Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

telecom

MDPI

*Článok*

# Vystavenie pracovníkov v dôsledku súkromných 5G sietí

**Blaž Valič[1], David Plets[2], Gunter Vermeeren[2] Christos Apostolidis[3] a Peter Gajšek[1,*]**

[1] Inštitút neionizujúceho žiarenia (INIS), 1000 Ľubľana, Slovinsko; blaz.valic@inis.si IMEC-WAVES, 9052
[2] Gent, Belgicko; david.plets@ugent.be (DP); gunter.vermeeren@ugent.be (GV) Centrum pre
[3] interdisciplinárny výskum a inovácie, Aristotelova univerzita v Solúne,
57001 Thermi, Grécko; capos@physics.auth.gr
* Korešpondencia: peter.gajsek@inis.si

**Abstrakt**

Súkromné mobilné siete 5G sa objavujú ako platforma pre bezdrôtové pripojenie v profesionálnych aplikáciách v inteligentných priemyselných sektoroch, ako sú automatizované skladovanie, logistika, nasadenie autonómnych vozidiel v prostredí kampusov, baníctvo a spracovanie materiálov. Očakáva sa, že väčšina komunikačných spojení typu Machine-to-Machine (M2M) a priemyselného internetu vecí (IIoT) sa bude čoraz viac spoliehať na bezdrôtové riešenia, pretože flexibilita, ktorú ponúkajú, poskytuje jasné výhody oproti pevne zapojeným sieťovým inštaláciám. S cieľom získať prehľad o vystavení pracovníkov rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF EMF) vyžarovaným súkromnými mobilnými sieťami 5G sa vykonala analýza založená na nameraných a vypočítaných úrovniach RF EMF z rôznych súkromných sietí 5G v reálnych scenároch v rôznych inteligentných priemyselných sektoroch a platformách výskumu a vývoja v troch krajinách. Bolo vyhodnotených niekoľko scenárov expozície vrátane výrobných zariadení, logistických operácií, kancelárskeho prostredia a výskumných pracovísk. Inštalácie zahŕňali rôzne konfigurácie: súkromné samostatné a nesamostatné siete 5G pracujúce na frekvenciách 3,5 GHz a 26 GHz, ako aj verejné siete so súkromným rozdelením. Výsledky jasne ukázali, že úrovne expozície vo všetkých skúmaných scenároch boli výrazne pod existujúcimi limitmi expozície. V typickom vnútornom priemyselnom prostredí, kde sú nasadené základňové stanice pico 5G, sa zistilo, že nameraná expozícia nepresiahla 0,006 % akčnej hodnoty smernice 2013/35/EÚ a 0,03 % limitov smernice ICNIRP pre širokú verejnosť.

**Kľúčové slová:**5G; vystavenie návykovým látkam na pracovisku; inteligentný priemysel; súkromné siete

## 1. Úvod

Potreba posúdiť vystavenie pracovníkov rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF EMF) v prostrediach Priemyslu 4.0 vyplýva z bezprecedentnej integrácie bezdrôtových, automatizovaných a prepojených technológií, ktoré vytvárajú komplexné, viacfrekvenčné elektromagnetické prostredia. Bezdrôtová komunikácia je základným kameňom Priemyslu 4.0, pretože umožňuje bezproblémové, všadeprítomné a škálovateľné prepojenie medzi strojmi, senzormi a mobilnými entitami, ako sú roboty, automaticky riadené vozidlá, drony a ľudia [1].

Zavádzanie súkromných 5G sietí v inteligentných priemyselných prostrediach prináša pre pracovníkov jedinečné scenáre vystavenia vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu. Na dosiahnutie spoľahlivého pokrytia v inteligentných továrňach sa používajú dve hlavné konfigurácie inštalácie: (i) obmedzený počet zariadení s tvarom lúča základňové stanice (BS), ktoré dokážu pokryť rozsiahle oblasti, a (ii) viacero nízkoenergetických rádiových hláv, ktoré poskytujú robustné pokrytie aj v prostrediach s mnohými prekážkami a odrazmi. Antény s tvarovaním lúča majú vysoké maximálne zisky (15 – 23 dBi) a schopnosť

Check for updates

Akademický redaktor: Fabio D'Andreagiovanni

Prijaté: 20. februára 2026
Revidované: 13. apríla 2026
Schválené: 20. mája 2026
Publikované: 1. júna 2026

**Autorské práva:**© 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, d. Švajčiarsko. Tento článok je článok s e otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienokLicencia Creative na Comm Attribution (CC BY).



https://doi.org/10.3390/telecom7030063

dynamicky riadia lúče, zatiaľ čo rádiové hlavy s nízkym výkonom používajú všesmerové alebo čiastočne smerové vyžarovacie diagramy s nízkym ziskom (0–4 dBi). Vzhľadom na ich podobný maximálny výstupný výkon vedú tieto rozdiely k výrazne vyšším expozíciám v blízkosti antén formujúcich lúč. Výhoda antén formujúcich lúč s vysokým ziskom je obmedzená prítomnosťou prekážok, zatiaľ čo viacero rádiových hláv s nízkym výkonom profituje zo schopnosti pokryť väčšinu oblasti vďaka svojmu priestorovému rozloženiu.

Výskum vystavenia pracovníkov vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu v plne funkčných súkromných sieťach 5G v rámci Priemyslu 4.0 je stále nedostatočný. Hlavným dôvodom je relatívne pomalé zavádzanie súkromných sietí 5G v inteligentných odvetviach z dôvodu vysokých nákladov, technických problémov a neistej návratnosti investícií. Okrem toho je prístup výskumníkov k priemyselným lokalitám so súkromnými sieťami 5G veľmi obmedzený. Majitelia zariadení zriedka udeľujú povolenie na externé merania alebo zverejňovanie výsledkov a prístup si často vyžaduje zdĺhavé rokovania a dohody o mlčanlivosti, ktoré vedenie spoločností často ruší pred ich dokončením.

Niektoré publikované štúdie uvádzajú, že zatiaľ čo tvarovanie lúča 5G sústreďuje energiu smerom k určeným prijímačom, dynamická povaha vzorov lúčov a časovo priemerované rozdelenie výkonu znižuje celkové vystavenie pracovníkov v porovnaní so statickými sektorovými anténami. V kontrolovaných scenároch hustota výkonu často zostala pod 1 % limitov stanovených Medzinárodnou komisiou pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) [2].

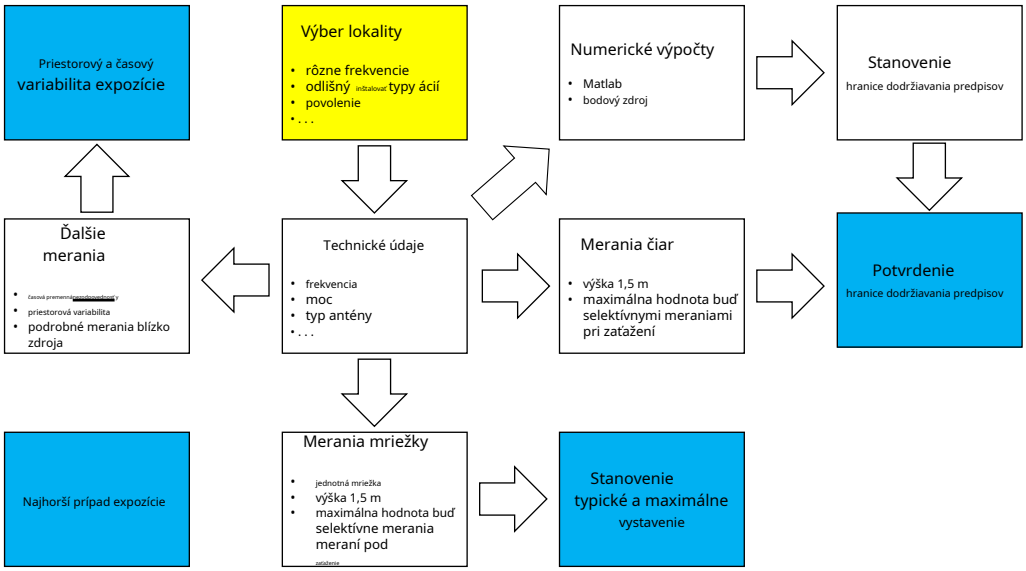
## 2. Materiály a metódy

Na určenie vystavenia pracovníkov súkromným 5G sieťam sa vykonalo veľké množstvo meraní v kombinácii s numerickými výpočtami na presné určenie zón dodržiavania predpisov. Bolo meraných a numericky modelovaných niekoľko scenárov expozície vrátane výrobných zariadení, logistiky, kancelárií a výskumných zariadení s rôznymi typmi inštalácií: súkromné samostatné (SA) a nesamostatné (NSA) 5G siete na frekvenciách 3,5 GHz a 26 GHz, ako aj verejné 5G siete so súkromným rozdelením (Tabuľka1).

**Tabuľka 1.**Prehľad 8 analyzovaných scenárov v Slovinsku, Nemecku a Belgicku.

| Scenár | Sektor | Tvarovanie lúča | Inštalácia Typ | f (GHz) | Model antény | Vstupný výkon (Z) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikrobunka 5G FR1 | logistika, prístav | NIE | súkromné | 3,5 | Bezdrôtové slúchadlá Alpha AW3232 (Alpha Wireless, Portlaoise, Írsko) | 4 |
| 2: Logistický sektor: prístav, verejná sieťová makrobunka 5G FR1 | logistika, prístav | ÁNO | verejný výsek | 3,5 | Ericsson AIR 3227 (Ericsson, Štokholm, Švédsko) | 100 |
| 3: Inteligentné riešenia IOT: sklad, súkromná pikobunka 5G FR1 | inteligentný priemysel 4,0 | NIE | súkromné | 3.6 | Nokia AirScale Pico (Nokia, Espoo, Fínsko) | 1 |
| 4: Inteligentné riešenia IOT: výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 | inteligentný priemysel 4,0 | NIE | súkromné | 3.6 | Nokia AirScale Pico (Nokia, Espoo, Fínsko) | 1 |
| 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1 | kancelária | NIE | súkromné | 3,5 | Ericsson 6524 (Ericsson, Štokholm, Švédsko) | 16 |
| 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 | kancelária | NIE | súkromné | 3,45 | Huawei PRRU 5961 (Huawei, Shenzhen, Čína) | 0,63 |
| 7: Výskumné zariadenie, súkromná mikrobunka 5G FR2 | laboratórny scenár | ÁNO | súkromné | 26 | Nokia AWEUC (Nokia, Espoo, Fínsko) | 1 |
| 8: Inteligentný priemysel 4.0: paletový sklad, súkromná pikobunka 5G FR1 | logistika, sklad | ÁNO | súkromné | 28 | 5G NR 4×4 | 1 |

Najprv sa získali všetky potrebné technické údaje o zdrojoch vysokofrekvenčného elektromagnetického žiarenia, ako napríklad prevádzková frekvencia, vysielací výkon a charakteristiky antény. Tieto informácie sú potrebné pre numerické modelovanie a správny návrh meracích postupov. (Obrázok1).




**Obrázok 1.**Proces analýzy lokality. Žlté pole predstavuje začiatok analýzy lokality a modré polia predstavujú výsledky analýzy. Symbol (. . .) označuje ďalšie parametre, ktoré nie sú v texte podrobne uvedené.

