

Návrh pevného pozemního bezdrátového spoje

SBS – Projekt 1



Martin Šimák, Antonín Semerád, Marek Hulec, Marek Jína

2022

Obsah

1	Cíl	3
2	Zadání	3
3	Umístění a výšky stožárů	4
4	Výběr antény	6
5	Ověření výškového profilu	6
5.1	Jednotlivé spoje	7
5.1.1	FEL – Strahov	7
5.1.2	Strahov – Rudná	8
5.1.3	Rudná – Závodí	9
5.1.4	Závodí – Beroun	10
5.2	Výpočet a srovnání	11
6	Rezerva na únik	12
7	Ztráty šířením	13
7.1	Útlum atmosférickými plyny	13
7.2	Šíření volným prostorem	13
7.3	Difrakce	13
8	Úniky	14
8.1	Multi-hop spoj	14
9	Útlumy vlivem deště	15
9.1	Útlum pro více skoků	15
10	Shrnutí	16

Seznam obrázků

1	Trasa	4
2	Trasa	5
3	Výškový profil FEL – Strahov	7
4	Výškový profil Strahov – Rudná	8
5	Výškový profil Rudná – Závodí	9
6	Výškový profil Závodí – Beroun	10

Seznam tabulek

1	Umístění a výšky stožárů	4
2	Přehled spojů	5
3	Přehled spojů	6
4	FEL – Strahov	7
5	Strahov – Rudná	8
6	Rudná – Závodí	9
7	Závodí – Beroun	10
8	Přehled spojů	11
9	Rezerva na únik pro $BER=10^{-6}$	12
10	Útlum atmosférickými plyny	13
11	Útlum FSL	13
12	parametr pw	14
13	Porovnání parametrů jednotlivých spojů	15

1 Cíl

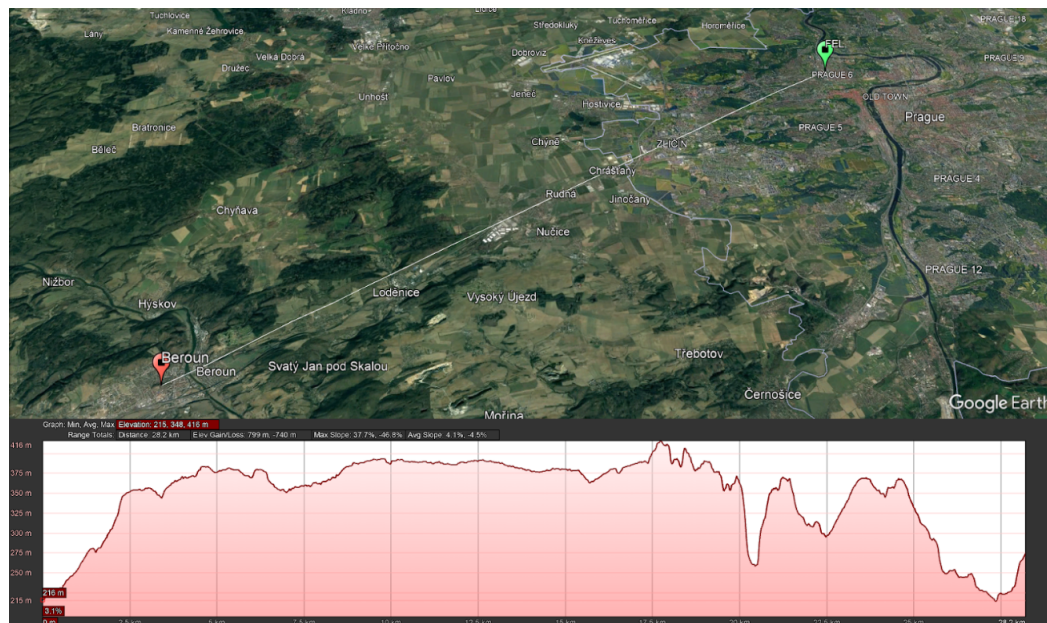
Osvojit si návrh pevného pozemního bezdrátového spoje typu bod-bod v mikrovlnném frekvenčním pásmu dle metodiky ITU-R.

