Bentax Plus Kft.
https://www.bentaxplus.hu

Kvantumtechnológia a közösségi közlekedésben

Felhasználások a világban és Magyarországon

Dátum: 2026.10.24.

Nyilvános

Kvantumtechnológia a közösségi közlekedésben

Felhasználások a világban és Magyarországon

Bentax Plus Kft.

2026.10.24.

Rövid kivonat

A közösségi közlekedésben eddig közölt kvantumszámítási eredmények eltérő technikai alapon születtek: valódi kvantumhardveren, közvetlenül vagy hibrid kvantum–klasszikus megoldón keresztül, klasszikus hardveren futó, úgynevezett kvantuminspirált megoldóval, illetve szimulációban. Az eredmények értékelése azon múlik, melyikről van szó. A 2017 és 2026 között nyilvánosan dokumentált 90 közlekedési esetből 12 valós környezetben igazolt: üzemi alkalmazás vagy valós üzemeltetői adatokon végzett kísérlet. További 16 folyamatban lévő alkalmazott projekt, amely eredményt még nem közölt. A vasúti újraütemezés, a járműforduló-tervezés és a pályaudvari vágányutak kijelölése valós adatokkal kvantumszámítógépen is lefutott, és ahol pontos klasszikus megoldóval is összevetették, egyik kísérlet sem adott jobb eredményt. Az üzemhez két alkalmazás jutott a legközelebb. A japán Nankai vasúttársaság kvantuminspirált megoldóra épülő rendszert épít a személyzet és a járművek beosztására, és a hatásvizsgálatában mért nyereséget a kézi tervezéshez méri. A Japan Airlines 2026 márciusa óta kvantumszámítási technológiaként bemutatott karbantartás-tervező eszközt használ, amelynek módszerét a közlemények nem írják le. A technológia többi ága más ütemben halad. A posztkvantum-átállásra az uniós ajánlásra épülő, a tagállamok által elfogadott ütemterv ajánl céldátumokat, a kvantumnavigáció repülési és vasúti próbákig jutott. A vasúti kvantumkulcs-szétosztás Európában terepi méréseknél tart, az orosz vasúttársaság pedig sajtóközlések szerint 7858 km-es vállalati gerinchálózatot üzemeltet.

Magyarországon közlekedési kvantumprojektről nincs nyilvános adat, a nemzetközi kísérletek feladatai azonban itthon is megvannak, és egy részük már klasszikus optimalizálásra épülő rendszerben fut. A 2020-as és a 2023-as közlemények szerint a BKV jármű- és járművezető-ütemezését a vállalati rendszerbe illesztett, hazai fejlesztésű döntéstámogató rendszer segíti, amely kész klasszikus viszonyítási alapot ad egy összevető kísérlethez. Közölt példányai járatszámban a nemzetközi kísérletek nagyságrendjébe esnek, a generált vezetői szolgálatok száma azonban több ezertől több mint egymillióig terjed. A 2026-ban létrehozott országos közlekedésszervező és a Magyar Vonatflotta Zrt. a hálózati menetrend-, csatlakozás- és járműtervezésnek új intézményi keretet ad, a vidéki városi hálózatok pedig egész hálózatra kiterjedő kísérletek terepei lehetnek. Hazai kutatók már részt vettek nemzetközi vasúti kvantumkísérletekben, az európai kvantumszámítógépeken pedig kísérleti gépidő ingyenesen kérhető. A feladatok modellezése, az adatok rendezése és az összevetés a hagyományos tervezésben is hasznot hozhat, és a hibatűrő gépek megjelenése után is felhasználható.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés **5**
1.1. Egy pályaudvari kísérlet tanulságai . . . 5
1.2. Módszer és források . . . 6
1.3. Érettség, kvantumos és kvantuminspirált megoldás . . . 6
1.4. Fogalmak . . . 7

I. rész. A nemzetközi helyzetkép **10**

2. Az esetek térképe **10**
2.1. Kilencven eset, három érettségi fokozat . . . 10
2.2. Feladatok és módszerek . . . 14
2.3. Üzemeltetők és módszerszolgáltatók . . . 15

3. Vasút **15**
3.1. Újraütemezés és zavarkezelés . . . 16
3.2. Menetrend és vágánykijelölés . . . 16
3.3. Jármű- és személyzetütemezés, karbantartás . . . 17

4. Városi és közúti közösségi közlekedés **18**
4.1. Buszok élő üzemben és a forgalomáramlás . . . 18
4.2. Jelzőlámpák és forgalomirányítás . . . 19
4.3. Busz- és metróüzem tervezése . . . 19
4.4. Igényvezérelt közlekedés és elektromos buszok . . . 20
4.5. Kereslet-előrejelzés és hálózattervezés . . . 20

5. Légi közlekedés **21**
5.1. Légitársasági tervezés . . . 21
5.2. Repülőtéri erőforrások . . . 22
5.3. Légiforgalmi irányítás . . . 22

6. Az eredmények értékelése **23**
6.1. Üzemi nyereséget közlő esetek . . . 23
6.2. A legjobb klasszikus megoldóval szemben . . . 24
6.3. Feladatméret és hardverkorlát . . . 26
6.4. A klasszikus optimalizálás mint viszonyítási alap . . . 27
6.5. A kvantumelőny és a hardver érettsége . . . 28
6.6. Várakozások és becslések . . . 28

7. Kommunikáció, titkosítás és érzékelés **29**
7.1. Kvantumkulcs-szétosztás vasúti szálon . . . 29
7.2. A posztkvantum-átállás időkerete . . . 30
7.3. Kitett rendszerek a közlekedésben . . . 31
7.4. Műholdjeltől független navigáció . . . 32
7.5. Gravimetria, diagnosztika és időszinkron . . . 33

8. Programok és a bekapcsolódás formái **34**
8.1. Programok és finanszírozás . . . 34

8.2. A nemzetközi programok felépítése 34

II. rész. Magyar kontextus **37**

9. A magyar közösségi közlekedés és digitális alapjai **37**
9.1. Szereplők és irányítás 2026-ban 37
9.2. Méretek: a hazai feladatok léptéke 37
9.3. Tervezési és üzemeltetési rendszerek, adatok 38
9.4. Vasúti digitális infrastruktúra és kiberbiztonság 41

10. Hazai kvantumképességek és kapcsolódási pontok **42**
10.1. Kutatási programok és infrastruktúra 42
10.2. Kutatói kapcsolatok és a klasszikus operációkutatás 42
10.3. Ökoszisztéma és hiányzó láncszemek 43

III. rész. Hazai hasznosítás **44**

11. A nemzetközi minták hazai hasznosíthatósága **44**
11.1. Jármű- és személyzetütemezés, karbantartás 47
11.2. Vasúti újraütemezés és vágánykijelölés 49
11.3. Ütemes menetrend és csatlakozások 49
11.4. Jelzőlámpa-vezérlés és igényvezérelt közlekedés 50
11.5. Légi közlekedés 50
11.6. Posztkvantum-átállás és kvantumérzékelés 51

12. Időtávok és kiindulópontok **52**

13. Megvalósítási utak és finanszírozás **54**
13.1. A nemzetközi minták hazai átültetése 54
13.2. Jogi és adatkezelési feltételek 55
13.3. Hozzáférés és költség 55
13.4. Finanszírozás 55
13.5. Felkészülés 58

14. Következtetések **59**

Irodalomjegyzék **61**

1. Bevezetés

1.1. Egy pályaudvari kísérlet tanulságai

A London Bridge pályaudvar egyik feladata, hogy 18 perces időablakban, 15 peronos vágányhálózaton 26 vonatnak úgy jelöljön ki vágányutat, hogy azok ne ütközzenek. A brit pályahálózat-működtető (Network Rail) és a Közlekedési Minisztérium ezt a feladatot egy kormányzati innovációs verseny keretében adta át a Q-CTRL kvantumszoftvercégnek. A valós adatokból felírt, 103 qubitet igénylő feladat 2025-ben az IBM kapualapú kvantumszámítógépén futott, és a Network Rail vezető mérnöke „kellemes meglepetésként" értékelte, hogy valódi kvantumeszközön megtalálták a 26 vonat optimális vágányútját [1, 2, 3].

Az eredményből mégsem következik, hogy a kvantumszámítógép ma jobban tervezné a pályaudvari forgalmat, mint a klasszikus eszközök. A cég a megoldását véletlen mintavételhez és mohó kereséshez hasonlította, pontos klasszikus megoldóhoz nem, és lektorált közlemény sem jelent meg róla. Pontos klasszikus összevetés híján nem tudni, mennyire nehéz a példány egy jó klasszikus megoldónak. Egy rokon, bár eltérő szerkezetű feladatnál, a lengyel egyvágányú vonalak újraütemezésénél a hasonló méretű példányokat a nyílt forráskódú CBC megoldó három századmásodperc alatt optimálisan megoldotta [4]. A kísérlet értéke inkább abban látható, hogy egy valós üzemi feladat olyan alakot kapott, amelyet a kvantumszámítógép, a kvantuminspirált hardver és a klasszikus megoldó egyaránt fogad. Egy ilyen modell a technológia fejlődésével újra lefuttatható és összevethető.

A terület egészén hasonló a kép. 2017 óta 90 közösségi közlekedési kvantumszámítási vagy kvantuminspirált eset vált nyilvánossá, többségük 2021 óta. Az üzemhez egy kvantuminspirált és egy nem közölt módszerrel működő megoldás jutott a legközelebb. A japán Nankai vasúttársaság hatásvizsgálatában a Hitachi kvantuminspirált megoldójával a személyzeti beosztás több hónapos kézi munkája kb. egy hétre rövidíthetőnek bizonyult; a rendszer a 2027-es üzleti évtől állhat üzembe [5]. A Japan Airlines 2026 márciusa óta kvantumszámítási technológiaként bemutatott karbantartás-tervező eszközt használ (5.1. pont) [6]. A hardver közben gyorsan fejlődik: a gyártók 2028 és 2030 közé teszik az első hibatűrő gépeket, az Európai Unió kvantumszámítógépein pedig 2026 nyarától ingyenes kísérleti gépidő kérhető [7, 8, 9, 10].

A hazai tervezési feladatok – a vasúti és buszos fordulóktól a pályaudvari vágánykijelölésen át a repülőtéri erőforrásokig – ugyanazok, mint a nemzetközi kísérletekben, a hazai keretek azonban 2026-ban több ponton is átalakultak. Új szervezet felel az országos ütemes menetrendért és a csatlakozásokért, egy másik a vasúti járműállomány kezeléséért [11, 12]. Az uniós ajánlásra épülő, a tagállamok által elfogadott ütemterv 2026 végére teszi a posztkvantum-átállás megkezdését [13]. A hazai kvantumkutatás legnagyobb programjának, a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratóriumnak a támogatási időszaka 2026 szeptemberében zárult [14].

A tanulmány súlypontja a kvantumszámítás, mert a közlekedési esetek túlnyomó többsége ide tartozik. A kvantumkommunikáció, a posztkvantum-kriptográfia és a kvantumérzékelés rövidebben szerepel, mivel ezek elsősorban a kommunikációs és a navigációs infrastruktúrát érintik. A hazai hasznosíthatóság elemzése feladattípusonként halad. Azt mérlegeli, van-e a feladatnak itthon felelős szervezete, adata és működő tervezőrendszere, amely klasszikus viszonyítási alapot ad, és milyen hasznot hozhat már önmagában a feladat bináris modellje és a klasszikus összevetés. A nemzetközi helyzetképet (I. rész) a magyar közösségi közlekedés és a hazai képességek bemutatása (II. rész), majd a hazai hasznosítás lehetőségeinek elemzése (III. rész) követi.

1.2. Módszer és források

A kutatás 2026 októberében készült. A valós környezetben igazolt alkalmazások köre 2019-től terjed, a bejelentett tervek nagyjából 2030-ig; az esetlista a 2017–2018-as alapkísérleteket is tartalmazza, mert ezekre több későbbi munka épül. A keresések angol, német, olasz, japán, kínai és koreai nyelven folytak, a hazai rész magyar nyelvű forrásokra is támaszkodik. Elsődleges forrásnak a lektorált közlemény, az előközlemény, a hatósági és a projektgazdai dokumentum számít. A gyártói és résztvevői közlemény szintén elsődleges, de önbevallásos, ezért a benne szereplő számokat a szöveg a közlőnek tulajdonítja; a szaksajtó és a mások által írt összefoglaló másodlagos forrás.

A kvantumszámítási rész egységes esetlistára épül, amely 90 nyilvánosan dokumentált esetet rendez alágazat, feladat, érettség, módszer, feladatméret és klasszikus összevetés szerint. Az érettségi és a módszer szerinti besorolás a tanulmány saját besorolása, ezért az összesítő ábrák az esetlista szerkezetét mutatják, nem hivatalos statisztikát. Ahol egy szereplőnél nem került elő projekt, az a nyilvános, kereshető forrásokra vonatkozik, belső munka nem zárható ki; a japán szaksajtó egy része fizetős, így a japán esetek köre szűkebb lehet a ténylegesnél.

1.3. Érettség, kvantumos és kvantuminspirált megoldás

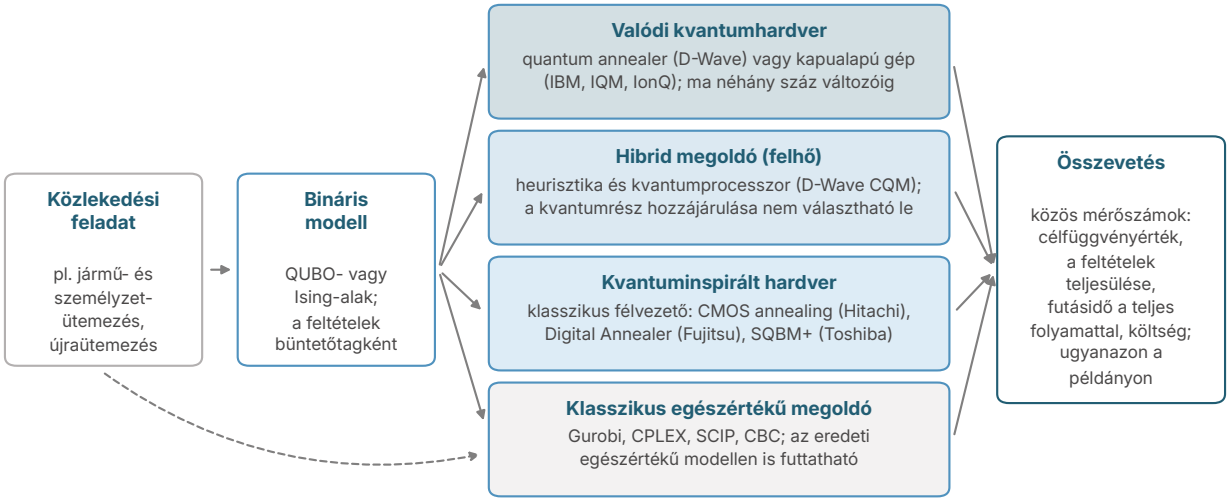
Az esetek besorolása az érettséget és a megoldás jellegét rögzíti (1. táblázat). Érettség szerint *valós környezetben igazolt* az üzemi alkalmazás és a valós üzemeltetői adatokon végzett, dokumentált kísérlet. *Folyamatban lévő alkalmazott projekt* az üzemeltető részvételével bejelentett kísérleti projekt, megvalósíthatósági vizsgálat vagy tender, amely eredményt még nem közölt; ide sorolódnak a lezárult, de eredményt nem közölt projektek is. *Kutatási szakaszban lévő* a laboratóriumi, szimulációs vagy elméleti eredmény, amely jellemzően üzemeltető részvétele nélkül született. A három fokozat tájékoztató jelleggel az Európai Bizottság technológiai érettségi skálájának (*Technology Readiness Level*, TRL) egy-egy szakaszához köthető [15]; ez a megfeleltetés a tanulmány saját közelítése. Az ábrák és a szűk táblázatoszlopok a kategóriák rövid alakját használják: igazolt, folyamatban, kutatási.

A megoldás jellegének rögzítése azért szükséges, mert a „kvantum” jelző több, egymástól lényegesen eltérő technológiát takar (1. ábra). Valódi kvantumhardveren fut a *quantum annealer*, vagyis a szimulált hűtés kvantumos megfelelőjét megvalósító gép (például a D-Wave gépei), a kapualapú kvantumszámítógép (például az IBM, az IQM és az IonQ gépei) és a semleges atomos analóg processzor. A felhőben elérhető hibrid kvantum–klasszikus megoldók a feladat nagy részét klasszikus heurisztikákkal oldják meg, és csak egy részét adják át a kvantumprocesszornak; a vasúti újraütemezést vizsgáló szerzők szerint a kvantumprocesszor tényleges hozzájárulása az ilyen megoldóban nem választható el a klasszikus összetevőktől [16].

A kvantuminspirált megoldók kvantumfizikai elvekből indulnak ki, de klasszikus félvezető hardveren futnak, és a *quantum annealer* gépekhez hasonló alakú feladatokat oldanak meg. Ilyen a Hitachi szobahőmérsékleten működő *CMOS annealing* megoldása, a Fujitsu *Digital Annealer* rendszere és a Toshiba *simulated bifurcation* elvű SQBM+ megoldója [5, 17]. Ezek nem kvantumszámítógépek, de ma kereskedelmi szolgáltatásként elérhetők, és a közlekedésben az üzemi bevezetéshez legközelebb álló eset is ilyen megoldóval fut. A koherens Ising-gép (*coherent Ising machine*, CIM) optikai impulzusokkal működő analóg optimalizáló, amelyet a gyártója optikai kvantumszámítógépként ír le [18]; a tanulmány külön kategóriaként kezeli. A szimuláció a kvantumáramkör klasszikus gépen futó modellje.

A megkülönböztetésnek gyakorlati jelentősége van. Egy kvantuminspirált megoldó eredménye a feladat matematikai megfogalmazását és a klasszikus hardver teljesítményét méri. Az 1. ábra megoldási ágainak közös kiindulópontja a feladat bináris modellje (QUBO, 2. táblázat). Ugyanaz a példány ezért

a kvantumhardveren, a hibrid és a kvantuminspirált megoldón is futtatható, és az eredmény közvetlenül összevethető a klasszikus egészértékű megoldóéval. A tanulmány ezért minden esetnél jelöli a futtatás módját, a feladat méretét és azt, hogy volt-e összevetés a legjobb klasszikus megoldóval.



Folytonos nyíl: a bináris modell útja. Szaggatott nyíl: a klasszikus megoldó az eredeti feladatmodellt is használhatja.

1. ábra. Egy közlekedési optimalizálási feladat megoldási útjai: három kvantumos vagy kvantuminspirált futtatási mód és a klasszikus viszonyítási ág. A közös bináris modell miatt a megoldók ugyanazon a példányon, közös mérőszámokkal vethetők össze.

Forrás: saját szerkesztés [19, 20, 16, 17, 5, 21, 22, 23] alapján.

1.4. Fogalmak

A szakkifejezéseket a 2. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Az esetek besorolása érettség és a megoldás jellege szerint.

Kategória	Meghatározás	Jellemző példa	Tájékoztató TRL-megfeleltetés
Érettség			
Valós környezetben igazolt	üzemi alkalmazás, vagy valós üzemeltetői adatokon végzett, dokumentált kísérlet	vágányutak kijelölése a London Bridge pályaudvaron valós adatokkal	kb. 6–7
Folyamatban lévő alkalmazott projekt	üzemeltető részvételével bejelentett kísérleti projekt, megvalósíthatósági vizsgálat, tender vagy tervezett telepítés, közölt eredmény nélkül	a DLR QCMobility vasúti alprojektje	kb. 4–6
Kutatási szakaszban lévő	laboratóriumi, szimulációs vagy elméleti eredmény, jellemzően üzemeltetői részvétel nélkül; ide tartozik a kis hardveres demonstráció, a verseny és a szándéknyilatkozat is	beszállókapu-kiosztás 5–9 járatos példányon	kb. 2–4
A megoldás jellege			
Valódi kvantumhardver, hibrid megoldó	*quantum annealer*, kapualapú vagy semleges atomos processzor, közvetlenül vagy hibrid megoldón keresztül	D-Wave, IBM, IQM, IonQ, Pasqal	
Kvantuminspirált	kvantumfizikai elvekből kiinduló, klasszikus félvezető hardveren futó optimalizáló	Hitachi *CMOS annealing*, Fujitsu *Digital Annealer*	
Koherens Ising-gép	optikai impulzusokkal működő analóg optimalizáló	QBoson	
Szimuláció, elméleti	a kvantumos eljárás klasszikus szimulációja vagy elméleti eredmény	QAOA-szimuláció	

Forrás: a tanulmány saját besorolása a témakör kijelölésekor rögzített szempontok szerint; a módszercsoportok leírása: [17, 16, 18]. A TRL-megfeleltetés a tanulmány saját, tájékoztató közelítése az Európai Bizottság technológiai érettségi skálájához (*Technology Readiness Level*, TRL 1–9), a Horizont Európa munkaprogram általános mellékletei szerint [15].

2. táblázat. A tanulmányban használt fontosabb fogalmak.

Fogalom	Jelentés a tanulmányban	Forrás
QUBO-modell	Feltétel nélküli kvadratikus bináris optimalizálási feladat (*quadratic unconstrained binary optimization*); a feladat feltételei büntetőtagként kerülnek a célfüggvénybe. A *quantum annealer* gépek és a kvantuminspirált megoldók bemenete.	[19, 20]
Quantum annealing	Analóg kvantumos optimalizáló eljárás QUBO- vagy Ising-alakú feladatok közelítő megoldására, a szimulált hűtés (*simulated annealing*) kvantumos megfelelője; bevett magyar neve nincs. Az ezt megvalósító gép a *quantum annealer*.	[24]
QAOA	*Quantum Approximate Optimization Algorithm*: kvantumos közelítő optimalizáló algoritmus kapualapú gépekre; mélysége (p) az áramkör ismétlődő rétegeinek száma.	[25]
Hibrid (kvantum–klasszikus) megoldó	Felhőszolgáltatásként elérhető megoldó, amely klasszikus heurisztikát és kvantumprocesszort együtt használ, például a D-Wave feltételes kvadratikus modellt (*constrained quadratic model*, CQM) kezelő hibrid megoldója.	[16]
Kvantuminspirált megoldó	Kvantumfizikai elvekből kiinduló, klasszikus hardveren futó optimalizáló, például a *Digital Annealer* vagy a *CMOS annealing*.	[17]
PESP	*Periodic Event Scheduling Problem*: periodikus eseményütemezési feladat, az ütemes menetrend klasszikus matematikai modellje.	[26]
Technológiai érettségi szint (TRL)	*Technology Readiness Level*: az Európai Bizottság kilencfokú skálája az alapelvek megfigyelésétől (TRL 1) a valós üzemi környezetben igazolt rendszerig (TRL 9). A tanulmány érettségi kategóriái csak tájékoztató jelleggel feleltethetők meg neki.	[15]
Kvantumelőny	Az a helyzet, amikor a kvantumszámítógép egy feladatot a legjobb ismert klasszikus módszernél gyorsabban vagy jobb minőségben old meg; optimalizálásban csak ezek felülmúlásával állítható.	[27, 28]
Logikai qubit, hibatűrés	Hibajavító kóddal több fizikai qubitből képzett qubit; a hibatűrő gép hosszú számításokat is hibajavítással végez.	[29, 7]
Posztkvantum-kriptográfia (PQC)	Kvantumszámítógépes támadással szemben is védelmet nyújtó nyilvános kulcsú eljárások; első szabványai a FIPS 203–205; az ezekre való áttérés a posztkvantum-átállás.	[30]
Kvantumkulcs-szétosztás (QKD)	Kvantumfizikai elven működő kulcscsere, amely dedikált optikai infrastruktúrát igényel.	[31]
Kvantumos inerciális navigáció	Atominterferométerre vagy kvantummagnetométerre épülő, műholdjeltől független helymeghatározás.	[32, 33]

Forrás: a Forrás oszlopban jelölt művek.

I. rész. A nemzetközi helyzetkép

A közlekedési kvantumszámítás rövid története három szakaszra bontható. Az első kísérletek 2017 és 2019 között azt mutatták meg, hogy egy taxiflotta útvonalai vagy a légi járatok pályakonfliktusai egyáltalán felírhatók kvantumszámítógépre, kis feladatokon vagy részfeladatokon [34, 35]. 2020-tól az üzemeltetők is megjelentek: a Deutsche Bahn és a Network Rail valós feladatot és adatot adott, a lengyel kísérletek a hivatalos menetrendre épültek, a módszert pedig kvantumszolgáltatók és kutatóhelyek hozták [36, 4, 2]. 2025–2026-ra pedig a kvantuminspirált megoldók az üzem küszöbéig jutottak [5].

2. Az esetek térképe

2.1. Kilencven eset, három érettségi fokozat

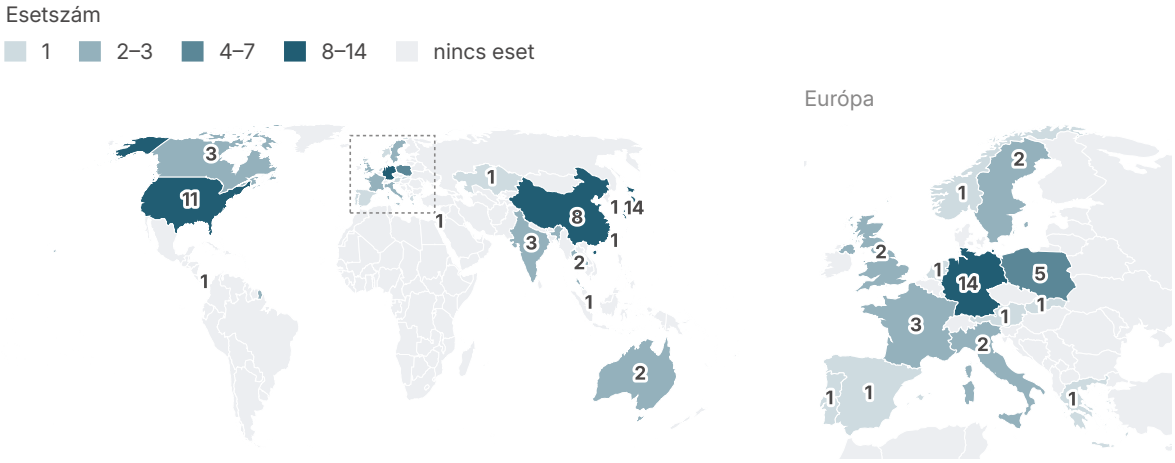
A kutatás 2017 és 2026 között 90 nyilvánosan dokumentált kvantumszámítási vagy kvantuminspirált esetet azonosított a közösségi közlekedésben, a vasúttól a városi és a légi közlekedésen át a kereslet-előrejelzésig. Közülük 12 valós környezetben igazolt, 16 folyamatban lévő alkalmazott projekt, a többi kutatási szakaszban van; az igazolt esetek közül egy üzemeltető által bejelentett üzemi alkalmazás. Az igazolt esetek köre érzékeny a besorolásra. A lengyel egyvágányú kísérletek két közleménye valószínűleg ugyanannak a munkának két változata [37, 4], a légitársasági flottakiosztásnál az üzemeltető részvétele nem dokumentált [38], a kínai jelzőlámpás esetről pedig csak önbevallásos, részben hirdetésként jelölt beszámoló szól [39]. Szigorúbb besorolással a valós környezetben igazolt esetek száma kilenc lehet.

Az esetek földrajzilag néhány országban sűrűsödnek (2. ábra). Németországhoz és Japánhoz 14-14, az Egyesült Államokhoz 11, Kínához 8 eset köthető, Európában Németország után Lengyelország következik öt vasúti esettel. Magyarországi üzemeltetővel vagy magyar adatokon készült eset nincs a listában, a lengyelországi esetek közül négyben azonban a budapesti Wigner FK is részt vett (3.1. és 3.3. pont).

Az első nyilvános közlések száma 2021-ben ugrott meg, majd 2025-ben és 2026 első tíz hónapjában is 15-15 esetet tett ki (3. ábra). A valós környezetben igazolt esetek egyharmada 2026-os, de közülük kettőnél az üzemeltető szerepe nem dokumentált, illetve csak önbevallásos beszámolóból ismert (2.1. pont). Az ábra az első közlés évét mutatja, nem a megvalósulását: a japán légitársasági eset például 2021-ben indult, és 2026-ban lépett üzembe.

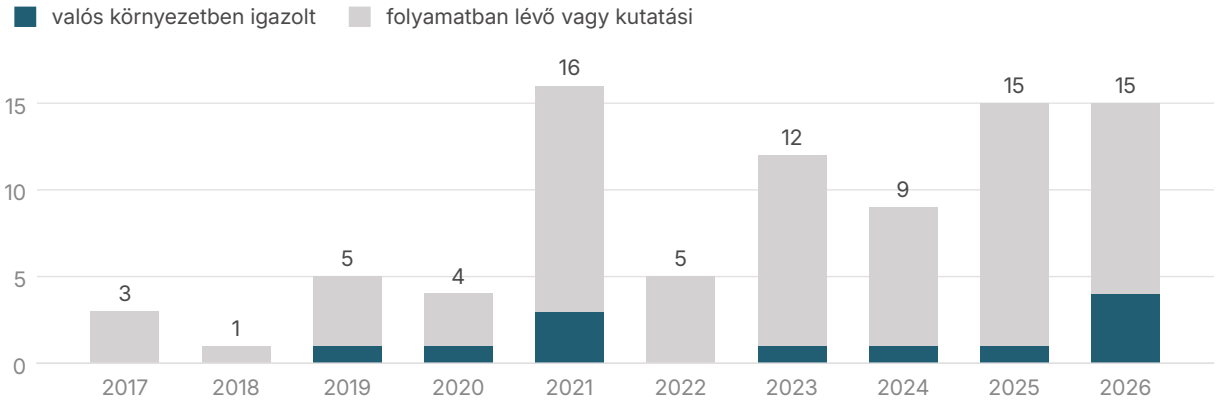
Az alágazatok között a vasút emelkedik ki (4. ábra). A valós környezetben igazolt esetek többsége vasúti, és ezek jórészt az üzemeltetővel közösen, valós pályahálózati vagy menetrendi adatokon készültek. A légi és a városi, közúti közlekedés esetei túlnyomórészt kutatási szakaszban vannak; feladatkör szerint a légitársasági tervezésben és a jelzőlámpa-vezérlésben a legtöbb a kutatási eset. A folyamatban lévő alkalmazott projektek a vasút, a jelzőlámpák és az igényvezérelt közlekedés körül sűrűsödnek, a kereslet-előrejelzés és a hálózattervezés pedig eddig csak kutatási szinten jelenik meg.

A valós környezetben igazolt eseteket a 3. táblázat foglalja össze. Az esetek többségében az üzemeltető adott adatot és feladatot, a módszert kvantumszolgáltató vagy kutatóhely hozta. A lengyel kísérletek a hivatalos menetrendre és közbeszerzési dokumentumokra épültek, a pályahálózat-működtető közreműködése nem dokumentált, és a légitársasági flottakiosztásban sem ismert az üzemeltető szerepe. A közvetlenül kvantumprocesszoron futó kísérletek mérete a néhány tíztől a néhány száz válto-



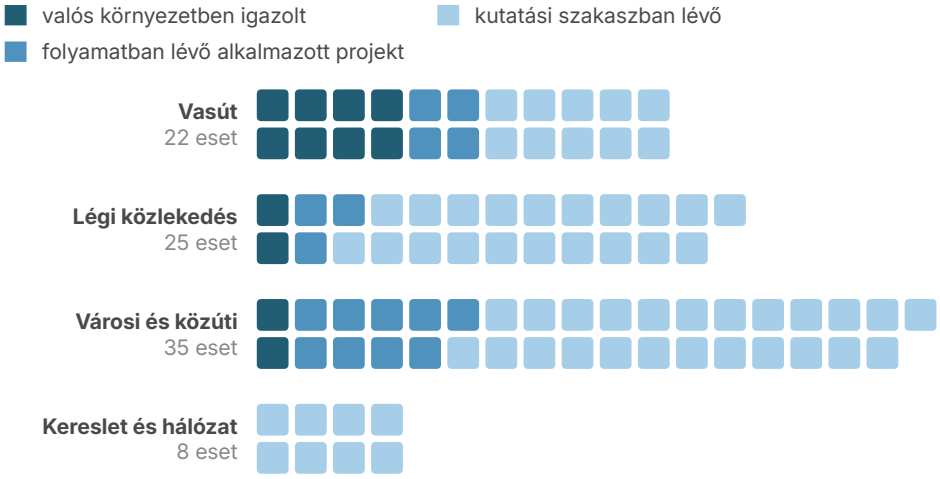
2. ábra. A közösségi közlekedési kvantumszámítási és kvantuminspirált esetek száma országonként; jobbra Európa nagyítva. Az esetek Németországban, Japánban, az Egyesült Államokban és Kínában sűrűsödnek, Európában Németország után Lengyelország következik; a szín az esetszám-osztályt, a szám az esetszámot jelöli.

Forrás: a tanulmány esetlistája (90 eset) a 3–5. fejezetben hivatkozott források alapján; a tanulmány saját számlálása. Több ország esetén az első helyen megnevezett ország szerepel. Hat eset nem köthető egy országhoz (nemzetközi verseny, uniós kutatási projektek, az Eurocontrol tendere, valamint két, ország nélküli eset), ezek nem szerepelnek az ábrán. Térképi alap: Natural Earth.



3. ábra. Az esetek száma az első nyilvános közlés éve szerint, 2017–2026; a sötét rész a valós környezetben igazolt esetek száma, az oszlop fölötti szám az éves összeg. A közlések 2021-ben megugrottak, és 2026-ban négy valós környezetben igazolt eset jelent meg.

Forrás: a tanulmány esetlistája (90 eset) a 3–5. fejezetben hivatkozott források alapján; a besorolás a tanulmány saját besorolása. A 2026-os oszlop október 24-ig tart. Öt kutatási szakaszban lévő eset közlési éve nem ismert, ezek nem szerepelnek az ábrán.



4. ábra. Az esetek alágazat és érettség szerint; egy négyzet egy eset. A sötét, valós környezetben igazolt esetek zöme a vasúti sorban van, a légi és a városi, közúti közlekedés esetei túlnyomórészt kutatási szakaszban vannak.

Forrás: a tanulmány esetlistája; a besorolás a tanulmány saját besorolása. Igazolt: valós környezetben igazolt; folyamatban: folyamatban lévő alkalmazott projekt; kutatási: kutatási szakaszban lévő eset. A vasúti kör a baltimore-i könnyűvasúti esetet is tartalmazza.

zóig terjed, a hibrid megoldóval futó flottakiosztás ezres nagyságrendű. Az üzemi bevezetésig, illetve annak küszöbéig két eset jutott el. A Nankai épülő rendszerében kvantuminspirált megoldó váltaná ki a kézi tervezést, üzembe helyezését a 2027-es üzleti évre tervezik; a JAL karbantartás-tervező eszköze 2026 márciusa óta üzemel (5.1. pont).

3. táblázat. A valós környezetben igazolt esetek: üzemi alkalmazás, valamint éles üzemben vagy valós adatokon végzett kísérletek.

Szereplők, év	Feladat	Futtatás és méret	Összevetés, eredmény
Vasút			
IITiS PAN, Wigner FK és partnerek; PKP PLK-menetrend, 2020–2023	újraütemezés egyvágányú vonalon	D-Wave *quantum annealer*; 48 és 198 logikai qubit	a CBC klasszikus megoldó 0,03 s alatt optimális; klasszikus fölény
Wigner FK, IITiS PAN, TU Dresden, 2023–2025	újraütemezés a felső-sziléziai (GZM) hálózaton	D-Wave hibrid (CQM); 27 vonat, 556–817 változó	a CPLEX optimális; a CQM mindig lehetséges megoldást ad, a nagyobb hálózatokon rosszabb célértékkel
Koleje Śląskie, IITiS PAN, Wigner FK, 2025	motorvonat-forduló	D-Wave és kvantuminspirált VeloxQ; csak részpéldányon	az egészértékű programozás a teljes, legfeljebb 404 menetes példányon kb. 40 perc alatt jó tervet ad
DB Systel, Fraunhofer FOKUS, 2021	járműforduló karbantartással	D-Wave hibrid; 34–139 menet, 52–252 qubit	a korlátozásprogramozás a legkisebb példány kivételével jobb (előközlemény)
IQM, Deutsche Bahn, 2026	járműforduló	IQM Emerald, QAOA; 190 menet, 20 csúcsos részgráfok	a mohó algoritmussal „elhanyagolható” különbség
Network Rail, DfT, Q-CTRL, 2024–2025	vágányutak kijelölése, London Bridge	IBM kapualapú gép; 26 vonat, 103 qubit	csak véletlen és mohó kereséssel összevetve

Szereplők, év	Feladat	Futtatás és méret	Összevetés, eredmény
Nankai, Hitachi, 2025–2026	személyzet- és járműütemezés	kvantuminspirált *CMOS annealing*; több száz vonat napi személyzete	hatásvizsgálat: rövidebb tervezési idő a kézi tervezéshez mérve; klasszikus megoldóval nem vetették össze
Légi közlekedés			
JAL, A*Quantum, 2021–2026	karbantartás-tervezés (üzem 2026. márciustól)	a módszer nem közölt; géptípusonként kb. 500 tétel	„hagyományos számítógéphez" mért nyilatkozat
Tata Consultancy Services, 2026	flottakiosztás ausztrál adatokon	D-Wave hibrid (CQM); 46–3680 járat	a SCIP mindig optimális; a bináris modellen a CQM gyorsabb, az egészértékűn a SCIP
Városi és közúti közlekedés			
Volkswagen, Carris, Lisszabon, 2019	buszútvonalak élő üzemben, 9 busz	D-Wave hibrid; legfeljebb 12 változó	klasszikus összevetés nélkül
China Mobile, hefei közlekedésrendészet, 2026	jelzésterv öt csomópontban	a hardver nem közölt	számszerű eredmény nincs (önbevallás, részben hirdetésként jelölt beszámoló)

Forrás: [37, 4, 16, 40, 36, 25, 2, 5, 6, 41, 38, 42, 43]. A lengyel egyvágányú kísérletek két közleménye a táblázatban egy sorban szerepel, ezért a sorok száma tizenegy.

A 16 folyamatban lévő alkalmazott projektet a 4. táblázat sorolja fel. Többségük bejelentett vagy még futó projekt, amely 2026 októberéig nem közölt eredményt; a lezárult Renfe-kísérletről, valamint a tervek szerint 2025 végéig, illetve 2026 szeptemberéig tartó busani és Nishi-Tokyo Bus-kísérletről sem jelent meg eredményközlés, a Renfe a sajátját a felhasználási esetek feltérképezését szolgáló kezdeti lépésként mutatja be [44]. Az esetek több mint fele a városi és közúti körbe esik. A futtatás módját, vagyis a géptípust vagy a megoldót csak kevesebb mint egyharmaduk (16-ból 5) nevezi meg; a tervezett gép (Ayalon) és az általános megjelölés („kvantumszámítás", „kvantumalgoritmusok") nem számít közöltnek.