Merania boli vykonané podľa široko používanej normy IEC 62232:2022 [3]. Na posúdenie najhoršieho prípadu expozície sa použili merania pri zaťažení a selektívne merania [3]. Merania pri zaťažení sú možné, keď je meraný zdroj dominantný, pretože prevádzka je generovaná prevažne meraným zdrojom. Pri selektívnych meraniach sa amplitúda sekundárneho synchronizačného signálu (SSS) s konštantným výkonom meria pomocou kódovo-selektívneho prístroja vybaveného 5G dekodérom. Podľa IEC 62232:2022 [3], extrapolácia na maximum *V*-pole sa vypočíta podľa vzorca:

$$V_{\text{maximum}} = \sqrt{\frac{n_{\text{RE, SSS}} \times F_{\text{Horná úvrat}} \times F_{\text{mravec}}(\varphi,\theta)}{BF}}\, V_{\text{RE, SSS}}, \quad (1)$$

kde $V_{\text{maximum}}$ je maximálna hodnota *V*pole pre jednotlivú 5G BS bunku, $n_{\text{RE, SSS}}$ je pomer medzi maximálnym povoleným vysielacím výkonom a výkonom zdroja (RE), $F_{\text{Horná úvrat}}$ je pracovný cyklus duplexného časového delenia (TDD), $F_{\text{mravec}}$ je faktor tvarovania lúča v dôsledku rôznych ziskov antény vysielajúceho SSS a fyzického zdieľaného kanála downlinku (PDSCH) (1, ak neexistuje tvarovanie lúča), *BF* je zosilňujúci faktor pre referenčný signál (RS) a $V_{\text{RE, SSS}}$ je nameraný výkon RE v SSS. $n_{\text{RE, SSS}}$ je určená šírkou pásma signálu a rozstupom subnosných (SCS) a je uvedená v norme IEC 62232:2022 [3]. Faktor tvarovania lúča $F_{\text{mravec}}$ sa vypočíta z vyžarovacieho diagramu antény podľa rovnice:

$$F_{\text{mravec}} = 10^{\frac{(G_{\text{PDSCH}} - V\,\text{čase}_{\text{PDSCH}}) - (G_{\text{SSS}} - V\,\text{čase}_{\text{SSS}})}{10}} = 10^{\frac{(G_{\text{pokrobiliv}}\text{SCH} - G_{\text{SSS}}) + (O_{\text{SSS}} - V\,\text{čase}_{\text{PDSCH}})}{10}}, \quad (2)$$

kde $G_{\text{PDSCH}}$ (v dBi) je zisk antény pri prenose signálu PDSCH, $O_{\text{PDSCH}}$ (v dB) je obálka relatívneho útlmu antény pri prenose signálu PDSCH v smere vyhodnocovania v dBi a $G_{\text{SSS}}$ (v dBi) je zisk antény pri vysielaní SSS a $O_{\text{SSS}}$ (v dB) je obálka relatívneho útlmu antény pri vysielaní SSS v smere vyhodnocovania. Pre selektívne merania

5G vyžaduje niekoľko technických parametrov v porovnaní s iba minimálnymi technickými údajmi potrebnými na merania pri zaťažení.

Všetky merania boli vykonané pomocou spektrálneho analyzátora (Narda SRM-3006) v kombinácii s trojosou anténou Narda 3502 pre FR1 a trychtýrovou anténou Narda LNB 1 pre FR2 (všetky tri Narda STS, Pfullingen, Nemecko). Rozšírená neistota merania zariadenia bola ±3,5 dB pre frekvenčné pásmo FR1 a ±3,1 dB pre frekvenčné pásmo FR2.

Časť meraní sa uskutočnila v rôznych vzdialenostiach od antény v smere hlavného lúča, 45° vľavo alebo vpravo od hlavného svetla, 90° vľavo alebo vpravo od hlavného lúča a pod anténou v závislosti od inštalácie antény. Výsledky týchto meraní boli použité na potvrdenie numericky vypočítaných vzdialeností zhody. Časť meraní bola vykonaná na rovnomernej mriežke v celej cieľovej oblasti, aby sa zachytilo rozloženie expozície. Výška merania bola 1,5 m nad zemou, čo slúžilo na odhad typických expozícií. Pre všetky miesta merania boli určené vertikálne a horizontálne vzdialenosti od antény.

Na posúdenie časovej variability sa pre väčšinu scenárov vykonali časovo riadené merania na jednom reprezentatívnom mieste v trvaní od niekoľkých minút do viac ako 1 hodiny. To umožnilo výpočet rôznych priemerovacích období a odhad pomerov medzi typickými a maximálnymi expozíciami.

Pre každú anténu uvažovanú v simuláciách boli hranice zhody (CD) určené vyhodnotením vzdialenosti zhody vo všetkých smeroch okolo antény. CD je minimálna vzdialenosť od antény, v ktorej hustota výkonu už nepresahuje limit referenčnej úrovne. $S_{limit}$CD bola odvodená pomocou sférického vzorca pre hustotu výkonu vo vzdialenom poli [3]:

$$S(r,\theta,\varphi) = \frac{P \cdot G(\theta,\varphi)}{4\pi r^2}, \quad (3)$$

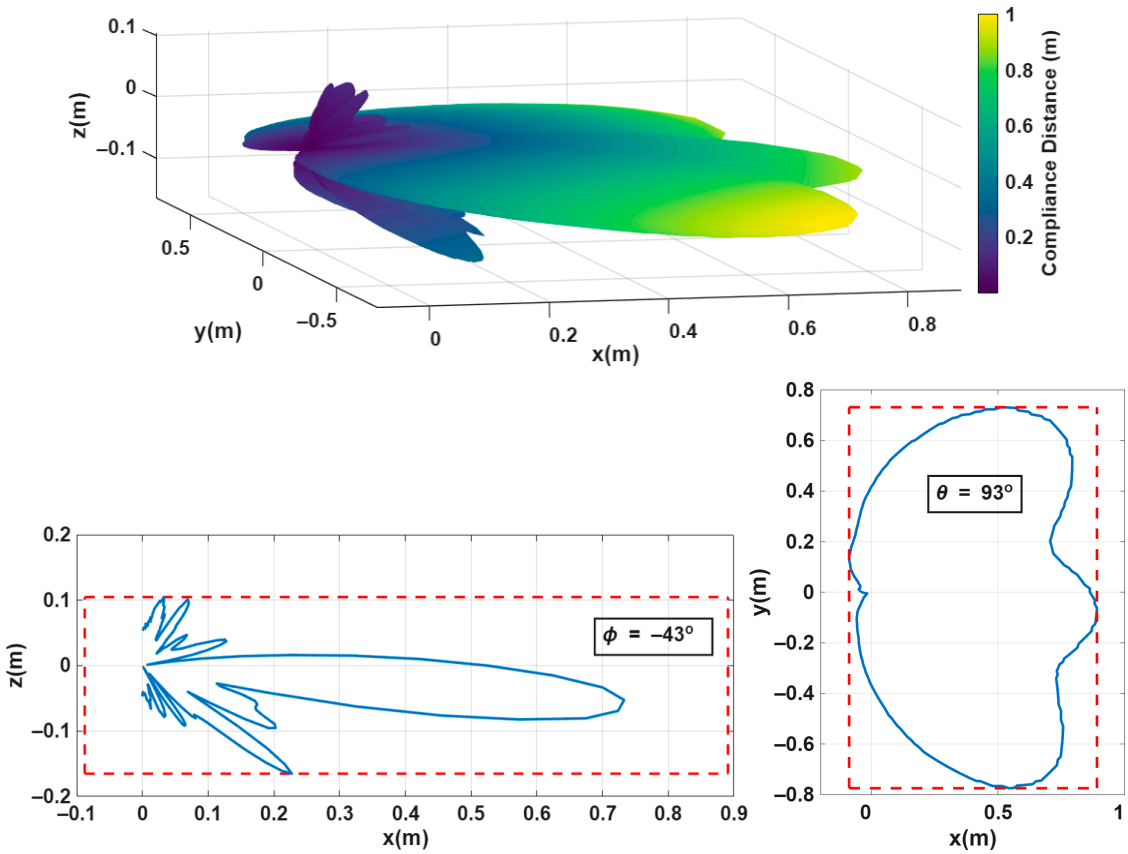
kde $S$ je hustota vyžarovaného výkonu (W/m$^2$), $P$ je vstupný výkon antény (W), $G(\theta,\varphi)$ je lineárny zisk antény, $r$ je radiálna vzdialenosť od antény (m), $\theta$ je polárny (elevačný) uhol a $\varphi$ je azimutálny uhol.

Nastavenie $S = S_{limit}$ a vyriešenie vyššie uvedenej rovnice pre $r$, môžeme určiť CD:

$$CD(\theta,\varphi) = \sqrt{\frac{P \cdot G(\theta,\varphi)}{4\pi S_{limit}}}. \quad (4)$$

Táto rovnica poskytuje smerovo závislú vzdialenosť poddajnosti CD(θ, $\varphi$), ktorá sa mení v závislosti od vyžarovacieho diagramu antény a aplikuje sa za predpokladu šírenia vo voľnom priestore, t. j. že v smere vyhodnocovania nie sú prítomné žiadne významné odrazové povrchy alebo objekty. Pomocou tejto formulácie sme vypočítali 3D hranicu poddajnosti izo-povrchu, ktorá definuje najmenší uzavretý povrch obklopujúci anténu, kde sa hustota výkonu rovná $S_{limit}$ vo všetkých smeroch. Okrem toho sme odvodili hranicu poddajnosti v tvare krabice, definovanú ako najmenší ohraničujúci rámček zarovnaný s osami, ktorý úplne uzatvára 3D izo-plochu. Tento rámček poskytuje zjednodušené geometrické znázornenie užitočné pre zónovanie poddajnosti. CD boli určené pre najhorší prípad expozície, keď anténa pracovala na maximálnom výkone.

Na obrázku 2, je uvedený príklad hraníc zhody pre sektorovú anténu základňovej stanice Alpha Wireless AW3232. Predpokladá sa vysielací výkon 4 W. V hornej časti je uvedená 3D izoplocha predstavujúca CD. V dolnej časti sú znázornené prierezy vo vertikálnej rovine (vľavo) a horizontálnej rovine (vpravo). Pre vertikálnu rovinu bol maximálny CD získaný pri polárnom uhle φ −43° a pre horizontálnu rovinu pod uhlom elevácie θ z 93° Modrá čiara zobrazuje CD, zatiaľ čo červená čiara predstavuje CD v tvare škatule.




**Obrázok 2.**Príklad hraníc súladu. (**Hore**): 3D izo-povrch CD. (**Zľava dole doprava**): Maximálny CD pre vertikálnu rovinu a pre horizontálnu rovinu. Modrá čiara zobrazuje CD, zatiaľ čo červená čiara predstavuje CD v tvare krabice.

Na numerické určenie CD bol použitý programový balík MATLAB (verzia R2025a) (MathWorks, Natick, MA, USA).

## 3. Výsledky

### *3.1. Určenie vzdialenosti zhody*

Dodržiavacia vzdialenosť bola stanovená pre ožiarenie širokej verejnosti aj pre ožiarenie v práci. Pre ožiarenie širokej verejnosti a v práci boli použité limity hustoty výkonu$S_{limit}$sú 10 W/m2a 50 W/$m^2$2, ako stanovila ICNIRP [2] a v súlade so smernicou EÚ 2013/35/EÚ [4]. Vyjadrené v elektrickom poli sú tieto limity 61 a 140 V/m.

Z výsledkov výpočtov vzdialenosti zhody v tabuľke2, je zrejmé, že medzi vnútornými anténami použitými v rôznych scenároch a vonkajšou makrobunkovou anténou nasadenou v prístave existuje podstatný rozdiel.

Pre vnútorné antény sa vertikálne vzdialenosti pre ožiarenie verejnosti pohybujú od 9 do 39 cm a pre ožiarenie v práci od 4 do 17 cm. Horizontálne vzdialenosti pre ožiarenie verejnosti sa pohybujú od 9 cm do 1,54 m a pre ožiarenie v práci od 4 do 69 cm.

