



Institut scientifique
de service public

Métrologie environnementale
Recherche – Analyses
Essais – Expertises

Siège social et site de Liège :
Rue du Chéra, 200
B-4000 Liège
Tél : +32(0)4 229 83 11
Fax : +32(0)4 252 46 65
Site web : <http://www.isssep.be>

Site de Colfontaine :
Zoning A. Schweitzer
Rue de la Platinerie
B-7340 Colfontaine
Tél : +32(0)65 61 08 11
Fax : +32(0)65 61 08 08

Liège, le 21 février 2024

ANNEXE
DE L'AVIS RELATIF À LA PROTECTION
CONTRE LES ÉVENTUELS EFFETS NOCIFS ET NUISANCES
PROVOQUÉS PAR LES RAYONNEMENTS NON IONISANTS
GÉNÉRÉS PAR DES ANTENNES ÉMETTRICES STATIONNAIRES

Version 5.2.2.

Remarque : cette annexe ne peut être reproduite, sinon en entier, sauf accord de l'Institut.

AnnexeV5.2.2.- page 1/11



Wallonie

A1. Décret du 3 avril 2009 relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par des antennes émettrices stationnaires

En Wallonie, les émissions électromagnétiques dans la gamme des radiofréquences sont régies par le décret du 8 décembre 2022 (M.B. du 16.12.2022) modifiant le décret du 3 avril 2009 relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par des antennes émettrices stationnaires et dénommé ci-après « le décret ».

L'article 4 du décret fixe deux limites d'immission dans les lieux de séjour. Le paragraphe 1er définit la limite portant sur « l'intensité du rayonnement électromagnétique généré par l'ensemble des antennes émettrices stationnaires d'un exploitant installées sur un même support », dénommée ci-après « limite par installation » ; la seconde limite, définie au paragraphe 2, s'applique à « l'intensité du rayonnement électromagnétique généré par l'ensemble des antennes émettrices stationnaires de l'ensemble des exploitants d'un même site d'antennes émettrices stationnaires » tel que défini dans l'article 2, ci-après dénommée « limite cumulative ».

A2. Méthode d'examen

A2.1. Evaluation du respect de la limite par installation

Les conclusions des avis visés à l'article 5 du décret reposent sur des simulations effectuées au moyen d'un modèle mathématique selon une méthode décrite ci-dessous.

L'exposition des personnes aux rayonnements d'antennes peut généralement être traitée au moyen du modèle de propagation en espace libre et en tenant compte de la présence éventuelle d'obstacles. Ce modèle repose sur les relations mathématiques dites « formules du champ éloigné ». Elles fournissent l'intensité des composantes électrique et magnétique du champ et traduisent notamment le fait que ces deux composantes, en l'absence d'obstacles, sont inversement proportionnelles à la distance.

Il en résulte que, dans les lieux de séjour, le champ électromagnétique E produit par une antenne peut être déterminé au moyen de la relation

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{30 P \times G}{A(\phi, \theta)}} \quad (\text{A2.1})$$

dans laquelle :

P est la puissance rayonnée par l'antenne exprimée en watts (W). La valeur utilisée pour les simulations est la puissance émise lorsque l'installation fonctionne à pleine charge, à l'exception des antennes 5G NR utilisant les techniques du TDD¹ et du *beamforming*² pour lesquelles un coefficient de réduction respectivement égal à 1,25 dB et à 4,75 dB peut être utilisé ;

¹ Time division duplex.

² *Beamforming*, traduit littéralement par « formation de faisceau », est une technique qui permet d'obtenir une meilleure sélectivité spatiale que les antennes classiques, i.e. de mieux cibler une région restreinte de l'espace. Le rayonnement est émis sous forme de « faisceaux » dans des directions précises grâce à une gestion appropriée des différents éléments rayonnants constituant l'antenne.

- G est le gain de l'antenne, par rapport à une antenne isotrope, dans la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (nombre sans dimension) ;
- $A(\phi, \theta)$ est la perte de puissance dans la direction considérée par rapport à la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (nombre sans dimension). Ce nombre est déduit des diagrammes de rayonnement horizontal et vertical de l'antenne ;
- θ est l'angle d'élévation (en degrés) ;
- ϕ est l'angle formé avec l'azimut de référence, lequel correspond en principe à la direction dans laquelle le gain est maximum (en degrés) ;
- d est la distance par rapport à l'antenne exprimée en mètres.

Comme mentionné plus haut, $A(\phi, \theta)$ est déduit des diagrammes de rayonnement. Ces diagrammes, généralement au nombre de deux, caractérisent l'effet directionnel d'une antenne (intensité du rayonnement en fonction de la direction considérée). Le diagramme horizontal $A_H(\phi)$ indique la perte de puissance dans les différentes directions du plan horizontal ($\theta = 0$) tandis que le diagramme vertical $A_V(\theta)$ fournit la perte de puissance dans les différentes directions du plan vertical ($\phi = 0$). Le coefficient de perte de puissance $A(\phi, \theta)$ dans la direction (ϕ, θ) peut être déduit des diagrammes de rayonnement $A_H(\phi)$ et $A_V(\theta)$ puisque

$$A(\phi, \theta) = A_H(\phi) \times A_V(\theta) \quad (\text{A2.2})$$

L'indice d'exposition relatif à la limite par installation, noté IE_i , est un nombre sans unité calculé de la manière suivante :

$$IE_i = \sum_f \left(\frac{E_f}{E_{r,f,i}} \right)^2 \quad (\text{A2.3})$$

où :

- E_f est l'intensité du champ électrique, exprimé en volts par mètre (V/m), généré à la fréquence f ;
- $E_{r,f,i}$ est le niveau de référence relatif à la limite par installation pour la fréquence d'émission f , égal à :
- a) $67/f^{0,7}$ (V/m) pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 30 MHz, f est la fréquence exprimée en MHz ;
 - b) 6,1 V/m pour les fréquences comprises entre 30 MHz et 400 MHz ;
 - c) $(0,307 \sqrt{f})$ (V/m) pour les fréquences comprises entre 400 MHz et 2 GHz, f est la fréquence exprimée en MHz ;
 - d) 13,7 V/m pour les fréquences comprises entre 2 GHz et 300 GHz.

