

Doktori (PhD) értekezés tézisei
ELEKTROMOBILITÁS ÉS FENNTARTHATÓSÁG:
A V2G KÖZÉP-EURÓPAI ADAPTÁCIÓS
LEHETŐSÉGEI

Horváth Gábor

Témavezető:
Dr. Szegedi Sándor



DEBRECENI EGYETEM
Földtudományok Doktori Iskola
DEBRECEN 2026

Bevezetés

Az Európai Unió klímapolitikai stratégiája, a Fit for 55 csomag és az Európai Zöld Megállapodás irányelvei, alapjaiban alakítja át a kontinens energetikai és közlekedési rendszereit. A közlekedés villamosítása és a megújuló energiaforrások integrációja egymást erősítő változásként jelenik meg, amely növeli a villamosenergia rendszer rugalmasságigényét és felértékeli a szabályozhatóságot. Ebben a kontextusban a jármű hálózat integráció (Vehicle to Grid, V2G) olyan megoldásként értelmezhető, amely a járművekre passzív fogyasztók helyett aktív és vezérelhető hálózati elemként tekint, és így kritikus rendszerszintű rugalmassági funkciót tölthet be (Amamra & Marco, 2019; Ravi & Aziz, 2022; Sultan és mtsai., 2022).

A nemzetközi szakirodalom dominánsan fejlett és tökeerős nyugat-európai és észak-amerikai piacokra épít, ezért a közép-európai régió sajátosságai csak részben jelennek meg az uralkodó modellekben. A háztartások korlátozott beruházási képessége, az energiamix fosszilis és nukleáris dominanciája, valamint a volatilis megújuló termelésből fakadó hálózati kihívások együtt olyan strukturális feltételrendszert alkotnak, amely a V2G gazdasági és intézményi bevezethetőségét és a környezeti mérleget egyaránt befolyásolják (Christensen és mtsai., 2021; Horváth és mtsai., 2023; Leal Filho és mtsai., 2021).

Az értekezés központi állítása, hogy a V2G Közép-Európában nem technológiai kuriózum és nem távoli jövőkép, hanem a hálózati stabilitás és a dekarbonizáció költséghatékony támogatásának egyik reálisan mozgósítható eszköze. A kutatás célja régióspecifikus adatokra támaszkodó adaptációs stratégia kidolgozása volt, amely kijelöli a bevezetés kulcsfeltételeit (Horváth és mtsai., 2023; International Energy Agency, 2022).

Célkitűzések

A kutatás egymásra épülő logikai láncolatban tekintette át a V2G régiós bevezethetőségének kritikus feltételeit gazdasági, technológiai, környezeti, regionális és viselkedési ösztönzői összefüggésben, magán és vállalati alkalmazási szinten, kifejezetten a közép-európai sajátosságokra építve.

Az első vizsgálati blokk a gazdasági racionalitás megalapozására irányult, ezen belül a dinamikus teljes birtoklási költség elemzés azt értékelte, hogy a régiós jövedelmi korlátok és a használtautó piac dominanciája mellett milyen feltételek mellett válhat az elektromos személyautó versenyképes alternatívává (Horváth és mtsai., 2023; Vanhaverbeke és mtsai., 2017). A gazdasági dimenziót az üzleti modellek elemzése egészítette ki, amely az elektromos autómegosztó rendszerek működési fenntarthatóságát tárta fel, és a hálózati integrációból származó halmozott bevételek nyereségességi szerepét tette értelmezhetővé (Briguglio & Formosa, 2023; Ritter & Schanz, 2021; Scale, 2025).

A következő lépés a régiós piaci környezet és a fejlődési pályák strukturált feltárása volt, amely csoportképző elemzés keretében az európai elektromobilitási mintázatokon belül elkülönítette a közép-európai kínálatvezérelt fejlődési logikát, és eltérő bevezetési prioritásokat indokolt a nyugati mintákhoz képest (Ghadikolaei és mtsai., 2021; Máthé és mtsai., 2025). Majd a töltésvezérlés környezeti korlátainak értékelése azt tisztázta, hogy a régiós energiamix mellett milyen feltételek esetén állítható elő tényleges környezeti előny, és miért kulcskérdés a valós idejű szén-dioxid kibocsátást követő intelligens töltés (Bieker, 2021; Knobloch és mtsai., 2020; Taljegard és mtsai., 2019).

A hálózati integráció szintjén a munka azt elemezte, hogy a járműflották virtuális tárolóként milyen mértékben képesek kezelni a napenergia túltermelés és az atomerőművi zsinórtermelés mellett kialakuló időbeli feszültségeket,

különös tekintettel a regionális kiegyenlítő szerepre (Adegbohun és mtsai., 2024; Darani és mtsai., 2021). A környezeti értékelés teljes életciklus elemzésre támaszkodva tisztázta az akkumulátor elhasználódás és a rendszerszintű környezeti haszon viszonyát, továbbá számszerűsítette a hálózati tárolók részleges kiváltásából adódó elkerült gyártási kibocsátást (Husmann és mtsai., 2024; Preis & Biedenbach, 2023; Ravi & Aziz, 2022; Uddin és mtsai., 2018).

Végül a társadalmi és intézményi alkalmazkodás feltételeinek áttekintése arra fókuszált, hogy a régióra jellemző bizalmi hiány milyen ösztönzői és kockázatmegosztási megoldásokkal hidalható át, különös tekintettel az automatizált aggregátori keretekre és a garanciális konstrukciókra, amelyek a magán és vállalati szereplők mellett a hálózatüzemeltetők, a piaci közvetítők és a szabályozói intézmények részvételét is stabilizálhatják (Bakhuis és mtsai., 2025; Maeng és mtsai., 2020; Zahler és mtsai., 2024).

Felhasznált módszerek

A kutatás módszertani felépítése egymásra épülő, hierarchikus felépítést követ. Az első szint az adatbázis és az adatelőkészítés, a második szint négy elemzési modul és a harmadik szint a tézisekhez rendelt szintézis. A megközelítés hiteles nemzetközi adatbázisokra és hazai rendszerüzemeltetői, valamint ágazati forrásokra támaszkodik. Az empirikus bázist az elektromobilitási és járműpiaci idősorok, a töltőinfrastruktúra mutatók és az energiarendszer jellemzői adják, kiemelten az EAFO, az ACEA és az Eurostat adatkörei, továbbá a hazai rendszeradatok és jelentések (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), 2025; European Commission, 2025; Eurostat, 2025; MAVIR, 2024). Az adatelőkészítés során konzisztenciaellenőrzés és keresztforrásos összevetés történt, a hiányzó értékek kezelésére idősoros becslés került alkalmazásra, az

összehasonlíthatóságot pedig egységes pénzügyi bázisévhez kötött, euróalapú harmonizáció biztosította.

A gazdasági racionalitás értékelése a régióspecifikus paraméterezésű teljes birtoklási költség modellre épül, amely a beszerzési és finanszírozási tételek, az értékvesztés, az energiafelhasználás, valamint az üzemeltetési és karbantartási költségek időbeli lefutását egységes diszkontált keretben kezeli. A modell a közép európai használtautó piac és a lokális energiaár környezet hatásait expliciten beemeli, és érzékenységvizsgálatokkal teszteli a kulcsparaméterek stabilitását (Horváth és mtsai., 2023). A vállalati alkalmazási szintet az elektromos autómegosztás pénzügyi működőképességének számszerűsítése képviseli benchmarking alapú költség és bevételstruktúrával, ezt sztochasztikus Monte Carlo szimuláció egészíti ki. A keresleti ingadozás, a kihasználtság, az energiaárkitettségek és a káreseménykockázat hatása eloszlásalapú módon jelenik meg, a döntési kimenet a nyereségességi valószínűség és a diszkontált pénzáram mutatók eloszlása, scenárió és stressztesztekkel alátámasztva (Briguglio & Formosa, 2023).

A regionális mintázatok és fejlődési pályák feltárása többváltozós indikátorrendszerre épül, amely az elektromos autó penetráció, a töltőinfrastruktúra sűrűsége és az energiarendszer karbonintenzitása mentén képezi le az uniós különbségeket. A normalizálás és a rangsor alapú csoportosítás kézi, mégis reprodukálható klaszterlogikával történt. Az irányhelyesítés következetesen érvényesült ott, ahol a kedvező teljesítmény alacsonyabb értéket jelent. A robosztusságot párhuzamos normalizálási futtatások támasztják alá, a fő mintázatok ésszerű küszöbtartományban stabilak. Az eljárás a közép-európai sajátosságokat a fejlett és a felzárkózó piacok viszonyában értelmezi, és az eltérő bevezetési prioritásokat módszertanilag is alátámasztja (European Commission, 2025; Eurostat, 2025; Máthé és mtsai., 2025).

