

BUDAPEST LOKÁLIS KLÍMAZÓNA-TÉRKÉPE – LCZ BP

LOCAL CLIMATE ZONES MAP OF BUDAPEST

SZERZŐ/BY: SZCZUKA LEVENTE, BÁTHORYNÉ NAGY ILDIKÓ RÉKA, LŐRINCZI REGINA

HTTPS://DOI.ORG/10.36249/62.3

BEVEZETÉS

Budapest lokális klímazónáinak GIS alapú feltárása a város klimatikus összefüggéseinek javítása – megőrzése érdekében különösen indokolt feladat. A városklíma-kutatások egyik fontos alapja a városon belüli lokális klímazónák meghatározása, amelynek alapjait Iain D. Stewart és Tim Oke fektették le.¹ A lokális klímazónák elemei néhány száz métertől néhány kilométerig terjedő területek, amelyek viszonylag egységes felszínborítással, anyagtípusokkal, szerkezettel rendelkeznek.² A városi hősziget jelenség (Urban Heat Island – UHI) mértéke alapvetően a felszínborítottsággal és a beépítés sűrűségével szoros összefüggésben áll.³ A burkolt - beépített felületek (pl. utak, épületek stb.) energiatároló kapacitása általában nagyobb, mint a nem beépített, természetes felületeké (zöldfelületek, vízfelületek), így a napból beérkező hőt jobban raktározzák, majd az esti időszakban a környezetüket fűtve egyenlítik ki a hőkülönbözetüket.⁴ Ebből következően a nagy burkolt felületi aránnyal rendelkező, sűrűn beépített területek a hőszigetelést erősítik, míg a nem beépített területek kiegyenlítő hatással vannak egy város klimatikus viszonyaira.

M. Szilágyi Kinga „A tervezés növekvő szerepe a klímaváltozásra való felkészülésben” című, 4D folyóiratban megjelent cikkében megemlíti a hőszigetelés mérséklésének fontosságát, amely az urbánus és rurális tájban egyaránt képes a kedvezőtlen hatások csökkentésére. A szerző szerint a kutatások és visszajelzések mind azt igazolják, hogy a hazai városok, illetve általánosan véve az urbánus és rurális tájak minősége, élhetősége fokozatosan romlik. Ezúgy konferencia programsorozatot tartottak 2012. áprilisában, amelynek célja a problémákra való rávilágítás, valamint megoldási javaslat keresése volt.⁵ A városi hősziget jelenségét és a település beépítésének függvényét vizsgálta Oláh András Béla, aki olyan módszereket gyűjtött össze a településrendezés számára, ami még a tervezési fázisban segíthet egy tervezési terület, térség hőmérsékleti és légköri viszonyait kiszámítani. Oláh szerint a települések hőmérséklet-változásaira alapvetően hatással van a városi hőszigetjelenség és a városi légköri szoros kapcsolatban van egymással, utóbbira visszahat a település beépítése és egyéb adottságai. Abban az esetben, ha az épületek túl közel vannak egymáshoz, nincs utcaszintű átszellő-

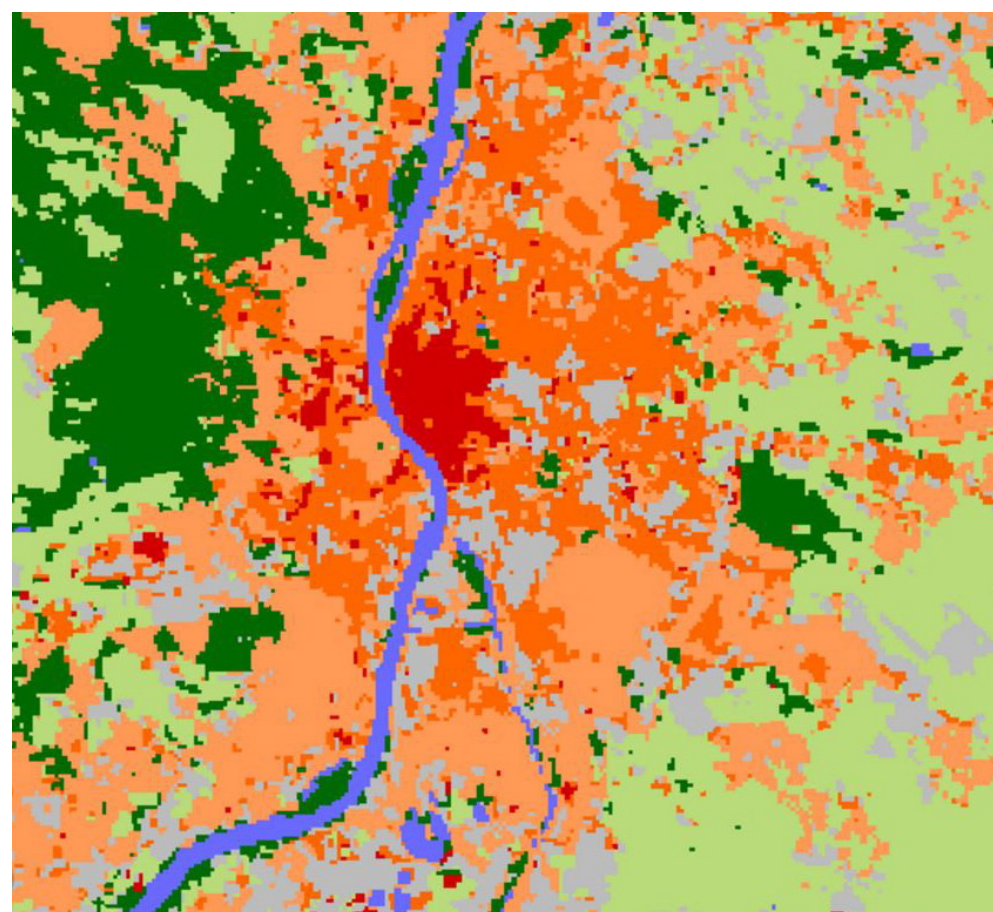
- ¹ STEWART, I. and OKE, T.R. 2009 'Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer' *Bulletin American Meteorological Society* 90, 922-23
- ² Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- ³ Sarah Chapman, Marcus Thatcher, Alvaro Salazar, James E. M. Watson, and Clive A. McAlpine, *The Effect of Urban Density and Vegetation Cover on the Heat Island of a Subtropical City*, (*Journal of Applied Meteorology and Climatology* 2018, 57,11)
- ⁴ Oláh András Béla 2008 - A városi hősziget és légkörzés alakulása a beépítés függvényében (*Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat*, 2008, p.28-34.)
- ⁵ M. Szilágyi Kinga 2012 - A tervezés növekvő szerepe a klímaváltozásra való felkészülésben (*Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat*, 2012, p.80-81.)