2 Zadání

Představte si otevřenou soutěž na návrh řešení mikrovlnného spoje pro vysokokapacitní přenos dat mezi budovou FEL ČVUT v Praze, Technická 2 (LAT 50,103153N; LON 14,392759E; maximální možná výška umístění antény 40 m nad zemí) a fiktivním odloučeným pracovištěm v Bečkově s anténou na rozhledně na Městské hoře (LAT 49,9626386N; LON 14,0650983E; výška 14 m nad terénem).

3 Umístění a výšky stožárů

Prvním krokem návrhu trasy spoje bylo intuitivní zvážení toho jak by FEL a městská hora v centru Berouna mohly být spojeny. Pohled na terénní profil spojnice těchto míst jasně použití přímého spoje vylučuje. Zejména se kvůli relativně nízké poloze počátečního a koncového bodu spoje, jsou obklopeny kopci, které mají vyšší nadmořskou výšku:



Obrázek 1: Trasa

Dalším krokem bylo nalezení vysílačů, které by mohly spojení umožnit. Vysílače byly nalezeny pomocí webové aplikace mapy.cz. Hlavní výhodou byla možnost vidět vysílače jako body na mapě a tak si vytvořit představu o různých způsobech vedení trasy spoje.

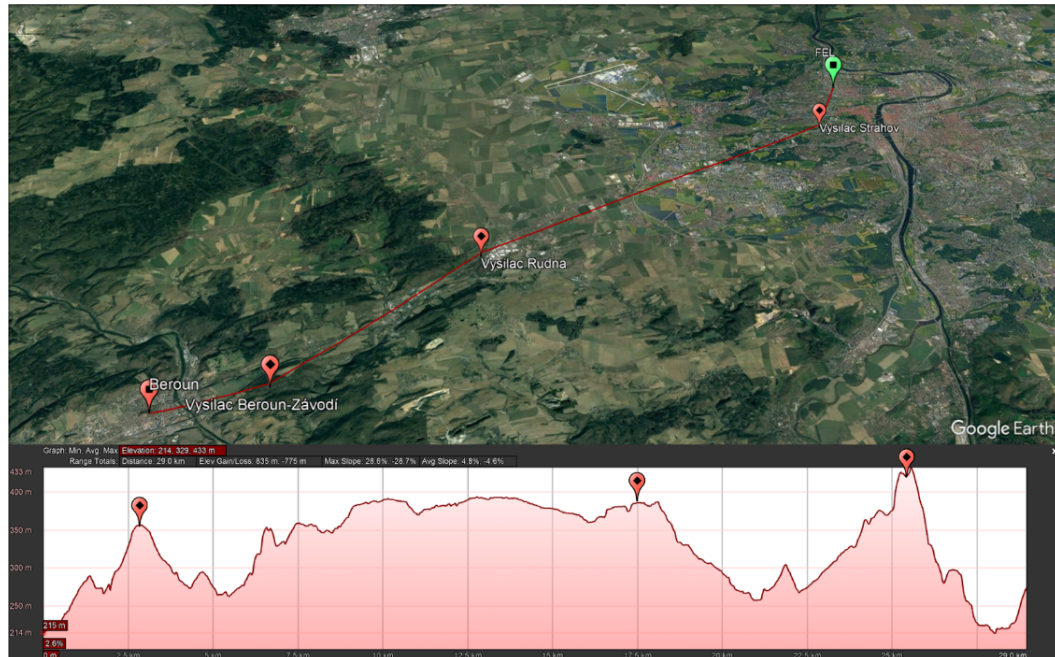
Po importu poloh relevantních vysílačů do programu google earth byly vybrány vysílače v adekvátní výšce a poloze, která umožní realizaci spoje přes vyšší terén. Dalším krokem bylo nalezení do jaké výšky umožňují vybrané vysílače umístit antény a kontrola pomocí kalkulačky AL-COMA jestli je výška dostačující na přenos LOS bez zastínění 1FZ. Ve výsledku se jedná o tyto tři mezispoje:

název	GPS souřadnice	Nadmorská výška	Max výška antény
Vysílač Strahov	50.0798528N, 14.3758333E	356 m.n.m.	60 m
Vysílač Rudná	50.0186111N, 14.1958333E	386 m.n.m	neznámá
Vysílač Beroun-Závodí	49.9711700N, 14.1117989E	425 m.n.m.	30 m