Le paragraphe 1er de l'article 4 du décret précise que, dans les lieux de séjour, l'intensité du rayonnement électromagnétique généré par l'ensemble des antennes émettrices stationnaires d'un exploitant installées sur un même support est limitée de sorte que :

$$IE_i \leq 1 \quad (\text{A2.4})$$

L'indice d'exposition relatif à la limite cumulative, noté IE_c , est un nombre sans unité calculé de la manière suivante :

$$IE_c = \sum_f \left(\frac{E_f}{E_{r,f,c}} \right)^2 \quad (A2.5)$$

où :

E_f est de nouveau l'intensité du champ électrique, exprimé en V/m, généré à la fréquence f ;

$E_{r,f,c}$ est le niveau de référence relatif à la limite cumulative pour la fréquence d'émission f , égal à :

- a) $134/f^{0,7}$ (V/m) pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 30 MHz, f est la fréquence exprimée en MHz ;
- b) 12,2 V/m pour les fréquences comprises entre 30 MHz et 400 MHz ;
- c) $(0,614 \sqrt{f})$ (V/m) pour les fréquences comprises entre 400 MHz et 2 GHz, f est la fréquence exprimée en MHz ;
- d) 27,4 V/m pour les fréquences comprises entre 2 GHz et 300 GHz.

Le paragraphe 2 de l'article 4 du décret précise que, dans les lieux de séjour, l'intensité du rayonnement électromagnétique généré par l'ensemble des antennes émettrices stationnaires de l'ensemble des exploitants d'un même site d'antennes émettrices stationnaires est limitée de sorte que :

$$IE_c \leq 1 \quad (A2.6)$$

La valeur des niveaux de référence est définie dans le décret de sorte que, pour toute fréquence f comprise entre 100 kHz et 300 GHz :

$$E_{r,f,c} = 2 E_{r,f,i} \quad (A2.7)$$

Lorsque plusieurs installations sont présentes sur le site d'antennes émettrices stationnaires, l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative est égal à la somme des contributions individuelles. Compte tenu de l'égalité (A2.7), on obtient :

$$IE_c = 0,25 \sum_{i=1}^N IE_i \quad (A2.8)$$

où l'indice de sommation i est relatif aux N installations d'antennes émettrices stationnaires prises en considération, y inclus l'installation faisant l'objet de la demande d'avis. Ainsi, si chaque installation respecte la condition (A2.4), on obtient :

$$IE_c \leq 0,25 N \quad (A2.9)$$

de sorte que lorsque moins de 5 installations sont présentes sur le site ($N \leq 4$), la limite cumulative est automatiquement respectée et il n'est pas nécessaire d'évaluer le cumul des rayonnements par des simulations (voir paragraphe A2.2).

Puisque les niveaux de référence dépendent de la fréquence, l'adoption de la valeur la plus basse dans une bande de fréquences va dans le sens de la sécurité. En particulier, aux fréquences utilisées par les réseaux de communication mobile, les niveaux de référence les plus stricts sont ceux qui correspondent à la fréquence la plus basse dans chaque bande. Le tableau 1 reprend les niveaux de référence adoptés dans les simulations pour les bandes de fréquence actuellement utilisées par les antennes émettrices stationnaires des réseaux de communication mobile.

Tableau 1 : Niveaux de référence utilisés pour les antennes émettrices stationnaires des réseaux de communication mobile

Bande de fréquences (MHz)	Fréquence la plus basse (MHz)	Niveaux de référence	
		Limite par installation (V/m)	Limite cumulative (V/m)
758 à 788	758	8,45	16,90
791 à 821	791	8,63	17,27
921 à 960	921	9,32	18,63
1427 à 1517	1427	11,60	23,19
1805 à 1880	1805	13,04	26,09
2110 à 2170	2110	13,70	27,40
2620 à 2690	2620	13,70	27,40
3430 à 3800	3430	13,70	27,40

Il est généralement tenu compte d'une atténuation d'obstacle par défaut de 3 dB (ce qui correspond à une réduction de l'exposition de 50 %) pour les lieux de séjour à l'intérieur des bâtiments. Cette valeur de 3 dB permet d'éviter toute sous-estimation par rapport aux champs réels³, l'atténuation due à l'enveloppe des bâtiments étant généralement plus élevée : en particulier, l'atténuation dépasse en principe 10 dB lorsque le rayonnement traverse le toit en béton d'un immeuble. Pour cette raison, une valeur d'atténuation de 10 dB (soit une réduction de l'exposition d'un facteur 10) peut être utilisée pour les lieux de séjour éventuels situés sous des antennes lorsque celles-ci sont installées sur le toit en béton d'un bâtiment. Une atténuation supplémentaire peut être appliquée exceptionnellement lorsqu'un obstacle est situé juste devant les antennes émettrices ou lorsque les antennes sont installées dans un lieu clos, pour autant que cela soit justifié par la nature et la disposition des matériaux en présence. Le cas échéant, l'amplitude de l'atténuation à appliquer est étayée par des documents fournis par l'exploitant.

