

Pátý element

*Doprava a průmysl jako aktivní součásti fraktálního ekosystému
Pátá studie série technických rozborů - violka.info*

Abstrakt

Studie navazuje na předchozí čtyři díly série a rozšiřuje ekosystémový rámec o velkou dopravu, energetizaci dopravních ploch, těžký průmysl a datová centra. Klíčové zjištění je, že tyto sektory jsou v současném modelu vnímány převážně jako pasivní spotřebiče energie, ale technologicky jsou připravené stát se aktivními součástmi sítě — jako flexibilní spotřeba, lokální výroba, akumulace a zdroj odpadního tepla. Plně elektrifikovaná silniční doprava ČR (osobní + nákladní) představuje 21,5 TWh/rok elektrické spotřeby, což nahrazuje cca 80 TWh primární energie v palivech (úspora ~73 % díky účinnosti BEV). Megawattové nabíjení (MCS, 1–1,5 MW) prokázalo v provozu 2025 a kombinované s depotními bateriemi 2 MWh dělá dálkovou kamionovou dopravu plně elektrifikovatelnou v rámci EU regulací (45 min přestávka řidiče). Vůdce eHighway pilotů (overhead catenary) byl odebrán a vedení demontovaná — battery-electric trucks zvítězily. Zastřešení 30–50 km² parkovišť v ČR může produkovat 3–5 TWh/rok, plus chrání vozidla a umožňuje integraci flash chargerů. Železnice s 30 % rekuperací brzděné energie a bateriovou bufferovací kapacitou v napájecích stanicích je sama akumulační vrstvou. Liberty Ostrava (3,5 Mt oceli/rok hybridní EAF, 2027) potřebuje ~9 TWh/rok elektřiny pro H₂-DRI; cementárny vyžadují CCS + geopolymery + alternativní paliva, syntetický metan vyřeší ~40 % emisí; sklářství je ideální zákazník syntetického plynu. Datová centra s 35–45 % flexibilní zátěží (trénink AI, dávkové úlohy) jsou strategickým aktivem pro absorpci OZE přebytků; jejich odpadní teplo (40 %–80 % místního dálkového vytápění v Helsinkách, Stockholmu) představuje obrovský nevyužitý zdroj. Cílová roční výroba elektřiny ČR vychází na 105–110 TWh.

Klíčová slova: elektrifikace dopravy, MCS, megawattové nabíjení, battery-electric truck, rekuperace, agrivoltaika nad parkovištěm, H₂-DRI, syntetický plyn, geopolymery, datová centra, odpadní teplo, flexibilní spotřeba.

1. Úvod a vymezení tématu

Předchozí čtvrtá studie této série [1] navrhla architekturu fraktálního ekosystému s cílovou roční výrobou 92 TWh elektřiny v ČR. Tato hodnota byla vědomě postavena na konzervativních předpokladech o elektrifikaci průmyslu (4 TWh) a pominula řadu sektorů, které v dlouhodobém horizontu transformaci budou vyžadovat: nákladní silniční dopravu, plnou elektrifikaci železnice, dekarbonizaci hutí a cementáren, a rychle rostoucí datová centra.

Pátá studie tyto sektory rozebírá detailněji a klade si tři otázky: (I) Jaká je technologicky realistická cesta jejich elektrifikace nebo dekarbonizace? (II) Jak se mění jejich role v ekosystému — z pasivního spotřebiče na aktivního účastníka sítě? (III) Jaký je výsledný přírůstek spotřeby elektřiny a jak ovlivní celkovou bilanci ČR?

Klíčový posun, který tato studie zavádí, je následující: doprava a průmysl nejsou izolované odběratele energie, jsou součástí ekosystému a v některých případech mu více pomáhají, než ho zatěžují. Parkoviště se zastřešením vyrábí elektřinu. Železnice rekuperuje. Datacentrum topí městu. Kamion v depotu pracuje jako BESS. Takový pohled mění ekonomiku a urbanistické plánování — tradiční dělení „energetika vs. ostatní sektory“ přestává platit.

2. Velká silniční nákladní doprava

2.1 Tři historické cesty a vítěz roku 2025

Pro elektrifikaci dálkových kamionů byly v EU od roku 2010 souběžně rozvíjeny tři technologické cesty: (a) baterie + ultrarychlé nabíjení, (b) overhead catenary („eHighway“)

— trolejové vedení nad pravým pruhem dálnice, (c) palivové články na vodík. Studie z let 2018–2022 ještě dávala všem třem cestám reálné šance. V letech 2024–2026 je obraz podstatně jasnější.

eHighway — odpis. Tři pilotní úseky v Německu (A1 Lübeck, A5 Frankfurt, B462 Murgtal) v součtu 30 km byly v letech 2017–2024 v provozu. Technicky systém fungoval — kamiony překonávaly úseky bez vedení s pomocí baterií, dosahovaly 50% pokrytí dráhy elektřinou [11, 12]. Ekonomicky a regulatorně však pilot ztroskotal: investice 2,5 mil. EUR na kilometr vedení, nutnost mezinárodní kompatibility (kamion z DE do CZ musel by mít trolej i tady), a zejména rapidní pokles cen baterií a růst kapacit BEV kamionů činily projekt zastaralým [13]. V roce 2025 byly všechny tři pilotní úseky v Německu demontovány. Závěrečné hodnocení RWTH Aachen a IFEU označilo systém za technicky funkční, ale tržně nekonkurenceschopný [11, 14].

Vodíkové palivové články — okrajová role. Pro nišové aplikace (extrémně dlouhé trasy bez nabíjecí infrastruktury, lodní doprava) ano. Pro mainstreamovou kamionovou dopravu v EU s rozvinutou sítí je round-trip účinnost 30–35 % (oproti 75–85 % u BEV) ekonomicky neudržitelná. Volvo, Daimler, MAN a Scania v roce 2024 prakticky ukončili vývoj nákladních FCEV pro evropský trh.