Tabulka 1: Umístění a výšky stožárů

Z obrázku je vidět že trasa spoje je rozdělena do 4 kratších spojů. Spoje z počátečního bodu FEL a koncového bodu v Berouně k jejich příslušným vysílačům v nejvyšších bodech terénního profilu v jejich okolí jsou nejkratšími spoji. Tyto vysílače, Beroun-Závodí a Strahov, poskytují možnost přímého spojení. Nakonec tato alternativa využita nebyla z důvodu délky spoje a s ní spojeným útlumem trasy. Splnění podmínek BER 10-6 a dostupnosti spoje 99,99% by vyžadovalo použití vysílaného výkonu 40 dBm a antén o průměru 1,2m. Proto byl použit jeden mezispoj nadrámeč původního návrhu a to za pomoci vysílače Rudná.

Trasa spoje je tvořena čtyřmi dílčími spoji:



Obrázek 2: Trasa

Popis	Délka spoje
FEL - Strahov	2,81 km
Strahov - Rudná	14,57 km
Rudná - Závodí	8,02 km
Závodí - Beroun	3,47 km

Tabulka 2: Přehled spojů

4 Výběr antény

V zadání byl určen výrobce ALCOMA a produktová řada ALCOMA ALxxF, kterou je možné použít v projektu. Nejvyšší dosažitelná přenosová kapacita antén tohoto typu je 360 Mbit/s, kterou jsme na celé trase spoje chtěli dosáhnout. K výběru velikosti antén byla použita výpočtová tabulka dostupná na stránkách výrobce.

Pro výběr frekvence a pak antén byl kritický spoj Strahov - Rudná s velkou délkou trasy 14,55 km a odpovídajícím útlumem FSL = 140,82 dB. S pomocí výpočtové tabulky a informací z produktové dokumentace byla vybrána frekvence 18 GHz. Byly k tomu dva důvody: menší FSL útlum a specifikace antény AL18F pracující na $f = 18$ GHz. Antény AL18F mají maximální vstupní výkon 26 dBm a pro průměr 0,35; 0,65; 0,9 a 1,2 m zisk 33; 38,5; 42 a 44 dBi.

Dosažení rychlosti 360 Mbit/s (modulace 256 QAM a šířka pásma 55 MHz) s BER 10⁻⁶ je podmíněno prahovou citlivostí -64 dBm. Rezerva na únik spoj Strahov-Rudná při použití 0,9 m poloměru antén je 27,2 dB (uvážení jenom únik FSL), což by mělo zaručit dostatečnou dostupnost spoje o dané rychlosti v 99,99% času. Kromě příznivějšího FSL je na frekvenci 18 GHz lepší i útlum atmosférickými plyny který stoupá velice prudce na intervalu 10 - 23 GHz: Přirozeně, pro krátké spoje FEL - Strahov a Závodí - Beroun použijeme menších antén.

Popis	Průměr antény	Zisk antény
FEL - Strahov	0,30 m	33 dBi
Strahov - Rudná	0,90 m	42 dBi
Rudná - Závodí	0,60 m	38,5 dBi
Závodí - Beroun	0,30 m	33 dBi

