenletessége ezért kulcsfontosságú tényező.

További módszertani kihívást jelent a különböző területhasználati kategóriák eltérő viselkedése. A mezőgazdasági területek esetében az EVI-értékek erősen függnek a termesztett kultúrák típusától és fenológiai ciklusától. Például az őszi vetésű búza a vegetációs időszakon kívül is zöldborítottságot mutathat, ami torzíthatja az éves átlagértékeket, ha az elemzés kizárólag a vegetációs időszakra korlátozódik. A fedetlen talaj és az elhalt vagy kiszáradt növényzettel borított felszín spektrális tulajdonságai gyakran hasonlóak, ezért az alacsony EVI-értékek nem értelmezhetők egyértelműen teljes növényzetvesztésként.

Ez különösen a mezőgazdasági területeken jelent problémát, például Kecskemét külterületi szántóin, ahol az utóbbi években egyre gyakoribb jelenség, hogy a nyári időszak végére – elsősorban az aszályos és hőstresszes körülmények hatására – a kultúrnövények (pl. búza vagy kukorica) állománya teljes mértékben kiszárad, illetve elszenesedik vagy elhal. Ebben az állapotban a felszín spektrális válasza közelíthet a fedetlen talajéhoz, ami az EVI-értékek jelentős csökkenését eredményezi. Ugyanakkor ebben az esetben a felszínt nem teljesen fedetlen talaj alkotja, hanem a növényi maradványok – szár- és levélrészek – továbbra is jelen vannak. Bár ezek már nem járulnak hozzá a fotoszintetikus aktivitáshoz, bizonyos ökológiai funkciókat továbbra is betöltenek, például részleges talajvédelmet biztosítanak, csökkentik a kiporzást és mérséklik a felszíni eróziót. Ez a jelenség rávilágít arra, hogy az alacsony EVI-értékek nem minden esetben jelentenek ökológiai értelemben teljes degradációt, hanem bizonyos esetekben egy sajátos, átmeneti vagy stressz által meghatározott felszínállapotot tükröznek.

A városi környezetben további problémát jelent bizonyos mesterséges felszínek spektrális viselkedése. Egyes épületek tetőfelületei – például speciális szín- és anyaghasználat esetén, mint a Katona József Könyvtár türkiz színű tetőszerkezete – torz EVI-értékeket adhatnak, amelyek nem illeszkednek a −1 és +1 közötti elméleti tartományba, vagy befolyásolják a környező pixelek értékeit.

További bizonytalanságot jelent, hogy az éves átlagos EVI-értékek alakulása erősen függ az adott év időjárási viszonyaitól. Az aszályos időszakok – mint például a 2022-es év – jelentős EVI-csökkenést eredményezhetnek, míg egy csapadékosabb év átmeneti növekedést mutathat. Ez azt jelenti, hogy az idősorokban megjelenő változások nem minden esetben vezethetők vissza kizárólag területhasználati vagy szerkezeti átalakulásokra, hanem részben klimatikus hatások eredményei is lehetnek.

Hasonlóképpen a ΔEVI értékek sem értelmezhetők egyértelműen. A negatív értékek nem minden esetben jelentenek tartós zöldfelület-veszteséget, míg a pozitív értékek mögött is állhat rövid távú vagy átmeneti vegetációs növekedés. Ez különösen az átmeneti zónákban figyelhető meg, ahol az építési tevékenységek és a spontán regeneráció egyidejűleg vannak jelen.

A jelen kutatás továbbfejlesztésének egyik legfontosabb iránya a különböző vegetációs és felszínindikátorok együttes alkalmazása lehet. Az EVI mellett más indexek – például NDVI, NDBI, NDMI vagy NDWI – bevonása lehetővé tenné a felszínborítás és a környezeti állapot komplexebb értelmezését. Az egyes indexek eltérő érzékenysége révén pontosabban elkülöníthetők lennének a beépített területek, a nedvességviszonyok és a különböző vegetációtípusok. Az indexek kombinált alkalmazása nemcsak az eredmények megbízhatóságát növelheti, hanem lehetőséget ad az egyes jelenségek – például a zöldfelületi változások, a felszínborítás átalakulása vagy a városi hősziget-hatás – komplexebb vizsgálatára is.