A2.2. Evaluation du respect de la limite cumulative

La méthode décrite dans le présent paragraphe repose sur l'évaluation préalable du respect de la limite par installation par les antennes faisant l'objet de la demande d'avis. L'évaluation se limite aux antennes émettrices stationnaires constituant un site d'antennes émettrices stationnaires tel que défini à l'article 2 du décret, lesquelles sont situées dans un rayon de 300 mètres⁴ de l'installation faisant l'objet de la demande d'avis. Ces antennes émettrices stationnaires ont-elles-mêmes fait l'objet d'une évaluation préalable attestant soit du respect de la limite par installation, soit du respect de la limite abrogée de 3 V/m par antenne⁵. Or, comme indiqué dans le tableau 2, si on suppose que chaque technologie d'une installation génère exactement 3 V/m au même endroit dans un lieu de séjour en conservant une réduction de 6 dB sur la puissance à l'entrée des antennes 5G NR utilisant conjointement la technique du TDD¹ (1,25 dB) et celle du beamforming² (4,75 dB), cette installation génère, au plus, un indice d'exposition relatif à la limite cumulative de 0,16 à cet endroit.

³ Compilation of measurement data relating to building entry loss. Report ITU-R P.2346-4 (07/2021).

⁴ Arrêté du Gouvernement wallon du 27 avril 2023 fixant le périmètre de proximité sur base de la puissance isotrope rayonnée équivalente des antennes présentes et de la fraction de la limite cumulative à partir de laquelle une antenne située dans le périmètre doit être prise en compte. M.B., 12 juin 2023.

⁵ Cette limite n'est plus d'application depuis le 26 décembre 2022.

Tableau 2 : Contribution maximale d'une installation à la limite cumulative lorsque chaque technologie génère 3 V/m au même endroit dans un lieu de séjour

Technologie	Fréquence la plus basse (MHz)	Niveau de référence de la limite cumulative (V/m)	Contribution à IE_c si $E = 3 \text{ V/m}$
GSM (2G)	921	18,63	0,026
DCS (2G)	1805	26,09	0,013
UMTS (3G)	921	18,63	0,026
LTE (4G)	758	16,90	0,031
5G NR ⁶	758	16,90	0,063
Total :			0,16

Lors de l'évaluation du respect de la limite cumulative, deux cas de figure peuvent se présenter :

A2.2.1. Au plus 4 installations présentes dans un rayon de 300 mètres

Comme montré dans le paragraphe A2.1, la limite cumulative est automatiquement respectée lorsqu'au plus 4 installations, y inclus l'installation faisant l'objet de la demande d'avis, sont présentes dans la zone d'évaluation (cercle de 300 mètres de rayon autour de l'installation faisant l'objet de la demande d'avis) et que chacune d'entre elles respecte la condition (A2.4).

A2.2.2. Plus de 4 installations présentes dans un rayon de 300 mètres

Lorsqu'au moins 5 installations sont présentes dans la zone d'évaluation (cercle de 300 mètres de rayon autour de l'installation faisant l'objet de la demande d'avis), le respect de la limite cumulative peut être vérifié par étapes de complexité croissante, d'un simple comptage à des simulations basées sur un modèle de calcul.

a) Prise en compte du nombre d'installations ayant fait l'objet d'un avis relatif à la limite abrogée de 3 V/m

Lorsque, sur le site d'antennes émettrices stationnaires, coexistent des antennes faisant l'objet d'avis selon la limite abrogée de 3 V/m et des installations faisant ou ayant fait l'objet d'une demande d'avis selon la norme actuelle, la limite cumulative est automatiquement respectée si la condition suivante est vérifiée :

$$n \times 0,25 + m \times 0,16 \leq 1 \quad (\text{A2.10})$$

où n est le nombre d'installations évaluées selon la limite par installation et m est le nombre d'installations ayant fait l'objet d'un avis relatif à la limite abrogée de 3 V/m.

On constate que si $n = 1$, la condition (A2.10) est respectée si $m \leq 4$; si $n = 2$, la condition (A2.10) est respectée si $m \leq 3$; si $n = 3$ par contre, la condition (A2.10) n'est respectée que si $m \leq 1$. Ainsi,

⁶ Le calcul prend en compte une réduction de 6 dB appliquée à la puissance maximale à l'entrée des antennes 5G NR utilisant conjointement les techniques du TDD et du *beamforming*.

dans les deux premiers cas, la limite cumulative est respectée même si le nombre total d'installations $N(= m + n)$ dans la zone d'évaluation de 300 mètres de rayon est égal à 5.

b) Autres cas

La condition (A2.10) est obtenue en considérant que chaque installation des réseaux mobiles référencée dans les avis relatifs à la limite abrogée utilise toutes les technologies existant à la date de l'entrée en vigueur de la norme actuelle, à savoir GSM, DCS 1800, UMTS, LTE et 5G NR, aux fréquences et donc aux limites les plus basses reprises dans le tableau 2. Ce n'est généralement pas le cas : d'une part, la majorité des installations n'utilise qu'une partie de ces technologies ; d'autre part, les technologies en service n'utilisent pas nécessairement la bande de fréquence d'émission la plus basse pour cette technologie, la valeur limite y relative n'est donc pas toujours la plus stricte. La contribution d'une installation à la limite cumulative égale à 0,16 est donc un maximum. Un exemple est décrit dans le tableau 3. La contribution de cette installation fictive à l'indice relatif à la limite cumulative n'est plus que de 0,051, soit près d'un tiers de la valeur maximale.