Tabulka 3: Přehled spojů

5 Ověření výškového profilu

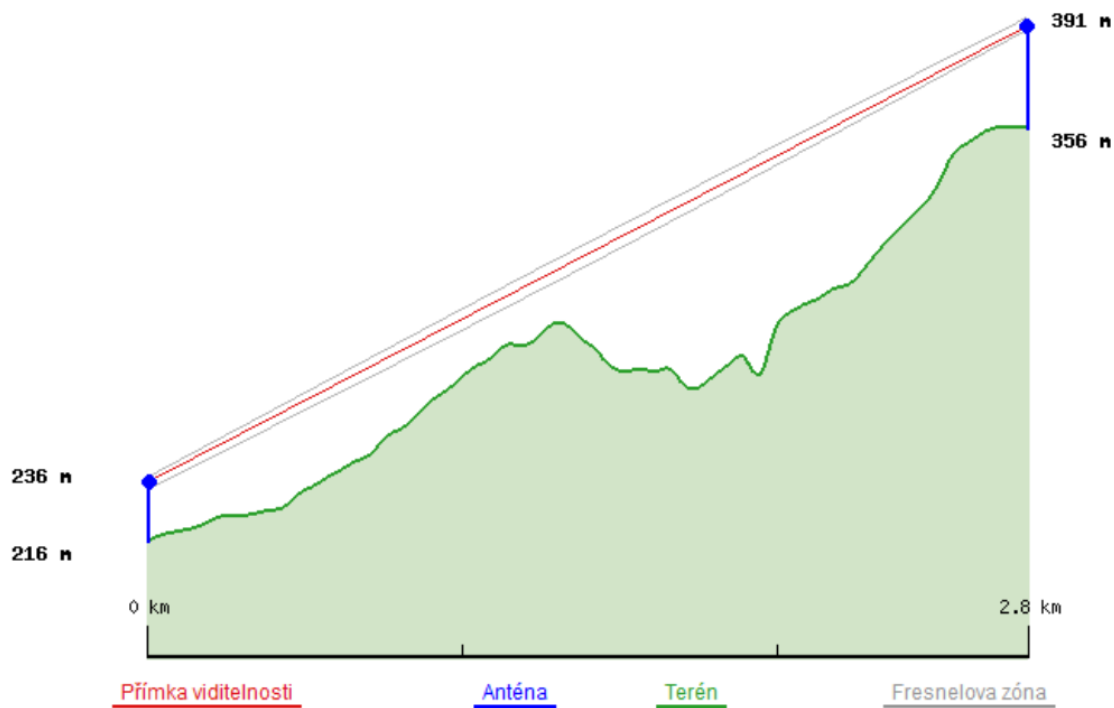
Při ověřování průchodnosti spoje výškovým profilem je potřeba brát v úvahu několik parametrů. Jsou jimi především zakřivení Země a nezakrytost celé první Fresnelovy zóny. K tomu je potřeba použít parametr k , který se pro standardní atmosféru rovná 4/3. V dalším kroku byl tento parametr přepočítán podle vztahu

$$k_e = \frac{157}{144 + \frac{2670}{d}}, \quad (1)$$

kde d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem v kilometrech. Při přepočítání parametru k je však korekce působící na výškový profil v našem případě zanedbatelná (obzvláště na krátkých trasách), tak jsou následující obrázky znázorněny pouze pro základní hodnotu 4/3.