4. táblázat. Folyamatban lévő alkalmazott projektek: bejelentett vagy futó kísérleti projektek, megvalósíthatósági vizsgálatok és tenderek, közölt eredmény nélkül.

Szereplők, időszak	Feladat	Módszer a forrás szerint	Állapot 2026 októberében
Vasút			
DLR QCMobility vasúti alprojekt; HLB, DB InfraGO, ÖBB-Infra (2025–2027)	újraütemezés, menetvonal- és menetrendtervezés	nem közölt	eredmény még nincs; első közlemény: szakirodalmi áttekintés
Renfe TrenLab, QCentroid (2025–2026)	flotta- és járattervezés	nem közölt	a kísérleti projekt lezárult, eredmény nem jelent meg
JR Kyushu, Groovenauts (2021)	járműállomány üzemi tervezése	*quantum annealing* alapú modell (bejelentés)	kimenetele nem ismert
Hitachi, meg nem nevezett vasúti ügyfél (2021)	személyzetütemezés	kvantuminspirált (*CMOS annealing*)	a 2022-re tervezett bevezetésről nincs adat
Légi közlekedés			

Szereplők, időszak	Feladat	Módszer a forrás szerint	Állapot 2026 októberében
Hamburgi Egyetem, Lufthansa Industry Solutions (2024–2027)	repülőtéri beszállókapu-kiosztás	nem közölt	folyamatban
DLR QCMobility légi alprojekt; Eurowings, Lufthansa (2025–2027)	gépek járatokhoz rendelése, személyzeti zavarkezelés, útvonal, beszállókapu	klasszikus és kvantumos, szimuláció és hardver	eredmény még nincs
Eurocontrol (2026)	megvalósíthatósági próba 1–2 légiforgalmi feladatra	kvantumszámítás, szükség esetén hibrid	tender; a nyertes nem ismert
Városi és közúti közlekedés			
DENSO, Toyota Tsusho, D-Wave, Bangkok (2017)	forgalmi adatelemzés, taxi-összerendelés	*quantum annealing* (bejelentés)	eredmény nem jelent meg
Fujitsu, Hamburgi Kikötői Hatóság (2021)	hálózati jelzőlámpa-optimalizálás	kvantuminspirált (*Digital Annealer*)	valós adat; élő vezérlés nem igazolt
NEC Solution Innovators, Kawasaki (2021)	kamerás járműkövetés, forgalomfelmérés	nem közölt (*quantum annealing* típusú, meg nem nevezett gép)	kimenetele nem ismert
DLR QI-TraSiCo, Augsburg (2023–2026)	valós idejű hálózati jelzőlámpa-vezérlés	kvantuminspirált	élő teszt eredménye nem jelent meg
Ayalon Highways, Quantum Art (2025)	csomópontok összehangolása	csapdázott ionos gép (tervezett)	bejelentés
NEC Solution Innovators, Kawasaki (2025–2026)	igényvezérelt közlekedés megállói és útvonalai	„kvantumszámítógép” (a város megfogalmazása)	eredménybemutató számadat nélkül
DLR QCMobility közúti alprojekt; d-fine, planqc, Rhein-Neckar-Verkehr (2025-től)	igényvezérelt közlekedés virtuális megállói	kvantumalgoritmusok; a hardver nem közölt	folyamatban; szoftverintegráció: ParityQC (a DLR 2025. decemberi közleménye szerint)
Nishi-Tokyo Bus, Quanmatic (2026)	buszok garázsbeli beállási terve	kvantum és klasszikus, hardverfüggetlen	a tervezett időszak (2026. 07–09.) lejárt, eredmény nem jelent meg
Busani városi vasút, Korea Quantum Computing (2025)	járatsűrűség, energia, személyzet	nem közölt	eredmény nem jelent meg

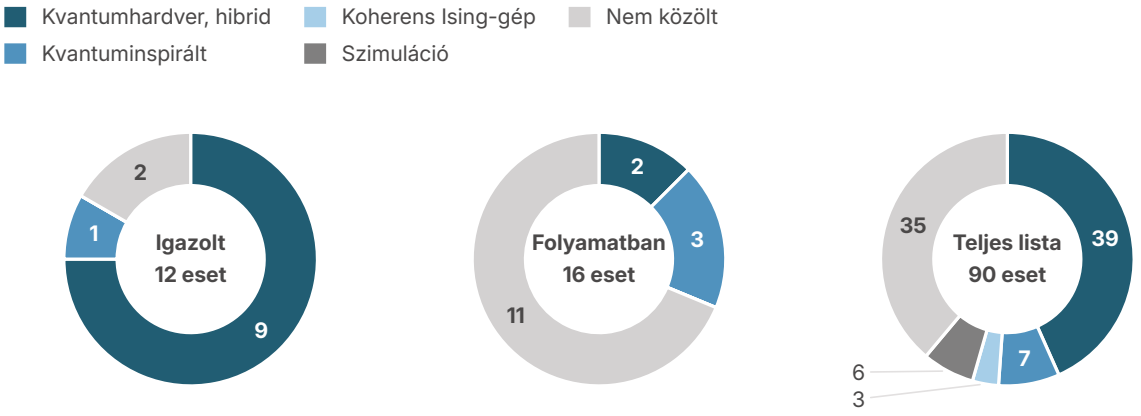
Forrás: [45, 46, 44, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63]. A besorolás a tanulmány saját besorolása.

2.2. Feladatok és módszerek

Az esetek szinte mindegyike kombinatorikus optimalizálási feladat. Az újraütemezés, a jármű- és személyzetütemezés, a vágány- és beszállókapu-kiosztás, a jelzőlámpa-vezérlés és az útvonal-hozzárendelés közös vonása, hogy sok diszkrét döntést kell szigorú feltételek mellett egymással összehangolni. Az ilyen feladatok QUBO- vagy Ising-alakra írhatók, és ez a *quantum annealer* gépek és a kvantuminspirált megoldók természetes bemenete [19, 20]. A gépi tanulásra épülő előrejelzés a vizsgált körben kivételes.

A módszerek megoszlását a 5. ábra mutatja. Az esetek közel felében a forrás valódi kvantumhardvert nevez meg, közvetlen futtatással vagy hibrid megoldón keresztül, túlnyomó részben a D-Wave gépét vagy hibrid megoldóját; ezek közül hét eset kapualapú gépet említ, és legalább négy esetben a futtatás csak tervezett vagy nem dokumentált. A kvantuminspirált, a koherens Ising-gépes és a

szimulációs esetek együtt is kisebb csoportot alkotnak, az esetek több mint harmadánál pedig nem derül ki, milyen gépen futott a számítás. Az igazolt esetek háromnegyede valódi kvantumhardvert használt, a folyamatban lévő projektek többsége viszont nem közli a módszert.



5. ábra. Az esetek megoszlása a futtatás módja szerint a valós környezetben igazolt (12), a folyamatban lévő (16) és a teljes esetlistában (90 eset); a szeleteken az esetszám áll. Az igazolt esetek háromnegyede valódi kvantumhardvert nevez meg, a folyamatban lévő projekteknél a nem közölt módszer van többségben. A sötétkék szeletek legalább négy olyan esetet is tartalmaznak, amelyben a futtatás csak tervezett vagy nem dokumentált.

Forrás: a tanulmány esetlistája; egy eset egy helyen, az elsődleges módszer szerint szerepel. Kvantumhardver, hibrid: *quantum annealer*, kapualapú és semleges atomos processzor, közvetlenül vagy hibrid megoldón keresztül, a forrás megnevezése szerint. Közöltnek a géptípust vagy a megoldót megnevező eset számít (2.1. pont), ezért a DLR QCMobility közúti alprojektje a nem közölt kategóriában szerepel.

2.3. Üzemeltetők és módszerszolgáltatók

Az üzemeltetők jellemzően a feladatot, az adatot és a szakmai ellenőrzést adják; ilyen szerepben vett részt többek között a Deutsche Bahn, az ÖBB-Infra, a Network Rail, a Sziléziai Vasutak, a Nankai, a Renfe, a Lufthansa, a JAL és a busani metró. A módszert kvantumszolgáltatók (D-Wave, IBM, IQM, Q-CTRL, IonQ, Pasqal, Kipu Quantum, QBoson), tanácsadók és kutatóhelyek hozzák [64, 25, 2].

A menetrend- és beosztástervező szoftverek gyártóinál (IVU, INIT, PTV, Trapeze, Optibus, GIRO, Siemens Mobility, Hacon) nyilvános kvantumos fejlesztés nem ismert. Az IVU saját közlése szerint optimalizálása klasszikus, a berlini Zuse Intézettel (ZIB) közösen fejlesztett algoritmusokra épül [65]. A gyártói oldalhoz legközelebb az Accenture tanácsadó cég áll, amelynek a vonatok és a mozdonyvezetők zavar utáni újraütemezésére van kvantumos szabadalmi bejelentése [66]. A nemzetközi kísérletek ezért a meglévő tervezőrendszer adataira épülő, külön optimalizálási ágként futottak.

3. Vasút

A vasút a valós adatos kvantumkísérletek fő terepe. Az esetek jórészt vasúttársaságok vagy pályahálózat-működtetők közreműködésével, illetve hivatalos menetrendi adatokon készültek, és a hazai kvantumkutatók is itt kapcsolódtak be a nemzetközi munkába. Valódi kvantumhardveren futó üzemi alkalmazás nincs; az üzemi bevezetéshez a Nankai vasúttársaság kvantuminspirált jármű- és személyzetütemezése áll a legközelebb.

3.1. Újraütemezés és zavarkezelés

A vasúti újraütemezés első, részletesen dokumentált QUBO-modelljeit lengyel, magyar és német kutatók készítették. A gliwicei IITiS PAN, a Sziléziai Műszaki Egyetem és a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont csoportja a modelleket a D-Wave *quantum annealer* gépén futtatta, a lengyel pályahálózat valós példányain. Az *Entropy* folyóiratban 2023-ban megjelent cikk két egyvágányú vonalszakasz három-, illetve hatvonatos példányát vizsgálta 48 és 198 logikai qubiten; a klasszikus CBC megoldó mindegyiket 0,03 másodperc alatt optimálisan megoldotta. A szerzők szerint a D-Wave gép akkori generációjától nem várható, hogy felülmúlja a legjobb klasszikus algoritmusokat [4].

A csoport 2025-ös munkája a felső-sziléziai agglomeráció (GZM) heterogén városi-elővárosi hálózatára lépett tovább, 27 vonattal és legfeljebb 817 változóval. A D-Wave hibrid megoldója (CQM) a kisebb hálózatokon megtalálta az optimumot, és mindig lehetséges megoldást adott. A cikk táblázata szerint azonban a 4–9. hálózaton 5–72%-kal rosszabb célfüggvény-értéket ért el a CPLEX optimumánál; két hálózaton gyorsabb volt a pontos CPLEX-nél, de ott is 30–42%-kal rosszabb megoldást adott. A kvantumprocesszor ebből legfeljebb 0,032 másodpercet futott. A szerzők összegzése szerint a hibrid megoldó általában nem múlja felül a klasszikus megoldókat, de „hasznos eredményt ad elfogadható időn belül” [16]. A közlemények társszerzője Koniorczyk Mátyás (Wigner FK); a hazai kapcsolódást a 10.2. pont tárgyalja.

A Baltimore Light RailLink hálózatán az IITiS PAN egyik kutatója az UMBC kutatóival sztochasztikus zavarok melletti újraütemezést vizsgált D-Wave és IonQ gépen. A szerzők szerint ez volt az első eset, amikor mindkét kvantumszámítási paradigmát villamos- és vasúti újraütemezésre alkalmazták, és a kvantumos módszerek ma alulteljesítenek a klasszikus megoldókhoz képest [67].

A német hálózaton a DB Netz és a Cambridge Quantum 2021-ben valószerű menetrendek késések utáni újraütemezését vizsgálta, mennyiségi eredmény nélkül [68]. A legkiterjedtebb folyamatban lévő munka a DLR QCMobility programjának vasúti alprojektje. A 2025 augusztusában indult, 18 hónapos projektet a d-fine tanácsadó cég és a planqc kvantumszámítógép-gyártó koordinálja. A Hessische Landesbahn ipari felhasználóként, a DB InfraGO és az ÖBB-Infra társult partnerként vesz részt benne, folyamataikat és valós üzemi adataikat bocsátják rendelkezésre. A feladatok a zavar utáni rövid távú újraütemezéstől a menetvonal- és menetrendtervezésen át a stratégiai tervezésig terjednek [45]. A program első közleménye szakirodalmi áttekintés, amely a klasszikushoz mért gyorsulást csak lehetőségként fogalmazza meg [46].

Az újraütemezési kísérletek egy kvantumtól független eredményt is hoztak. A szerzők szerint a hibrid megoldó több lehetséges, közel optimális változatot adhat, amelyből a forgalomirányító választhat [16], és a Q-CTRL menetrendtervezési ága is több jelölt menetrendet állított elő [2].

3.2. Menetrend és vágánykijelölés

A London Bridge-i kísérletet (1.1. pont) az SBRI Quantum Catalyst Fund kormányzati innovációs verseny finanszírozta, a Q-CTRL egymillió font támogatást nyert [1]. A cég a vágányutak kijelölését maximális súlyú független csúcshalmaz feladataként írta fel. A projekt menetrendtervezési ága a periodikus eseményütemezési feladatot (PESP) kezelte; a cég szerint a szoftverével hatszor nagyobb feladat volt megoldható, mint nélküle, üzemi hatást pedig 2028-tól vár, ez azonban előrejelzés [2]. A cég közleményében szereplő „több mint 2500-szoros” költségcsökkenés egy pénzügyi kísérlet két kvantumhardver-konfigurációjának becsült díjára vonatkozik, a vasúti feladathoz nem kapcsolódik [69].

A francia vasútnál (SNCF) a kvantumos munka ipari doktori kutatásként jelent meg: Camille Grange a Montpellier-i Egyetemen az SNCF-fel együttműködve vasúti menetrendtervezési feladatokat írt át

QUBO- és magasabb rendű bináris alakra, és QAOA-val oldotta meg [70, 71]. A csoport egy Grover-keresésre épülő elméleti munkája hibatűrő gépet feltételezve egygépes és flowshop-ütemezési feladatokon a legjobb ismert klasszikus algoritmusnál kisebb exponenciális futásidőt mutat; vasúti feladatot nem vizsgál [72].

3.3. Jármű- és személyzetütemezés, karbantartás

A DB Systel és a Fraunhofer FOKUS 2021-ben a Deutsche Bahn valós adatain alapuló, egynapos járműforduló-tervezést vizsgált karbantartási feltételekkel. A QUBO-modellt a D-Wave hibrid megoldója és klasszikus tabukeresés (*tabu search*) oldotta meg; az előközlemény szerint a korlátozásprogramozás (*constraint programming*) a legkisebb példány kivételével több menetet fedett le, rövidebb futásidővel [36]. Az IQM és a Deutsche Bahn 2026 júliusában közölt, kétnapos horizontú kísérletében a QAOA az IQM Emerald gépén, a fordulógráf 20 csúcsos részgráfjain futott; a két kísérlet méretét a 3. táblázat mutatja. A szerzők szerint a hibrid algoritmus és a mohó algoritmus közötti különbség „elhanyagolhatónak tűnik" [25]; az IQM közleménye a valós idejű zavarkezelésre való kiterjesztést lehetőségként említi [73].

A Sziléziai Vasutak motorvonat-fordulóinak tervezésében a teljes napi feladat legfeljebb 404 menetet és 11 járműtípust tartalmazott. Az egészértékű lineáris programozás kb. 40 perc alatt jó minőségű tervet adott, a D-Wave gépe és a kvantuminspirált VeloxQ megoldó viszont csak lényegesen kisebb részpéldányokat tudott kezelni; a szerzők az eredményt a QUBO-alapú módszerek jelenlegi korlátainak bemutatásaként értékelik [40].

Az üzemhez a japán Nankai vasúttársaság és a Hitachi rendszere jutott a legközelebb. A Hitachi *CMOS annealing* megoldása szobahőmérsékleten működő klasszikus félvezető hardver, tehát kvantuminspirált. A vállalatok 2026. júliusi közlése szerint a Nankai fővonal feladatain végzett 2025-ös üzleti évi hatásvizsgálatban a személyzeti beosztás több hónapos kézi munkája kb. egy hétre, az egyhavi járműforduló-terv kb. 20 napos munkája néhány napra rövidíthetőnek bizonyult. A feladat naponta több száz vonat mozdonyvezetőinek és vonatkísérőinek beosztása, változó munkaidő-rendszerrel, pihenő- és étkezési idővel. A rendszer építésének megkezdését a vállalatok ugyanekkor jelentették be; a 2027-es üzleti évben, felhőalapú szolgáltatásként állhat üzembe, és további vonalakra bővülhet [5]. A közlemény a megtakarítást a kézi tervezéshez méri, klasszikus matematikai programozással nem veti össze. A Hitachi 2021-ben egy meg nem nevezett vasúti ügyfélnél már közölt hasonló, napokról kb. 30 percre rövidülő beosztáskészítést; a következő évre bejelentett kereskedelmi bevezetéséről nyilvános adat nem jelent meg [49].

Két további vasúti projekt a folyamatban lévő alkalmazott projektek közé tartozik; eredményt egyik sem közölt. A JR Kyushu és a Groovenauts 2021-ben a járműállomány üzemi tervezésére és csökkentésére indított kísérleti projektet [48]. A spanyol Renfe induló vállalkozásokat támogató gyorsítóprogramjában a QCentroid nyerte a „működési hatékonyság kvantumszámítással" kihívást, 50 000 eurós, hathónapos kísérleti projekttel és legfeljebb egymillió eurós szerződés lehetőségével [47]; a lezárult projektet a Renfe a felhasználási esetek feltérképezéseként mutatja be [44].

Önálló, kvantumszámítást alkalmazó vasúti karbantartás-ütemezésre a vizsgált körben nincs példa. A karbantartás a forduló- és beosztástervezésben feltételként jelenik meg: a DB Systel kísérletében megszeghető, büntetőtaggal kezelt feltételként, az IQM–DB munkában kötelező megállóként, a Nankai rendszerében vizsgálati cikluskén t [36, 25, 5]. A legközelebbi analógia a légi közlekedésből származik (5.1. pont).

4. Városi és közúti közösségi közlekedés

A városi közlekedésben a kutatói érdeklődés a jelzőlámpa-vezérlésre és a forgalomáramlásra összpontosul, ahol a szimulációs és demonstrációs esetek vannak többségben. A közösségi közlekedés üzemi tervezésében viszont 2025–2026-ban sorra jelentek meg a valós adatokon futó kísérleti projektek (garázsbeállás, metrójáratok), a járművezetők beosztásában pedig verseny és konferenciabemutató jelent meg.

4.1. Buszok élő üzemben és a forgalomáramlás

A nyilvános forrásokban egyetlen olyan eset van, amelyben egy kvantumprocesszor menet közben, utasokat szállító buszok irányításában vett részt. A Volkswagen a lisszaboni önkormányzattal és a Carris közlekedési vállalattal 2019 novemberében négy napig kilenc buszt irányított. A rendszer minden buszhoz közel valós idejű útvonalat számolt, hogy az útvonalak kevésbé fedjék egymást, és az élesben futó D-Wave hibrid megoldó legfeljebb 12 változós feladatokat oldott meg néhány másodperces válaszidővel. Klasszikus megoldóval nem vetették össze, menetidő-javulást nem közöltek, és a járművezetők visszajelzése vegyes volt. A kísérlet értéke abban áll, hogy a keresleti modell, az optimalizálás és a járművezetői navigációs alkalmazás egy élő szolgáltatásban kapcsolódott össze [42].

A forgalomáramlás és a jelzőlámpa-vezérlés a kvantumos kísérletezés legtöbbet vizsgált területei közé tartozik; a fontosabb eseteket a 5. táblázat veti össze. Ahol a módszert pontos klasszikus megoldóval is összevetették (Melbourne, Kassa, Aomori), ott a klasszikus megoldó optimális vagy jobb eredményt adott. A kassai vizsgálatban a legrövidebb útvonalhoz képest a torlódási költség a hálózattól függően a hibrid megoldóval legfeljebb 24,4%-kal, a Gurobival legfeljebb 29,4%-kal csökkent [74].

5. táblázat. Forgalomáramlási és jelzőlámpás kvantumos és kvantuminspirált esetek: méret, megoldó és viszonyítási alap.

Eset	Feladat és méret	Megoldó	Viszonyítási alap	Közölt eredmény
Volkswagen, Peking (2017)	taxiforgalom történeti adatokon; 418 autó, 1254 változó	D-Wave hibrid	véletlen hozzárendelés	kevesebb torlódás
Ford, Microsoft, Seattle (2019)	útvonal-kiegyensúlyozás, szimuláció; 5000 jármű	kvantuminspirált	egyénileg optimális útvonal	73%-kal kisebb teljes torlódás (sajtóbeszámoló)
Ford, Melbourne-i Egyetem (2025)	útvonal-hozzárendelés; kb. 22 qubitig	IBM kapualapú gép	Gurobi	a Gurobi minden példányon optimális; a szerzők szerint „még túl korai” ítéletet mondani
Kassai Műszaki Egyetem (2025)	városi forgalomáramlás; legfeljebb 25 000 jármű	D-Wave hibrid	Gurobi	a hibrid kb. 1%-kal elmarad a Gurobitól
Toyota kutatóintézet, Tokiói Egyetem (2021)	jelzőlámpák, 50×50-es rács; 2500 változó, 42 részfeladat	*quantum annealer*	szimulált hűtés	részben jobb, részben gyengébb
Tohoku Egyetem, Aomori (2023)	jelzőlámpák, 48 csomópont; 100 változó	*quantum annealer*	Gurobi; rögzített ciklus	a Gurobi optimális és a leggyorsabb; az optimális vezérlés 600 járműnél 28,9%-kal kevesebb várakozást ad, 200 járműnél a rögzített ciklus kedvezőbb

Eset	Feladat és méret	Megoldó	Viszonyítási alap	Közölt eredmény
Jij, Toyota Tsusho (2020)	jelzőlámpák fáziseltolása, szimuláció	kvantuminspirált	hagyományos eltoláskeresés	20%-kal rövidebb várakozás
Fujitsu, Hamburgi Kikötői Hatóság (2021)	jelzőlámpa-hálózat, valós forgalmi adat	*Digital Annealer*	nem közölt	menetidő legfeljebb 15%-kal, CO_2 legfeljebb 9%-kal kisebb a meglévő, nem részletezett vezérléshez képest
China Mobile, Hefei (2026)	jelzésterv, 5 csomópont, valós környezet	nem közölt	nem közölt	javuló átbocsátás, számadat nélkül

Forrás: [34, 75, 76, 74, 77, 78, 79, 54, 43]. Az eredmények a forrásban közölt formában.

4.2. Jelzőlámpák és forgalomirányítás

A jelzőlámpa-vezérlés a városi kör legtöbbet vizsgált feladata, 11 eset tartozik ide. A *quantum annealer* gépeken futó akadémiai munkák szimulált hálózatokon dolgoztak, és a nagyobb hálózatokat a hardver mérete miatt részfeladatokra kellett bontaniuk [77]. Az aomori vizsgálatban az optimális, hálózati szintű vezérlés nagy forgalomnál jelentősen csökkentette a várakozást a rögzített ciklushoz képest, kis forgalomnál viszont a rögzített ciklus volt kedvezőbb, vagyis a haszon a forgalmi helyzettől függ [78]. Az ipari vizsgálatok kvantuminspirált megoldókkal dolgoztak; a hamburgi kikötői esetben a közlemény az eredményt a meglévő, nem részletezett vezérléshez méri, és az élő vezérlés ténye nem derül ki belőle [54].

Az élő forgalomba vezető út legjobban dokumentált példája a német DLR QI-TraSiCo projektje (2023. szeptember – 2026. december). A kvantuminspirált háttérrendszer valós idejű, hálózati szintű jelzőlámpa-vezérlést céloz. Először a DLR laboratóriumában, prototípusként tesztelik, majd egy augsburgi teszterülethez csatlakoztatják, ahol élő forgalomban valós jelzőlámpákat vezérelne; a projekt kifejezett célja a folyamatos üzembiztonság és a meglévő forgalomtechnikai interfészekhez való illesztés. Az élő tesztről 2026 októberéig nem jelent meg közlés [56].

Két további eset valós környezetet jelez. Kínában a China Mobile és a hefei közlekedésrendészet 2026-ban öt szomszédos csomópont jelzésterveit optimalizálta a meglévő forgalomirányító platformhoz kapcsolódva; a beszámolók javuló jármű-átbocsátásról szólnak, számszerű eredményt és hardvertípust azonban nem közölnek, és az egyiket a közlő oldal hirdetésként jelöli [43, 39]. Izraelben az autópálya-üzemeltető Ayalon Highways és a Quantum Art 2025-ben több száz csomópont összehangolására jelentett be együttműködést, a jelenlegi klasszikus eszközökkel való összevetés tervével [57]. Valódi kvantumhardveren, valós üzemeltetői adattal futó jelzőlámpa-vezérlés a nyilvános forrásokban nem dokumentált.

4.3. Busz- és metróüzem tervezése

A közösségi közlekedési üzemtervezés 2026-ban vált a valós adatokon futó kísérleti projektek terepévé. A Nishi-Tokyo Bus három telephelyére a Quanmatic 2026 júliusától szeptemberig tervezett kísérletet a garázsbeli beállási terv automatikus elkészítésére, valós adatokon [62]. A terv eddig kézzel, néhány órától fél napig tartó munkával készült, és a feltételek között a vizsgák, a meghibásodások és az elektromos buszok töltőinek helye is szerepel. A közlemény a módszert kvantum- és klasszikus számítás hardverfüggetlen ötvözeteként írja le; siker esetén más buszvállalatoknak is elérhető webes alkalmazás készülne [61].

A járművezetők beosztása két 2026-os esetben jelent meg. Egy berlini kvantumos *hackathonon*, az-

az néhány napos, csapatos fejlesztői versenyen egy csapat egy 150 buszvezetős, négyhetes BVG-beosztási feladatot oldott meg QUBO-modellel, a Kipu Quantum algoritmusával; a BVG részvétele és az adatok eredete nem dokumentált. Klasszikus összevetés nem készült, és az évi kb. 18 millió eurós érték a csapat saját előrejelzése egy feltételezett 2%-os hatékonyságjavulásra [80]. Az Accenture egy konferencia-előadásban kvantumos oszlopgenerálást mutatott be valós városi járművezető-beosztási feladatra, kis példányokon [81]. Az oszlopgenerálás a klasszikus járműütemezésben is bevett módszer [82]; a kvantumos lépés itt csak az árazási részfeladatot váltja ki.

A metróüzemben a busani városi vasút 2025-ben a Korea Quantum Computing céggel kezdte vizsgálni a járatsűrűség, az energiafelhasználás és a személyzet együttes optimalizálását üzemi adatokon, a koreai Nemzeti Kutatási Alapítvány „kvantumelőny-kihívás" programjában [63, 83]. Pekingben egy metrótervező cég, a Pekingi Csiaotung Egyetem és a QBoson az utolsó éjszakai járatok csatlakozását optimalizálta három vonal és két átszállóhely kis példányán. Az eredeti modellen a Gurobi 0,3 másodperc, a koherens Ising-gép becsülten kb. 0,5 másodperc alatt adta ugyanazt a célfüggvényértéket; a szerzők szerint a koherens Ising-gép előnye a feladatmérettel nőhet, ezt azonban a cikk mérésekkel nem támasztja alá [84].

4.4. Igényvezérelt közlekedés és elektromos buszok

Az igényvezérelt közlekedésben a megállók és az útvonalak tervezése jelent meg a kísérleti projektekben. A japán Kawasaki város „kvantum-demonstráció" programjában az NEC Solution Innovators a város közlekedéspolitikai osztályával a használati adatok alapján vizsgálta az igényvezérelt járatok megállóit és útvonalait, a buszvezetőhiány kezelésére; a város megfogalmazása szerint „kvantumszámítógéppel", a hardvert azonban nem nevezi meg [58]. A 2026 márciusi eredménybemutatóról a nyilvános beszámolók számszerű eredményt nem közölnek. A program 2026–2027-es fordulójának két nyertese között közlekedési projekt nem szerepel [85]; erre a fordulóra a felhívás projektenként legfeljebb 3,25 millió jen támogatást írt ki [86]. A német DLR QCMobility programjának közúti alprojektjét 2025-től a d-fine és a planqc viszi, alvállalkozóként a Rajna–Neckar térség közlekedési vállalatával (Rhein-Neckar-Verkehr); az igényvezérelt közlekedésben a virtuális megállók elhelyezését vizsgálják [59]. A DLR 2025. decemberi közleménye szerint a kvantumos megoldások integrálására a ParityQC kapott megbízást [60].

A DENSO kiotói vizsgálatában 400 előre foglalt városnéző taxiúthoz a D-Wave-alapú megoldás szerint 43 jármű elegendő, a „hagyományos megközelítésben" 62 kellett [87]. A viszonyítási alap jellege nem ismert, ezért a 30%-os különbség inkább szemléltetésnek tekinthető. A közös utazás (*ride pooling*) modelljeinél a változók száma négyzetesen nő, ami a mai kvantumeszközökön akadályt jelent [88, 89].

Az elektromos buszok töltésütemezése jól megfogalmazható QUBO-feladat. Az EDF kínai kutatóközpontja valószerű üzemi adatokon vizsgálta D-Wave gépen. A büntetőtagos megfogalmazás kb. 150 logikai változója a hardveren kb. 1500 fizikai qubitet igényelt, ezért a 3 buszos, 2 töltős, 48 időlépéses példány csak egy átalakított alakban, 320 qubiten volt megoldható, és a *quantum annealing* nem adott jobb eredményt a szimulált hűtésnél [90, 24]. A Pasqal és az EDF személyautó-flották töltését legfeljebb 100 qubites semleges atomos processzoron vizsgálta [91]. A depótöltés közeli megoldását így a klasszikus vagy a kvantuminspirált megoldók adhatják.

4.5. Kereslet-előrejelzés és hálózattervezés

A hálózattervezésben a legrészletesebb munka egy új pekingi buszjárat nyomvonalát választotta ki legalább 60 jelölt megállóból, a pekingi közlekedési vállalat kb. 40 000 forrás–cél párt tartalmazó keresleti adataival. A koherens Ising-gép az egyik modellváltozatban gyorsabb volt a Gurobinál, mind-

kettő 100%-os sikeraránnyal, a másikban viszont a sikeraránya 10% volt, a Gurobié 100%. A szerzők többsége a gyártó munkatársa, és kvantumelőnyt nem állítanak [18].

A nyilvános források szerint kvantumos gépi tanulásra épülő utasáramlás- vagy kereslet-előrejelzést egyetlen közlekedési vállalat sem használ éles vagy kísérleti üzemben. Az athéni forgalmi adatokon végzett vizsgálat a legjobb klasszikus módszerekkel versenyképes pontosságot jelzett, nagyobb számítási igénnyel [92], egy 2026-os NeurIPS-workshopposzter pedig a Los Angeles-i forgalmi adatok 50 csomópontos részhálózatán nem talált előnyt a klasszikus kontrollmodellekhez képest [93]. Kanadai és ausztrál kutatók a közösségi közlekedés forrás–cél mátrixát automatikus viteldíjfizetési és utasszámlálási adatokból tervezik becsülni [94].

5. Légi közlekedés

A légi közlekedés intézményi szempontból a legaktívabb közlekedési terület: a SESAR közös vállalkozás, az Eurocontrol és a német DLR is saját programot indított. Az esetek többsége mégis kutatási vagy demonstrációs szintű. Egy lektorált áttekintés szerint a légitársasági ütemezésben, a hálózattervezésben és a beszállókapu-kiosztásban a klasszikus módszerek túlszárnyalásához a hardver és az algoritmusok jelentős fejlődése szükséges [95].

5.1. Légitársasági tervezés

Az egyetlen üzemeltető által bejelentett üzemi alkalmazás a Japan Airlines (JAL) karbantartástervező eszköze. A JAL 2021-től kísérleteket végzett az A*Quantum céggel, 2023-ban megállapodtak az alkalmazás fejlesztéséről, és a JAL közlése szerint az eszköz 2026 márciusában formálisan üzembe lépett a JAL Engineeringnél [96, 6]. A feladat géptípusonként kb. 500 karbantartási tétel ütemezése a gépek használata, a szerelők, a hangárkapacitás és a határidők szerint, azzal a céllal, hogy a gépek a határidőhöz közelebb kerüljenek ellenőrzésre, és csökkenjen a karbantartások száma. A JAL egyik munkatársa 2024-ben úgy nyilatkozott, hogy egy hónapos terv elkészítése „hagyományos számítógéppel 3–4 év, kvantumszámítási technológiával 10 perc” [41]. A 2026-os közlemény a módszert csak „kvantumszámítási technológiaként, matematikai optimalizálásként és nagy sebességű adatfeldolgozásként” írja le, így nem ellenőrizhető, hogy az eszköz valódi kvantumhardveren fut-e, és a nyilatkozatban szereplő hagyományos számítógépes eljárást sem írják le, tehát a viszonyítási alap sem ismert. Az eset ettől függetlenül azt mutatja, hogy egy összetett, gyakran újratervezendő karbantartási feladat optimalizálása üzemi szintre vihető.

A Tata Consultancy Services 2026-ban egy ausztrál légitársaság adatain, napi 46–3680 járattal vizsgálta a flottakiosztást (*fleet assignment*), vagyis azt, hogy melyik géptípus repülje az egyes járatokat. Az előközlemény szerint a SCIP klasszikus megoldó minden példányt optimálisan megoldott. A D-Wave hibrid megoldója a bináris modellváltozat legnagyobb példányán gyorsabban adott közel optimális megoldást, az egészértékű modellváltozatban viszont 1104 járattól nem talált lehetséges megoldást [38]. A SCIP a kereskedelmi megoldóknál általában lassabb, így az összevetés nem a legerősebb klasszikus viszonyítási alaphoz mér. A járatok repülőgépekhez rendelését (*tail assignment*) a svéd Chalmers Műszaki Egyetem QAOA-val vizsgálta, kvantumelőnyt nem állítva [97]. Az Air France–KLM és a holland TNO munkájában a hibrid megoldó jobb beosztást adott a *quantum annealing* eljárásnál és a szimulált hűtésnél, egészértékű programozással azonban nem vetették össze [98]. Egy indiai szolgáltató fehér könyvei a légi személyzet vezénylését (*crew rostering*) és a személyzeti fordulótervezést (*crew pairing*) vetették össze a nyílt forráskódú CBC megoldóval; az eredményeket a 7. táblázat és a 6. ábra mutatja [99, 100].

A légitársasági területen a folyamatban lévő alkalmazott projektek közül a DLR QCMobility légi alprojektje a legjelentősebb. Az Eurowings több mint 100 repülőgépes, 13 bázisos hálózatán a stratégiai tervezést, a Lufthansa üzemi adataival a gépek és a személyzet zavar utáni átosztását vizsgálják [51]. A Lufthansa Industry Solutions 2026. szeptemberi előadása szerint a gépek járatokhoz rendelését, a személyzeti zavarkezelést, az útvonaltervezést és a beszállókapu-kiosztást klasszikus és kvantumos algoritmusokkal, szimulációban és hardveren is futtatták, eredményt azonban még nem közöltek [101]. A panamai Copa Airlines 2026-ban valós üzemi adatokon rendezett versenyt az utasok zavar utáni átfoglalására [102].

5.2. Repülőtéri erőforrások

A repülőtéri beszállókapu-kiosztás a kvantumos kísérletek kedvelt mintafeladata, mert jól megfogalmazható hozzárendelési feladat. A DLR már 2018-ban egy német repülőtér valós adataiból vett kis példányokat oldott meg D-Wave gépen [103]. A Hamburgi Egyetem és a Lufthansa Industry Solutions 2024 és 2027 között skálázható kvantumalgoritmust fejleszt reális repülőtéri feltételekre; szemléltető adatuk szerint 15 kapu és 10 repülőgép esetén több mint 570 milliárd lehetséges hozzárendelés van [50]. Az IonQ és a DESY 2023–2024-ben csapdázott ionos gépen, 9 járatos és 4 kapus szemléltető példányon futtatott kísérletet [104].

A Delta Air Lines, a North Carolina State University és az IBM 2021-ben az IBM 27 qubites processzorán futtatott beszállókapu-kiosztási kísérletet. A hardveren egy 5 járatos példány futott, a hagyományos kódolással 25, a qubittakarékos kódolással 15 qubiten, és a helyes megoldás volt a legvalószínűbb kimenet, kb. 0,586%-os valószínűséggel. A szerzők a gyakorlati alkalmazást 5–10 éves távlatba helyezik [105]. A qubittakarékos kódolás magyar kutatók – Tabi Zsolt, Kallus Zsófia, Hága Péter, Kozsik Tamás és Zimborás Zoltán – 2020-as gráfszínezési munkájára épül [106], akik egy 2024-es közös közlemény szerint részben az ELTE és a HUN-REN Wigner FK kvantumszámítási csoportjához, részben az Ericsson Research budapesti csoportjához tartoznak [107]; Kozsik Tamás az ELTE IK dékánja [14]. A földi kiszolgálás (kiszolgáló járművek és személyzet ütemezése) kvantumos optimalizálására a vizsgált körben nincs önálló eset.

5.3. Légiforgalmi irányítás

A légiforgalmi irányításban a NASA, a DLR és a Berkeley kutatói már 2017–2019-ben az Atlanti-óceán feletti, valós pályák konfliktusfeloldását vizsgálták D-Wave gépen. A hardverre férő részfeladatokat 99%-os valószínűséggel, egy másodpercen belül oldották meg optimálisan; ez a részfeladatokra igaz, nem a teljes feladatra [35]. Az Edinburghi Egyetem egy szimulált légtérben helyes, de a klasszikusnál jóval lassabb kvantumos pályaoptimalizálásról számolt be [108].

2026-ban az európai intézmények saját programot indítottak. A SESAR közös vállalkozás négy kvantumtárgyú feltáró kutatást támogat, összesen közel 4 millió euróval, és maga is úgy látja, hogy a gyakorlati bevezetés valószínűleg évtizedekre van [109]. A kvantumszámítási projektek közül a Zágrábi Egyetem vezette JANUS az ENAV olasz léginavigációs szolgáltatóval a kvantumalgoritmusokra alkalmas légiforgalmi feladatokat rangsorolja, kidolgoz egy felhasználási esetet és egy posztkvantum-kriptográfiai ütemtervet [110]. A NEXT-QCM szektorszintű pályaoptimalizálást vizsgál kvantumszimulátorokon, magyarázható modellekkel [111].

Az Eurocontrol 2026 augusztusában megvalósíthatósági próbára (*proof of concept*) írt ki tendert a kvantumszámítás légiforgalmi alkalmazására. A hirdetmény szerint a technológia „viszonylag korai érettségi szakaszban” van, és az Eurocontrol nem rendelkezik a független értékeléshez szükséges szakértelemmel és infrastruktúrával. A feladat egy-két légiforgalmi kihívásra (kapacitásnövelés, a biztonsági szint fenntartása) kidolgozott próba valós vagy reprezentatív adatokon, amelynek központi

követelménye a releváns klasszikus kiindulási megoldásokkal való összevetés; elfogadott kimenet a technológia további figyelemmel kísérése is [52]. Az ajánlattételi határidő 2026 szeptemberében lejárt, a nyertes októberig nem vált ismertté.

