

Návrh spoje v pásmu LF/MF (AM rozhlas)

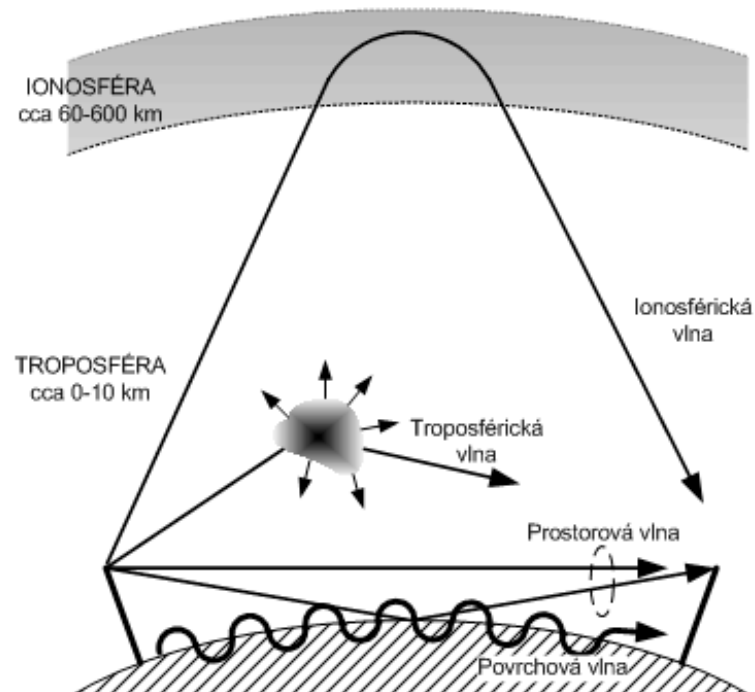
1

Číslo pásma	Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka	Český ekvivalent	Metrické označení
3	ULF	300 Hz – 3 kHz	1000 km-100 km	EDV, extrémně dlouhé v.	hkm, hektokilometrické,
4	VLF	3 kHz – 30 kHz	100 km-10 km	VDV, velmi dlouhé vlny	Mam, myriametrové v.
5	LF	30 kHz – 300 kHz	10 km-1 km	DV, dlouhé vlny	km, kilometrové vlny
6	MF	300 kHz – 3 MHz	1 km-100 m	SV, střední vlny	Hm, hektometrové v.
7	HF	3 MHz – 30 MHz	100 m-10 m	KV, krátké vlny	Dm, dekametrové v.
8	VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m-1 m	VKV, velmi krátké vlny	m, metrové vlny
9	UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m-10 cm	UKV, ultra krátké vlny	dm, decimetrové vlny
10	SHF	3 GHz – 30 GHz	10 cm-1 cm	SKV, super krátké vlny	cm, centimetrové vlny
11	EHF	30 GHz- 300 GHz	1 cm-1 mm	EKV, extrémně krátké vlny	mm, milimetrové vlny

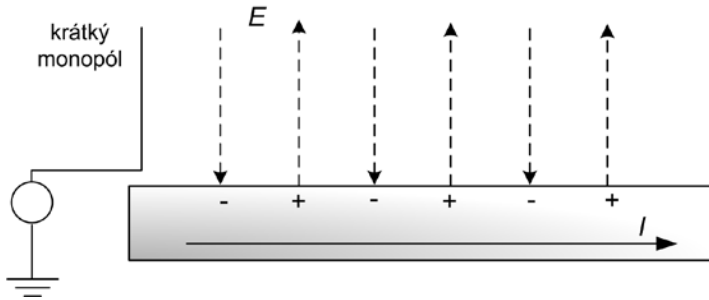
Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713 a ITU-R V.431

Šíření přízemní povrchové vlny

- Přízemní povrchová vlna
 - ◆ Podmínky vybuzení
 - ◆ Činitel tlumení
 - ◆ Nortonovo řešení pro rovinnou zemi
 - ◆ Spádové křivky ITU-R P.368 (GRWAVE)
 - ◆ Šíření nad nehomogenním povrchem
 - ◆ Parametry zemského povrchu (ITU-R P.527 a P.832)



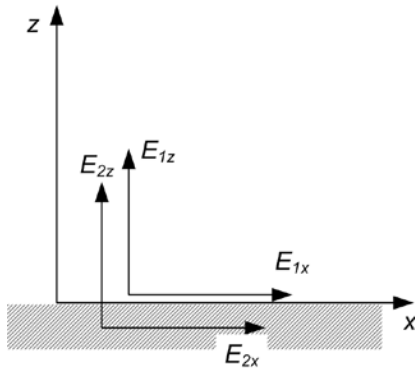
Povrchová vlna, pásmo LF a MF (DV a SV)



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0, \mu_1 = \mu_0, \sigma_1 = 0 \quad Z_1 = \sqrt{(\mu_0 / \varepsilon_0)}$$

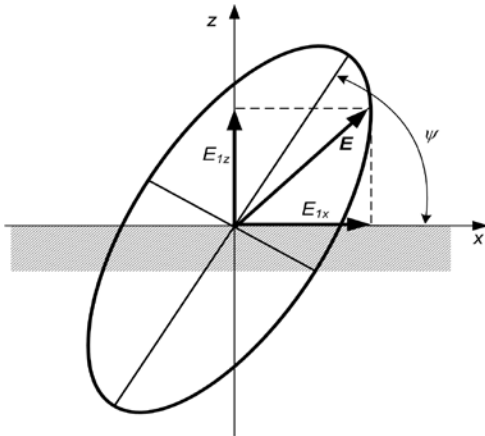
$$\varepsilon_2 > \varepsilon_0, \mu_2 = \mu_0, \sigma_2 \quad Z_2 = \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_{kr}} \right)}$$

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} = \varepsilon_r - j 60 \lambda \sigma$$