5.1 Jednotlivé spoje

5.1.1 FEL – Strahov

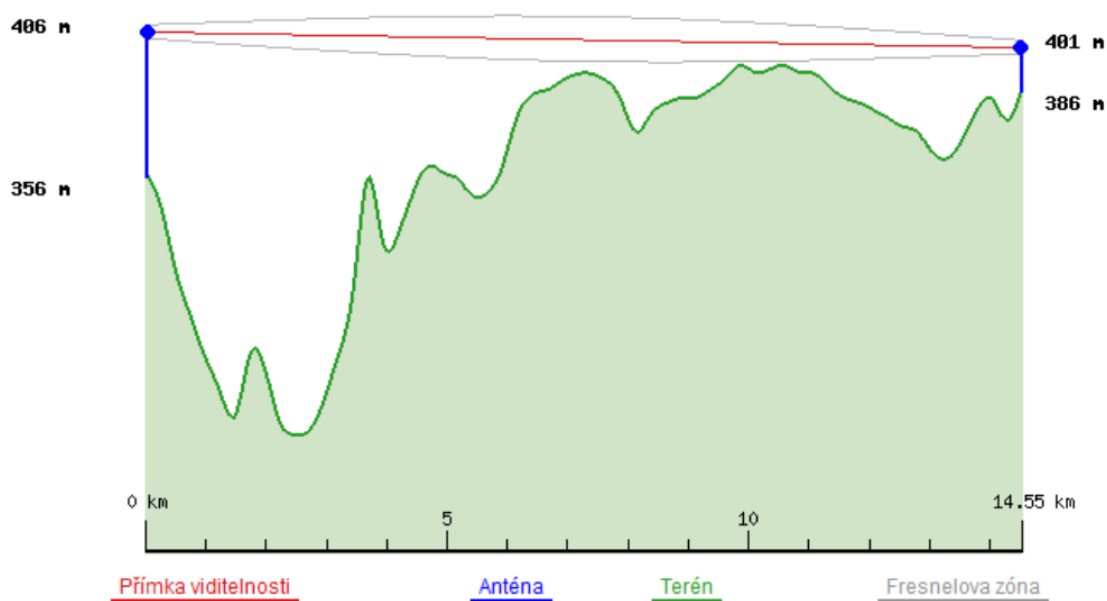


Obrázek 3: Výškový profil FEL – Strahov

parametr	hodnota
Délka spoje	2,81 km
Průměr antény	0,30 m
Zisk antény	33 dBi
FSL	126,52 dB
Lgas	0.17 dB
Ldifrací	-
P_t	10 dBm
Citlivost pro BER10-6	-64 dBm
Rezerva na únik	13,31 dBm

Tabulka 4: FEL – Strahov

5.1.2 Strahov – Rudná

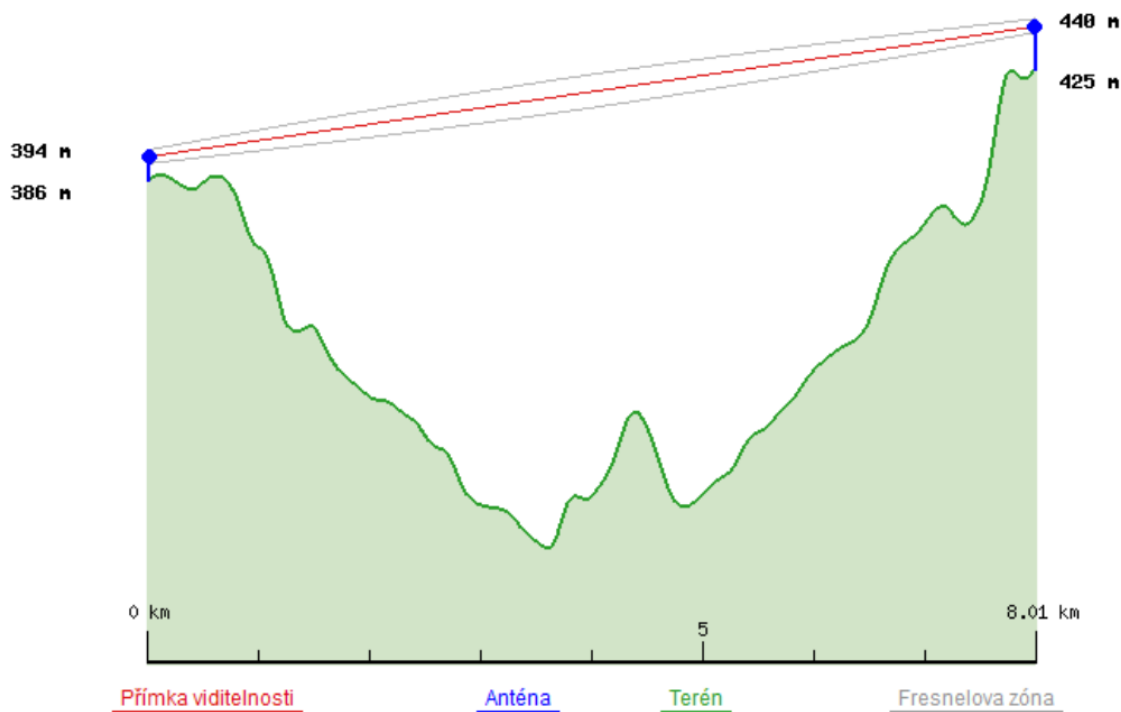


Obrázek 4: Výškový profil Strahov – Rudná

parametr	hodnota
Délka spoje	14,57 km
Průměr antény	0,90 m
Zisk antény	42 dBi
FSL	140,82 dB
Lgas	0,87 dB
Ldifrakcí	-
P_t	17 dBm
Citlivost pro BER10-6	-64 dBm
Rezerva na únik	23,31 dBm