V prípade vonkajšej antény sú vertikálne vzdialenosti pre dodržiavanie predpisov najmenej šesťkrát vyššie a dosahujú 2,43 m pre verejnosť a 1,09 m pre ožiarenie v práci. Podobne sú horizontálne vzdialenosti pre dodržiavanie predpisov najmenej deväťkrát vyššie a dosahujú 13,27 m pre verejnosť a 5,94 m pre ožiarenie v práci.

**Tabuľka 2.**Dodržiavanie vzdialeností v rámci simulačných scenárov pre verejnosť a expozíciu na pracovisku.

| Scenár | Expozícia širokej verejnosti $S_{limit}$= 10 W/m$^2$2 | | Expozícia v práci $S_{limit}$= 50 W/m$^2$2 | |
|---|---|---|---|---|
| | Vertikálne Súlad s predpismi Vzdialenosť (m) | Horizontálne Súlad s predpismi Vzdialenosť (m) | Vertikálne Súlad s predpismi Vzdialenosť (m) | Horizontálne Súlad s predpismi Vzdialenosť (m) |
| 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikrobunka 5G FR1 | 0,17 | 0,89 | 0,07 | 0,40 |
| 2: Logistický sektor: prístav, verejná sieťová makrobunka 5G FR1 | 2,43 | 13,27 | 1,09 | 5,94 |
| 3: Inteligentné riešenia IOT: sklad, súkromná pikobunka 5G FR1 | 0,09 | 0,09 | 0,04 | 0,04 |
| 4: Inteligentné riešenia IOT: výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 | 0,09 | 0,09 | 0,04 | 0,04 |
| 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1 a 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 | 0,39 | 1,27 | 0,17 | 0,57 |
| 7: Výskumné zariadenie, súkromná mikrobunka 5G FR2 | 0,38 | 1,40 | 0,17 | 0,62 |
| 8: Inteligentný priemysel 4.0: paletový sklad, súkromná pikobunka 5G FR1 | 0,12 | 0,60 | 0,05 | 0,27 |

Pre niekoľko scenárov boli lineárne merania vykonané v rôznych vzdialenostiach od antény. Pre scenár 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikrobunka 5G FR1, výsledky lineárnych meraní sú uvedené v tabuľke3prekročili limity expozície pre širokú verejnosť vo vzdialenosti 0,2 m od antény, zatiaľ čo vo vzdialenosti 0,5 m boli tesne pod limitmi. To sa dobre zhoduje s numericky určenou hodnotou CD 0,89 m, ktorá je o niečo vyššia ako nameraná hodnota v dôsledku zjednodušenia numerického modelu predstavujúceho anténu ako bodový zdroj.

**Tabuľka 3.**Výsledky meraní trate pre scenár 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikrobunka 5G FR1. Merania sa vykonali v smere hlavného lúča antény, v smeroch 45◦od hlavného lúča antény a kolmice (90◦) k hlavnému lúču.

| Vzdialenosť (m) | $V_{diaľkové\ svetlo}$(V/m) | $V_{45◦z\ diaľkového\ svetla}$ (V/m) | $V_{90◦z\ diaľkového\ svetla}$ (V/m) |
|---|---|---|---|
| 0,2 | 75,69 | 63,30 | 37,62 |
| 0,5 | 50,64 | 58,30 | 26.09 |
| 1 | 34,28 | 36,55 | 19,78 |
| 2 | 13,95 | 10,61 | 11.15 |

Pre scenár 3: Inteligentné riešenia IoT: sklad, súkromná 5G FR1 pikobunka a scenár 4: Inteligentné riešenia IoT: výrobný závod, súkromná 5G FR1 pikobunka, bola najmenšia vzdialenosť, pri ktorej sa merania vykonávali, 0,3 m. Nameraná hodnota bola 8,9 V/m, čo je výrazne pod limitmi expozície. Numericky stanovená hodnota CD bola iba 0,09 m.

Pre scenár 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1, namerané hodnoty vo výške antény (3 m) v tabuľke4prekročili limity expozície pre širokú verejnosť vo vzdialenosti 0,5 m od antény, zatiaľ čo vo vzdialenosti 1 m boli tesne pod limitnými hodnotami. To sa dobre zhoduje s numericky stanovenou hodnotou CD 1,27 m, ktorá je o niečo vyššia ako nameraná hodnota v dôsledku zjednodušenia numerického modelu predstavujúceho anténu ako bodový zdroj. Pre expozíciu na pracovisku limitné hodnoty

sú prekročené vo vzdialenosti 0,2 m od antény, zatiaľ čo pri 0,5 m sú pod limitmi, čo dobre súhlasí s numericky určenou hodnotou CD 0,57 m.

**Tabuľka 4.**Výsledky meraní liniek pre scenár 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1. Merania sa vykonali v smere hlavného lúča antény a v smeroch 45◦z hlavného lúča antény.

| Vzdialenosť (m) | $V_{\text{diaľkové svetlo pod zaťažením}}$ (V/m) | $V_{\text{extrapolovaný diaľkový lúč}}$ (V/m) | $V_{45\,\text{z diaľkového svetla pod zaťažením}}$ (V/m) | $V_{45\,\text{z extrapolovaného diaľkového svetla}}$ (V/m) |
|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 242,56 | 250,60 | 121,53 | 84,38 |
| 0,5 | 83,65 | 107,70 | 60,36 | 76,04 |
| 1 | 45,79 | 50,47 | 32,93 | 23,85 |
| 2 | 25,47 | 32,04 | 23,38 | 16.13 |

Pre scenár 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná piko bunka 5G FR1, CD nebol numericky určený, pretože vyžarovací diagram zdroja nebol k dispozícii. Výsledky meraní linky sú uvedené v tabuľke5Namerané hodnoty vo vzdialenosti 0,2 m, čo je najmenšia vzdialenosť, v ktorej boli merania vykonané, sú výrazne pod limitnými hodnotami pre širokú verejnosť, čo znamená, že CD je výrazne menšia ako 0,2 m.

**Tabuľka 5.**Výsledky meraní linky pre scenár 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 v troch smeroch s počiatkom v pRRH: vo výške antény (3 m), smerovaná 45◦ smerom nadol a vo vertikálnom smere.

| Vzdialenosť (m) | $V_{\text{diaľkové svetlo}}$(V/m) | $V_{45\,\text{z diaľkového svetla}}$ (V/m) | $V_{\text{vertikálne}}$(V/m) |
|---|---|---|---|
| 0,2 | 8,83 | 9,78 | 18.11 |
| 0,5 | 4,80 | 4,86 | 6,99 |
| 1 | 2,25 | 2,90 | 4.24 |
| 2 | 1,04 | 1,56 | 2.13 |

Pre scenár 7: Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikrobunka, boli merania vedenia vykonané v smere hlavného lúča, 45◦k hlavnému svetlu a 90◦k hlavnému lúču. Všetky tieto tri čiary boli naklonené o −10◦, pretože to bola hodnota sklonu antény nadol. Merania vedenia sa vykonali za podmienok rýchlostného testu, aby sa zachytili maximálne hodnoty. Výsledky meraní vedenia sú uvedené v tabuľke6Keďže najmenšia vzdialenosť, v ktorej sa merania vykonávali, bola 1 m, limity expozície pre širokú verejnosť neboli prekročené. Numericky určená hodnota CD bola 1,4 m. Dôvodom rozdielu je zjednodušenie numerického modelu, ktorý predstavuje anténu ako bodový zdroj. Keďže táto anténa FR2 má veľmi vysokú smerovosť, toto zjednodušenie je výraznejšie aj pri mierne väčších vzdialenostiach, a preto je numericky určená hodnota CD väčšia ako nameraná.

**Tabuľka 6.**Výsledky meraní vedení pre scenár 7: Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikrobunka v troch vedeniach, 10◦smerom nadol od antény, čo je sklon antény.

| Vzdialenosť (m) | Výška (m) | $V_{\text{diaľkové svetlo}}$(V/m) | $V_{45\,\text{z diaľkového svetla}}$(V/m) | $V_{90\,\text{z diaľkového svetla}}$(V/m) |
|---|---|---|---|---|
| 1,0 | 1,32 | 23,61 | 9,33 | 1,45 |
| 2.0 | 1,15 | 11,27 | 10,26 | 0,98 |

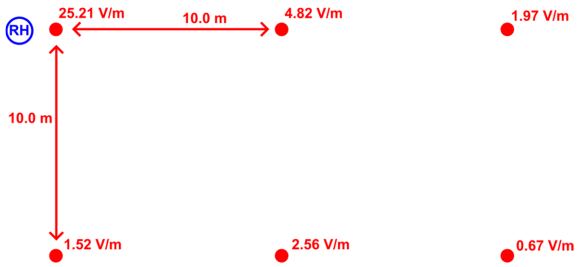
*3.2. Typická expozícia v dôsledku súkromných sietí*

3.2.1. Scenár 1: Logistický sektor: Prístav, súkromná mikrocela 5G FR1

V prístave boli posúdené dva scenáre nasadenia 5G. V prvom scenári bola nainštalovaná súkromná samostatná (SA) 5G sieť pracujúca na frekvencii 3,5 GHz. Merania

sa vykonávali predovšetkým na testovacom mieste mimo prístavu, kde sa dostupnosť a kontrola ľahšie zabezpečili dodatočnými meraniami vykonanými v samotnom prístave. Zariadenie pozostávalo zo 4 W základňovej stanice pracujúcej na frekvencii 3,41 GHz. Šírka pásma bola 20 MHz s pracovným cyklom 0,6. Smerová anténa Alpha Wireless AW3232 bola namontovaná na stožiari vo výške 1,9 m (stred antény); preto bol k anténe priamy prístup, čo je pri skutočných súkromných 5G inštaláciách veľmi nepravdepodobné.

Merania sa vykonávali v podmienkach záťaže, počas meraní prebiehal test rýchlosti a skutočný výkon základňovej stanice monitoroval poskytovateľ siete. Výška merania bola 1,5 m. Z dôvodu priestorových obmedzení sa merania vykonávali do vzdialenosti 20 m a 10 m napravo od antény (obrázok3). Tabuľka7 zobrazuje rôzne štatistické hodnoty výsledkov merania.




**Obrázok 3.**Výsledky rastrových meraní vo výške 1,5 m. Modrý štítok RH označuje polohu antény.

**Tabuľka 7.**Výsledky rastrových meraní vo výške 1,5 m pre súkromnú sieť v prístave.

| Typ výsledku | E (V/m) |
|---|---|
| maximálna hodnota | 25.21 |
| 95. percentil | 21,97 |
| mediánová hodnota | 2,28 |
| štandardná odchýlka | 16.02 |

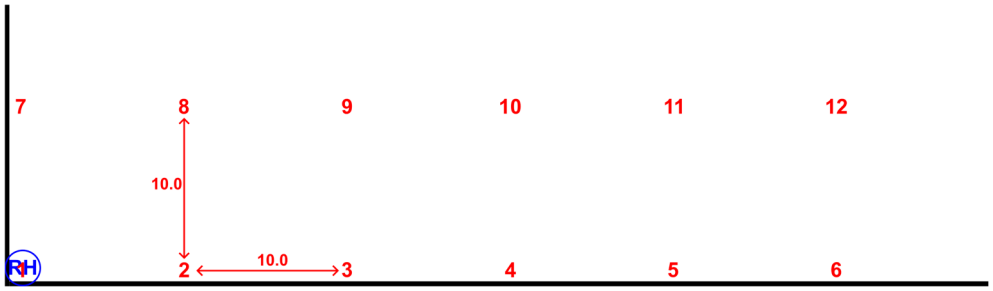
3.2.2. Scenár 2: Logistický sektor: Prístav, verejná sieťová makrobunka 5G FR1

V prístave bol druhý scenár založený na súkromnom segmente v rámci verejnej 5G siete s frekvenciou 3,5 GHz. Tento súkromný segment sa spoliehal výlučne na základňové stanice umiestnené v prístave a všetka základná infraštruktúra sa nachádzala v oblasti prístavu. V dôsledku toho boli všetky informácie uchovávané v priestoroch prístavu. Zariadenie pozostávalo zo 100 W základňovej stanice pracujúcej na frekvencii 3,47 GHz. Šírka pásma bola 100 MHz s pracovným cyklom 0,8. Anténa s tvarovaním lúča Ericsson AIR 3227 bola namontovaná na stožiari vo výške 9,2 m (obrázok4). Merania sa vykonávali za zaťaženia vo výške 1,5 m. Rastrové merania sa vykonávali na ploche s dĺžkou 10 m.×10 m mriežka až do vzdialenosti 50 m (obrázok5). Tabuľka8zobrazuje výsledky merania rastra.