Ezen túlmenően a nagyobb időbeli felbontású adatsorok alkalmazása – azaz egy éven belül több időpont bevonása – jelentősen javíthatná az elemzések pontosságát, különösen a mezőgazdasági és átmeneti területek

capable of capturing only part of the complexity of real-world processes. Consequently, the interpretation of the results can become fully reliable only through the integrated use of multiple data sources and complementary methodological approaches.

5. CONCLUSIONS

Our results demonstrate that the condition of Kecskemét's urban green spaces showed a moderate but consistent decline between 2017 and 2025, which is clearly reflected in the time series derived from satellite-based vegetation indices. The decrease in citywide EVI values indicates a reduction in the average extent and vitality of vegetation cover during the investigated period. This trend corresponds with the rapid pace of urbanization, the intensive development of peripheral areas, and the increasing environmental pressures characteristic of climate-sensitive urban regions. Based on the ΔEVI difference maps, a distinct spatial pattern emerges in Kecskemét: green-space loss is concentrated primarily in transitional and peripheral zones affected by urban expansion and infrastructure development, whereas stable or positive changes are mainly associated with large contiguous forest areas, recreational zones, and local green-space improvements.

The analysis also highlights that green-space gain and loss do not represent equivalent processes in terms of urban landscape functioning. While positive ΔEVI values often reflect localized, patch-like, or temporary changes — including biological maturation, spontaneous revegetation, or smaller-scale interventions — green-space loss is generally associated with larger spatial extent and more structurally persistent impacts. This contrast suggests that the development and regeneration of urban green infrastructure are considerably more vulnerable and slower processes than urbanization-driven land-cover losses, which frequently transform the urban landscape structure in an irreversible manner.

The analysis of district-level differences further confirms that urban landscape dynamics are not homogeneous but strongly zone-specific. Large green core areas generally exhibit relatively stable conditions, although even these areas show signs of decline related to climatic sensitivity and increasing land-use pressure. Suburban and mosaic-pattern residential areas react more strongly to climatic and socio-spatial processes, while compact inner-city districts display lower amplitudes of change. However, given their already limited green-space base, these densely built-up zones remain particularly vulnerable in the long term. Economic and industrial zones represent the most dynamically changing areas, where strong development pressure and rapid land-cover transformation significantly reshape vegetation patterns.

In conclusion, EVI-based urban green-space analysis proves to be an effective tool for investigating urban landscape dynamics, as it is capable of detecting both structural transformations and more subtle changes in vegetation condition. The method can support urban green infrastructure planning and prioritization, particularly in cities where urbanization pressure and climate change impacts simultaneously influence landscape functioning. The results emphasize that mitigating green-space loss, preserving existing vegetation assets, and implementing targeted ecological interventions are of critical importance for maintaining the long-term resilience of the city. ⦿

This work is licensed under Creative Commons 4.0 standard licenc: CC-BY-NC-ND-4.0.

esetében. A vegetációs időszakon kívüli időszak bevonása szintén indokolt lehet bizonyos területhasználati kategóriák esetében.

További fejlesztési lehetőséget jelent a nagyfelbontású műholdképek, terepi megfigyelések és fotódokumentáció integrálása, amelyek segíthetik a spektrális alapú eredmények validálását.