Battery-electric trucks + MCS — vítěz. Megawatt Charging System (MCS, ISO/IEC 63379) byl jako standard publikován v únoru 2026 [18], ale už od léta 2025 je v reálném provozu. První veřejná MCS stanice v EU (Lipperland Süd na A2, projekt HoLa) je v provozu od září 2025 s výkonem 1,2 MW [19]. Mercedes eActros 600, Volvo FH Aero Electric (480 kWh, dojezd 500 km) [16], MAN eTGX (480 kWh, 500 km) a Scania jsou v sériové výrobě s podporou MCS [15, 17]. Konsorcium E.ON + Voltix + GreenWay buduje do konce 2028 v EU 330 MCS stanic na 55 lokacích [20].

2.2 EU regulační rámec a jeho synergie s technologií

Klíčový poznatek: standard EU pro řidiče kamionu (4,5 h jízdy + 45 min povinná pauza + 4,5 h jízdy) je v dokonalé shodě s technickými možnostmi MCS. Při výkonu 1 MW se baterie 480 kWh nabije z 20 % na 80 % za 28 minut, což znamená, že 45minutová pauza řidiče poskytuje plný čas na nabití plus rezervu [17]. Kamion tak může absolvovat 800–1000 km denně (EU maximum) bez jakékoliv změny pracovních pravidel a bez nutnosti delších odstavek. Z hlediska fleetové ekonomiky to znamená, že BEV kamion v dálkové dopravě má od roku 2026 srovnatelnou nebo lepší produktivitu než dieselový.

Tab. 1: Srovnání tří cest dekarbonizace nákladní silniční dopravy v EU. Stav 2025–2026 podle pilotů a publikovaných studií Fraunhofer ISI, RWTH Aachen, IFEU a komerčních dat výrobců [11–18]. Účinnost je round-trip od bodu výroby elektřiny po hřidel kola.

Aspekt	BEV + MCS	eHighway	FCEV (vodík)
Účinnost (well-to-wheel)	75–85 %	70–80 %	30–35 %
Investice infrastruktury	MCS stanice ~25 mil. Kč	~60 mil. Kč/km vedení	H ₂ stanice ~50 mil. Kč
Dosah trans-EU	Postupně 2026–2030	Vyžaduje vedení v každé zemi	Síť H ₂ stanic neexistuje
Sériová vozidla 2026	Volvo, MAN, Mercedes, Scania	Pouze hybridy se spalovákem	Žádný velký výrobce
Status pilotů 2025	Komerčně rozjeté	Demontováno (DE)	Ukončeno
Závěr	Mainstream	Slepá ulička	Nišové (lod)

2.3 Bilance pro ČR

ČR má registrovaných cca 30 000 kamionů (tahače návěsů) a 600 000 lehkých nákladních a dodávkových vozů [3]. Při průměrném ročním nájezdu kamionu 100 000 km a spotřebě BEV

varianty ~110 kWh/100 km vychází roční spotřeba 110 MWh na vůz, tj. cca 3,3 TWh celkem za 30 000 vozů. Realisticky bude k roku 2040 elektrifikováno 30–50 % flotily, což odpovídá 1,0–1,7 TWh/rok. Lehká nákladní vozidla (dodávky, pekárny, kurýr) jsou na elektrifikaci snadnější (kratší trasy, návrat do depota) a při poloviční flotile to dělá další ~3 TWh/rok.

Dohromady tedy plně elektrifikovaná silniční nákladní doprava ČR spotřebuje 4–5 TWh/rok, plus 14 TWh osobní (z předchozí studie [1]) + 1 TWh autobusy + 0,5 TWh železnice v rozšíření. Celkem doprava v plné elektrifikaci: ~21 TWh/rok elektřiny. Pro srovnání: současná spotřeba paliv v dopravě ČR činí ~78 TWh primární energie ročně [4]. Úspora primární energie vlivem vyšší účinnosti elektrické trakce: ~73 %.

2.4 Depo jako energetické centrum

Reálná instalace MCS, jak ji ukazuje Alfredsson Transport ve Švédsku (první evropský komerční MCS hub, 12 nabíjecích bodů, srpen 2025), je návodem pro budoucnost: 2,4 MW grid připojení + 2,4 MWh BESS + 400 kW FV [15]. Síť tedy nemusí dodávat plný špičkový výkon — bufferuje to interní BESS a část pokrývá vlastní FV. Logistické depo se mění z čistého spotřebiče na hybridní entitu, která je v některých hodinách producentem do sítě (FV přebytky) a v jiných ostro špičkový spotřebič (ráno, večer při návratu kamionů). Tato struktura odpovídá fraktálnímu principu z předchozí studie [1] — depo je mezo-úrovňová jednotka s vlastní výrobou, akumulací a flexibilní spotřebou.

3. Železnice — z pasivního spotřebiče k aktivní vrstvě

3.1 Současný stav v ČR

Železniční síť ČR má 9 470 km kolejí, z toho elektrifikováno cca 33 % (~3 100 km). EU průměr je 57 % [9]. ČR je tedy mírně podprůměrná, což souvisí s vysokou hustotou regionálních tratí a lokálek, kde se elektrifikace ekonomicky neoplatí. Trakční spotřeba České dráhy a ostatních dopravců činí cca 1,5 TWh/rok elektřiny + cca 50 mil. l motorové nafty pro neelektrifikované úseky [10]. Po plné elektrifikaci hlavních koridorů a nasazení bateriových nebo hybridních jednotek na regionálních tratích by spotřeba vzrostla na ~2 TWh/rok elektřiny (úspora 40 % CO₂ při energetickém mixu 2030) [8].

3.2 Rekuperace brzděné energie

Měření Českých drah na trati Praha–Kolín (jednotky řady 471) prokázala, že průměrně 30 % elektrické energie odebrané vlakem během rozjezdu se při brzdění vrací zpět do troleje [10]. U osobních zastávkových vlaků to může být až 20 % spotřeby (více brzdění/rozjezdů). U Regiojetu je rekuperací vybavena polovina vozového parku, u Leo Expressu všechny jednotky, u ČD jen třetina. Plné využití rekuperace u celé flotily by ušetřilo 0,4–0,6 TWh/rok.