**Tabuľka 8.**Výsledky rastrových meraní vo výške 1,5 m pre verejný výrez v prístave.

| Miesto merania | E (V/m) | Miesto merania | E (V/m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,06 | 7 | 1,40 |
| 2 | 3,56 | 8 | 6.19 |
| 3 | 13.30 | 9 | 17,55 |
| 4 | 24.22 | 10 | 12.17 |
| 5 | 6,06 | 11 | 10.01 |
| 6 | 13,62 | 12 | 14,86 |
| maximálna hodnota | | 24.22 | |
| 95. percentil | | 20,82 | |
| mediánová hodnota | | 11.14 | |
| štandardná odchýlka | | 12,98 | |

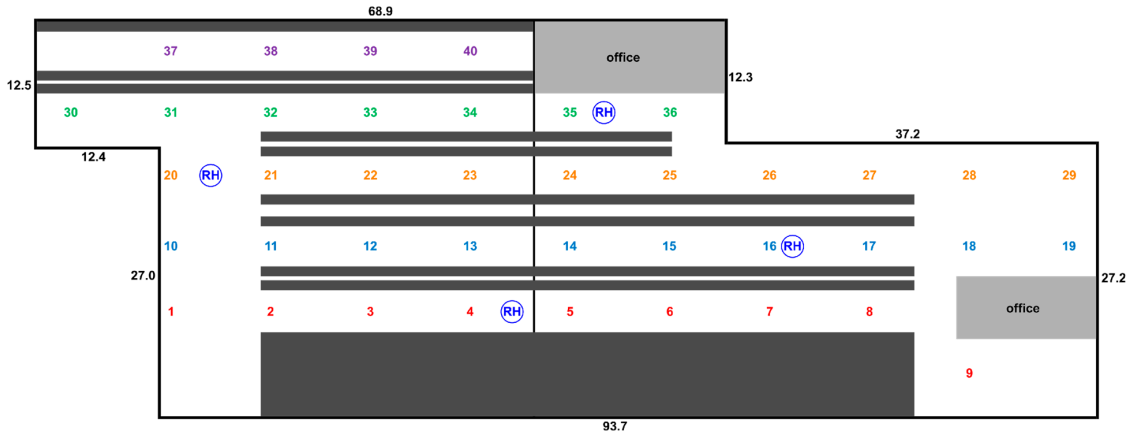
**Obrázok 4.**Logistický sektor (prístav) – testovaná základňová stanica 5G.




**Obrázok 5.**Miesta meraní rastra. Modrý štítok RH označuje polohu antény. Rozmery sú uvedené v m.

3.2.3. Scenár 3: Inteligentné riešenia IoT: Sklad, súkromná 5G FR1 Pico bunka

V sklade bola nainštalovaná súkromná 5G sieť. Budova má rozlohu približne 3400 $m^2$.2a je postavený prevažne z betónu s kovovou strechou vo výške 5,5 m. Vnútri šesť radov paletových regálov pokrýva približne 40 % plochy skladu (obrázok6). Útlm paletových regálov bol v priemere stanovený na 3 dB [5].




**Obrázok 6.**Umiestnenie rastrových meraní. Čierne bloky predstavujú steny, tmavosivé rady paletových regálov a svetlosivé kancelárie. Modrý štítok RH označuje umiestnenie pRRH. Rozmery sú uvedené v m.

Súkromná sieť SA 5G pracovala vo frekvenčnom rozsahu 3,7 – 3,8 GHz. Testovaná súkromná sieť pozostávala zo štyroch vnútorných rádiových hlavíc Nokia AirScale AWHQB (Nokia, Espoo, Fínsko) rozmiestnených po sklade, namontovaných na strešných nosníkoch vo výške približne 5 m s maximálnym výstupným výkonom 1 W. Vyžarovací diagram pRRH je takmer izotropný. Pracovný cyklus bol 0,6.

Boli vykonané merania selektívne podľa kódu. Vzhľadom na obmedzenia, ktoré predstavujú paletové regály, boli rastrové merania mierne upravené. Namiesto 10×10 m mriežka, merania pozdĺž chodieb boli vykonané s rozostupom 10 m (obrázok6).

Výsledky meraní uvedené v tabuľke9, jasne ukazujú, že hodnoty elektrického poľa boli nízke na všetkých meraných miestach. Hodnota 95. percentilu bola 1,01 V/m.

**Tabuľka 9.**Výsledky rastrových meraní v sklade.

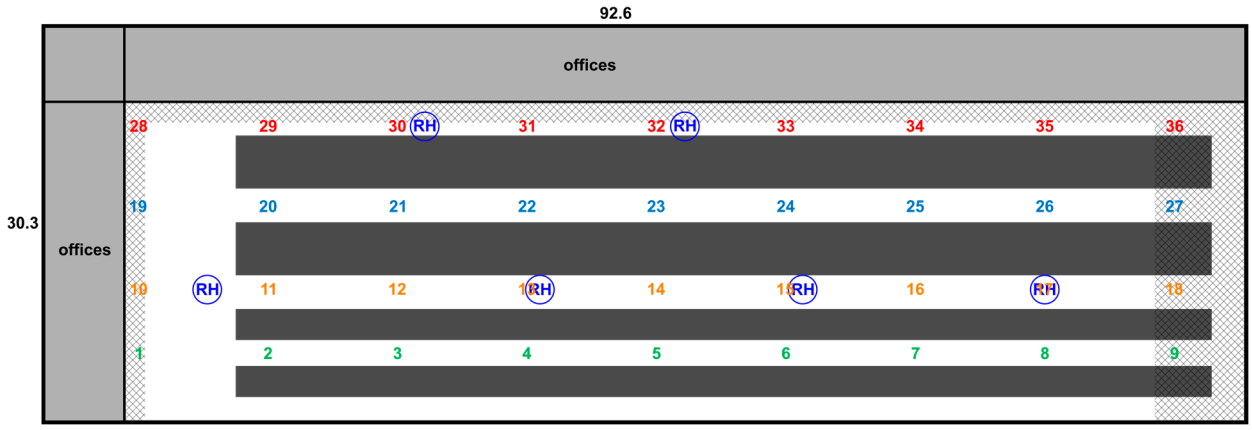
| Miesto merania | E (V/m) | Miesto merania | E (V/m) | Miesto merania | E (V/m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,59 | 15 | 0,40 | 29 | 0,17 |
| 2 | 0,38 | 16 | 1,41 | 30 | 0,38 |
| 3 | 0,43 | 17 | 0,75 | 31 | 0,71 |
| 4 | 0,74 | 18 rokov | 0,42 | 32 | 0,63 |
| 5 | 0,34 | 19 | 0,25 | 33 | 0,33 |
| 6 | 0,27 | 20 | 1,25 | 34 | 0,22 |
| 7 | 0,25 | 21 | 0,87 | 35 | 0,77 |
| 8 | 0,47 | 22 | 0,56 | 36 | 0,64 |
| 9 | 0,13 | 23 | 0,23 | 37 | 0,31 |
| 10 | 1,00 | 24 | 0,28 | 38 | 0,16 |
| 11 | 0,51 | 25 | 0,52 | 39 | 0,12 |
| 12 | 0,18 | 26 | 0,42 | 40 | 0,08 |
| 13 | 0,25 | 27 | 0,49 | | |
| 14 | 0,18 | 28 | 0,18 | | |
| | maximálna hodnota | | | 1,41 | |
| | 95. percentil | | | 1,01 | |
| | mediánová hodnota | | | 0,39 | |
| | štandardná odchýlka | | | 0,64 | |

3.2.4. Scenár 4: Inteligentné riešenia IoT: Výrobné miesto, súkromná 5G FR1 Pico bunka

Na výrobnom mieste pre montáž a testovanie elektronických zariadení bola nainštalovaná súkromná 5G sieť. Výrobná hala má rozlohu približne 2800 $m^2$.2a je postavená prevažne z betónu s kovovou strechou vo výške 6,9 m. Na dvoch stranách haly sa nachádzajú dvojúrovňové kancelárie s balkónom na prvom poschodí vo výške 3,4 m. Väčšinu budovy zaberá hlavná výrobná hala, ktorá zahŕňa niekoľko vyhradených pracovných staníc na montáž a testovanie, usporiadaných do štyroch radov oddelených chodbami. Všetky zariadenia sú relatívne nízko, pod 2,5 m. Efektívne pokrytie haly zariadeniami je menej ako 20 % (obrázok7).

Súkromná sieť SA 5G pracovala vo frekvenčnom rozsahu 3,7 – 3,8 GHz. Testovaná priemyselná súkromná sieť pozostávala zo štyroch vnútorných rádiových hlavíc Nokia AirScale AWHQB rozmiestnených po výrobnej hale s maximálnym výstupným výkonom 1 W. Štyri rádiové hlavy boli namontované na strešných nosníkoch vo výške približne 5,9 m, zatiaľ čo dve boli inštalované na balkóne vo výške približne 3,1 m. Vyžarovací diagram pRRH je takmer izotropný. Pracovný cyklus bol 0,6.

Boli vykonané merania selektívne podľa kódu. Vzhľadom na obmedzenia, ktoré predstavujú paletové regály, boli rastrové merania mierne upravené. Namiesto 10×10 m mriežka, merania pozdĺž chodieb boli vykonané s rozostupom 10 m (obrázok7).




**Obrázok 7.**Umiestnenie rastrových meraní. Čierne bloky predstavujú steny, tmavošedé výrobné priestory s rôznym vybavením, svetlošedé kancelárie a krížový vzor balkón. Modrý text RH označuje umiestnenie pRRH. Rozmery sú uvedené v m.

Expozícia vo výrobnej hale (Tabuľka10) bola o niečo vyššia v porovnaní so skladom (Tabuľka9). Pre 36 meraní rozmiestnených po celej výrobnej hale bola maximálna hodnota 2,11 V/m a 95. percentil bol 1,22 V/m. V sklade sa nachádzalo niekoľko vysokých paletových regálov, väčšinou naplnených rôznymi položkami, zatiaľ čo vo výrobnej hale bolo vybavenie relatívne riedke. Preto bol útlm EMF vyžarovaného pRRH vo výrobnej hale nižší ako v sklade, čo viedlo k vyšším expozíciám vo výrobnej hale.