INTRODUCTION AND GOALS

The GIS-based mapping of local climate zones in Budapest is a particularly actual task for the improvement and preservation of the city's climatic conditions. An important basis for urban climate research is the identification of local climate zones within the city, the foundations of which were laid by Stewart and Oke.¹ Local climate zones include areas ranging from a few hundred meters to a few kilometres in diameter, with relatively uniform land cover, material types and structure.² The extent of the Urban Heat Island (UHI) phenomenon is essentially closely related to land cover and building density.³ The energy storage capacity of paved –and other artificial surfaces (e.g. roads, buildings, etc.) is generally higher than that of unpaved, natural surfaces (green or water surfaces) so they store more heat from the Sun and then compensate for the heat surplus by heating their surroundings in the evening.⁴ Consequently, densely built-up areas with a high impervious surface ratio increase the urban heat island effect, while unbuilt areas have a balancing effect on the climatic conditions of a city. In

her article "The growing role of planning in preparing for climate change" published in the journal 4D, Kinga M. Szilágyi mentions the importance of mitigating the urban heat island effect, thus reducing the adverse effects in both urban and rural landscapes. According to the author, research and feedback show that the quality and liveability of Hungarian cities and urban and rural landscapes in general are gradually declining. A series of conferences were held in April 2012 to highlight the problems and to propose solutions.⁵ The phenomenon of the urban heat island and its dependence on the settlement's built-up areas was investigated by András Béla Oláh, who collected methods for urban planning, which can help to predict the temperature and air circulation conditions of a planning area or region in the planning phase. According to Oláh, the urban heat island phenomenon and the urban air circulation have a fundamental impact on differences in temperature within settlements. The two are closely related, the latter being influenced by the ratio of built-up area and other characteristics of the settlement. If buildings are too close together, there is no ventilation at street level, therefore no air circulation

- ¹ STEWART, I. and OKE, T.R. 2009 'Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer' *Bulletin American Meteorological Society* 90, 922-23
- ² Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- ³ Sarah Chapman, Marcus Thatcher, Alvaro Salazar, James E. M. Watson, and Clive A. McAlpine, *The Effect of Urban Density and Vegetation Cover on the Heat Island of a Subtropical City*, (*Journal of Applied Meteorology and Climatology* 2018, 57,11)
- ⁴ Oláh András Béla: "A városi hősziget és légkörzés alakulása a beépítés függvényében" [*The urban heat island and the wind flow in the context of the urban fabric*] (*Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat*, 2008, p.28-34.)
- ⁵ M. Szilágyi Kinga: "A tervezés növekvő szerepe a klímaváltozásra való felkészülésben" [*The growing importance of planning as a response to climate change*] (*Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat*, 2012, p.80-81.)
- ⁶ Oláh András Béla: "A városi hősziget és légkörzés alakulása a beépítés függvényében" [*The urban heat island and the wind flow in the context of the urban fabric*] (*Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat*, 2008, p.28-34.)



zés, nem alakul ki légkörczés. Ez a jelenség főleg az V., VI., VII. kerületet érinti.⁶

A Szegedi Tudományegyetem városi hőszigetelés kutatásai Szeged esetében kimutatták, hogy a külterület és a belváros átlagos éves léghőmérséklet különbsége 2,5 Kelvinnél nagyobb (fűtési félévben > 2,1; nem fűtési félévben 3,18). Mindez az egyes eseti mérések esetén sokszor 5-6 Kelvin, ami szélsőséges esetben nyáron a hajnali időszakban akár 8 Kelvin különbség is lehet az egymástól csupán négy kilométerre elhelyezett külterületi és belvárosi mérőállomások adatai szerint. (Szeged belterület, Szeged külterület 2011.08.21-23.-i mérési eredmények).⁷

Budapest települését tekintve értelem szerűen a képet tovább árnyalja a település szerkezete, a hasonló felszínborítottságú, beépítésű területek kiterjedése, egymáshoz képesti elhelyezkedése. Az ily módon adódó, városrészenként különböző adottságok eltérően befolyásolják a városi hőszigetelés jelleget, a város klímáját, amelynek feltér-

képezése szükségszerű annak érdekében, hogy megfelelő válaszokat lehessen adni klímavédelmi szempontból.

Jelen elemzés célja, hogy feltárásra kerüljenek Budapest viszonylatában a városon belül megkülönböztethető lokális klímazónák, ennek alapján beazonosításra kerüljenek a városklímát meghatározó terhelő valamint kompenzációs területek mind jellegük, mind elhelyezkedésük szerint.

MÓDSZERTAN

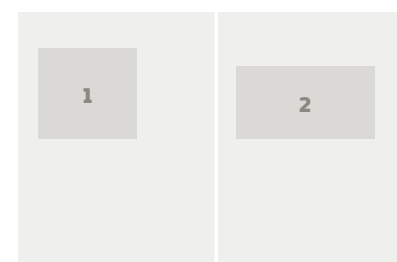
Elméleti módszertan

A lokális klimatikus viszonyok meghatározásához a klímakutatásban mára általánosan elismert és használatos Local Climate Zones - LCZ kategorizálás szolgál,⁸ jelen elemzésben ez adja az elméleti módszertan alapját. A módszertan szerinti kategorizálás alapvetően szétválasztja a beépített és nem beépített területeket, majd ezeket osztályozza tovább. Az LCZ módszertan

⁶ Oláh András Béla 2008 - A városi hősziget és légkörczés alakulása a beépítés függvényében (Kertészeti Egyetem, 4D folyóirat, 2008, p.28-34.)

⁷ Unger János, MTA Doktori Értekezés, a városi hősziget-jelenség néhány aspektusa; Szeged 2010

⁸ STEWART, I. and OKE, T.R. 2009 'Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer' Bulletin American Meteorological Society 90, 922-23



1. ábra/Fig. 1:
Budapest LCZ beosztása - Tamás Gál, Benjamin Bechtel, Michael Foley / LCZ categories of Budapest by Tamás Gál, Benjamin Bechtel and Michael Foley
(FORRÁS/SOURCE: HTTP://WWW.WUDAPT.ORG)

2. ábra/Fig. 2:
Az elemzésben szereplő, Budapesten értelmezhető Lokális Klíma Zóna kategóriák / Local Climate zone categories relevant for Budapest and applied in the research based on Stewart and Oke



evolves. This phenomenon mainly affects districts 5, 6 and 7 in Budapest.⁶

Research on the urban heat island effect at the University of Szeged has shown that the difference in the average annual air temperature between the outer and the inner city of Szeged is greater than 2.5 Kelvin (winter semester > 2.1; summer semester 3.18).⁷ This is often 5-6 Kelvin in an individual measurement, which in extreme cases can be up to 8 Kelvin in the morning in summer, according to data from measuring stations in the suburbs and in the city centre, which are only 4 km apart (Szeged city center, Szeged suburbs 21-23 August 2011).

In the case of Budapest, the structure of the settlement, the extent of areas with similar land cover and built-up areas, and their relative location enrich the picture. The resulting differences between the different neighbourhoods have different effects on the characteristics of the urban heat island effect and the urban climate,

which need to be mapped in order to provide appropriate responses from a climate adaptation perspective.

The aim of the present analysis is to identify the local climate zones within the city of Budapest and, on this basis, to identify the pressure and compensation areas that determine the urban climate, both in terms of their characteristics and their location.

METHODOLOGY

The method in theory

The Local Climate Zones (LCZ) categorisation,⁸ now widely recognised and used in climate research, is used to define local climatic conditions and provides the basis for this analysis. The categorisation of the method basically separates built-up and non-built-up areas and then further classifies them. In general, the LCZ methodology distinguishes between ten types of land cover (LCZ 1 - LCZ 10) in built-up

⁷ Unger János, MTA Doktori Értekezés, "A városi hősziget-jelenség néhány aspektusa" [Some Aspects of the Urban Heat Island Phenomenon]; Szeged 2010

⁸ STEWART, I. and OKE, T.R. 2009 'Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer' Bulletin American Meteorological Society 90, 922-23

általánosan a beépített területeken tíz típust (LCZ 1 – LCZ 10), a nem beépített területeken hét felszínborítás típust különböztet meg (LCZ A – LCZ G).

Az egyes beépített területek Stewart és Oke módszertanában különböző indikátorok (égbolthatósági index, térarány, épületmagasság, felszín érdeség, jellemző albedo érték, stb.) szerint kerültek megkülönböztetésre, de besorolásukat alapvetően a beépítés sűrűsége, jellege határozza meg. A Stewart és Oke által kifejlesztett módszertanra épülő kutatások szoros összefüggéseket tártak fel az egyes LCZ kategóriák és a városi hőszigetelés (UHI) között.⁹

A módszertan alapján ugyan lehetőség nyílik az egyes fő csoportosítások kombinálására (pl. LCZ 2 és LCZ 4 = LCZ 24), de jelen elemzés, annak áttekintő mivolta miatt csak a fő csoportosításokkal számol.