A kis magasságú városi légi forgalomban a Sumitomo és a Tohoku Egyetem 2021-es szimulációjában a sajtóbeszámoló szerint a kvantumos forgalomirányítás kb. 70%-kal több egyidejű repülést tett lehetővé, a viszonyítási alap megnevezése nélkül [112].

6. Az eredmények értékelése

6.1. Üzemi nyereséget közlő esetek

Azok az esetek, amelyek nagy üzemi nyereséget közöltek, kvantuminspirált, a D-Wave platformjára épülő vagy nem közölt módszerrel működő megoldóval futnak. Eredményeiket független fél nem ellenőrizte, és a négy esetből kettő a korábbi kézi tervezéshez mér (6. táblázat). Közlekedési üzemi alkalmazás hibrid megoldóval nem ismert. A legközelebbi rokon eset a kanadai Pattison élelmiszer-kereskedelmi csoport több mint 500 járművezetőjének heti beosztása. A D-Wave keltezetlen esettanulmánya szerint ez 2022 vége óta a D-Wave platformjára épülő üzemi alkalmazás, a megoldó típusát azonban az esettanulmány nem nevezi meg, és az eredmény is csak ebből a gyártói forrásból ismert [113].

6. táblázat. Közölt üzemi nyereséggel járó optimalizálási esetek közlekedési és rokon feladatokon.

Eset	Feladat	Megoldó	Közölt eredmény	Viszonyítási alap
Nankai–Hitachi (2025–2027)	vasúti személyzet- és járműütemezés	kvantuminspirált	hatásvizsgálat: személyzet hónapok helyett kb. 1 hét, jármű kb. 20 nap helyett néhány nap	kézi tervezés
JAL–A*Quantum (üzem 2026-tól)	légi karbantartás-tervezés	nem közölt	1 havi terv „3–4 év” helyett 10 perc (nyilatkozat)	„hagyományos számítógép”
Pattison–D-Wave (2022 végétől)	járművezetők heti beosztása	D-Wave-platform (típus nem közölt)	heti kb. 80 munkaóra helyett kb. 15	kézi tervezés
Hamburgi Kikötő–Fujitsu (2021; folyamatban lévő projekt)	jelzőlámpa-hálózat	kvantuminspirált	menetidő legfeljebb 15%-kal, CO_2 legfeljebb 9%-kal kisebb	a meglévő, nem részletezett vezérlés

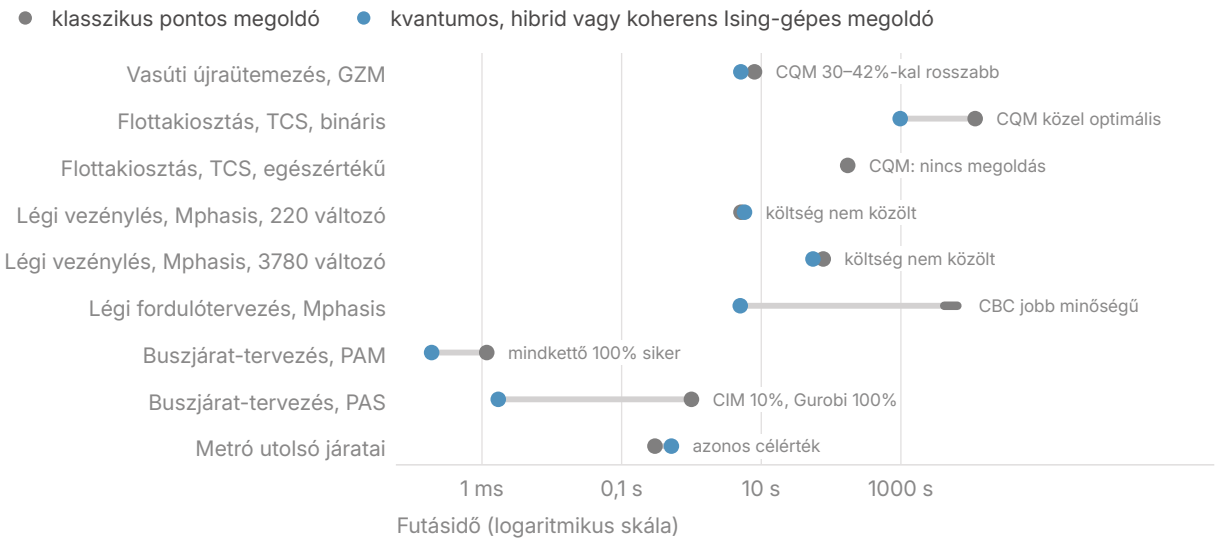
Forrás: [5, 6, 41, 113, 54]. Az eredmények gyártói vagy üzemeltetői közlések, független ellenőrzés nélkül. A Pattison-eset élelmiszer-kereskedelmi, ezért nem része a 90 közlekedési esetnek; eredménye a D-Wave esettanulmányából ismert. A hamburgi eset a 4. táblázatban folyamatban lévő projektként szerepel, mert az élő vezérlés nem igazolt.

A Nankai és a Pattison a nyereséget a kézi tervezéshez méri, a JAL viszonyítási alapja nem ismert (5.1. pont). Hogy egy korszerű matematikai programozási megoldó hasonló eredményt adna-e, a közleményekből nem állapítható meg [5, 41]. A haszon egy része ezért a feladat matematikai megfogalmazásából és a tervezés automatizálásából eredhet. A kvantuminspirált és a hibrid megoldók teljesítménye ráadásul feladatosztályonként eltér. Egy egyetemi összevetésben a D-Wave hibrid megoldója, a Toshiba és a Fujitsu megoldója más-más feladatosztályon lett első, és egy jól hangolt szimulált hűtés is közel került hozzájuk [17]. A szerzők egyike, Ohzeki Masayuki a Sigma-i vezérigazgatója; a cég 2019-ben felhőhozzáférési szerződést kötött a D-Wave-vel [114]. Egy független összehasonlító mérés szerint a D-Wave hibrid megoldója egészértékű kvadratikus célfüggvényű feladatokon mutat-

kozott a legelőnyösebbnek, egy valós vegyes egészértékű lineáris programozási feladaton viszont sem futásidőben, sem megoldásminőségben nem érte el a CPLEX-et és a Gurobit [115].

6.2. A legjobb klasszikus megoldóval szemben

Ahol a szerzők a kvantumos vagy hibrid módszert pontos klasszikus megoldóval (Gurobi, CPLEX, SCIP, CBC, korlátozásprogramozás) is összevetették, a kvantumos oldal a megoldás minőségében egyszer sem volt jobb (7. táblázat). Néhány nehezebb példányon gyorsabban adott lehetséges megoldást: a 3680 járatos flottakiosztásnál közel optimálisat, a felső-sziléziai vasúti hálózat két példányán viszont az optimumnál jóval rosszabbat [38, 16]. A futásidő azonban önmagában félrevezető lehet (6. ábra): a gyorsabb kvantumos vagy hibrid futás több esetben nem optimális megoldást ad, vagy alacsony sikeraránnyal fut. A személyzeti fordulótervezésben például a hibrid megoldó egy előre beállított időkorlátig futott, a CBC az optimum bizonyításáig, így a két idő nem ugyanazt méri [100].



6. ábra. Futásidő a klasszikus pontos megoldóval és a kvantumos, hibrid vagy koherens Ising-gépes megoldóval ugyanazon a példányon. A kvantumos oldal több példányon gyorsabb, de ahol a forrás a megoldás minőségét is közli, ott egyik esetben sem jobb.

Forrás: [16, 38, 99, 100, 18, 84]. Logaritmikus skála. A fordulótervezésnél a klasszikus futásidő tartomány (4176–6436 s). A flottakiosztás egészértékű modellváltozatában a hibrid megoldó nem talált lehetséges megoldást, ezért ott csak a klasszikus idő szerepel. A metrós példány kvantumos ideje becsült érték. A PAM és a PAS a buszjárat-tervezési modell két pontosság-csökkentő változata.

7. táblázat. A klasszikus megoldóval végzett összevetések eredménye.

Eset	Klasszikus összehasonlító	Eredmény a forrás szerint	Értékelés
Vasúti újraütemezés, lengyel egyvágányú vonalak	CPLEX, CBC, heurisztikák	a CBC minden példányt 0,03 s alatt optimálisan megold	klasszikus fölény
Vasúti újraütemezés, GZM	CPLEX	a CQM a kisebb hálózatokon optimális, a 4–9. hálózaton 5–72%-kal rosszabb; két hálózaton gyorsabb, de ott is 30–42%-kal rosszabb	klasszikus fölény

Eset	Klasszikus összehasonlító	Eredmény a forrás szerint	Értékelés
Motorvonat-forduló, Sziléziai Vasutak	egészértékű programozás	a kvantumos ág csak részpéldányt kezel	klasszikus fölény
Járműforduló, DB Systel	korlátozásprogramozás	a korlátozásprogramozás jobb, kivéve a legkisebb példányt; a hibrid legfeljebb 7%-kal kevesebb menetet fed le	klasszikus fölény
Járműforduló, IQM–DB	pontos, mohó és véletlen megoldó	a mohó és a hibrid különbsége „elhanyagolható”	nincs előny
Flottakiosztás, TCS	SCIP	a SCIP mindig optimális; a bináris modellen a CQM 3680 járatnál gyorsabb, az egészértékű modellen a SCIP kb. 173 s alatt végez, a CQM 1104 járattól nem talál megoldást	vegyes; nem a legerősebb megoldóhoz mérve
Légi személyzet vezénylése, Mphasis	CBC	a kisebb példányon a CBC, a nagyobbon a CQM gyorsabb; a megoldás költségét a forrás nem közli	minőségben nem értékelhető
Légi személyzeti fordulótervezés, Mphasis	CBC	a CBC jobb minőségű, de lassabb; többcélú változatban csak a CQM fut le	időkorlátos heurisztika és pontos megoldó
Jelzőlámpa, Aomori	Gurobi	a Gurobi optimális és a leggyorsabb	klasszikus fölény
Forgalomáramlás, Kassa	Gurobi	a hibrid kb. 1%-kal elmarad	klasszikus fölény, kis különbséggel
Útvonal-hozzárendelés, Ford–Melbourne	Gurobi	a Gurobi minden példányon optimális	klasszikus fölény
Buszjárat-tervezés, Peking	Gurobi	az egyik változatban a CIM gyorsabb, a másikban 10%-os sikerarányú	kis példányon vegyes; gyártói szerzők
Elektromosbusz-töltés, EDF	CPLEX, szimulált hűtés	a *quantum annealing* nem jobb a szimulált hűtésnél	nincs előny
Utolsó járatok, pekingi metró	Gurobi	azonos célérték; az eredeti modellen a Gurobi gyorsabb	nincs előny

Forrás: [4, 16, 40, 36, 25, 38, 100, 78, 74, 76, 18, 90, 84]. Az értékelés oszlop a tanulmány összegzése a forrásban közölt eredmények alapján.

A független szakirodalom ugyanezt mutatja. Egy ipari áttekintés szerint nincs olyan ipari alkalmazás, ahol a *quantum annealing* vitathatatlanul felülmúlná a klasszikus heurisztikákat [24]. A kvantumoptimalizálás átfogó áttekintése szerint az értékeléshez a klasszikus technikákkal való méltányos összevetést lehetővé tevő mérőszámok kellenek [27], a QOBLIB nyílt referenciafeladat-készlet szerzői pedig hangsúlyozzák, hogy kvantumelőny csak a legjobb ismert klasszikus módszerek felülmúlásával állítható [28]. A közelítő optimalizálásban élénk a tudományos vita: egy 2025-ös cikk a *quantum annealing* skálázási előnyét közölte spinüveg-feladatokon [116], egy 2026-os munka viszont egy kvantumos ötletből származó klasszikus algoritmussal hasonló skálázást mutatott [117]. A vita eredményeként ezek a klasszikus algoritmusok maguk is erős, ma is elérhető megoldóként jelentek meg.

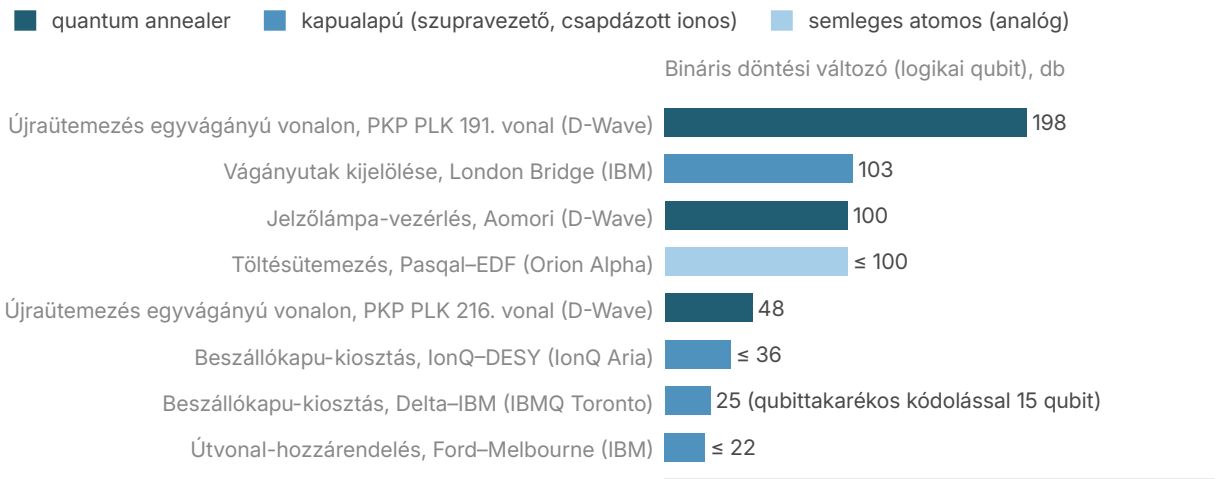
A gyártók 2025-ben optimalizálási feladatokon is közöltek kvantumelőny-állítást. A Kipu Quantum kutatói szerint az IBM 156 qubites gépén futó hibrid algoritmusuk egyes, nehéznek választott példányokon gyorsabban ad jó közelítő megoldást, mint a szimulált hűtés és a CPLEX [118]. Az állítást több elemzés vitatta. Egy lektorált munka szerint a rendszerszintű többletterhek beszámításával és egy

GPU-n futó, *simulated bifurcation* elvű klasszikus megoldóval összevetve az előny nem áll fenn [119]; a szerzők egy része maga is versenytárs kvantuminspirált megoldó fejlesztőjéhez kötődik. Egy másik, valószínűleg szintén versenytárshoz kötődő előközlemény szerint a *quantum annealing* jobb eredményt ad rövidebb idő alatt [120], egy nagy nyelvi modellre épülő ellenőrző elemzés pedig azt találta, hogy az előny a legnehezebb példányon alapul, a medián gyorsulás jóval kisebb a közöltnél, és a két oldal futásideje nem azonos lépéseket tartalmaz [121]. Egy előnyállítás megítélése tehát a példányok kiválasztásán, a futásidő meghatározásán és a klasszikus viszonyítási alap erősségén múlik.

A közlekedési gyártói közlemények jellemzően gyenge viszonyítási alaphoz mérnek (véletlen mintavétel, mohó keresés, rögzített ciklusú jelzőlámpa, kézi tervezés), vagy nem közölnek összevetést [2, 73, 87]. A sajtóban „kvantumos” címkével szereplő legnagyobb közlekedési hatásbecslések kvantuminspirált, klasszikus hardveren futó eljárásokból és gyenge viszonyítási alapból származnak (5. táblázat). Ezek elsősorban azt az előnyt mérik, amelyet a hálózati szintű megfogalmazás a helyi vagy egyéni döntésekkel szemben ad, és ez az előny klasszikus eszközökkel ma is elérhető.

6.3. Feladatméret és hardverkorlát

A kvantumprocesszoron közvetlenül futtatott, valós eredetű feladatok mérete néhány tíztől néhány száz bináris változóig terjed (7. ábra). Nagyobb méret csak részfeladatokra bontással adódott: a japán rácsmodell 2500 változóját 42 részre kellett osztani [77]. A hibrid megoldók ezres–tízezres nagyságrendű feladatokat is kezelnek (3680 járat, 5886 személyzeti párosítás, 25 000 jármű), de ezeknél a kvantumprocesszor tényleges hozzájárulása nem választható szét a klasszikus heurisztikákétól [16].



7. ábra. A kvantumprocesszoron közvetlenül futtatott, valós eredetű közlekedési feladatok mérete bináris döntési változóban. A közvetlen hardveres futtatások néhány tíz és néhány száz változó közötti feladatokon történtek.

Forrás: [4, 2, 78, 91, 104, 76, 105]. A méret a feladat bináris döntési változóinak (logikai qubitjeinek) száma; a „≤” felső korlát. Nem szerepelnek a hibrid megoldók, az áruszállítási feladatok (például a repülőgép-rakodás), a részfeladatokra bontott és az átalakított alakban futtatott példányok (például az elektromosbusz-töltés, 4.4. pont), valamint a méretet nem közlő futtatások.

A gyártók közlése szerint a kvantuminspirált és a hibrid megoldók ennél jóval nagyobb feladatot fogadnak. A felhőben elérhető *Digital Annealer* és a Toshiba SQBM+ (2022-ben az Azure Quantumon, ma az AWS Marketplace-en) legfeljebb 100 000, a D-Wave feltételes kvadratikus modellt kezelő hibrid megoldója (CQM) a 2026. októberi dokumentáció szerint legfeljebb ötmillió változós és 100 000 feltételes feladatot [21, 22, 23, 122]; újabb gyártói közlések százmilliós vagy milliárdos változószá-

mot is említenek [123, 124]. A kapacitás azonban nem jelenti, hogy a megoldó ekkora feladaton jó minőségű megoldást ad.

A korlát a feladat megfogalmazásából is ered. A feltételek büntetőtagként épülnek be a QUBO-modellbe, és ez a feladat méretét gyorsan növeli. A Sziléziai Vasutak esetében a QUBO sok tagja és a beágyazási korlát miatt a kvantumos ág csak részpéldányt kezelt, a DB Systel kísérletében a karbantartási feltétel csak megszeghető, büntetett feltételként szerepelt [40, 36], az elektromos buszok töltésénél pedig a beágyazás mintegy tízszeres qubitigényt jelentett (4.4. pont).

6.4. A klasszikus optimalizálás mint viszonyítási alap

A kvantumos esetek értékeléséhez a klasszikus matematikai optimalizálás évtizedes közlekedési gyakorlata ad viszonyítási alapot (8. táblázat). A holland vasút (NS) 2006-ban operációkutatási módszerekkel teljesen újraszerkesztette országos menetrendjét, és ehhez igazította a jármű- és a személyzeti beosztást; a vállalat becslése szerint az új beosztások és a növekvő utasszám együtt évi kb. 40 millió eurós többletnyereséget hoztak, ebből kb. 10 millió euró bevétel [125].

8. táblázat. A klasszikus optimalizálás közölt eredményei a közösségi és a légi közlekedésben, kvantumos párjukkal.

Üzemeltető, év	Feladat	Eredmény	Viszonyítási alap	Kvantumos párja
Holland vasút (NS), 2006–2007	országos ütemes menetrend, jármű- és személyzeti beosztás, kb. 5500 vonat/nap	évi kb. 40 M EUR többletnyereség (ebből kb. 10 M EUR bevétel)	korábbi menetrend	Q-CTRL PESP-ág (3.2.); Nankai (3.3.)
Holland vasút (NS), 2005	mozdonyvezetők és jegyvizsgálók szolgálati szabályai	személyi költség évi kb. 4,8 M USD-vel ($-1{,}2\%$) kevesebb	korábbi szabályrendszer	Nankai személyzetütemezés (3.3.)
Berlini metró (BVG), 2004–2005	metró-menetrend, 9 vonal	1 szerelvény megtakarítása, rövidebb várakozás	korábbi menetrend	Q-CTRL PESP-ág (3.2.)
Hamburger Hochbahn, 1997	több telephelyes járműütemezés (teszt)	kb. 10%-kal kisebb költség	korábbi tervezőrendszer	DB Systel, IQM–DB (3.3.); Accenture-oszlopgenerálás (4.3.)
American Airlines, 1991	személyzeti fordulótervezés	évi több mint 20 M USD	korábbi gyakorlat	Mphasis fordulótervezés (5.1.)
Air New Zealand, 1986–1999	személyzettervezés (8 rendszer)	évi 15,66 M NZD	korábbi gyakorlat	Mphasis vezénylés; TNO–Air France-KLM (5.1.)
Continental Airlines, 2001	személyzet zavar utáni újraütemezése	kb. 40 M USD (2001, nagy zavarok)	kézi újraütemezés	Lufthansa (QCMobility), Copa-verseny (5.1.)

Forrás: [125, 126, 26, 82, 127, 128, 129]; a kvantumos párok a zárójelben jelölt pontokban hivatkozott források szerint. A pénzügyi adatok az üzemeltetők saját becslései, eredeti pénznemben.

A táblázat utolsó oszlopa azt a kvantumos vagy kvantuminspirált esetet nevezi meg, amely ugyanazt a feladattípust vizsgálta; ezeknél a klasszikus eredmény mutatja, mekkora hasznot hozott már maga a matematikai megfogalmazás. A klasszikus optimalizálás a nagy üzemeltetőknél évi tízmillió eurós vagy dolláros nagyságrendű megtakarítást, eszközmegtakarítást és rövidebb tervezési időt hozott, és ezt a feladat matematikai megfogalmazása tette lehetővé. A kvantumos lépés ott ígérheti a legtöbbet, ahol a klasszikus optimalizálás már bevezetett, vagyis az adat, a modell és a folyamat rendelkezésre áll, a feladat mérete vagy szerkezete pedig a klasszikus megoldók határát súrolja. Ilyen

lehet az integrált menetrend-, jármű- és személyzettervezés és a valós idejű újratervezés.

6.5. A kvantumelőny és a hardver érettsége

A kvantumszámítás hardvere gyorsan fejlődik, de a közlekedési optimalizálásban jellemző nagy feladatokhoz szükséges hibatűrő gépek még a gyártói ütemtervekben vannak (9. táblázat). 2024 óta teljesült a hibaküszöb alatti hibajavítás, általánosan elérhetővé vált a D-Wave újabb *quantum annealer* generációja, 2025 végén pedig a szaksajtó szerint megjelent az első, hibajavított logikai qubiteket bemutató kereskedelmi rendszer, a Quantinuum Helios [29, 130, 131]. Az IBM 2029-re 200 logikai qubites rendszert, a Quantinuum az évtized végére teljesen hibatűrő rendszert tervez [7, 8]. Az IBM azt várja, hogy az első igazolt kvantumelőnyt a szakmai közösség 2026 végéig megerősíti [132]; a nyílt kvantumelőny-követő felületen azonban 2026 októberében egyetlen jelölt sem szerepelt igazolt előnyként, és optimalizálási jelölt nincs rajta [133].

9. táblázat. Kvantumszámítási hardver: a 2026 októberéig megvalósult mérföldkövek és a gyártók bejelentett tervei.

Gyártó	Megvalósult	Bejelentett terv
Google	2024: Willow, hibajavítás a hibaküszöb alatt	–
D-Wave	2025: Advantage2 *quantum annealer*, több mint 4400 qubit, általánosan elérhető	–
IBM	2025: Nighthawk, 120 qubit; a kísérleti Loon processzort bejelentették, bemutatása nem dokumentált	2026: Kookaburra, első moduláris processzor; 2026 vége: igazolt kvantumelőny (várakozás); 2027: Cockatoo; 2029: Starling, 200 logikai qubit; 2033 után: Blue Jay, 2000 logikai qubit
Quantinuum	2025: Helios, 98 fizikai és 48 hibajavított logikai qubit	2027: Sol; az évtized végére: Apollo, teljesen hibatűrő, több száz logikai qubit
IonQ	–	2028: 1600 logikai qubit; 2030: 40 000–80 000 logikai qubit

Forrás: [29, 130, 132, 7, 134, 131, 8, 9, 135]. A Helios adatai szaksajtóból, a Blue Jay évszáma és az IonQ 2028-as célja másodlagos forrásból valók; a tervek gyártói közlések.

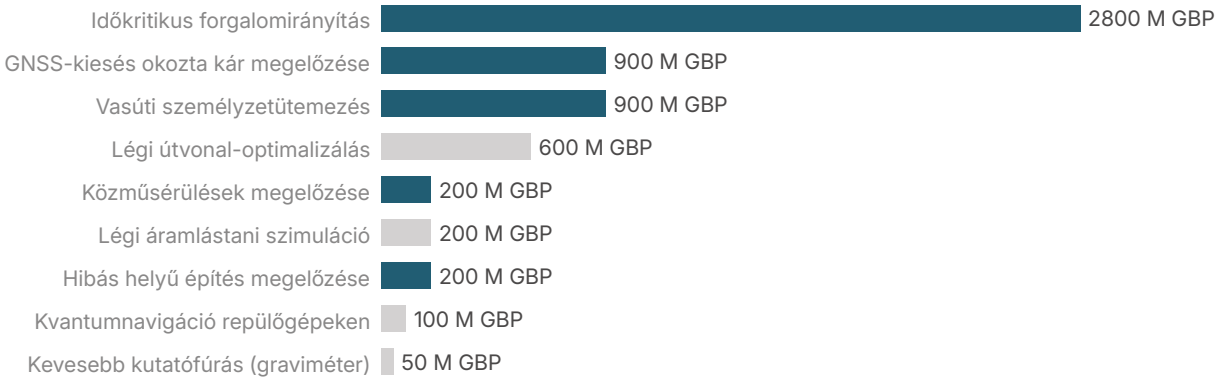
Az algoritmusok oldaláról is ismert korlát: egy elemzés szerint a gyakorlati haszonhoz kis adatigényű feladat és a négyzetesnél nagyobb gyorsítás kell, amelyet a legtöbb javasolt kvantumalgoritmus nem ér el [136, 137]. A klasszikus módszerek is fejlődnek: egy szaklap 2026-os beszámolója szerint a QOBLIB első közzététele óta a klasszikus megoldók egyik feladatosztályban (Market Split) 60-ról 110 változóra növelték a legnagyobb megoldott példány méretét [138]. A viszonyítási alap tehát mozog, és a nagy, vegyes egészértékű közlekedési feladatok hibatűrő kvantumszámítógépen történő megoldása a gyártói ütemtervek teljesülése esetén is legkorábban a 2030-as évek elején–közepén válhat vizsgálhatóvá.

6.6. Várakozások és becslések

A tanácsadói becslések nagy, de hosszú távú potenciált jeleznek. A BCG a széles körű kvantumelőnyt 2030 és 2040 közé teszi, és szerinte a kvantumszámítás 2040-ig 450–850 milliárd dollár értéket teremthet [139], a McKinsey 2026-os jelentése az utazás, a közlekedés és a logisztika területén 2035-ig 200–500 milliárd dollárt valószínűsít, a lábjegyzete szerint a mai helyzethez, nem a jövőbeli klasszikus technológiákhoz mérve [140].

Az egyetlen talált kormányzati kiadású közlekedési becslést a brit Közlekedési Minisztérium adta ki 2024-ben. A Resonance által készített jelentés 2030–2035-ig legalább 4–8 milliárd font nettó érték-

teremtést tart lehetségesnek az Egyesült Királyság közlekedésében, és a hasznos, kvantumelőnyt adó hibatűrő gépeket kb. 2035-től várja; a minisztérium jogi nyilatkozata szerint a megállapítások a szerzőkéi, akik maguk is erős egyszerűsítésnek nevezik a számszerűsítést [141]. A tételes bontást a 8. ábra mutatja. A legnagyobb tétel az időkritikus forgalomirányítás, amely egy kvantuminspirált szimulációra épül. A közösségi közlekedéshez legközvetlenebbül a vasúti személyzetütemezés kb. 900 millió fontos tétele kapcsolódik, amely a brit vasúti foglalkoztatás évi kb. 6,2 milliárd fontos költségének legfeljebb 15%-os megtakarításával számol, egy „korai Hitachi-esettanulmányra" hivatkozva. A jelentés az esettanulmányt nem azonosítja, és a Hitachi nyilvános közleményei sem tartalmaznak ilyen arányt [49, 142]. A dokumentált esetekben a személyzeti tervezés optimalizálásának hatása ennél jóval, a holland vasút esetében egy nagyságrenddel kisebb volt (6.4. és 10.2. pont).



8. ábra. A brit Közlekedési Minisztérium által kiadott jelentés szemléltető értékbecslése a közlekedési és a közlekedési infrastruktúrát érintő tételekre, 2030–2035-ig. A forgalomirányítás tétele messze a legnagyobb, utána a műholdas navigáció kiesésének megelőzése és a vasúti személyzetütemezés következik.

Forrás: [141], 7–8. és 35–37. o.; a jelentés szerzői szerint szemléltető becslés. A kiemelt tételek brit közlekedési adatra épülnek, a halványak a BCG vagy a Citi Group globális becslésének 2%-os leosztásából erednek. Nem szerepelnek a személyszállításhoz nem kapcsolódó tételek: a logisztikai hálózatok (kb. 1,2 Mrd GBP), az önvezető járművek algoritmusai, a kvantumos gépi tanulás és az egyéb precíziós szenzoralkalmazások.

A szakmai szereplők időbecslései ezzel összhangban vannak: a DB Systel oldala és a Delta-kísérlet szerzői egyaránt 5–10 éves távlatot jeleznek [143, 105], a brit polgári légügyi hatóság szerint pedig a kvantumérzékelésen alapuló navigáció és a biztonságos kommunikáció közeli, az optimalizálás hosszabb távú lehetőség [144].

7. Kommunikáció, titkosítás és érzékelés

A kvantumszámításon kívüli három technológia a közlekedésben a kommunikációs és a navigációs infrastruktúrához kapcsolódik, és érettségük jelentősen eltér. Az atomórára épülő időforrás vasúti üzemben is működik, a kvantumnavigáció repülési és vasúti próbáknál tart, a vasúti kvantumkulcs-szétosztás néhány terepi mérésnél. A posztkvantum-kriptográfia klasszikus eljárások köre, amely a kvantumszámítógépek jelentette kockázatra ad választ, és átállásához uniós céldátumok tartoznak.

7.1. Kvantumkulcs-szétosztás vasúti szálon

A vasúti kvantumkulcs-szétosztás (QKD) terepi kísérleteit a 10. táblázat foglalja össze. Az egyetlen jól dokumentált európai mérés Csehországban zajlott: a cseh pályahálózat-működtető (Správa želez-

nic), a prágai Műszaki Egyetem és a Toshiba a vágány mellett futó optikai szálon több mint két hétig mért, és a Toshiba esettanulmánya szerint a működés a vonatok okozta rezgés mellett is stabil maradt [145]. Egy 2026-os folyóiratcikk kivonata a vizsgálatot több tíz kilométeres, közép-csehországi teszthálózaton, stabil kulcssebességgel írja le [146]. A brit QTRAX projekt eredményéről nyilvános közlés nem ismert, a német SQuIRRL kutatási projekt pedig a biztosítóberendezés és a terepi elemek közötti kommunikációt is vizsgálja [147, 148].

10. táblázat. Kvantumkulcs-szétosztás vasúti optikai hálózaton.

Szereplők	Időpont	Nyomvonal, méret	Eredmény	Minőség
Správa železnic, prágai Műszaki Egyetem, Toshiba (OpenQKD)	2023 vagy korábban; több mint két hét	Praha-Smíchov–Beroun, 46 km pálya menti szál, a vágánytól legfeljebb 5 m-re	112 kbit/s kulcssebesség; rezgés mellett is stabil működés	gyártói esettanulmány; folyóiratcikk (2026)
York Egyetem, Network Rail (QTRAX)	bejelentés: 2022	York–Leeds–Huddersfield–Manchester, 4 csomópont, pálya menti szál	nem közölt	projektoldal
SQuIRRL-konzorcium (Németország)	2024 decemberétől, 3 év	vasút, közút, légi közlekedés; több mint 5 M EUR	még nincs	projektoldal
Orosz vasúttársaság (RZD)	2021–2026	vállalati QKD-gerinc; 7858 km, 206 megbízható csomópont	a vállalati informatikát védi; biztosítóberendezési felhasználás nem ismert	sajtóban idézett vállalati közlés

Forrás: [145, 146, 147, 148, 149].

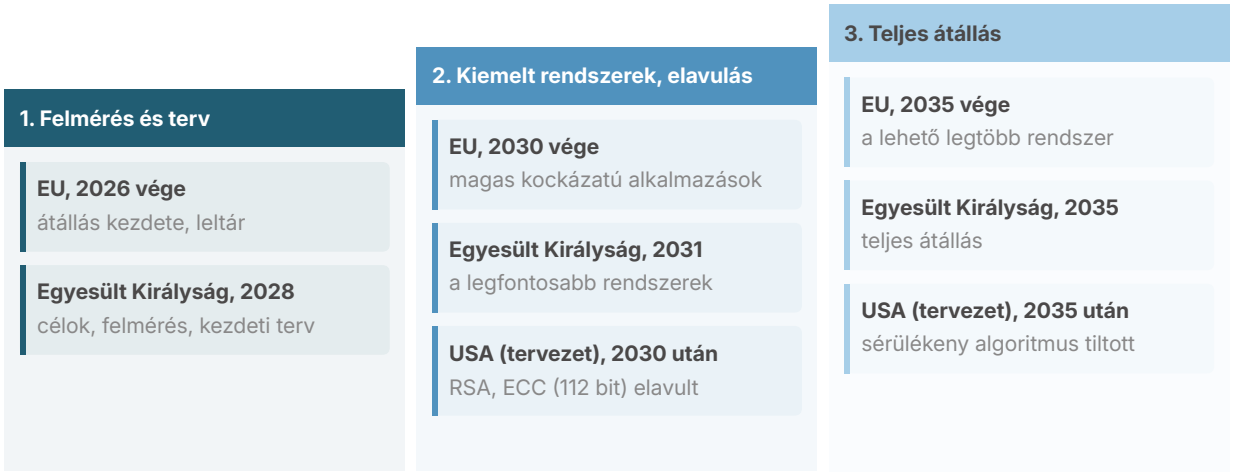
Az RZD hálózatáról független műszaki értékelés nem ismert. Ázsiából nem ismert ellenőrizhető vasúti vagy metrós QKD-telepítés.

A kiberbiztonsági hatóságok egybehangzóan a posztkvantum-kriptográfiát (PQC) helyezik előtérbe. A német, a francia, a holland és a svéd hatóság 2024-es közös állásfoglalása szerint a QKD csak néhány szűk felhasználási esetben használható, és biztonsági érettsége nem elegendő [31]. A brit NCSC szerint a QKD nem lehet a kulcsképzés egyedüli forrása, és hitelesítés hiányában PQC-vel kell kombinálni [150]. A vasúti szálvagyon ugyanakkor a nemzeti kvantumkommunikációs infrastruktúra szempontjából érdekes lehet: a cseh mérés stabil kulcsképzést mutatott pálya menti szálon, és az európai kvantumkommunikációs infrastruktúráról (EuroQCI) szóló nyilatkozatot mind a 27 tagállam aláírta [145, 151].

7.2. A posztkvantum-átállás időkerete

A posztkvantum-átállás műszaki keretét a NIST 2024 augusztusában véglegesített első három szabványa (FIPS 203–205) adja [30]; a NIST átállási ütemterve (IR 8547) 2026 októberében is tervezet, a Falcon-alapú aláírási szabvány (FIPS 206) pedig még nem jelent meg [152, 153]. Az uniós keretet a 2024/1101 bizottsági ajánlás és a NIS Együttműködési Csoport 2025 júniusában közzétett összehangolt ütemterve adja. Ezek nem kötelező erejűek: azt ajánlják, hogy a tagállamok 2026 végéig kezdjék meg az átállást és mérjék fel kriptográfiai eszközeiket, 2030 végéig álljanak át a magas kockázatú alkalmazásokban, 2035 végéig pedig a lehető legtöbb rendszerben [154, 13]. A brit NCSC ütemterve (2028, 2031, 2035) elsősorban a kritikus infrastruktúra és az ipari vezérlőrendszerek üzemeltetőinek szól [155]. A három menetrend hasonló fokokra épül, közös végpontként 2035-tel (9. ábra). Az első fok a felmérés és a terv. A második az uniós és a brit menetrendben a kiemelt rendszerek átállítása, az amerikai tervezetben a 112 bites kvantumsérülékeny algoritmusok elavulttá nyilvánítása. A harmadik

a teljes átállás, illetve a sérülékeny algoritmusok tiltása.



9. ábra. A posztkvantum-átállás három foka az uniós, a brit és az amerikai menetrendben. A céldátumok közel esnek egymáshoz: a felmérés 2026–2028-ra, a második fok 2030–2031-re, a teljes átállás 2035-re esik; a második fok az amerikai tervezetben elavulttá nyilvánítást jelent.

Forrás: [156, 13, 155, 152]. Az uniós dátumok ajánlások, a 2035-ös uniós mérföldkő részletei másodlagos forrásból [157]; a NIST IR 8547 tervezet.

A közlekedéshez közvetlenül kötődő lépések ennél szórványosabbak. Szaksajtó szerint Dél-Korea 2026-os posztkvantum-kísérleti programja egy intelligens közlekedési rendszer kriptográfiai átállítását is tartalmazza, és 2030-ra teljes körű hazai PQC-képességet céloz [158]. Egy 2026-os ICAO-előadás szerint a légiközlekedési tanúsítványpolitikáért (Doc 10169) felelős testület 2026 tavaszán új munkatémaként javasolta a PQC felvételét; a következő ülés 2027 májusában lesz [159]. A kártyás fizetés szabványalkotója, az EMVCo szerint gyakorlati kvantumfenyegetés legalább 2040-ig nem várható [160]. Az ERA, az UIC, az EASA és a C-ITS szabványalkotók nyilvános PQC-ütemterve nem került elő.

Az ütemterv a közlekedést is érintheti, mert a közlekedés a NIS2 irányelv hatálya alá tartozó ágazat [161]. A Bizottság 2026 januárjában javasolta a NIS2 irányelv módosítását, amely a tagállamok nemzeti kiberbiztonsági stratégiájában kötelezővé tenné a posztkvantum-átállás szakpolitikáját. A javaslat 2026 októberében az Európai Parlament illetékes bizottságában (ITRE) tárgyalási szakaszban volt, és csak elfogadása után válhat a tagállamokra nézve kötelezővé [162, 163]. A „most gyűjts, később fejts vissza” támadás miatt a hosszú ideig bizalmas adatok kitettsége már ma fennáll [156].

7.3. Kitett rendszerek a közlekedésben

A közlekedési rendszerek kriptográfiai elemei eltérő mértékben kitettek (11. táblázat). A szimmetrikus kulcsokra épülő elemek, például az ETCS 3DES-alapú kulcsai és a biztonsági modulra épülő jegykártyák, kvantumszempontból kevésbé sürgős területek. A nyilvános kulcsú elemek viszont a Shor-algoritmussal szemben sérülékenyek. Ilyen a vasúti online kulcskezelés TLS- és PKI-rétege, a vonalkódos és mobiljegyek aláírása és a jármű–infrastruktúra kommunikáció (C-ITS) tanúsítványrendszere.