Klíčová technická podmínka rekuperace je schopnost trakční napájecí stanice přijmout zpětný tok. Ve stejnosměrných systémech (ČR má 3 kV DC) toto vyžaduje měniče, které dovolí obousměrný tok. Tradičně byly stanice jen dodavatelské. Modernizace SŽ na obousměrné napájecí stanice s integrovanými BESS by změnila železnici v aktivní akumulační vrstvu — BESS by zachycovaly přebytky rekuperace v jedné lokalitě a vydávaly je při rozjezdu vlaku v jiné. To je pasivní vrstva sítě s nulovou marginální cenou energie.

3.3 Diferencovaný přístup k tratím

V Konceptu rozvoje elektrické trakce v ČR (MD ČR, 2023) je realistický přístup: hlavní koridory plně elektrifikovat, regionální tratě řešit podle frekvence dopravy [8]. Pro málo využívané regionální tratě jsou bateriové nebo vodíkové jednotky řádově levnější než stavba nové trolejové infrastruktury. Alstom Coradia iLint (vodík), Siemens Mireo Plus B (baterie 320 km) a další moderní jednotky jsou v sériové výrobě. ČR by měla rozhodovat case-by-case, ne plošně.

Tab. 2: Diferencovaný přístup k železničním tratím v ČR podle frekvence dopravy a délky úseku. Hodnoty jsou orientační; konkrétní rozhodnutí závisí na investiční analýze case-by-case dle MD ČR [8].

Typ tratě	Frekvence	Optimální technologie	Důvod
Hlavní koridor (>100 vlaků/den)	Vysoká	Elektrifikace 25 kV AC	Vysoká úspora paliva, návratnost OK
Vedlejší elektrifikovaná	Střední	Stávající 3 kV DC + modernizace	Existující infrastruktura
Regionální (10–50 vl./den)	Nízká	Bateriová jednotka 200–400 km	Investice do trolejí se nevrátí
Lokálka (<10 vl./den)	Velmi nízká	Bateriová nebo vodíková	Často jen turistický provoz
Příhraniční tranzit	Střední	Dual-system (3 kV DC + 25 kV AC)	Kompatibilita se sousedy

3.4 Železnice jako energetická hub

Železnice má jednu vlastnost, která ji předurčuje k roli aktivního energetického prvku: vlastní pozemky a vlastní napájecí infrastrukturu. SŽ vlastní cca 28 000 ha pozemků v koridorech, na nádražích a v depech. Část těchto ploch je vhodná pro fotovoltaiku — projekty jako Blackfriars Bridge v Londýně (50 % spotřeby blízké stanice z FV nad mostem) nebo německý StationGreen ukazují, že nádraží a kolejiště lze energeticky aktivovat. Pro ČR se nabízí velká nádraží Praha hl. n. (kolejiště ~12 ha), Brno hl. n., Ostrava-Svinov, Plzeň, Pardubice — každé z nich by mohlo nést 5–15 MWp FV. Plus odstavná nádraží a depa nákladních vagonů, kde už dnes není vegetace.

4. Letecká a námořní doprava

Letecká a námořní doprava se principiálně neelektrifikuje — hustota energie baterií (cca 250 Wh/kg) je o řád nižší než kerosen (12 000 Wh/kg). Pro vnitrostátní krátké lety do 500 km existují prototypy bateriových letadel (Heart Aerospace ES-30, Eviation Alice), pro mainstream však elektrifikace nepřichází v úvahu. Cestou je syntetické kapalné palivo vyráběné Fischer-Tropsch syntézou z H₂ (z OZE elektřiny) a CO₂ (zachyceného z atmosféry, bioplynové stanice nebo cementárny).

Letiště Václava Havla v Praze odbaví ročně cca 18 mil. cestujících a spotřebuje ~700 mil. l. kerosenu. EU regulace ReFuelEU Aviation vyžaduje povinný podíl udržitelných leteckých paliv (SAF) — 2 % v 2025, 6 % v 2030, 20 % v 2035, 70 % v 2050 [32]. Trh tedy existuje regulačně, ne nutně tržně. Domácí výroba e-kerosen v ČR je ekonomicky smysluplná, pokud bude součástí fraktálního ekosystému s přebytky OZE. Při typické účinnosti 18 % (z elektřiny do mechanické energie spalovacího motoru) je 1 GWh letecké energie ekvivalent 5,5 GWh elektřiny vstupu — to je drahá cesta, ale jediná dostupná pro dlouhé lety.

Námořní doprava se ČR z geografických důvodů přímo netýká, ale české exporty kovů, strojů a chemikálií využívají námořní dopravu nepřímou. Globálně zde vede e-metanol a e-amoniak (Maersk, MSC objednaly e-metanolové lodě, první v provozu 2024) [32]. To je téma evropské ekonomiky, do české energetiky se promítá jen okrajově (přes export H₂ derivátů).

5. Zastřešení dopravních ploch – energeticky aktivní infrastruktura

5.1 Princip a kategorie ploch

Tradiční pohled považuje dopravní plochy (parkoviště, dálnice, koridory) za pouhé spotřebiče prostoru. Fraktální ekosystém je vidí jinak: jsou to plochy, které již existují, jsou zastavěné, a jejich energetická aktivace nestojí novou půdu. Klíčové rozlišení je podle ROI a multifunkčnosti.

Tab. 3: Kategorizace dopravních ploch v ČR podle vhodnosti pro energetické zastřešení. Plocha v ČR je odhadem na základě statistik MD ČR, ČSÚ a katastrálních dat [3, 8]. ROI je hrubá kvalitativní hodnota, závisí na konkrétní lokalitě a ceně silové elektřiny.