Tableau 3 : Exemple de calcul de la contribution d'une installation fictive à la limite cumulative lorsque chaque technologie présente génère 3 V/m au même endroit dans un lieu de séjour

Technologie mentionnée dans l'avis	Fréquence la plus basse (MHz)	Niveau de référence de la limite cumulative (V/m)	Contribution à IE_c si $E = 3$ V/m
GSM (2G)	921	18,63	0,026
UMTS (3G)	2110	27,40	0,012
LTE (4G)	1805	26,09	0,013
Total :			0,051

Cette approche reste sécuritaire notamment parce qu'elle ne prend en compte ni la décroissance de l'intensité du champ électromagnétique avec la distance, ni la perte de puissance dans la direction considérée par rapport à la direction où l'intensité du rayonnement est maximale (formule A2.1).

Lorsqu'un dépassement de la limite cumulative ne peut être totalement exclu sur base de la méthode décrite ci-avant, une évaluation basée sur un modèle simplifié utilisant les données inscrites dans les demandes d'avis et les avis existants suffit généralement pour attester le respect de la limite cumulative. Pour ce faire, on définit, pour chaque installation de la zone d'évaluation, un indice d'exposition simplifié I qui varie en fonction de la distance de la manière suivante :

$$I = \begin{cases} I_{max} & \text{si } d \leq D_{max} \\ I_{D_{max}} \left(\frac{D_{max}}{d} \right)^2 & \text{si } d > D_{max} \end{cases} \quad (\text{A2.11})$$

où D_{max} est le rayon maximal de la zone d'évaluation du respect de la limite par installation ou de la limite abrogée.

Si l'installation a été évaluée selon la limite par installation, alors

$$I_{max} = 0,25 \times IE_{i,max} \quad (\text{A2.12})$$

$$I_{D_{max}} = 0,25 \quad (\text{A2.13})$$

où $IE_{i,max}$ est la valeur maximale (≤ 1) de l'indice d'exposition relatif à la limite par installation.

En l'absence de données sur les lieux de séjour et les niveaux d'exposition, une approche sécuritaire consiste à adopter la valeur $IE_{i,max} = 1$; la distance D_{max} est alors la distance maximale de l'installation à laquelle la limite par installation peut être atteinte, elle est donnée par la formule

$$D_{max} = \sqrt{30 \sum_f \frac{PIRE_f}{E_{r,f,i}^2}} \quad (A2.14)$$

où $PIRE_f$ est la Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente maximale exprimée en watts (W), donnée par :

$$PIRE_f = \sum_k P_{f,k} \cdot 10^{g_{f,k}/10} \quad (A2.15)$$

où $P_{f,k}$ est la puissance maximum fournie à l'entrée de l'antenne k à la fréquence f , exprimée en watts (W) et $g_{f,k}$ est le gain maximum, exprimé en dBi, de l'antenne k à la même fréquence f .

Lorsque l'atténuation d'obstacle par défaut de 3 dB est prise en compte, les lieux de séjour situés à l'extérieur (sans atténuation d'obstacle) et les lieux de séjour situés à l'intérieur de bâtiments (avec une atténuation d'obstacle) sont évalués séparément en adoptant des valeurs de $IE_{i,max}$ et de D_{max} qui dépendent du type de lieu de séjour. Notamment, la valeur de $D_{max,0dB}$ relative aux lieux de séjour situés à l'extérieur (sans atténuation d'obstacle) est donnée par la formule (A2.14) et la valeur de $D_{max,3dB}$ relative aux lieux de séjour situés à l'intérieur de bâtiments (avec une atténuation d'obstacle par défaut de 3 dB) est alors

$$D_{max,3dB} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times D_{max,0dB} \cong 0,71 \times D_{max,0dB} \quad (A2.16)$$

Si l'installation a été évaluée selon la limite abrogée, alors $I_{max} = I_{D_{max}}$ est la valeur calculée sur base de la limite abrogée comme dans l'exemple du tableau 3. Dans ce cas, on a :

$$I_{max} = I_{D_{max}} \leq 0,16 \quad (A2.17)$$

$$D_{max} = \frac{\sqrt{30 \times PIRE_{tech,max}}}{3} \quad (A2.18)$$

où $PIRE_{tech,max}$ est la PIRE relative à la technologie ayant la PIRE totale la plus grande.

L'évaluation du respect de la limite cumulative repose alors sur l'inégalité suivante :

$$IE_c \leq I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (A2.19)$$

où $I_1, I_2, \dots, I_N$ est l'indice d'exposition simplifié, calculé selon la formule (A2.11), relatif à l'installation 1, 2, ..., N dans chaque lieu de séjour à l'intérieur de la zone de 300 mètres de rayon. La limite cumulative n'est pas dépassée si la somme des indices inscrite dans l'inégalité (A2.19) est inférieure ou égale à 1.