Tabulka 5: Strahov – Rudná

5.1.3 Rudná – Závodí

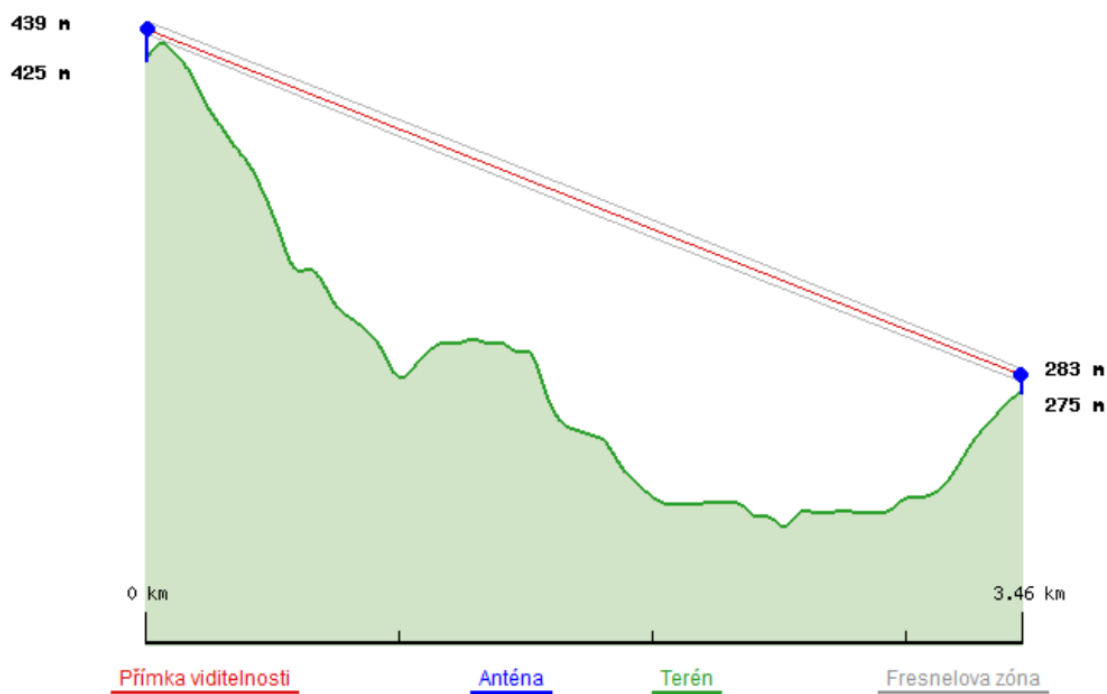


Obrázek 5: Výškový profil Rudná – Závodí

parametr	hodnota
Délka spoje	8,02 km
Průměr antény	0,60 m
Zisk antény	38,5 dBi
FSL	135,63 dB
Lgas	0,48 dB
Ldifrakcí	-
P_t	17 dBm
Citlivost pro BER10-6	-64 dBm
Rezerva na únik	19,89 dBm

Tabulka 6: Rudná – Závodí

5.1.4 Závodí – Beroun



Obrázek 6: Výškový profil Závodí – Beroun

parametr	hodnota
Délka spoje	3,47 km
Průměr antény	0,30 m
Zisk antény	33 dBi
FSL	128,36 dB
Lgas	0,21 dB
Ldifrakcí	-
P_t	10 dBm
Citlivost pro BER10-6	-64 dBm
Rezerva na únik	13,43 dBm

Tabulka 7: Závodí – Beroun

5.2 Výpočet a srovnání

Výpočet prvních Fresnelových zón byl proveden použitím následujícího vztahu.