Typ plochy	Plocha [km ²]	Hustota [MWp/km ²]	ROI bez dotace	Vedlejší přínos
Parkoviště OC, supermarkety	20–25	100–130	Velmi dobrý	Stín, sucho, EV nabíjení
Parkoviště průmysl, firmy	30–40	100–130	Dobrý	Stín, denní spotřeba
Dálniční odpočívadla	5–8	100–130	Průměrný	MCS pro kamiony
Velká nádraží + depa SŽ	10–15	120–150	Dobrý	Trakční spotřeba, stín
Železniční koridory	specif.	sporné	Špatný	Hluk, ale stín na trati problém
Dálnice a rychl. silnice	specif.	sporné	Špatný	Hluk, sůl, ledovce — drahé

5.2 Parkoviště – primární cíl

Parkoviště obchodních center, supermarketů, průmyslových areálů a velkých zaměstnavatelů jsou ideální typ plochy pro energetickou aktivaci. Důvody: (a) pozemek je již zastavěný, žádný nový zábor, (b) vlastník je jeden subjekt s rozhodovací pravomocí (na rozdíl od dálnic, kde je mnoho aktérů), (c) energie se spotřebovává na místě (prodejna, výroba), takže odpadá síťový poplatek, (d) FV nad parkovištěm je technologicky standardní a relativně levný (carport).

Nevýhoda: investiční náklady jsou 1,5–2× vyšší než ekvivalentní polní FVE. Carport vyžaduje nosnou ocelovou konstrukci, betonové základy, integraci s odvodněním. Komerční systémy 200–800 kWp v EU vychází na 1,8–2,3 EUR/Wp (vs. 0,9–1,2 EUR/Wp u polní FVE) [33, 34]. Ekonomicky se přesto vyplatí, pokud jsou splněny tři podmínky:

(I) Vlastník zároveň spotřebovává elektřinu (supermarket, průmysl). Ušetřená síťová a daňová složka 5–8 Kč/kWh dělá návratnost 7–12 let.

(II) Integruje se EV nabíjecí infrastruktura. Carport + flash charger (FV + BESS + nabíječky) je inherentně ekonomicky atraktivní — vlastník generuje dvojí příjem (elektřina pro vlastní spotřebu + EV nabíjení pro zákazníky/zaměstnance). V ČR existuje komerční nabídka carportových řešení pro domácnosti i firmy (např. Alukov [35]).

(III) Bilancuje se i stínění a ochrana vozidel. Stín redukuje klimatizaci v autech (úspora paliva 5–10 % v letních dnech), prodlužuje životnost laku a interiéru, chrání před krupobitím a ledem. Toto jsou reálné peněžně vyjádřitelné přínosy.

5.3 Bilance pro ČR

Konzervativní odhad: realisticky pokrytelná plocha parkovišť 30–50 km² (50 % všech vhodných parkovišť). Při hustotě 110 MWp/km² vychází instalovaný výkon 3,3–5,5 GWp. Při kapacitním faktoru 11 % (carportové FV mají typicky o 5 % nižší výnos kvůli horizontální orientaci) to dává 3,2–5,3 TWh/rok. Pro srovnání: tato hodnota odpovídá zhruba 5–8 % současné spotřeby ČR. A to bez záboru jediného hektaru zemědělské půdy.

5.4 Dálnice a koridory – opatrný optimismus

Zastřešení dálnic je komplikovanější. Pilotní projekty (Švýcarsko, Německo) ukazují měrné náklady 3-5 EUR/Wp — řádově dráž než parkoviště. Klíčový argument tedy nemůže být ekonomika výroby elektřiny, ale multifunkční přínos: snížení hluku v obytných zónách, ochrana vozovky před teplem (méně koleje od horka, delší životnost asfaltu o 10-15 %), méně soli v zimě (nižší údržba), méně oslnění protijedoucím sluncem, ochrana před krupobitím. Pokud se všechny tyto přínosy kvantifikují a zahrnou do bilance, dává zastřešení smysl v určitých úsecích — typicky průchody obytnými zónami a horské průsmyky. Plošné zastřešení D1 však smysl nedává.

Zastřešení železničních koridorů má další problém: stín na koleji v zimě znamená neroztátý sníh a led, vlhkost, koroze, problémy se signalizací. Plošné zastřešení tedy ne; pouze v lokacích, kde už dnes existuje konstrukce (mosty, tunely, zastávky) lze FV smysluplně doplnit.

6. Těžký průmysl — diferencovaný přístup

6.1 Sklářství — ideální zákazník syntetického plynu

Sklářské pece pracují při 1400-1600 °C a dnes většinou na zemní plyn. Sklo je tradiční český exportní artikl s vysokou marží (export ~18 mld. Kč/rok), takže obor si může dovolit vyšší cenu paliva. Spotřeba sklářství ČR činí ~2 TWh primární energie ročně [4]. Klíčový poznatek: syntetický metan z OZE elektřiny lze do skleněné pece dodávat bez technologické změny — pouhým jiným palivovým vstupem do existujícího hořáku. Sklářské pece tak mohou být první sektor, kde se P2G (Power-to-Gas) realisticky komerčně uplatní v ČR.

Synergie jdou dál: odpadní teplo ze skleněné pece (600+ °C) se dnes z velké části vyzářuje do okolí. Lze ho využít pro Sabatier syntézu ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$, exotermní), čímž vzniká uzavřený průmyslový cyklus: OZE elektřina → elektrolyzátor → H_2 → metanace s CO_2 → CH_4 → spalování ve skleněné peci → odpadní teplo zpět do procesu. To je laboratorně prokázané, komerčně se rozjíždí ve Spolkové republice (projekt SchwarzWaldhof, Bad Lauchstädt) a může být modelem i pro ČR.

6.2 Metalurgie — primární vs. sekundární

ČR má dva primární výrobce oceli: Třinec (cca 2,5 Mt/rok) a Liberty Ostrava (3,5 Mt/rok kapacita po modernizaci). Liberty Ostrava signoval v roce 2022 kontrakt s italskou firmou Danieli na dva hybridní elektrické obloukové pece (8,6 mld. Kč investice, EUR 350 mil.), které snižují emise CO_2 o 80 % do 2027 a jsou kompatibilní s 100 % šrotem v druhé fázi [21]. Plný GREENSTEEL provoz s vodíkovým redukováním rudy (DRI) by znamenal úplnou dekarbonizaci do 2030.