Összességében az EVI-alapú elemzés hatékony eszköz a városi tájdinamika vizsgálatára, ugyanakkor alkalmazása során figyelembe kell venni, hogy a távérzékelési indikátorok a valóság komplexitásának csak egy részét képesek megragadni. Ennek megfelelően az eredmények értelmezése mindig többféle adatforrás és módszer integrált alkalmazásával válhat teljessé.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Eredményeink azt mutatják, hogy Kecskemét városi zöldfelületeinek állapota a 2017 és 2025 közötti időszakban mérsékelt, de konzisztens gyengülést mutat, amely jól követhető a műholdas vegetációs indexek alapján előállított idősorokból. A város teljes területére számított EVI-értékek csökkenése azt jelzi, hogy a vegetációs borítottság és vitalitás átlagos mértéke romlott ebben az időszakban, ami összhangban áll a gyors ütemű urbanizációval, a peremterületek intenzív fejlesztéseivel és a klímaérzékeny térségekre jellemző növekvő környezeti terheléssel. A ΔEVI különbségtérképek alapján Kecskemét esetében világosan kirajzolódik egy olyan térbeli logika, amely szerint a zöldfelület-veszteség főként a beépítési és infrastrukturális terjeszkedés által érintett, átmeneti és peremi zónákban koncentrálódik, míg a stabilabb vagy pozitív irányú változások inkább a nagy összefüggő erdőterületekhez, a rekreációs zónákhoz és a lokális fejlesztésekhez köthetők.

A vizsgálat arra is rámutat, hogy Kecskemét városi tájrendszerében a zöldfelületi nyereség és veszteség nem egyenértékű folyamatok a városi táj működése szempontjából. Míg a növekedést jelző ΔEVI-értékek sok esetben lokális, foltszerű vagy átmeneti jellegű változásokat tükröznek – legyen szó biológiai beérésről, spontán revegetációról vagy kisebb léptékű beavatkozásokról –, addig a zöldfelület-vesztés általában nagyobb térbeli kiterjedésű és szerkezetileg tartósabb hatásokhoz kötődik. Ez a kettősség azt jelzi, hogy a városi zöldinfrastruktúra fejlődése sérülékenyebb és lassabb folyamat, mint az urbanizáció által előidézett területi veszteségek, amelyek sokszor visszafordíthatatlanul alakítják át a városi tájszerkezetet.

A városrészi különbségek elemzése tovább erősíti azt a felismerést, hogy a települési tájdinamika nem homogén, hanem zónaspecifikus jellegű. A nagy kiterjedésű zöldmag-területek viszonylag stabil állapotot mutatnak, bár ezekben is érzékelhető a klímaérzékenységből és a használati terhelésből fakadó csökkenés. A kertvárosias, mozaikos felszínborítású területek erősebben reagálnak a klimatikus és társadalmi folyamatokra, míg a kompakt belvárosi szövetben a változások amplitúdója csekély, ám az alacsony zöldfelületi alapállapot miatt ezek a zónák hosszú távon különösen sérülékenyek maradnak. A gazdasági és ipari térségek ezzel szemben a legdinamikusabban változó zónák, ahol a beépítési nyomás és a felszínborítási átalakulások gyors egymásutánja erőteljesen formálja a vegetációs mintázatokat.

Összegzésként megállapíthatjuk, hogy az EVI-alapú városi zöldfelületi vizsgálat hatékony eszköz a települési tájdinamika feltárására, mivel képes érzékelni mind a szerkezeti változásokat, mind a vegetációs állapot finomabb módosulásait. A módszer alkalmas arra, hogy támogassa a városi zöldinfrastruktúra-tervezést és -priorizálást, különösen olyan városok esetében, ahol az urbanizációs nyomás és a klímaváltozás hatásai egyidejűleg befolyásolják a táj működését. A vizsgálat eredményei hangsúlyozzák, hogy a zöldfelületi veszteségek mérséklése, a meglévő vegetációs értékek megőrzése és a célzott, ökológiai alapú fejlesztések kiemelt jelentőséggel bírnak a város jövőbeli ellenállóképességének fenntartásában. ⦿

IRODALOM/*BIBLIOGRAPHY*

Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: The spatial dimension. In: Novotny, V. and Brown, P., eds., Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management. London: IWA Publishing, pp. 267–283.

Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. Landscape and Urban Planning, 70(1–2), pp. 21–34.