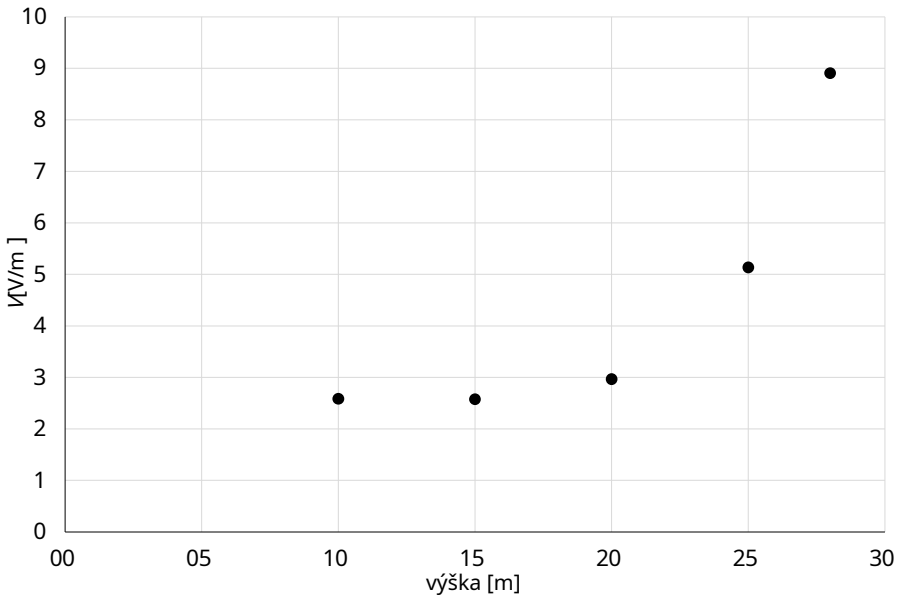
**Tabuľka 10.**Výsledky rastrových meraní vo výrobnom závode.

| Miesto merania | E (V/m) | Miesto merania | E (V/m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,49 | 19 | 1,02 |
| 2 | 0,79 | 20 | 0,62 |
| 3 | 0,73 | 21 | 0,65 |
| 4 | 0,68 | 22 | 0,58 |
| 5 | 0,83 | 23 | 0,70 |
| 6 | 0,52 | 24 | 1,28 |
| 7 | 1,14 | 25 | 0,91 |
| 8 | 0,85 | 26 | 0,61 |
| 9 | 1,17 | 27 | 0,35 |
| 10 | 0,52 | 28 | 0,38 |
| 11 | 0,51 | 29 | 0,45 |
| 12 | 0,52 | 30 | 1,20 |
| 13 | 1.11 | 31 | 1,09 |
| 14 | 0,61 | 32 | 2.11 |
| 15 | 0,95 | 33 | 0,89 |
| 16 | 0,63 | 34 | 0,42 |
| 17 | 0,51 | 35 | 0,36 |
| 18 rokov | 1,01 | 36 | 0,50 |
| maximálna hodnota | | 2.11 | |
| 95. percentil | | 1,22 | |
| mediánová hodnota | | 0,66 | |
| štandardná odchýlka | | 0,88 | |

Ako sa očakávalo, maximálna hodnota vo výrobnej hale bola nameraná na meracom mieste 32, blízko jednej z najnižších hodnôt pRRH. Jednotky pRRH v súkromných inštaláciách nebudú namontované výrazne nižšie ako v analyzovanom prípade; preto táto situácia predstavuje najhorší možný prípad, aký sa môže vyskytnúť v inštaláciách súkromných sietí.

Pre ďalšiu analýzu najhoršieho možného scenára boli vykonané ďalšie merania v blízkosti jedného z pRRH namontovaného vo výške 3,1 m. Merania boli

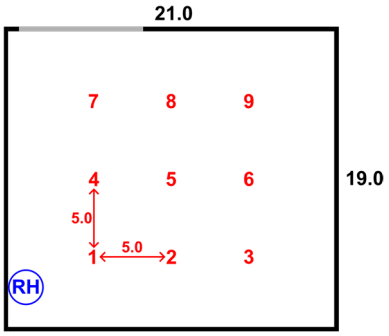
vykonané vo viacerých výškach pozdĺž zvislej čiary pod anténou. Výsledky na obrázku8 ukazujú, že na vyšších miestach bližšie k pRRH sa hodnoty zvyšujú až na 8,9 V/m vo výške 2,8 m, čo je 0,3 m pod pRRH.




**Obrázok 8.**Výsledky podrobných meraní pod pRRH namontovaným vo výške 3,1 m. Merania sa vykonali v 5 rôznych výškach pod pRRH.

3.2.5. Scenár 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobuňka 5G FR1

V kancelárskej hale s rozlohou približne 400 m² bola nainštalovaná súkromná 5G sieť.2, postavená prevažne z betónu, s kovovou strechou vo výške 7 m. Horná strana haly na obrázku9mali kovové dvere široké približne 6 m, ktoré sa rozprestierali po celej výške steny (sivá časť steny na obrázku9). Pravá strana ohraničovala ďalšie kancelárie s kovovými stenovými panelmi a niekoľkými malými oknami. V hale sa nenachádzali žiadne vysoké predmety. Súkromná samostatná (SA) 5G sieť fungovala na frekvencii 3,47 GHz so šírkou pásma 100 MHz. Pracovný cyklus bol 0,8. Anténa Ericsson 6524 (Ericsson, Štokholm, Švédsko) s rozmermi 0,2 m×0,2 m, bola namontovaná na stene vo výške 3 m. Výkon dodávaný do antény bol 20 W. Merania sa opakovali dvakrát: najprv za podmienok rýchlostného testu a druhýkrát ako kódovo-selektívne merania. Vzhľadom na malú veľkosť zariadenia sa rastrové merania vo výške 1,5 m vykonali na 5 m×5 m mriežka namiesto 10 m×10 m mriežka. Stôl11zobrazuje výsledky merania.



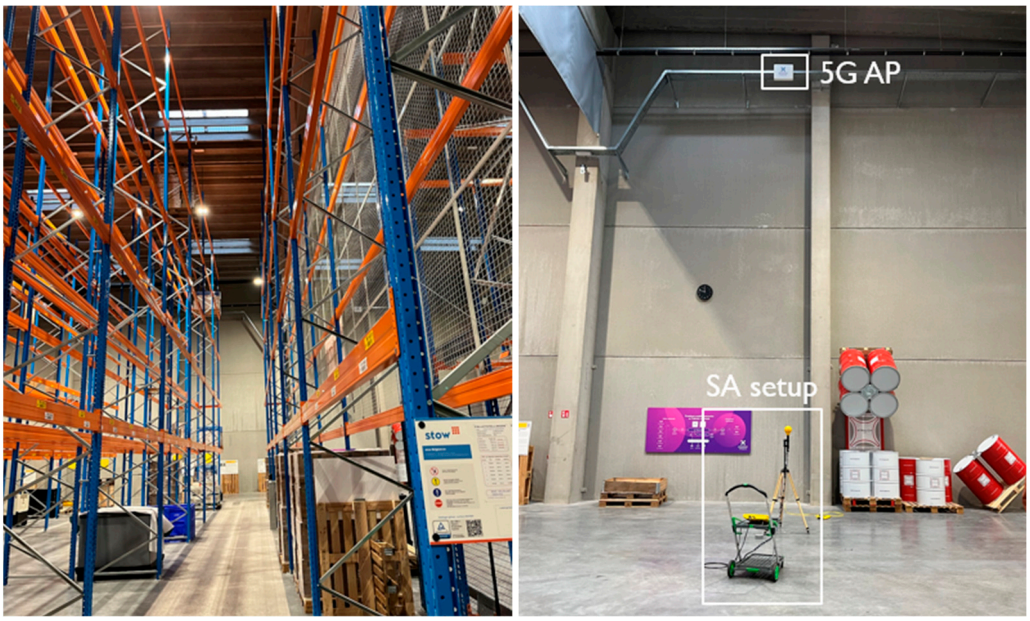

**Obrázok 9.**Umiestnenie rastrových meraní. Modrý štítok RH označuje umiestnenie antény. Rozmery sú uvedené v m.

**Tabuľka 11.**Výsledky rastrových meraní pre selektívne merania a pre merania pod zaťažením.

| Miesto merania | $V_{selektívny}$(V/m) | $V_{zaťaženie}$(V/m) |
|---|---|---|
| 1 | 11,63 | 9,38 |
| 2 | 9.24 | 7.30 |
| 3 | 3,72 | 7,84 |
| 4 | 7,68 | 4,64 |
| 5 | 5,05 | 7,28 |
| 6 | 8.31 | 6,71 |
| 7 | 3,07 | 3.22 |
| 8 | 4,78 | 4,72 |
| 9 | 4,98 | 4,88 |
| maximálna hodnota | 11,63 | 9,38 |
| 95. percentil | 10,74 | 8,79 |
| mediánová hodnota | 5,05 | 6,71 |
| štandardná odchýlka | 6,46 | 4,97 |

3.2.6. Scenár 8: Inteligentný priemysel 4.0: Paletový sklad, súkromná 5G FR1 PicoCell

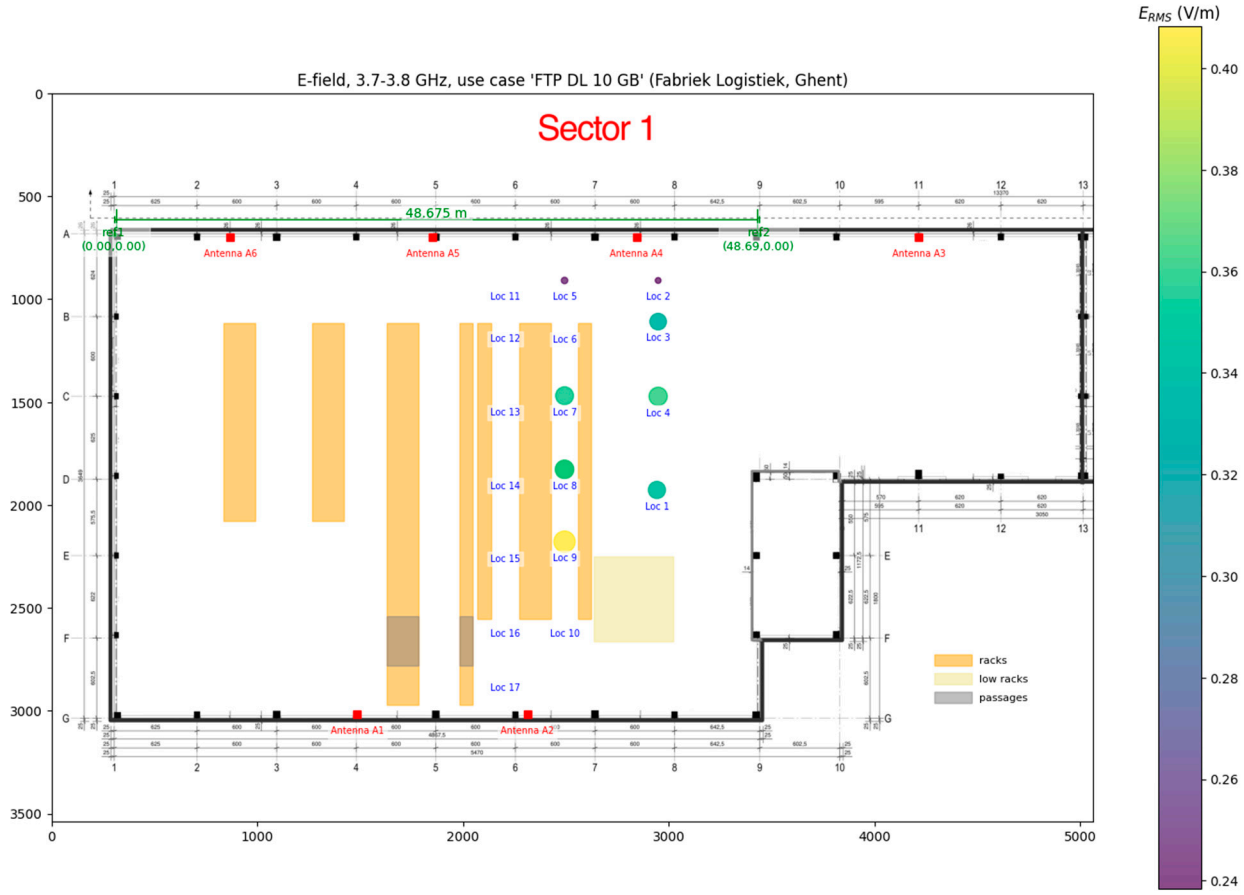
Fabriek Logistiek je logistické testovacie centrum v Gente v Belgicku, ktoré pozostáva z paletového skladu s rozlohou 2400 $m^2$.2a sklad elektronického obchodu s rozlohou 2000 m2V celom testovacom centre bola mobilným operátorom nasadená súkromná sieť 5G. Sklad obsahuje šesť smerových 4G/5G portov.×4 MIMO antény v budove, ktoré zabezpečujú pokrytie v každej z chodieb medzi kovovými regálmi paletového skladu (pozri obrázok10, vľavo). Pracuje na frekvencii 3,7 GHz.