Energetická bilance je impozantní: 1 t oceli z H_2 -DRI procesu spotřebuje ~50 kg H_2 . Pro 3,5 Mt oceli/rok to dělá 175 000 t H_2 /rok. Při účinnosti elektrolyzy 70 % a měrné spotřebě 50 kWh/kg H_2 vychází roční elektrická spotřeba ~9 TWh jen na Liberty Ostrava. Pro Třinec dalších ~6 TWh. Dohromady primární metalurgie ČR po plné transformaci ~15 TWh/rok elektřiny — to je čtvrtina dnešní spotřeby ČR.

Důležité: primární metalurgie není flexibilní zákazník. Vysoká pec se chladí týdny, hybridní EAF má sice větší flexibilitu (Q-One technologie umožňuje rychlou regulaci výkonu), ale stále preferuje kontinuální provoz. V hierarchii spotřebičů ekosystému je metalurgie baseline, ne flexibilita. Pro ekosystém to znamená, že 15 TWh/rok musí být dostupné prakticky v každý okamžik — což zvedá nároky na sezónní akumulaci (P2G přes plynovou síť) a/nebo dovoz.

Sekundární metalurgie (tavení šrotu v EAF mimo hutě Liberty a Třinec — strojírenské a slévárenské podniky) je naopak ideálně flexibilní. Indukční pece dokáží regulovat výkon v minutách, tavení proběhne v dávkách. To je přesný profil spotřebiče, který v ekosystému absorbuje OZE přebytky. Strojírny v ČR mají kapacitu ~2 Mt šrotové produkce ročně, což představuje cca 1,5 TWh/rok elektřiny — a tato spotřeba je flexibilní.

6.3 Cementárny — komplikovanější příběh

ČR má 5 cementáren (Radotín, Mokrý, Čížkovice, Hranice, Prachovice) s celkovou produkcí cca 4 Mt cementu/rok. Roční emise CO₂ z cementářství jsou ~3,8 Mt, tj. 2,7 % celkových emisí ČR [6, 7]. Klíčové strukturální rozlišení: ~60 % emisí je procesních (chemická reakce kalcinace vápence: CaCO₃ → CaO + CO₂), zbývajících 40 % je z paliva (uhlí, plyn, alternativní paliva) [7, 36]. Procesní emise nelze odstranit změnou paliva — i kdybychom topili vodíkem nebo elektřinou, vápenec při výpalu uvolní CO₂.

Reálná cesta dekarbonizace cementu je tedy kombinovaná:

(1) Náhrada paliva — alternativní paliva (RDF, masokostní moučka, biomasa) už dnes dosahují 93,5 % paliva v Čížkovicích [24]. Syntetický metan může nahradit zbylých ~6,5 % fosilního plynu. Tím vyřešíme cca 40 % emisí (palivová složka).

(2) Snížení podílu slínku — slínek (vypalovaný vápenec) je zdroj procesních emisí. Náhrada slínku struskou, popílkem, vápencem, pucolánem nebo recyklovaným betonem snižuje měrné emise. Heidelberg Materials v Radotíně investuje 300 mil. Kč do vertikálního mlýnu, který umožní jemnější mletí a vyšší podíl příměsí; cíl 12 % snížení emisí do 2030 [22, 23].

(3) Geopolymerní pojiva — alternativa k portlandskému cementu úplně jiná chemie (alkalická aktivace metakaolínu nebo strusek). Emise 50–80 % nižší. Technologicky funkční, ale stavebnictví konzervativní — pomalu přijímá nové normy. V ČR ojediněle (geopolymerní silnice Liberec).

(4) CCS (Carbon Capture and Storage) — pro zbývajících procesní emise jediná cesta. Norsko (Brevik), Heidelberg cílí na CCS v průmyslové škále. ČR zatím nemá CCS infrastrukturu. Geologické ukládání CO₂ v ČR (terciární pánve) je možné, ale projekt by byl 10–20letý.

Realisticky: cementárny ČR do roku 2040 mohou snížit emise o 50–70 % kombinací (1) + (2). Plná dekarbonizace vyžaduje (4) — to je investiční a regulační téma na další desetiletí.

6.4 Sumarizace průmyslu

Tab. 4: Strategie dekarbonizace klíčových odvětví těžkého průmyslu v ČR. Sloupec „Flexibilita“ označuje schopnost daného procesu absorbovat krátkodobé přebytky elektřiny z OZE — vysoká znamená v rámci hodin, nízká znamená kontinuální provoz.

Odvětví	Hlavní cesta	Role syntet. plynu	Spotřeba el.	Flexibilita
Sklářství (~2 TWh)	Syntet. CH ₄	Primární palivo	+0 (stejně)	Střední
Sekundární metalurgie	Elektřina (EAF)	Doplňkové	~1,5 TWh	Vysoká
Primární ocel — H ₂ -DRI	Vodík + EAF	Marginální	+15 TWh	Nízká
Cementárny	CCS + geopol. + paliva	40 % emisí	+0 (stejně)	Nízká
Keramika a vápenky	Syntet. CH ₄	Primární palivo	+0 (stejně)	Střední
CELKEM průmysl ČR	—	—	+~17 TWh	—

7. Datová centra — flexibilita a tepelná synergie

7.1 Globální a evropský kontext

Datová centra představují v roce 2025 cca 4,5 % světové spotřeby elektřiny [26]. Do 2030 dle prognóz IEA více než zdvojnásobí, do 2035 až 16násobně podle BloombergNEF (zejména díky AI) [26]. V Evropě by datová centra mohla představovat 14 % nové poptávky po elektřině do 2033 = cca 220 TWh, tj. čtyřnásobek roční spotřeby ČR [25]. ČR je v této expanzi zatím okrajový hráč (současná spotřeba DC ~0,5 TWh, plánované projekty Microsoft v Ostravě a CTP v Praze přidají 1–2 TWh do 2030) [25].