Módszertan adaptálása a helyi viszonyokhoz

Az elemzés szempontjából megkerülhetetlen az általánosan alkalmazott módszertan adaptálása az adott települési viszonyokhoz. Az LCZ kategorizálás egy olyan általános rendszert alkot, amelybe a világ bármely része bekezelhető, ugyanakkor Budapest esetében a tágra nyitott LCZ kategóriák közül több nem jelenik meg.

Benjamin Bechtel, Dr. Gál Tamás, és Michael Foley korábban már feltérképezte Budapest LCZ kategóriáit,¹⁰ a WUDAPT's (World Urban Database and Access Portal Tool) weboldal alkalmazásával¹¹ (1. ábra). Az elemzés azt az általános eredményt hozta, hogy Budapest esetében mindössze négy beépített LCZ kategória létezik (LCZ 2: Compact midrise, LCZ 5: Open

midrise, LCZ 6: Open low-rise, LCZ 8: Large low-rise)

Jelen írás a fent bemutatott kategóriáknál részletesebben kívánja bemutatni és kategorizálni a város beépített területeit, amely részben megfeleltethető az országosan alkalmazott területfelhasználási besorolásoknak is (2. ábra). Budapest nem rendelkezik összefüggő magasházas beépítéssel, így az LCZ 1 (compact high-rise) és az LCZ 4 (open high-rise) kategóriákat értelemszerűen nem lehet alkalmazni. Hasonlóan nem értelmezhető Budapest esetében az LCZ 4 (lightweight low-rise) kategória sem, ami általánosan a favellák által beépített területekre, vagy egyes Közéleketen jellemző beépítésekre vonatkozna. Szintén nem jellemző Budapesten az LCZ 10 (heavy industry) kategória sem, amely a nagy kiterjedésű, jelentős kibocsátású gyárakat adja. Ezek tekintetében az elemzés megegyezik a korábbi eljárás kategóriáival.

A nyilvánvaló kategóriák általános kiszűrésén túl indokolt a többi kategóriát is „lefordítani” a helyben tapasztalható beépítési formákhoz. A hagyományos beépítési formákat vizsgálva Budapest esetében az elemzés azt mutatja, hogy az LCZ 2 (Kompact mid-rise / Kompakt – közepes) kategóriának a nagyvárosias, jellemzően 3-9 szintes, zárt sorú, többnyire zártudvaros beépítés feleltethető meg, míg az LCZ 6 (Open low-rise / Szabadonálló – alacsony) a kertvárosias beépítésű területeket adja. Ezen túl számos olyan, nagy kiterjedésű terület található, amelyek átmenetet képeznek a nagyvárosias beépítésű és a kertvárosias beépítésű területek között, mégsem sorolhatók egyik kategóriához sem. Ezek a jellemzően az alacsonyabb, sűrű beépítésű, kisvárosias, kevés zöldfelülettel ren-

⁹ Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.

¹⁰ Bechtel, B., and Coauthors, 2015: Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4, 199–219, doi:10.3390/ijgi4010199

¹¹ WUDAPT Tamas Gal, Benjamin Bechtel, Michael Foley https://geopedia.world/#T4_L107_x2130299.9783078623_y6020180.347740481_s11_b2345

areas and seven types of land cover (LCZ A – LCZ G) in non-built-up areas.

Stewart and Oke's methodology distinguishes between built-up areas according to various indicators (sky visibility index, aspect ratio, building height, surface roughness, typical albedo etc.), but their classification is essentially determined by the density and nature of the built-up area. Research based on the method developed by Stewart and Oke has revealed strong correlations between each LCZ category and the urban heat island effect (UHI).⁹

While the method allows for combining the main categories (e.g. LCZ 2 and LCZ 4 = LCZ 24), the present analysis, as being of general nature, only considers the main categories.

Adapting the method to local conditions

In order to complete the analysis, it is essential to adapt the method to the specific local conditions. The LCZ categorisation is a general system which could be used in any part of the world, but in the case of Budapest, several of the basic LCZ categories do not appear.

Benjamin Bechtel, Tamás Gál and Michael Foley¹⁰ have previously mapped Budapest's LCZ categories using the WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tool) website (<http://www.wudapt.org/>).¹¹ The general result of the analysis was that for Budapest there are only four built-up LCZ categories (LCZ 2: Compact midrise, LCZ 5: Open midrise, LCZ 6: Open low-rise, LCZ 8: Large low-rise)

The present research aims to describe and categorize the built-up areas of the city in more detail than the categories presented above, which may also

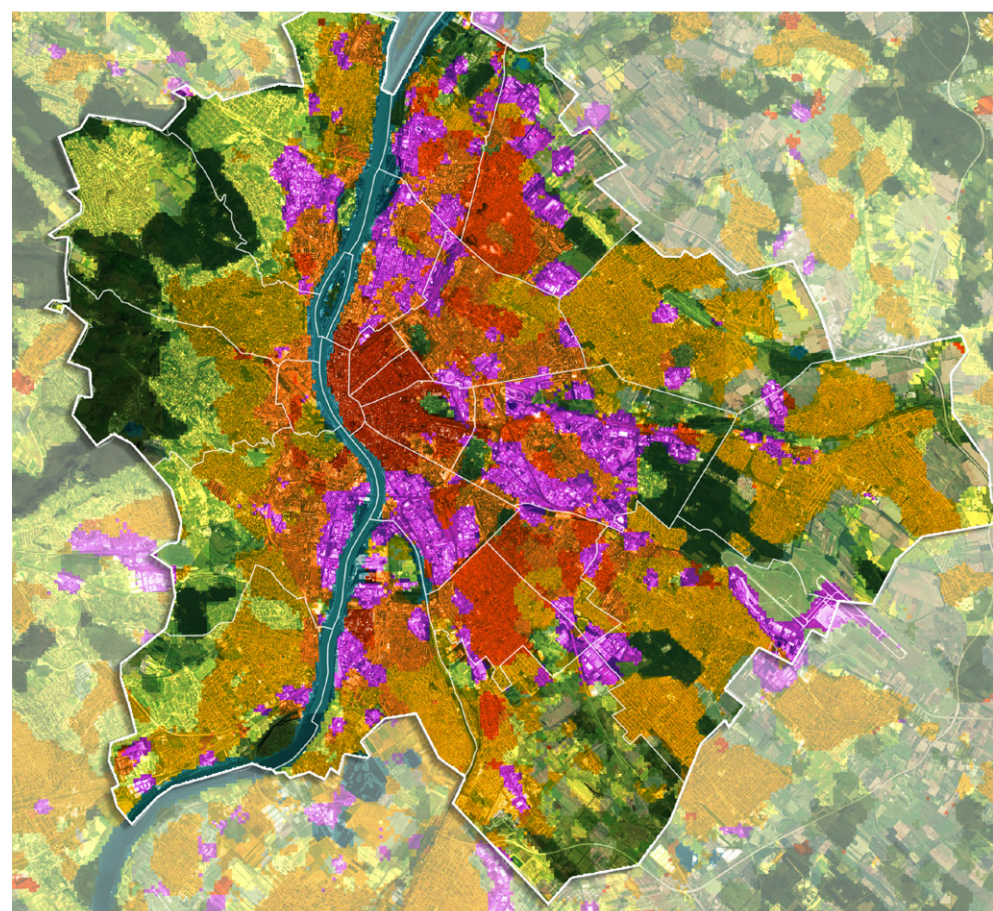
correspond in part to the land use classifications used nationally. Budapest does not have a coherent high-rise built-up area, so the categories LCZ 1 (compact high-rise) and LCZ 4 (open high-rise) cannot be applied by definition. Similarly, the category LCZ 4 (lightweight low-rise), which would apply to areas generally developed by favelas or to certain types of development in the Middle East, cannot be applied to Budapest. Also not typical for Budapest is LCZ 10 (heavy industry), which refers to large-scale factories with significant emissions. For these categories the analysis uses the same factors as for the previous procedure.