Aryal, J.; Sitaula, C.; Aryal, S. (2022): NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. Land, 11(3), 351. https://doi.org/10.3390/land11030351

Bürgi, M., Hersperger, A.M. and Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change – current and new directions. Landscape Ecology, 19(8), pp. 857–868.

Dsilva, Nicole. (2025). Comparative NDVI and EVI Analysis of Urban Green Infrastructure in European Cities: Implications for Sustainable Urban Planning.

Erdélyi, R.; Szabó, Z.; Sallay, Á. (2021): The Role of City-Level Green Space Facilities in Municipal Climate Regulation through the Example of Kecskemét. 4D Journal of Landscape Architecture, 59, 72–75. https://doi.org/10.36249/59.5

Erdélyi, R.; Sallay, Á. (2023): The Development History of the Main Square in Kecskemét and the Changing Role of Green Infrastructure. 4D Journal of Landscape Architecture, 67, 72–87. https://doi.org/10.36249/4D.67.4129

Erdélyi, R.; Tóth, B.; Bánhidai, A.; Sallay, Á. (2025): Climate Adaptation Analysis of the Main Square in Kecskemét. 4D Journal of Landscape Architecture, 77, 66–75. https://doi.org/10.36249/4D.77.5956

González-Marín, A.; Garrido-Cumbrera, M. (2025): Assessing urban vegetation inequalities: Assessing urban vegetation inequalities: Methodological insights and evidence. Ecological Informatics, 86, 102987. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102987

Hansen, R. and Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. Ambio, 43(4), pp. 516–529.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote sensing of environment, 83(1-2): 195–213.

Iváncsics, V., & Filepné Kovács, K. (2020). A városi növekedés trendjei és morfológiája magyarországi középvárosok vonzáskörzetében 1990 és 2018 között. 4D Tájépítészeti és Kertművészeti Folyóirat, 57, 16-27. https://doi.org/10.36249/57.2

Jombach, S.; Üsztöke, L.; Hassan, Y.N. (2023): Changes in Green Space Intensity in Budapest's 14th District. 4D Journal of Landscape Architecture, 67, 30–43. https://doi.org/10.36249/4D.67.4188

Jombach, S.; Hassan, Y.N.; Wagner, J.R.; Du, C.; Sölch, B.; Üsztöke, L. (2024):
Changes in Green Space Intensity in Újbuda, Budapest's 11th District. 4D Journal of Landscape Architecture, 74, 2–23. https://doi.org/10.36249/4D.74.6307

Kabisch, N., Qureshi, S. and Haase, D. (2016). Human–environment interactions in urban green spaces – A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. Environmental Impact Assessment Review, 50, pp. 25–34.

Pauleit, S., Liu, L., Ahern, J. and Kazmierczak, A. (2011). Green infrastructure and climate change adaptation. In: Douglas, I., Goode, D., Houck, M.C. and Wang, R., eds., The Routledge Handbook of Urban Ecology. London: Routledge, pp. 272–285.

Takácsné Zajacz, V.; Gecséné Tar, I.; Reith, A.; Tuffaha, A.; Takács, K.; Mikházi, Z.; Sallay, Á. (2025): Measuring Local Climate Effects of Institutional Gardens in Budapest. Land, 14, 1768. https://doi.org/10.3390/land14091768

Turner, M. G., Gardner, R. H. and O'Neill, R. V. (2001) Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4

Van Delm, A.; Gulinck, H. (2011): Classification and quantification of green in the expanding urban and semi-urban complex: Application of detailed field data and IKONOS-imagery. Ecological Indicators, 11(1), 52–60.

https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.06.004Vijith, H.; Dodge-Wan, D. (2020): Applicability of MODIS land cover and Enhanced Vegetation Index (EVI) for the assessment of spatial and temporal changes in strength of vegetation in tropical rainforest region of Borneo. Remote Sensing Applications: Society and Environment,18,100311. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100311

Weng, Q. (2012) Integrating Remote Sensing and GIS: Principles, Methods, and Applications. New York: McGraw-Hill.