**Obrázok 10.**(**Vľavo**): Obrázok kovových regálov v sklade paliet. (**Vpravo**): Zostava spektrálneho analyzátora (SA) pozostávajúca z NARDA SRM-3006 a triaxiálnej sondy, smartfónu na vozíku a 5G prístupového bodu nainštalovaného v blízkosti strechy skladu paliet.

Merania sa vykonávali vo výške 1,7 m. Smartfón Xiaomi 12 Pro (Xiaomi, Peking, Čína) vybavený testovacím nástrojom QualiPoc (verzia 23.0.52) (Rohde & Schwarz, Mníchov, Nemecko) sa nachádzal 2 m od sondy. Boli zvážené dva scenáre: scenár nečinnosti, počas ktorého nebolo počas merania nadviazané žiadne aktívne downlinkové pripojenie, a scenár „sťahovanie FTP 10 GB“ iniciovaný spustením sťahovania FTP na mobilnom telefóne počas merania (pozri obrázok10, vpravo).

Obrázok 11 zobrazuje priemernú RMS *V*-pole vo frekvenčnom pásme 3,7 – 3,8 GHz na uzemňovacej rovine paletového skladu pre scenár „FTP 10 GB DL“. Frekvenčné pásmo 3,7 – 3,8 GHz používa súkromná sieť 5G.




**Obrázok 11.** Nameraná priemerná RMS *V*-poľa medzi 3,7 GHz a 3,8 GHz pre scenár „Stiahnutie FTP 10 GB“ v paletovom sklade, vykreslené na pôdoryse paletového skladu. Umiestnenia prístupových bodov sú označené označením „Loc“, za ktorým nasleduje číslo. RMS *V* hodnoty polí sú znázornené ako kruhy s farbou a polomerom upraveným podľa hodnoty poľa.

Tabuľka 12 uvádza strednú a maximálnu RMS hodnotu *V* hodnoty poľa na deviatich miestach v sklade paliet. Priemerná hodnota RMS E-poľa pre scenár „Nečinnosť“ sa pohybovala medzi 0,13 V/m a 0,14 V/m. Počas scenára „FTP 10 GB DL“ sa priemerná hodnota RMS E-poľa pohybovala od 0,24 V/m na miestach Loc 2 a Loc 5 do 0,41 V/m na mieste Loc 9. Maximálna nameraná hodnota RMS *V* Hodnoty poľa pozorované počas scenára „FTP 10 GB DL“ boli 3,5 až 3,8-krát vyššie ako priemerné hodnoty, v rozmedzí od 0,77 V/m v lokalite Loc 5 do 1,56 V/m v lokalite Loc 9. Pre scenár „Nečinnosť“ sa maximálne hodnoty pohybovali od 0,51 V/m v lokalite Loc 5 do 1,00 V/m v lokalite Loc 6.

### *3.3. Priestorová variabilita*

Boli vykonané podrobné merania na vyhodnotenie priestorového priemerovania, ktoré sa riadili normou IEC 62232:2022 [3] schéma priestorového priemerovania s použitím troch výšok (1,1, 1,5 a 1,7 m) v troch bočných polohách (stred, 0,2 m vľavo a rovnaká hodnota vpravo). Táto rovina priniesla deväť meracích bodov. Bola rozšírená o dve ďalšie vertikálne roviny posunuté o 0,2 m pred a za centrálnou rovinou, čo spolu predstavovalo 27 meracích bodov. Vypočítali sa nasledujúce priemerné hodnoty: 3 body (centrálne body vo všetkých výškach), 9 bodov (všetky body v centrálnej vertikálnej rovine), 27 bodov a 9 bodov vo vzdialenosti 1,1 m, 1,5 m a 1,7 m.

**Tabuľka 12.**Priemerná a maximálna RMS hodnota *V*-pole merané vo frekvenčnom pásme 3,7 – 3,8 GHz na deviatich miestach v sklade paliet pre scenáre „Nečinnosť" (na pozadí) a „Stiahnutie 10 GB z FTP".

| Miesto merania | $V_{PRIEMER\ v\ nečinnosti}$(V/m) | $V_{MAXIMÁLNY\ VOĽNOBEŽ}$(V/m) | $V_{FTP\ DL\ 10\ GB\ AVG}$(V/m) | $V_{FTP\ DL\ MAX\ 10GB}$(V/m) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,13 | 0,76 | 0,34 | 1,16 |
| 2 | 0,13 | 0,74 | 0,24 | 0,92 |
| 3 | 0,14 | 0,65 | 0,34 | 1.10 |
| 4 | 0,14 | 0,78 | 0,36 | 1,29 |
| 5 | 0,13 | 0,51 | 0,24 | 0,77 |
| 6 | 0,14 | 1,00 | / | / |
| 7 | 0,14 | 0,85 | 0,36 | 1,24 |
| 8 | 0,14 | 0,82 | 0,36 | 1,28 |
| 9 | 0,14 | 0,95 | 0,41 | 1,56 |
| maximálna hodnota | 0,14 | 1,00 | 0,41 | 1,56 |
| 95. percentil | 0,14 | 0,98 | 0,39 | 1,47 |
| mediánová hodnota | 0,13 | 0,74 | 0,32 | 1,05 |
| štandardná odchýlka | 0,03 | 0,48 | 0,19 | 0,75 |

Pre scenáre 2: Logistický sektor: prístav, verejná makrobunka 5G FR1, 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1 a 7: Výskumné zariadenie, súkromná mikrobunka 5G FR2 bola priestorová variabilita analyzovaná na jednom mieste v smere hlavného lúča antény, vo vzdialenosti 50 m, 10 m a 3 m od antény. Tabuľka13 zobrazuje výsledky meraní priestorovej variability.

**Tabuľka 13.**Výsledky meraní priestorovej variability.

| Meranie | E (V/m) | | |
|---|---|---|---|
| | **Scenár 2: Logistický sektor: Prístav, Verejný segment 5G FR1 Makrobunka** | **Scenár 5: Kancelária, Test Bezdrôtové pripojenie Siete, súkromné 5G FR1 Mikrobunka** | **Scenár 7: Výskum Zariadenie, súkromné 5G FR2 Mikrobunka** |
| jeden bod | 33,10 | 9.35 | 48,25 |
| Priemer 3 bodov | 35,06 | 12,71 | 30,23 |
| 9-bodový priemer | 32,27 | 12.03 | 28,82 |
| Priemer 27 bodov | 33,98 | 11.13 | 29,55 |
| 9-bodový priemer 1,1 m | 36,42 | 11,50 | 12.06 |
| 9-bodový priemer 1,5 m | 32,81 | 10,39 | 47,50 |
| 9-bodový priemer 1,7 m | 32,57 | 11,47 | 14,73 |

Pre scenáre 2: Logistický sektor: prístav, verejná makrobunka 5G FR1 a 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1, rozdiely medzi rôznymi metódami priemerovania neboli významné.

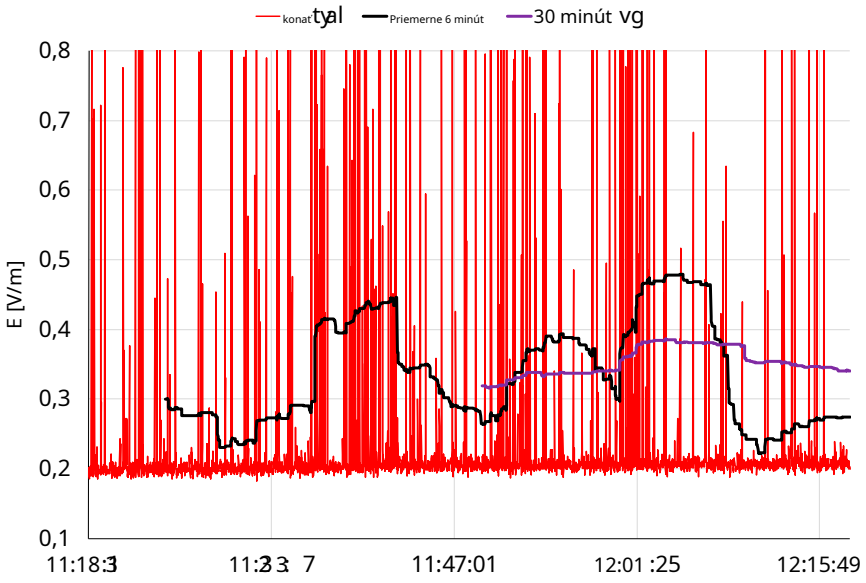
V scenári 7: Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikrobunka, boli rozdiely medzi metódami priemerovania významné, pričom primárnym faktorom bola výška. To sa očakávalo vzhľadom na krátku vzdialenosť medzi miestom merania a anténou a vysokú smerovosť antény. Vertikálny posun len o 0,2 m posunul anténu mimo hlavného lúča, čo viedlo k podstatne nižším hodnotám.

### *3.4. Časová variabilita*

Na zachytenie časovej variability signálov sa merania celého používaného 5G pásma vykonávali počas dlhších časových úsekov na niekoľkých miestach. Keďže väčšina testovaných sietí boli testovacie siete, vo väčšine prípadov nebola prítomná žiadna skutočná prevádzka. Na generovanie prevádzky sa počas meracieho obdobia zvyčajne spustil test rýchlosti. Z výsledkov sa vypočítali priemerné hodnoty za 6 minút a ak je to možné, za 30 minút ako hodnota RMS.

Pre scénu ário 1: Logistika sektor c: port, súkromný 5G od Mikrobunka FR1, merania boli zhotovené na diskotéke vzdialenosť 5 m od antény. Základňa 4 W. Keďže išlo Počas meraní nebola prítomná podmienky, t vysielanie na o test s dobou trvania 30 s, bol etžiadna premávka, čo bolo preto, pre obdobie ab o vykonaný rýchlostný test rw s spôsobené 1,16 V/m. Keď bola nízka premávka, th hodnoty e sú l o priemernou hodnotou medzi prítomná premávka, maximálna instantan hodnota bežala 2,5 a 1000 mA. hodnota bola 4,78 V/m; preto je pomer medzi een maxi m Hodnota um a priemerný hodnota 4,1.

Pre scénu ário 2: Logistika c sektor: port, verejný výrez 5G FR1 makro bunka, merania v ee smer hlavného byť a m vo vzdialenosti 50 mwr vykonané počas trvania jednej o mal hodinu. Ako sieť pod test bol verejný výrez, n prevádzka bola prítomná kvôli verejné použitie siete. Výsledky sú uvedené v e, nie o ja rázku F12Maximálne namerané hodnota bola 5,0 1 V/m (červené čiary sú viditeľné na obrázku12d ty e vo vybranej mierke), zatiaľ čo /m najvyššie 6 minút priemerná hodnota bolo oveľa nižšie pri 0,48 V, ( maximum čiernej čiary) a m fialovej najvyššie 30 m v priemernej hodnote ty bolo 0,39 V/m (maximálne ečiary). Hodnota pomeru je preto medzi maximálna hodnota ty a 6-minútové priemerné 10,4. Tieto veľké rozdiely rk počas sú spôsobené b y operáciu g podmienky siete boli testovania. Hoci je základom čas; stanica bola o operačné, to w aktívne iba pre lomový tok preto prerušované vysoké hodnoty h reklama silná v na priemernej hodnote ue.