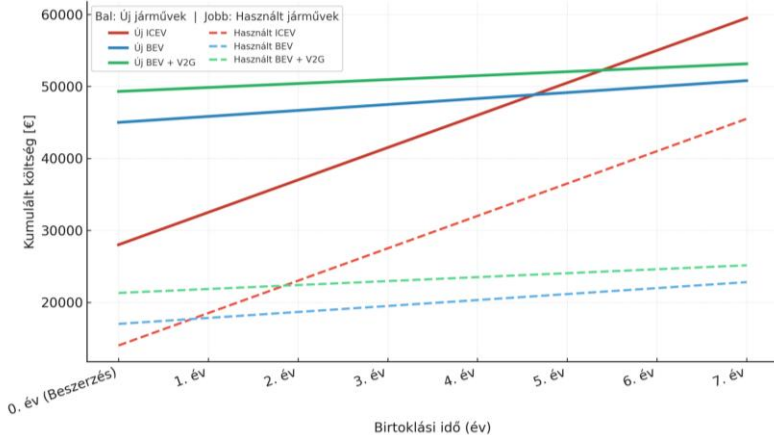
A környezeti hatásvizsgálat scenárióvezérelt életciklus elemzési keretrendszerrel alkalmaz. A számítás az akkumulátorhasználatból eredő többletterheléseket együtt kezeli a villamosenergia-rendszerben elérhető emisszió kiváltással és a tárolókapacitás igény mérséklődésével. A funkcionális egység a szolgáltatott hálózati rugalmassághoz rendelt energiamennyiség, a rendszerhatár pedig úgy került kijelölésre, hogy az akkumulátor terhelése és a kiváltott hálózati hatások közös mérlegben szerepeljenek. A töltés időzítése és a hálózati emissziós profil időbeli alakulása külön kerül értelmezésre, majd az eredmények a legfrissebb európai életciklusos összevetésekhez illeszkednek, figyelembe véve a termelési szerkezet változását és az okos, illetve kétirányú töltés rendszerszintű következményeit (Ravi & Aziz, 2022; Transport & Environment, 2024; Council of European Energy Regulators, 2025).

A módszertani leírást a társadalmi és intézményi adaptáció elemzése zárja. Az anyag nemzetközi pilotok és esettanulmányok kvalitatív összegzésére támaszkodik, a részvételt formáló ösztönzők azonosításával, különös tekintettel a kényelmi tényezőkre, a kockázatteret, a bizalomra és az aggregátori közvetítés szerepére. A kiválasztás dokumentáltsági és közép-európai relevancia szempontok szerint történt. A tartalomelemzés egységes kódolási rendet követ, az elfogadás, a bizalom, a kockázat, a kompenzáció és az intézményi garanciák dimenzióiban. Az értelmezés a V2G részvételi mintázatok friss összegző eredményeihez igazodik, és a szabályozási környezethez kötött megvalósítási akadályokat is kezeli (Andersen és mtsai., 2019; Cenex, 2021; Liu és mtsai., 2025). A továbbiakban a tézisek betűkóddal szerepelnek, a gazdasági tézisek (G), a regionális tézisek (R), a környezeti és életciklus szemléletű tézisek (K), a multidiszciplináris tézis (M) jelölést kapnak.

Kutatási eredmények

1. tézis (G1): TCO-küszöbök és a szekunder piac szerepe a régiós diffúzióban

A régióspecifikus dinamikus TCO modell futtatásai alapján a BEV és ICEV teljes birtoklási költsége több scenárióban a használat közepén közelít egymáshoz. Új járműnél ez az 5–6. évben jelenik meg, a tartós BEV-előny pedig jellemzően hosszabb időtáv és nagyobb éves futás mellett rajzolódik ki. A küszöbértékek 7 év és évi $\geq 18\ 000$ km körül adódnak, az eredmény ugyanakkor érzékeny a villamosenergia- és üzemanyagárak szintjére, valamint a maradványértékre. A szekunder piaci scenáriókban a használt BEV a horizont végére gyakran a legköltséghatékonyabb alternatívává válik, mert a nyugat-európai értékvesztési pályákból származó árcsökkenés, az alacsonyabb tőkeköltség és az üzemeltetési megtakarítás együttesen érvényesül. A V2G-kompatibilitás eszközoldali többletberuházása rövid és középtávon mérsékelheti az előnyt, hosszabb távon azonban továbbra is az üzemeltetési megtakarítás és a maradványérték szintje a meghatározó.



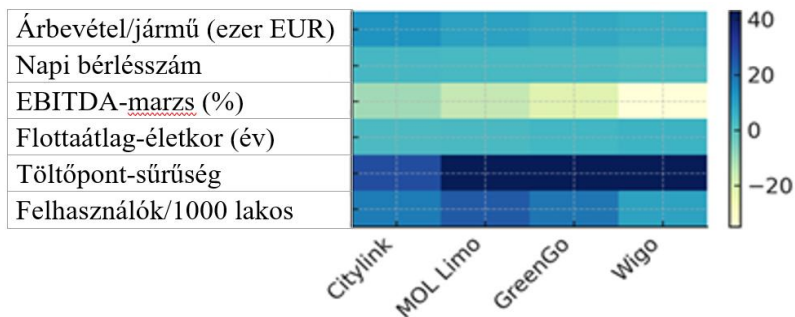
1. ábra BEV és ICEV kumulált teljes birtoklási várható költsége 2023–2030 közötti időszakban Forrás: saját számítás és szerkesztés

2. tézis (G2): Az e-autómegosztás üzleti fenntarthatósága és a V2G-hez köthető kiegészítő bevételek szerepe

A budapesti és régiós e-carsharing szolgáltatók KPI-alapú összevetése két, jól elkülöníthető működési mintázatot mutatott. Az első csoportba azok a szolgáltatók tartoznak, amelyek magasabb járműenkénti árbevételt érnek el, több a napi bérlésük, kedvezőbb az EBITDA-marzsuk, és jellemzően fiatalabb flottával működnek. A második csoportot azok a szereplők alkotják, ahol alacsonyabb a kihasználtság, gyengébb a jövedelmezőség, és az idősebb járműállomány miatt nagyobb az amortizációs nyomás.

A Monte Carlo cash-flow szimulációk szerint a jelenlegi árazás és kihasználtság mellett az üzletág önmagában nem stabilan fenntartható. A scenáriók többségében a diszkontált pénzáram kedvezőtlen, és a kockázati profilt főként a töltési energiaár volatilitása és a keresleti ingadozás határozza meg.

A fenntarthatóságot célzó beavatkozások közül a flottaifiatalítás mintegy 8% hatékonyságjavulást adhat. A V2G-integráció kétirányú DC-töltéssel és éjszakai visszatáplálással 8–12% többletbevételt képes biztosítani, ami több konfigurációban a pozitív cash-flow feltétele. Kiegészítésként az adatmonetizáció és a dinamikus tarifák további 4–6% hatékonyságjavulást eredményezhetnek.



2. ábra KPI-hő térkép – e-carsharing szolgáltatók összevetése
Forrás: saját számítás és szerkesztés

3. tézis (R1): Az elektromobilitási indikátorrendszer és klaszterezés eredményei az Európai Unióban

Az EU27 elektromobilitási pozíciói három indikátor együttes értékelésével jól elkülönülő országcsoportokra bonthatók. Az összevetés az EV-penetrációra (EV/1000 fő), a nyilvános töltőinfrastruktúra sűrűségére (töltőpont/100 000 fő) és az alacsony karbonkibocsátású villamosenergia-termelés arányára épült. A besorolás stabilitását három, egymást kontrolláló eljárás adta: rangsor alapú pontszám, min–max. normalizálás és z-score standardizálás. A végső klasztercímkek többségi egyezéssel adódtak, és a robusztussági vizsgálat 18 országnál teljes egyezést, 9-nél részleges egyezést mutatott, ellentmondó (1/3) eset nélkül.

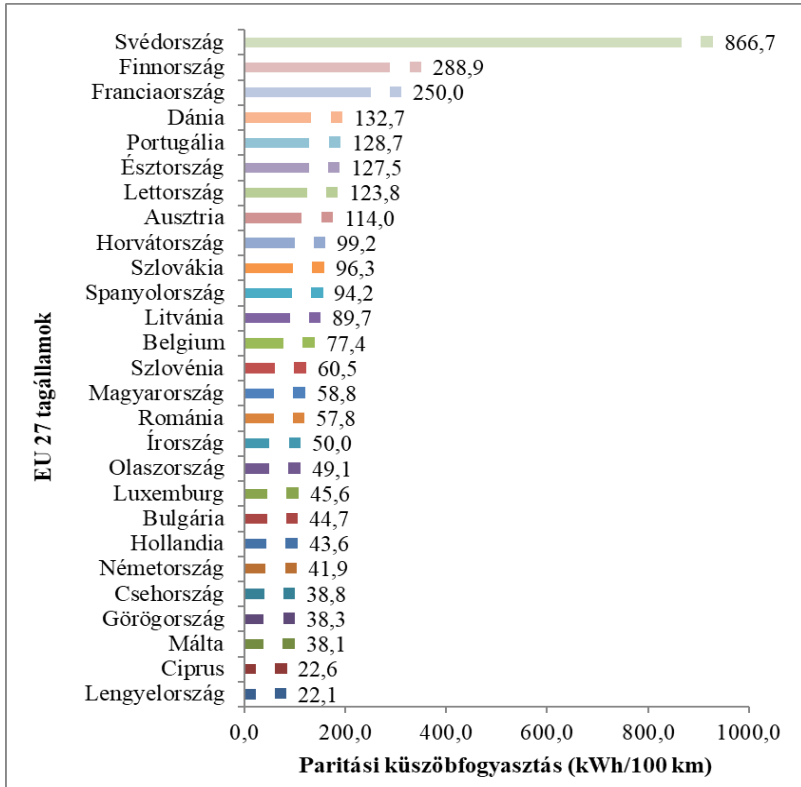
Fejlett	Hollandia, Svédország, Dánia, Belgium, Finnország, Ausztria, Franciaország
Gyorsan fejlődő	Luxemburg, Portugália, Németország, Szlovénia, Spanyolország
Magas potenciál	Szlovákia, Horvátország, Magyarország, Lettország, Írország, Olaszország, Észtország, Ciprus
Feltörekvő	Görögország, Csehország, Románia, Litvánia, Bulgária, Málta, Lengyelország

1. táblázat Az EU27 tagállamainak elektromobilitási klaszterbesorolása az EV/1000 fő, a töltőpont/100 000 fő és az alacsony C-kibocsátás alapján.
Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján

A hárompilléres indikátorrendszer klaszterezése Közép-Európa több országát a magas potenciálú csoportba sorolja, ahol a profil közepes és heterogén, a felzárkózás pedig szakpolitikai és beruházási eszközökkel formálható. A képet az alacsonyabb EV-bázis, a töltőhálózat hiányai és a lassabb dekarbonizáció alakítja, ezért a V2G mozgásteret a nyugat-európai mintáktól eltérően elsősorban infrastruktúra-bővítéshez és energiamix-tisztuláshoz kötött.