Remarquons, à toute fin utile, que l'inégalité (A2.20) ci-dessous montre qu'à données égales, la valeur de D_{max} relative à la limite abrogée est supérieure à celle relative à la limite par installation. Il en résulte que tous les lieux de séjour qui seraient pertinents pour l'évaluation du respect de la limite par installation sur base des données utilisées pour établir l'avis attestant le respect de la limite abrogée ont été référencés et pris en compte.

$$\sum_f \frac{PIRE_f}{E_{r,f,i}^2} \leq \frac{PIRE_{GSM}}{9,32^2} + \frac{PIRE_{DCS\ 1800}}{13,04^2} + \frac{PIRE_{UMTS}}{9,32^2} + \frac{PIRE_{LTE}}{8,45^2} + \frac{2\ PIRE_{5G\ NR}}{8,45^2} \quad (A2.20)$$

$$\leq PIRE_{tech,max} \left(\frac{2}{9,32^2} + \frac{1}{13,04^2} + \frac{3}{8,45^2} \right) \leq PIRE_{tech,max} \frac{1}{3^2}$$

où $PIRE_{GSM}, \dots$ est la PIRE totale allouée à la technologie reprise en indice.

A3. Considérations sur la méthode d'évaluation

Les phénomènes physiques qui affectent la propagation sont d'une telle complexité que leur prise en compte n'est possible que moyennant quelques simplifications. Quelles que soient les simplifications envisagées, il faut toutefois veiller à ce que l'immission ainsi calculée ne soit pas inférieure à la valeur réelle (c'est-à-dire celle qui pourrait être mesurée sur le terrain), en particulier lorsque l'immission calculée est proche de la limite.

En outre, certaines données techniques peuvent comporter des incertitudes, lesquelles vont impacter l'incertitude sur le résultat final. Les principales sources d'incertitudes sont commentées ci-dessous.

a) Atténuation d'enveloppe

L'atténuation du rayonnement que produisent l'enveloppe des bâtiments et les obstacles en général dépend, entre autres, de la taille et de l'orientation des fenêtres, du type de vitres, de l'épaisseur et de la nature des murs et de l'angle d'incidence du rayonnement.

La prise en compte d'une atténuation d'enveloppe par défaut de 3 dB (pour les lieux de séjour à l'intérieur des bâtiments) garantit, en principe, que l'immission calculée n'est pas inférieure à la valeur réelle. Ce choix repose d'une part sur les connaissances actuelles³ et, d'autre part, sur le constat lors des mesures sur le terrain que l'atténuation réelle est généralement supérieure à 3 dB. En conséquence, l'immission réelle est inférieure à celle calculée sur base de l'hypothèse d'une atténuation de 3 dB.

On mentionnera qu'il n'est pas indispensable qu'un obstacle soit sur le trajet direct du rayonnement pour que l'immission soit réduite. Cette réduction de l'immission s'explique du fait que l'essentiel de la puissance transmise d'un point d'émission à un point de réception se propage dans un certain volume (appelé « premier ellipsoïde de Fresnel ») entourant le trajet direct reliant ces deux points. Les bords inférieur, supérieur et latéraux des fenêtres constituent des éléments qui entravent, du moins partiellement, la propagation du rayonnement, d'où une réduction du niveau d'immission.

b) Incertitudes sur certaines données techniques

La plupart des données prises en compte dans les calculs (angles d'azimut, distances, variations du gain d'antenne en fonction de la fréquence du rayonnement...) comportent une incertitude.

c) Durée d'exposition

Les limites d'immission fixées à l'article 4 du décret sont une moyenne prise sur une période quelconque de 30 minutes. Or, à l'exception des antennes du réseau 5G NR émettant dans la bande 3,6 GHz pour lesquelles une puissance effective inférieure à la puissance maximale peut être utilisée, tous les calculs de champ sont basés sur la puissance émise lorsque l'installation fonctionne à pleine charge. Pour des antennes utilisées dans les réseaux de communication mobile publics, une telle situation ne se produit que rarement et dans des circonstances particulières. En principe, l'immission

moyenne sur une période quelconque de 30 minutes n'atteint pratiquement jamais celle qui correspond à la pleine charge.

d) Validité du modèle mathématique

Les calculs de champ sont effectués au moyen d'un logiciel développé par l'ISSEP ; ce logiciel détermine l'intensité du champ électromagnétique au moyen de la relation (A2.1) qui est valable dans la zone de champ lointain. L'approximation « champ lointain » s'applique normalement à partir d'une distance supérieure à $2D^2/\lambda$ où D représente la plus grande dimension (en mètres) de l'antenne dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement – en fait, D est la plus grande dimension de l'antenne « vue » depuis le point considéré – et λ est la longueur d'onde du signal rayonné. Selon la recommandation ECC (02)04 - Révisée (Bratislava 2003, Helsinki 2007), l'approximation peut être étendue à $[\lambda; \frac{2D^2}{\lambda}]$. Pratiquement, cela revient à considérer que l'approximation s'applique à partir de 40 cm dans une direction perpendiculaire à l'antenne, voire moins dans d'autres directions. En outre, utiliser la relation (A2.1) dans la zone de champ proche conduit à une surestimation de l'intensité du champ électromagnétique qui va dans le sens de la sécurité.

Dans le cas du déploiement de la 5G NR dans la bande 3,6 GHz, deux nouveaux éléments sont à prendre en compte. D'une part, dans cette bande de fréquence, le multiplexage est temporel, c'est-à-dire que les antennes n'émettent pas pendant la partie du temps qui est réservée aux communications montantes (de l'appareil vers l'antenne). Les antennes n'émettent que pendant trois quarts du temps durant un cycle. D'autre part, le rayonnement des antennes dites adaptatives, c'est-à-dire qui utilisent la technique du *beamforming*, présentent une grande variabilité spatiale afin de mieux cibler les utilisateurs.

Pour tenir compte de ces deux éléments, une puissance effective inférieure à la puissance maximale peut être utilisée. Une réduction de 6 dB, qui semble faire consensus dans la littérature publiée, est appliquée sur la puissance maximale : la puissance effectivement utilisée dans les simulations est égale à un quart de la puissance maximale à l'entrée de l'antenne adaptative.