A vasúti irányító-biztosító rendszerekben a biztonsági architektúra a szimmetrikus kulcsoktól a TLS és az ágazati PKI felé mozdul: egy 2026-os kockázatelemzés szerint az FRMCS-re való teljes átállással minden kriptográfiai anyagot ágazati PKI kezel [166], az európai vasúti kiberbiztonsági specifikációk 2026-os migrációs útmutatója pedig a PQC-t nem említi [167]. A kitett felület így a nyilvános kulcsú

11. táblázat. Közlekedési rendszerek kriptográfiai elemei és kvantumkitettségük.

Rendszer	Kriptográfia a forrás szerint	Kitettség	PQC-helyzet
ETCS rádiókapcsolat	3DES-alapú szimmetrikus kulcsok (KMAC)	kisebb	a 3DES elavult primitív; PQC-ütemterv nincs
ETCS online kulcskezelés és végponttól végpontig tartó biztonság, FRMCS	TLS és PKI; elliptikus görbés kulcscsere és aláírás (20. táblázat)	nagy	a hatályos specifikáció és az ágazati migrációs útmutató sem tartalmaz PQC-elemet
Vasúti vonalkódos jegy (UIC FCB)	DSA- vagy ECDSA-aláírás, az algoritmust azonosító jelöli	nagy	az azonosító formálisan bővíthető; az ML-DSA-44 aláírása 2420 bájt az ECDSA 64 bájtjával szemben
Német helyi jegy (VDV-KA)	RSA-alapú aláírás	nagy	nyilvános terv nincs
Calypso jegykártya	biztonsági modul, szimmetrikus kulcsok; a PKI-változatban RSA és ECC	kisebb, illetve nagy	a szövetség szerint „inkább előbb, mint utóbb”
Kártyás fizetés (EMV)	online: AES; offline: RSA, ECC	vegyes	fenyegetés legalább 2040-ig nem várható
C-ITS (jármű–infrastruktúra)	ECDSA-aláírás	nagy	kockázat „kritikus”; a sávszélesség a fő akadály
Légi adatkapcsolat (LDACS)	Diffie–Hellman- és KEM-alapú kulcsmegállapodás, posztkvantum üzemmóddal	posztkvantum üzemmódban kisebb	formális biztonsági bizonyítás; az ICAO-ban PQC-munkatéma javaslata a légiközlekedési PKI-hoz

Forrás: [164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 160, 173, 174, 175, 159]. A kitettség a tanulmány értékelése a nyilvános forrásokban leírt algoritmusok alapján: a nyilvános kulcsú eljárások sérülékenyek, a szimmetrikusak kevésbé.

elemek felé tolódik.

A C-ITS-ben az ETSI 2023-as tanulmánya szerint egy kriptográfiailag releváns kvantumszámítógép megjelenése után a kockázat kritikus. A fedélzeti egységek élettartama kb. 20 év lehet, és nincs jelentős előnye annak, ha az átállás az ideális algoritmusra vár; a rádiócsatorna kapacitása azonban szűk, a FALCON-aláírás kb. 4,4 kB-os többlete határeset, a Dilithiumé (kb. 11,8 kB) nem fér bele [173]. Egy kutatás üzenetenként 0,39 ms többletkésleltetéssel járó, részlegesen hibrid megoldást javasolt [174]. A légi közlekedésben az L-sávú digitális adatkapcsolat (LDACS) kulcsmegállapodásának van posztkvantum üzemmódja, amelynek biztonságát a KIT és az Airbus kutatói formálisan igazolták [175], az ICAO-ban pedig javaslat született a PQC felvételére a légiközlekedési PKI-politikába [159].

Az uniós szakpolitika a kriptográfiai eszközök leltárát várja, amely a közlekedésben az ETCS-kulcskezelésre, a jegyrendszerekre és a C-ITS-tanúsítványokra is kiterjedhet [156]. Az ágazati források a hosszú élettartamú rendszereknél a kriptográfiai rugalmasságot (*crypto-agility*), vagyis az algoritmus cserélhetőségét emelik ki, és ahol még 3DES fut, az AES-re való áttérést [160, 173].

7.4. Műholdjeltől független navigáció

A kvantumérzékelés közlekedési jelentőségét a műholdas navigáció (GNSS) zavarása adja. Az IATA adatai szerint a GPS-jelvesztési események száma 2021 és 2024 között 220%-kal nőtt, a rövid távú válasz pedig a hagyományos navigációs eszközök tartalékként való fenntartása [176]. Az EASA biztonsági tájékoztatójának 2026. október 14-i hétnapos táblájában 42 érintett repüléstájékoztató körzet

szerepelt [177]. Hosszabb távon a kvantumszenzoros navigáció kínálhat megoldást.

2024 és 2026 között több repülési kísérlet zajlott műholdjel nélkül (12. táblázat). A legtávolabb a mágneses anomáliákra épülő navigáció jutott: az amerikai védelmi innovációs egység (DIU) és a Honeywell 2026 nyarán egy Embraer 170-es utasszállító típusú gépen 4 óra 23 percig repült GPS nélkül [178]. A közölt eredmények többsége önbevallott vagy a megrendelőtől származik, lektorált, független validálás még nincs. A SESAR QUASAN projektje 2026-tól a polgári légi navigációban vizsgálja a kvantumérzékelést [109].

12. táblázat. Kvantumnavigációs és -érzékelési kísérletek a közlekedésben.

Szereplők	Időpont	Terület, módszer	Eredmény	Minőség
Infleqtion, BAE Systems, QinetiQ	2024. május	repülőgép; optikai atomóra és hideg atomos szenzorelemek	részegységek repülésben, számadat nélkül	kormányzati közlés
Boeing, AOSense	2024	repülőgép; atominterferometriás inerciális egység	4 óra GPS nélkül	önbevallott
Q-CTRL	2024–2025	repülőgép és földi jármű; mágneses anomália	legfeljebb 46-szor kisebb hiba, mint inerciális rendszerrel	előközlemény
SandboxAQ, Acubed (Airbus)	2025	repülőgép; mágneses anomália	több mint 150 repült óra; legjobb: < 74 m egyórás repülésen	önbevallott
DIU, Honeywell	2026 nyara	Embraer 170; mágneses anomália	4 óra 23 perc GPS nélkül; 89%-kal jobb a tartaléknál	a finanszírozó közlése
MoniRail és partnerek	2024. március	londoni metró; kvantumos inerciális navigáció	„részleges siker” számadat nélkül; cél: legfeljebb 10 cm	sajtó, interjú
MoniRail, GBRX	2026. március	fővonali vonat; kvantumos inerciális navigáció	eredmény nem közölt	hivatalos közlés
Birminghami Egyetem	2022	alagútkimutatás; gravitációsgradiens-mérő	2 m-es alagút, ±0,19 m pontosság	lektorált

Forrás: [179, 180, 32, 181, 178, 182, 183, 33, 184]. Az eredmények forrásminőségét a jobb oldali oszlop jelzi.

Vasúton az Egyesült Királyságban két kísérlet zajlott. 2024-ben a londoni metróban egy forgalomból kivont szerelvényen tesztelték a kvantumos inerciális navigációs szenzorokat; a cél drift nélkül legfeljebb 10 cm-es pontosság, és a vezető kutató 5–10 évet becsült a kereskedelmi termékig [182]. A résztvevők egy interjúban annyit közöltek, hogy a teszt egytengelyes, hidegatomos érzékelővel, részleges sikerrel zárult, és a következő lépés egy hattengelyes vasúti szenzor [183]. 2026. március 3-án egy fővonali vonaton futott a rendszer London belvárosa és Welwyn Garden City között. A Network Rail szerint ez a világ első ilyen fővonali kísérlete, célja a költséges pálya menti vonatérzékelő berendezések lehetséges kiváltása [33]; pontossági eredmény 2026 októberéig nem jelent meg.

7.5. Gravimetria, diagnosztika és időszinkron

A Birminghami Egyetem kutatói 2022-ben a *Nature*-ben közölték, hogy kvantumos gravitációsgradiens-mérővel terepen kimutattak egy 2 m-es alagutat, ±0,19 m vízszintes pontossággal; a szerzők szerint az eljárás csökkentheti a talajviszonyokból eredő kockázatokat az infrastruktúraépítésben [184]. A Network Rail bevonásával vasútvonalak alatti víztelenítési elemek és üregek kimutatását is értékelték, az egyetem spin-off cége, a Delta.g pedig a brit Közlekedési Minisztériumnál futó kísérleti telepítésekben vesz részt [185, 186]. Az Innovate UK és az EPSRC a közlekedési kvantumtechnológiák felhasználási eseteire legfeljebb 1,5 millió fontos keretet adott 2026 első

negyedévében futó, legfeljebb 40 000 fontos projektekre [187]. A fókuszterületek egy pályázati tanácsadó összefoglalója szerint többek között az infrastruktúra-felügyelet és a földművek vizsgálata [188]. A kvantummagnetométeres szerkezetdiagnosztika egy 2026-os áttekintés szerint még laboratóriumi és prototípus-szinten tart [189].

Az időszinkronban a „kvantum" jelző két eltérő érettségű technológiát takar. A Deutsche Bahn országos hálózatában és az FRMCS-átálláshoz optikai pumpálású céziumórára épülő időforrást használ, amely a gyártó szerint műholdjel kiesése esetén 55 napig 100 nanoszekundumon belül tartja az eltérést [190]; ez az atomóra-technológia éles üzemi példája. A hordozható optikai atomórák repülési kísérlet szintjén tartanak [179]. A kvantumszenzorok széles körű alkalmazásának akadálya a méret, a tömeg, a teljesítményfelvétel és a költség [191], a brit nemzeti kvantumstratégia mégis 2030-ra kvantumnavigációt tűz ki repülőgépeken és kvantumszenzorokat a közlekedési kritikus infrastruktúrában [192].

8. Programok és a bekapcsolódás formái

8.1. Programok és finanszírozás

A közlekedési kvantumprogramok közül az Egyesült Királyságé a legösszefüggőbb (13. táblázat): a tízéves, 2,5 milliárd fontos nemzeti stratégia öt küldetéséből három közvetlenül érinti a közlekedést [192]. Németországban a DLR kvantumszámítási kezdeményezése és a szövetségi kutatási konzorciumok, az EU szintjén a SESAR, az Eurocontrol és a kvantumtechnológiai zászlóshajó-program adják a keretet [193, 109, 151]. Az uniós kvantumpolitika irányát a 2025 júliusában közzétett Quantum Europe stratégia jelöli ki, amely 2030-ra európai vezető szerepet tűz ki [194]. A Bizottság munkaprogramja 2026 második negyedévére jelezte az uniós kvantumtörvény (*Quantum Act*) javaslatát, az Európai Parlament jogalkotási nyomkövetője azonban 2026 októberében is csak bejelentett státuszt mutatott, vagyis a javaslat késik [195]. Az Egyesült Államok közlekedési minisztériuma 2024-ben jelentést adott ki a kvantumtechnológiák közlekedési alkalmazásairól [196], Ázsiában pedig kutatási alapítványi és önkormányzati programok finanszíroznak közlekedési kísérleti projekteket.

8.2. A nemzetközi programok felépítése

A kvantumszámítás vizsgálatába bekapcsolódó közlekedési szervezetek eltérő utakon indultak, programjaik szerkezete mégis hasonló. Mindegyik egy-egy jól körülírt tervezési feladattal és valós üzemi adattal kezdett, kvantumszolgáltatóval vagy kutatóhellyel társult, és kis, néhány hónapos projektben mérte fel a lehetőségeket, jellemzően állami program vagy uniós pályázat költségén.

A Deutsche Bahn programját az informatikai leányvállalata, a DB Systel vezeti. A nyilvános források alapján a DB nem saját hardvert vásárolt, hanem szövetségi kutatási konzorciumokban és több szolgáltatóval, egymást követő kis kísérletekben épített képességet, a valós adatot pedig az üzemi leányvállalatok adják [143, 198]. A brit modellben a közszféra a feladat megrendelőjeként lép fel: az SBRI-verseny első fázisa rövid megvalósíthatósági tanulmányokat, a második prototípust és terepi tesztet támogatott [197]. A német DLR QCMobility programjában az üzemeltetők ajánlatkérés útján csatlakoznak, saját tervezési folyamatot, problémát és szükség esetén valós adatot hoznak, a megoldásokat pedig szimulációban és a DLR kvantumhardverén tesztelik [193, 200].

Kisebb költségű bekapcsolódási forma az ipari doktori kutatás, amelyet az SNCF alkalmazott [70], és a nyílt verseny. Az Airbus 2019-ben indított kvantumszámítási versenyére több mint 800 érdeklődő jelentkezett, és 36 pályamű érkezett [201]; a győztes rakodásoptimalizálási megoldást az Airbus

13. táblázat. Közlekedési elemet tartalmazó kvantumprogramok és finanszírozási formák.

Program	Időszak	Keret	Közlekedési elem
Nemzeti kvantumstratégia (Egyesült Királyság)	2024–2034	2,5 Mrd GBP	légi kvantumnavigáció 2030-ra; szenzorok a közlekedési infrastruktúrában
SBRI Quantum Catalyst Fund	2023–2025	legfeljebb 15 M GBP (2. fázis: legfeljebb 13 M GBP)	Network Rail: vágányutak kijelölése és menetrendtervezés
Közlekedési kvantumtechnológiák, 1. fázis (Innovate UK, EPSRC)	2026. I. negyedév	legfeljebb 1,5 M GBP	infrastruktúra-felügyelet, földművek, járműplatformok
DLR kvantumszámítási kezdeményezés	4 év	740 M EUR	QCMobility: légi, vasúti, közúti, vízi alkalmazások
EniQmA (Németország)	2022–2025	9,3 M EUR	DB Systel partnerként
SQuIRRL (Németország)	2024-től 3 év	több mint 5 M EUR	vasúti, közúti és légi QKD
SESAR feltáró kutatás	2026–2029	kb. 4 M EUR (4 projekt)	légiforgalmi szolgáltatás: számítás, PQC, navigáció
Eurocontrol megvalósíthatósági próba	2026	nem közölt	1–2 légiforgalmi kihívás, klasszikus összevetéssel
Kvantumtechnológiai zászlóshajó (EU)	2018-tól	1 Mrd EUR	általános keret
Renfe TrenLab	2025–2026	50 000 EUR kísérleti projektenként	flotta- és járattervezés
USDOT egyetemi közlekedési központ	2025–2026	498 924 USD	posztkvantum jármű–infrastruktúra kommunikáció
Koreai Nemzeti Kutatási Alapítvány	2025	nem közölt	busani metró járatsűrűsége
Kawasaki-modell	2025–2026 (2026–2027: közlekedési projekt nélkül)	2026: legfeljebb 3,25 M JPY projektenként	igényvezérelt közlekedés (csak a 2025-ös fordulóban)

Forrás: [192, 197, 187, 193, 198, 148, 151, 109, 52, 47, 196, 199, 63, 58, 85, 86]. Eredeti pénznemben.

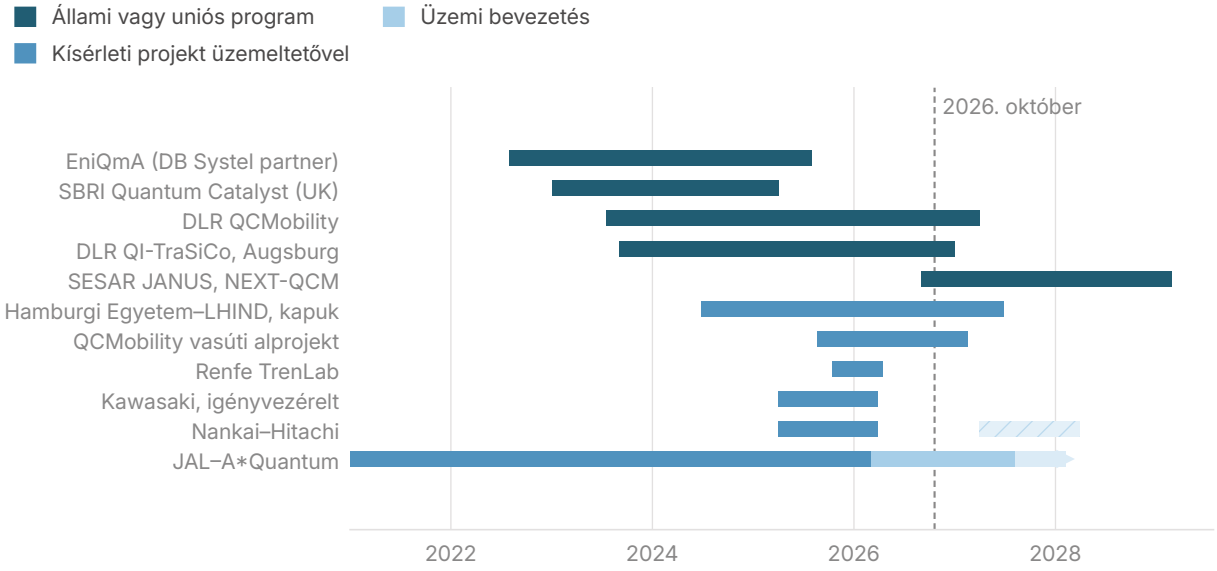
szakértői a csapattal tovább tesztelték [202], 2022-ben pedig az Airbus az IonQ-val kötött 12 hónapos együttműködést a rakodásoptimalizálásra [203, 204]. A japán esetekben (Nankai–Hitachi, JAL–A∗Quantum, Nishi-Tokyo Bus–Quanmatic) a szolgáltató és az üzemeltető közvetlen, termékfejlesztési jellegű együttműködése jellemző; ezek közül a Nankai–Hitachi együttműködés kvantuminspirált [5, 6, 61]. A kísérleti projektek költsége a nemzetközi példákban mérsékelt (13. táblázat), a programok felépítését a 14. táblázat veti össze.

Az időbeli kép (10. ábra) szerint 2023 után a programok és az üzemeltetői kísérleti projektek sűrűsödnek, és több közülük 2026 és 2029 között zárul vagy fut tovább, így a következő években számos új eredmény várható. A tanácsadói ajánlások ugyanezt az irányt követik: a BCG három-öt nagy értékű felhasználási eset kijelölését, a feladatot és a módszert összekötő csapatot, kvantuminspirált módszerek kipróbálását és stratégiai partnerségeket javasol [205].

14. táblázat. A közlekedési kvantumprogramok felépítése.

Program	Szervezeti keret	Finanszírozás	Első lépés	Partnerek	Kezdet
Deutsche Bahn	DB Systel (informatikai leányvállalat)	szövetségi kutatási konzorciumok (EniQmA)	kísérletek valós adaton	Fraunhofer, Cambridge Quantum, IQM, DLR	2019
Network Rail, DfT	kormányzati megrendelő	SBRI-verseny	háromhónapos megvalósíthatósági fázis	Q-CTRL (IBM-hardver)	2023
DLR QCMobility	DLR, öt intézet	DLR kvantumszámítási kezdeményezés	felhasználási esetek gyűjtése, ajánlatkérés	DB InfraGO, ÖBB-Infra, Eurowings, Lufthansa	2023
SNCF	kutatási igazgatóság	ipari doktori ösztöndíj	QUBO-modell	Montpellier-i Egyetem	2021
Airbus	Airbus	saját verseny, majd szolgáltatói szerződés	nyílt verseny	Machine Learning Reply, IonQ	2019
Renfe	TrenLab gyorsító	gyorsítóprogram	hathónapos kísérleti projekt	QCentroid	2025
Nankai	üzemeltető	szolgáltatói fejlesztés	éles adatos próba	Hitachi	2025

Forrás: [143, 198, 197, 193, 200, 70, 202, 5, 47]. A programok közölt keretét a 13. táblázat tartalmazza.



10. ábra. A közösségi közlekedési kvantumszámítási programok és üzemeltetői kísérleti projektek futamideje, 2021–2029. A programok és a kísérleti projektek 2023 után sűrűsödnek, és több közülük 2026 után zárul vagy fut tovább; az üzemi bevezetés két esetben kezdődött el vagy tervezett.

Forrás: [198, 197, 64, 56, 110, 50, 45, 47, 58, 5, 6, 96]. A sraffozott sáv tervezett szakasz, a nyíl folytatódó üzem. A QCMobility zárónapja a program oldala szerint 2027. március 31.

II. rész. Magyar kontextus

A nemzetközi kísérletek feladatai itthon is megvannak. A BKV-nál, a MÁV-csoportnál és a vidéki városokban ugyanúgy kell járműfordulót, személyzeti beosztást, menetrendet és csatlakozásokat tervezni, a pályaudvarokon vágányt kijelölni, a budapesti repülőtéren állóhelyet és beszállókaput kiosztani, mint a Deutsche Bahnnál, a Nankainál vagy a Lufthansánál. A II. rész ezért azt vizsgálja, ki felel ezekért a feladatokért, mekkorák, milyen adat és tervezőrendszer áll mögöttük, és hol van meg itthon a kvantumos modellezés tudása.

9. A magyar közösségi közlekedés és digitális alapjai

9.1. Szereplők és irányítás 2026-ban

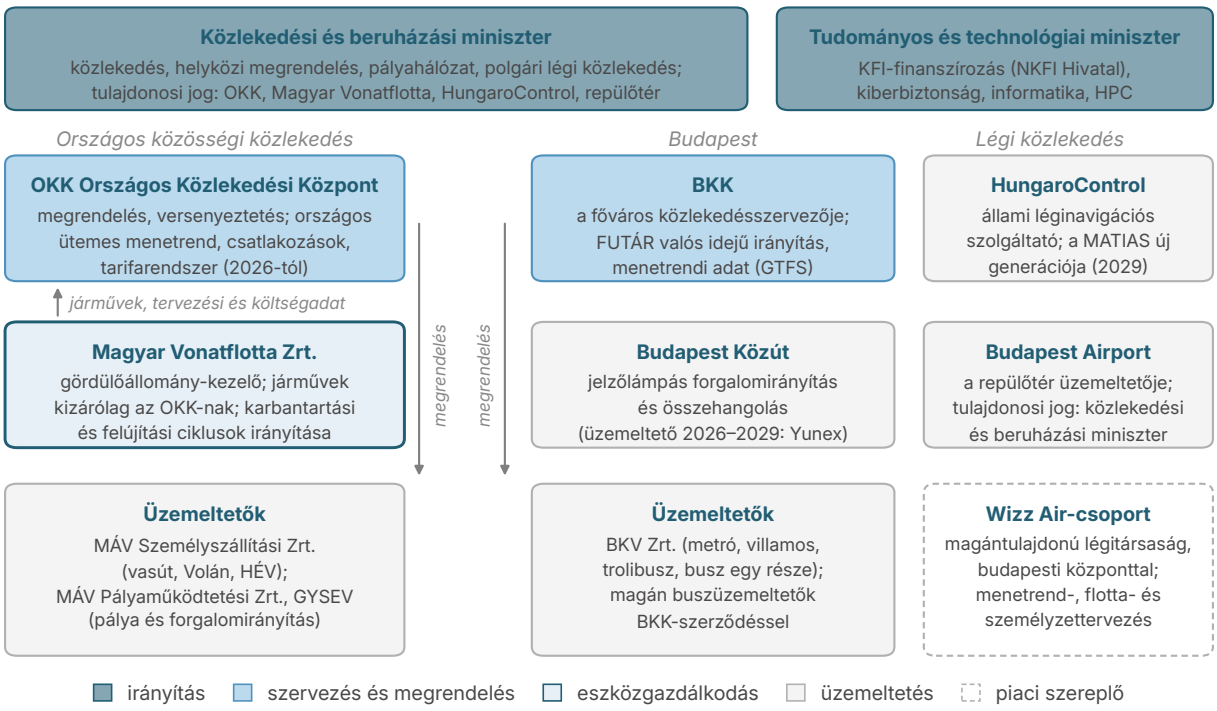
A 2026-ban hivatalba lépett kormány hatásköri rendelete szerint a közlekedésért, a helyközi közösségi közlekedés megrendeléséért, a vasúti pályahálózat fenntartásáért és a polgári légi közlekedésért a közlekedési és beruházási miniszter felel. Ő irányítja a léginavigációs szolgáltatót, és gyakorolja a tulajdonosi jogokat a budapesti repülőteret üzemeltető társaság felett. A tudománypolitika, a kutatás-fejlesztési és innovációs finanszírozás, az informatika, a kiberbiztonság és a nagy teljesítményű számítási infrastruktúra a tudományos és technológiai miniszterhez tartozik [206]. A rendelet szövegében a kvantumtechnológia nem szerepel, így a közlekedési kvantumalkalmazás a két tárca határterületére esik (11. ábra).

A Kormány 2026 júniusában, a Helyreállítási és Ellenállóképességi Terv mérföldköveinek teljesítésére hivatkozva elrendelte egy országos közlekedésszervező és egy gördülőállomány-kezelő társaság létrehozását [207]. A jogi kereteket a 2026. évi XXXVII. törvény teremtette meg, a két társaságot, az OKK Országos Közlekedési Központ Zrt.-t és a Magyar Vonatflotta Zrt.-t miniszteri rendelet jelölte ki [11, 208, 209]. Az OKK feladata a közszolgáltatások megrendelése, valamint egységes, országos ütemes menetrend, csatlakozások és tarifarendszer kialakítása [11]. Az 5/2026. (VIII. 13.) KBM rendelet a viszonylathálózat tervezését az OKK-ra bízza, a vasúti pályakapacitás elosztását viszont nem [208]; ez utóbbi a DLR QCMobility és a Q-CTRL menetrendi ágának hazai párja (9.3. pont). A Magyar Vonatflotta a járműveket kizárólag az OKK rendelkezésére bocsátja, irányítja a karbantartási és felújítási ciklusokat, és a vasúti törvény szerint tervezési és költségadatot ad át az OKK-nak [12].

Az üzemeltetők közül a nemzetközi kísérletek szereplőinek közvetlen hazai párja a vasúti, a Volán- és a HÉV-szolgáltatást 2025 óta egy társaságban nyújtó MÁV Személyszállítási Zrt., a pályát működtető MÁV Pályaműködtetési Zrt. és a nyugat-dunántúli vonalakon 2025 júliusától a GYSEV, utóbbiak az ÖBB-Infrához és a DB InfraGO-hoz hasonló szerepben [210, 211]. Budapesten a BKK a közlekedésszervező, a BKV pedig a Nankaihoz és a BVG-hez hasonlóan maga üzemelteti a metrót, a villamost, a trolibuszt és a buszhálózat egy részét [212, 213]. A légi közlekedésben a budapesti központú Wizz Air-csoport piaci szereplőként maga tervezi menetrendjét, flottáját és személyzetét, a Lufthansához és a TCS-kísérlet ausztrál légitársaságához hasonlóan [214].

9.2. Méretek: a hazai feladatok léptéke

A hazai tervezési feladatok méretét a 15. táblázat veti össze a legközelebbi nemzetközi kísérletek méretével. A legnagyobb közúti tervezési feladatot a Volán-ág hordozza, a vasúti hálózaton pedig évente közel másfél millió vonat közlekedik [217, 218].



11. ábra. A magyar közösségi közlekedés fő szereplői és felelősségi viszonyai 2026 októberében. A szervezés, az eszközgazdálkodás és az üzemeltetés elkülönül; a közlekedési feladatok a közlekedési, a kutatás-fejlesztés és a kiberbiztonság a tudományos és technológiai miniszterhez tartoznak.

Forrás: saját szerkesztés [206, 11, 208, 12, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 214] alapján. Az OKK feladatai az 5/2026. (VIII. 13.) KBM rendelet szerint.

A nemzetközi kvantumos kísérletek és a hazai feladatok léptéke között nagyságrendi különbség van. A budapesti jelzőlámpás hálózat 1250 csomópontja mintegy huszonhatszorosa az aomori vizsgálat 48 csomópontjának (15. táblázat). A Volán autóbuszflottája mintegy 40–650-szer (másfél–közel három nagyságrenddel) nagyobb a nemzetközi kísérletek járműszámánál, vezetői létszáma pedig egy-két nagyságrenddel haladja meg a nemzetközi beosztási kísérletek példányait. A BKV közölt példányai viszont járatszámban a nemzetközi kísérletek nagyságrendjébe esnek (12. ábra). A vidéki városi hálózatok ennél jóval kisebbek. Pécsett a Tüke Busz 144 autóbusza munkanapon 1802 járatot teljesít [220], Debrecenben pedig a 2022–2024-es flottacsere és egy 2023-as előadás adatai mintegy 120–135 autóbuszra utalnak [221, 222]. A nemzetközi kísérleti projektek kilenc buszt (Lisszabon), illetve 150 és több mint 500 járművezetőt (BVG-s verseny, Pattison) vizsgáltak (4.1., 4.3. és 6.1. pont); egy vidéki városi hálózat egésze ezekhez közeli léptékű kísérleti terep lehet. A nemzetközi gyakorlat is részpéldányokon dolgozott, egy-egy vonalszakaszon, elővárosi hálózatrészen vagy egynapos járműfordulón [4, 16, 36]. Egy hazai kísérlethez a BKV közölt vonalcsoportpéldányai (87–811 járat), a rugalmas útvonalú 274-es járat és egy villamos- vagy trolibusz-telephely fordulója áll a legközelebb [223, 224].

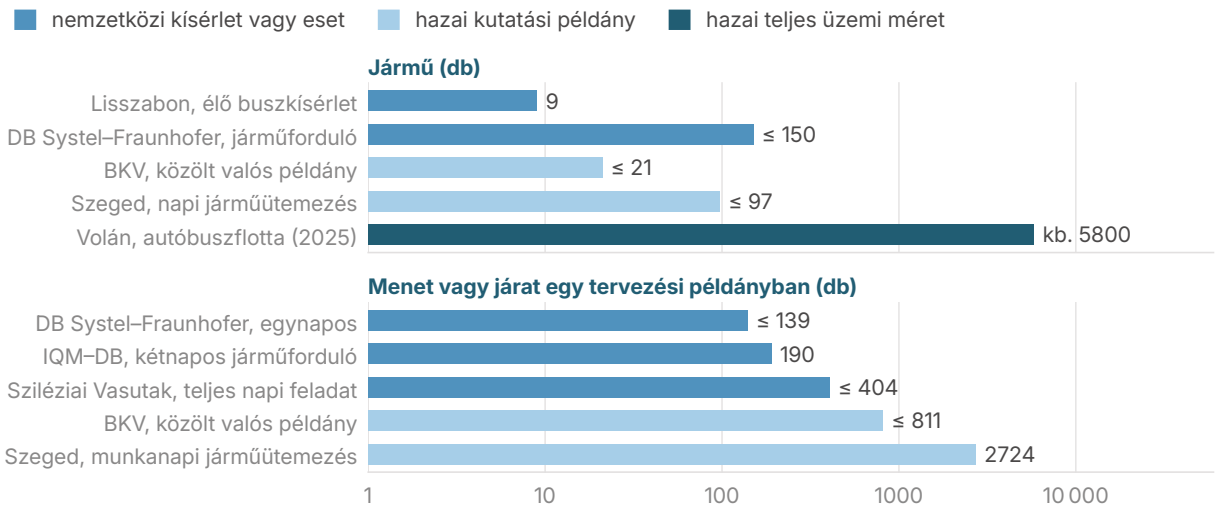
9.3. Tervezési és üzemeltetési rendszerek, adatok

A nemzetközi kvantumkísérletek tipikus feladatai itthon már szabványszoftveres vagy hazai fejlesztésű, klasszikus optimalizálásra épülő rendszerekben futnak (16. táblázat). Az IVU 2017-es közleménye szerint a MÁV-START (ma MÁV Személyszállítási Zrt.) 2008-tól az IVU.rail rendszerrel tervezte járműveit és mozdonyvezetőit, 2016-tól a jegyvizsgálók és az állomási munkavállalók beosztását is. A

15. táblázat. A hazai tervezési feladatok mérete és a legközelebbi nemzetközi kísérletek mérete.

Szereplő	Mutató	Hazai érték (időszak)	Nemzetközi kísérleti példány
MÁV pályavasút	közlekedtetett vonat	1 492 835 (2024)	újraütemezés: 27 vonat (GZM); vágányutak: 26 vonat 18 perc alatt (London Bridge)
Volán (MÁV Személyszállítási Zrt.)	autóbusz	kb. 5800 (2025)	9 busz élő üzemben (Lisszabon)
	autóbusz-vezető	kb. 10 800 (2025)	150 buszvezető (BVG-s verseny); több mint 500 járművezető (Pattison)
	járat	12,3 millió (2024)	járműforduló: 34–139 menet (DB Systel), 190 menet (IQM–DB)
Budapest Közút	jelzőlámpás csomópont	1250 (2025)	48 csomópont (Aomori); 5 csomópont (Hefei)
Budapest Airport	légijármű-mozgás	138 000 (2025)	beszállókapu-kiosztás: 5 járat (Delta–IBM), 9 járat (IonQ–DESY)
Wizz Air-csoport	repülőgép	262 (2025/26-os pénzügyi év)	több mint 100 repülőgép (Eurowings, QCMobility); flottakiosztás: 46–3680 járat (TCS)
Tüke Busz (Pécs)	autóbusz	144: 60 csuklós, 84 szóló, ebből 18 elektromos (2026)	9 busz (Lisszabon)
	járat munkanapon	1802 (2026)	mint a Volán járatsorában
DKV (Debrecen)	autóbusz	mintegy 120–135 (2024)	mint a pécsi autóbuszsorban

Forrás: [218, 217, 215, 219, 214, 220, 221, 222]; a nemzetközi méretek a 3–6. fejezetben hivatkozott források szerint. A hazai értékek éves vagy teljes üzemi adatok, a nemzetközi méretek egy-egy kísérleti példányra vonatkoznak. A pécsi adatok a szolgáltató honlapjáról származnak; a debreceni autóbuszszám a 2022–2024-es flottacsere és egy 2023-as előadás adataiból becsült nagyságrend.



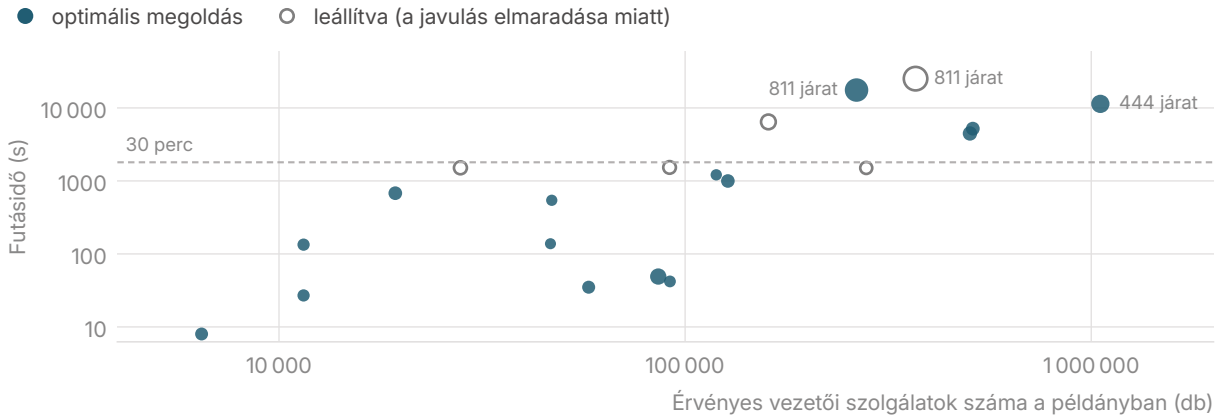
12. ábra. A nemzetközi kísérletek és a hazai feladatok mérete járműszámban és egy tervezési példány menet- vagy járatszámában. A Volán teljes autóbuszflottája mintegy 40–650-szer (másfél–közel három nagyságrenddel) nagyobb a nemzetközi kísérletek járműszámánál, a BKV közölt példányai viszont járatszámban a nemzetközi kísérletek nagyságrendjébe esnek.

Forrás: [42, 36, 223, 225, 217, 25, 40]. Logaritmikus skála, panelenként külön egységgel. A „≤" a legnagyobb közölt példányt jelöli. A Szilériai Vasutak teljes napi feladatát klasszikus megoldó kezelte, a kvantumos ág csak részpéldányt.

szerződés 2019 szeptemberéig szólt [226], és a MÁV az IVU 2022-es közleménye szerint is ügyfél volt [227]; a rendszer mai használati köréről nincs nyilvános adat. Ez a feladatkör a Nankai jármű- és személyzetütemezésének közvetlen hazai megfelelője. Az IVU saját közlése szerint optimalizálási algoritmusai a berlini Zuse Intézettel közös fejlesztésből erednek (2.3. pont); hogy a MÁV-nál használt modulok automatikus optimalizálást végeznek-e, a közlésekből nem állapítható meg. Budapesten a BKK IVU-alapú FUTÁR-rendszere kb. 2300 járművet követ és irányít valós időben; ez a lisszaboni élő buszirányítási kísérlet (4.1. pont) hazai felülete [228].

A vasúti pályakapacitás-elosztás, vagyis a menetvonalak tervezése a DLR QCMobility vasúti alprojektjének és a Q-CTRL menetrendtervezési ágának (3.1. és 3.2. pont) hazai megfelelője. A Vasúti Pályakapacitás-elosztó (VPE) egy keltezetlen szakmai előadása szerint 2012-től dinamikus foglalásra és automatikus menetrend-szerkesztő eszközre épülő eljárást alkalmaztak. Ezzel az ad hoc menetvonal-igényekre adott ajánlatok aránya 50% alól 90% fölé, az elfogadottaké 20% alól 75% fölé nőtt, a kézi menetrend-szerkesztés pedig a felügyeletre szűkült [229]. Egy 2020-as sajtócikk szerint a KAPELLA 2 rendszert 2019-ben vezették be [230]; továbbfejlesztésére és üzemeltetésére 2026 májusában nettó 440 millió forintos keretű közbeszerzés indult [231]. Ez az egyetlen talált hazai közlekedési tervezési automatizálás, amelyről előtte–utána adat ismert, így egy kvantumos menetvonaltervezési kísérlet viszonyítási pontja lehet. A MÁV-csoport 10 milliárd forintos, 2029-ig tartó IKOP Plusz projektje egységes, valós üzemi adatokra épülő menetrendtervezést, utasszámlálást és integrált közúti–vasúti forgalomirányítást épít [232].

Budapesten a BKV jármű- és járművezető-ütemezését egy döntéstámogató rendszer segíti, amelyet a Szegedi Tudományegyetem és az Óbudai Egyetem kutatói fejlesztettek a BKV számára. A rendszer egy vonal vagy vonalcsoport adatcsomagjából számol; a 2020-as és a 2023-as közlemények szerint a vállalati információs rendszerbe illeszkedik, amely a kimenetét a napi beosztásban is felhasználja [223, 233]. A módszer generálás–kiválasztás elvű: először nagyszámú érvényes vezetői szolgálatot állít elő, majd ezek közül egy halmazfedési feladat választja ki a beosztást. A 20 közölt valós példány 87–811 járatot és 3–21 járművet tartalmazott, háromnegyedük optimálisan megoldódott (13. ábra), és a szerzők szerint a módszer a kézi beosztást nagyrészt automatizálhatja [223]. A rendszer üzemi használatának kezdete és köre, a kézi tervezéshez mért megtakarítás, valamint a Volán-ág tervezőszoftvere a nyilvános forrásokból nem ismert.