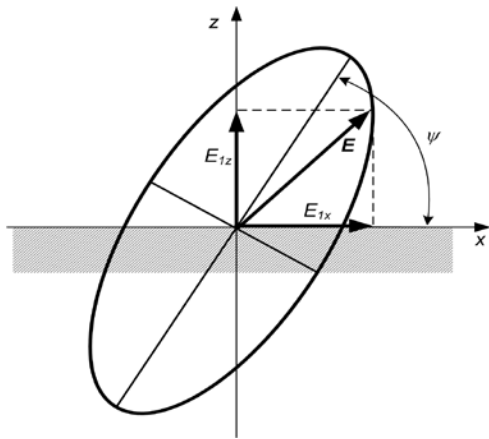
$$E_{1z} = E_{1zm} e^{j\omega t} \quad H_{1y} = -\frac{E_{1z}}{Z_1} = -\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \right)} E_{1z} = H_{2y}$$

$$E_{1x} = E_{2x} = -H_{2y} Z_2 = -H_{2y} \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)} \sqrt{\frac{1}{(\varepsilon_r - j \cdot 60 \lambda \sigma)}} = E_{1z} \sqrt{\frac{1}{(\varepsilon_r - j \cdot 60 \lambda \sigma)}}$$



$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E_{1zm}}{E_{1xm}} = \sqrt{|\varepsilon_r - j \cdot 60 \lambda \sigma|} = \sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60 \lambda \sigma)^2} = \sqrt{|\varepsilon_{kr}|}$$

Sklon čela vlny povrchové vlny



$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E_{1zm}}{E_{1xm}} = \sqrt{|\varepsilon_r - j \cdot 60 \lambda \sigma|} = \sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60 \lambda \sigma)^2} = \sqrt{|\varepsilon_{kr}|}$$

Typ povrchu	Frekvence (kHz) / ε_{kr}	
	200 (LF)	1000 (MF)
Moře ($\sigma=5$ S/m, $\varepsilon_r = 70$)	$70 - j 450000$	$70 - j 90000$
Dobře vodivá země ($\sigma=10^{-2}$ S/m, $\varepsilon_r = 10$)	$10 - j 900$	$10 - j 180$
Špatně vodivá země ($\sigma=10^{-3}$ S/m, $\varepsilon_r = 4$)	$4 - j 90$	$4 - j 18$

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j \cdot 60 \lambda \sigma = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

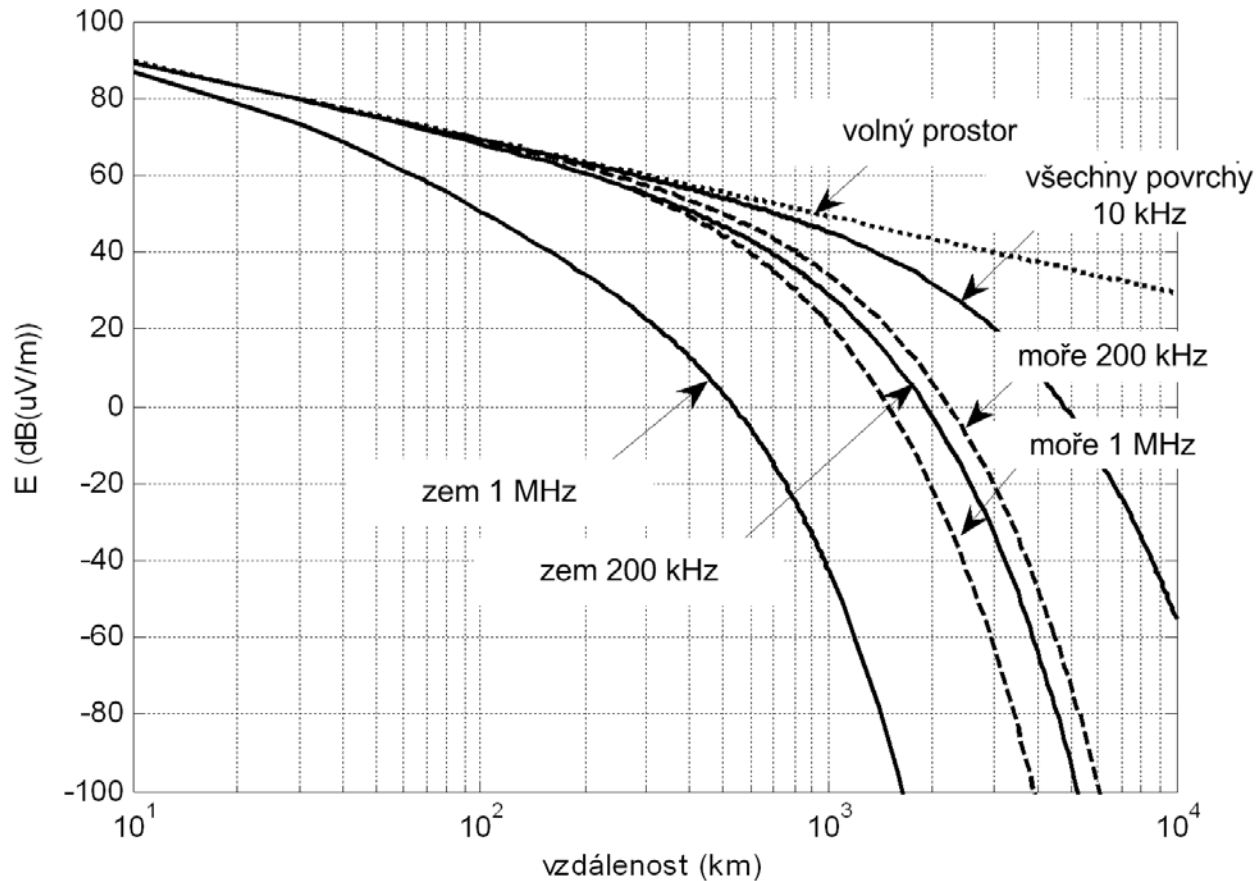
$$\sigma / \omega \varepsilon_0 = \frac{1.8 \times 10^4 \sigma}{f_{\text{MHz}}}$$