4. tézis (K1): EV-k használatából eredő CO₂-kibocsátás és a villamosenergia-mix összefüggései

A BEV-ek üzemeltetési CO₂-terhelése országonként eltér, mert az áramtermelés karbonintenzitása és a jármű fogyasztása együtt dönt. Ezt a 130 g/km-es ICEV-referenciához viszonyított e* paritási küszöbfogyasztás fejezi ki, vagyis az a kWh/100 km érték, ahol a BEV eléri a referencia-kibocsátást. Tiszta energiámnél az e* magas, ezért az előny jellemzően megmarad, szénintenzív mixnél alacsony, így könnyen eltűnik. Emiatt a V2G környezeti hozadéka is csak valós idejű karbonintenzitáshoz igazított töltéssel érvényesül



3. ábra Paritási küszöbfogyasztás (e*) EU27 tagállamokban (ICEV referencia: 130 g/km) Forrás: saját számítás és szerkesztés

5. tézis (R2): Regionális kiegyenlítés és hálózati rugalmasság V2G-vel scenárióalapú becslések alapján

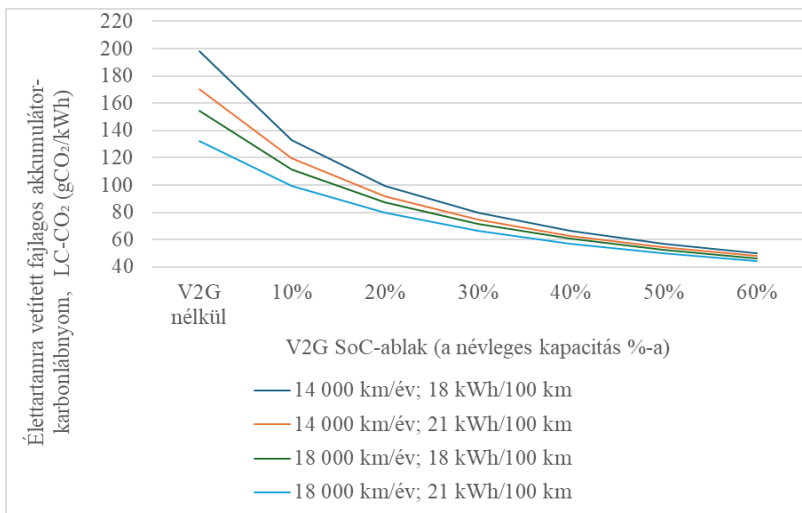
A hálózati és energiamix-szenáriók alapján a kétirányú töltésre képes elektromosjármű-flották regionális léptékben mérséklék a csúcsterhelési helyzeteket és javítják a rendelkezésre álló rugalmasságot, miközben a villamosenergia-rendszer átlagos karbonintenzitása is csökken. Gazdasági dimenzióban egy 5–10 kW névleges teljesítményű, rendszeresen szolgáltató egység nagyságrendileg 1000–1800 euró/év bevételi potenciált érhet el, miközben a kiegyenlítési költség tipikusan 4–5 euró/MWh mértékben mérséklődhet. Hálózati dimenzióban a kritikus városi és elővárosi szakaszokon 15–20% csúcsterhelés-csökkenés és 3–4% feszültség-ingadozás-csillapítás adódhat, a rugalmassági mutató pedig 25–35%-kal javulhat. Energia- és klímapolitikai dimenzióban 20–25% átlagos CO₂-intenzitás-csökkenés és 15–20% megújulókihasználtság-javulás becsülhető.

Indikátor megnevezése	Becsült érték / hatás	Megjegyzés
Éves bevételi potenciál	1000 – 1800 €/év	5–10 kW egység (frekvenciaszabályozás)
Kiegyenlítési költség csökkenése	4 – 5 €/MWh	Átlagos csökkenés
Hálózatfejlesztési igény	Kitolódik	Kapacitásbővítés mérséklése
Feszültség-ingadozás csökkenése	3 – 4%	Amplitúdó mérséklődése
Csúcsterhelés-csökkenés	15 – 20%	Kritikus városi/elővárosi szakaszon
Rugalmassági index javulása	25 – 35%	Növelt részvételi arány mellett
Átlagos CO ₂ -intenzitás csökkenése	20 – 25%	~380 → 295 gCO ₂ /kWh
Megújuló (RES) kihasználtság	+15 – 20%	Termelés-korlátozás csökkenése
Akkumulátor-degradáció	Semleges	Vezérelt profil esetén nem romlik

2. táblázat A V2G-technológia regionális hatásainak becsült indikátormátrixa
 Forrás: saját számítás és szerkesztés

6. tézis (K2): A „V2G-paradoxon” és a fajlagos életciklus-terhelés csökkenése

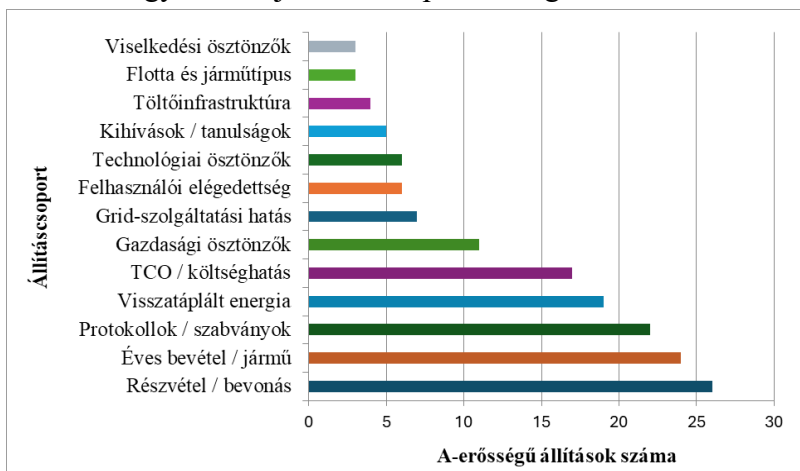
A kétirányú üzem az akkumulátor magasabb kihasználtságán keresztül csökkenti az egységnyi energiaszolgáltatásra jutó életciklus-CO₂-terhelést (LC-CO₂). A mikroszintű forgatókönyvekben a V2G-re megnyitott SoC-ablak 10%-ról 60%-ra bővítése a napi kapacitásigényt a 19–29%-os referenciatartományból több esetben 70–80% fölé emelte, és ezzel együtt az LC-CO₂ a 132–198 gCO₂/kWh sávból 44–50 gCO₂/kWh tartományba csökkent. A SoC-ablak bővítésével mérséklődött a futásteljesítmény (14 000 vs. 18 000 km/év) és a fajlagos fogyasztás (18 vs. 21 kWh/100 km) hatása, a profilok közötti különbségek konvergáltak. A „V2G-paradoxon” lényege, hogy a többlet-ciklizálás mellett is javulhat a fajlagos mutató, mert a gyártás egyszeri karbonterhe több, élettartam alatti energiaszolgáltatásra oszlik szét.



4. ábra Az akkumulátor élettartamra vetített fajlagos karbonlábnyomának (LC-CO₂) alakulása a V2G SoC-ablak függvényében
Forrás: saját szerkesztés és számítás

8. tézis (M1): A V2G bevezetésének minimumfeltételei

Nemzetközi kísérleti projektek kvalitatív meta-analízise alapján a V2G bevezetéséhez kapcsolódó ösztönző-ökoszisztéma modellje került kialakításra. Közpolitikai értelemben az eredmények azt jelzik, hogy a V2G nem egyetlen szabályozási lépésen múlik, hanem több, egymásra épülő beavatkozási terület összehangolt kezelésén. Az ábra a bevezetési témacsoportokat és azok nemzetközi alátámasztottságát mutatja. Ahol több jelölés látható, ott több projektben ismétlődik ugyanaz a sikerfeltétel. A legerősebben alátámasztott csomópontok a részvétel és bevonás, a járműre jutó bevétel, a szabványosított rendszerkapcsolatok és a költséghatás, amelyek együtt a mérhetőség és elszámolhatóság, a kiszámítható ösztönzők és az egyszerű belépés szakpolitikai minimumait jelölik ki. Közép-Európában a részvétel stabil elterjedését várhatóan az átlátható és auditálható mérés-elszámolás, a felhasználói költségkiettség korlátozhatósága és a kockázatmegosztást biztosító, automatizált aggregátori működés együttes teljesülése alapozza meg.