13. ábra. A BKV jármű- és járművezető-ütemező döntéstámogató rendszerének 20 közölt valós példánya: az érvényes vezetői szolgálatok száma és a futásidő. A futásidő a generált szolgálatok számával nő; a példányok háromnegyede optimálisan megoldódott.

Forrás: [223], 1–3. táblázat. Logaritmikus skálák; a futásidő a gráf- és a szolgálatgenerálást is tartalmazza. A pont mérete a járatszámmal arányos (87–811 járat). „Leállítva”: a megoldót a javulás tartós elmaradása miatt megállították.

16. táblázat. Hazai tervezési és üzemeltetési rendszerek a nemzetközi kísérletek feladattípusai szerint.

Feladat	Rendszer, módszer	Gazda	Állapot
Vasúti jármű- és személyzettervezés	IVU.rail (jármű-, szolgálat- és személyzetmodulok)	MÁV-START (ma MÁV Személyszállítási Zrt.)	2008-tól (MÁV-START); szerződés 2019. 09-ig igazolt, ügyfélkapcsolat 2022-ig; mai kör: n. i.
Pályakapacitás-elosztás	KAPELLA 2 és KUMO automatikus menetrend-szerkesztés	pályakapacitás-elosztó szervezet	üzemel; automatikus szerkesztés 2012-től (előadás), KAPELLA 2 2019-től (sajtó); 2026: továbbfejlesztési és üzemeltetési eljárás, nettó 440 M Ft keret; fejlesztő: n. i.
Egységes menetrendtervezés, utasszámlálás	IKOP Plusz-rendszerek	MÁV Zrt. vezette konzorcium	2023–2029; termék: n. i.
Budapesti autóbusz jármű- és járművezető-ütemezés	hazai fejlesztésű döntéstámogató rendszer (generálás–kiválasztás, egészértékű programozás)	BKV Zrt.	a vállalati rendszerbe integrálva, a napi beosztásban alkalmazva; bevezetés éve, köre: n. i.
Nyílt menetrendi adat	GTFS	BKK; MÁV; Szegeden az SZKT, Pécsett a BIOKOM	nyilvános; a MÁV-nál igénylés alapján, díjmentesen
Légitársasági menetrend és személyzet	Sabre-menetrendtervezés; AIMS személyzeti rendszer	Wizz Air	2019-es választás; 2026-os álláshirdetés
Repülőtéri állóhely- és beszállókapu-kiosztás	INFORM GroundStar	Budapest Airport	szállítói referencialista, keltezetlen közlemény; mai kör: n. i.
Légiforgalmi irányítás	MATIAS, következő generációs változat	HungaroControl	a vezérigazgatói interjú szerint 2029-től

Forrás: [226, 227, 230, 229, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 231, 216]. Rövidítés: n. i. – a nyilvános forrásokból nem ismert.

A BKK statikus GTFS-adatbázisa a teljes budapesti hálózatot lefedi, a MÁV pedig a menetrendi adatbázisát GTFS-formátumban, igénylés alapján díjmentesen adja ki [234, 235]. Szegeden és Pécsett a helyi szolgáltatók hivatalos GTFS-adata is nyilvános [236, 237]. Ezekből felépíthető egy olyan ütemes hálózati modell, amilyet a Q-CTRL menetrendtervezési ága kezelt (3.2. pont). A keresletalapú tervezéshez szükséges mért utasforgalmi adat ugyanakkor hiányos. A calgaryi tervezett forrás–cél becslés (4.5. pont) automatikus viteldíj- és utasszámlálási adatokra épülne, itthon viszont a vasúti utasszámot a bérletekből és a jegyekből becsülik; automatikus utasszámláló sajtóforrás szerint 123 FLIRT és 40 KISS motorvonaton van, ami az ülőhely-kapacitás nagyjából negyede [94, 242]. Az IKOP Plusz utasszámlálási eleme éppen ezt a hiányt célozza [232]. A jármű-, forduló- és személyzeti adatok a tervezőrendszerekben vannak, és nem nyilvánosak.

9.4. Vasúti digitális infrastruktúra és kiberbiztonság

A vasúti vonatbefolyásolás és rádiókommunikáció digitalizáltsága részleges. A 2024-es ERTMS nemzeti végrehajtási terv szerint a magyarországi TEN-T hálózaton 917,8 km-en telepítették az ETCS-t, zömében a törzshálózaton és háromnegyed részben második (L2) szinten, és az ETCS kulcskezelő központja 2023 harmadik negyedéve óta elérhető. A GSM-R a TEN-T hálózat 1850,7 km-én épült ki, az 5G-alapú FRMCS kiépítése viszont még nem kezdődött meg: Magyarország 2031-től, a finanszírozás és a mentességek függvényében tervezi telepíteni, a 2020-tól üzembe helyezett GSM-R

szakaszokat pedig 2045-től, élettartamuk végén cserélné [243]. A posztkvantum-átállás kérdése itthon így jórészt a még ki nem épült rendszerekben vetődik fel.

A 2024. évi LXIX. törvény a NIS2 irányelvet ülteti át, és a légi, a vasúti és a közúti közlekedés mellett a tömegközlekedést is kiemelten kockázatos ágazatként kezeli; a felügyeleti hatóság a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH). A meglévő szervezetek első auditjának határideje 2026. június 30. volt, új rendszernél pedig a biztonsági osztályba sorolást a beszerzés előtt a hatóságnak jóvá kell hagynia [244]. A törvény kriptográfiai algoritmust nem ír elő, és hazai posztkvantum-kriptográfiai előírás vagy ajánlás a vizsgált forrásokban nem szerepel. A rendszerek kötelező nyilvántartása, biztonsági osztályba sorolása és auditálása ugyanakkor a kriptográfiai leltár természetes kapcsolódási pontja lehet. A vasúti irányító-biztosító interfészek kriptográfiáját uniós szabály rögzíti (11.6. pont).

10. Hazai kvantumképességek és kapcsolódási pontok

10.1. Kutatási programok és infrastruktúra

A hazai kvantumkutatás súlypontja a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium (KNL), amelyet a Wigner Fizikai Kutatóközpont vezet a BME és az ELTE részvételével (17. táblázat). Az NKFI Hivatal ismertetője szerint a laboratórium 3,275 milliárd forint támogatást kapott, támogatási időszaka 2026. szeptember 30-án zárult. Kutatási irányai között a kvantumos algoritmusok gyakorlati alkalmazását, partneri formái között közös szimulációs kísérleti projektet is említ [14].

A kvantumkommunikációban a Kormányzati Informatikai Fejlesztési Ügynökség (KIFÜ) vezette QCI-Hungary projekt Budapest–Győr–Nagykanizsa–Szeged gerincet tervez, 2025-ben pedig bemutatták az első többcsomópontos hazai kvantumkulcs-szétosztási teszthálózatot [245, 246]. A számítási oldalon 2025 októberében egyetemek, a HUN-REN és ipari szereplők megalapították a Kvantum- és Szuperszámítástechnikai Platformot, amely távlatilag hazai kvantumszámítógépet is célul tűz ki [247], a HUN-REN SZTAKI felhőalapú referenciaarchitektúrája pedig külföldi kvantumprocesszorokhoz is hozzáférést ad [248]. EuroHPC-kvantumszámítógép Magyarországon nincs, az ország azonban a EuroHPC közös vállalkozás tagjaként pályázhat a nyílt hozzáférési felhívásokon [249, 250].

10.2. Kutatói kapcsolatok és a klasszikus operációkutatás

Hazai közlekedési szolgáltatónál kvantumos vagy kvantuminspirált kezdeményezés nyilvános forrásban nem szerepel, a kutatói kapcsolódás viszont két szálon is megvan (17. táblázat). Az első a Wigner FK kutatójának, Koniorczyk Mátyásnak a részvétele a lengyel vasúti kvantumkísérletekben (3.1. pont). A felső-sziléziai hálózaton végzett hibrid újraütemezési munkát a köszönetnyilvánítás szerint a KNL is támogatta [16]. Magyar üzemeltetői adat egyik munkában sem szerepelt. A második szál a Delta–IBM beszállókapu-kiosztási kísérlet, amelynek qubittakarékos kódolása az ELTE, a Wigner FK és az Ericsson Research budapesti kutatóinak gráfszínezési munkájára épül (5.2. pont); a csoport egy 2024-es közös közleményének finanszírozói között a Kooperatív Doktori Program (KDP-2021, KDP-2023) is szerepel [106, 107].

A szegedi kutatók a Tisza Volán valós adatain vizsgálták a busz jármű- és járművezető-ütemezést; a társaság eredeti beosztásának teljes munkaideje 10–14%-kal haladta meg az elméleti alsó korlátot, a néhány perc alatt futó algoritmusé 8–9,5%-kal. Üzemi bevezetést a dokumentumok nem állítanak [225]. Ez a mért különbség hazai viszonyítási alapot ad a brit közlekedési minisztérium által kiadott jelentés 15%-os feltevéséhez (6.6. pont). Ugyanez a kör fejlesztette a BKV döntéstámoga-

17. táblázat. Hazai kvantumkutatási programok és infrastruktúra, lehetséges közlekedési kapcsolódásukkal.

Program, infrastruktúra	Gazda, partnerek	Tartalom	Lehetséges közlekedési kapcsolódás
Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium (2022–2026)	Wigner FK; BME, ELTE	kommunikáció, hardver, algoritmusok, szimuláció, posztkvantum-kriptográfia	a felső-sziléziai vasúti kísérlet támogatója; algoritmusok
HunQuTech	Wigner FK, BME, ELTE, EK MFA; ipar: Ericsson, BHE, Femtonics, Nokia Bell Labs	kvantumkulcs-szétosztás, egyfoton-források, kvantummemória, érzékelés, algoritmusok	algoritmusok és érzékelés
QCIHungary (EuroQCI)	KIFÜ; BME, ELTE, Wigner FK	nemzeti kvantumkommunikációs gerinc és földi állomás	pálya menti optikai hálózat (11.6. pont)
QKD-teszthálózat (2025)	BME, Magyar Telekom, AdvaNet, Netvisor	három csomópontos kvantumkulcs-szétosztás, kulcskezelés	terepi kvantumkulcs-szétosztási tapasztalat
Kvantum- és Szuperszámítástechnikai Platform (2025)	HUN-REN, egyetemek, HPE, IBM	ökoszisztéma-összehangolás, hazai kvantumszámítógép (cél)	hazai gépidő (távlati cél)
HUN-REN SZTAKI kvantumarchitektúra	HUN-REN SZTAKI	szimulátorok és külföldi kvantumprocesszorok felhőben	gépidő egy kísérlethez

Forrás: [14, 16, 251, 245, 246, 247, 248]. A kapcsolódás oszlop a tanulmány értékelése; hazai közlekedési kvantumprojekt egyiknél sem ismert. Rövidítések: EK MFA – HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet; BHE – BHE Bonn Hungary Elektronikai Kft.

tó rendszerét (9.3. pont). A BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszékének kutatói egy 2022-es szakcikkben vegyes egészértékű programozásra épülő, valós idejű vasúti konfliktusfeloldó modellt mutattak be, háromállomásos példahálózaton [252]; ez a lengyelországi egyvágányú és felső-sziléziai kvantumos újraütemezési kísérletek klasszikus párja. Koniorczyk Mátyás a klasszikus vasúti operációkutatásban is dolgozott. A MÁV-START jegyvizsgálóinak beosztását 2015-ben a Railm@n személyzetbeosztó rendszer kezelte; ennek szolgálatgenerálási fázisáról szerzőtársaival, köztük a MÁV-START munkatársával esettanulmányt közölt (9.3. pont) [253].

10.3. Ökoszisztéma és hiányzó láncszemek

Az izraeli Quantum Machines 2026-ban magyar céget vásárolt és budapesti fejlesztőközpontot nyitott [254], az IVSZ Kvantum Munkacsoportja pedig 2026 júniusában munkatervet tett közzé, amely a kvantumtechnológiát tervezhető üzleti eszközzé tenné a hazai cégek számára [255]. Önálló hazai kvantumstratégia nem ismert, az uniós kvantumtörvény javaslata késik (8.1. pont), a Kvantum- és Szuperszámítástechnikai Platform tevékenységéről pedig 2025. októberi létrehozása, illetve a 2026. májusi kormányalakítás óta nem jelent meg nyilvános közlés [247]. A módszertani, QUBO-modellezési és összevetési tapasztalat tehát a hazai kutatóknál, a klasszikus tervezőrendszerek és a valós adatok a szolgáltatóknál vannak meg. Hiányzik viszont a kettőt összekötő, hazai adatokra épülő közös projekt és annak kezdeményezője, amely a közlekedési és a tudományos-technológiai tárca együttműködésére épülhet (9.1. pont).

III. rész. Hazai hasznosítás

A III. rész a feladattípusokat két szempont szerint rendezi: milyen érett a nemzetközi minta, és van-e itthon felelős szervezete, adata és tervezőrendszere. Ezek adják egy hazai kísérlet terepét és a klasszikus viszonyítási alapot. A feladattípusok áttekintése után a rész az időtávokat, a megvalósítás útjait és a finanszírozást tárgyalja.

11. A nemzetközi minták hazai hasznosíthatósága

A tizenkét optimalizálási feladattípus hazai megfelelőjét a 18. táblázat, a várható hasznot, a költséget, a kockázatot és az időtávot a 19. táblázat foglalja össze, a 14. ábra pedig a nemzetközi érettség és a hazai adottságok szerint rendezi őket. A jobb felső sarokban egyedül a jármű- és személyzetütemezés áll: nemzetközi mintája valós környezetben igazolt, és itthon felelős szervezete, tervezőrendszere és adata is van. Hat további feladatnak szintén van igazolt nemzetközi mintája, a hazai adat vagy rendszer viszont részleges, így ezeknél az adatok összegyűjtése lehet az első lépés. Közülük négy minta gyengén igazolt. A jelzőlámpás eset önbevallásos beszámolóból, a karbantartási egy nem közölt módszerrel működő eszközből, a légitársasági egy dokumentált üzemeltetői részvétel nélküli kísérletből ismert, az ütemes menetrendi minta pedig gyártói közlés. A posztkvantum-átállás és az érzékelés nem optimalizálási feladat, ezeket a 11.6. pont tárgyalja.

18. táblázat. A nemzetközi minták hazai megfelelője feladattípusonként.

Feladattípus és nemzetközi minta	Hazai szereplő	Méret és rendszer	Hiányzó adat	Lehetséges első lépés
Jármű- és személyzetütemezés. Nankai–Hitachi (kvantuminspirált, üzem 2027-től tervezett); DB, IQM, Sziléziai Vasutak	BKV; MÁV Személyszállítási Zrt. (vasút és Volán); vidéki városi szolgáltatók	BKV-rendszer, 87–811 járatos példányok; IVU.rail; Volán: kb. 5800 busz; Pécs: 144, Debrecen: mintegy 120–135 busz	a BKV-rendszer bevezetési köre; a Volán tervezőszoftvere	összevető kísérlet a BKV-rendszer egy részfeladatán (15. ábra)
Karbantartás-tervezés. JAL (üzem 2026-tól; 5.1. pont); karbantartási feltétel a DB-kísérletekben	Magyar Vonatflotta Zrt.; MÁV Személyszállítási Zrt. (járműjavítás)	flottamegújítás folyamatban	munkatétel-szintű adat	karbantartási ciklusok beépítése a fordulótervezési modellbe
Vasúti újraütemezés. Lengyel vasutak (Wigner FK részvételével); DLR QCMobility	MÁV Pályaműködtetési Zrt., GYSEV	kb. 1,49 millió vonat évente	forgalmi napló; a forgalomirányító szoftverek leírása	a lengyel módszertan kipróbálása hazai történeti adatokon
Pályaudvari vágánykijelölés. London Bridge (Network Rail, Q-CTRL)	MÁV Pályaműködtetési Zrt.	peron melletti vágány: Keleti 13, Nyugati 17, Déli 12, Kelenföld 10	vonatonkénti vágányrend, csúcsórai vonatszám	adatkészlet egy fejpályaudvarra, klasszikus modellel kezdve
Ütemes menetrend. NS és BVG (klasszikus, PESP); Q-CTRL PESP-ág; DLR QCMobility	OKK (2026-tól); MÁV (IKOP Plusz)	GTFS-adat; 2996 Volán-viszonylat; egységes menetrendtervezés 2029-ig	mért utasforgalmi adat	PESP-alapú hálózati modell nyílt adatokból; kvantumos ág összevetésként

Feladattípus és nemzetközi minta	Hazai szereplő	Méret és rendszer	Hiányzó adat	Lehetséges első lépés
Utolsó járatok csatlakozása. Pekingi metró (koherens Ising-gép, kis példány)	BKK; OKK	négy metróvonal és HÉV	csatlakozó utasáramok	kis budapesti példány klasszikus megoldóval; nyílt verseny
Jelzőlámpa-vezérlés. DLR QI-TraSiCo; Aomori; Hefei	Budapest Közút, BKK	1250 csomópont; 740 hurokdetektor, 827 kamera (legutóbb közölt adat)	a központ szoftvere és interfészei	szimulációs tesztkörnyezet egy csomópontcsoportra
Igényvezérelt közlekedés. Kawasaki (NEC); DLR QCMobility (Rajna–Neckar)	BKK (274-es járat, Telebusz); MVK; OKK közreműködőként	foglalási rendszer	igényszámok	megállóhálózat-tervezés a foglalási adatokból
Elektromosbusz-töltés. EDF (D-Wave); Pasqal–EDF	BKK, BKV	legalább 250 elektromos busz, az elsők 2029-re várhatók; energiamenedzsment-rendszer a beszerzésben	– (a rendszer még nem üzemel)	nyílt optimalizálási interfész a beszerzésben
Légitársasági tervezés. TCS; Lufthansa (QCMobility); Copa-verseny	Wizz Air	262 repülőgép; Sabre, AIMS	üzleti adat, a légitársaság döntésén múlik	valós adatokra épülő verseny a légitársaság döntése alapján
Repülőtéri erőforrások. Hamburgi Egyetem és Lufthansa Industry Solutions; Delta–IBM	Budapest Airport	138 000 mozgás (2025); GroundStar (referencialista)	az állóhelyek száma	az erőforrás-adatok összeállítása
Légiforgalmi irányítás. SESAR (JANUS); Eurocontrol	HungaroControl	a MATIAS következő generációs változata (2029, vezérigazgatói interjú); SESAR-részvétel	–	SESAR-partnerség; megvalósíthatósági próba az Eurocontrol mintájára

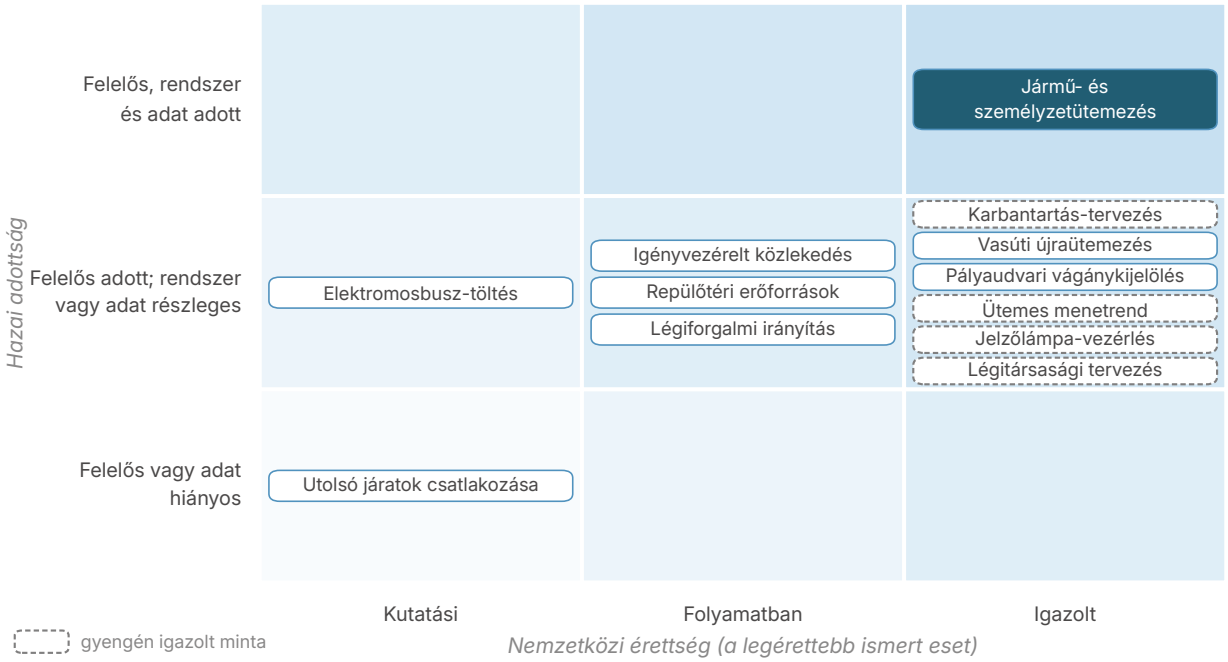
Forrás: a 3–10. fejezetben hivatkozott források, különösen [5, 233, 226, 227, 217, 220, 221, 6, 12, 16, 218, 2, 256, 257, 258, 259, 125, 11, 208, 232, 84, 56, 215, 260, 58, 224, 261, 262, 239, 219, 109]. A hiányzó adat oszlop a nyilvános forrásokban nem szereplő adatokat, az első lépés oszlop a tanulmány értékelését mutatja.

19. táblázat. A feladattípusok besorolása, várható haszna, költsége, kockázata és időtávja.

Feladattípus	Érettség; hazai adottság	Várható haszon (mihez képest)	Költség és kockázat	Időtáv
Jármű- és személyzetütemezés	igazolt (I, Q); adott	gyorsabb újratervezés, választható változatok; a klasszikus optimalizálás hatása a korábbi beosztáshoz mérve: NS $-1{,}2\%$ személyi költség, Szeged: kb. 3 százalékponttal kisebb munkaidő-többlet; érintett kör: vasút kb. 3000 mozdonyvezető és kb. 3000 jegyvizsgáló (az IVU-rendszerben kezelt kör, IVU-közlemény, 2017), Volán kb. 10 800 autóbusz-vezető (2025)	kis kísérleti költség; a kvantuminspirált ág valószínűleg nem ad jobb tervet; a teljes feladat meghaladja a megoldók kapacitását; személyes adatok	rövid
Karbantartás-tervezés	igazolt (n. k.); részleges	rövidebb tervezési idő (JAL-nyilatkozat, 5.1. pont)	munkatétel-adat hiánya; új intézményi kapcsolat	rövid–közép
Vasúti újraütemezés	igazolt (Q); részleges	választható változatok a forgalomirányítónak, a klasszikus MILP-modellhez mérve	biztonságkritikus feladat, ezért csak offline, történeti adaton	közép
Pályaudvari vágánykijelölés	igazolt (Q); részleges	gyorsabb vágánykijelölés zavar idején; a nemzetközi eset csak heurisztikához mért	a vágányrend és a lehetséges vágányutak összegyűjtése	közép
Ütemes menetrend	igazolt (Q); részleges	a haszon döntő része klasszikus hálózati optimalizálásból (NS: a korábbi menetrendhez mérve)	modellezési munka; a kvantumos ág eredménye gyártói közlés, pontos klasszikus összevetés nélkül	rövid (klasszikus), hosszú (kvantumos)
Utolsó járatok csatlakozása	kutatási; hiányos	jobb éjszakai csatlakozás; a pekingi példán a kvantumos és a klasszikus eredmény azonos	utasáram-adat hiánya	közép
Jelzőlámpa-vezérlés	igazolt (n. k.); részleges	rövidebb várakozás nagy forgalomnál, a rögzített ciklushoz mérve	élő vezérlés kockázata, szállítói interfész; szimulációval kezelhető	rövid–közép
Igényvezérelt közlekedés	folyamatban; részleges	jobb megállóhálózat, a jelenlegi útvonalakhoz mérve	kis feladat, kis költség; igényadat nem nyilvános	rövid
Elektromosbusz-töltés	kutatási; részleges	alacsonyabb energiaköltség; a kvantumos ág nem volt jobb a szimulált hűtésnél	beszerzési előírás; az első buszok 2029-ben	közép
Légitársasági tervezés	igazolt (Q); részleges	gyorsabb újratervezés; a SCIP-hez mérve vegyes eredmény	piaci döntés, bizalmas adatok	közép

Feladattípus	Érettség; hazai adottság	Várható haszon (mihez képest)	Költség és kockázat	Időtáv
Repülőtéri erőforrások	folyamatban; részleges	a nemzetközi példányok a napi forgalomnál nagyságrendekkel kisebbek	méretkülönbség	hosszú
Légiforgalmi irányítás	folyamatban; részleges	feltáró eredmény; a SESAR szerint a bevezetés évtizedekre van	uniós program keretében kis saját kockázat	közép–hosszú

Forrás: a tanulmány értékelése a 3–10. fejezetben hivatkozott források alapján. Érettség: a legérettebb ismert nemzetközi eset a 1. táblázat kategóriái szerint, rövid alakban (igazolt, folyamatban, kutatási); zárójelben a futtatás módja (I: kvantumins-pirált; Q: valódi kvantumhardver vagy hibrid megoldó; n. k.: nem közölt). Hazai adottság: a feladat felelős szervezete, terve-zőrendszere és adata adott, részleges vagy hiányos (14. ábra). Az érintett kör: [126, 225, 226, 217]. Időtáv: rövid 2026–2027, közép 2028–2031, hosszú 2032-től.



14. ábra. Hasznosíthatósági mátrix: a feladattípusok a nemzetközi érettség és a hazai adottságok szerint (a tanulmány értékelése). A jármű- és személyzetütemezésben mindkét feltétel teljesül; több valós környezetben igazolt nemzetközi mintánál a hazai adat vagy rendszer részleges. A szaggatott keretű feladatok mintája gyengén igazolt, mert önbevallásos beszámolóra, nem közölt módszerre, dokumentált üzemeltetői részvétel nélküli kísérletre vagy gyártói közlésre épül.

Forrás: saját értékelés a 3–5. és a 9. fejezetben hivatkozott források alapján. Kategoriális besorolás, nem pontszám. A leg-érettebb eset futtatási módját a 19. táblázat adja. A posztkvantum-átállás és az érzékelés nem optimalizálási feladat, ezért nem szerepel.

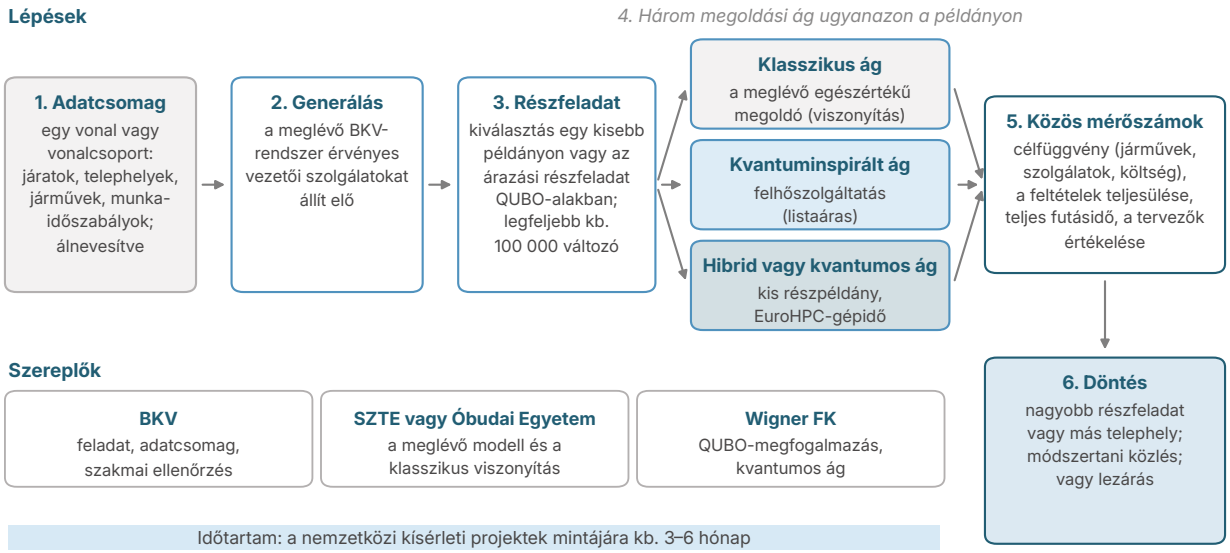
11.1. Jármű- és személyzetütemezés, karbantartás

Itthon a jármű- és személyzetütemezést több szervezet végzi, eltérő eszközökkel. A BKV-nál a 9.3. pontban bemutatott döntéstámogató rendszer integrált jármű- és járművezető-ütemezést vé-gez, a MÁV Személyszállítási Zrt. vasúti beosztása a legutóbbi közlések szerint IVU-alapú volt, a Volán-ág pedig a legnagyobb közúti beosztási feladatot hordozza [233, 227, 217]. A BKV-feladat a nemzetközi esetekkel rokon, de nem azonos velük: a DB Systel és a Sziléziai Vasutak kísérlete

csak járműfordulót, a Nankai a személyzetet és a járműveket külön vizsgálta, integrált jármű- és járművezető-ütemezést a vizsgált esetek közül csak a BKV-rendszer old meg [36, 40, 5].

A közölt BKV-példányokban az érvényes szolgálatok, vagyis a kiválasztás döntési változóinak száma hatezertől több mint egymillióig terjedt (13. ábra), és a halmazfedés QUBO-alakja a feltételek miatt további segédváltozókat igényel. A példányok közel felében a szolgálatok száma meghaladja a felhőben elérhető kvantuminspirált megoldók 100 000 változós határát. A D-Wave CQM ötmilliós határa alá viszont, a segédváltozók nélkül számolva, valamennyi példány befér (6.3. pont). Ekkora halmazfedési feladaton azonban kvantuminspirált vagy hibrid megoldót kereskedelmi egészértékű megoldóval eddig nem vetettek össze. A legközelebbi nemzetközi munkák legfeljebb néhány tíz változós példányokon, ideális kvantumáramkörök szimulációjával, vagy más feladatosztályon dolgoztak [263, 115, 264]. A BKV 2025-ben 855 autóbuszát vizsgálta át, a flotta tehát legalább ekkora [265]; a teljes autóbusz-forgalom így a közölt vonalcsoport-csomagoknál jóval nagyobb feladat.

Egy kísérlet ezért részfeladaton képzelhető el: egy kisebb példány kiválasztási fázisán, dekompozícióval, vagy az oszlopgenerálás árazási részfeladatán, amelyet egy 2026-os Accenture-előadás kis példányokon kvantumos megoldónak adott át [81]. A BKV-rendszer kiválasztási fázisa QUBO-alakban is felírható, így a megoldási ágak ugyanazokon az adatcsomagokon vethetők össze (15. ábra) [233, 20]. Első lépésként a BKV-val közös példánykör kijelölése vizsgálható. A szállítói rendszerek interfészeinek nyitottsága nem ismert, ezért a kísérlet a tervezőrendszerek adatexportjára épülhet.



15. ábra. Egy lehetséges hazai mintakísérlet a jármű- és járművezető-ütemezésben. A BKV meglévő rendszere adja a feladatot és a klasszikus viszonyítási alapot, a részfeladat három megoldási ágon fut, és a közös mérőszámok alapján születik döntés a folytatásról.

Forrás: saját szerkesztés [223, 233, 20, 21, 22, 23, 10, 197, 47] alapján. Az időtartam a nemzetközi kísérleti projektek közölt hosszát (SBRI első fázis: 3 hónap; Renfe: 6 hónap) követi; a szereplők kiválasztása a tanulmány értékelése a hazai kapcsolódási pontok (10.2. pont) alapján.

A várható haszon a viszonyítási alaptól függ. A dokumentált klasszikus beosztásoptimalizálás a korábbi beosztáshoz képest néhány százalékos hatást ért el (19. táblázat); a brit közlekedési minisztérium által kiadott jelentés 15%-os feltevése ennél jóval nagyobb, és azonosítatlan esettanulmányra épül (6.6. pont). A MÁV-csoport személyi jellegű ráfordítása a pályavasúti, a karbantartási és az irodai állományt is lefedi, ezért egy százalékos megtakarítás csak az érintett szűkebb körre értelmezhető, amelynek bérköltsége külön nem ismert [266]. A kvantuminspirált ág elsősorban gyorsabb újraterve-

zést ígér, nem feltétlenül jobb tervet egy jól beállított egészértékű megoldónál (6.1. pont), egy hibrid ág pedig több választható változatot adhat (3.1. pont). A nemzetközi összevetések alapján valószínű kimenet, hogy a kvantuminspirált ág nem ad jobb eredményt a meglévő klasszikus megoldónál; ekkora feladaton azonban egy jól dokumentált összevetés nemzetközileg is újszerű lenne.

A vasúti és a Volán-beosztásban ugyanez a minta egy telephelyen vagy vonalcsoporton követhető. A pécsi hálózat (144 autóbusz, munkanapon 1802 járat) és a debreceni (mintegy 120–135 autóbusz) egészében is kísérleti terep lehet (9.2. pont). Szegeden és Pécsett nyílt menetrendi adat is van, Szegeden pedig a helyi autóbusz-ütemezésről valós üzemi adatokon már készült egyetemi kutatás [236, 237, 225]. Ezek a városok egy kisebb, de egész hálózatra kiterjedő kísérlet helyszínei is lehetnek.

A karbantartás-tervezés nemzetközi mintája a JAL 2026 márciusa óta üzemelő eszköze (5.1. pont); vasúton a karbantartás a fordulótervezésben feltételként jelenik meg (3.3. pont). Itthon a karbantartási és felújítási ciklusok irányítása 2026-tól a Magyar Vonatflotta feladata, a járműjavítás a MÁV Személyszállítási Zrt.-hez tartozik [12, 266]. A karbantartási ciklusok beépítése a fordulótervezési modellbe a DB Systel kísérletének mintájára vizsgálható [36], és ehhez a Magyar Vonatflotta és az OKK kötelező adatcseréje intézményi keretet adhat.

11.2. Vasúti újraütemezés és vágánykijelölés

A DLR QCMobility vasúti alprojektjében az osztrák pályahálózat-működtető társult partnerként, adattal és folyamatokkal vesz részt [45]. Itthon a feladatot a MÁV Pályaműködtetési Zrt. és a saját hálózatán a GYSEV végzi; a hálózaton 2024-ben kb. 1,49 millió vonat közlekedett [218]. Klasszikus viszonyítási alapot a BME KJK vegyes egészértékű programozásra épülő konfliktusfeloldó modellje adhat [252].

A vágánykijelölésben a budapesti pályaudvarok szerkezeti adatai az állomási végrehajtási utasításokból ismertek. A peron melletti fogadó- és indítóvágányok száma a Keletiben 13, a Nyugatiban 17, a Déliben 12, Kelenföldön 10, ami a London Bridge-kísérlet 15 peronjának nagyságrendje [256, 257, 258, 259, 2]. Lényeges különbség, hogy a három fejpályaudvaron az érkező vonat és az induló szerelvény ugyanazt a vágányt foglalja, és egy vágányon több szerelvény is állhat. A vonatonkénti vágányrend és a csúcsórai vonatszám az utasításokban nem szerepel, ezért egy London Bridge-típusú vizsgálat első lépése ezek összeállítása lehet. A két vasúti feladat jellege is eltér: a London Bridge-kísérlet vágányutakat jelölt ki, a lengyel kísérletek a vonalon közlekedő vonatok sorrendjét ütemezték újra.

A haszon rövid távon a döntéstámogatásban keresendő: a választható változatokra épülő forgalomirányítói modell (3.1. pont) klasszikus megoldóval is kipróbálható. A kockázat a feladat biztonságkritikus és valós idejű jellegéből ered, ezért kísérlet csak offline, történeti adatokon, az élő irányítástól elkülönítve képzelhető el. Első lépésként vizsgálható, hogy a Wigner FK részvételével kidolgozott módszertan a forgalmi napló egy anonimizált kivonatán a BME KJK klasszikus modelljével összevethető-e; a napló és a forgalomirányítást támogató szoftverek leírása ma nem nyilvános. Az osztrák minta szerint a hazai pályahálózat-működtetők külföldi programokba társult partnerként, saját kvantumprogram nélkül is bekapcsolódhatnak.

11.3. Ütemes menetrend és csatlakozások

A hálózati menetrendtervezés klasszikus módszere, a periodikus eseményütemezési feladat (PESP) üzemben bizonyított (6.4. pont), így a Q-CTRL kvantumos PESP-kísérletének (3.2. pont) viszonyítási alapja egy érett klasszikus eljárás. Itthon az OKK feladata az egységes, országos ütemes menetrend és a csatlakozások kialakítása, a MÁV IKOP Plusz projektje pedig 2029-ig egységes menetrendtervezést épít [11, 232]. A BKK menetrendi alapadata nyilvános, a MÁV-é igénylés alapján díjmentesen

elérhető, így egy hálózati modell ezekből is felépíthető (9.3. pont). A haszon döntő része a holland tapasztalat alapján a klasszikus hálózati optimalizálásból eredhet (6.4. pont), a kvantumos ág ehhez képest kutatási jellegű összevetés lehet.

Az utolsó éjszakai járatok csatlakozásának nemzetközi mintája a pekingi metrós vizsgálat, amelyben a klasszikus megoldó és a koherens Ising-gép kis példányon azonos eredményt adott (4.3. pont). Budapesten a négy metróvonal és a HÉV éjszakai csatlakozásai hasonló feladatot jelentenek. A csatlakozó utasáramok mért adata azonban hiányos, ezért első lépésként egy kis, klasszikus megoldóval kezdett példány látszik reálisnak; a nyílt menetrendi adatokra épülő verseny a panamai légitársaság mintájára kis költséggel vonhatná be a kutatói közösséget [102].

11.4. Jelzőlámpa-vezérlés és igényvezérelt közlekedés

A jelzőlámpa-vezérlésben az élő forgalomba vezető út legjobban dokumentált mintája a DLR QI-TraSiCo projektjének szimuláció–laboratórium–tesztterület lépcsője (4.2. pont). Budapesten a Budapest Közút 1250 jelzőlámpás csomópont üzemeltetésére írt ki közbeszerzést, az üzemeltetést 2026 és 2029 között a Yunex Traffic végzi [215], a BKK legutóbb közölt adatai szerint mérőhálózatában pedig 740 hurokdetektor és 827 kamera működik [260]. 2023 októberében a BKK, a Budapest Közút és a Google forgalmi adatok alapján két csomópont lámpaprogramját hangolta újra [267]; egy QI-TraSiCo- vagy Aomori-típusú vezérlési kísérlet haszna az ilyen, már elérhető klasszikus módszerekhez mérhető.