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}}, \quad (2)$$

kde f je frekvence v GHz, d celková vzdálenost v km a d_1 a d_2 jsou vzdálenosti od antén k nejvyšší překážce (v km). Maximální odchylka ve výškovém profilu, kterou způsobuje zakřivení Země lze vypočítat jako

$$x = \frac{d_1 d_2}{2R_e}, \quad (3)$$

kde R_e je efektivní poloměr Země v km.

Vypočtené hodnoty pro jednotlivé skoky jsou uvedeny v následující tabulce.

Popis	Délka spoje	FSL pro 18 GHz
FEL - Strahov	2,81 km	126,52 dB
Strahov - Rudná	14,57 km	140,82 dB
Rudná - Závodí	8,02 km	135,63 dB
Závodí - Beroun	3,47 km	128,36 dB

Tabulka 8: Přehled spojů

6 Rezerva na únik

Rezerva na únik byla počítána podle následujícího vztahu

$$rezerva_{BER6} = P_t - P_{r_{BER6}} + G_t + G_r - L_{sys} - L_{clearair}, \quad (4)$$

kde P_t je výkon vysílače v dBm, $P_{r_{BER6}}$ citlivost pro BER=10⁻⁶ v dBm pro dané modulační schéma, G_t zisk vysílače v dBi, G_r zisk přijímače v dBi, L_{sys} jsou ostatní systémové ztráty v dB a $L_{clearair}$ je útlum prostředí v dB.

Samotný útlum prostředí je vyjádřen vztahem

$$L_{clearair} = FSL + L_{gas} + L_{diffraction}, \quad (5)$$

kde FSL jsou ztráty ve volném prostoru v dB, L_{gas} je útlum atmosférickými plyny v dB a $L_{diffraction}$ je útlum způsobený difrakcí na překážce v dB.

Pro zvolenou anténu a jednotlivé úseky trasy jsou rezervy na únik pro navrhovanou spolehlivost 99,99 % v tabulce č. 9. Vztahy a vypočtené hodnoty pro jednotlivé útlumy vyskytující se v celkovém útlumu prostředí jsou popsány v následující sekci.

Úsek	Rezerva na únik (dB)
FEL–Strahov	13,31 dB
Strahov–Rudná	23,31 dB
Rudná–Závodí	19,89 dB
Závodí–Beroun	13,43 dB

Tabulka 9: Rezerva na únik pro BER=10⁻⁶

7 Ztráty šířením

7.1 Útlum atmosférickými plyny

Tento druh útlumu byl vypočítán pomocí vztahu uvedeném v doporučení ITU-R P.676. Pro zvolenou frekvenci jsou útlumy jednotlivých úseků v následující tabulce.

Úsek	Útlum (dB)
FEL–Strahov	0,17
Strahov–Rudná	0,87
Rudná–Závodí	0,48
Závodí–Beroun	0,21

Tabulka 10: Útlum atmosférickými plyny

7.2 Šíření volným prostorem

FSL (Free Space Loss), neboli ztráty šířením volným prostorem lze získat pomocí následujícího vztahu

$$FSL = 92.44 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d), \quad (6)$$

kde f je frekvence spoje v GHz a d je vzdálenost antén v kilometrech.

Útlumy jednotlivých úseků jsou v následující tabulce.

Úsek	Útlum (dB)
FEL–Strahov	126,52
Strahov–Rudná	140,82
Rudná–Závodí	135,63
Závodí–Beroun	128,36

Tabulka 11: Útlum FSL

7.3 Difrakce

Zvolená trasa je navržena tak, že žádné překážky nezasahují do 1. Fresnelovy zóny, takže tento útlum můžeme považovat za nulový.

8 Úniky

Pro vypočtení pravděpodobnosti, že bude překročena rezerva na únik spočítaná v sekci 6 byly využity empirické vztahy uvedené v doporučení ITU-R P.530 (§ 2.3.1 a § 2.3.2). Nutná data potřebná k výpočtu byla součástí téhož doporučení.