6. ábra A-erősségű állítások állításcsoportonként Forrás: saját szerkesztés és számítás Forrás: saját szerkesztés és számítás

Irodalomjegyzék

1. Adegbohun, F., Von Jouanne, A., Agamloh, E., & Yokochi, A. (2024). A Review of Bidirectional Charging Grid Support Applications and Battery Degradation Considerations. *Energies*, *17.0*(6), 1320. <https://doi.org/10.3390/en17061320>
2. Amamra, S.-A., & Marco, J. (2019). Vehicle-to-Grid Aggregator to Support Power Grid and Reduce Electric Vehicle Charging Cost. *IEEE Access*, *7*, 178528–178538. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2958664>
3. Andersen, P. B., Hashemi Toghroljerdi, S., Sørensen, T. M., Christensen, B. E., Høj, J. C. M. L., & Zecchino, A. (2019). The Parker Project: Final Report. In *The Parker Project: Final Report* [Report]. Technical University of Denmark.
4. Bakhuis, J., Barbour, N., & Chappin, É. J. L. (2025). Exploring user willingness to adopt vehicle-to-grid (V2G): A statistical analysis of stated intentions. *Energy Policy*, *203*, 114619. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114619>
5. Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars* (White Paper). International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
6. Briguglio, M., & Formosa, G. (2023). Sharing Is Caring: An Economic Analysis of Consumer Engagement in an Electric Vehicle Sharing Service. *Sustainability*, *15*(6), 5502. <https://doi.org/10.3390/su15065502>
7. Cenex. (2021). *Project Sciurus Trial Insights: Findings from 300 Domestic V2G Units in 2020*. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Sciurus-Trial-Insights.pdf>
8. Christensen, K., Ma, Z., Demazeau, Y., & Jørgensen, B. N. (2021). Methodology for identifying technical details of smart energy solutions and research gaps in smart grid: An example of electric vehicles in the energy system. *Energy Informatics*, *4*(S2), 38. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00160-w>
9. Council of European Energy Regulators. (2025). *CEER Annual Report 2024*. <https://www.ceer.eu/>
10. Darani, Z. H., Taheri Demne, M., Zanjirani, D. M., & Zackery, A. (2021). Conceptualization of a new generation of smart energy systems and the transition toward them using anticipatory systems.

- European Journal of Futures Research*, 9.0(1), 15.
<https://doi.org/10.1186/s40309-021-00184-1>
11. European Association for Storage of Energy (EASE). (2022). *Energy Storage Targets 2030 and 2050: Full Report*. European Association for Storage of Energy (EASE).
<https://energystorageeurope.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/>
 12. European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). (2025). *New car registrations: +1.4% in November 2025 year-to-date*. ACEA.
https://www.acea.auto/files/Press_release_car_registrations_November_2025.pdf
 13. European Commission. (2025). *EAFO incentives & legislation: Hungary*. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>
 14. Eurostat. (2025). *GDP per capita in PPS* [Dataset]. Eurostat.
<https://doi.org/10.2908/TEC00114>
 15. Ghadikolaei, M. A., Wong, P. K., Cheung, C. S., Zhao, J., Ning, Z., Yung, K.-F., Wong, H. C., & Gali, N. K. (2021). Why is the world not yet ready to use alternative fuel vehicles? *Heliyon*, 7(7), e07527.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07527>
 16. Horváth, G., Bai, A., Szegedi, S., Lázár, I., Máthé, C., Huzsvai, L., Zakar, M., Gabnai, Z., & Tóth, T. (2023). A Comprehensive Review of the Distinctive Tendencies of the Diffusion of E-Mobility in Central Europe. *Energies*, 16(14), 5421.
<https://doi.org/10.3390/en16145421>
 17. Husmann, J., Beylot, A., Perdu, F., Pinochet, M., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2024). Towards consistent life cycle assessment modelling of circular economy strategies for electric vehicle batteries. *Sustainable Production and Consumption*, 50, 556–570.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.001>
 18. International Energy Agency. (2022). *Hungary 2022: Energy Policy Review*. <https://www.iea.org/reports/hungary-2022>
 19. Knobloch, F., Hanssen, S., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewprecha, U., Huijbregts, M. A. J., & Mercure, J.-F. (2020). Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability*, 3(6), 437–447.
<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
 20. Leal Filho, W., Abubakar, I. R., Kotter, R., Grindsted, T. S., Balogun, A.-L., Salvia, A. L., Aina, Y. A., & Wolf, F. (2021). Framing Electric Mobility for Urban Sustainability in a Circular Economy Context:

- An Overview of the Literature. *Sustainability*, 13(14), 7786. <https://doi.org/10.3390/su13147786>
21. Liu, F., Wei, Z., Lin, Y., Huang, X., Li, Y., Huang, Y., & Lim, M. K. (2025). Vehicle-To-Grid Technology Acceptance for Electric Vehicle Users: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda. *International Journal of Consumer Studies*, 49(3). <https://doi.org/10.1111/ijcs.70065>
 22. Maeng, K., Ko, S., Shin, J., & Cho, Y. (2020). How Much Electricity Sharing Will Electric Vehicle Owners Allow from Their Battery? Incorporating Vehicle-to-Grid Technology and Electricity Generation Mix. *Energies*, 13(16), 4248. <https://doi.org/10.3390/en13164248>
 23. Máthé, C., Péntzes, J., Horváth, G., Zakar, M., & Tóth, T. (2025). Alternative Forms of Transport and Possibilities of Sustainable Transport in the European Union. In M. A. Dulebenets, S. Wiśniewski, & M. Borowska-Stefańska (Szerk.), *Transport and Climate Change: New Mitigation and Adaptation Strategies* (o. 233–258). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00563-2_10
 24. MAVIR. (2024). *A magyar villamosenergia-rendszer adatai 2024*. https://www.mavir.hu/documents/10258/0/MEKH_statistikai_kiad_vany_VILLAMOSENERGIA_2024_A4_10.pdf
 25. Preis, V., & Biedenbach, F. (2023). Assessing the incorporation of battery degradation in vehicle-to-grid optimization models. *Energy Informatics*, 6(S1), 33. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00288-x>
 26. Ravi, S. S., & Aziz, M. (2022). Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives. *Energies*, 15(2), 589. <https://doi.org/10.3390/en15020589>
 27. Ritter, M., & Schanz, H. (2021). Carsharing Business Models' Strategizing Mindsets Regarding Environmental Sustainability. *Sustainability*, 13(22), 12700. <https://doi.org/10.3390/su132212700>
 28. Scale. (2025). Utrecht becomes Europe's first city with a V2G electric car-sharing service. *SCALE*. <https://scale-horizon.eu/utrecht-becomes-europes-first-city-with-a-v2g-electric-car-sharing-service/>
 29. Sultan, V., Aryal, A., Chang, H., & Kral, J. (2022). Integration of EVs into the smart grid: A systematic literature review. *Energy Informatics*, 5.0(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00251-2>
 30. Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2019). Electric Vehicles as Flexibility Management Strategy for the

- Electricity System—A Comparison between Different Regions of Europe. *Energies*, 12(13), 2597. <https://doi.org/10.3390/en12132597>
31. Transport & Environment. (2024). *Public charging in Europe: Where are we at?* <https://www.transportenvironment.org/discover/public-charging-europe-where-are-we-at/>
 32. Uddin, K., Dubarry, M., & Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy*, 113, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>
 33. Vanhaverbeke, L., Schreurs, D., De Clerck, Q., Messagie, M., & Van Mierlo, J. (2017). Total cost of ownership of electric vehicles incorporating Vehicle to Grid technology. *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ever.2017.7935931>
 34. Zahler, J., Vollmuth, P., & Ostermann, A. (2024). Unlocking the Potential: An In-Depth Analysis of Factors Shaping the Success of Smart and Bidirectional Charging in a Cross-Country Comparison. *Energies*, 17.0(15), 3637. <https://doi.org/10.3390/en17153637>



Nyilvántartási szám: DEENK/31/2026.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Horváth Gábor
Doktori Iskola: Földtudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10103342

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű könyvrészletek (1)

1. Zakar, M., Lázár, I., Szegei, S., **Horváth, G.**, Tóth, T.: Az elsőgenerációs bioüzemanyagok újraértékelése.

In: Tájékoztatói kihívások, adaptációs lehetőségek / (szerk.) Kiss Emőke, Balla Dániel, MTA DTB Földtudományi Szakbizottság, Debrecen, 69-75, 2022. ISBN: 9789637064432

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (1)

2. Máthé, C., Péntzes, J., **Horváth, G.**, Zakar, M., Tóth, T.: Alternative Forms of Transport and Possibilities of Sustainable Transport in the European Union.

In: Transport and Climate Change: New Mitigation and Adaptation Strategies / Maxim A. Dulebenets; Szymon Wiśniewski; Marta Borowska-Stefańska, Springer Nature Switzerland, Cham, 233-258, 2025. ISBN: 9783032005625

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

3. **Horváth, G.**, Szegei, S., Zakar, M., Póka, C., Tóth, T.: A hazai lakossági villamosenergia szektor paradigmaváltása és a napelemes HMKE-k.