A forgalomirányító központ szoftvere és interfészei nem nyilvánosak, az üzemeltetés pedig 2029-ig egy szállítónál van, ezért egy kísérlet a Budapest Közút, a BKK és az üzemeltető együttműködését igényelheti. Első lépésként a QI-TraSiCo mintájára egy csomópontcsoport szimulációs tesztkörnyezete vizsgálható, amely a valós vezérlőhöz nem nyúl, és amelyben a klasszikus, a kvantuminspirált és a kvantumos vezérlési megfogalmazás egymás mellett mérhető.

Az igényvezérelt közlekedésben a nemzetközi kísérleti projektek a megállók és az útvonalak tervezését célozzák, a japán Kawasaki városában és a DLR Rajna–Neckar térségi projektjében (4.4. pont). Budapesten 2025 augusztusa óta a 274-es rugalmas útvonalú járat a foglalások alapján optimalizált útvonalon közlekedik, és a BKK Telebusz-szolgáltatása is igényvezérelt [224, 268]. Miskolcon az MVK foglalásra épülő igényvezérelt autóbuszjáratai a kawasaki vizsgálathoz hasonló feladatot jelentenek [261]. Az 5/2026. (VIII. 13.) KBM rendelet szerint az OKK közreműködik az igényvezérelt szolgáltatásokra vonatkozó javaslatok kidolgozásában [208]. Első lépésként a foglalási adatokra épülő megállóhálózat-tervezés vizsgálható klasszikus és kvantuminspirált megoldóval; a feladat kicsi, ezért a nemzetközi kísérletek méretéhez illeszkedik.

Az elektromos buszok töltésütemezése a BKK és a BKV legalább 250 elektromos buszt célzó beszerzésével válik hazai feladattá; a projekt töltést optimalizáló energiamenedzsment-rendszert is tartalmaz, az első buszok 2029-ben állhatnak forgalomba [262]. Mivel a nemzetközi kísérletekben a *quantum annealing* nem volt jobb a szimulált hűtésnél (4.4. pont), rövid távon klasszikus vagy kvantuminspirált megoldás látszik reálisnak, a beszerzésnél pedig megfontolható egy nyílt optimalizálási interfész, amely később más megoldók összevetését is lehetővé teszi.

11.5. Légi közlekedés

A HungaroControl a SESAR 3 programban 2025-ben hét pályázatból hatban nyert, köztük mesterséges intelligenciára épülő konfliktuskezelési, kapacitás–igény kiegyensúlyozási és egy GNSS-zavarásnak ellenálló, műholdas multilaterációs légtérfelügyeleti projektben [219]. Az előbbi kettő a JANUS és a NEXT-QCM által kvantumos módszerrel vizsgált légiforgalmi optimalizálási feladatok

(5.3. pont) klasszikus rokona. A MATIAS irányítórendszer következő generációs változata a vezérigazgatói interjú szerint 2029-ben állhat üzembe [216]. A kvantumos SESAR-projektek közül a JANUS egy olasz léginavigációs szolgáltatóval dolgozik (5.3. pont), egy későbbi felhívásban pedig a HungaroControl is csatlakozhat hasonló projekthez. Egy hazai megvalósíthatósági próba mintája az Eurocontrol tendere lehet, amely a klasszikus kiindulóponthoz mért összevetést írja elő, és a további figyelemmel kísérést is elfogadható kimenetnek tekinti (5.3. pont).

A Wizz Air-csoport flottája a 2025/26-os pénzügyi évben 262 repülőgépből állt [214]. Menetrend- és résidő-tervezésére 2019-ben a Sabre rendszerét választotta, a személyzeti beosztás helyreállítása pedig egy 2026-os álláshirdetés szerint budapesti munkakörben, AIMS-rendszerben folyik [238, 239]. Ez a nemzetközi légitársasági kísérletek közvetlen hazai megfelelője, egy kísérlet azonban a piaci szereplő saját üzleti döntése; a hazai kutatói közösség partnerként, például valós adatokra épülő verseny formájában kapcsolódhat [102].

A budapesti repülőtér 2025-ben 138 000 légijármű-mozgást kezelt [219]. A repülőtér INFORM GroundStar-rendszereket használ: a gyártó referencialistáján szerepel, egy keltezetlen sajtóközlemény pedig az állóhely- és kapukezelés mellett mintegy 1100 munkatárs és eszköz beosztására szóló megrendelésről ír; a rendszerek mai alkalmazási köre ezért bizonytalan [240, 241]. A nemzetközi beszállókapu-kiosztási kísérletek legfeljebb néhány tíz járatos példányai nagyságrendekkel kisebbek a napi forgalomnál (5.2. pont), ezért itt a kvantumos megközelítés hosszabb távú kérdés.

11.6. Posztkvantum-átállás és kvantumérzékelés

A posztkvantum-átálláshoz a többi feladattól eltérően az uniós ütemterv céldátumokat ajánl, amelyek a NIS2 módosításával kötelezővé válhatnak (7.2. pont). Hazai keretét a kiberbiztonsági törvény adja (9.4. pont), a mozgástér azonban rétegenként eltér (20. táblázat). Az ETCS hatályos biztonsági specifikációja (SUBSET-146 v4.0.0) TLS 1.2 és 1.3 alatt elliptikus görbés kulcscserét és ECDSA- vagy RSA-aláírást ír elő, posztkvantum-elem nélkül [165, 164]. A specifikációt az ellenőrző-irányító és jelző alrendszerre vonatkozó uniós átjárhatósági műszaki előírás (CCS ÁME) kötelezővé teszi, és nyitott pontjai között nincs kriptográfiai pont [269, 270]. A tanulmány értelmezése szerint ezért a vonatbefolyásolási interfészekre nemzeti posztkvantum-előírás nem alkotható. A 2026 májusában hatályba lépett ÁME-módosítás az összefoglalók szerint vizsgálati és átmeneti kérdéseket rendez, a kriptográfiai előírásokat nem változtatja meg [271].

Az európai vasúti kiberbiztonsági specifikációk migrációs útmutatója szerint a rugalmasságot a nyilvános kulcsú infrastruktúra (PKI) adja, és ennek kialakítása a vasút döntése [167]. A további hazai ETCS- és a 2031-től tervezett FRMCS-kiépítés ezért alkalmat adhat arra, hogy a PKI-szolgáltatás, a frissíthetőség, a szállítói frissítési kötelezettség és a kriptográfiai anyagjegyzék beszerzési követelményként jelenjen meg [243, 272]. A CCS ÁME-n kívüli rendszerek, például a forgalomirányítási, a jegy- és az utastájékoztató rendszerek kriptográfiai rugalmassága nemzeti vagy üzemeltetői döntés.

A kvantumkulcs-szétosztásban a cseh pályahálózat-működtető egy terepi kísérletben a teszthálózat helyszínét biztosította, a cseh nemzeti kvantumkommunikációs hálózat pedig sajtóforrás szerint részben a vasúttársaság távközlési leányvállalatának optikai infrastruktúrájára épül [145, 273]. Itthon a GSM-R első üteméhez kb. 1100 km optikai kábelhálózat tartozik, a QCIHungary pedig nemzeti kvantumkommunikációs gerincet tervez [274, 245]; a pálya menti hálózat üzemeltetési modelljéről nincs nyilvános adat. A kettő közötti szinergia vizsgálható, a kiberbiztonsági hatóságok azonban a posztkvantum-kriptográfiát tekintik elsődlegesnek (7.1. pont).

A kvantumérzékelés hazai jelentősége a jelenlegi adatok szerint mérsékeltebb. A budapesti repülés-tájékoztató körzet az EASA 2026. október 14-i táblájában nem szerepelt a GNSS-zavarással érintett

20. táblázat. Kriptográfiai előírások és hazai mozgástér a vasúti irányító-biztosító rendszerekben és környezetükben.

Réteg	Kötelező erő	Mit rögzít	Hazai mozgástér
CCS ÁME (2023/1695 végrehajtási rendelet, 2026/693 módosítással)	kötelező	a rádión továbbított adatok kulcskezelési interfészei; a hivatkozott specifikációk TLS-t és nyilvános kulcsú tanúsítványokat írnak elő	nemzeti szabály csak nyitott pontra alkotható, kriptográfiai nyitott pont nincs
SUBSET-146 v4.0.0 (végponttól végpontig tartó biztonság)	kötelező, az ÁME része	TLS 1.2: ECDHE-kulcscsere ECDSA- vagy RSA-aláírással, AES-256-GCM, SHA-384; TLS 1.3: AES-256-GCM vagy ChaCha20-Poly1305; görbék: secp256r1, brainpoolP256r1	a kulcscsere és az aláírás kvantumsérülékeny, a szimmetrikus elemek megfelelők; változtatás csak uniós szinten
Ágazati kiberbiztonsági specifikációk (Europe's Rail, 2026)	beszerzési követelményként alkalmazható	elliptikus görbés PKI, TLS 1.3; posztkvantum-kriptográfiáról nem szól	a PKI-szolgáltatás kialakítása és üzemeltetése a vasút döntése
FRMCS	részben (interfész)	a fedélzeti specifikáció nem része a 2023-as ÁME-nek; hazai kiépítés 2031-től tervezett	a nem CCS-interfész rétegek kriptográfiája a következő ÁME-ig azon kívül esik
Uniós posztkvantum-ütemterv	ajánlás (2024/1101), NIS CG-ütemterv	leltár 2026 végéig, magas kockázatú rendszerek 2030-ig	a NIS2-módosítás elfogadása után válhat kötelezővé; a javaslat 2026 októberében az ITRE-ben
Kiberbiztonsági törvény (2024. évi LXIX.)	kötelező	algoritmust nem ír elő; nyilvántartás, besorolás, audit; új rendszernél a besorolás a beszerzés előtt hatósági jóváhagyást igényel	a leltár, a kockázatkezelés és a nem ÁME-s rendszerek követelményei nemzeti szinten alakíthatók

Forrás: [269, 270, 165, 164, 271, 167, 243, 154, 13, 162, 244]. A CCS ÁME szövege nem hivatalos, teljes szöveges másolatból ellenőrizve. A mozgástér oszlop a tanulmány értelmezése a forrásokban leírt kötelező erő alapján.

körzetek között [177], a HungaroControl pedig klasszikus, GNSS-zavarásnak ellenálló, műholdas multilaterációs légtérfelügyeleti megoldást fejleszt a SESAR keretében [219]. A kvantumnavigáció és a kvantumgravimetria hazai hasznosítása ezért elsősorban a nemzetközi fejlesztések és a tanúsítás követésében, valamint a SESAR-együttműködésben lehet; a hazai érzékelési igények feltérképezésére a brit közlekedési kvantumpályázat projektenként legfeljebb 40 000 fontos fázisa (7.5. pont) olcsó mintát ad [187].

12. Időtávok és kiindulópontok

A kiindulópontok időzítését a hazai intézményi és rendszerfejlesztési határidők, a posztkvantum-átállás uniós menetrendje és a kvantumszámítási hardver várható fejlődése együtt alakítja. Időtávonként a 16. ábra mutatja a hazai határidőket és a hardverrel kapcsolatos várakozásokat; a posztkvantum-átállás fokait a 9. ábra, a gyártói ütemterveket a 9. táblázat részletezi. A 21. táblázat azt foglalja össze, mi látszik célszerűnek és mi kevésbé indokoltnak az egyes időtávokon.

A rövid táv (2026–2027) a felkészülés és az összevető kísérlet szakasza lehet: ekkor alakul ki az OKK működési modellje, az uniós ütemterv szerint 2026 végéig elkészítendő a kriptográfiai leltár, és 2026 júniusa óta ingyenes európai kvantumos gépidő kérhető [11, 13, 10]. Saját kvantumhardver beszerzése és az éles, biztonságkritikus irányítás kvantumos megoldóra bízása ebben a szakaszban



16. ábra. A hazai kiindulópontokat meghatározó határidők és várakozások rövid, közép- és hosszú távon, a 21. táblázat időtávjai szerint. A hazai intézményi és rendszerfejlesztési lépések a rövid és a középtávra esnek, a széles körű kvantumelőny a becslések szerint a hosszú távra; a szaggatott keretű kártya interjún, gyártói terven vagy tanácsadói, illetve kormányzati megbízású becslésen alapul.

Forrás: [208, 10, 232, 262, 216, 7, 8, 139, 141]. A BCG-becslés tartománya (2030–2040) a középtávba is átnyúlik. A posztkvantum-átállás határideje a 9. ábrán szerepel.

21. táblázat. Célszerűnek látszó és kevésbé indokolt lépések időtávonként.

Időtáv	Célszerűnek látszó lépések	Kevésbé indokolt
Rövid táv (2026–2027)	összevető kísérlet a jármű- és járművezető-ütemezés egy részfeladatán; a feladatok QUBO- és klasszikus modelljei; anonimizált példánykészletek; kisebb vidéki városi hálózat mint kísérleti helyszín; kriptográfiai leltár és beszerzési követelmények; ingyenes európai gépidő; vállalati doktori kutatás	saját kvantumhardver beszerzése; éles, biztonságkritikus irányítás kvantumos megoldóra bízása; kvantumos előrejelzés mért utasadat nélkül
Középtáv (2028–2031)	integrált menetrend-, jármű- és személyzettervezés az OKK, a Magyar Vonatflotta és a szolgáltatók között; keresletvezérelt tervezés az utasszámlálásra építve; jelzőlámpás szimulációs tesztkörnyezetből teszterület; SESAR-partnerség; a magas kockázatú rendszerek posztkvantum-átállása; első kísérletek hibatűrő gépeken	kvantumelőny elvárása teljes üzemi méretben; kvantumkulcs-szétosztás a posztkvantum-kriptográfia helyett
Hosszú táv (2032-től)	valós idejű, integrált újratervezés hibatűrő gépen, ha az előny igazolódik; kvantumnavigáció tanúsítás után; a vasúti optikai hálózat és a kvantumkommunikáció összekapcsolása	–

Forrás: a tanulmány értékelése a 6. és a 11. fejezetben hivatkozott források alapján.

kevésbé indokolt, mert a nemzetközi szereplők sem így kezdtek, és az összevetésekben a klasszikus megoldók legalább ugyanolyan jó eredményt adtak (6.2. és 8.2. pont).

Középtávon (2028–2031) a hazai rendszerfejlesztések érnek be: az IKOP Plusz egységes menetrendtervezése és utasszámlálása, a HungaroControl MATIAS-rendszerének következő generációs változata és a BKK–BKV első elektromos buszai 2029-re várhatók [232, 216, 262]. Ugyanekkorra esik az uniós ütemterv szerinti átállás a magas kockázatú rendszerekben és a gyártók által ígért első hibatűrő gépek megjelenése (9. ábra és 9. táblázat). Ebben a szakaszban az integrált menetrend-, jármű- és személyzettervezés lehet a fő terület, mert mérete és szerkezete a klasszikus megoldók határát súrolja (6.4. pont). A tanácsadói és a brit minisztérium által kiadott becslések a széles körű kvantumelőnyt 2030 és 2040 közé teszik, az előnyt adó hibatűrő gépeket pedig kb. 2035-től várják [139, 141]. Ha ez igazolódik, hosszú távon (2032-től) a valós idejű, integrált újratervezés lehet a legértékesebb alkalmazás.

13. Megvalósítási utak és finanszírozás

13.1. A nemzetközi minták hazai átültetése

A nemzetközi programok közös mintája a kis, egymásra épülő kísérlet, a valós adat, a partnerség és a külső finanszírozás (8.2. pont, 14. táblázat); lehetséges hazai megfelelőiket a 22. táblázat mutatja. Egyik minta sem igényelt saját kvantumhardvert az üzemeltetőtől. A szomszédos országokban is akad kis költségű példa: a lengyel kutatóintézeti együttműködés üzemeltetői adattal, a cseh pályahálózat-működtető, amely egy kvantumkulcs-szétosztási kísérlet teszthálózatának helyszínét biztosította, és az osztrák pályahálózat-működtető társult partnersége egy német programban [16, 145, 45]. A régióban két EuroHPC-kvantumszámítógép üzemel, Lengyelországban 2025 júniusa, Csehországban 2025 szeptembere óta; a cseh gépet üzemeltető konzorciumnak Magyarország nem tagja [275, 276].

22. táblázat. A nemzetközi minták lehetséges hazai megfelelői.

Nemzetközi minta (14. táblázat)	Lehetséges hazai megfelelő	Lehetséges csatorna
Lengyel kutatóintézeti együttműködés	Wigner FK és MÁV Pályaműködtetési Zrt., GYSEV vagy OKK	kutatási pályázat (NKFI); a nemzeti laboratórium 2026 szeptemberében zárult
DLR QCMobility feladatgyűjtése	hazai kutatóhely vagy kompetenciaközpont gyűjti a feladatokat, az üzemeltetők adatot adnak	HPC EDIH HU; EuroHPC-gépidő
Brit SBRI kétfázisú verseny	közlekedési tárca, OKK vagy BKK megrendelőként	innovációs partnerség vagy kutatás-fejlesztési kivételre épülő beszerzés
SNCF ipari doktori kutatás	BKV, MÁV, OKK munkáltatóként	Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program, Kooperatív Doktori Program (EKÖP-KDP)
Airbus- és Copa-verseny	verseny nyílt menetrendi adatokkal	szolgáltatói vagy szponzorált keret
Osztrák társult partnerség	MÁV Pályaműködtetési Zrt., GYSEV, HungaroControl	külföldi programok, SESAR
Nankai–Hitachi termékfejlesztés	szolgáltató és tervezőszoftver-szállító	működési keret

Forrás: [16, 200, 277, 278, 102, 45, 5, 279, 14]. A hazai megfelelő és a csatorna oszlop a tanulmány értékelése.

Nyitott kérdés, ki kezdeményezné és fogná össze a hazai munkát (10.3. pont). Kísérleti terepet az OKK és a Magyar Vonatflotta adatcserére épülő kapcsolata, a BKV és a BKK tervezőrendszerei, valamint a vidéki városi szolgáltatók adhatnak, a kutatói oldalt a 10.2. pontban bemutatott csoportok.

13.2. Jogi és adatkezelési feltételek

Egy hazai kísérlet jogi feltételeit a 23. táblázat foglalja össze. A legtöbb előkészítést az adatkezelés igényelheti. A járművezetői adatok személyes adatok, ezért a kísérlet álnevesített vagy szintetikus beosztási adatokkal, adatvédelmi hatásvizsgálat mellett látszik megvalósíthatónak [280]. Amerikai felhőszolgáltatónál az adattovábbítás jogalapjának, az uniós–amerikai adatvédelmi keretnek az érvényessége bírósági eljárás tárgya [281, 282]. Ezt a kockázatot uniós helyszínű gépek, például a jülichi D-Wave-rendszer és a EuroHPC-kvantumszámítógépek csökkenthetik [283]; a EuroHPC ingyenes gépideje viszont nyílt tudományos felhasználásra szól, ezért bizalmas adatoknál az eredmények közölhető részét célszerű előre elhatárolni [284]. Egy beosztó rendszer üzemi bevezetése az üzemi tanács véleményezési jogát is érintheti [285], egy elkülönített, a valós beosztást nem módosító kísérletnél ez kevésbé valószínű. A holland vasút személyzeti tervezésének sikerében a munkavállalói elfogadhatóság és a szakszervezettel egyeztetett szabályok is szerepet játszottak [125].

Közbeszerzési oldalról a Kbt. kutatás-fejlesztési kivétele akkor alkalmazható, ha az eredményt nem kizárólag az ajánlatkérő hasznosítja, vagy a szolgáltatás ellenértékét nem teljes egészében ő fizeti; az innovációs partnerség pedig szakaszos fejlesztést és a szakaszok utáni kilépést enged [277]. A kivétel a 2014/24/EU irányelv 14. cikkének felel meg, az irányelv (47) preambulumbekezdése pedig ehhez a Bizottság 2007-es, a kereskedelmi hasznosítást megelőző beszerzésről (*pre-commercial procurement*, PCP) szóló közleményére utal [286]. Ebben a modellben az ajánlatkérő több versengő szállítótól, szakaszonként szűkülő körben vásárol kutatás-fejlesztést, a szellemi tulajdonhoz kötődő kockázatokat és hasznokat pedig piaci áron megosztja [287]. A brit SBRI-programnak megfelelő, önálló hazai konstrukció a vizsgált forrásokban nem szerepel. Az uniós kutatás-fejlesztési támogatási keret egy jogi elemzés szerint a nyílt, versenyeztetett kutatás-fejlesztési beszerzést nem tekinti állami támogatásnak [288, 289].

13.3. Hozzáférés és költség

A EuroHPC kvantumszámítógépeire 2026. június 25-től európai kutatók, közintézmények és ipari szereplők ingyenes, három vagy hat hónapos kísérleti gépidőt kérhetnek [10], a szolgáltatók ingyenes tanulási keretet kínálnak, a kvantuminspirált megoldók pedig felhőszolgáltatásként érhetők el [290, 22, 23] (24. táblázat). Egy kísérlet ráfordításának nagyobb része így az adat-előkészítésre és a szakértői munkára eshet, amelynek nagyságrendjét a források nem közlik. A nemzetközi kísérleti projektek közölt kerete a néhány tízezer eurós vagy fontos megvalósíthatósági szakasztól a milliós nagyságrendű prototípusig terjed (13. táblázat).

A MÁV-csoport 2024-ben és 2025-ben kutatás-fejlesztési költséget nem számolt el [266], ezért egy kísérlet a működési keretből, pályázatból vagy kutatói együttműködésben valósulhat meg; a nemzetközi példákban is jellemzően állami program vagy pályázat viselte a költséget, az üzemeltetők adatot és szakértői időt adtak (8.2. pont).

13.4. Finanszírozás

Kifejezetten közlekedési és kvantumos uniós felhívás a vizsgált körben csak a SESAR-ban volt [295]. A Horizont Európa 2026-os kvantumos témáit egy pályázati tanácsadó szerint visszavonták vagy felfüggesztették [296], az Europe’s Rail 2026-01-es felhívása pedig a könnyű gördülőállományra, az automatizált multimodális rendszerre és a hyperloopra irányult, kvantumos téma nélkül [297]. Egy

23. táblázat. Jogi és adatkezelési feltételek egy hazai kísérletnél.

Terület	Szabály	Lehetséges következmény a kísérletre
Személyes adatok	általános adatvédelmi rendelet (2016/679), 35. cikk	álnevesített vagy szintetikus adat; adatvédelmi hatásvizsgálat
Adattovábbítás	GDPR V. fejezet; uniós–amerikai adatvédelmi keret (2023/1795)	amerikai szolgáltatónál a keret ad jogalapot, érvényessége bírósági eljárásban; uniós helyszínű gép csökkenti a kockázatot
Munkajog	Mt. 264. §	üzemi bevezetésnél az üzemi tanács véleményezési joga; elkülönített kísérletnél kevésbé valószínű
Gépidő	EuroHPC hozzáférési szabályzat	nyílt tudományos felhasználás; a bizalmas adat és a közölhető eredmény elhatárolandó
Beszerzés	Kbt. 9. § (8) l) (kutatás-fejlesztési kivétel); Kbt. 95–97. § (innovációs partnerség)	közbeszerzési eljárás nélküli kutatás-fejlesztési beszerzés, ha az eredmény nem kizárólag az ajánlatkérőé, vagy nem ő fizeti teljes egészében; szakaszos fejlesztés kilépési lehetőséggel
Állami támogatás	uniós kutatás-fejlesztési támogatási keret (2022/C 414/01); általános csoportmentességi rendelet	versenyeztetett beszerzésnél a díj nem támogatás; pályázati támogatás a csoportmentességi kategóriák szerint

Forrás: [280, 281, 282, 283, 285, 284, 277, 288, 289]. A következmény oszlop a tanulmány értelmezése; jogi tanácsadásnak nem minősül.

24. táblázat. Kvantumos és kvantuminspirált hozzáférési lehetőségek és listaárak.

Hozzáférés	Összeg, feltétel	Megjegyzés
Kvantumhardver		
EuroHPC kvantumos kísérleti hozzáférés	ingyenes; 3 vagy 6 hónap	2026. június 25-től, havi határnapokkal
IBM Quantum, ingyenes csomag	havonta legfeljebb 10 perc	tanulásra, kis kísérletre
IBM Quantum, felhasználásalapú	96 USD/perc	szerződéssel olcsóbb
Amazon Braket	0,30 USD/feladat + mérésenkénti díj (*shot*); foglalás 2500–7000 USD/óra	gépenként eltér
Pasqal (Azure Quantum)	3000 EUR/kvantumprocesszor-óra	semleges atomos gép
D-Wave Leap	nyilvános ár nincs; próbahozzáférés	hibrid megoldók
HUN-REN SZTAKI kvantumarchitektúra	külföldi kvantumprocesszorok kutatóknak	díja nem ismert
Kvantuminspirált megoldók		
Toshiba SQBM+ (AWS Marketplace)	0,50–15 USD másodpercenként a géptípustól függően, az AWS-díjon felül	a díjegység a megrendelés előtt ellenőrizendő
Fujitsu *Digital Annealer*	nyilvános ár nincs	felhőszolgáltatás

Forrás: [10, 290, 291, 292, 293, 23, 294, 248]. Eredeti pénznemben, adó nélkül; a listaárak a 2026. októberi állapotot tükrözik, és változhatnak.

hazai kezdeményezés ezért több, eltérő célú forrást kapcsolhat össze (25. táblázat); a 2026 októberében nyitott csatornák közül a EuroHPC ingyenes gépideje, a HPC EDIH HU szolgáltatása és az EIT Urban Mobility következő határnapja illeszkedik közvetlenül egy kísérlethez. Mivel a közlekedési felhívások a kvantumot, a kvantumos felhívások a közlekedést nem nevesítik, a pályázatok a tervezési feladatra összpontosító, technológiasemleges megfogalmazással illeszthetők.

25. táblázat. Hazai és uniós finanszírozási és hozzáférési csatornák.

Csatorna	Keret, feltétel	Illeszkedés a közlekedési kvantumkísérlethez	Állapot 2026 októberében
Hazai			
2026-4.1.1-MISSZIÓK (NKFI Alap)	20,92 Mrd Ft; 1–4 Mrd Ft projektenként; csak kutató-tudásközvetítő szervezet pályázhat	kiemelt terület a kvantumtechnológia (eszköz, prototípus), az autonóm rendszerek és a mesterséges intelligencia	a beadás lezárult, eredmény nem ismert
EKÖP-KDP	400 000 Ft/hó ösztöndíj, 24–48 hónap; munkáltató gazdasági társaság is lehet	vállalati doktori kutatás; kvantumos előzmény: KDP, Ericsson–ELTE–Wigner FK	a 2025/26-os kör lezárult
NKFI Alap, Nemzetközi Programok	7,787 Mrd Ft (2026)	európai partnerségek hazai része, például QuantERA	felhívásonként
HPC EDIH HU	ingyenes szolgáltatás	célágazat a logisztika és a közlekedés	nyitott
Uniós			
EuroHPC kvantumos kísérleti hozzáférés	ingyenes gépidő	algoritmus- és munkafolyamat-fejlesztés	nyitott, havi határnapokkal
EIT Urban Mobility	legfeljebb 2 M EUR projektenként, legfeljebb 65%; két ország partnerei	közösségi közlekedés, mobilitási adatkezelés; a kvantum nincs nevesítve	következő határnap 2027 elején
SESAR 3	2025: 24 M EUR feltáró kutatás, ebből négy kvantumprojekt	légiforgalmi irányítás	újabb kvantumos téma nem ismert
QuantERA	2025: kb. 53 M EUR, 29 ország; hazai finanszírozó az NKFI Hivatal	alkalmazott kvantumtudomány, egyetemi vezetéssel	a 2025-ös felhívás lezárult
Európai Kvantumakadémia	19,8 M EUR	képzés	2026-ban indult

Forrás: [298, 278, 107, 299, 279, 10, 300, 295, 301, 302]. Az illeszkedés és az állapot oszlop a tanulmány értékelése a 2026. októberi források alapján.

A MISSZIÓK-felhívás a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium legvalószínűbb folytatási csatornája, kvantumtechnológiai területe azonban eszköz- és prototípus-fejlesztésre szól, ezért egy közlekedési optimalizálási alkalmazás inkább a mesterséges intelligencia vagy az autonóm rendszerek területén, illetve egy kvantumos laboratórium alkalmazási munkacsomagjaként illeszkedhet. A beadási határidő 2026 márciusában lejárt, az eredmény októberig nem jelent meg [298]. Az EKÖP-KDP elődjét, a Kooperatív Doktori Programot már használták egyetem és vállalat közös kvantumos doktori kutatására. A felhívás a lehetséges munkáltatók között a kettős könyvvitelt vezető gazdasági társaságokat is említi, így az állami tulajdonú társaságokat sem zárja ki [278, 107].

13.5. Felkészülés

A nemzetközi programok tapasztalata szerint a felkészülés az adatoknál kezdődik. Egy szisztematikus áttekintés szerint a közlekedési kvantumoptimalizálási tanulmányok többsége szintetikus adatra épül, a szerzők nyílt adatkészleteket és kísérleti üzemi próbákat javasolnak [303]. Egy anonimizált, valós példánykészlethez készült QUBO-modell kidolgozott irodalomra támaszkodhat [19, 20], és a kvantumos, a hibrid és a kvantuminspirált ágon is futtatható, a klasszikus megoldó pedig viszonyítási alapot ad hozzá (1. ábra). Az ilyen modell és példánykészlet a klasszikus optimalizálásnak is bemenete, ezért a hagyományos tervezésben már most hasznot hozhat, a hibatűrő gépek megjelenése után pedig rájuk is átvihető.

A kvantuminspirált megoldók kipróbálását a BCG kifejezetten javasolja a közeli távú értékteremtéshez, az üzleti feladatot és a kvantumos módszert összekötő csapattal együtt [205]. Egy egyetemi összevetés szerint azonban erősségük feladatosztályonként eltér (6.1. pont) [17], és a nemzetközi esetek jelentős része nem közli a futtatás módját (2.2. pont). A kipróbálás ezért akkor adhat értékelhető eredményt, ha a klasszikus megoldóval párhuzamosan fut, és a hardvert, a módszert és a viszonyítási alapot előre rögzítik. A képzéshez az Európai Kvantumakadémia 2026-os indulása és a szolgáltatók ingyenes tanulási kerete ad lehetőséget [302, 290].

A posztkvantum-átállás a felkészülés uniós céldátumokhoz kötött ága. A WEF és a Deloitte eszköztára a kriptográfiai anyagjegyzéket, a kriptográfia leválasztását az alkalmazásokról és a szerződéses kvantumbiztonsági követelményeket emeli ki [272]. A leltár elkészítése alkalmat adhat arra, hogy a szervezet a kvantumszámítás lehetőségeit is felmérje.

14. Következtetések

A 2017–2019-es demonstrációk óta a terület eljutott a valós üzemi adatokon végzett, pontos klasszikus megoldóval összevetett kísérletekig. Ahol ilyen összevetés készült, a klasszikus megoldó legalább ugyanolyan jó megoldást adott. Az Eurocontrol 2026-os tendere a klasszikus kiindulási megoldásokkal való összevetést már követelményként írja elő, a QOBLIB pedig nyílt referenciafeladatkészlettel teszi mérhetővé az előnyállításokat. A terület így olyan szakaszba lépett, amelyben egy kvantumos eredmény értékét a viszonyítási alap erőssége határozza meg.

A sikeres programokban az üzemeltető hozta a jól körülírt tervezési feladatot, a valós adatot és a szakmai ellenőrzést, a módszert pedig kvantumszolgáltatók és kutatóhelyek adták (8.2. pont). Az üzemhez legközelebb jutott alkalmazás, a Nankai kvantuminspirált jármű- és személyzetütemezése a hatásvizsgálatban ott mutatott nagy nyereséget, ahol a tervezés korábban kézzel folyt. A haszon jelentős része így a feladat matematikai megfogalmazásából és a tervezés automatizálásából eredhetett, ahogy a klasszikus operációkutatás évtizedes közlekedési gyakorlatában is.

Magyarországon több ilyen feltétel már adott. Hazai kutatók munkája vasúti és repülőtéri kvantumkísérletekbe is beépült, és erős a klasszikus közlekedési operációkutatás. A BKV jármű- és járművezető-ütemezéséhez pedig integrált klasszikus rendszer, vagyis erős viszonyítási alap tartozik, amely sok nemzetközi kísérletből hiányzott. A 2026-ban létrehozott közlekedésszervező feladata az egységes, országos ütemes menetrend, a csatlakozások és a tarifarendszer kialakítása, a gördülőállomány-kezelő pedig tervezési és költségadatot ad át neki. A kutatói tudást és a szolgáltatói adatokat összekötő közös munkáról nincs nyilvános adat. A hazai teljes feladatok mérete egyúttal a léptéket is kijelöli: egy kísérlet részfeladaton vagy kisebb városi hálózaton indulhat.

Ebből néhány vizsgálandó irány rajzolódik ki. A legközvetlenebb a BKV meglévő rendszerére épülő összevető kísérlet lehet, amelyben egy részfeladat klasszikus, kvantuminspirált és hibrid ágon fut, előre rögzített mérőszámokkal; ekkora járművezető-ütemezési feladaton ilyen összevetés nemzetközileg sem ismert. Az új országos intézményeknél megfontolható, hogy a tervezési adatok és modellek eleve megoldófüggetlen, összevethető alakban készüljenek. A vasúti újraütemezésben a hazai részvétellel kidolgozott lengyel módszertan történeti adatokon, offline vizsgálható, a vidéki városi hálózatok és az igényvezérelt járatok pedig kis, egész hálózatra kiterjedő kísérletek terepei lehetnek. A posztkvantum-átállás más természetű feladat: itt uniós céldátumok vannak, és a további ETCS- és a tervezett FRMCS-kiépítés beszerzési követelményein múlhat, mennyire lesznek cserélhetők a kriptográfiai elemek a következő évtizedekben.

Ha a hibatűrő gépek a gyártói ütemtervek szerint megjelennek, azok a szervezetek használhatják ki őket elsőként, amelyek tervezési feladatai addigra adatokkal, modellel és mért klasszikus eredménnyel együtt állnak rendelkezésre; ha később érkeznek, ugyanez a munka a klasszikus tervezésben térülhet meg.

Szerzői jogi és felhasználási nyilatkozat

A tanulmányt a Bentax Plus Kft. (a továbbiakban: Jogosult) saját kezdeményezésére, külső megbízás és harmadik személlyel szembeni kötelezettségvállalás nélkül készítette. A tanulmány a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény (Szjt.) szerinti védelem alatt áll, a vagyoni jogok jogosultja a Jogosult.

Felhasználási engedély. A Jogosult bárki számára ingyenes, nem kizárólagos, területi és időbeli korlátozás nélküli engedélyt ad (Szjt. 45. § (2) bekezdés d) pont) a tanulmány változatlan formában történő többszörözésére, terjesztésére és nyilvánossághoz közvetítésére, valamint arra, hogy a tanulmány részleteit idézze, átvegye, és megállapításait saját művében feldolgozza, üzletszerű célra is. A felhasználás feltételei:

a) a forrás feltüntetése a következő formában: „Bentax Plus Kft.: Kvantumtechnológia a közösségi közlekedésben. Felhasználások a világban és Magyarországon. 2026. október 24. www.bentaxplus.hu”;

b) a tanulmány szövege, ábrái és táblázatai nem módosíthatók, a tanulmány megváltoztatott változata nem terjeszthető és nem tehető közzé, a saját műben történő feldolgozás pedig nem keltheti azt a látszatot, hogy az a Jogosult műve vagy álláspontja;

c) a felhasználás nem keltheti azt a látszatot, hogy a Jogosult a felhasználót vagy a felhasználást támogatja.

A Jogosult a felhasználás díjazásáról az Szjt. 16. § (4) bekezdése alapján kifejezetten lemond. A feltételek megszegése esetén az engedély az érintett felhasználó tekintetében megszűnik. Az engedély nem terjed ki a tanulmányban idézett harmadik személyek műveire és adataira, valamint a Bentax Plus Kft. nevére és logójára.

Felelősség. A tanulmány nyilvánosan elérhető források alapján készült, tájékoztató jellegű szakmai elemzés, amely a 2026. október 24-i állapotot tükrözi. Nem minősül jogi, befektetési, informatikai biztonsági vagy egyéb szakmai tanácsadásnak, és nem helyettesíti az egyedi helyzetre szabott szakértői vizsgálatot. A Jogosult a tanulmány felhasználásából eredő károkért – a Polgári Törvénykönyv 6:152. §-ában meghatározott esetek kivételével – felelősséget nem vállal.

Irodalomjegyzék

[1] Oxford Quantum Circuits. *Optimisation of rail travel (SBRI Quantum Catalyst Fund)*. Sajtóközlemény, 2024-02-05 (frissítve: 2026-08-06). 2024. febr. URL: https://oqc.tech/company/newsroom/optimisation-rail-travel/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[2] Q-CTRL. *Accelerating the schedule for quantum-enhanced rail*. Esettanulmány. URL: https://q-ctrl.com/case-study/accelerating-the-schedule-for-quantum-enhanced-rail (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[3] Q-CTRL. *Q-CTRL and leading UK rail organizations optimize train scheduling efficiency with quantum software*. Sajtóközlemény, 2025-06-18. 2025. jún. URL: https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-and-leading-uk-rail-organizations-optimize-train-scheduling-efficiency-with-quantum-software (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[4] Krzysztof Domino és tsai. „Quantum Annealing in the NISQ Era: Railway Conflict Management”. *Entropy* 25.2 (2023), 191. old. DOI: 10.3390/e25020191.

[5] Hitachi, Ltd. és Nankai Electric Railway Co., Ltd. 南海電鉄と日立、乗務員運用計画と車両運用計画を自動作成するシステムの構築を開始. Közös sajtóközlemény, 2026-07-14. 2026. júl. URL: https://www.hitachi.com/ja-jp/press/articles/2026/07/0714a/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[6] 日本航空株式会社 és 株式会社エー・スター・クォンタム. *JAL*のCVCよりA*Quantum社へ出資. Közös sajtóközlemény, 2026-05-20 (PR TIMES); a karbantartás-tervező eszköz 2026 márciusában formális üzembe lépett. 2026. máj. URL: https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000001491.000030684.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[7] IBM. *IBM Sets the Course to Build World’s First Large-Scale, Fault-Tolerant Quantum Computer at New IBM Quantum Data Center*. 2025. jún. 10. URL: https://newsroom.ibm.com/2025-06-10-IBM-Sets-the-Course-to-Build-Worlds-First-Large-Scale,-Fault-Tolerant-Quantum-Computer-at-New-IBM-Quantum-Data-Center (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[8] Quantinuum. *Quantinuum Unveils Accelerated Roadmap to Achieve Universal, Fully Fault-Tolerant Quantum Computing by 2030*. https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-unveils-accelerated-roadmap-to-achieve-universal-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030. 2024. szept.

[9] Zacks / Nasdaq. *IonQ’s Quantum Roadmap and Foundry Strategy Through 2030*. https://www.nasdaq.com/articles/ionqs-quantum-roadmap-and-foundry-strategy-through-2030. 2026.