7.2 Skutečná flexibilita — diferencované rozlišení

V mediální debatě často zaznívá, že datová centra jsou „pasivní 24/7 spotřebiče bez flexibility“. Realita je nuancovanější. Z celkové spotřeby datacentra je flexibilní podíl 35–45 % a netkví jen v IT zátěži, ale i v chlazení.

Tab. 5: Diferencovaná flexibilita zátěže datacentra. Procenta jsou typická pro velké hyperscale datacentrum kombinující cloudové služby, AI tréninky a podnikové úlohy. Konkrétní rozložení závisí na obchodním modelu provozovatele.

Typ zátěže	Podíl spotřeby	Flexibilita	Příklad
Trénink AI modelů	10–25 %	Vysoká (hodiny–dny)	GPT, Claude, Gemini training
Dávkové výpočty	5–15 %	Vysoká (hodiny)	Vědecké simulace, rendering
Cloudové back-office	20–30 %	Střední (15–60 min)	Databáze, zálohy
Webové služby SLA	20–30 %	Velmi nízká	E-shop, banka, video stream
Chlazení (tep. setrvačnost)	30–40 %	Střední (10–30 min)	Předchlazení, ledová akumulace
Síťová a bezpečnostní	5–10 %	Žádná	Firewall, monitoring
Reálná flexibilita celku	—	35–45 %	Při dynamickém řízení

Klíčová poznámka: AI trénink je nejflexibilnější výpočetní zátěž v dějinách IT. Trénink GPT-úrovně modelu trvá týdny až měsíce, běží v dávkách a je principálně možné ho odložit nebo zpomalit podle ceny elektřiny bez negativního dopadu na uživatele. To je výjimečně atraktivní vlastnost pro fraktální ekosystém — datacentrum tréninkového typu se může stát klíčovým absorberem letních FV přebytků.

7.3 Odpadní teplo — největší nevyužitý zdroj

Datacentrum o příkonu 100 MW elektřiny vyprodukuje ~95 MW tepla (zbytek je IT práce, tj. <5 %). Toto teplo má teplotu 30–60 °C (podle technologie chlazení), což je vhodné pro nízkoteplotní dálkové vytápění (4. generace DH) přímo, nebo pro klasické DH (60–80 °C) po doohřátí tepelným čerpadlem (COP 3–5).

Reálné finské a švédské projekty ukazují masivní potenciál:

Microsoft Fortum Espoo a Kirkkonummi (2025–2026): dvě datacentra dodají do dálkového vytápění 350 MW tepelného výkonu z odpadního tepla, tj. 40 % potřeby DH celého regionu. Roční využití 75 % odpadního tepla (zima), 25 % nevyužito v létě (DH neexistuje v letní spotřebě). Roční úspora 400 000 tun CO₂ vůči předchozímu uhelnému zdroji [27, 28, 29].

Google Hamina (Finsko, plný provoz konec 2025): pokrývá až 80 % poptávky po DH ve městě [27, 29].

Stockholm Data Parks: program nutí datová centra prodávat odpadní teplo do DH za regulované ceny. „Cost turns into revenue“ — provozovatel nejen šetří chlazení, ale generuje

příjem z tepla [30].

EU Energy Efficiency Directive (2023/1791) z roku 2023 nově vyžaduje po členských státech, aby do 2030 měly akční plán pro využití průmyslového odpadního tepla, což zahrnuje datová centra [31]. Německo už má povinnost maximálního využití odpadního tepla v zákoně. ČR má v tomto ohledu strategický prostor — pokud se datová centra v Praze, Brně, Ostravě budou stavět ve vazbě na soustavy CZT, mohou pokrýt 20–30 % potřeby vytápění daných měst.

7.4 Bilance pro ČR

Konzervativní odhad pro ČR k roku 2035: spotřeba datových center 3–5 TWh/rok. Tepelná produkce 3–5 TWh tepla — pokud se 70 % využije v DH, znamená to 2,1–3,5 TWh tepla pokrytého „zadarmo“ oproti dnešnímu spalování. Pro Prahu (roční potřeba DH cca 5 TWh tepla) by jediné 100 MW datacentrum integrované do PT pokrylo 12–15 % potřeby.

Strategické doporučení: nové datová centra v ČR by měla být lokalizována primárně tam, kde existuje napojení na CZT. Nikoli „kdekoliv, kde je síť“. To je územně-plánovací rozhodnutí, nikoli technické.

8. Celková bilance — aktualizace cílové výroby

Po zahrnutí všech sektorů z této páté studie (nákladní silniční doprava, rozšíření železnice, primární metalurgie, sekundární metalurgie, datová centra) vychází cílová roční výroba elektřiny ČR vyšší než 92 TWh ze čtvrté studie:

Tab. 6: Aktualizovaná cílová bilance výroby elektřiny pro ČR. Hodnoty zahrnují plnou elektrifikaci dopravy, 50 % vytápění tepelnými čerpadly, primární metalurgii s H₂-DRI, sekundární metalurgii, datová centra, vlastní spotřebu P2X procesu a 7 % síťových ztrát. Pásmo 105–110 TWh odráží dolní (konzervativní) a horní (rozšířený průmysl) scénář. Současná spotřeba dle ERÚ [2], rozdělení dle ČSÚ [3] a TZB-info [4].

Sektor	Současná [TWh/rok]	Po transformaci [TWh/rok]	Změna [TWh]
Domácnosti	15	16–18	+1–3
Veřejné a komerční služby	8	10–12	+2–4
Tradiční průmysl	25	23–24	–1–2
Primární metalurgie (H ₂ -DRI)	~3	13–17	+10–14
Sekundární metalurgie	1,2	1,5	+0,3
Sklářství a keramika	~1,5	1,5	0
Doprava — silniční osobní (BEV)	~0	14	+14
Doprava — silniční nákladní	~0	4–5	+4–5
Doprava — železniční	1,5	2	+0,5
Datová centra	0,5	3–5	+2,5–4,5
P2X (elektrolýza pro průmysl)	~0	8–12	+8–12
Síťové ztráty	3,4	5	+1,6
CELKEM	~60	105–110	+45–50

Důležité: tato bilance předpokládá, že H₂-DRI metalurgie probíhá v ČR (což znamená 9 TWh pro Liberty + 6 TWh pro Třinec). Alternativně by mohla huť dovážet H₂ nebo HBI (hot briquetted iron) ze zemí s lepším OZE potenciálem (Marocco, Saúdská Arábie, Norsko), čímž by ČR snížila vlastní spotřebu o 10–15 TWh, ale zvýšila energetickou závislost na dovozu. Toto je strategické rozhodnutí mimo rámec této studie.