Földr. Közl. 147 (2), 202-217, 2023. ISSN: 0015-5411.

DOI: <http://dx.doi.org/10.32643/fk.147.2.10>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

4. Zakar, M., Máthé, C., Szegei, S., Vas, O. O., **Horváth, G.**, Tóth, T.: Challenges and opportunities for advancing electric carsharing in Central Europe: The Role of Infrastructure, Policy and Consumer Behavior in the Adoption of E-carsharing in Central Europe.

Folia Geographica. 66 (2), 83-119, 2024. ISSN: 1336-6157.

IF: 2





5. **Horváth, G.**, Bai, A., Szegedi, S., Lázár, I., Máthé, C., Huzsvai, L., Zakar, M., Gabnai, Z., Tóth, T.:
A Comprehensive review of the distinctive tendencies of the diffusion of e-mobility in Central Europe.
Energies. 16 (14), 1-29, 2023. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en16145421>
IF: 3

További közlemények

Magyar nyelvű könyvrészletek (1)

6. Póka, C., **Horváth, G.**, Szegedi, S., Tóth, T.: A szőlővenyige tüzelési célú hasznosítása Tokaj-Hegyalján.
In: Tájékológiai kihívások, adaptációs lehetőségek / (szerk.) Kiss Emőke, Balla Dániel, MTA DTB Földtudományi Szakbizottság, Debrecen, 76-81, 2022. ISBN: 9789637064432

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

7. Póka, C., **Horváth, G.**, Zakar, M., Szegedi, S., Tóth, T.: A szőlővenyige potenciál-felmérésének elméleti alapjai Tokaj-Hegyalján.
Földr. Közl. 147 (2), 218-229, 2023. ISSN: 0015-5411.
DOI: <http://dx.doi.org/10.32643/fk.147.2.11>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 5

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 5

A DEENK a Jelölt által a Tudósterbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2026.01.22.



Short thesis for degree of doctor of philosophy (PhD)

**ELECTROMOBILITY AND SUSTAINABILITY:
PROSPECTS OF V2G ADAPTATION
IN CENTRAL EUROPE**

by Gábor Horváth

Supervisor
Dr. Szegedi Sándor



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Earth Sciences
DEBRECEN 2026

Introduction

The European Union's climate policy strategy, framed by the Fit for 55 package and the European Green Deal, is fundamentally reshaping the continent's energy and transport systems. Transport electrification and the integration of renewable energy sources emerge as mutually reinforcing transitions that increase the flexibility requirements of the power system and raise the value of controllability. In this context, vehicle-to-grid (V2G) can be interpreted as an approach that turns vehicles from passive consumers into active, controllable grid elements and thereby provides a critical system-level flexibility function (Amamra & Marco, 2019; Ravi & Aziz, 2022; Sultan és mtsai., 2022).

The international literature predominantly builds on capital-strong Western European and North American markets; consequently, the specific conditions of Central Europe appear only partially in prevailing models. Limited household investment capacity, the fossil and nuclear dominance of the electricity mix, and grid challenges arising from variable renewable generation together form a structural context that affects both the economic and institutional implementability of V2G and the overall environmental balance (Christensen és mtsai., 2021; Horváth és mtsai., 2023; Leal Filho és mtsai., 2021).

The central claim of the dissertation is that V2G in Central Europe is neither a technological curiosity nor a distant vision, but a realistically mobilisable instrument for cost-effective support of grid stability and decarbonisation. The research aimed to develop an adaptation strategy grounded in region-specific evidence, identifying the key preconditions for implementation (Horváth és mtsai., 2023; International Energy Agency, 2022).

Objectives

The research reviewed the critical preconditions for regional V2G implementation in a logically linked sequence, spanning economic, technological, environmental, regional and behavioural-incentive relationships, at both private and corporate application levels, explicitly reflecting Central European characteristics.

The first analytical block established economic rationality. Within this block, a dynamic total cost of ownership (TCO) analysis assessed under what conditions an electric passenger car can become a competitive alternative given regional income constraints and the dominance of the used-car market (Horváth és mtsai., 2023; Vanhaverbeke és mtsai., 2017). The economic dimension was complemented by business-model analysis, which explored the operational sustainability of electric car-sharing systems and clarified the profitability role of stacked revenues from grid integration (Briguglio & Formosa, 2023; Ritter & Schanz, 2021; Scale, 2025).

The next step was a structured exploration of the regional market environment and development pathways. Through a grouping analysis, the study distinguished a supply-driven Central European development logic within European electromobility patterns and justified different implementation priorities relative to Western trajectories (Ghadikolaei és mtsai., 2021; Máthé és mtsai., 2025). Subsequently, the assessment of environmental constraints of charging control clarified under what circumstances a genuine environmental advantage can be achieved in/given the regional electricity mix, and why smart charging aligned with real-time CO₂ intensity is pivotal (Bieker, 2021; Knobloch és mtsai., 2020; Taljegard és mtsai., 2019).

At the grid-integration level, the dissertation analysed to what extent vehicle fleets, as virtual storage, can manage temporal tensions arising from solar overproduction and nuclear

baseload generation, with particular emphasis on regional balancing (Adegbohun és mtsai., 2024; Darani és mtsai., 2021). The environmental assessment, grounded in life-cycle analysis, clarified the relationship between battery wear and system-level environmental benefit, and quantified the eliminated manufacturing emissions associated with partial displacement of stationary grid storage (Husmann és mtsai., 2024; Preis & Biedenbach, 2023; Ravi & Aziz, 2022; Uddin és mtsai., 2018). Finally, the review of societal and institutional adaptation conditions focused on how the trust deficit, characteristic of the region, can be bridged through incentive design and risk-sharing arrangements, with particular attention to automated aggregator frameworks and warranty structures that can stabilise participation by private and corporate actors as well as grid operators, market intermediaries and regulatory institutions (Bakhuis és mtsai., 2025; Maeng és mtsai., 2020; Zahler és mtsai., 2024).

Methodology

The methodological design follows a hierarchical structure. Level 1 covers database construction and data preparation; level 2 consists of four analytical modules; level 3 provides a thesis-linked synthesis. The approach relies on credible international databases and domestic system-operator and sectoral sources. The empirical basis includes electromobility and vehicle-market time series, charging-infrastructure indicators and power-system characteristics, with an emphasis on EAFO, ACEA and Eurostat data domains, complemented by national system data and reports (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), 2025; European Commission, 2025; Eurostat, 2025; MAVIR, 2024). Data preparation comprised consistency checks and cross-source comparison; missing values were handled via time-series

estimation; comparability was ensured by euro-based harmonisation to a uniform financial base year.

Economic rationality is assessed through a region-specific TCO model that treats acquisition and financing items, depreciation, energy use, and operating and maintenance costs within a unified discounted framework. The model explicitly incorporates the effects of the Central European used-car market and the local energy-price environment, and tests key-parameter stability via sensitivity analysis (Horváth és mtsai., 2023). Corporate application is represented by a quantitative assessment of the financial viability of electric car-sharing using benchmarking-based cost and revenue structures, complemented by stochastic Monte Carlo simulation. Demand volatility, utilisation, energy-price exposure and damage-event risk are modelled as distributions; outputs include the probability of profitability and the distribution of discounted cash-flow indicators, supported by scenarios and stress tests (Briguglio & Formosa, 2023).

Regional patterns and development pathways are mapped using a multivariate indicator system capturing EU differences along EV penetration, charging-infrastructure density and electricity-system carbon intensity. Normalisation and rank-based grouping follow a manual yet reproducible clustering logic. Directional alignment is consistently applied where favourable performance corresponds to lower values. Robustness is supported by parallel normalisation runs; main patterns remain stable within a reasonable threshold range. The procedure interprets Central European characteristics in relation to developed and catching-up markets and methodologically supports differing implementation priorities (European Commission, 2025; Eurostat, 2025; Máthé és mtsai., 2025).

Environmental impact assessment applies a scenario-driven life-cycle framework. The calculation jointly accounts for additional battery utilisation burdens, emission substitution

achievable in the power system, and reductions in storage-capacity demand. The functional unit is the energy quantity associated with delivered grid flexibility, and the system boundary is set so that battery loading and displaced grid impacts are evaluated in a common balance. Charging timing and the temporal profile of grid emissions are interpreted separately, and the results are aligned with the most recent European life-cycle comparisons, considering changes in generation structure and system-level consequences of smart and bidirectional charging (Ravi & Aziz, 2022; Transport & Environment, 2024; Council of European Energy Regulators, 2025).

The methodological section concludes with the analysis of societal and institutional adaptation. The material builds on a qualitative synthesis of international pilots and case studies, identifying participation-shaping incentives with emphasis on convenience factors, perceived risk, trust and the role of aggregator intermediation. Selection followed documentation quality and Central European relevance. Content analysis applies a uniform coding scheme across the dimensions of acceptance, trust, risk, compensation and institutional guarantees. Interpretation is aligned with recent synthesised findings on V2G participation patterns and also addresses implementation barriers tied to regulatory contexts (Andersen és mtsai., 2019; Cenex, 2021; Liu és mtsai., 2025). In what follows, theses are indicated by letter codes stem from the hungarian terms: economic theses (G), regional theses (R), environmental and life-cycle theses (K), and the multidisciplinary thesis (M).