Šíření povrchové vlny – činitel tlumení

$$|E| = \frac{\sqrt{30P_V G}}{d} |F|$$

$G = 3$ (4,8 dB), E v mV/m, d v km, P_V v kW =>

$$|E| = \frac{300\sqrt{P_V}}{d} |F|$$



$|F| = 1$

$|F|$ úměrná $1/d$

$|F|$ klesá exponenciálně

$$d_{km} = \frac{80}{\sqrt[3]{f_{MHz}}}$$

Nortonovo řešení pro rovinnou zemi

$$|F(p, b)| = \left| 1 + j\sqrt{\pi p_1} e^{-p_1} \operatorname{erfc}(-j\sqrt{p_1}) \right|$$

$$p_1 = pe^{jb}$$

$$\operatorname{erfc}(-j\sqrt{p_1}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-j\sqrt{p_1}}^{\infty} e^{-x^2} dx$$

vertikální polarizace

$$p = \pi \frac{d \cos^2 b''}{\lambda x \cos b'} = \frac{\pi d}{\lambda \sqrt{\varepsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)^2}} = \frac{\pi d}{\lambda |\varepsilon_{kr}|}$$

$$b = 2b'' - b' = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \omega}{\sigma}$$

$$x = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$$

$$b' = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_r - 1}{x}$$

$$b'' = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_r}{x}$$

horizontální polarizace

$$p = \pi \frac{d}{\lambda} \frac{x}{\cos b'}$$

$$b = 180^\circ - b'$$

σ, ε_r – elektrické parametry povrchu

p (-) – tzv. numerická vzdálenost (*numerical distance*)

b ($^\circ$) – závisí pouze na elektrických parametrech zemského povrchu

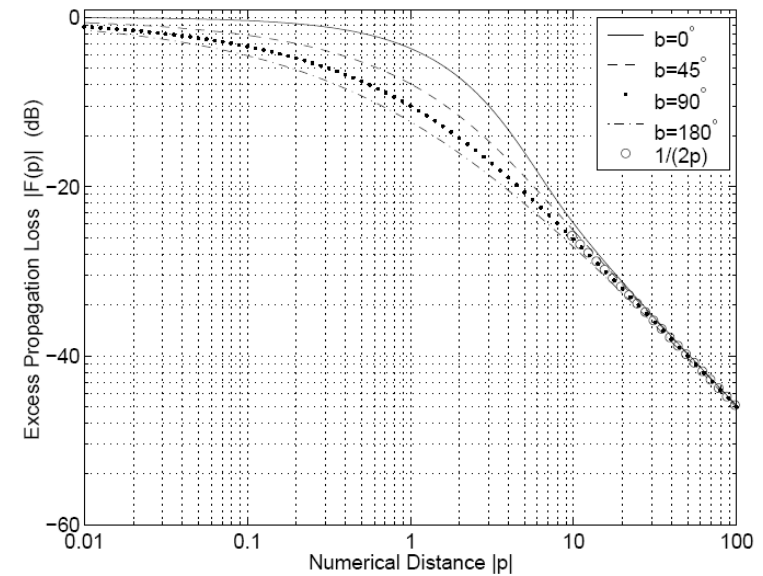
Pro dokonale vodivý povrch $b = 180^\circ$

$$|F(p, 180^\circ)| = \left| 1 - \sqrt{\pi p} e^{p(1 - \operatorname{erf} \sqrt{p})} \right|$$

Nortonovy aproximace

$$b < 5^\circ \quad |F(p)| \approx \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2}$$

$$|F(p)| \approx \frac{1}{2p} \quad p \geq 20$$



Přesnější:

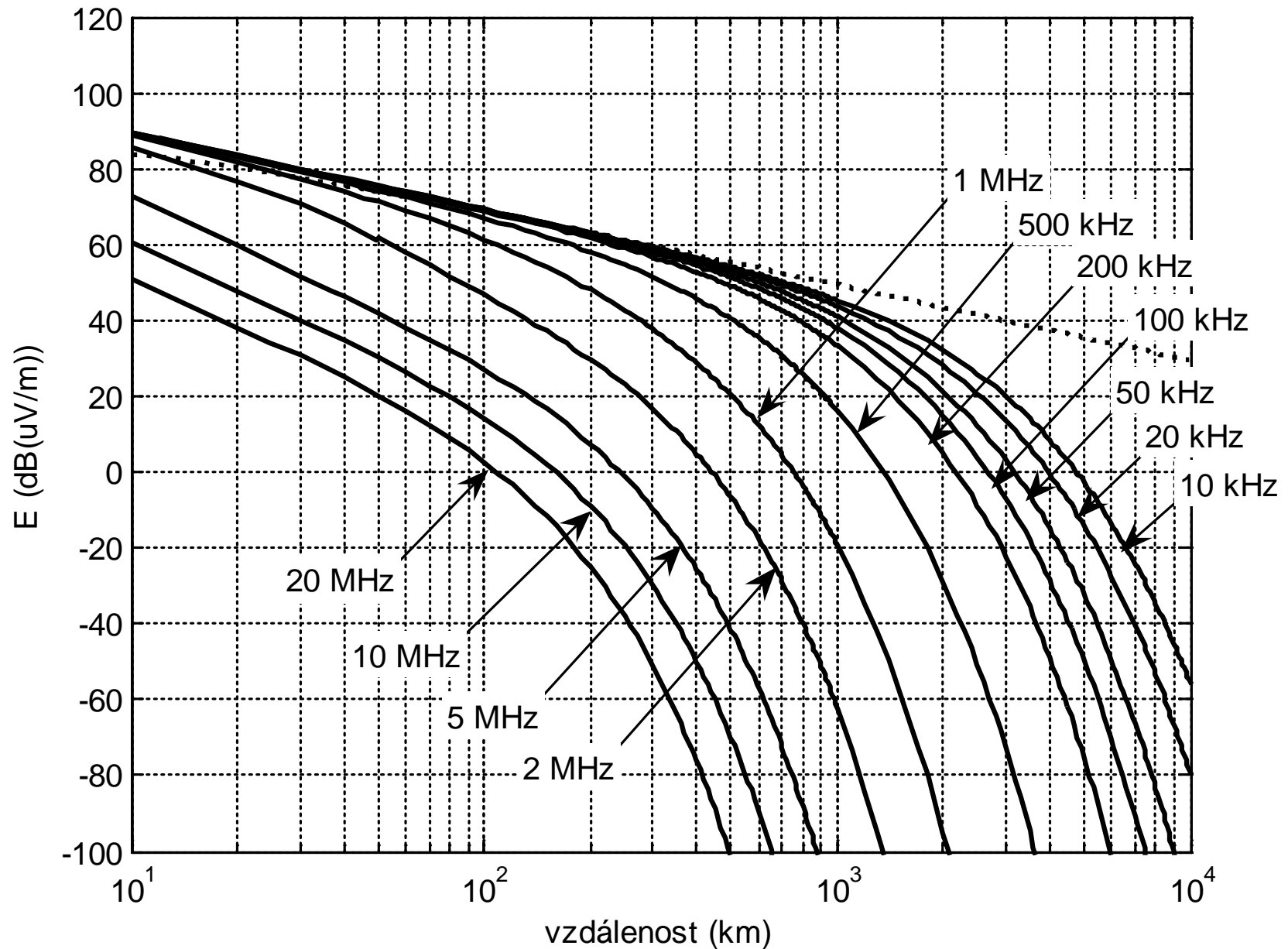
p	b	$ F(p, b) \approx$
$> 4,5$	$< 5^\circ$	$\frac{1}{2p - 3,7}$
$\leq 4,5$	$< 5^\circ$	$e^{-0,43p + 0,01p^2}$
$\leq 4,5$	$\geq 5^\circ$	$e^{-0,43p + 0,01p^2} - \sqrt{\frac{p}{2}} e^{-5p/8} \sin b$
$> 4,5$	$\geq 5^\circ$	$\frac{1}{2p - 3,7} - \sqrt{\frac{p}{2}} e^{-5p/8} \sin b$