Un certain nombre d'éléments complémentaires peuvent être pris en compte pour l'évaluation du respect de la limite cumulative :

- dans le cas où plusieurs antennes sont présentes sur le site d'antennes émettrices stationnaires, il est très peu probable qu'elles produisent toutes leur maximum exactement au même endroit. D'une part, les antennes directives sises sur un même support sont rarement toutes orientées dans la même direction (en azimut et en élévation) et elles ont des caractéristiques différentes. D'autre part, lorsque plusieurs installations sont disposées autour d'un bâtiment, l'exposition maximale qu'elles génèrent peut être atteinte dans des lieux différents ;
- dans le cas des antennes des réseaux de communication mobile, la puissance rayonnée par les antennes varie dans le temps, de sorte que la puissance maximale n'est atteinte qu'occasionnellement. Or, à l'exception des antennes du réseau 5G NR utilisant la technique du *beamforming* pour lesquelles une puissance effective inférieure à la puissance maximale peut être utilisée, la vérification du respect de la limite d'immission est basée sur la puissance maximale. Le champ sera donc, la plupart du temps, inférieur à la valeur ainsi calculée. Dans le cas d'une exposition aux rayonnements de plusieurs installations d'antennes, la probabilité qu'elles émettent toutes simultanément (et a fortiori pendant une même période quelconque de 30 minutes) au maximum de leur puissance est

très faible. Le maximum du cumul des rayonnements de cet ensemble d'antennes sera nettement inférieur à la somme des maximums produits par chacune prise isolément ;

- la méthode de calcul de l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative décrite au paragraphe A2.2.2 ne prend pas en compte la variabilité de l'exposition en fonction de l'angle d'azimut. Or, les antennes directives utilisées dans les réseaux de communication mobile ne rayonnent que dans un secteur limité dans le plan horizontal. Plusieurs antennes sont ainsi placées de manière à couvrir une zone de 360°. Le champ que chacune produit en dehors de son secteur (ou des différents lobes dans le cas du *beamforming*) est donc plus faible, voire négligeable, notamment derrière l'antenne ;
- dans la zone de champ lointain, l'intensité du champ est inversement proportionnelle à la distance. Dans l'hypothèse sécuritaire où une installation d'antennes émettrices stationnaires des réseaux mobiles génère une exposition maximale égale à la limite par installation à 150 mètres des antennes, sa contribution à l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative est égale à 1/16 à 300 mètres des antennes. Cela indique qu'à plus de 300 mètres d'une installation d'antennes, sa contribution devient faible au regard de la limite cumulative.

En résumé, les différents éléments exposés dans ce paragraphe indiquent que l'approche suivie pour l'évaluation du respect de la limite par installation et de la limite cumulative conduit globalement à une surestimation de l'exposition. Une telle surestimation est acceptable puisqu'elle va dans le sens de la sécurité.



Wissenschaftliches
Institut
des öffentlichen
Dienstes

Umweltmesswesen
Recherche – Analyse

Hauptsitz und Standort Lüttich:

Rue du Chéra, 200

B-4000 Lüttich

Tel.: +32(0)4 229 83 11

Fax: +32(0)4 252 46 65

Website: <http://www.issep.be>

Standort in Colfontaine:

Zoning A. Schweitzer

Rue de la Platinerie

B-7340 Colfontaine

Tel.: +32(0)65 61 08 11

Fax: +32(0)65 61 08 08

Lüttich, den 21. Februar 2024

**ANHANG
ZUR STELLUNGNAHME ÜBER DEN SCHUTZ
VOR MÖGLICHEN SCHÄDLICHEN AUSWIRKUNGEN UND
BELÄSTIGUNGEN DURCH NICHT-IONISIERENDE STRAHLUNG,
DIE VON STATIONÄREN SENDEANTENNEN ERZEUGT WIRD**

Version 5.2.2.

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

AnhangV5.2.2.– Seite 1/12



Wallonie

A1. Dekret vom 3. April 2009 über den Schutz gegen die etwaigen gesundheitsschädlichen Auswirkungen und die Belästigungen, die durch die durch ortsfeste Sendeantennen erzeugten nicht-ionisierenden Strahlungen verursacht werden

In der Wallonie werden elektromagnetische Emissionen im Radiofrequenzbereich durch das Dekret vom 8. Dezember 2022 (Belgisches Staatsblatt vom 16.12.2022) zur Abänderung des Dekrets vom 3. April 2009 über den Schutz gegen die etwaigen gesundheitsschädlichen Auswirkungen und die Belästigungen, die durch die durch ortsfeste Sendeantennen erzeugten nicht-ionisierenden Strahlungen verursacht werden, geregelt und im Folgenden als „das Dekret“ bezeichnet.

Artikel 4 des Dekrets legt zwei Grenzwerte für Immissionen an Aufenthaltsorten fest. Paragraph 1 definiert den Grenzwert für die „Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die von allen ortsfesten Sendeantennen eines Betreibers, die auf demselben Träger installiert sind, erzeugt wird“, im Folgenden als „Grenzwert pro Anlage“ bezeichnet; der zweite Grenzwert, der in Paragraph 2 definiert ist, gilt für die „Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die von allen ortsfesten Sendeantennen aller Betreiber eines Standorts mit ortsfesten Sendeantennen erzeugt wird“, wie in Artikel 2 definiert, im Folgenden als „kumulativer Grenzwert“ bezeichnet.