Scientific Results

Thesis 1 (G1): TCO thresholds and the role of the secondary market in regional diffusion

Based on the runs of the region-specific dynamic TCO model, the total cost of ownership of BEVs and ICEVs converges in several scenarios around the middle of the use period. For new vehicles, this typically appears in years 5–6, while a persistent BEV advantage generally emerges over longer horizons and with higher annual mileage. Threshold values arise around a 7-year horizon and $\geq 18,000$ km/year; however, results are sensitive to electricity and fuel price levels and to residual value. In secondary-market scenarios, used BEVs often become the most cost-effective alternative by the end of the horizon, as price declines driven by Western European depreciation paths, lower capital costs and operating savings reinforce each other. The additional upfront investment required for V2G compatibility can reduce the advantage in the short and medium term; in the long run, operating savings and residual value remain decisive.

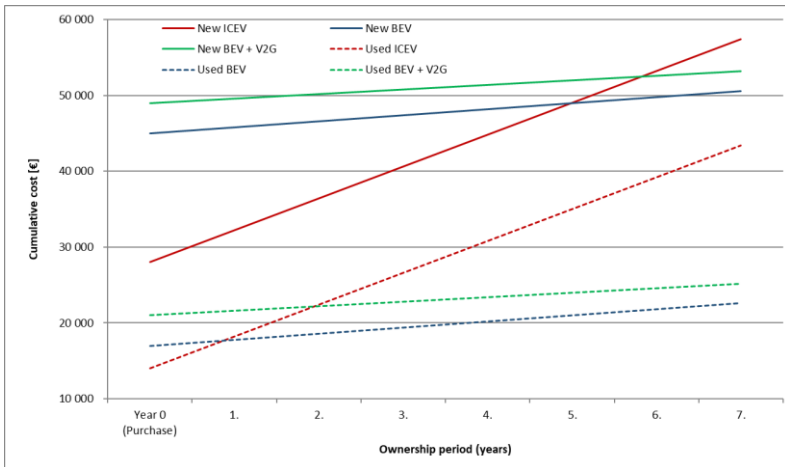


Figure 1. Cumulative expected total cost of ownership (TCO) of BEVs and ICEVs over 2023–2030. Source: own calculations and editing

Thesis 2 (G2): Business sustainability of e-carsharing and the role of supplementary V2G-related revenues

A KPI-based comparison of Budapest and regional e-carsharing providers revealed two clearly distinguishable operating patterns. The first group comprises providers achieving higher revenue per vehicle, more daily rentals, a more favourable EBITDA margin and typically a younger fleet. The second group consists of actors with lower utilisation, weaker profitability and stronger depreciation pressure due to an older vehicle stock.

Monte Carlo cash-flow simulations indicate that, under current pricing and utilisation, the business line is not stably sustainable on its own. In most scenarios, discounted cash flow is unfavourable, and the risk profile is driven primarily by charging-energy price volatility and demand fluctuations.

Among interventions targeting sustainability, fleet rejuvenation can deliver around 8% efficiency improvement. V2G integration—via bidirectional DC charging and night-time feed-in—can provide 8–12% additional revenue, which is a condition for positive cash flow in several configurations. As complements, data monetisation and dynamic tariffs can yield a further 4–6% efficiency improvement.

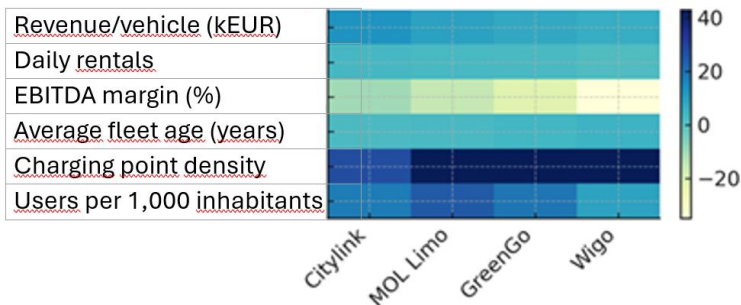


Figure 2. KPI heatmap – comparison of e-carsharing providers
Source: own calculations and editing

Thesis 3 (R1): Results of the electromobility indicator system and clustering in the European Union

EU27 electromobility positions can be partitioned into distinct country groups by jointly evaluating three indicators: EV penetration (EV/1,000 inhabitants), public charging-infrastructure density (charge points/100,000 inhabitants) and the share of low-carbon electricity generation. Classification stability was supported by three mutually controlling procedures: rank-based scoring, min–max normalisation and z-score standardisation. Final cluster labels were assigned by majority agreement; the robustness check showed full agreement for 18 countries and partial agreement for 9, with no contradictory (1/3) cases.

Developed	Netherlands, Sweden, Denmark, Belgium, Finland, Austria, France
Rapidly developing	Luxembourg, Portugal, Germany, Slovenia, Spain
High potential	Slovakia, Croatia, Hungary, Latvia, Ireland, Italy, Estonia, Cyprus
Emerging	Greece, Czech Republic, Romania, Lithuania, Bulgaria, Malta, Poland

Table 1. Electromobility cluster classification of EU27 member states based on EV/1,000 inhabitants, charge points/100,000 inhabitants and the low-carbon electricity share. Source: own compilation based on (Máthé et al., 2025)

Clustering based on the three-pillar indicator system assigns several Central European countries to the high-potential group, where profiles are moderate and heterogeneous and catching-up can be shaped through policy and investment instruments. The pattern is driven by a lower EV base, gaps in the charging network and slower decarbonisation; therefore, unlike Western European contexts, the room for V2G in Central Europe is primarily tied to infrastructure expansion and electricity-mix decarbonisation.

Thesis 4 (K1): CO₂ emissions from EV use and the electricity mix

Operational CO₂ burdens of BEVs differ across countries because electricity-generation carbon intensity and vehicle energy consumption jointly determine outcomes. This relationship is captured by the parity threshold consumption e^* relative to a 130 gCO₂/km ICEV reference, (i.e., the kWh/100 km value at which a BEV reaches the reference emission level). With a clean electricity mix, e^* is high and the advantage generally persists; with a carbon-intensive mix, e^* is low and can readily vanish. Accordingly, the environmental benefit of V2G materialises only when charging is aligned with real-time carbon intensity.

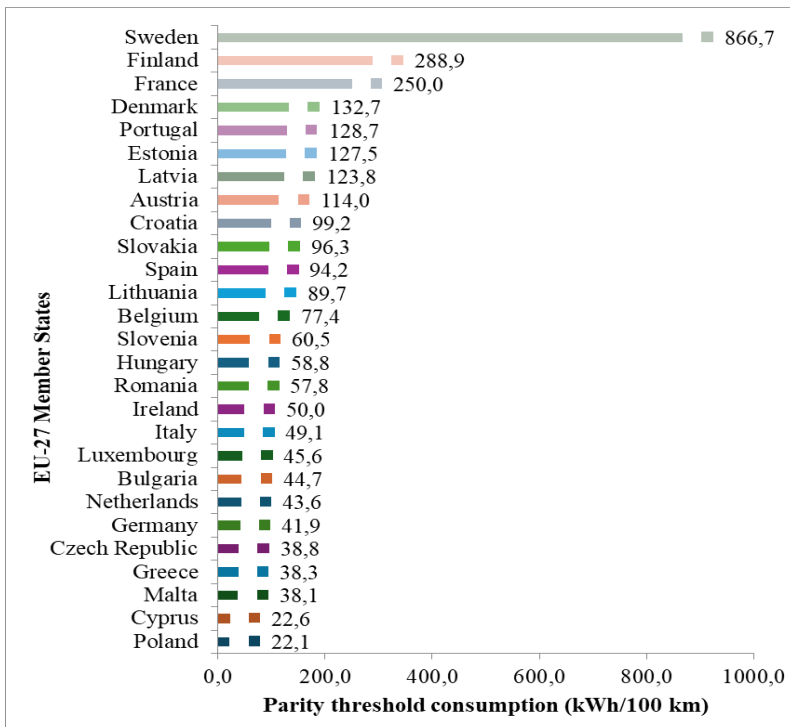


Figure 3. Parity threshold consumption (e^*) in EU27 member states (ICEV reference: 130 g/km). Source: own calculations and editing

Thesis 5 (R2): Regional balancing and grid flexibility with V2G – scenario-based estimates

Based on grid and electricity-mix scenarios, bidirectionally chargeable EV fleets can reduce peak-load situations at regional scale and improve available flexibility, while also lowering the average carbon intensity of the power system. Economically, a regularly providing unit with nominal power of 5–10 kW can reach a revenue potential of EUR 1,000–1,800 per year, while balancing costs can typically decline by about 4–5 EUR/MWh. From a grid perspective, in critical urban and suburban sections, a 15–20% peak-load reduction and 3–4% damping of voltage fluctuations may occur, and a flexibility indicator can improve by 25–35%. From an energy and climate-policy perspective, an average CO₂-intensity reduction of 20–25% and a renewables-utilisation improvement of 15–20% can be estimated.