ITU-R P.368; 10 kHz – 30 MHz

- Rotheram
- Kombinace tří výpočetních numerických metod
- Včetně prostorové vlny
- GRWAVE
- Spádové křivky pro referenční spoj
 - ◆ $EIRP = 1 \text{ kW}$
 - ◆ vysílací anténa – elementární monopól umístěný na vodivé rovině; zisk $G = 3 \sim 4,8 \text{ dB}$ (ve vzdálenosti 1 km $E = 300 \text{ mV/m}$)
 - ◆ přijímací anténa – monopól v nulové výšce nad povrchem
 - ◆ hladký homogenní kulový povrch země
 - ◆ standardní atmosféra
 - ◆ výsledek $E(d)$ v $\text{dB}(\mu\text{V/m})$
- Přepočet na ztráty v dB (f je v MHz):

$$L = 142,0 + 20 \log f - E$$

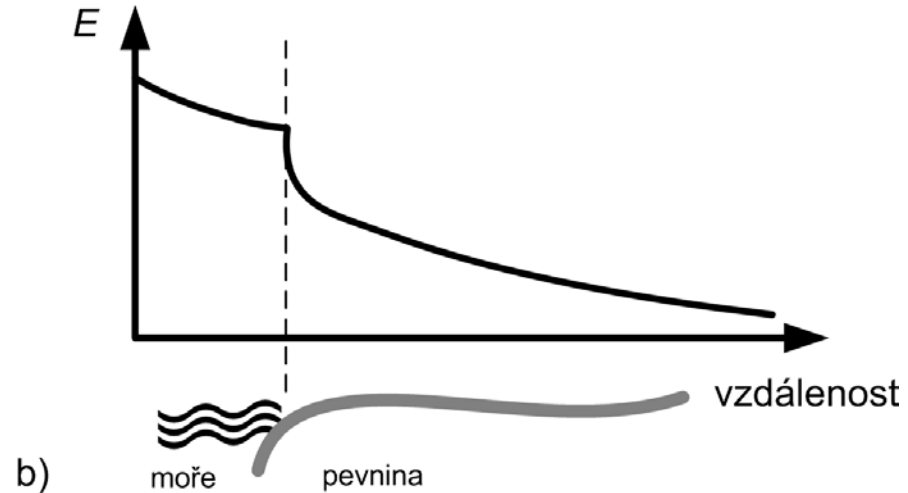
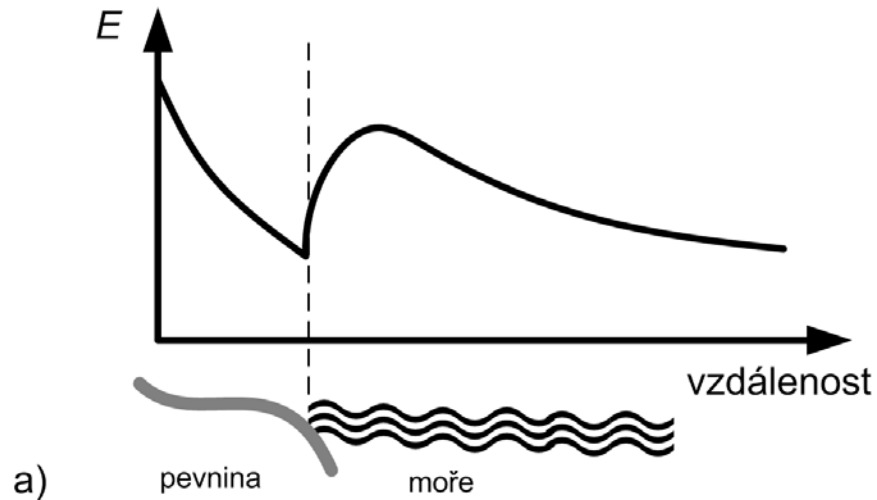
$$EIRP = 1 \text{ kW}, \sigma = 3 \cdot 10^{-2} \text{ S/m}, \varepsilon_r = 40$$