A2. Untersuchungsmethode

A2.1. Bewertung der Einhaltung des Grenzwertes pro Anlage

Die Schlussfolgerungen der in Artikel 5 des Dekrets genannten Stellungnahmen beruhen auf Simulationen, die mithilfe eines mathematischen Modells nach einer unten beschriebenen Methode durchgeführt werden.

Die Exposition von Personen gegenüber Antennenstrahlung kann in der Regel mit dem Modell der Ausbreitung im freien Raum und unter Berücksichtigung möglicher Hindernisse behandelt werden. Dieses Modell beruht auf den mathematischen Beziehungen, die als Fernfeldformeln bezeichnet werden. Sie liefern die Stärke der elektrischen und magnetischen Komponenten des Feldes und spiegeln insbesondere die Tatsache wider, dass diese beiden Komponenten, wenn keine Hindernisse vorhanden sind, umgekehrt proportional zur Entfernung sind.

Daraus folgt, dass an Aufenthaltsorten das von einer Antenne erzeugte elektromagnetische Feld E mithilfe der folgenden Beziehung bestimmt werden kann

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{30 P \times G}{A(\phi, \theta)}} \quad (\text{A2.1})$$

Hierbei gilt:

P ist die von der Antenne abgestrahlte Leistung in Watt (W). Der für die Simulationen verwendete Wert ist die Sendeleistung bei Volllast, mit Ausnahme von 5G NR-Antennen, die

TDD¹ und *Beamforming*² verwenden, für die ein Reduktionsfaktor von 1,25 dB bzw. 4,75 dB verwendet werden kann;

- G ist der Gewinn der Antenne im Vergleich zu einer isotropen Antenne in der Richtung, in der die Strahlungsintensität am größten ist (dimensionslose Zahl);
- $A(\phi, \theta)$ ist der Leistungsverlust in der betrachteten Richtung relativ zu der Richtung, in der die Strahlungsintensität am größten ist (dimensionslose Zahl). Diese Zahl wird aus den horizontalen und vertikalen Strahlungsdiagrammen der Antenne abgeleitet;
- θ ist der Elevationswinkel (in Grad);
- ϕ ist der Winkel zum Referenzazimut, der in der Regel der Richtung entspricht, in der der Gewinn am größten ist (in Grad);
- d ist der Abstand zur Antenne in Metern.

Wie bereits erwähnt, wird $A(\phi, \theta)$ aus den Strahlungsdiagrammen abgeleitet. Diese Diagramme, meist zwei, charakterisieren die Richtwirkung einer Antenne (Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der betrachteten Richtung). Das horizontale Diagramm $A_H(\phi)$ zeigt den Leistungsverlust in den verschiedenen Richtungen der horizontalen Ebene ($\theta = 0$), während das vertikale Diagramm $A_V(\theta)$ den Leistungsverlust in den verschiedenen Richtungen der vertikalen Ebene ($\phi = 0$) liefert. Der Koeffizient des Leistungsverlusts $A(\phi, \theta)$ in der Richtung (ϕ, θ) kann aus den Strahlungsdiagrammen $A_H(\phi)$ und $A_V(\theta)$ abgeleitet werden, da

$$A(\phi, \theta) = A_H(\phi) \times A_V(\theta) \quad (\text{A2.2})$$

Der Expositionsindex für den Grenzwert pro Anlage, der mit IE_i bezeichnet wird, ist eine Zahl ohne Einheit, die wie folgt berechnet wird:

$$IE_i = \sum_f \left(\frac{E_f}{E_{r,f,i}} \right)^2 \quad (\text{A2.3})$$

wobei:

E_f ist die Stärke des elektrischen Feldes, ausgedrückt in Volt pro Meter (V/m), das bei der Frequenz f erzeugt wird;

$E_{r,f,i}$ ist der Referenzpegel bezüglich des Grenzwerts pro Anlage für die Emissionsfrequenz f , gleich:

- $67/f^{0,7}$ (V/m) für Frequenzen zwischen 100 kHz und 30 MHz, f ist die Frequenz in MHz;
- 6,1 V/m bei Frequenzen zwischen 30 MHz und 400 MHz;
- $(0,307 \sqrt{f})$ (V/m) für Frequenzen zwischen 400 MHz und 2 GHz, f ist die Frequenz in MHz;

¹ Time division duplex.

² *Beamforming*, wörtlich übersetzt „Strahlformung“, ist eine Technik, die eine bessere räumliche Selektivität als herkömmliche Antennen ermöglicht, d. h. eine bessere Ausrichtung auf einen begrenzten Bereich des Raums. Die Strahlung wird in Form von „Strahlen“ in bestimmte Richtungen abgegeben, was durch eine geeignete Steuerung der verschiedenen strahlenden Elemente, aus denen die Antenne besteht, erreicht wird.

d) 13,7 V/m bei Frequenzen zwischen 2 GHz und 300 GHz.