Indicator	Estimated value / impact	Note
Annual revenue potential	1000 – 1800 €/year	5–10 kW unit (frequency regulation)
Reduction in average balancing energy cost	4 – 5 €/MWh	Average reduction
Peak load reduction	Shifted/delayed	Reduced need for capacity expansion
Improvement in voltage stability	3 – 4%	Reduced amplitude
Flexibility index improvement	15 – 20%	On critical urban/suburban sections
Reduction in CO ₂ intensity	25 – 35%	With increased participation rate
Improved utilisation of renewables	20 – 25%	~380 → 295 gCO ₂ /kWh
Change in battery degradation	+15 – 20%	Reduced curtailment
Utilisation of bidirectional chargers	Neutral	Does not deteriorate under controlled operating profiles

Table 2. Estimated indicator matrix of regional V2G impacts. Source: own calculations and editing

Thesis 6 (K2): The “V2G paradox” and the reduction of specific life-cycle burden

Bidirectional operation reduces the life-cycle CO₂ burden per unit of energy service (LC-CO₂) by increasing the utilisation of the battery. In micro-level scenarios, expanding the V2G-enabled SoC window from 10% to 60% raised daily capacity demand from the 19–29% reference range to above 70–80% in several cases, while LC-CO₂ fell from 132–198 gCO₂/kWh to 44–50 gCO₂/kWh. With SoC-window expansion, the effects of annual mileage (14,000 vs. 18,000 km/year) and specific consumption (18 vs. 21 kWh/100 km) decreased, and differences between profiles converged. The essence of the “V2G paradox” is that even with additional battery cycles, the specific indicator can improve because the one-off manufacturing carbon burden is distributed over more lifetime energy services.

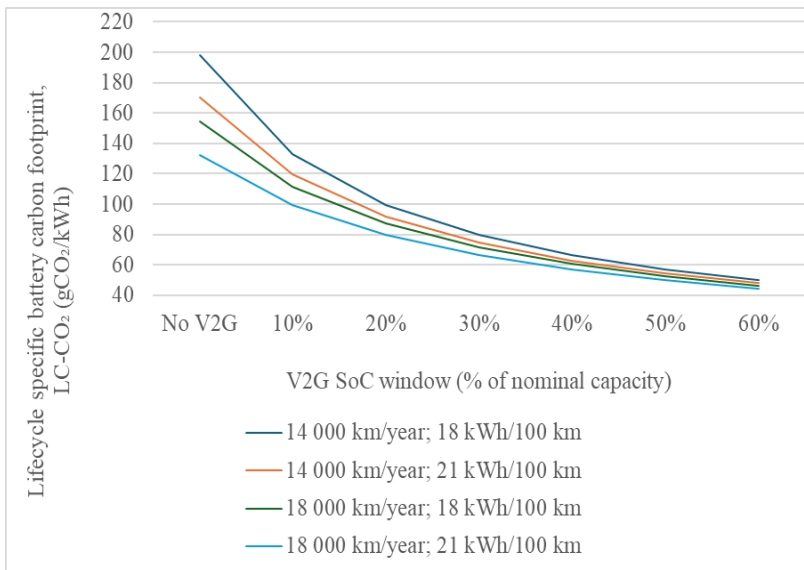


Figure 4. Battery lifetime specific carbon footprint (LC-CO₂) as a function of the V2G SoC window
Source: own calculations and editing

Thesis 7 (K3): Substitution of electricity storage and the carbon effect of avoided manufacturing

Based on the analysis of the EU's 2030 storage-power requirement, the contribution of V2G does not alter the 187 GW target value; instead, it induces a structural reallocation within the short-duration storage portfolio. Activating the battery capacity of parked vehicles displaces part of dedicated stationary battery energy storage capacity while leaving total system need unchanged. For participation-linked outputs, at a V2G share of 0.3–0.5, the V2G contribution increases to 20.1–33.5 GW, and the energy-equivalent of displaced storage rises to 40.2–67 GWh. Avoided manufacturing burdens associated with displaced storage amount to 3.518–5.863 Mt CO_{2e} by 2030 in the analysed scenarios. The CO_{2e} values reported here refer exclusively to the avoided manufacturing of displaced stationary storage; operational effects are not included in this result unit.

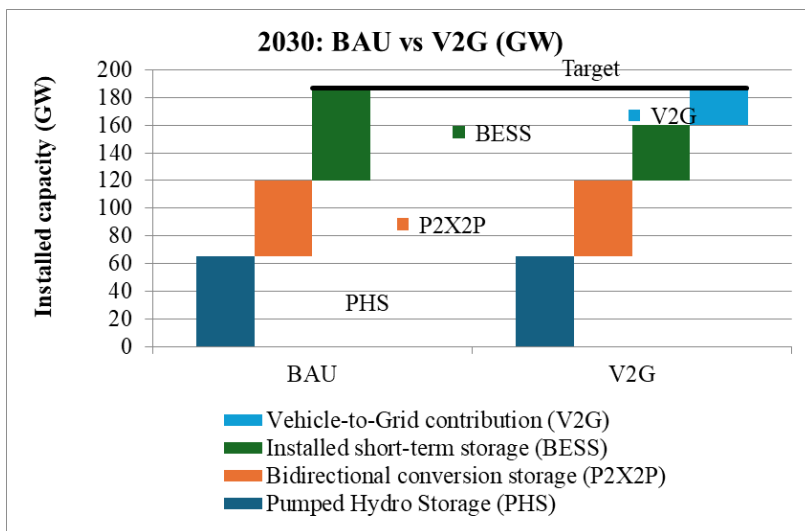


Figure 5. Composition of the EU's 2030 storage-power requirement under BAU and V2G scenarios relative to the 187 GW target. Source: own compilation based on European Association for Storage of Energy (EASE), 2022

Thesis 8 (M1): Minimum conditions for V2G deployment

Based on a qualitative meta-analysis of international pilot projects, a model of the incentive ecosystem supporting V2G deployment was developed. From a policy perspective, results indicate that V2G does not hinge on a single regulatory step; it depends on coordinated treatment of several interlinked intervention areas. The figure shows implementation topic groups and their international support; where more markers are visible, the same success condition recurs across multiple projects. The most strongly supported nodes are participation and engagement, revenue per vehicle, standardised system interfaces and cost-effectiveness; together, these define the policy minimums of measurability and auditability, predictable incentives and low-friction entry. In Central Europe, stable diffusion is likely to rest on the joint fulfilment of transparent and auditable measurement–settlement, controllable user cost exposure and automated aggregator operation that provides risk sharing.

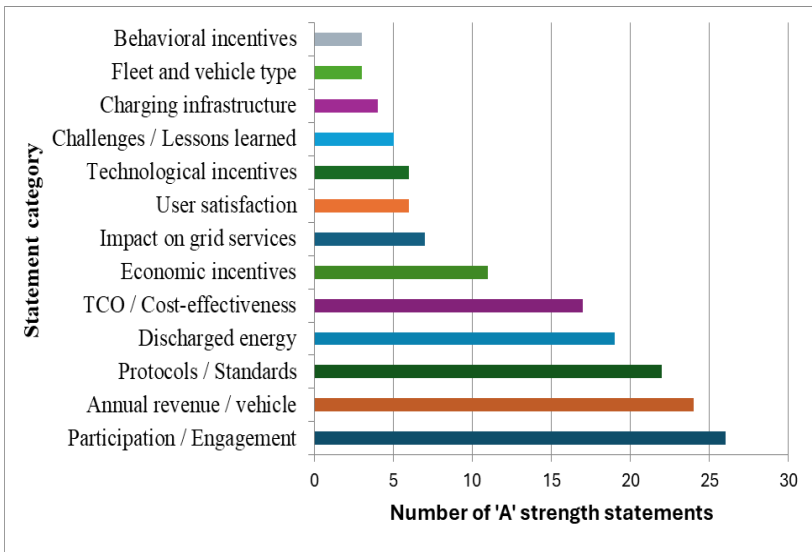


Figure 6. A-strength claims by claim group. Source: own calculations and editing

References

1. Adegbohun, F., Von Jouanne, A., Agamloh, E., & Yokochi, A. (2024). A Review of Bidirectional Charging Grid Support Applications and Battery Degradation Considerations. *Energies*, 17.0(6), 1320. <https://doi.org/10.3390/en17061320>
2. Amamra, S.-A., & Marco, J. (2019). Vehicle-to-Grid Aggregator to Support Power Grid and Reduce Electric Vehicle Charging Cost. *IEEE Access*, 7, 178528–178538. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2958664>
3. Andersen, P. B., Hashemi Toghroljerdi, S., Sørensen, T. M., Christensen, B. E., Høj, J. C. M. L., & Zecchino, A. (2019). The Parker Project: Final Report. In *The Parker Project: Final Report [Report]*. Technical University of Denmark.
4. Bakhuis, J., Barbour, N., & Chappin, É. J. L. (2025). Exploring user willingness to adopt vehicle-to-grid (V2G): A statistical analysis of stated intentions. *Energy Policy*, 203, 114619. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114619>
5. Bieker, G. (2021). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars (White Paper). International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
6. Briguglio, M., & Formosa, G. (2023). Sharing Is Caring: An Economic Analysis of Consumer Engagement in an Electric Vehicle Sharing Service. *Sustainability*, 15(6), 5502. <https://doi.org/10.3390/su15065502>
7. Cenex. (2021). Project Sciurus Trial Insights: Findings from 300 Domestic V2G Units in 2020. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Sciurus-Trial-Insights.pdf>
8. Christensen, K., Ma, Z., Demazeau, Y., & Jørgensen, B. N. (2021). Methodology for identifying technical details of smart energy solutions and research gaps in smart grid: An example of electric vehicles in the energy system. *Energy Informatics*, 4(S2), 38. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00160-w>
9. Council of European Energy Regulators. (2025). CEER Annual Report 2024. <https://www.ceer.eu/>
10. Darani, Z. H., Taheri Demne, M., Zanjirani, D. M., & Zackery, A. (2021). Conceptualization of a new generation of smart energy systems and the transition toward them using anticipatory systems.