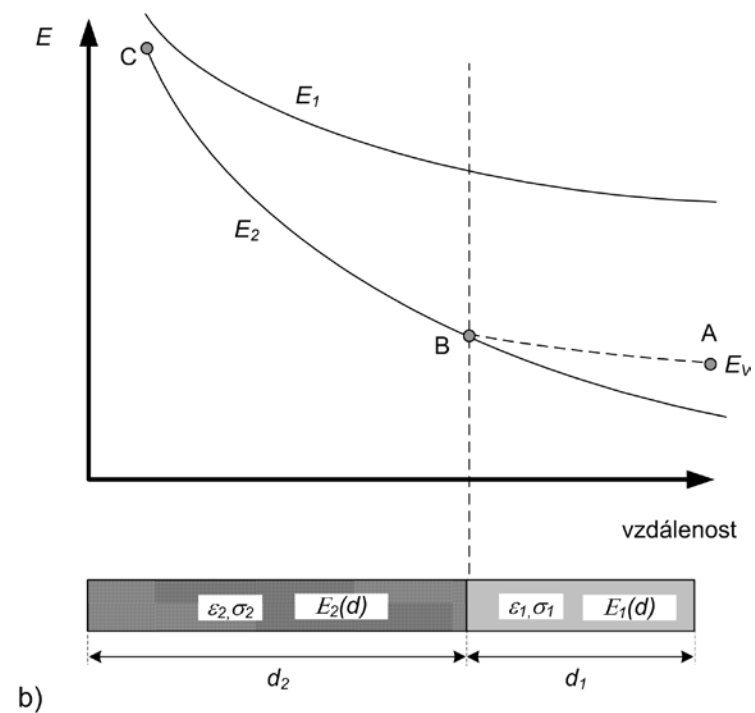
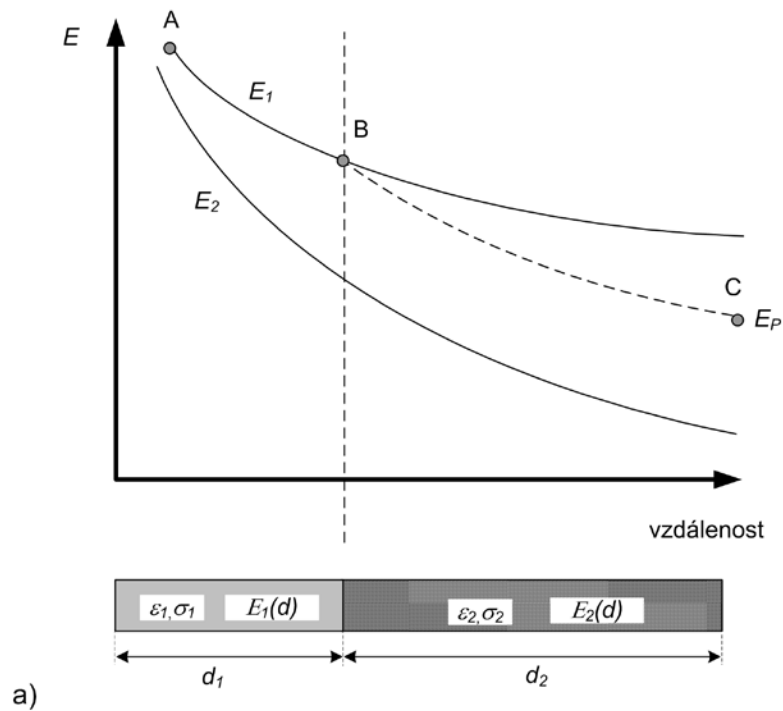
Šíření povrchové vlny nad nehomogenním povrchem

■ Změna spádové křivky

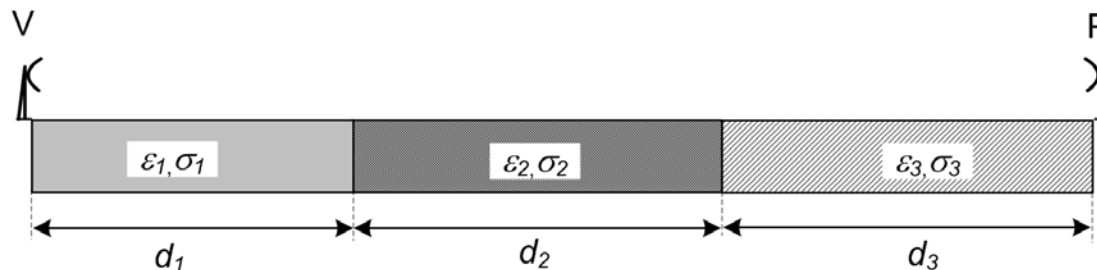
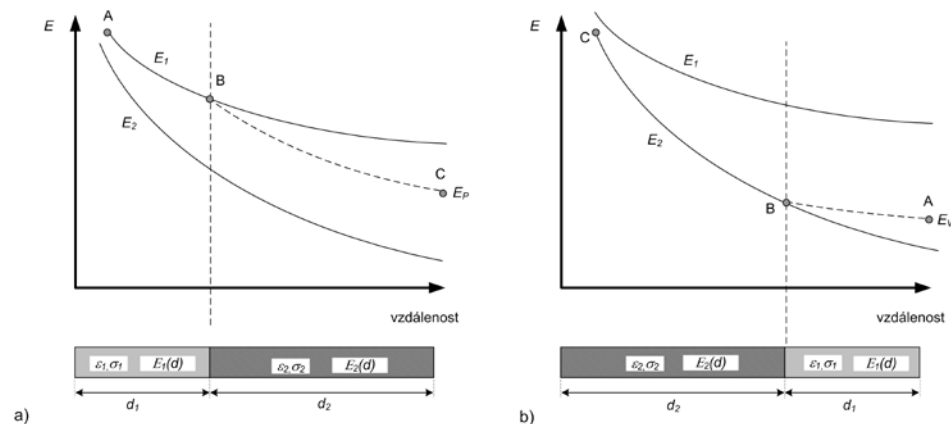