9. Strukturální důsledky pro fraktální ekosystém

9.1 Sektory jako aktivní účastníci sítě

Klíčové zjištění této studie není ve výši čísel, ale ve strukturální změně role sektorů. Tradiční pohled:

Síť → Doprava (čerpá), Síť → Průmysl (čerpá), Síť → Datacentra (čerpá).

Fraktální pohled:

Parkoviště ↔ Síť (vyrábí FV, spotřebovává EV), Železnice ↔ Síť (rekuperuje, spotřebovává trakci), Datacentrum ↔ Síť ↔ CZT (čerpá elektřinu, vrací teplo, flexibilní v 35 % zátěže), Sekundární metalurgie ↔ Síť (absorbuje přebytky v EAF), Depo kamionů ↔ Síť (BESS bufferace, FV nad střechou, MCS infrastruktura).

Každý sektor má v ekosystému dvojí roli — spotřebiče a poskytovatele služeb (flexibilita, akumulace, teplo). To zásadně mění ekonomiku — sektor přestává být čistým nákladem na elektřinu a stává se i jejím zdrojem nebo distributorem v rámci širšího systému.

9.2 Odpadní teplo jako materiálový tok

Druhým strukturálním zjištěním je, že elektřina není jediný energetický tok, který má ekosystém řídit. Odpadní teplo z datových center, sklářských pecí, hutí a dokonce z elektrolyzérů P2X je obrovský zdroj, který se v současném modelu z velké části vyzáhuje do atmosféry. Nízkoteplotní DH 4. generace (40–60 °C vstupní teplota) je technologie, která tento tok dokáže využít.

Skandinávské země ukazují, že 60–80 % vytápění města lze pokrýt z průmyslového a datacentrového odpadního tepla, pokud je to územně naplánováno. Pro ČR to znamená přehodnocení lokalizační politiky datových center, sklářství, P2X — měly by být primárně tam, kde existuje CZT s rezervou.

9.3 Implikace pro investice

Fraktální architektura znamená, že investiční těžiště se přesouvá z velkých zdrojů na distribuční síť, akumulaci a sektorové integrace. Konkrétně:

(I) Zastřešení parkovišť 50 km² = ~5 GWp = ~50–60 mld. Kč. Tato investice nahrazuje řádově 1 200 ha polní FVE a navíc generuje vedlejší přínosy.

(II) MCS síť pro kamionovou dopravu = pro celou ČR cca 200 lokací × 5 nabíjecích bodů × 25 mil. Kč = ~25 mld. Kč. To řeší přechod ze 30 000 dieselových kamionů na elektrické bez budování nové uhlovodíkové infrastruktury.

(III) Liberty Ostrava H₂-DRI = elektrolyzér ~1 GW + infrastruktura ~50 mld. Kč. Bez této investice se ocelárna do 2030 stává nekonkurenceschopnou (CBAM, EU ETS) [21, 37].

(IV) Integrace datových center s CZT = výměníky a tepelná čerpadla ~10–20 mld. Kč pro pokrytí poloviny pražské CZT.

(V) Trakční napájení a rekuperace SŽ = modernizace napájecích stanic + BESS = ~30–50 mld. Kč.

Celkový rozsah investic do těchto distribuovaných opatření se pohybuje v řádu 200–250 mld. Kč v horizontu 15 let. To je srovnatelné s investicí do jednoho velkého jaderného bloku (~500 mld. Kč), ale rozsah dopadu je strukturálně širší — týká se řady sektorů zároveň, ne jednoho elektrického zdroje.

10. Závěr

Pátá studie této série rozšiřuje fraktální ekosystémový rámec o velkou dopravu, dopravní plochy, těžký průmysl a datová centra. Klíčová zjištění:

(I) Battery-electric kamion s MCS nabíjením je vítězem mainstreamu. eHighway pilot byl ukončen, vodíkové palivové články jsou pro EU kamiony okrajové. První komerční MCS stanice 2025 a 330 plánovaných lokací do 2028 v EU činí dálkovou kamionovou dopravu plně elektrifikovatelnou v souladu s EU regulací řidičů.