[10] EuroHPC Joint Undertaking. *EuroHPC JU opens access to its quantum computers*. https://www.eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-opens-access-its-quantum-computers-2026-06-25_en. 2026. jún.

[11] *2026. évi XXXVII. törvény a közösségi közlekedés versenyképességének és hatékonyságának javításával összefüggő intézkedésekről, valamint az országos közlekedésszervező és az országos gördülőállomány-kezelő társaság létrehozásához szükséges törvénymódosításokról*. Nemzeti Jogszabálytár. Elfogadva: 2026. július 28.; kihirdetve: 2026. július 30. 2026. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2026-37-00-00 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[12] *2005. évi CLXXXIII. törvény a vasúti közlekedésről (VII/A. fejezet, 24/B–24/F. §)*. Nemzeti Jogszabálytár, 2026.09.27-i állapot. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2005-183-00-00 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[13] NIS Cooperation Group. *A Coordinated Implementation Roadmap for the Transition to Post-Quantum Cryptography*. 2025. jún. 23. URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/coordinated-implementation-roadmap-transition-post-quantum-cryptography (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[14] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal. *Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium (ismertető)*. Projektazonosító: 2022-2.1.1-NL-2022-00004; támogatási összeg 3 275 000 000 Ft; támogatási időszak 2022.10.01–2026.09.30. 2024. URL: https://www.nemzetilaborok.nkfih.gov.hu/gazdasag-tarsadalom-digitalis-atallasa/letoltheto-anyagok/kvantuminformatika (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[15] European Commission. *Horizon Europe Work Programme 2023–2025. 13. General Annexes*. European Commission Decision C(2025) 2779 of 14 May 2025. A technológiai érettségi szintek (Technology Readiness Levels, TRL 1–9) meghatározása: 14. o. 2025. máj. URL: https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-13-general-annexes_horizon-2023-2024_en.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[16] Koniorczyk Mátyás és tsai. „Solving rescheduling problems in heterogeneous urban railway networks using hybrid quantum-classical approach”. *Journal of Rail Transport Planning & Management* 34 (2025). arXiv:2309.06763, 100521. old. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2025.100521.

[17] Hiroki Oshiyama és Masayuki Ohzeki. „Benchmark of quantum-inspired heuristic solvers for quadratic unconstrained binary optimization”. *Scientific Reports* 12 (2022), 2146. old. DOI: 10.1038/s41598-022-06070-5.

[18] Jiangwei Ju és tsai. „Quantum Computing for Transport Network Optimization”. *Entropy* 27.9 (2025), 953. old. DOI: 10.3390/e27090953.

[19] Andrew Lucas. „Ising formulations of many NP problems”. *Frontiers in Physics* 2 (2014), 5. old. DOI: 10.3389/fphy.2014.00005.

[20] Fred Glover, Gary Kochenberger és Yu Du. „Quantum Bridge Analytics I: a tutorial on formulating and using QUBO models”. *4OR* 17 (2019), 335–371. old. DOI: 10.1007/s10288-019-00424-y.

[21] Fujitsu. *Digital Annealer API Guide*. A 3. és 4. generációs megoldó legnagyobb feladatmérete 100 000 bit. URL: https://portal.aispf.global.fujitsu.com/apidoc/da/jp/da-guide-en.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[22] Microsoft Azure. *Toshiba launches new SQBM+ quantum-inspired optimization provider on Azure Quantum*. https://azure.microsoft.com/en-us/blog/quantum/2022/06/27/toshiba-launches-new-sqbm-quantum-inspired-optimization-provider-on-azure-quantum/. 2022. jún.

[23] Amazon Web Services. *SQBM+ for AWS Business Standard Plan (AWS Marketplace)*. https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-ichzuqyx2vy7a. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[24] Sheir Yarkoni, Elena Raponi, Thomas Bäck és Sebastian Schmitt. „Quantum annealing for industry applications: introduction and review". *Reports on Progress in Physics* 85.10 (2022), 104001. old. DOI: 10.1088/1361-6633/ac8c54. arXiv: 2112.07491.

[25] Jiří Guth Jarkovský, Patricia Bickert, Elisabeth Wybo és Martin Leib. *Rolling Stock Planning Using the Quantum Approximate Optimization Algorithm*. IQM Quantum Computers; Deutsche Bahn AG / DB Systel; benyújtva: IEEE Quantum Week 2026. 2026. arXiv: 2606.11383. URL: https://arxiv.org/abs/2606.11383 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[26] Christian Liebchen. „The First Optimized Railway Timetable in Practice". *Transportation Science* 42.4 (2008), 420–435. old. DOI: 10.1287/trsc.1080.0240. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[27] Amira Abbas, Andris Ambainis, Brandon Augustino és tsai. „Challenges and opportunities in quantum optimization". *Nature Reviews Physics* (2024). arXiv:2312.02279. DOI: 10.1038/s42254-024-00770-9. arXiv: 2312.02279.

[28] Thorsten Koch és tsai. „The Quantum Optimization Benchmarking Library". *Nature Computational Science* 6.6 (2026). online megjelenés: 2026. június 23. (Crossref). Előközlemény: „Quantum Optimization Benchmarking Library – The Intractable Decathlon", arXiv:2504.03832, v1: 2025. április 4., v2: 2025. augusztus 28. A kulcs a main.tex miatt maradt 2025-ös, 653–671. old. DOI: 10.1038/s43588-026-00991-1. arXiv: 2504.03832.

[29] Google Quantum AI and Collaborators. „Quantum error correction below the surface code threshold". *Nature* (2024). DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.

[30] NIST. *NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards*. 2024. aug. 13. URL: https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[31] BSI, ANSSI, NLNCSA és Swedish NCSA. *Position Paper on Quantum Key Distribution*. 2024. jan. 26. URL: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Crypto/Quantum_Positionspapier.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[32] Murat Muradoglu, Mattias T. Johnsson, Nathanial M. Wilson és tsai. *Quantum-assured magnetic navigation achieves positioning accuracy better than a strategic-grade INS in airborne and ground-based field trials*. 2025. arXiv: 2504.08167.

[33] Network Rail. *World first as development of quantum navigation technology advances onto Britain's national railway*. 2026. márc. 24. URL: https://www.networkrailmediacentre.co.uk/news/world-first-as-development-of-quantum-navigation-technology-advances-onto-britains-national-railway (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[34] Florian Neukart és tsai. „Traffic Flow Optimization Using a Quantum Annealer". *Frontiers in ICT* 4 (2017), 29. old. DOI: 10.3389/fict.2017.00029.

[35] Tobias Stollenwerk és tsai. „Quantum Annealing Applied to De-Conflicting Optimal Trajectories for Air Traffic Management". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2019). arXiv:1711.04889. DOI: 10.1109/TITS.2019.2891235.

[36] Patricia Bickert és tsai. *Optimising Rolling Stock Planning including Maintenance with Constraint Programming and Quantum Annealing*. v3: 2023-09-25; DB Systel GmbH, Fraunhofer FOKUS. 2021. arXiv: 2109.07212. URL: https://arxiv.org/abs/2109.07212 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[37] Krzysztof Domino és tsai. *Quantum computing approach to railway dispatching and conflict management optimization on single-track railway lines*. v3: 2021-03-30. 2020. arXiv: 2010.08227. URL: https://arxiv.org/abs/2010.08227 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[38] Kuntal Adak, Sakshi Kaushik és Rahul Rana. *Airline Fleet Assignment Problems with Binary and Integer Programming models: Classical vs Quantum Annealing*. Tata Consultancy Services. 2026. arXiv: 2602.12840. URL: https://arxiv.org/abs/2602.12840 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[39] 中国日报网. *Hefei quantum traffic signal timing trial (China Mobile)*. China Daily, kínai nyelvű oldal, 2026-08-04. Az oldal reklámtartalomként jelöli. 2026. URL: https://cn.chinadaily.com.cn/a/202608/04/WS6a71ade0a310d709c2fc183c.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[40] Ewa Kędziera és tsai. *EMU circulation planning for Silesian Railways: case study and a quantum approach*. v3: 2026-06-03. 2025. arXiv: 2512.19340. URL: https://arxiv.org/abs/2512.19340 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[41] 日刊工業新聞 (ニュースイッチ). 運航整備計画１カ月分を10分で作成、ＪＡＬエンジが生かす「量子技術」の威力. Nikkan Kogyo Shimbun 2024-11-20, online 2024-11-26. 2024. nov. URL: https://newswitch.jp/p/43730 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[42] Sheir Yarkoni és tsai. „Quantum Shuttle: Traffic Navigation with Quantum Computing". *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software (APEQS 2020)*. 2020. DOI: 10.1145/3412451.3428500. arXiv: 2006.14162.

[43] 杨雪. 合肥完成基于量子计算技术的交通信号配时优化试验. 科技日报 (Science and Technology Daily), 2026-08-04. 2026. URL: https://www.stdaily.com/web/gdxw/2026-08/04/content_558984.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[44] Renfe. *TrenLab*. A VI. pályázati kör pilotjai és a Demo Day; a QCentroid munkája korai szakaszú, eredmény nélkül. URL: https://grupo.renfe.com/es/es/conoce-renfe/innovacion/trenlab (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[45] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Fewer delays, better route planning and timetables: quantum computing for rail transport*. Hír, 2025-08-22. 2025. aug. URL: https://www.dlr.de/en/ts/latest/news/2025/fewer-delays-better-route-planning-and-timetables-quantum-computing-for-rail-transport (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[46] Tino Werner és Freyja Ullinger. „Quantum algorithms for scheduling problems: a survey". *EPJ Quantum Technology* (2026). DOI: 10.1140/epjqt/s40507-026-00494-y. URL: https://qci.dlr.de/en/publication/paper-quantum-algorithms-for-scheduling-problems-a-survey/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[47] Capital Riesgo. *TrenLab, la aceleradora de Renfe, reúne en Madrid a los ganadores de su VI convocatoria*. 2025-10-14. 2025. okt. URL: https://capital-riesgo.es/es/articles/trenlab-la-aceleradora-de-renfe-re-ne-en-madrid-a-los-ganadores-de-su-vi-convocatoria/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[48] Kyushu Railway Company és Groovenauts. *JR*九州とグルーヴノーツは、量子コンピュータ等の最新技術を活用して「鉄道車両の運用最適化」に取り組みます. Sajtóközlemény, 2021-02-09. 2021. febr. URL: https://www.jrkyushu.co.jp/news/__icsFiles/afieldfile/2021/02/09/210209_jrkyushugroovenauts.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[49] Nikkei. 日立、量子技術で鉄道ダイヤ最適に 数日の作業を自動化. 2021-10-12. 2021. okt. URL: https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC102X40Q1A011C2000000/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[50] Universität Hamburg. *Quantencomputing-Algorithmen für die optimale Abfertigung an Flughäfen (Pressemitteilung 32/2024)*. 2024-06-27. 2024. jún. URL: https://www.uni-hamburg.de/newsroom/presse/2024/pm32.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[51] TechInformed. *Lufthansa & DLR Explore Quantum Computing for Airline Planning*. 2025-01-30. 2025. jan. URL: https://techinformed.com/lufthansa-dlr-quantum-computing-airline-planning/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[52] EUROCONTROL. *Call for Tenders ECTL_SRC_260083: Proof-of-Concept (POC) of Quantum Technologies for ATM*. i-Call for Tenders hirdetmény, 4 oldal; ajánlattételi határidő 2026-09-08 15:00. 2026. aug. URL: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2026-08/ectl-src-260083.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[53] Toyota Tsusho Corporation és DENSO Corporation. *DENSO and Toyota Tsusho to Conduct a Test Applying a Quantum Computer to Analyze IoT Data with a Commercial Application*. Sajtóközlemény, Kariya, 2017-12-13. 2017. URL: https://www.toyota-tsusho.com/english/press/detail/171213_004076.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[54] Fujitsu. *Fujitsu Quantum-Inspired Optimization Services Cut Traffic Jams and CO2 Emissions at Hamburg Port*. Sajtóközlemény, München, 2021-12-08. 2021. URL: https://info.archives.global.fujitsu/emeia/about/resources/news/press-releases/2021/emeia-08122021-fujitsu-quantum-inspired-optimization-services-cut-traffic-jams-and-co2-emissions-at-hamburg-port.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[55] クラウド Watch. *NEC*ソリューションイノベータ、川崎市で量子コンピュータを用いた交通流解析の実証実験. Impress Cloud Watch, 2021-07-21. 2021. URL: https://cloud.watch.impress.co.jp/docs/news/1339602.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[56] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *QI-TraSiCo – Quantum-Inspired Traffic Signal Control*. Projektoldal (DLR QCI és DLR Institut für Verkehrssystemtechnik). URL: https://qci.dlr.de/en/qi-trasico/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[57] The Quantum Insider. *Ayalon Highways and Quantum Art Partner to Bring Quantum Computing to Urban Traffic Planning*. The Quantum Insider, 2025-10-22. 2025. URL: https://thequantuminsider.com/2025/10/22/ayalon-highways-and-quantum-art-partner-to-bring-quantum-computing-to-urban-traffic-planning/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[58] 川崎市 (Kawasaki város). 「量子実証 川崎モデル創出事業」成果報告会. Önkormányzati oldal, közzétéve 2026-02-18, frissítve 2026-03-30. 2026. URL: https://www.city.kawasaki.jp/280/page/0000184447.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[59] DLR Quantum Computing Initiative. *QCMobility | Intermodal Transport & Road Transport: Planqc & D-Fine awarded the contract*. Hír, 2025. május 6. 2025. máj. URL: https://qci.dlr.de/en/qcmobility-intermodal-transport-road-transport-planqc-d-fine-awarded-the-contract/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[60] DLR Quantum Computing Initiative. *ParityQC supports QCMobility in the integration of quantum computing for mobility solutions*. Hír, 2025. december 3. 2025. dec. URL: https://qci.dlr.de/en/parityqc-supports-qcmobility-in-the-integration-of-quantum-computing-for-mobility-solutions/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[61] 株式会社Quanmatic. 京王電鉄「JISOU」に採択、西東京バスと「バス格納表作成」最適化の実証実験を開始. PR TIMES, 2026-07-17. 2026. URL: https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000039.000117406.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[62] 京王電鉄株式会社. 西東京バスの3営業所において、「バス格納表作成」の最適化に向けた実証実験を実施します. Sajtóközlemény, 2026. július 17. A kísérlet kezdete 2026. július 18. (szombat). 2026. júl. URL: https://digitalpr.jp/r/139487 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[63] 벤처스퀘어. 한국퀀텀컴퓨팅, '양자컴퓨터를 이용한 부산 도시철도 배차 최적화 연구' 과제 선정. Venture Square, 2025-06-24. 2025. URL: https://www.venturesquare.net/974885/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[64] DLR Quantencomputing-Initiative. *QCMobility – Quantum computers for mobility applications*. Projektoldal. URL: https://qci.dlr.de/en/qcmobility/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[65] IVU Traffic Technologies AG. *Optimisation*. Gyártói oldal (Solutions – Highlights). Dátum nélkül. URL: https://ivu.com/solutions/highlights/optimisation (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[66] Accenture. *Quantum Computation for Train and Driver Recovery Problems*. US 2022/0114533 A1 szabadalmi bejelentés; bejelentve 2021-09-29; ideiglenes bejelentés: 63/091,559, 2020-10-14. 2022. URL: https://patents.justia.com/patent/20220114533 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[67] Krzysztof Domino és tsai. „On the Baltimore Light RailLink into the quantum future". *Scientific Reports* 15 (2025), 29576. old. DOI: 10.1038/s41598-025-15545-0. arXiv: 2406.11268.

[68] Cambridge Quantum. *Cambridge Quantum and Deutsche Bahn Netz AG Leverage Latest Quantum Algorithms to Optimise Train Scheduling*. Sajtóközlemény, 2021-11-11, PR Newswire. 2021. nov. URL: https://www.prnewswire.co.uk/news-releases/cambridge-quantum-and-deutsche-bahn-netz-ag-leverage-latest-quantum-algorithms-to-optimise-train-scheduling-843127480.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[69] Q-CTRL. *Reducing quantum compute costs 2,500X with Fire Opal*. Esettanulmány, dátum nélkül; pénzügyi portfólióoptimalizálás, QAOA. URL: https://q-ctrl.com/case-study/reducing-quantum-compute-costs-2-500x-with-fire-opal (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[70] Camille Grange. „Design and application of quantum algorithms for railway optimisation problems". theses.fr: 2024UMONS009; SNCF-együttműködés. Dissz. Université de Montpellier, 2024. URL: http://www.theses.fr/2024UMONS009 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[71] Camille Grange, Marion Lavignac, Valentina Pozzoli és Eric Bourreau. *Quadratic versus Polynomial Unconstrained Binary Models for Quantum Optimization illustrated on Railway Timetabling*. 2024. arXiv: 2411.10062. URL: https://arxiv.org/abs/2411.10062 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[72] Camille Grange és tsai. *Moderate Exponential-time Quantum Dynamic Programming Across the Subsets for Scheduling Problems*. 2024. arXiv: 2408.05741. URL: https://arxiv.org/abs/2408.05741 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[73] IQM Quantum Computers. *IQM and Deutsche Bahn Demonstrate Quantum Algorithm for Railway Scheduling on Real Operational Data*. Sajtóközlemény, München, 2026-07-20. 2026. júl. URL: https://iqm.tech/?p=19781 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[74] Renáta Rusnáková, Martin Chovanec és Juraj Gazda. *Quantum Annealing for Realistic Traffic Flow Optimization: Clustering and Data-Driven QUBO*. v5: 2026-06-29. 2025. arXiv: 2510.06053.

[75] Jason Plautz. *Ford, Microsoft partner to reduce congestion with 'quantum-inspired' tech*. Smart Cities Dive, 2019-12-11. 2019. URL: https://www.smartcitiesdive.com/news/ford-microsoft-partner-to-reduce-congestion-with-quantum-inspired-tech/568840/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[76] Jedwin Villanueva és tsai. *Hybrid quantum optimization in the context of minimizing traffic congestion*. v1, 2025-04-11; Melbourne-i Egyetem és Ford Motor Company. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.08275. arXiv: 2504.08275. URL: https://arxiv.org/abs/2504.08275 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[77] Daisuke Inoue és tsai. „Traffic signal optimization on a square lattice with quantum annealing". *Scientific Reports* 11 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-82740-0.

[78] Reo Shikanai, Masayuki Ohzeki és Kazuyuki Tanaka. *Quadratic Unconstrained Binary Formulation for Traffic Signal Optimization on Real-World Maps*. v2: 2024. december. 2023. arXiv: 2308.14462.

[79] MONOist. 量子コンピューティングでクルマの待ち時間*20%*低減、トポロジー最適化への活用も. MONOist (ITmedia), 2020-06-22. A Microsoft 2020-06-19-i sajtótájékoztatójáról. 2020. URL: https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2006/22/news046.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[80] Anna Kristha Almazán Favela. *Quantum optimization meets public transit: lessons from the Berlin Quantum Hackathon*. GMV blog, 2026-05-13. 2026. URL: https://www.gmv.com/en/media/blog/industry/quantum-optimization-meets-public-transit-lessons-berlin-quantum-hackathon (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[81] AIDAQ Berlin. *Quantum Column Generation: A Scalable Approach to Public Transport Driver Scheduling (előadó: Dr. Sebastian Senge, Accenture)*. AI & Data Summit / Quantum Summit Berlin, programpont, 2026. szeptember 22–23. 2026. URL: https://aidaq.berlin/program/quantum-column-generation-a-scalable-approach-to-public-transport-driver-scheduling (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[82] Andreas Löbel. *Solving Large-Scale Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problems*. ZIB-Report SC-97-17. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, 1997. URL: https://opus4.kobv.de/opus4-zib/frontdoor/index/index/docId/286 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[83] 권병석. 부산시, 양자기술 선도도시 도약… "지역산업 접목". 파이낸셜뉴스 (Financial News). 2025. aug. URL: https://www.fnnews.com/news/202508051911306496 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[84] Ye Yuan és tsai. „基于量子计算的城市轨道交通网络末班车衔接优化 [Quantum Computing-Based Optimization for the Last-Train Connection Planning Problem in Urban Rail Transit Networks]". 都市快轨交通 *(Urban Rapid Rail Transit)* 37.2 (2024). Beijing Urban MTR Consulting Co.; Pekingi Csiaotung Egyetem; Beijing Bose Quantum (QBoson)., 138–145. old. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.020. URL: https://castjournals.cast.org.cn/joweb/dskgjt/CN/10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.020 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[85] 川崎市. 令和8年度「量子実証 川崎モデル創出事業」採択事業の決定. 2026.08.10.; nyertesek: Zenku Co., Quanmatic Co. 2026. aug. URL: https://www.city.kawasaki.jp/280/page/0000189282.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[86] 川崎市経済労働局イノベーション推進部. 令和8年度「量子実証 川崎モデル創出事業」募集要領. ≤ 325万円 (áfával) projektenként, 100%-os támogatási intenzitás, 2–3 projekt; pályázás 2026-06-02 – 07-07; megvalósítás 2026. 08. – 2027. 02. 2026. jún. URL: https://www.city.kawasaki.jp/280/cmsfiles/contents/0000187/187604/08bosyu-yoryo.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[87] D-Wave Quantum Inc. *DENSO case study*. Egyoldalas esettanulmány (PDF; a fájl metaadatai szerint 2023. november). 2023. URL: https://dwavequantum.com/media/f1hpibxr/denso-case-study2_v3.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[88] Michele Cattelan és Sheir Yarkoni. „Modeling routing problems in QUBO with application to ride-hailing". *Scientific Reports* (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-70649-3.

[89] The Quantum Insider. *Volkswagen Data:Lab and University of Innsbruck Formulate QUBO-Based Solutions for Ride Pooling*. The Quantum Insider, 2024-08-29. 2024. URL: https://thequantuminsider.com/2024/08/29/volkswagen-datalab-and-university-of-innsbruck-formulate-qubo-based-solutions-for-ride-pooling-linking-quantum-computing-to-real-world-optimization-challenges/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[90] Sizhuo Yu és Tahar Nabil. „Applying the Hubbard-Stratonovich Transformation to Solve Scheduling Problems Under Inequality Constraints With Quantum Annealing". *Frontiers in Physics* 9 (2021), 730685. old. DOI: 10.3389/fphy.2021.730685.

[91] Lucas Leclerc és tsai. „Implementing transferable annealing protocols for combinatorial optimisation on neutral atom quantum processors: a case study on smart-charging of electric vehicles". *Physical Review A* 111 (2025), 32611. old. arXiv: 2411.16656.

[92] Nikolaos Schetakis és tsai. *Data re-uploading in Quantum Machine Learning for time series: application to traffic forecasting*. 2025. arXiv: 2501.12776.

[93] Firas Elhag, Tam Bang, Mina Sartipi és Hoang H. Nguyen. *Trustworthy Evaluation of Quantum Message Passing: Isolating Circuit Contributions in Traffic Forecasting*. Poszter, NeurIPS 2026 Workshop on Secure and Trustworthy Quantum Machine Learning (SaTQuML). 2026. URL: https://neurips.cc/virtual/2026/173891 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[94] Mitacs. *Exploring Quantum Computing for Public Transit Origin-Destination Matrix Estimation*. Globalink Research Award projektoldal; Calgaryi Egyetem, partner: Melbourne-i Egyetem; témavezető: Saeid Saidi. Dátum nélkül. URL: https://www.mitacs.ca/fr-ca/nos-projets/exploring-quantum-computing-for-public-transit-origin-destination-matrix-estimation/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[95] Zhuoming Du, Sebastian Wandelt és Xiaoqian Sun. „Overcoming computational challenges in air transportation: A quantum computing perspective of the status quo and future applicability". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 184 (2026), 105505. old. DOI: 10.1016/j.trc.2025.105505.

[96] 日川佳三 (IT Leaders, Impress). *[Hír a JAL és az A-Star Quantum karbantartás-tervező alkalmazásának fejlesztéséről]*. 2023-07-31. 2023. júl. URL: https://it.impress.co.jp/articles/-/25167 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[97] Pontus Vikstål és tsai. „Applying the Quantum Approximate Optimization Algorithm to the Tail-Assignment Problem". *Physical Review Applied* 14 (2020). arXiv:1912.10499, 34009. old.

[98] TNO Quantum Application Lab. *Quantum Annealing for Rostering Optimisation*. Esetleírás, dátum nélkül; Air France–KLM; NGF / Quantum Delta NL. URL: https://qal.tno.nl/use-cases/quantum-annealing-rostering-optimisation/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[99] Sidh Satam, Siddharth Shankar és Rohit Kumar Patel. *Quantum Computing-based Airline Crew Rostering Optimization*. Mphasis NEXT Labs fehér könyv; nyomdai kód 03/02/23. 2023. URL: https://marketingable.mphasis.com/content/dam/mphasis-com/global/en/home/innovation/next-lab/Airline_Crew_Rostering.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[100] Mphasis NEXT Labs. *Quantum Computing-based Airline Crew Pairing Optimization*. Fehér könyv; nyomdai kód 27/11/23. 2023. URL: https://marketingable.mphasis.com/content/dam/mphasis-com/global/en/home/innovation/next-lab/airline-crew-pairing-optimization-whitepaper.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[101] Joseph Doetsch. *Quantum Computing in the Airline Industry*. AIDAQ Berlin, előadás. 2026. URL: https://aidaq.berlin/program/quantum-computing-in-the-airline-industry (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[102] Quantum Computing Report. *Mphasis and Copa Airlines Partner on Global Quantum Computing Challenge for Airline Disruption Management*. 2026-09-24. 2026. szept. URL: https://quantumcomputingreport.com/mphasis-and-copa-airlines-partner-on-global-quantum-computing-challenge-for-airline-disruption-management/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[103] Tobias Stollenwerk, Elisabeth Lobe és Martin Jung. „Flight Gate Assignment with a Quantum Annealer". *Quantum Technology and Optimization Problems (QTOP 2019)*. arXiv:1811.09465. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-14082-3_9.

[104] Yahui Chai és tsai. *Simulating the flight gate assignment problem on a trapped ion quantum computer*. 2023. arXiv: 2309.09686. URL: https://arxiv.org/abs/2309.09686 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[105] Hamed Mohammadbagherpoor és tsai. *Exploring Airline Gate-Scheduling Optimization Using Quantum Computers*. NC State University, IBM, Delta Air Lines; az INFORMS Journal on Computing folyóiratba benyújtva. 2021. arXiv: 2111.09472. URL: https://arxiv.org/abs/2111.09472 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[106] Tabi Zsolt és tsai. „Quantum Optimization for the Graph Coloring Problem with Space-Efficient Embedding". *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*. arXiv:2009.07314. 2020. DOI: 10.1109/QCE49297.2020.00018.

[107] Tabi Zsolt István és tsai. „Quantum-Classical Autoencoder Architectures for End-to-End Radio Communication”. *IEEE Access* (2025). arXiv:2405.18105 (2024-05-28). DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3566207. URL: https://arxiv.org/abs/2405.18105 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[108] EPCC, University of Edinburgh. *Exploring the viability of quantum computing in air traffic control*. Projektoldal, dátum nélkül (2026-os oldal). URL: https://www.epcc.ed.ac.uk/exploring-viability-quantum-computing-air-traffic-control (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[109] SESAR JU. *Why is air traffic management investing in quantum technologies?* 2026. júl. 9. URL: https://www.sesarju.eu/news/why-air-traffic-management-investing-quantum-technologies (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[110] European Commission, CORDIS. *JANUS – Jumpstarting Air Navigation Services with Quantum Solutions (Grant agreement 101287685)*. 2026. URL: https://cordis.europa.eu/project/id/101287685 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[111] European Commission, CORDIS. *NEXT-QCM – Towards Explainable Quantum AI Solutions for Next-Generation Trajectory Optimisation (Grant agreement 101288872)*. 2026. URL: https://cordis.europa.eu/project/id/101288872 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[112] eeNews Europe. *Quantum computing improves air mobility traffic control*. 2021-10-19. 2021. okt. URL: https://www.eenewseurope.com/en/quantum-computing-improves-air-mobility-traffic-control/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[113] D-Wave Quantum Inc. *Quantum in Production: Optimizing E-Commerce Logistics (Pattison Food Group, case story)*. Keltezés nélküli, 2 oldalas esettanulmány; heti 80 → 15 munkaóra, éles üzem 2022 végétől. URL: https://www.dwavesys.com/media/2pnfscch/the-pattison-food-group_case_story_v7-1.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[114] D-Wave Systems. *Sigma-i and D-Wave Announce Largest-Ever Quantum Cloud-Access Contract*. Sajtóközlemény. 2019. júl. 1. URL: https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/sigma-i-and-d-wave-announce-largest-ever-quantum-cloud-access-contract/ (elérés dátuma 2026. 10. 25.).

[115] Finley Alexander Quinton és tsai. „Quantum annealing applications, challenges and limitations for optimisation problems compared to classical solvers”. *Scientific Reports* 15 (2025), 12733. old. DOI: 10.1038/s41598-025-96220-2. URL: https://arxiv.org/abs/2409.05542 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[116] Humberto Munoz-Bauza és Daniel Lidar. „Scaling Advantage in Approximate Optimization with Quantum Annealing”. *Physical Review Letters* 134 (2025), 160601. old.

[117] J. Pawłowski és tsai. „Toward quantum scaling advantage in approximate optimization”. *Physical Review Applied* 26 (2026), 14024. old. DOI: 10.1103/qcws-8kgm.

[118] Pranav Chandarana és tsai. *Runtime Quantum Advantage with Digital Quantum Optimization*. Kipu Quantum; IBM 156 qubites eszközök. Előközlemény. 2025. arXiv: 2505.08663. URL: https://arxiv.org/abs/2505.08663 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[119] J. Tuziemski és tsai. „Limits of quantum run-time advantage”. *Physical Review Applied* 25 (2026). Négy szerző a Quantumz.io-hoz is kötődik., 44084. old. DOI: 10.1103/gpsf-pn1x. arXiv: 2510.06337. URL: https://arxiv.org/abs/2510.06337 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[120] Pau Farré, Erika Ordog, Kevin Chern és Catherine C. McGeoch. *Comparing Quantum Annealing and BF-DCQO*. v2: 2026-10-16. Előközlemény; a szerzők kötődése az oldalon nem szerepel. 2025. arXiv: 2509.14358. URL: https://arxiv.org/abs/2509.14358 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[121] Yuntao Du, Minh Dinh, Kaiyuan Zhang és Ninghui Li. *AutoVerifier: An Agentic Automated Verification Framework Using Large Language Models*. Esettanulmány: arXiv:2505.08663. 2026. arXiv: 2604.02617. URL: https://arxiv.org/abs/2604.02617 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[122] D-Wave Quantum. *CQM Solver Properties*. D-Wave Quantum Computing Products documentation. URL: https://docs.dwavequantum.com/en/latest/industrial_optimization/solver_cqm_properties.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[123] The Quantum Insider. *Quantumz.io Unveils VeloxQ Algorithm That Outperforms Quantum Annealers on Standard Computers*. 2025. URL: https://thequantuminsider.com/2025/09/04/quantumz-io-unveils-veloxq-algorithm-that-outperforms-quantum-annealers-on-standard-computers/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[124] 東芝. 量子インスパイアード最適化ソリューション「*SQBM+*」において、世界最大規模の10億変数に対応し、提供を開始. https://www.afpbb.com/articles/-/3641170. közlekedési eset nincs benne. 2026. jún. 25. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[125] Leo Kroon és tsai. „The New Dutch Timetable: The OR Revolution”. *Interfaces* 39.1 (2009). Franz Edelman-díj, 2008., 6–17. old. DOI: 10.1287/inte.1080.0409. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[126] Erwin Abbink és tsai. „Reinventing Crew Scheduling at Netherlands Railways”. *Interfaces* 35.5 (2005), 393–401. old. DOI: 10.1287/inte.1050.0158.

[127] Ranga Anbil, Eric Gelman, Bruce Patty és Rajan Tanga. „Recent Advances in Crew-Pairing Optimization at American Airlines”. *Interfaces* 21.1 (1991), 62–74. old. DOI: 10.1287/inte.21.1.62.

[128] E. Rod Butchers és tsai. „Optimized Crew Scheduling at Air New Zealand”. *Interfaces* 31.1 (2001), 30–56. old. DOI: 10.1287/inte.31.1.30.9688.

[129] Gang Yu és tsai. „A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines”. *Interfaces* 33.1 (2003), 5–22. old. DOI: 10.1287/inte.33.1.5.12720.

[130] D-Wave Quantum Inc. *D-Wave Announces General Availability of Advantage2 Quantum Computer, Its Most Advanced and Performant System*. https://www.businesswire.com/news/home/20250520948155/en/D-Wave-Announces-General-Availability-of-Advantage2-Quantum-Computer-Its-Most-Advanced-and-Performant-System. 2025. máj.

[131] Quantum Computing Report. *Quantinuum Launches Helios Quantum Computer with Industry-Leading Fidelity and Singapore Partnership*. 2025-11-05. 2025. nov. URL: https://quantumcomputingreport.com/quantinuum-launches-helios-quantum-computer-with-industry-leading-fidelity-and-singapore-partnership/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[132] IBM. *IBM Delivers New Quantum Processors, Software, and Algorithm Breakthroughs on Path to Advantage and Fault Tolerance*. 2025-11-12. 2025. nov. URL: https://newsroom.ibm.com/2025-11-12-ibm-delivers-new-quantum-processors,-software,-and-algorithm-breakthroughs-on-path-to-advantage-and-fault-tolerance (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[133] Quantum Advantage Tracker. *Quantum Advantage Tracker*. Három pálya (observable estimations, variational problems, classically verifiable problems). URL: https://quantum-advantage-tracker.github.io/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[134] IBM. *IBM Quantum Roadmap*. Blue Jay: 2033+, 2000 qubit, 10^9 kapu; Starling: 2029. URL: https://www.ibm.com/roadmaps/quantum/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[135] IonQ. *Industry-leading roadmap*. https://ionq.com/roadmap.

[136] Torsten Hoefler, Thomas Häner és Matthias Troyer. „Disentangling Hype from Practicality: On Realistically Achieving Quantum Advantage”. *Communications of the ACM* 66.5 (2023), 82–87. old. DOI: 10.1145/3571725.

[137] Ryan Babbush és tsai. „Focus beyond quadratic speedups for error-corrected quantum advantage”. *PRX Quantum* 2 (2021), 10103. old. DOI: 10.1103/PRXQuantum.2.010103.

[138] Quantum Computing Report. *Global Consortium Launches Quantum Optimization Benchmarking Library (QOBLIB) to Track Path to Quantum Advantage*. Quantum Computing Report, 2026. augusztus 15. közvetlenül kiolvasva; szerzői sor: „Written by the team at Global Quantum Intelligence”. 2026. aug. 15. URL: https://quantumcomputingreport.com/global-consortium-launches-quantum-optimization-benchmarking-library-qoblib-to-track-path-to-quantum-advantage/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[139] Boston Consulting Group. *Quantum Computing On Track to Create Up to $850 Billion of Economic Value By 2040 (The Long-Term Forecast for Quantum Computing Still Looks Bright)*. https://www.bcg.com/ja-jp/press/23july2024-quantum-computing-create-up-to-850-billion-of-economic-value-2040. Sajtóközlemény. 2024. júl.

[140] McKinsey & Company. *McKinsey Quantum Technology Monitor 2026: A commercial tipping point*. 2026. ápr. URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-technology/our-insights/mckinsey-quantum-technology-monitor-2026-a-commercial-tipping-point (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[141] Department for Transport és Resonance. *Potential Socio-Economic Impacts of Quantum Technologies in UK Transport*. https://gov.uk/government/publications/socio-economic-impacts-of-quantum-technologies-in-transport. A fedőlap dátuma 2024. június, közzététel 2024. 11. 14.; 84 oldal; készítette a Resonance, adatállapot 2024. 04. 30. 2024. nov.

[142] Hitachi. *Hitachi launches work shift optimization solution using CMOS annealing (sajtóközlemény)*. 2020-10-19. 2020. okt. URL: https://www.hitachi.com/en/press/articles/2020/10/1019a/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[143] DB Systel GmbH. *Quantencomputing: Heute schon auf die Rechenmöglichkeiten von morgen vorbereiten*. Weboldal, dátum nélkül. URL: https://www.dbsystel.de/dbsystel/Consulting-und-Innovation/Quantencomputing-9108998 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[144] UK Civil Aviation Authority. *CAP3200 Quantum Technologies Strategic Insight Report*. 2026. jan. 14. URL: https://www.caa.co.uk/data-and-publications/publications/documents/content/cap3200/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[145] Toshiba Europe. *QKD over trackside fibre, Czech Republic (esettanulmány)*. URL: https://www.toshiba.eu/quantum/?p=1420 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[146] Weiss és tsai. „Performance assessment of fiber-optic railway infrastructure QKD testbed by upper bounded deviation method”. *Quantum Information Processing* (2026). DOI: 10.1007/s11128-026-05215-z.