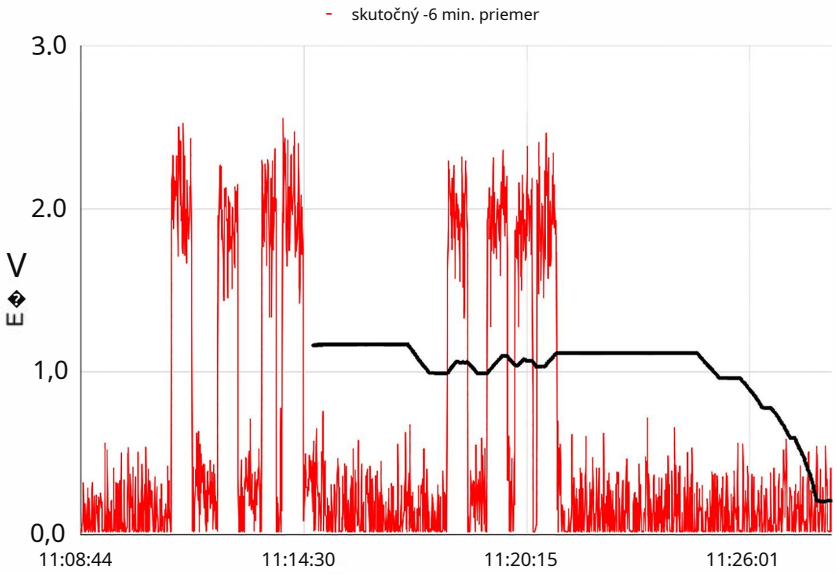



**Obrázok 12.** Časové miery tyremízy z wšírka pásma 5G t používa sa menej ako 5 hodín 0 m od antény v smere hlavného lúča pre scenár 2: Logistický sektor: prístav, verejná segmentová makrobunka 5G FR1. Okrem skutočnej hodnoty sú zobrazené aj priemerné hodnoty za 6 a 30 minút.

Pre scenár 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná piko bunka 5G FR1, boli merania vykonávané počas 20 minút vo vzdialenosti 2 m a 2 m pod pRRH. Keďže išlo o testovaciu sieť, nebola prítomná žiadna skutočná prevádzka; preto bol počas meraní niekoľkokrát vykonaný test rýchlosti, čo je jasne viditeľné z výsledkov na obrázku.13Maximálna hodnota bola 2,55 V/m, zatiaľ čo najvyššia 6-minútová priemerná hodnota bola nižšia, 1,17 V/m. Pomer medzi maximálnou hodnotou a 6-minútovou priemernou hodnotou je preto 2,2.

Pre scenár 7: Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikrobunka, boli merania vykonané v hlavnom lúči vo vzdialenosti 3 m a výške 1 m počas približne 10 minút. Maximálna hodnota bola 20,95 V/m, zatiaľ čo najvyššia 6-minútová priemerná hodnota bola oveľa nižšia, 1,10 V/m. Pomer medzi maximálnou hodnotou a 6-minútovou priemernou hodnotou je preto 19,0. Tieto veľké rozdiely sú spôsobené prevádzkovými podmienkami

testovanú sieť. Objem prevádzky bol veľmi obmedzený, a preto niektoré občasné vysoké hodnoty mali silný vplyv na priemernú hodnotu.




**Obrázok 13.**Časové merania celej šírky pásma 5G pre scenár 6: Kancelária, výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1. Okrem skutočnej hodnoty sú prezentované aj 6-minútové priemerné hodnoty.

Tabuľka14zobrazuje výsledky meraní pre všetky 4 analyzované scenáre.

**Tabuľka 14.**Výsledky meraní časovej variability.

| Meranie | E (V/m) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Scenár 1: Logistika** Sektor: Prístav, Súkromný 5G FR1 mikrobunka | **Scenár 2: Logistika** Sektor: Prístav, Verejný Makro Slice 5G FR1 Bunka | **Scenár 6: Kancelária, Výrobné miesto,** Súkromné 5G FR1 Pico Bunka | **Scenár 7: Výskum** Zariadenie, súkromné 5G Mikrobunka FR2 |
| maximálna hodnota | 4,78 | 5,01 | 2,55 | 20,95 |
| Priemerne 6 minút | 1,16 | 0,48 | 1,17 | 1.10 |
| 30-minútový priemer | | 0,39 | | |
| pomer maximálna hodnota/6-minútový priemer | 4.1 | 10.4 | 2.2 | 19,0 |

## 4. Diskusia

Merania RF EMF sa uskutočnili v ôsmich rôznych scenároch, ktoré boli vybrané tak, aby reprezentovali rozmanité odvetvia – vrátane logistiky, výroby a kancelárskeho prostredia – a frekvenčné pásma (3,5 GHz, 26 GHz). Vybrané scenáre zahŕňajú široké spektrum nastavení súkromných sietí, od verejných 5G makro segmentov pracujúcich s výkonom 100 W na sektor až po vnútorné piko bunky s výkonom pod 1 W.

Výberový proces však bol výrazne obmedzený niekoľkými externými výzvami. Po prvé, počet plne funkčných súkromných inštalácií 5G zostáva veľmi obmedzený. Po druhé, vlastníci existujúcich súkromných sietí 5G sa vo všeobecnosti zdráhali udeliť prístup k svojim zariadeniam, čo bránilo realizácii rozsiahlejších meracích kampaní.

Ďalšou významnou výzvou bol súčasný nedostatok sieťovej prevádzky. Väčšina súkromných 5G sietí je v súčasnosti nečinná alebo prenáša minimálnu prevádzku, najmä pokiaľ ide o počet aktívnych pripojených zariadení. Hoci sa predpokladá, že 5G pre Priemysel 4.0 umožní masívne pripojenie pre zariadenia IIoT a používateľské rozhrania, počas týchto meraní bolo aktívnych len niekoľko zariadení. Hodnoty CD uvedené v tabuľke2a typické úrovne expozície v

Tabuľka15boli určené pre najhoršie možné podmienky; v dôsledku toho zostávajú nezávislé od skutočnej sieťovej prevádzky alebo používania zariadení. V prostrediach s vysokou hustotou pripojených zariadení sa však môže celková expozícia vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam zvýšiť – najmä ak ide o značnú uplinkovú prevádzku, čo je možný budúci scenár pre súkromné siete. Vzhľadom na obmedzený počet takýchto zariadení v tejto štúdii nebolo možné analyzovať tieto kumulatívne účinky. Literatúra týkajúca sa expozície širokej verejnosti naznačuje, že súčasná prevádzka veľkého počtu zariadení v hustých situáciách môže viesť k nepatrnému zvýšeniu celkovej expozície vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam [6,7].

**Tabuľka 15.**Prehľad výsledkov všetkých rastrových meraní.

| Scenár \|Typ výsledku | E (V/m) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Maximálne Hodnota | 95. Percentil | Medián Hodnota | Štandard Odchýlka |
| 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikro bunka 5G FR1 2: | 25.21 | 21,97 | 2,28 | 16.02 |
| Logistický sektor: prístav, verejná makro bunka 5G FR1 3: | 24.22 | 20,82 | 11.14 | 12,98 |
| Inteligentné riešenia internetu vecí: sklad, súkromná piko bunka 5G FR1 | 1,41 | 1,01 | 0,39 | 0,64 |
| 4: Inteligentné riešenia IOT: výrobné miesto, súkromná pikobunka 5G FR1 | 2.11 | 1,22 | 0,66 | 0,88 |
| 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1 | 11,63 | 10,74 | 5,05 | 6,46 |
| 6: Kancelária, výrobný závod, súkromná 5G FR1 piko bunka 7: | 4,64 | 4,07 | 1,05 | 2,90 |
| Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikro bunka 8: | 59,65 | 48,44 | 11,69 | 33,73 |
| Inteligentný priemysel 4.0: paletový sklad, súkromná 5G FR1 piko bunka | 1,56 | 1,47 | 1,20 | 0,75 |

Napriek tomu sa merania časovej variability vykonávali v kľúčových scenároch, kde sa celková hodnota merala v celom frekvenčnom pásme, v ktorom sieť fungovala. V prípadoch, kde bola prevádzka prítomná – alebo zámerne generovaná – sa získali informácie týkajúce sa časovej variability a priemernej expozície. Odhad očakávaných priemerných hodnôt expozície v súkromných 5G sieťach však zostáva náročný a je obmedzený ich súčasným obmedzeným prevádzkovým stavom. Na riešenie tohto problému sa vo všetkých scenároch určili najhoršie možné podmienky, a to buď selektívnymi meraniami s extrapoláciou na maximálne hodnoty, alebo vykonaním meraní za vynútených prevádzkových podmienok (napr. testy rýchlosti alebo nepretržitý prenos dát).

Počas merania v prevádzkovom prostredí továrne bolo identifikované miesto, kde bol pRRH nainštalovaný v nižšej výške 3,1 m, čo predstavuje najhorší možný scenár expozície. Na tomto mieste bolo maximálne elektrické pole namerané vo výške 1,5 m 3,1 V/m, zaznamenané priamo pod pRRH.

Tabuľka15sumarizuje výsledky rastrových meraní. Rastrové merania boli vybrané, pretože poskytujú najlepší odhad úrovní vysokofrekvenčného elektromagnetického žiarenia vyžarovaného testovaným zariadením. Rozmiestnením meracích bodov po celej oblasti okolo zdroja poskytujú spoľahlivé posúdenie priemernej expozície vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu pre personál v blízkosti súkromnej bezdrôtovej siete.

Výsledky uvedené v tabuľke15vykazujú významnú variabilitu v rôznych scenároch expozície, pričom hodnoty dosahujú faktor až 20. Významná priestorová variabilita je zrejmá aj v rámci jednotlivých scenárov. V scenároch 2, 3, 4, 5 a 8 je pomer medzi strednou a maximálnou hodnotou nižší ako 4, čo naznačuje relatívne rovnomerné úrovne expozície v celej meracej mriežke. Naproti tomu v scenári 1 tento pomer presahuje 10. Tento výrazný rozdiel sa pripisuje nízkej inštalačnej výške antény (1,9 m), ktorá umiestnila

najbližší merací bod priamo v hlavnom lúči a v krátkej vzdialenosti od antény.

Stanovenie CD pomocou výpočtov aj meraní naznačuje, že pre typické súkromné inštalácie 5G sú zóny zhody relatívne kompaktné: pod 1,5 m pre ožiarenie verejnosti a pod 0,7 m pre ožiarenie v práci. Výnimka nastáva, keď sa sieťový segment v rámci verejnej siete 5G používa ako súkromná sieť; v týchto prípadoch sa zóny zhody zväčšujú pod 15 m pre ožiarenie verejnosti a pod 6 m pre ožiarenie v práci. Treba poznamenať, že tieto vypočítané CD predstavujú konzervatívne, najhoršie možné situácie, pretože zdroj bol modelovaný ako bodový zdroj. Ak by bol zdroj namiesto toho modelovaný ako pole žiaričov – presnejšie odrážajúce konštrukciu skutočnej antény – výsledné zóny zhody by boli menšie. Tieto zistenia podporujú experimentálne údaje: v prípadoch, keď sa merania vykonávali v blízkosti zdroja, boli CD odvodené z meraní konzistentne menšie ako tie, ktoré boli odvodené z numerických výpočtov.

Pokiaľ ide o časovú variabilitu, vyšetrovanie preukázalo, že trvanie priemerovania má obmedzený vplyv na selektívne merania. V štyroch analyzovaných scenároch bol maximálny rozdiel medzi 1-minútovým a 6-minútovým priemerom 33 % a menej ako 10 % pri porovnaní 3-minútového priemeru.