- (II) Plně elektrifikovaná silniční doprava ČR spotřebuje 21 TWh/rok, což nahrazuje 78 TWh primární energie v palivech (úspora ~73 % díky vyšší účinnosti elektrické trakce).
- (III) Zastřešení 30–50 km² parkovišť ČR generuje 3–5 TWh/rok elektřiny, plus stínění vozidel, integrace EV nabíjení, ochrana před krupobitím. Bez záboru zemědělské půdy.
- (IV) Železnice s 30 % rekuperací a obousměrnými napájecími stanicemi se stává akumulací vrstvou. Plné využití rekuperace ušetří 0,4–0,6 TWh/rok. Diferencovaný přístup k tratím (elektrifikace hlavních koridorů, baterie/vodík na regionálních) je realistický.
- (V) Sklářství je ideální zákazník syntetického metanu; sekundární metalurgie (EAF) je flexibilní spotřebič přebytků; primární metalurgie vyžaduje H₂-DRI a zvedne spotřebu o 15 TWh/rok. Cementárny vyžadují kombinaci alternativních paliv, geopolymérů a CCS — syntetický plyn vyřeší pouze ~40 % emisí.
- (VI) Datová centra mají reálnou flexibilitu 35–45 % zátěže (AI trénink, dávkové úlohy, tepelná setrvačnost chlazení). Jejich odpadní teplo je v Helsinkách a Stockholmu pokrytím 40–80 % místního dálkového vytápění — strukturálně významný zdroj nevyužitý v ČR.
- (VII) Cílová roční výroba elektřiny ČR vychází na 105–110 TWh po zahrnutí všech sektorů (oproti 92 TWh ze čtvrté studie). Rozdíl 13–18 TWh je primárně způsoben H₂-DRI metalurgií a rozšířením dopravy.
- (VIII) Strukturální posun: sektory jsou aktivními účastníky sítě, ne pasivními spotřebiči. Parkoviště vyrábí, depo bufferuje, datacentrum topí, sekundární metalurgie absorbuje přebytky. Toto je klíčový princip fraktálního ekosystému — každý sektor poskytuje víc než jen poptávku.
- (IX) Investiční rámec ~200–250 mld. Kč v horizontu 15 let na distribuované integrované systémy. To je srovnatelné s jedním velkým jaderným blokem, ale s strukturálně širším dopadem napříč sektory.
- (X) Volba pro účastníky sektorů. Provozovatel parkoviště, majitel logistického depa, ředitel ocelárny, manažer datacentra mají v této transformaci postupně rostoucí rozhodovací prostor: jak modernizovat, kdy přejít, kde lokalizovat. Žádný z těchto kroků není vnucený. Avšak ekonomická a regulatorní logika (CBAM, EU ETS, ReFuelEU, FuelEU Maritime, EED 2023/1791) [31, 32, 37] pracuje konzistentně ve směru transformace. Studie tedy nepředkládá normativní doporučení, předkládá data o cestě, kterou trh a regulace již postupně volí.

11. Použité zdroje

- [1] Předchozí studie této série: I.–IV., violka.info 2026.
- [2] ERÚ (2024): Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR, eru.gov.cz.
- [3] ČSÚ (2024): Statistiky energetiky a dopravy.
- [4] TZB-info (2024): Vývoj spotřeby energie v ČR v období 1990–2022.
- [5] Fakta o klimatu (2024): Elektřina v ČR — výroba, spotřeba a emise.
- [6] Fakta o klimatu (2023): Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů.
- [7] Fakta o klimatu: Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně?
- [8] Ministerstvo dopravy ČR (2023): Koncepce rozvoje elektrické trakce v České republice.
- [9] Ekolist (2025): Studie ČVUT — Elektrizace železnice v ČR zaostává za průměrem EU.
- [10] Pohl, J. (ČD): Energetické aspekty moderní železniční dopravy. Vědeckotechnický sborník ČD.
- [11] Lehmann, M. et al., IFEU (2022): Current technical findings on the eHighway system.
- [12] Linke, R. et al. (2024): Impact of an eHighway on directly emitted GHG. ScienceDirect.
- [13] Clean Energy Wire (2024): German catenary truck test yields positive results, but critics see waste of money.
- [14] Electrify (2026): RWTH Aachen successfully tests catenary trucks — eHighway pilots dismantled.
- [15] Kempower (2025–2026): MCS Live Winter Days, world's first public MCS charging session.
- [16] Volvo Trucks (2025): Volvo FH Aero Electric — 600 km range and superfast MCS charging.
- [17] Scania Group: Megawatt charging — all you need to know about MCS.
- [18] CharIN, IEC 63379, SAE J3271 (2025–2026): MCS standards.

- [19] HoLa project (Germany, 2025): First public MCS charging at Lipperland Süd, A2.
- [20] E.ON, Voltix, GreenWay (2025): 330 MCS chargers across Europe by 2028.
- [21] Liberty Ostrava (2022–2024): GREENSTEEL transformation — Danieli QONE hybrid EAF, 8.6 mld. Kč.
- [22] Heidelberg Materials CZ (2024): Cementárna Radotín — vertikální mlýn, 12 % úspora emisí do 2030.
- [23] e15.cz (2022): Cementárna Radotín — 300 milionů Kč investice.
- [24] Holcim Čížkovice (2024): 93,5 % alternativních paliv ve výrobě cementu.
- [25] Energie.cz (2025): Datová centra — ohromná spotřeba 24/7.
- [26] BloombergNEF (2025): New Energy Outlook 2025 — datacentra a poptávka po elektřině.
- [27] World Economic Forum (2025): Companies using data centres to heat cities.
- [28] Fortum & Microsoft (2022, 2025): Espoo & Kirkkonummi — 40 % DH z odpadního tepla, AFRY EPCM.
- [29] Business Finland (2025): Finland links waste heat utilization and digitalization.
- [30] Stockholm Data Parks: data centres as district heating commodity.
- [31] EU Energy Efficiency Directive 2023/1791 — waste heat action plans.
- [32] EU ReFuelEU Aviation a FuelEU Maritime (2023): regulační rámce pro syntetická paliva.
- [33] EnergyLink, GreenLancer, Solartech (2024–2025): Solar carport costs USD 2.75–3.99/W.
- [34] Station A (2024): Carport vs rooftop solar costs — 67–76 % vyšší než rooftop.
- [35] Alukov: Solar carports a komerční dostupnost v ČR.
- [36] Faktaoklimatu: Cement — 60 % procesní emise, 40 % paliva.
- [37] EU CBAM (2023, 2026): Carbon Border Adjustment Mechanism a dopady na ocelářství.

Tento dokument je technicko-analytický rozbor pátý v sérii violka.info. Neobsahuje politická doporučení ani regulační stanoviska. Cílem je transparentně předložit metodiku a vstupní hodnoty tak, aby výpočty byly nezávisle ověřitelné. Numerické hodnoty vycházejí z publikovaných dat, veřejných statistik (ERÚ, ČSÚ, MD ČR, Eurostat, IEA, BloombergNEF) a veřejných oznámení provozovatelů (Liberty Ostrava, Heidelberg Materials, Fortum, Microsoft, Volvo, Scania, MAN, Mercedes-Benz, Kempower, E.ON). Konkrétní hodnoty se mohou v aktuálních zdrojích lišit; práce je řadovým rozbohem s důrazem na metodickou strukturu a porovnání cest transformace.