■ Břehový lom

Millingtonova metoda



Millingtonova metoda - příklad



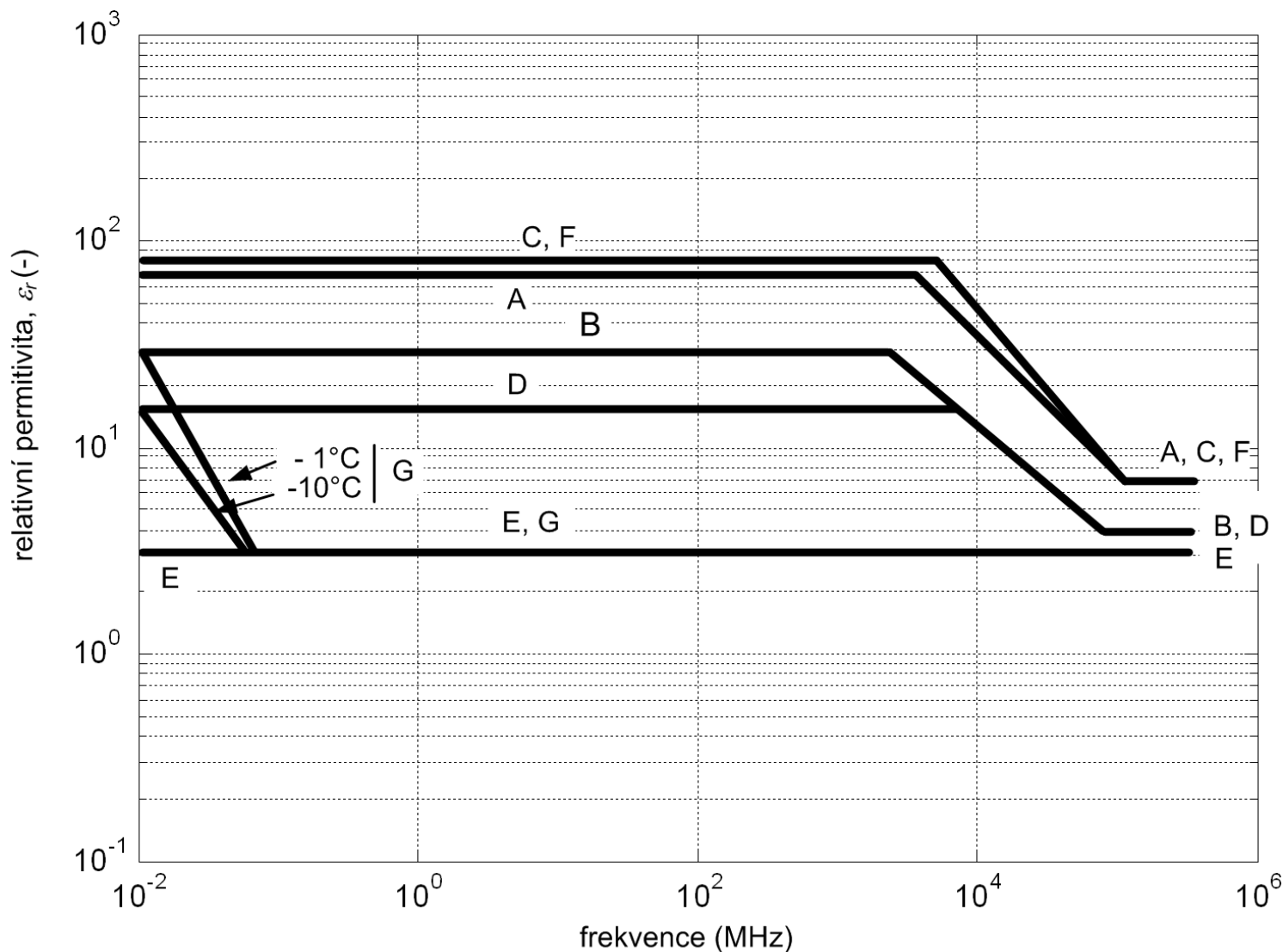
$$E_P = E_1(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_2(d_1) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) - E_3(d_1 + d_2)$$

$$E_V = E_3(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_2(d_3) + E_1(d_3 + d_2 + d_1) - E_1(d_3 + d_2)$$

$$E = \frac{E_P + E_V}{2}$$

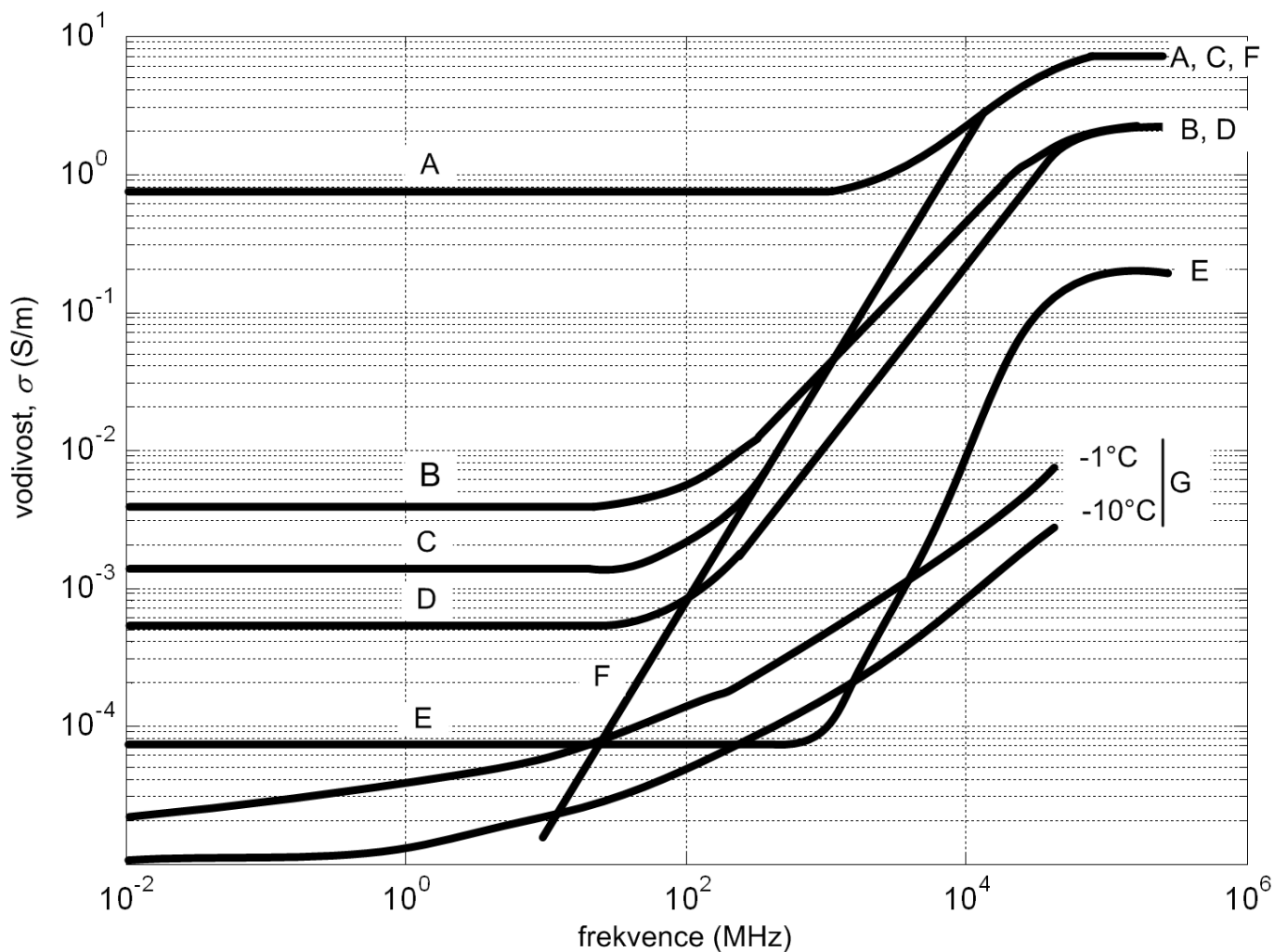
Frekvenční závislost rel. permitivity různých povrchů