Beyond the general filtering of common categories, it is also appropriate to render the categories to the forms of construction found in the locality. In the case of Budapest, the analysis of traditional building types shows that LCZ 2 (Compact mid-rise) corresponds to metropolitan, typically 3-9 storey, closed-concept, mostly enclosed courtyard buildings, while LCZ 6 (Open low-rise) corresponds to suburban areas. In addition, there are a number of large areas that are transitional between metropolitan and suburban areas, yet do not fall into either category. These are typically lower, densely built-up, small urban areas with little green space. Such areas include the traditional small urban areas of Újpest and Rákospalota, but also the dense, mostly sparsely built-up areas of Pesterzsébet. These areas are basically LCZ 3 (Compact low-rise) and therefore the use of LCZ 3 for Budapest could be the most appropriate. It is also appropriate to treat separately the areas with a lower density of development from the general suburban areas. This is typically

⁹ Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.

¹⁰ Bechtel, B., and Coauthors, 2015: Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4, 199–219, doi:10.3390/ijgi4010199

¹¹ WUDAPT Tamas Gal, Benjamin Bechtel, Michael Foley https://geopedia.world/#T4_L107_x2130299.9783078623_y6020180.347740481_s11_b2345



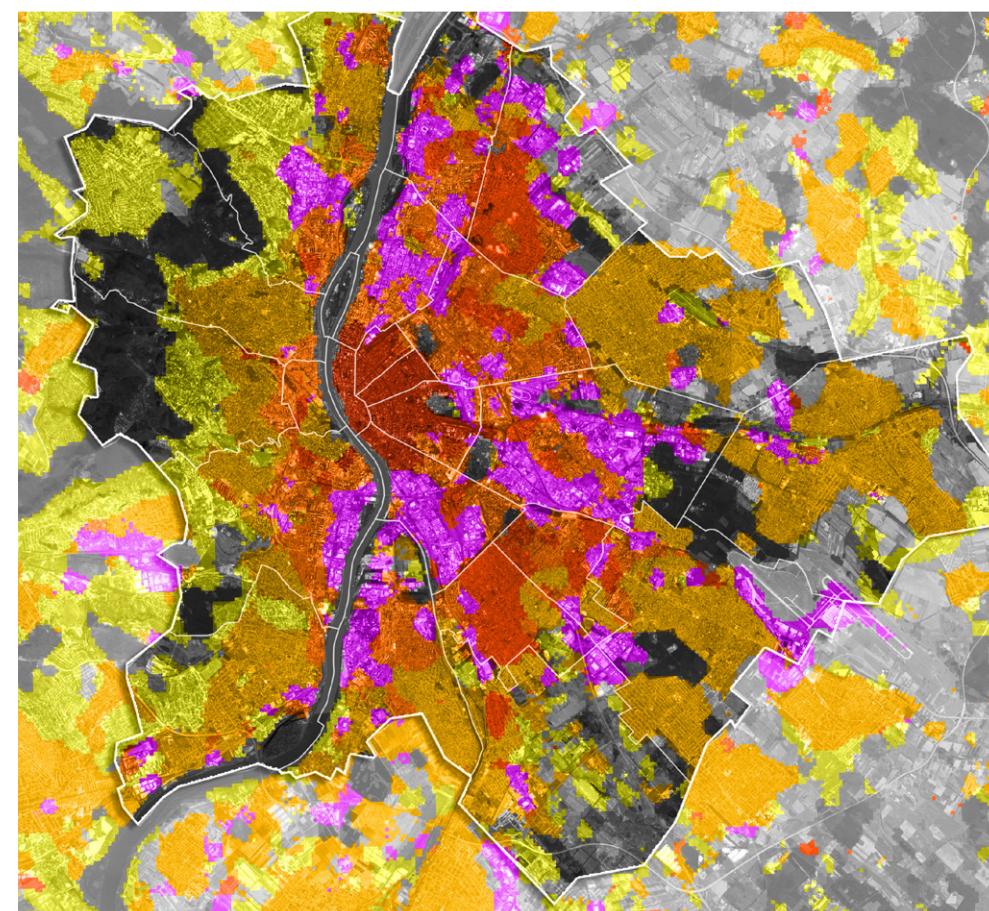
- LCZ 2 Compact mid-rise (Kompakt – közepes)
- LCZ 3 Compact low-rise (Kompakt – alacsony)
- LCZ 5 Open mid-rise (Szabadonálló – közepes)
- LCZ 6 Open low-rise (Szabadonálló – alacsony)
- LCZ 8 Large low-rise (Nagy kiterjedésű – alacsony)
- LCZ 9 Sparsely built (Szórványosan beépített)
- LCZ A Dense trees (Sűrű fával borított)
- LCZ B Scattered trees (Elszórta fával borított)
- LCZ C Bush, scrub (Bokros, cserjés)
- LCZ D Low plants (Gyepes)
- LCZ E Bare rock / paved (Sziklás / burkolt)
- LCZ F Bare soil / sand (Pusztító talaj / homok)
- LCZ G Water (Vízfelület)

Budapest Lokális Klíma Zónái



3. ábra/Fig. 3:
LCZ kategorizálás
eredménytérképe /
Scoreboard of LCZ
categorisation

4. ábra/Fig. 4:
Terhelési területek /
Map of the stress
areas, Budapest



- LCZ 2 Compact mid-rise (Kompakt – közepes)
- LCZ 3 Compact low-rise (Kompakt – alacsony)
- LCZ 5 Open mid-rise (Szabadonálló – közepes)
- LCZ 6 Open low-rise (Szabadonálló – alacsony)
- LCZ 8 Large low-rise (Nagy kiterjedésű – alacsony)
- LCZ 9 Sparsely built (Szórványosan beépített)

- terhelési területek
Budapest Lokális Klíma Zónái

delkező beépítések. Ilyenek mondhatók Újpest, vagy Rákospalota hagyományos kisvárosias területei, de ide sorolható pl. Pesterzsébet sűrű, többnyire hézagosan zártosított beépítéssel rendelkező területei is. E területek alapvetően megfeleltethetők az LCZ 3 (Compact low-rise / Kompakt – alacsony) kategóriának, ezért indokolt az LCZ 3 kategória alkalmazása Budapest esetében. Szintén indokolt külön kezelni az általános kertvárosias beépítésű területeknél lazábban beépült területeket. Ezek jellemzően a volt zártkerti és üdülőterületek, de ide sorolható a budai hegyvidék hagyományosan lazább beépítésű területei is. A fentiek megfeleltethetők az LCZ 9 (Sparsely built - Szórványosan beépített) kategóriának. Az LCZ 5 (Open mid-rise / Szabadonálló – közepes) kategória leginkább

a teleszerű beépítésekre, lakótelepekre értelmezhető. Az LCZ 8 (Large low-rise / Nagy kiterjedésű – alacsony) kategóriába sorolhatók a jelentősebb kereskedelmi, szolgáltató gazdasági területek.

A nem beépített területek esetében az általánosan használt LCZ besorolás Budapest esetében teljes körűen érvényesíthető.

Gyakorlati módszertan

A budapesti lokális klímazónák megállapításához a Szegedi Tudományegyetem TTK, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszéke által kidolgozott gyakorlati módszertan szolgál. A módszertant a 2015-ben megtartott ClimCap Pilot képzés folyamán ismertette dr. Gál Tamás, jelen elemzés az általa bemutatott gyakorlati ismereteken nyugszik.

the case for the former allotment and holiday areas, but also for the traditionally more loosely built-up areas of the Buda Hills. These correspond to category LCZ 9 (Sparsely built). The LCZ 5 (Open mid-rise) category is best interpreted as referring to housing estates. The LCZ 8 (Large low-rise) category can be used for larger commercial and service related economic areas.