[147] Quantum Communications Hub. *QTRAX: A Pilot Field-Deployment of Continuous Variable Quantum Key Distribution over Track-Side Fibre*. URL: https://www.quantumcommshub.net/?p=5204 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[148] Fraunhofer IIS EAS. *Project SQuIRRL*. URL: https://www.eas.iis.fraunhofer.de/en/application_areas/microelectronics/squirrl.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[149] ComNews. *Услуги магистральной квантовой сети ОАО „РЖД” стали доступны всем заинтересованным потребителям*. 2026. jún. 29. URL: https://www.comnews.ru/content/246222/2026-06-29/2026-w27/1018/uslugi-magistralnoy-kvantovoy-seti-oao-rzhd-stali-dostupny-vsem-zainteresovannym-potrebitelyam (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[150] NCSC. *Quantum networking technologies (white paper)*. módosítva: 2026. április 10. 2025. aug. 5. URL: https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-networking-technologies (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[151] Európai Bizottság. *Quantum (szakpolitikai oldal)*. frissítve: 2026. június 23. URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[152] NIST. *NIST IR 8547 (Initial Public Draft): Transition to Post-Quantum Cryptography Standards*. Tervezet (2024.11.12.); véglegesítve nincs. 2024. nov. URL: https://csrc.nist.gov/pubs/ir/8547/ipd (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[153] Jake Massimo, Panos Kampanakis, Sean Turner és Bas Westerbaan. *Internet X.509 Public Key Infrastructure – Algorithm Identifiers for the Fast-Fourier Transform over NTRU-Lattice-Based Digital Signature Algorithm (FN-DSA)*. IETF Internet-Draft draft-ietf-lamps-fn-dsa-certificates-00. 2026. máj. URL: https://www.ietf.org/archive/id/draft-ietf-lamps-fn-dsa-certificates-00.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[154] Európai Bizottság. *A Bizottság (EU) 2024/1101 ajánlása a posztkvantum-kriptográfiára való átállás összehangolt végrehajtási ütemtervéről*. 2024. ápr. 11. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2024/1101/oj/eng (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[155] NCSC. *Timelines for migration to post-quantum cryptography*. 2025. márc. 20. URL: https://www.ncsc.gov.uk/guidance/pqc-migration-timelines (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[156] Európai Bizottság. *Post-Quantum Cryptography (szakpolitikai oldal)*. Shaping Europe's digital future. utolsó frissítés: 2026. október 20. (az oldal „Last update" adata). 2026. okt. 20. URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/post-quantum-cryptography (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[157] PQShield. *EU PQC Workstream publishes 'A Coordinated Implementation Roadmap for the Transition to Post-Quantum Cryptography'*. 2025. jún. 24. URL: https://pqshield.com/eu-pqc-workstream-publishes-a-coordinated-implementation-roadmap-for-the-transition-to-post-quantum-cryptography/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[158] The Quantum Insider. *South Korea Expands Post-Quantum Security Program Across Critical Sectors*. 2026. máj. 6. URL: https://thequantuminsider.com/2026/05/06/korea-expands-post-quantum-cryptography-pilot/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[159] ICAO. *SP03 – ICAO AI.9 Trust Framework Panel Updates (CNS SG/30)*. 2026. URL: https://www.icao.int/sites/default/files/APAC/Meetings/2026/Workshop%20on%20achieving%20High%20Resilience%20in%20Sustaining%20Operations%20of%20Critical%20Aeronautical%20Infrastructure%20and%20CNS%20SG30/05-Presentations/SP03_ICAO-AI.9-Trust-Framework-Panel-Updates.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[160] Michael Ward. *Quantum Computing and EMV Chip: What's the Threat?* EMVCo; frissítve a 2026. augusztus 24-i második állásfoglalással. 2025. jún. 3. URL: https://www.emvco.com/knowledge-hub/quantum-computing-and-emv-chip-whats-the-threat/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[161] Európai Parlament és a Tanács. *Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/2555 irányelve (NIS2)*. I. melléklet, 2. pont „Közlekedés". 2022. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[162] Európai Parlament, Legislative Observatory. *2026/0012(COD) – Amending the NIS 2 Directive as regards simplification measures and alignment with the Cybersecurity Act 2*. COM(2026) 13; ITRE; előadó: Markéta Gregorová. 2026. URL: https://oeil.europarl.europa.eu/oeil/en/procedure-file?reference=2026/0012(COD) (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[163] Lutz Riede és tsai. *EU Cybersecurity Package: Commission proposes targeted NIS2 amendments and a revised Cybersecurity Act*. Freshfields, Technology Quotient blog. 2026. jan. 27. URL: https://www.freshfields.com/en/our-thinking/blogs/technology-quotient/eu-cybersecurity-package-commission-proposes-targeted-nis2-amendments-and-a-revi-102me35 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[164] European Union Agency for Railways. *SUBSET-137: ERTMS/ETCS On-line Key Management FFFIS, version 4.0.0*. Techn. jel. European Union Agency for Railways, 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index083_-_SUBSET-137_v400.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[165] European Union Agency for Railways. *SUBSET-146: ETCS End-to-End Security, version 4.0.0*. Techn. jel. European Union Agency for Railways, 2023. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index010d_-_SUBSET-146_v400.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[166] Kacper Darowski, Sebastian N. Peters és Lukas Lautenschlager. *Systematic Cybersecurity Risk Analysis of European Rail Traffic Management System*. v2: 2026. június 23.; az ARES 2026 CPRA-műhelyén elfogadott cikk bővített változata. 2026. arXiv: 2606.11839 [cs.CR]. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[167] Europe's Rail System Pillar, Cybersecurity Domain. *Migration Guideline, Version 1.1 (SP-SEC-MigGuide)*. rev. 856528, 20 oldal; feltöltve 2026 áprilisában. 2026. márc. 23. URL: https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2026/04/SP-SEC_Migration-Guideline_1.1_Released.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[168] UIC. *uicBarcodeHeader_v2.0.1.asn (UIC-barcode repozitórium)*. URL: https://github.com/UnionInternationalCheminsdeFer/UIC-barcode/blob/master/asn-specs/uicBarcodeHeader_v2.0.1.asn (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[169] NIST. *FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard*. 2024. aug. 13. URL: https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[170] KDE. *KItinerary API-dokumentáció: VdvTicketParser*. URL: https://api.kde.org/kdepim/kitinerary/html/classKItinerary_1_1VdvTicketParser.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[171] Calypso Networks Association. *Calypso Legacy Prime Certificate Generation Tool (Keyple)*. frissítve: 2026. március 4. URL: https://keyple-support.calypsonet.org/add-ons/tool/certificate-legacyprime/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[172] Calypso Networks Association. *CNA User Days 2025: 3 Key Takeaways*. 2025. dec. 18. URL: https://calypsonet.org/three-key-takeaways-from-the-cna-user-days/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[173] ETSI TC CYBER. *ETSI TR 103 949 V1.1.1 (2023-05): Quantum-Safe Cryptography (QSC) Migration; ITS and C-ITS migration study*. DTR/CYBER-QSC-0018. 2023. máj. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103900_103999/103949/01.01.01_60/tr_103949v010101p.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[174] Geoff Twardokus, Nina Bindel, Hanif Rahbari és Sarah McCarthy. „When Cryptography Needs a Hand: Practical Post-Quantum Authentication for V2V Communications". *Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*. 2024. DOI: 10.14722/ndss.2024.24267.

[175] Marcel Tiepelt, Christian Martin és Nils Maeurer. *Post-Quantum Ready Key Agreement for Aviation*. IACR Cryptology ePrint Archive, Paper 2024/1096 (a CIC 2024 publikáció kisebb javítása). 2024.

[176] IATA. *EASA and IATA Publish Comprehensive Plan to Mitigate the Risks of GNSS Interference*. 2025. jún. 18. URL: https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-06-18-01/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[177] EASA. *Global Navigation Satellite System Outages and Alterations (SIB 2022-02R4)*. FIR-táblák: 2026. október 14. 2026. júl. 3. URL: https://www.easa.europa.eu/en/domains/air-operations/global-navigation-satellite-system-outages-and-alterations (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[178] DefenseScoop. *DIU, Honeywell Aerospace flight test MagNav system*. 2026. szept. 8. URL: https://defensescoop.com/2026/09/08/diu-honeywell-aerospace-flight-test-magnav-system/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[179] DSIT. *Un-jammable quantum tech takes flight to boost UK's resilience against hostile actors*. 2024. máj. 13. URL: https://www.gov.uk/government/news/un-jammable-quantum-tech-takes-flight-to-boost-uks-resilience-against-hostile-actors (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[180] Boeing. *Beyond GPS (Boeing Innovation Quarterly)*. 2025. márc. 11. URL: https://www.boeing.com/innovation/innovation-quarterly/2025/03/beyond-gps-quantum-navigation-flight-test (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[181] SandboxAQ. *SandboxAQ and Acubed Achieve Remarkable Progress in Magnetic Navigation*. 2025. júl. 15. URL: https://www.sandboxaq.com/post/sandboxaq-and-acubed-achieve-remarkable-progress-in-magnetic-navigation (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[182] Railway Gazette. *Quantum train location testing on the London Underground*. 2024. márc. 5. URL: https://www.railwaygazette.com/metro/quantum-train-location-testing-on-the-london-underground/66026.article (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[183] The Naked Scientists. *Tracking trains with quantum mechanics*. számszerű eredményt nem közöl. 2025. febr. 14. URL: https://www.thenakedscientists.com/node/202938 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[184] Ben Stray és tsai. „Quantum sensing for gravity cartography". *Nature* 602.7898 (2022), 590–594. old. DOI: 10.1038/s41586-021-04315-3.

[185] University of Birmingham. *National Buried Infrastructure Facility: Quantum technology sensing*. URL: https://www.birmingham.ac.uk/research/centres-institutes/uk-collaboratorium-for-research-on-infrastructure-and-cities/national-buried-infrastructure-facility-nbif/nbif-research-capabilities/quantum-technology-sensing (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[186] University of Birmingham. *Delta.g secures £4.6 Million in oversubscribed seed round to advance quantum sensing*. 2025. szept. 26. URL: https://www.birmingham.ac.uk/news/2025/delta.g-secures-4.6-million-in-oversubscribed-seed-round-to-advance-quantum-sensing (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[187] UKRI. *Contracts for Innovation: quantum technologies for transport, phase 1*. 2025. szept. 23. URL: https://www.ukri.org/opportunity/contracts-for-innovation-quantum-technologies-for-transport-phase-1 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[188] Inventya. *Contracts for Innovation: Quantum Technologies for Transport – Phase 1*. URL: https://www.inventya.com/calls/contracts-for-innovation-quantum-technologies-for-transport-phase-1 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[189] Muhammad Mahmudul Hasan, Ingrid Torres és Alex Krasnok. *Quantum Magnetometers for Infrastructure Inspection and Monitoring*. beküldve: 2026. március 25. 2026. arXiv: 2604.03288 [physics.app-ph]. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[190] Adtran. *Deutsche Bahn brings 5G timing to German railways to meet new FRMCS standards with Adtran*. 2023. okt. 19. URL: https://www.adtran.com/en/newsroom/press-releases/20231019-deutsche-bahn-brings-5g-timing-to-german-railways-to-meet-new-frmcs-standards-with-adtran (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[191] Constanza M. Vidal Bustamante. *Atomic Advantage*. CNAS. 2025. máj. 28. URL: https://www.cnas.org/publications/reports/atomic-advantage (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[192] DSIT. *National Quantum Strategy Missions*. frissítve: 2023. december 14. 2023. URL: https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[193] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. *The DLR Quantum Computing Initiative (DLR QCI)*. https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/featured-topics/quantum-technologies/the-dlr-quantum-computing-initiative-qci. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[194] European Commission. *EU's plan to become a global leader in quantum by 2030*. https://commission.europa.eu/news-and-media/news/eus-plan-become-global-leader-quantum-2030-2025-07-02_en. 2025. júl.

[195] Európai Parlament. *Legislative Train: Quantum Act*. frissítve: 2026. szeptember 20. URL: https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-plan-for-europe-s-sustainable-prosperity-and-competitiveness/file-quantum-act (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[196] Daniel A. LeMaster és Prachi Vakharia. *Quantum Technologies in Transportation*. Techn. jel. 2024. decemberi második példánya is van a minisztérium oldalán. U.S. Department of Transportation, Office of the Assistant Secretary for Research és Technology (HASS COE, ARPA-I), 2024. nov. URL: https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2024-11/USDOT_Quantum_Workshop_Report_Nov2024.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[197] Innovate UK. *SBRI: Quantum Catalyst Fund, phase 1 and phase 2*. https://apply-for-innovation-funding.service.gov.uk/competition/1596/overview/52a420f3-3536-416b-882b-87b23c19064c. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[198] Fraunhofer ITWM. *Projekt EniQmA: Hybrid Quantum Computing Meets Use Cases*. Projektoldal. URL: https://www.itwm.fraunhofer.de/en/fields-of-application/quantum-computing/eniqma.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[199] TRID. *Towards Deployment-Ready Post-Quantum Cryptography Enabled Vehicle-to-Everything Communication*. USDOT UTC-program, TraCR központ. 2025. márc. 31. URL: https://trid.trb.org/View/2531081 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[200] DLR Quantencomputing-Initiative. *Contractor wanted for QCMobility | Rail Transport*. 2024. febr. URL: https://qci.dlr.de/en/contractor-wanted-for-qcmobility-rail-transport/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[201] Airbus. *Meet the Airbus Quantum Computing Challenge's five finalist teams*. 2020. okt. 12. URL: https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-meet-the-airbus-quantum-computing-challenges-five-finalist-teams (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[202] Reply. *Machine Learning Reply Wins the Airbus Quantum Computing Challenge*. Sajtóközlemény, 2020-12-17. 2020. dec. URL: https://www.businesswire.com/news/home/20201217005030/en/Reply-Machine-Learning-Reply-Wins-the-Airbus-Quantum-Computing-Challenge (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[203] STAT Times. *IonQ, Airbus sign agreement to collaborate on aircraft loading project using quantum computing*. 2022. aug. URL: https://www.stattimes.com/amp/aviation/ionq-airbus-sign-agreement-to-collaborate-on-aircraft-loading-project-using-quantum-computing-1346287 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[204] Ananth Kaushik és tsai. *Quantum Computing for Optimizing Aircraft Loading*. IonQ Inc.; Airbus. 2025. arXiv: 2504.01567. URL: https://arxiv.org/abs/2504.01567 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[205] Matt Langione és tsai. *Quantum Is Getting Real. CEOs Need to Shape Where It Creates Value*. https://www.bcg.com/publications/2026/ceos-need-to-shape-where-quantum-creates-value. 2026. jún.

[206] *90/2026. (V. 13.) Korm. rendelet a Kormány tagjainak feladat- és hatásköréről*. Nemzeti Jogszabálytár, 2026.10.20-i állapot. Módosítások: 139/2026. (VIII. 31.) és 281/2026. (X. 19.) Korm. rendelet. Hivatkozott: 43. §, 106–113. §, 168–175. §, 197/A. §, 1. melléklet. 2026. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2026-90-20-22 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[207] *1208/2026. (VI. 25.) Korm. határozat a közösségi közlekedés versenyképességének és hatékonyságának javításával összefüggő intézkedésekről, az országos közlekedésszervező és az országos gördülőállomány-kezelő társaság létrehozásáról*. Nemzeti Jogszabálytár. a Magyar Közlöny száma nem került megállapításra. 2026. jún. 25. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2026-1208-30-22 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[208] *5/2026. (VIII. 13.) KBM rendelet az országos közlekedésszervező kijelöléséről, működésének kereteiről és feladatainak ellátásáról*. Nemzeti Jogszabálytár. A kijelölt társaság: OKK Országos Közlekedési Központ Zrt. 2026. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2026-5-20-9J (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[209] *6/2026. (VIII. 13.) KBM rendelet a gördülőállomány-kezelő társaság kijelöléséről*. Nemzeti Jogszabálytár. 2026. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2026-6-20-9J (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[210] MÁV-csoport. *MÁV Személyszállítási Zrt. – bemutatkozás*. URL: https://www.mavcsoport.hu/mav-szemelyszallitas/bemutatkozas/mav-szemelyszallitasi-zrt (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[211] MÁV-csoport. *Előkészítés alatt a vonalátadás-átvétel a MÁV-csoport és a GYSEV között*. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/node/161436 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[212] Budapesti Közlekedési Központ. *Rólunk*. URL: https://bkk.hu/rolunk/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[213] BKV Zrt. *BKV has replaced nearly ten percent of its buses with modern vehicles*. 2026. február 9. 2026. URL: https://bkv.hu/en/content/bkv-has-replaced-nearly-ten-percent-of-its-buses-with-modern-vehicles-09022026 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[214] Wizz Air Holdings Plc. *Results for the 12 months to 31 March 2026*. RNS-közlemény (Investegate), 2026. június 11. 2026. URL: https://www.investegate.co.uk/announcement/rns/wizz-air-holdings--wizz/final-results/9612330 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[215] Jandó Zoltán. *Milliárdos üzlet a budapesti jelzőlámpák üzemeltetése*. Telex (G7), 2025. december 20. 2025. URL: https://telex.hu/g7/vallalat/2025/12/20/jelzolampa-uzemeltetes-budapest-milliard (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[216] Világgazdaság. *Interjú Turi Ferenccel, a HungaroControl vezérigazgatójával*. 2026. január 20. 2026. URL: https://www.vg.hu/vilaggazdasag-magyar-gazdasag/2026/01/hungarocontrol-turi-behatolo-fapados-menetrend (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[217] MÁV-csoport. *10 miniszteri vállalás: 1000 új busszal a VOLÁN-flotta…* 2025. október 15. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/print/175982 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[218] MÁV-csoport. *Működési statisztika (pályavasút)*. URL: https://www.mavcsoport.hu/palyavasut/mukodesi-statisztika (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[219] HungaroControl. *HungaroControl 2025. évi éves jelentés / Annual report 2025*. 2026. URL: https://www.hungarocontrol.hu/download/f36c2dfda355807b6b7880a915c0f242.hc-2025-eves-jelentes.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[220] Tüke Busz Zrt. *Jelenünk*. 144 autóbusz (60 csuklós, 84 szóló, 18 elektromos), típustábla, 17 136 férőhely; 150 km, 514 megálló, 80+7 viszonylat; 1 802 / 1 095 / 1 096 járat; 2025: 32 044 ezer utas; cégtörténet (közszolgáltatási szerződés 2012.04.01., tízéves megbízás 2018.07.01-től). URL: https://tukebusz.hu/jelenunk/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[221] DKV Debreceni Közlekedési Zrt. *Történetünk*. Flottacsere 2022.01.03-tól, 2024. októberig 119 új busz; 12 eCitaro (2022. aug.); szerződés: busz 2031.06.30-ig, villamos és troli 2036.12.31-ig. URL: https://www.dkv.hu/szolgaltatasok-es-vallalati-informaciok/tortenetunk (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[222] Interreg Europe, EXPRESS II. *EXPRESS II Study visit, PP4 Hungary (DKV-előadás)*. 2023. URL: https://www.interregeurope.eu/sites/default/files/2023-12/EXPRESS_II%20Study%20visit_PP4_Hungary.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[223] Békési József és Nagy Albert. „Combined Vehicle and Driver Scheduling with Fuel Consumption and Parking Constraints: a Case Study". *Acta Polytechnica Hungarica* 17.7 (2020). A BKV számára fejlesztett döntéstámogató rendszer esettanulmánya; 20 valós példány (1–3. táblázat)., 45–65. old. DOI: 10.12700/APH.17.7.2020.7.3. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[224] Budapesti Közlekedési Központ. *Új, innovatív buszjárat Budapesten: rugalmas útvonalon, az utasok igénye szerint közlekedik majd a 274-es busz*. BKK-hír, 2025. augusztus 15. 2025. URL: https://bkk.hu/hirek/2025/08/uj-innovativ-buszjarat-budapesten-rugalmas-utvonalon-az-utasok-igenye-szerint-kozlekedik-majd-a-274-es-busz.15155/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[225] Dávid Balázs. „Gyakorlatorientált ütemezési problémák a közösségi buszközlekedésben (Application-oriented scheduling problems in public bus transportation)". Témavezető: Krész Miklós; védés: 2018. november 26. Dissz. Szegedi Tudományegyetem, Informatika Doktori Iskola, 2018. URL: https://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/9745/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[226] IVU Traffic Technologies AG. *Hungarian State Railway MÁV-START extends use of IVU.rail*. Sajtóközlemény. Az oldal 2026 októberében nem érhető el. 2017. nov. 7. URL: https://ivu.com/news/details/hungarian-state-railway-mav-start-extends-use-of-ivurail (elérés dátuma 2026. 10. 25.).

[227] IVU Traffic Technologies AG. *IVU establishes subsidiary in Hungary*. 2022. július 12. 2022. URL: https://www.ivu.com/news/details/ivu-establishes-subsidiary-in-hungary (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[228] IVU Traffic Technologies AG. *IVU.suite at BKK (referencia)*. Frissítve 2024. július. URL: https://www.ivu.com/en/all-references/references/ivusuite-at-bkk (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[229] Pósalaki László. *Time in TIMEtabling (előadás)*. VPE Vasúti Pályakapacitás-elosztó Kft. Dátum nélkül. URL: https://vpe.hu/document/5945/10_VPE_L%C3%A1szl%C3%B3+P%C3%B3salaki_Time+in+TIMEtabling.pptx.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[230] B. Horváth Lilla. *Az ajtó és a küszöb között a VPE lába*. Világgazdaság. 2020. június 10. 2020. URL: https://www.vg.hu/vilaggazdasag/2020/06/az-ajto-es-a-kuszob-kozott-a-vpe-laba (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[231] Tenders On Time. *Further development and operation of KAPELLA2 in 2026 (közbeszerzési hirdetmény kivonata)*. 2026. URL: https://www.tendersontime.com/tenders-details/further-development-and-operation-kapella2-2026-86a42ea/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[232] MÁV-csoport. *IT projektek a MÁV-csoportnál – IKOP*. Közzétéve 2025. december 3., módosítva 2026. június 8. URL: https://www.mavcsoport.hu/print/179968 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[233] Békési József, Galambos Gábor és Papp Imre. „Automatic Planning of Vehicle and Driver Schedules for Public Transportation: A Case Study". *Proceedings of the 17th International Symposium on Operational Research in Slovenia (SOR 2023)*. A BKV-nál végzett valós kísérleteken alapuló esettanulmány; a rendszer integrálása a vállalati információs rendszerbe. Ljubljana: Slovenian Society Informatika, 2023, 93–96. old. URL: http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/35625 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[234] Budapesti Közlekedési Központ. *Fejlesztőknek (GTFS)*. URL: https://bkk.hu/fejlesztesek/fejlesztoknek/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[235] MÁV-csoport. *GTFS letöltési igénybejelentő*. MÁV-csoport, Fejlesztőknek (GTFS). URL: https://www.mavcsoport.hu/print/16387 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[236] MobilityData. *Szegedi Közlekedési Társaság – GTFS Schedule feed (mdb-887)*. Hivatalos feed, 47 viszonylat; érvényesség 2026.06.10–10.05. URL: https://mobilitydatabase.org/feeds/gtfs/mdb-887 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[237] MobilityData. *BIOKOM – GTFS Schedule feed (mdb-861)*. Hivatalos feed, 85 buszviszonylat; érvényesség 2026.08.28–12.18. URL: https://mobilitydatabase.org/feeds/gtfs/mdb-861 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[238] Airport Technology. *Wizz Air selects Sabre to optimise scheduling*. airport-technology.com, 2019. december 5. 2019. URL: https://www.airport-technology.com/?p=148401 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[239] Wizz Air Malta Hungarian Branch Office. *Crew Short Term Planner (Budapest) – álláshirdetés*. Wizz Air karrieroldal, feladva 2026. október 3. Álláshirdetés; a tartalom később változhat vagy eltűnhet. 2026. URL: https://careers.wizzair.com/job/Budapest-Crew-Short-Term-Planner-H-1095/1423986233/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[240] INFORM GmbH. *Airport Resource Management (GroundStar)*. Gyártói oldal; a Budapest Airport csak logóként szerepel a referenciák között. URL: https://inform-software.com/en/solutions/aviation-ground-operations/airport-resource-management (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[241] INFORM GmbH. *Budapest Airport: GroundStar human resource suite (sajtóközlemény)*. airport-technology.com. Keltezetlen; A cím rekonstruált. URL: https://airport-technology.com/contractors/data//pressreleases/press8-16 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[242] Telex. *Tele van kérdőjelekkel az álomszerű utasszám-növekedés, amit a MÁV kommunikál*. 2024. július 25. 2024. URL: https://telex.hu/g7/penz/2024/07/25/tele-van-kerdojelekkel-az-alomszeru-utasszam-novekedes-amit-a-mav-kommunikal (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[243] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *National Implementation Plan ERTMS – Hungary (2024)*. 2025. márc. URL: https://transport.ec.europa.eu/document/download/84afe55b-4e96-4ebb-bc4c-9cb72b2c4acc_en?filename=NIP_ERTMS_2024_HU.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[244] *2024. évi LXIX. törvény Magyarország kiberbiztonságáról*. Nemzeti Jogszabálytár. Hivatkozott: 13. §, 16. §, 23. §, 89. §, 1–3. melléklet. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2024-69-00-00 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[245] QCIHungary konzorcium. *QCIHungary – Deploy Advanced Quantum Communication Infrastructure in Hungary*. URL: https://qcihungary.hu/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[246] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. *Cyber security: quantum-based encryption test*. 2025. április 28.; bemutató: 2025. április 22. 2025. URL: https://www.bme.hu/en/news/250428/cyber-security-quantum-based-encryption-test (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[247] HUN-REN SZTAKI. *Quantum and supercomputing platform launched – HUN-REN SZTAKI founding member*. 2025. október 22. 2025. URL: https://sztaki.hun-ren.hu/en/current/news/2025/quantum-and-supercomputing-platform-launched-hun-ren-sztaki-founding-member (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[248] HUN-REN SZTAKI. *Quantum @ SZTAKI*. Kvantum-referenciaarchitektúra a HUN-REN Cloudon, külföldi QPU-hozzáférés. URL: https://q.sztaki.hun-ren.hu/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[249] EuroHPC Joint Undertaking. *Our quantum computers*. URL: https://eurohpc-ju.europa.eu/supercomputers/our-quantum-computers_en (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[250] European Commission. *The European High Performance Computing Joint Undertaking*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/high-performance-computing-joint-undertaking.

[251] HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont. *Nemzeti Kvantumtechnológiai Program (HunQuTech)*. URL: https://wigner.hu/s/quantumtechnology/projekt/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[252] Aradi Szilárd és Lövétei István. „Valós idejű forgalmi konfliktus feloldása matematikai optimalizációval". *Vasúti Vezetékvilág* 6.2 (2022), 22–28. old. URL: https://real.mtak.hu/205734/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[253] Koniorczyk Mátyás, Talas Borbála és Gedeon Ferenc. „Preconditioning in the Backtracking Duty Generation of Passenger Rail Crew Scheduling: A Case Study". *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina* 17.2 (2015), 23–29. old. DOI: 10.26552/com.C.2015.2.23-29. URL: https://komunikacie.uniza.sk/artkey/csl-201502-0004_preconditioning-in-the-backtracking-duty-generation-of-passenger-rail-crew-scheduling-a-case-study.php (elérés dátuma 2026. 10. 25.).

[254] The Quantum Insider. *Quantum Machines Acquires PCB Engineering and Opens Budapest R&D Hub*. 2026. június 17. 2026. URL: https://thequantuminsider.com/2026/06/17/quantum-machines-acquires-pcb-engineering-and-opens-budapest-rd-hub/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[255] IVSZ. *IVSZ Kvantum Munkacsoport 2026-os munkaterve*. 2026. jún. URL: https://ivsz.hu/wp-content/uploads/2026/06/2026_Kvatum_munkaterv.docx (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[256] MÁV Pályaműködtetési Zrt. *Állomási Végrehajtási Utasítás – Budapest-Keleti*. 32507-2/2025/PALYA. Hatálybalépés: 2025.12.14.; 2. sz. módosítás: 2026.06.20. Állomásfőnökség Budapest-Keleti. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/sites/default/files/upload/page/budapest-keleti.zip (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[257] MÁV Pályaműködtetési Zrt. *Állomási Végrehajtási Utasítás – Budapest-Nyugati*. 32507-3/2025/PALYA. Hatálybalépés: 2025.12.14. Budapest-Nyugati Állomásfőnökség. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/sites/default/files/upload/page/budapest-nyugati.zip (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[258] MÁV Pályaműködtetési Zrt. *Állomási Végrehajtási Utasítás – Budapest-Déli*. 32507-4/2025/PALYA. Hatálybalépés: 2025.12.14.; 1. sz. módosítás: 2026.06.20.; 2. sz. módosítás: 2026.09.21. Állomásfőnökség Budapest-Déli. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/sites/default/files/upload/page/budapest-deli.zip (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[259] MÁV Pályaműködtetési Zrt. *Állomási Végrehajtási Utasítás – Budapest-Kelenföld*. 34211/2025/PALYA. Hatálybalépés: 2025.12.14. Állomásfőnökség Budapest-Kelenföld. 2025. URL: https://www.mavcsoport.hu/sites/default/files/upload/page/budapest-kelenfold.zip (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[260] Budapesti Közlekedési Központ. *A BKK számokban*. Az adatok évszám nélküliek; a legkésőbbi évszámos adat 2022-es. URL: https://bkk.hu/magunkrol/rolunk/a-bkk-szamokban/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[261] MVK Zrt. *Már online is megrendelhetők az MVK Zrt. igényvezérelt járatai*. Hír, 2026. szeptember 1. ÚtraKész felület (utrakesz.mvkzrt.hu); telefonos foglalás továbbra is; legkésőbb 30 perccel az indulás előtt. A cím az URL alapján. 2026. URL: https://www.mvkzrt.hu/utazasi-informaciok/hirek/mar-online-megrendelhetok-az-mvk-zrt-igenyvezerelt-jaratai (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[262] Budapesti Közlekedési Központ. *Több száz új elektromos busz beszerzését készíti elő a BKK és a BKV*. 2026. július 17. 2026. URL: https://bkk.hu/hirek/2026/07/tobb-szaz-uj-elektromos-busz-beszerzeset-kesziti-elo-a-bkk-es-a-bkv.17003/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[263] Marika Svensson és tsai. „Hybrid Quantum-Classical Heuristic to Solve Large-Scale Integer Linear Programs”. *Physical Review Applied* 20.3 (2023). Jeppesen és Chalmers., 34062. old. arXiv: 2103.15433. URL: https://arxiv.org/abs/2103.15433 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[264] Margarita Veshchezerova és tsai. „A Hybrid Quantum-Classical Approach to the Electric Mobility Problem”. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*. 1. köt. 2023, 636–641. old. DOI: 10.1109/QCE57702.2023.00078. URL: https://arxiv.org/abs/2310.02760 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[265] BKV Zrt. *Fleet inspection at BKV completed: bus transport is safe and stable*. Közlemény, 2025. szeptember 1. 855 átvizsgált busz (2025.08.14–29.); átlagéletkor 12,8 év; „a flotta fele, 420 jármű” csereérett. 2025. URL: https://bkv.hu/en/content/fleet-inspection-at-bkv-completed-bus-transport-is-safe-and-stable-01092025 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[266] MÁV Zrt. *MÁV Zrt. 2025. évi konszolidált éves beszámoló*. Kelte: 2026. június 18. 2026. URL: https://www.mavcsoport.hu/sites/default/files/upload/page/mav_zrt_2025_evi_konszolidalt_eves_beszamolo.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[267] Budapesti Közlekedési Központ. *A Google és a BKK harmonizált lámpahangolással segíti a közlekedőket Budapesten*. BKK-hír, 2023. október 10. 2023. URL: https://bkk.hu/hirek/2023/10/a-google-es-a-bkk-harmonizalt-lampahangolassal-segiti-a-kozlekedoket-budapesten.10992/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[268] Budapesti Közlekedési Központ. *Telebusz*. URL: https://bkk.hu/utazasi-informaciok/kozossegi-kozlekedes/telebusz/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[269] Európai Bizottság. *A Bizottság (EU) 2023/1695 végrehajtási rendelete (2023. augusztus 10.) az Európai Unió vasúti rendszerének ellenőrző-irányító és jelző alrendszereire vonatkozó átjárhatósági műszaki előírásokról és a 2016/919/EU rendelet hatályon kívül helyezéséről*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj. Valószínűleg az eredeti, 2023-as szöveg. 2023. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[270] Európai Parlament és Európai Unió Tanácsa. *Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2016/797 irányelve (2016. május 11.) az Európai Unión belüli vasúti rendszer kölcsönös átjárhatóságáról*. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/797/oj. 2016. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[271] European Union Agency for Railways. *Amendment to the CCS TSI enters into force*. 2026-05-06. 2026. máj. URL: https://www.era.europa.eu/content/amendment-ccs-tsi-enters-force (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[272] World Economic Forum és Deloitte. *Quantum Readiness Toolkit: Building a Quantum-Secure Economy*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Readiness_Toolkit_2023.pdf. 2023. jún.

[273] Michal Křelina. *Qubity: Nobelova cena pro kvantové počítače, ČR má národní kvantovou strategii a postaví síť*. Lupa.cz. 2025. okt. URL: https://www.lupa.cz/clanky/qubity-nobelova-cena-pro-kvantove-pocitace-cr-ma-narodni-kvantovou-strategii-a-postavi-sit/ (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[274] MÁV-csoport. *Idén több mint 900 kilométeren üzemel be korszerű vasúti mobilkommunikációs rendszert a MÁV és a GYSEV*. 2020. július 3. 2020. URL: https://www.mavcsoport.hu/node/73369 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[275] EuroHPC Joint Undertaking. *Inauguration of PIAST-Q: A Leap for European Quantum Computing*. 2025. URL: https://www.eurohpc-ju.europa.eu/inauguration-piast-q-leap-european-quantum-computing-2025-06-23_en (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[276] EuroHPC Joint Undertaking. *VLQ: Europe's next leap towards quantum-powered research and innovation*. 2025. URL: https://eurohpc-ju.europa.eu/vlq-europes-next-leap-towards-quantum-powered-research-and-innovation-2025-09-23_en (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[277] Magyarország. *2015. évi CXLIII. törvény a közbeszerzésekről*. 2026.09.01-jén hatályos szöveg; 9. § (8) I), 95–97. §. 2015. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2015-143-00-00 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[278] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. *Pályázati felhívás az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program Kooperatív Doktori Programhoz (EKÖP-KDP-25), 2025/2026. tanév*. Közzétéve 2025-04-28, az NKFI Hivatal 2025-03-31-i jóváhagyásával; 19 oldal. 2025. ápr. URL: https://kozlekedes.bme.hu/wp-content/uploads/2025/04/EKOP-KDP-25-Felhivas.pdf (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[279] European Commission. *HPC EDIH HU – EDIH catalogue*. Projektvezető: KIFÜ; kedvezményezettek: Bay Zoltán Nonprofit Kft., KTI. URL: https://european-digital-innovation-hubs.ec.europa.eu/edih-catalogue/hpc-edih-hu (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[280] Európai Parlament és Tanács. *(EU) 2016/679 rendelet a természetes személyeknek a személyes adatok kezelése tekintetében történő védelméről és az ilyen adatok szabad áramlásáról (általános adatvédelmi rendelet)*. 2016. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[281] Európai Bizottság. *(EU) 2023/1795 végrehajtási határozat az EU–USA adatvédelmi keret szerinti megfelelő védelemről*. 2023. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2023/1795/oj (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[282] WilmerHale. *European Court of Justice to Review Challenge to EU-U.S. Data Privacy Framework*. T-553/23 (2025.09.03.) és C-703/25 P (fellebbezés 2025.10.31.) 2025. dec. URL: https://www.wilmerhale.com/en/insights/blogs/wilmerhale-privacy-and-cybersecurity-law/20251201-european-court-of-justice-to-review-challenge-to-eu-us-data-privacy-framework (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[283] D-Wave. *D-Wave and Forschungszentrum Jülich Launch First In-Region Commercial Quantum Computer for European Access*. 2022-01-17; eu-central-1 régió. 2022. jan. URL: https://dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-and-forschungszentrum-julich-launch-first-in-region-commercial-quantum-computer-for-european-access (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[284] EuroHPC Joint Undertaking. *Access to EuroHPC Systems: Access Policy and FAQ*. https://eurohpc-ju.europa.eu/access-our-supercomputers/access-policy-and-faq_en. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[285] Magyarország. *2012. évi I. törvény a munka törvénykönyvéről*. 264. § (1)–(2). 2012. URL: https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2012-1-00-00 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[286] Európai Parlament és Tanács. *2014/24/EU irányelv a közbeszerzésről és a 2004/18/EK irányelv hatályon kívül helyezéséről*. HL L 94., 2014. 3. 28., 65–242. o. 14. cikk és (47) preambulumbekezdés; a szöveg a legislation.gov.uk uniós tükréből, mert az EUR-Lex üres választ adott. 2014. URL: https://www.legislation.gov.uk/eudr/2014/24/article/14 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[287] Európai Bizottság, Kutatási és Innovációs Főigazgatóság. *Pre-commercial procurement*. A PCP meghatározása, szakaszai, szellemitulajdon-megosztás; hivatkozás a COM:2007:0799:FIN és a SEC(2007) 1668 dokumentumra. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/support-policy-making/shaping-eu-research-and-innovation-policy/new-european-innovation-agenda/procurement-information-and-communication-technology-ict-innovation/pre-commercial-procurement_en (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[288] Európai Bizottság. *A kutatáshoz, fejlesztéshez és innovációhoz nyújtott állami támogatások keretszabálya (2022/C 414/01)*. HL C 414., 2022. 10. 28., 1–38. o. 2022. URL: https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/state-aid-framework-for-research-and-development-and-innovation-rdi-framework.html (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[289] Mondaq. *The new R&D&I State aid framework and public procurement of R&D services*. 2022. URL: https://www.mondaq.com/Article/319142 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[290] IBM. *IBM Quantum pricing*. https://www.ibm.com/quantum/pricing. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[291] Amazon Web Services. *Amazon Braket Pricing*. https://aws.amazon.com/braket/pricing/. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[292] Microsoft. *Pricing Plans for Azure Quantum Providers*. https://learn.microsoft.com/azure/quantum/pricing. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[293] D-Wave Quantum Inc. *Leap Quantum Cloud Service*. https://www.dwavequantum.com/solutions-and-products/cloud-platform/. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[294] Fujitsu és Toyota Systems. *Fujitsu and Toyota Systems Optimize Large-Scale Supply Chain Logistics Using Quantum-Inspired Technology*. https://info.archives.global.fujitsu/global/about/resources/news/press-releases/2020/0910-02.html. 2020. szept.

[295] SESAR 3 Joint Undertaking. *Digital European Sky 2025 calls attract record interest from the aviation community*. https://www.sesarju.eu/node/5212. 2025. szept.

[296] Accelopment. *Amended Horizon Europe 2026–2027 Work Programmes to come – new opportunities and important changes*. https://accelopment.com/blog/funding/amended-horizon-europe-2026-2027-work-programmes-to-come-new-opportunities-and-important-changes/. 2026. aug.

[297] Europe's Rail Joint Undertaking. *Europe's Rail launches €6.1 million call to advance sustainable and passenger-centred rail transport*. https://rail-research.europa.eu/press-releases/europes-rail-launches-e6-1-million-call-to-advance-sustainable-and-passenger-centred-rail-transport. 2026. febr. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[298] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal. *Misszióvezérelt Nemzeti Laboratóriumok továbbfejlesztése. Pályázati felhívás és felhívásoldal, kódszám: 2026-4.1.1-MISSZIÓK*. Meghirdetés: 2025-12-22; módosítva: 2026-03-04 és 2026 augusztusa (egységes szerkezet); 44 oldal; keret 20,920 Mrd Ft; 1–4 Mrd Ft/projekt; 36–48 hónap. 2025. dec. URL: https://nkfih.gov.hu/palyazoknak/nkfi-alap/missziovezerelt-nemzeti-laboratoriumok-tovabbfejlesztese-2026-411-missziok (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[299] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal. *A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap 2026. évi programstratégiája*. 18 oldal; 118,287 Mrd Ft új felhívás, 32,22 Mrd Ft áthúzódó, teljes keret 150,507 Mrd Ft. 2025. nov. URL: https://nkfih.gov.hu/hivatalrol/hivatal-kiadvanyai/nkfia-programstrategia-2026 (elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[300] European Institute of Innovation and Technology. *EIT Urban Mobility: Strategic Innovation Open Call*. https://eit.europa.eu/our-activities/opportunities/strategic-innovation-open-call. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[301] QuantERA. *QuantERA Call 2025*. https://quantera.eu/call-2025. (Elérés dátuma 2026. 10. 24.).

[302] Quantum Flagship. *The Quantum Academy launches to train Europe's next generation of talent*. https://qt.eu/news/2026/2026-05-06_The_Quantum_Academy_launches_to_train_Europes_next-generation_of_talent. 2026. máj.

[303] Paloma Liu, Simon Parkinson és Kay Best. „Quantum and Quantum-Inspired Optimisation in Transport and Logistics: A Systematic Review". *Smart Cities* 8.6 (2025), 206. old. DOI: 10.3390/smartcities8060206.