A – mořská voda, B – vlhká zem, C – voda, D – středně suchá půda,
E – velmi suchá půda, F – dest. voda, G – led (podle ITU-R P.527)



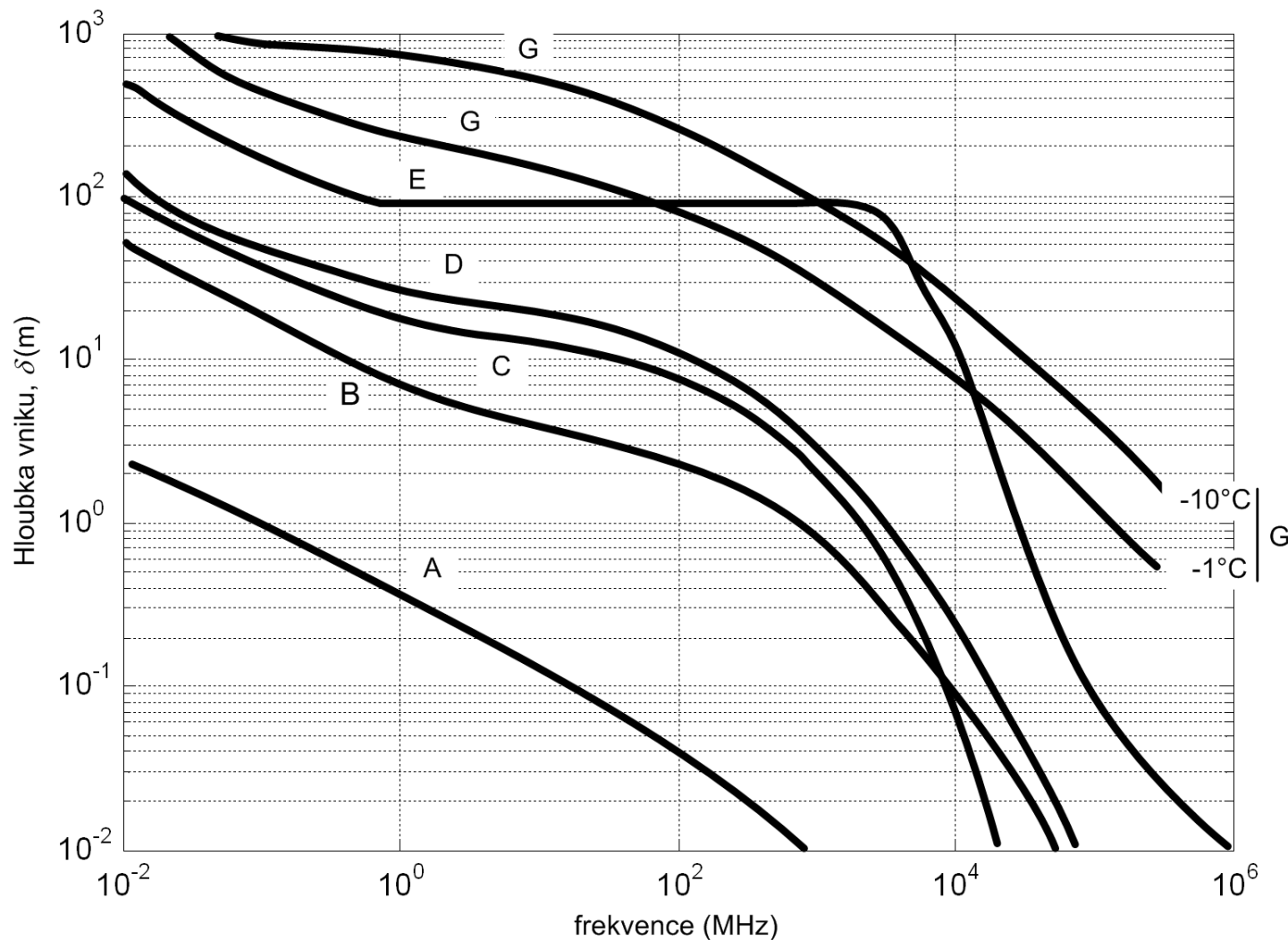
Frekvenční závislost vodivosti různých povrchů

A – mořská voda, B – vlhká zem, C – voda, D – středně suchá půda,
E – velmi suchá půda, F – dest. voda, G – led (podle ITU-R P.527)



Frekvenční závislost hloubky vniku různých povrchů

A – mořská voda, B – vlhká zem, C – voda, D – středně suchá půda, E – velmi suchá půda, G – led (podle ITU-R P.527)



Hloubka vniku udává vzdálenost, ve které je vlna utlumena na $1/e$ (37%)

Světový atlas vodivosti země (ITU-R P.832)

efektivní vodivost země v mS/m; VLF (do 30 kHz), MF (1 MHz)