For non-built-up areas, the commonly used LCZ classification is fully applicable to Budapest.

The actual research method

The applied method, developed by the Department of Climatology and Landscape Geography, Faculty of Science at the University of Szeged and the Institute of Technology in Szeged, is used for

the identification of the local climate zones in Budapest. The methodology was presented by Tamás Gál during the ClimCap Pilot training in 2015, and the present analysis is based on the practical knowledge presented by him. The same method was used in the present research to analyse and reinterpret the local climate conditions in Budapest.

Multispectral imagery from the Landsat 7 satellite was used as the primary source for the definition of local climate zones. The climate map was produced using the QGIS and SAGA programs. As an initial step, sample areas were selected using the Google Satellite overlay. In order to ensure sufficient sampling accuracy, 6 to 10 sample areas per pre-interpreted LCZ category were selected, making a total

Jelen elemzés a fenti módszertan felhasználásával elemzi és értelmezi újra a budapesti lokális klímaviszonyokat.

A lokális klímazónák meghatározásának elsődleges forrásaként a Landsat 7 műhold multispektrális felvételei szolgáltak. A klimatóp térkép a QGIS és a SAGA programok használatával készült. Kezdeti lépésként a Google Satellite fedvény segítségével mintaterületek kerültek kiválasztásra. A mintavétel kellő pontossága érdekében az előzetesen értelmezett LCZ kategóriáinként 6-10, összességében több, mint 150 mintavételi terület került kijelölésre. A lehatárolt mintaterületeken a műholdfelvételek különböző spektrális sávjai szolgáltattak bemenő adatforrásként, majd a SAGA program Random Forest (ViGrA) Classification moduljával került kiterjesztésre a teljes város területére, ezt követően homogenizálásra. A mintavétel alapján a program a területre leginkább megfelelő LCZ kategóriát helyettesíti be. A homogenizálás lényege, hogy a kisebb, a lokális klíma szempontjából még nem meghatározó méretű elemek beolvasztásra kerülnek a környező domináns zónák területébe. Az eredményes klasszifikáció érdekében a művellet többszöri újrafuttatása (mintaterületek korrigálása) vált szükségessé. Az elemzés eredménye a könnyebb területi azonosíthatóság érdekében légifelvétellel helyezve kerül bemutatásra.

ÁLTALÁNOS MEGÁLLAPÍTÁSOK

Beépített – terhelő területek

A GIS alapú elemzés általánosan az elvárt eredményt adta (3. ábra). A terhelő területek külön térképen is megjelenítésre kerülnek (4. ábra). Az LCZ 2-es

(kompakt – közepes) kategória a legmagasabb a beépített területek kategóriái közül, amely elsősorban a pesti sűrű belvárosi részt fedi le. Ebbe a kategóriába tartozik a teljes V. és VII. kerület, továbbá a VI., VIII., IX. és XIII. kerület egyes részei. Ezek a területen a korábban említettek szerint az épületek sűrűsége miatt az utcaszint átszellőzése nem kellően biztosított. Jól látszik, hogy Újlipótvárosban kb. a Balzac utca adja az LCZ 2 zóna határát, inntől – a jellemzően keretes és vegyes beépítésű területeken már az LCZ 5-ös (szabadonálló – közepes) kategóriának megfelelő beépítés a domináns. A VI. kerület külső peremén szép átmenetet képez a villanegyed, amit a Városliget domináns zöldfelületei (LCZ A; B; C) határolnak. Klimatikus szempontból e sűrűn beépült területen ez kiemelt jelentőséggel bír. A VIII. kerületben a sűrűn beépült LCZ 2 kategóriájú belvárosi részek közé beékelődik a Fiumei úti Sírkert zöldfelülete. Első ránézésre talán meglepő módon a vasúti területeket (Nyugati pu. – Keleti pu., volt Józsefvárosi pu.) a nagyvárosi sűrűségű területek bekebelezték, ahogy a volt Ganz-MÁVAG terület is az LCZ 2-es kategóriába került. Ez elsősorban a környező beépítésekhez hasonló magas burkolt felületi arányokkal, és alapvetően szűk, vonalas jellegükkel magyarázható.

Józsefváros déli részén és középső Ferencvárosban jól kivehető a beépítés lazulása, ami az alacsonyabb beépítettségnek, a jelentősebb intézménykerteknek (Ludovika, Szt. István és Szt. László kórház), a kisebb-nagyobb teresedéseknek egyaránt köszönhető. A klasszifikáció e területeket már az Újlipótvárosi területeken is látott LCZ 5 (Szabadonálló – közepes) kategóriába sorolta. A IX. kerületben a bel-

városi sűrűn beépült részeket a Haller utca határolja, ahol a vegyes belvárosi rész (a felvétel idejében még épülő) millenniumi városrészhez csatlakozik. Itt szépen kirajzolódik a rozsdáövezet déli része, amely közel egybefüggő sávot ad a Csepel szigeti és a Budafoki út menti gazdasági területekkel (LCZ 8).

A budai belvárosban a sűrűség oldódik, csupán a Bartók Béla út – Móricz Zsigmond körtérig terjedő szakaszán azonosít a szoftver magasabb, LCZ 2 zónának megfelelő sűrűséget. Ettől kijebb az LCZ 5 karéja övezi a Gellért-hegy – Budai vár környékét, ami már a szabadonálló, alacsony LCZ 6 kategóriának felel meg.

Fontos átmenetet képeznek a sűrűn beépített kertvárosias – alacsony kisvárosias jellegű területek, amelyek jól beazonosíthatóan az elemzés által az LCZ 3 (kompakt – alacsony) kategóriába kerültek. Az LCZ 3 kategóriába tartoznak Újpest egyes részei, Rákospalota, Pestújhely, Pesterzsébet, de több egyéb helyszín is a városban. Ezek a területeken a hagyományos értelemben vett kertvárosi területeknél jóval magasabb beépítési mértékkel, ennek értelmében alacsony zöldfelületi mértékkel rendelkeznek a telkek. Ez a nagy területen elterülő alacsony, de intenzív beépítés meghatározó lokális klimatikus tényezőként jelentkezik a városban.

Az LCZ 5 (szabadonálló, közepes) zóna főként a lakótelepeket érinti, de több lazább beépítésű, zöldfelületben gazdag területet is bekebelez, így pl. Zugló vagy a Déli pályaudvar környéke is ide sorolható.

Az LCZ 6 (szabadonálló, alacsony) zóna testesül meg a – többnyire az 1950-es években Budapesthez csatolt – alacsony beépítésű, de sűrű beépítéssel ren-

of more than 150 sample areas. The different spectral bands of the satellite images were used as input data source for the designated sample areas, and then extended to the whole city area by the Random Forest (ViGrA) Classification module of the SAGA program, followed by homogenisation. Based on the sampling, the program substitutes the most appropriate LCZ category for the area. The homogenisation process consists of merging smaller elements, which are not so relevant for the local climate, into the area of the surrounding dominant zones. In order to achieve a successful classification, the operation had to be repeated several times (correction of sample areas). The results of the analysis are presented overlaid on an aerial photograph for easier spatial identification.

GENERAL FINDINGS

The Built-up Stress Areas

The GIS-based analysis gave the expected results in general. The LCZ category 2 (compact - medium) is the largest of the built-up area categories, covering mainly the dense downtown area of Pest. This category includes the whole of districts 5 and 7, and parts of districts 6, 8, 9 and 13. In these areas, as mentioned above, due to the density of buildings the street level is not sufficiently ventilated. It is clear that in Újlipótváros, Balzac Street is the boundary of zone LCZ 1, from where, in areas with a typical frame and mixed development, the dominant development type is LCZ 5 (detached - medium). The outer periphery of District 6 is a nice transition to a residential area, which

is bordered by the dominant green areas of the Városliget (LCZ A; B; C). The park is of particular climatic importance in this densely built-up area. In District 8, the green area of the Fiumei Road Cemetery is wedged between the densely built-up LCZ 2 inner city areas. Perhaps surprisingly at a first glance, the railway areas (Nyugati, Keleti and the former Józsefvárosi Railway Stations) have been incorporated into the dense urban areas, as has the former Ganz-MÁVAG industrial area, which is now in LCZ 2. This can be explained mainly by the high paved surface ratios similar to the surrounding built-up areas and their essentially narrow, linear character.