Pro jednotlivé úseky byla vypočtena pravděpodobnost pw , která reprezentuje překročení rezervy na únik (vypočtené v sekci 6) v nejhorším měsíci.

Úsek	pw (%)
FEL–Strahov	$4,59 \cdot 10^{-6}$
Strahov–Rudná	$5,8 \cdot 10^{-4}$
Rudná–Závodí	$6,61 \cdot 10^{-5}$
Závodí–Beroun	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 12: parametr pw

8.1 Multi-hop spoj

Při uvažování, že celkový spoj je tvořen několika sekcemi se pravděpodobnost P_T překročení rezervy na únik vypočítá dle následujícího vztahu

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i P_{i+1})^C \quad (7)$$

$$C = 0.5 + 0.0052A + 0.0025(d_i + d_{i+1}),$$

kde n je počet skoků, P_i je pravděpodobnost výpadku i -tého spoje, A je rezerva na únik v dB a d_i je délka i -tého spoje v kilometrech. Tento vztah platí za podmínky, že $A \leq 40$ dB a $(d_i + d_{i+1}) \leq 120$ km.

Vypočtená hodnota pravděpodobnosti výpadku kvůli vícecestnému šíření je tedy $P_T = 6,3 \cdot 10^{-4}$ %, což je nedostupnost cca 3,5 minut na rok (požadavek byl maximálně cca 52 minut).

9 Útlumy vlivem deště

Útlum spoje může nastat také vlivem přírodních vlivů, v tomto případě hydrometeory. Pro požadovanou dostupnost spoje 99,99 % času bylo potřeba nejprve zjistit parametr $R_{0.01}$, který byl dostupný v příložených souborech doporučení ITU-R P.837. Pro naše zeměpisné souřadnice byl tento údaj odečten jako $R_{0.01} = 25,4149$, mm/h. Z doporučení ITU-R P.838 byl pak vypočítán specifický útlum

$$\gamma = kR^\alpha, \quad (8)$$

kde R bylo vypočteno v předchozím kroku a parametry α , a k jsou dostupné v tabulkách ve stejném doporučení. Vypočtená hodnota činí $= 2,344$ db/km. Nakonec byla vypočtena efektivní vzdálenost d_{eff}

$$A_{0.01} = \gamma \cdot d_{eff}. \quad (9)$$

-	FEL – Strahov	Strahov – Rudná	Rudná – Závodí	Závodí – Beroun
d (km)	2,81	14,57	8,02	3,47
d_{eff} (km)	2,9	9,24	5,87	3,31
$A_{0.01}$ (dB)	6,8	21,66	13,75	7,76
p_{rain} (%)	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Tabulka 13: Porovnání parametrů jednotlivých spojů

9.1 Útlum pro více skoků

Pro celkový útlum deštěm jsme brali v úvahu nejhorší možnou variantu, což je prostý součet pravděpodobností výpadků u jednotlivých skoků. Po dosazení do vztahu

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (10)$$

vychází celková pravděpodobnost výpadku spoje vlivem deště $P_T = 15,4 \cdot 10^{-4}$ %. Toto odpovídá časovému výpadku cca 8 minut v roce.

10 Shrnutí

Byl navržen pozemní bezdrátový spoj s třemi skoky, který měl za cíl propojit budovu ČVUT, FEL a rozhlednu na Městské hoře v Beruně. Toto se nám podařilo za pomoci meziskoků na Strahově, v Rudné a v Závodí. Dostupná kapacita je na navržené frekvenci 18 GHz a s vybranými anténami 360 Mbps.

Pravděpodobnost výpadku vlivem neselektivních úniků je $6,3 \cdot 10^{-4} \%$, což odpovídá nedostupnosti cca 3,5 minuty za 1 rok. Výpadek vlivem útlumu deště může nastat v $1,54 \cdot 10^{-3} \%$. Toto odpovídá cca 8 minutám v jednom roce. Tyto výsledky potvrzují, že požadovaná dostupnost spoje 99,99 % byla splněna.