- European Journal of Futures Research, 9.0(1), 15.
<https://doi.org/10.1186/s40309-021-00184-1>
11. European Association for Storage of Energy (EASE). (2022). Energy Storage Targets 2030 and 2050: Full Report. European Association for Storage of Energy (EASE).
<https://energystorageeurope.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/>
 12. European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). (2025). New car registrations: +1.4% in November 2025 year-to-date. ACEA.
https://www.acea.auto/files/Press_release_car_registrations_November_2025.pdf
 13. European Commission. (2025). EAFO incentives & legislation: Hungary. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>
 14. Eurostat. (2025). GDP per capita in PPS [Dataset]. Eurostat.
<https://doi.org/10.2908/TEC00114>
 15. Ghadikolaei, M. A., Wong, P. K., Cheung, C. S., Zhao, J., Ning, Z., Yung, K.-F., Wong, H. C., & Gali, N. K. (2021). Why is the world not yet ready to use alternative fuel vehicles? *Heliyon*, 7(7), e07527.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07527>
 16. Horváth, G., Bai, A., Szegedi, S., Lázár, I., Máthé, C., Huzsvai, L., Zakar, M., Gabnai, Z., & Tóth, T. (2023). A Comprehensive Review of the Distinctive Tendencies of the Diffusion of E-Mobility in Central Europe. *Energies*, 16(14), 5421. <https://doi.org/10.3390/en16145421>
 17. Husmann, J., Beylot, A., Perdu, F., Pinochet, M., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2024). Towards consistent life cycle assessment modelling of circular economy strategies for electric vehicle batteries. *Sustainable Production and Consumption*, 50, 556–570.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.001>
 18. International Energy Agency. (2022). Hungary 2022: Energy Policy Review. <https://www.iea.org/reports/hungary-2022>
 19. Knobloch, F., Hanssen, S., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewprecha, U., Huijbregts, M. A. J., & Mercure, J.-F. (2020). Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability*, 3(6), 437–447.
<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
 20. Leal Filho, W., Abubakar, I. R., Kotter, R., Grindsted, T. S., Balogun, A.-L., Salvia, A. L., Aina, Y. A., & Wolf, F. (2021). Framing Electric Mobility for Urban Sustainability in a Circular Economy Context: An Overview of the Literature. *Sustainability*, 13(14), 7786.
<https://doi.org/10.3390/su13147786>

21. Liu, F., Wei, Z., Lin, Y., Huang, X., Li, Y., Huang, Y., & Lim, M. K. (2025). Vehicle-To-Grid Technology Acceptance for Electric Vehicle Users: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda. *International Journal of Consumer Studies*, 49(3). <https://doi.org/10.1111/ijcs.70065>
22. Maeng, K., Ko, S., Shin, J., & Cho, Y. (2020). How Much Electricity Sharing Will Electric Vehicle Owners Allow from Their Battery? Incorporating Vehicle-to-Grid Technology and Electricity Generation Mix. *Energies*, 13(16), 4248. <https://doi.org/10.3390/en13164248>
23. Máthé, C., Péntzes, J., Horváth, G., Zakar, M., & Tóth, T. (2025). Alternative Forms of Transport and Possibilities of Sustainable Transport in the European Union. In M. A. Dulebenets, S. Wiśniewski, & M. Borowska-Stefańska (Szerk.), *Transport and Climate Change: New Mitigation and Adaptation Strategies* (o. 233–258). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00563-2_10
24. MAVIR. (2024). A magyar villamosenergia-rendszer adatai 2024. https://www.mavir.hu/documents/10258/0/MEKH_statistikai_kiadvany_VILLAMOSENERGIA_2024_A4_10.pdf
25. Preis, V., & Biedenbach, F. (2023). Assessing the incorporation of battery degradation in vehicle-to-grid optimization models. *Energy Informatics*, 6(S1), 33. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00288-x>
26. Ravi, S. S., & Aziz, M. (2022). Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives. *Energies*, 15(2), 589. <https://doi.org/10.3390/en15020589>
27. Ritter, M., & Schanz, H. (2021). Carsharing Business Models' Strategizing Mindsets Regarding Environmental Sustainability. *Sustainability*, 13(22), 12700. <https://doi.org/10.3390/su132212700>
28. Scale. (2025). Utrecht becomes Europe's first city with a V2G electric car-sharing service. SCALE. <https://scale-horizon.eu/utrecht-becomes-europes-first-city-with-a-v2g-electric-car-sharing-service/>
29. Sultan, V., Aryal, A., Chang, H., & Kral, J. (2022). Integration of EVs into the smart grid: A systematic literature review. *Energy Informatics*, 5.0(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00251-2>
30. Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2019). Electric Vehicles as Flexibility Management Strategy for the Electricity System—A Comparison between Different Regions of Europe. *Energies*, 12(13), 2597. <https://doi.org/10.3390/en12132597>
31. Transport & Environment. (2024). Public charging in Europe: Where are we at? <https://www.transportenvironment.org/discover/public-charging-europe-where-are-we-at/>

32. Uddin, K., Dubarry, M., & Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy*, 113, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>
33. Vanhaverbeke, L., Schreurs, D., De Clerck, Q., Messagie, M., & Van Mierlo, J. (2017). Total cost of ownership of electric vehicles incorporating Vehicle to Grid technology. 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ever.2017.7935931>
34. Zahler, J., Vollmuth, P., & Ostermann, A. (2024). Unlocking the Potential: An In-Depth Analysis of Factors Shaping the Success of Smart and Bidirectional Charging in a Cross-Country Comparison. *Energies*, 17.0(15), 3637. <https://doi.org/10.3390/en17153637>



Registry number: DEENK/31/2026.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Gábor Horváth
Doctoral School: Doctoral School of Earth Sciences
MTMT ID: 10103342

List of publications related to the dissertation

Hungarian book chapters (1)

1. Zakar, M., Lázár, I., Szegedi, S., **Horváth, G.**, Tóth, T.: Az elsőgenerációs bioüzemanyagok újraértékelése.
In: Tájékoztatói kihívások, adaptációs lehetőségek / (szerk.) Kiss Emőke, Balla Dániel, MTA DTB Földtudományi Szakbizottság, Debrecen, 69-75, 2022. ISBN: 9789637064432

Foreign language international book chapters (1)

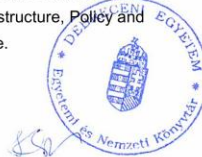
2. Máthé, C., Péntzes, J., **Horváth, G.**, Zakar, M., Tóth, T.: Alternative Forms of Transport and Possibilities of Sustainable Transport in the European Union.
In: Transport and Climate Change: New Mitigation and Adaptation Strategies / Maxim A. Dulebenets; Szymon Wiśniewski; Marta Borowska-Stefańska, Springer Nature Switzerland, Cham, 233-258, 2025. ISBN: 9783032005625

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (1)

3. **Horváth, G.**, Szegedi, S., Zakar, M., Póka, C., Tóth, T.: A hazai lakossági villamosenergia szektor paradigmaváltása és a napelemes HMKE-k.
Földr. Közl. 147 (2), 202-217, 2023. ISSN: 0015-5411.
DOI: <http://dx.doi.org/10.32643/fk.147.2.10>

Foreign language scientific articles in international journals (2)

4. Zakar, M., Máthé, C., Szegedi, S., Vas, O. O., **Horváth, G.**, Tóth, T.: Challenges and opportunities for advancing electric carsharing in Central Europe: The Role of Infrastructure, Policy and Consumer Behavior in the Adoption of E-carsharing in Central Europe.
Folia Geographica. 66 (2), 83-119, 2024. ISSN: 1336-6157.
IF: 2





5. **Horváth, G.**, Bai, A., Szegedi, S., Lázár, I., Máthé, C., Huzsvai, L., Zakar, M., Gabnai, Z., Tóth, T.:
A Comprehensive review of the distinctive tendencies of the diffusion of e-mobility in Central Europe.
Energies. 16 (14), 1-29. 2023. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en16145421>
IF: 3

List of other publications

Hungarian book chapters (1)

6. Póka, C., **Horváth, G.**, Szegedi, S., Tóth, T.: A szölvényige tüzelési célú hasznosítása Tokaj-Hegyalján.
In: Tájékológiai kihívások, adaptációs lehetőségek / (szerk.) Kiss Emőke, Balla Dániel, MTA DTB Földtudományi Szakbizottság, Debrecen, 76-81, 2022. ISBN: 9789637064432

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (1)

7. Póka, C., **Horváth, G.**, Zakar, M., Szegedi, S., Tóth, T.: A szölvényige potenciál-felmérésének elméleti alapjai Tokaj-Hegyalján.
Földr. Közl. 147 (2), 218-229, 2023. ISSN: 0015-5411.
DOI: <http://dx.doi.org/10.32643/fk.147.2.11>

Total IF of journals (all publications): 5

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 5

The Candidate's publication data submitted to the Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

22 January, 2026