In the southern part of Józsefváros and in the central part of Ferencváros, the loosening of the built-up area is clearly visible, which is due to the lower ratio of built-up area, the larger institutional gardens (Ludovika, St. István and St. László Hospitals) and the smaller and larger open spaces. The classification has placed these areas in the LCZ 5 (Vacant - Medium) category, already seen in the New Suburbs. In District 9, the densely built-up areas of the inner city are bordered by Haller Street, where the mixed inner city area is connected to the Millennium district (still under construction at the time of inclusion). Here the southern part of the so called *rust belt* is well defined, forming an almost contiguous strip with the economic areas of Csepel Island and Budafoki út (LCZ 8).

In the Buda city centre, the density is lower, with only the section from Bartók Béla út to Móricz Zsigmond körtér being identified by the software as of higher density, corresponding to zone LCZ 2. Further out, the area

around Gellért Hill - Buda Castle is surrounded by LCZ 5, which corresponds to the free-standing, low LCZ 6.

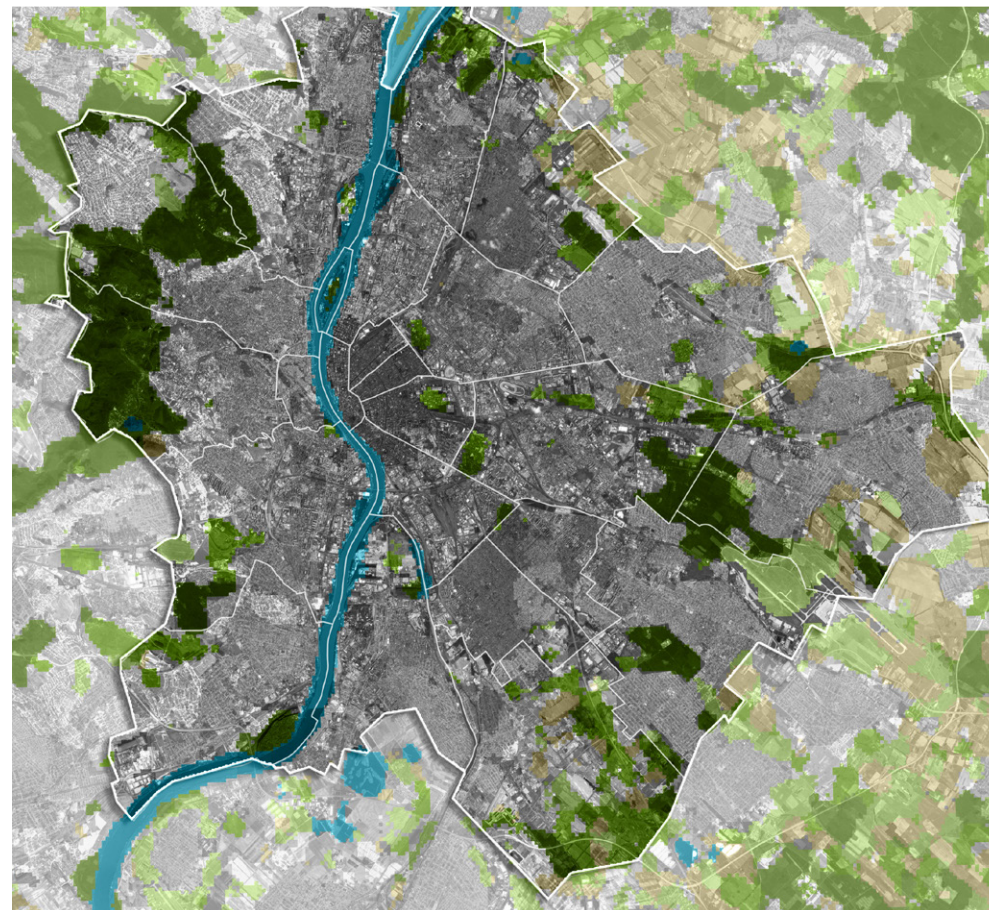
An important transition is formed by the densely built-up suburban - low small urban character areas, which are clearly identified by the analysis as LCZ 3 (compact - low). The LCZ 3 category includes parts of Újpest, Rákospalota, Pestújhely, Pesterzsébet, but also several other locations in the city. In these areas, plots have a much higher building density, and therefore less green area than in the traditional suburban areas. This low but intensive built-up area covering a large area is a dominant local climatic factor in the city.

The LCZ 5 (free-standing, medium) zone mainly concerns housing estates, but also includes a number of areas with a higher green cover and looser development, such as Zugló or the area around the Déli Railway Station.

The LCZ 6 (low, free-standing) zone is found in the low-density suburban areas (e.g. around Rákosszentmihály), which were mostly annexed to Budapest in the 1950s, and in the lower parts of the Buda Hills.

However, the outer built-up parts of the Buda Hills are already identified as LCZ 9 (sparsely built-up) by the software classification. This mostly concerns lower built-up areas, which have crept up and up the hills in recent decades, and the formerly enclosed areas, which are constantly being transformed, but also includes the whole Pesthidegkút area. In Pest, this character is no longer really prevalent, only in small areas.

Significantly different from the previous ones, the LCZ 8 (large, low built-up areas) are areas with a predominantly economic land use. As expected,



- LCZ A Dense trees (Sűrű fával borított)
- LCZ B Scattered trees (Elszórta fával borított)
- LCZ C Bush, scrub (Bokros, cserjés)
- LCZ D Low plants (Gyepes)
- LCZ E Bare rock / paved (Sziklás / burkolt)
- LCZ F Bare soil / sand (Pusztta talaj / homok)
- LCZ G Water (Vízfelület)

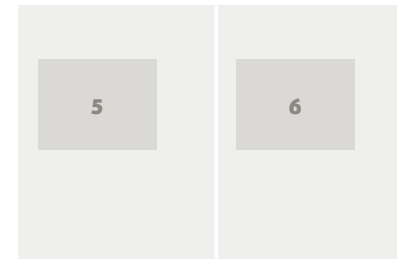
- kompenzációs területek
Budapest Lokális Klíma Zónái

delkező kertvárosias jellegű területeken (pl. Rákosszentmihály környéke), és a budai hegyvidék alsóbb részein is.

A budai hegyvidék külső beépített részeit ugyanakkor már LCZ 9 (szórvaányosan beépített) területként azonosítja a szoftveres klasszifikáció. Ez nagyrészt az előzőeknél alacsonyabb beépítési mértékkel rendelkező, a hegyekre az elmúlt évtizedekben egyre feljebb és feljebb kúszó beépítést és a folyamatosan átalakuló volt zártkerti részeket érinti, de ebbe a kategóriába tartozik teljes Pesthidegkút térsége is. A pesti részeken ez a jelleg már nem igazán jellemző, csak kisebb területegységeken jelenik meg.