FIGURE 6

Europe

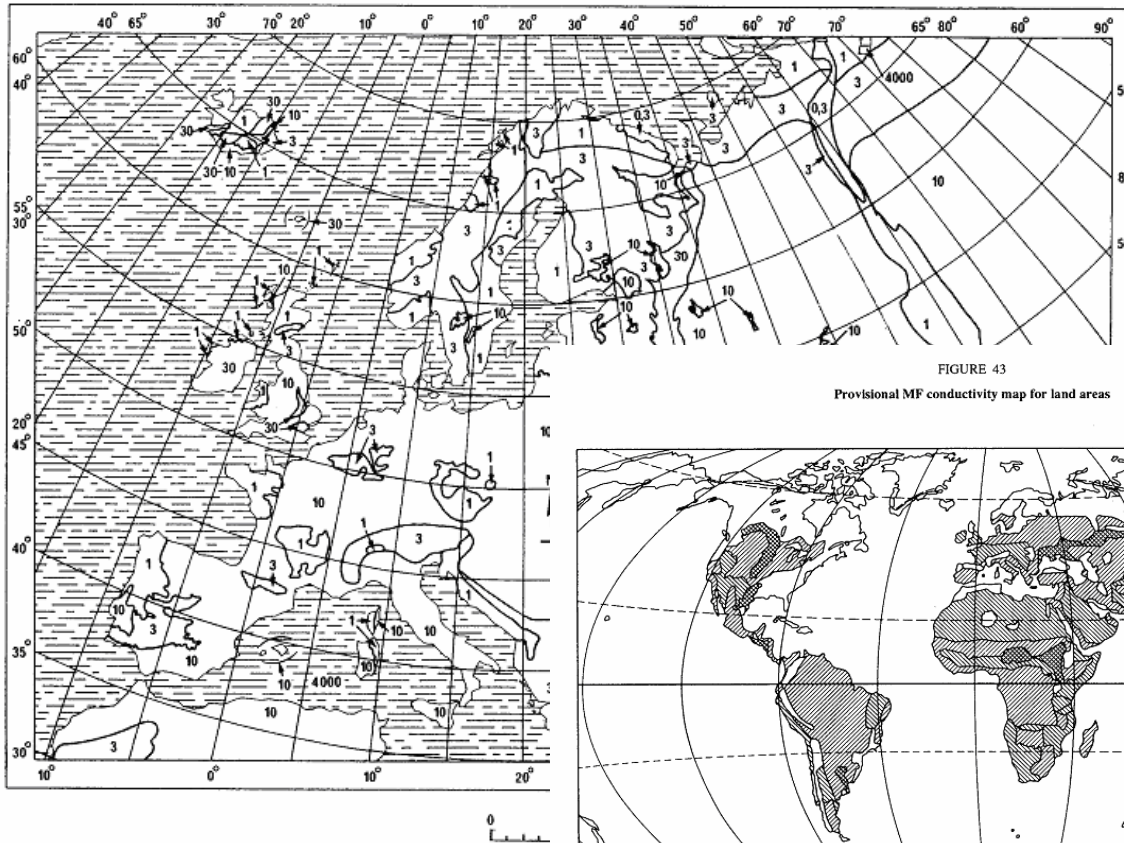


FIGURE 12

Finland

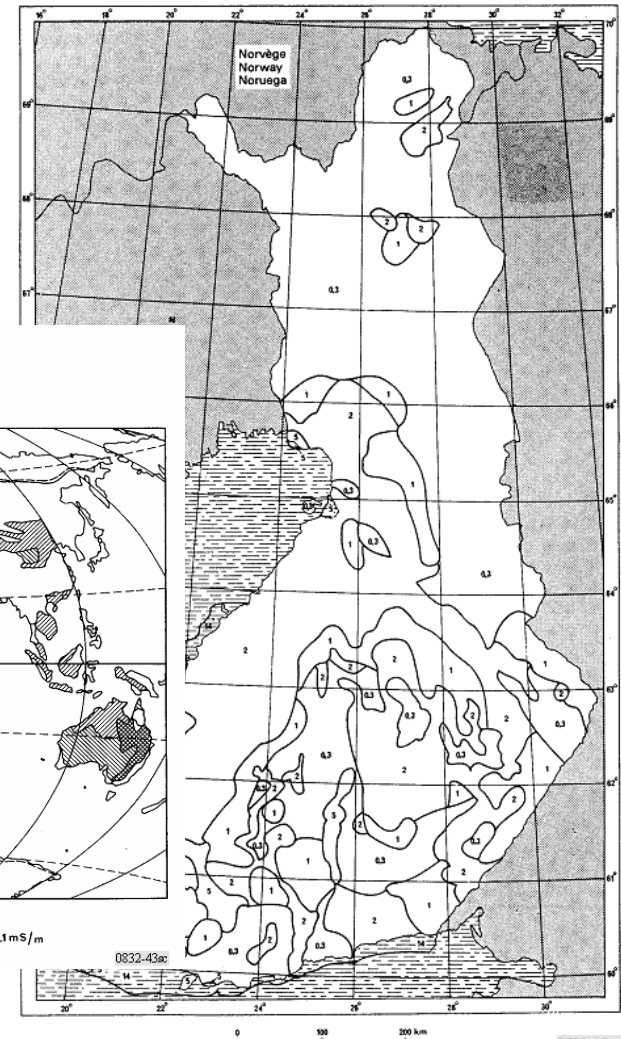
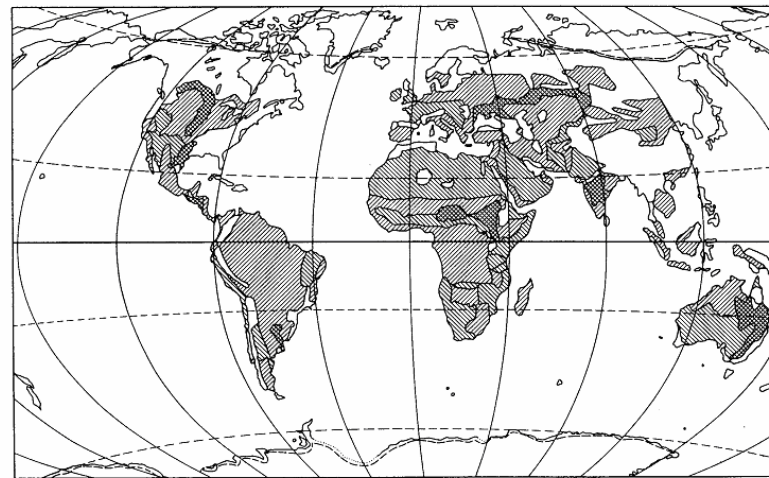


FIGURE 43

Provisional MF conductivity map for land areas

Values of σ

30 mS/m
 15 mS/m
 8 mS/m
 3 mS/m
 ≤ 0.1 mS/m

0832-43sc

Rádiový spoj v pásmu cca 150 kHz – 2 MHz (LF/MF)

- Mechanismus přenosu
 - ◆ Přízemní povrchová vlna
 - stále
 - ◆ Ionosférická vlna
 - v noci po vymizení tlumící vrstvy D odrazem od vrstvy E
- Příklad aplikací
 - ◆ Radionavigace
 - ◆ Rozhlasové vysílání (AM, DRM)
 - ◆ Datové služby – např. přenos času
 - ◆ ...