Naopak, merania v celom frekvenčnom pásme 5G vykazovali podstatne väčšiu variabilitu, ktorá bola spôsobená predovšetkým prevádzkovým stavom siete. Hoci boli základňové stanice aktívne, prenášali prevádzku len po malý zlomok času; v dôsledku toho občasné výbuchy vysokej prevádzky významne ovplyvnili vypočítaný priemer. Maximálny rozdiel medzi priemermi 1 minúta a 6 minút dosiahol 100 %. Okrem toho sa výrazné rozdiely pozorovali pri porovnaní období testovania rýchlosti s vysokým dopytom oproti základným obdobiam nečinnosti.

V scenári 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobuňka 5G FR1, jediným aktívnym zariadením bol modem použitý na testovanie rýchlosti, ktoré zahŕňalo fázu sťahovania aj odosielania. Merania počas týchto aktívnych období sa výrazne líšili od meraní získaných počas nečinnosti. Podobný trend sa pozoroval v scenári 1: Logistický sektor: prístav, súkromná mikrobuňka 5G FR1: počas období nízkej prevádzky zostalo elektrické pole mierne nad 1 V/m, zatiaľ čo počas aktívnych prevádzkových podmienok sa zvýšilo o 2,5 – 5 V/m.

Priestorová variabilita bola posúdená v rámci niekoľkých expozičných scenárov pomocou metodiky predpísanej v norme IEC 62232:2022 [3]. Schéma priestorového priemerovania využila tri vertikálne výšky (1,1 m, 1,5 m, 1,7 m) a tri bočné polohy (stred, 0,2 m vľavo, 0,2 m vpravo), čo viedlo k deviatim meraniam. Dve ďalšie vertikálne roviny (0,2 m vpredu a 0,2 m vzadu) zvýšili celkový počet na 27 meracích bodov.

V scenári 2: Logistický sektor: prístav, verejný segment 5G FR1 makrobunky, zdroj pozostával zo sieťového segmentu 5G využívajúceho makrobunku s tvarovaním lúča namontovanú na stožiari. Všetky výsledky pilotného signálu boli konzistentné vo všetkých schémach priemerovania: jednotlivé merania sa pohybovali od 0,095 do 0,228 V/m, s vypočítanými priemermi v rozmedzí od 0,136 do 0,151 V/m. Extrapolované maximálne hodnoty však vykazovali väčšiu variabilitu v dôsledku efektov tvarovania lúča. Napriek úzkemu priestorovému zoskupeniu meracích bodov sa extrapolačný faktor pohyboval medzi 215,28 a 270,56. V dôsledku toho sa extrapolované hodnoty pohybovali od 20,80 do 48,99 V/m, zatiaľ čo priemerované hodnoty boli stabilnejšie a pohybovali sa od 32,27 do 36,42 V/m. Je potrebné poznamenať, že rozdiely medzi rôznymi metódami priemerovania zostali nevýznamné. Podobné trendy boli získané pre scenár 5: Kancelária, testovacie zariadenie bezdrôtových sietí, súkromná mikrobunka 5G FR1, kde sa hodnoty pohybovali od 9,35 V/m (jeden bod) do 12,71 V/m (trojbodový priemer).

Naproti tomu scenár 7: Výskumné zariadenie, súkromná 5G FR2 mikrobunka, preukázalo významnú variabilitu medzi metódami priemerovania, silne ovplyvnenú výškou merania. Tento výsledok bol očakávaný vzhľadom na krátku vzdialenosť medzi miestom merania a vysoko smerovou anténou základňovej stanice. Menšie zmeny výšky antény spôsobili značné výkyvy v zisku antény a následne v nameranej intenzite elektrického poľa. Rozdiel v údajoch je pozoruhodný: maximálna hodnota z jedného bodu dosiahla 48,55 V/m, zatiaľ čo deväťbodový priemer vo výške 1,1 m priniesol minimum 12,16 V/m. Citlivosť na výšku je ďalej doložená porovnaním deväťbodových priemerov: hodnota bola 47,50 V/m vo výške 1,5 m, ale prudko klesla na 14,73 V/m vo výške 1,7 m.

Merania priestorovej variability naznačujú, že keď majú antény nízku smerovosť a merajú sa v dostatočnej vzdialenosti, presná mikropoloha meracieho bodu zvyčajne nemá významný vplyv. Naopak, pri vysoko smerových anténach má mikropoloha antény dôležitý vplyv na nameranú hodnotu.

Technológia tvarovania lúča tiež podstatne ovplyvňuje časovú a priestorovú variabilitu. Hoci účinky tvarovania lúča neboli v tejto štúdii explicitne analyzované, metodiky na určenie CD boli navrhnuté tak, aby boli konzervatívne: pre výpočty sa použila obálka všetkých dopravných lúčov, zatiaľ čo pre merania sa maximálne hodnoty určili bez použitia faktorov redukcie výkonu.

Hoci účinky tvarovania lúča boli rozsiahlo analyzované pre verejné siete [8,9], súčasný nedostatok reprezentatívnej prevádzky a reálneho využitia v analyzovaných súkromných sieťach zabránil analýze vplyvu tvarovania lúča na skutočné úrovne expozície.

## 5. Závery

Vo všetkých analyzovaných scenároch sa zistilo, že vystavenie vysokofrekvenčnému elektromagnetickému poľu zo súkromných samostatných 5G sietí je výrazne pod limitmi vystavenia na pracovisku, a to aj za najhorších podmienok. Toto je charakteristické pre scenáre inteligentného priemyslu v interiéri, kde nasadenie viacerých nízkovýkonných pRRH zaisťuje robustné pokrytie v rôznych interiérových scenároch napriek vysokému rušeniu. Montáž pRRH na strop je štandardnou praxou, najmä na dosiahnutie dobrého pokrytia, čo inherentne obmedzuje vystavenie vo výškach dostupných pracovníkom. Na ďalšie minimalizovanie priemerného vystavovania sa odporúča zamerať sa na homogénne rozloženie (nižších) úrovní elektrického poľa. To sa dá dosiahnuť buď zvýšením inštalačnej výšky pRRH a zvýšením ich výkonu podľa potreby, alebo zvýšením hustoty pRRH a súčasným znížením ich výstupného výkonu, aby sa udržalo pokrytie a zároveň znížili špičkové hodnoty.

Hoci táto štúdia poskytuje komplexné hodnotenie vystavenia pracovníkov vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu v operačnom prostredí inteligentného priemyslu, výsledky sú založené na obmedzenom súbore súkromných sietí v rámci Smart Industry 4.0. Preto si extrapolácia týchto výsledkov na širšie priemyselné sektory a prostredia vyžaduje opatrnosť. Úrovne expozície podliehajú variabilite, ktorú ovplyvňuje výkon vysielača, hustota rozmiestnenia, konfigurácie tvarovania lúča a environmentálne faktory, ako je konštrukčný návrh, zloženie materiálu a priestorové usporiadanie reflexných povrchov. Zariadenia využívajúce vysielače s vyšším výkonom, nižšie montážne výšky antén alebo hustú kovovú infraštruktúru by mohli vykazovať odlišné rozloženie expozície. Napriek tomu prístup duálnej metodiky štúdie, ktorý kombinuje empirické merania s numerickým modelovaním, zostáva robustným prístupom na hodnotenie expozície pracovníkov v rôznych priemyselných prostrediach.

**Príspevky autorov:**Metodika, PG; softvér, CA a DP; validácia, CA, DP a BV; skúmanie, BV, CA, DP a GV; písanie – príprava pôvodného návrhu, BV a PG; písanie, kontrola a editácia, DP, CA a GV; dohľad, PG Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

**Financovanie:**Tento výskum bol financovaný z rámcového programu Európskej únie Horizont Európa na základe dohody o grante číslo 101057622 (projekt SEAWave).

**Vyhlásenie o dostupnosti údajov:**Pôvodné príspevky prezentované v tejto štúdii sú zahrnuté v článku. Ďalšie otázky môžete adresovať príslušnému autorovi.

**Konflikty záujmov:**Autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov. Financujúce organizácie nemali žiadnu úlohu v návrhu štúdie, v zbere, analýze ani interpretácii údajov, v písaní rukopisu ani v rozhodovaní o publikovaní výsledkov.

## Skratky

V tomto rukopise sa používajú nasledujúce skratky:

| | |
|---|---|
| RF RMF | Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia |
| 5G | 5G je piata generácia technológie mobilných sietí s frekvenčným |
| FR1 | rozsahom 1 pod 7,125 GHz, nazývaným aj sub-6 GHz. |
| FR2 | Frekvenčný rozsah 2, zvyčajne v rozsahu 24 – 71 GHz, známy ako milimetrové vlny alebo horné pásmo |
| pRRH | diaľkové ovládanie pre vnútorné rádio Pico |
| CD | Vzdialenosť zhody (CD) je minimálna vzdialenosť od antény, pri ktorej hustota výkonu už nepresahuje limit referenčnej úrovne. |

## Referencie

1. 5G-ACIA. 5G pre priemyselný internet vecí (IIoT): Možnosti, vlastnosti a potenciál. 5G Aliancia pre prepojené odvetvia a automatizáciu, Biela kniha 5G-ACIA 2021. Dostupné online:https://5g-acia.org/whitepapers/5g-for-industrial-internet-ofthings/ (prístup 30. júna 2025).
2. ICNIRP. Pokyny pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz).*Zdravotná fyzika*.**2020**,*118*, 483–524.
3. *IEC 62232*; Stanovenie intenzity rádiofrekvenčného poľa, hustoty výkonu a SAR v blízkosti základňových staníc rádiokomunikácie na účely vyhodnotenia vystavenia ľudí. Medzinárodná elektrotechnická komisia (IEC): Ženeva, Švajčiarsko, 2022.
4. Smernica 2013/35/EÚ o minimálnych požiadavkách na zdravie a bezpečnosť týkajúcich sa vystavenia pracovníkov rizikám vyplývajúcim z fyzikálnych faktorov (elektromagnetických polí) Smernica 2013/35/EÚ z 26. júna 2013. Ú. v. EÚ L 179. 2013. Dostupné online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj/eng(prístup 29. júna 2025).
5. Gajšek, P.; Apostolidis, C.; Plets, D.; Samaras, T.; Valič, B. Vystavenie pracovníkov elektromagnetickému žiareniu v dôsledku súkromných sietí 5G v inteligentných odvetviach.*Elektronika***2025**,*14*, 2662. [CrossRef]
6. Gontier, Q.; Wiame, C.; Wiart, J.; Horlin, F.; Tsigros, C.; Oestges, C. O expozícii a pokrytí vzostupného a zostupného elektromagnetického poľa v hustých bunkových sieťach: stochastický geometrický prístup.*IEEE Trans. Veh. Technol.***2025**,*74*, 12966–12980. [CrossRef]
7. Celaya-Echarri, M.; Azpilicueta, L.; Ramos, V.; Lopez Iturri, P.; Falcone, F. Empirický a modelový prístup k hodnoteniu environmentálnych RF-EMF v interiéri v komplexných scenároch s vysokou hustotou uzlov: Prípadová štúdia verejných nákupných centier.*Prístup k IEEE***2021**, *9*, 46755. [CrossRef]
8. Rybakowski, M.; Bechta, K.; Grangeat, C.; Kabacik, P. Vplyv algoritmov tvarovania lúča na skutočnú expozíciu vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu z masívnych základňových staníc MIMO.*Prístup k IEEE***2023**,*11*, 141956–141964. [CrossRef]
9. Xu, B.; Anguiano Sanjurjo, D.; Colombi, D.; Törnevik, C. Analýza Monte Carlo skutočnej maximálnej expozície z antény základňovej stanice 5G milimetrových vĺn pre posúdenie zhody s EMF.*Verejné zdravie***2022**,*9*, 777759. [CrossRef] [ ]PubMed]

**Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa:**Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.