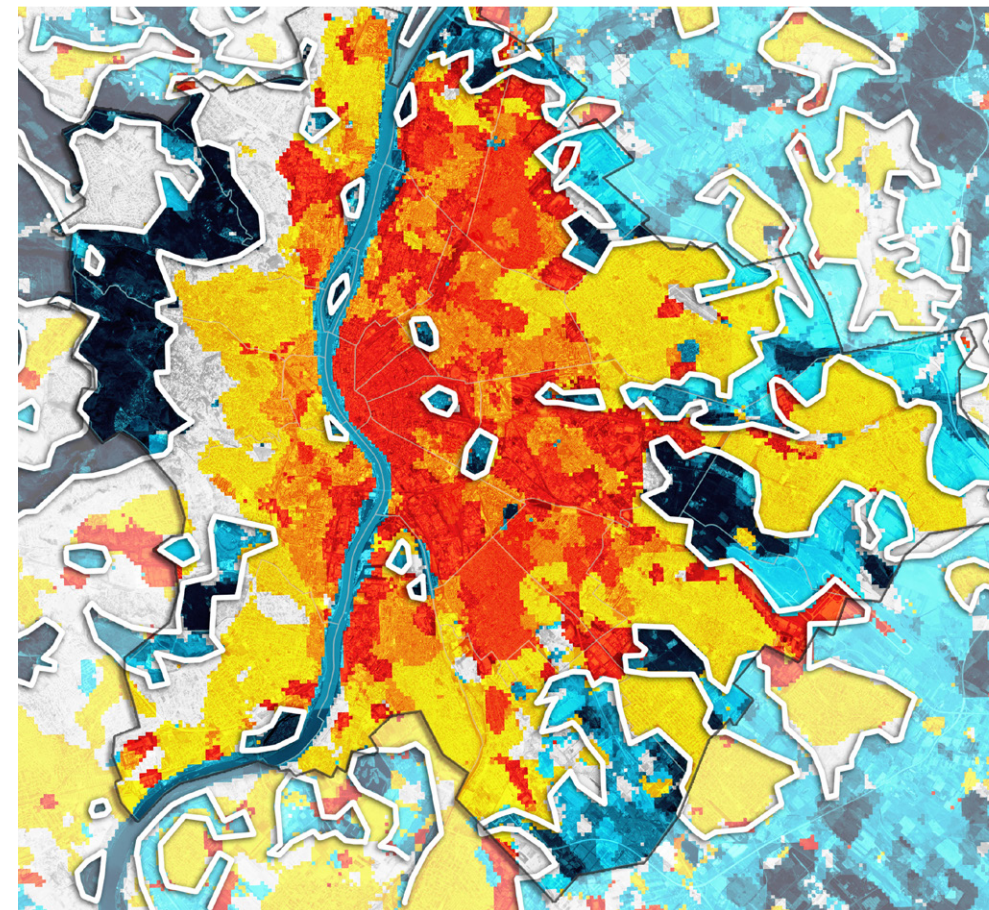
Az előzőektől jelentősen elváló LCZ 8 (nagy kiterjedésű, alacsony beépítésű) területek a jellemzően gazdasági terület-

használatú területek. A szoftveres klasszifikáció az elvárásoknak megfelelően beazonosította Budapest klasszikus barnamezős zónáit, így a Csepel-szigeti gazdasági területeket, a IX., X. és XI. kerületi összefüggő gazdasági területeket. Az északi kerületek közül jól kivehető a XIII. kerületi Frangepán utca környékének átalakulóban lévő gazdasági területe, Újpest egyes területei és Kaszásdűlő is. Az LCZ 8 kategória tekintetében megemlítendő, hogy egyes lakótelepeket (pl. Békásmegyér nyugati oldala) is ebbe sorolta a szoftveres feldolgozás, ami a kiterjedt parkolófelületek, a magas beépítés és a kevés zöldfelület miatt adódhat. Ugyanígy furcsának tűnhet, hogy a Stadionok környékén lévő sportlétesítményeket a Kerepesi út déli oldalán lévő gazdasági területtel megegyező



5. ábra/Fig. 5:
Kompenzációs területek / Map of Compensation Areas, Budapest

6. ábra/Fig. 6:
Terhelési és kompenzációs területek összefüggései / Map of stress and compensation areas, Budapest



- Erősen terhelő
- Mérsékelt terhelő
- Kompenzáció

- terhelési és kompenzációs területek
Budapest Lokális Klíma Zónái

the software classification has identified the classic brownfield zones of Budapest, such as the economic areas of Csepel Island, the contiguous economic areas of districts 9, 10 and 11. In the northern districts, the economic area in transition around Frangepán Street in District 13, certain areas of Újpest and Kaszásdűlő are also clearly visible. Regarding LCZ 8, it should be noted that some residential areas (e.g. the western side of Békásmegyér) are also included in this category, which may be due to the extensive parking areas, high built-up areas and limited green space. Similarly, it may seem strange that sports facilities in the vicinity of the stadiums were placed by the software classification in the same category as the economic area on the south side

of Kerepesi út, also due to the relatively high level of paved surfaces.

The Non-built-up Compensation Areas

The category of dense wooded areas LCZ A is defined as major spontaneously grown forests and afforested areas in Budapest. It is predominantly present in the Buda Hills as a distinctive band separating the transitional, sparsely built-up area of the Buda area from Pesthidegkút and the surrounding agglomeration settlements. The forest belts separating the agglomeration settlements can be regarded as important elements of the green spaces, which also prevail in terms of the local climate and can be defined as the most important compensation areas of Budapest.

kategóriába helyezte a szoftveres klaszszifikáció, aminek oka szintén a viszonylag magas burkoltságban keresendő.

Nem beépített – kompenzációs területek

A kompenzációs területeket összefoglalóan külön térkép mutatja (5. ábra). Az *LCZ A* kategóriának megfelelő sűrű, fával borított területeken a jelentősebb beerdősült területeket és a célzottan létrehozott véderdőket érthetjük Budapest esetében. Dominánsan a budai hegységen jelentkezik erős sávként, ami elválasztja a budai városrész átmeneti, szórványosan beépült területét Pesthidegkúttól és a környező agglomerációs településektől. Az agglomeráció településeit elválasztó erdősávok fontos zöldfelületi rendszerelemnek tekinthetők, amelyek a lokális klíma léptékében is érvényesülnek, Budapest legfontosabb kompenzációs területeiként definiálhatók. A városban és a közvetlen városkörnyéken az előzőnél jóval kisebb összefüggő, sűrű, fával borított zónákat lehet csak találni. Pesten a legnagyobb kiterjedésű terület az Rákoskeresztúri Új köztemető és a mellette lévő Indián-dombi erdőből tevődik össze. Jelentősebb klimatikusan is meghatározó elem a Péterhalmi erdő, de az elemző térképen feltűnik több kisebb méretű véderdő is.

A lokális klíma kompenzációs területei szempontjából meghatározók az *LCZ B* kategóriába sorolt, elszórtan fával borított területek, mivel ezek nem képeznek az előző kategóriánál tapasztalt összefüggő lombtömeget, így átszellőzésük, hőkiegyenlítésük gyorsabb. Ezek inkább vegyesen jelennek meg a többi kompenzációs területtel. A városélen jelentősebb – a lokális klímát érintően – meghatározó vegyes kompenzá-

ciós területek északon Újpest, Rákospalota, Újpalota környékén jelentkeznek, a dél-pesti oldalon pedig Soroksár déli részein. Jól kivehető, közel összefüggő kompenzációs sávot alkot a Rákos-patak mente, de a Szilas-patak menti zöldfelületek is a lokális klímát meghatározó elemsorként definiálhatók. A legfontosabb vonalas elem értelemszerűen a Duna főága (*LCZ G*). A szűk Ráckevei – Soroksári Dunaág a szomszédos beépítéseknek köszönhetően inkább csak a mikroklimatikus viszonyok szintjén képviselteti magát.

A pesti belvárosban jól kivehető, hogy a Városliget, Népliget és a Fiumei úti Sírkert területén vegyesen megjelennek az *LCZ A; B; C* kategóriák, tehát nemcsak a mikro környezetüket hűtik a sűrűn beépült városrészek határán, hanem lokális szinten is befolyásolják a városklímát. A budai belvárosban egyedül a Gellért-hegy jelenik meg *LCZ A* és *C* kategóriaként. Furcsamód a szomszédos Tabán önmagában már kicsinek bizonyult, így területét az azt bekebelező *LCZ 6* – szabadonálló, alacsony kategóriába helyezte az automatizált programsor.

Összefüggések

Ha az *LCZ* kategóriákra, mint a város klimatikus viszonyait terhelő és kiegyenlítő kategóriákra tekintünk, szembetűnik, hogy a beépített kategóriákba (terhelők) tartozó lokális klímazónák Budapestben belüli részaránya jóval kisebb a nem beépítetteknél (kiegyenlítők), ami Budapest fejlődése szempontjából hangsúlyos figyelemfelhívás (6. ábra).

E szempontból a belső városi részek és a gazdasági területek jórészt összefüggő egységet alkotnak, amelyet csak néhol szakít meg, tagol egy-egy, a lokális klímaviszonyok szempontjából kevésbé

By comparison in the capital and the immediate urban periphery, only much smaller contiguous zones of dense tree cover can be found than in and around its agglomeration. In Pest, the largest area is the New Public Cemetery in Rákoskeresztúr and the adjacent forests of Indián Hill. The most significant climatically dominant element is the Péterhalmi Forest, but several smaller size forests also appear on the map of analysis.

In terms of local climate compensation areas, the scattered wooded areas of category *LCZ B* are crucial, as they do not form the coherent canopy cover of the previous category and therefore have a faster ventilation and heat compensation. They tend to be mixed with other compensation areas. The more significant mixed compensation areas on the urban fringe, which have a decisive impact on the local climate, occur in the north around Újpest, Rákospalota and Újpalota, and on the south-western side in the southern parts of Soroksár. The banks of the Rákos Stream form a clearly visible, almost continuous compensation belt, but the green areas along the Szilas Stream can also be defined as a dominant element for the local climate. The main linear element is, by definition, the main branch of the Danube (*LCZ G*). The narrow Danube branch between Ráckeve and Soroksár is represented only at the microclimatic level, due to the adjacent built-up areas.

In the inner city of Pest, it can be clearly seen that the parks of Városliget, Népliget and Cemetery at Fiumei Road are mixed with *LCZ A; B* and *C*, thus not only cooling the microenvironment at the boundaries of the densely built-up districts, but also influencing the urban

climate at local level. In the Buda city centre, only Gellért Hill appears as *LCZ A* and *C*. Strangely, the neighbouring Tabán was already considered small in itself, so that its area was included in the *LCZ 6* - free-standing, low category by the automated programme.

Links

If we look at the *LCZ* categories as heat stressing and balancing areas of the city's climatic conditions, it is striking that the share of local climate zones in Budapest belonging to the built-up categories (stressors) is much smaller than the share of non-built-up categories (balancers), which is an important point to note for the development of Budapest.

From this aspect, the inner urban areas and the economic areas form a largely coherent whole, which is only occasionally interrupted or divided by areas with less local climate pressure. The outer parts of the city are typically moderately stressing, as they are mostly suburban areas with a relatively large amount of green space. The sparsely built-up areas (*LCZ g*) are on the borderline between polluting and mitigating in this respect, but further development and increase of density could have a negative impact on local climate.

The peri-urban elements of the green space network can have a major influence on the local climate, acting as green fingers which are separating the moderately stressing built-up areas. Preserving and consciously developing these green fingers is an important objective for the future.

An important result of the analysis is that the three key green areas in the inner city of Pest (the parks of Városliget and Népliget, Fiumei Road Cemetery)

terhelő terület. A város külső területei már jellemzően mérsékelt terhelők, tekintve hogy többnyire kertvárosias területek alkotják, ahol viszonylag sok a zöldfelület. A szórványosan beépült területek (LCZ g) e szempontból a terhelő és kiegyenlítő hatásúak határát képezik, ugyanakkor további beépülésük, sűrűségük növekedése már a lokális klímaviszonyok alakulását negatívan érintheti.

A lokális klíma alakításában a zöldfelületi rendszer városszéli elemei képviselhetnek jelentősebb hatást, amelyek zöld ujjakként tagolják a beépített, elsősorban mérsékelt terhelő területeket. Ennek megőrzése, tudatos fejlesztése mindenképp fontos célként jeleníthető meg a jövőben.

Az elemzés fontos eredménye, hogy a pesti belső városrészbe ékelődő három kiemelt zöldfelület (Városliget, Fiumei úti Sírkert, Népliget) a lokális klíma szempontjából is meghatározó kompenzációs területként azonosíthatók, de a Duna menti zöldfelületek és szigetek is jelentősen hozzájárulnak a lokális klíma alakulásához.

MÓDSZERTANI KÉRDÉSEK, TANULSÁGOK

A Budapestre készített LCZ elemzés a várt eredményt hozta. Értelemszerűen egy ekkora város esetében mindez csupán megközelítő eredményként értelmezhető. Az összetett LCZ kategóriák alkalmazásával, ellenőrző mérésekkel kiegészítve jobban meghatározhatóvá válhat a város lokális klímazónáinak felépülése.

A gyakorlati módszertan szempontjából kiemelten fontos a kellően megválasztott mintaterület lehatárolása

és száma. Minél több hasonló terület tudunk „megtanítani” a programnak, annál jobb eredményt kapunk. A mintaterületek szempontjából értelemszerűen az úrfelvétel időpontja a meghatározó, ami elsősorban a mezőgazdasági területhasználat esetében okozhat hibás eredményeket. Emiatt a mezőgazdasági művelés alatt álló területeken az LCZ F (Pusztas talaj / homok) erősen keveredhet az LCZ D (gyepes) felületekkel, attól függően, hogy a műholdfelvétel éppen milyen stádiumban készült.

Az LCZ E (Sziklás / burkolt) felületek a homogenizálás következtében beolvadtak az azokat körülvevő domináns zónákba, ezért Budapest esetében ebben a léptékben nem értelmezhetők.

Az automatizált klasszifikációk helyenként félrevezetőek lehetnek. A gazdasági területekre jellemző LCZ 8 kategória több esetben is összekeveredik más, jellemzően a lakótelepi, vagy a sűrűn beépült lakóterületekkel. (lásd pl. Békásmegyer, volt Ganz-MÁVAG). Ez feltehetőleg a hasonló beépítési mérték – vegetációs arány következménye lehet.

Az elméleti és gyakorlati módszertan alapján létrejött térképek mindezt összevetve átfogó képet tudtak adni a Budapesten belüli, lokális klimatikus viszonyokat meghatározó legfontosabb elemekről. ©

can be identified as key compensation areas for the local climate, but the green areas and islands along the Danube also make a significant contribution to balancing the local climate.

METHODOLOGICAL ISSUES, LESSONS LEARNED

The LCZ analysis for Budapest brought the expected results. Findings could be interpreted as an approximation due to the size of the city and the method used. The use of complex LCZ categories, complemented by monitoring measurements, should allow a better determination of the structure of the local climate zones of the city.

In the case of the implementation of the method, the designation and the number of sufficiently selected sample areas are of paramount importance. The more similar areas we can "teach" to the software, the better the results will be. Regarding the sample areas, the time of the survey is obviously the most important factor, which can lead to erroneous results, especially in the case of agricultural land use. For this reason, in areas under agricultural cultivation, LCZ F (bare soil/sand) may be strongly confused with LCZ D (grassland), depending on the date of the satellite image.

LCZ E (Rocky / Paved) surfaces have merged into the surrounding dominant zones due to homogenisation and are therefore not possible to interpret at this scale for Budapest.

Automated classifications can be misleading for certain types of places. In several cases, the LCZ 8 category, which is specific to economic areas, is confused

with other categories, typically residential or densely built-up residential areas. (See for example Békásmegyer and former Ganz-MÁVAG areas). This is presumably a consequence of the similar building density and vegetation ratio.

Maps based on theoretical and practical methodologies could be combined to provide a comprehensive picture of the most important elements determining local climatic conditions within Budapest. ©