Paragraph 4, Absatz 1 des Dekrets besagt, dass an Aufenthaltsorten die Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die von allen ortsfesten Sendeantennen eines Betreibers, die auf ein und demselben Träger installiert sind, erzeugt wird, so begrenzt wird, dass:

$$IE_i \leq 1 \quad (\text{A2.4})$$

Der Expositionsindex für den kumulativen Grenzwert, der mit IE_c bezeichnet wird, ist eine Zahl ohne Einheit, die wie folgt berechnet wird:

$$IE_c = \sum_f \left(\frac{E_f}{E_{r,f,c}} \right)^2 \quad (\text{A2.5})$$

wobei:

E_f ist wieder die Stärke des elektrischen Feldes, ausgedrückt in V/m, das bei der Frequenz f erzeugt wird;

$E_{r,f,c}$ ist der Referenzpegel bezüglich des kumulativen Grenzwerts für die Emissionsfrequenz f , gleich:

- a) $134/f^{0,7}$ (V/m) für Frequenzen zwischen 100 kHz und 30 MHz, f ist die Frequenz in MHz;
- b) 12,2 V/m bei Frequenzen zwischen 30 MHz und 400 MHz;
- c) $(0,614 \sqrt{f})$ (V/m) für Frequenzen zwischen 400 MHz und 2 GHz, f ist die Frequenz in MHz;
- d) 27,4 V/m bei Frequenzen zwischen 2 GHz und 300 GHz.

Paragraph 4, Absatz 2 des Dekrets besagt, dass an Aufenthaltsorten die Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die von allen ortsfesten Sendeantennen aller Betreiber eines Standorts mit ortsfesten Sendeantennen erzeugt wird, so begrenzt wird, dass:

$$IE_c \leq 1 \quad (\text{A2.6})$$

Der Wert der Referenzpegel wird in dem Erlass so festgelegt, dass für jede Frequenz f zwischen 100 kHz und 300 GHz:

$$E_{r,f,c} = 2 E_{r,f,i} \quad (\text{A2.7})$$

Befinden sich am Standort ortsfester Sendeantennen mehrere Anlagen, so ist der Expositionsindex für den kumulativen Grenzwert gleich der Summe der Einzelbeiträge. Unter Berücksichtigung der Gleichheit (A2.7) ergibt sich:

$$IE_c = 0,25 \sum_{i=1}^N IE_i \quad (\text{A2.8})$$

wobei sich der Summationsindex i auf alle N berücksichtigten ortsfesten Sendeantennenanlagen bezieht, einschließlich der Anlage, die Gegenstand des Antrags auf Stellungnahme ist. Wenn also jede Anlage die Bedingung (A2.4) erfüllt, ergibt sich:

$$IE_c \leq 0,25 N \quad (\text{A2.9})$$

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

so dass, wenn weniger als 5 Anlagen am Standort vorhanden sind ($N \leq 4$), der kumulative Grenzwert automatisch eingehalten wird und es nicht notwendig ist, die kumulative Strahlung durch Simulationen zu bewerten (siehe Absatz A2.2).

Da die Referenzwerte frequenzabhängig sind, ist die Annahme des niedrigsten Wertes in einem Frequenzband wie eine Art Sicherheitsfaktor. Insbesondere bei den Frequenzen, die von mobilen Kommunikationsnetzen genutzt werden, sind die strengsten Referenzwerte diejenigen, die der niedrigsten Frequenz in jedem Band entsprechen. In Tabelle 1 sind die in den Simulationen angenommenen Referenzpegel für die Frequenzbänder aufgeführt, die derzeit von ortsfesten Sendeantennen in Mobilfunknetzen genutzt werden.

Tabelle 1: Verwendete Referenzpegel für ortsfeste Sendeantennen von Mobilkommunikationsnetzen

Frequenzband (MHz)	Niedrigste Frequenz (MHz)	Referenzpegel	
		Grenzwert pro Anlage (V/m)	Kumulativer Grenzwert (V/m)
758 bis 788	758	8,45	16,90
791 bis 821	791	8,63	17,27
921 bis 960	921	9,32	18,63
1427 bis 1517	1427	11,60	23,19
1805 bis 1880	1805	13,04	26,09
2110 bis 2170	2110	13,70	27,40
2620 bis 2690	2620	13,70	27,40
3430 bis 3800	3430	13,70	27,40

Für Aufenthaltsorte in Gebäuden wird in der Regel eine Zusatzdämpfung durch Hindernisse von 3 dB (entspricht einer Expositionsreduktion von 50 %) berücksichtigt. Dieser Wert von 3 dB verhindert, dass die tatsächlichen Felder³ unterschätzt werden, da die Dämpfung durch die Gebäudehülle in der Regel höher ist: Insbesondere beträgt die Dämpfung in der Regel mehr als 10 dB, wenn die Strahlung das Betondach eines Gebäudes durchdringt. Aus diesem Grund kann ein Dämpfungswert von 10 dB (d. h. eine Reduzierung der Exposition um den Faktor 10) für mögliche Aufenthaltsorte unter Antennen verwendet werden, wenn diese auf dem Betondach eines Gebäudes installiert sind. Eine zusätzliche Dämpfung kann ausnahmsweise angewendet werden, wenn sich ein Hindernis direkt vor den Sendeantennen befindet oder wenn die Antennen in einem geschlossenen Raum aufgestellt sind, sofern dies durch die Art und Anordnung der vorhandenen Materialien gerechtfertigt ist. Gegebenenfalls ist die Höhe der anzuwendenden Dämpfung durch vom Betreiber vorgelegte Unterlagen zu belegen.

A2.2. Bewertung der Einhaltung des kumulativen Grenzwertes

Die in diesem Paragraphen beschriebene Methode beruht auf der vorherigen Bewertung, ob die Antennen, die Gegenstand des Antrags auf Stellungnahme sind, den Grenzwert pro Anlage einhalten. Die Bewertung beschränkt sich auf die ortsfesten Sendeantennen, die einen Standort für ortsfeste

³ Compilation of measurement data relating to building entry loss. Report ITU-R P.2346-4 (07/2021).

Sendeantennen gemäß Artikel 2 des Dekrets darstellen und die sich in einem Umkreis von 300 Metern⁴ um die Anlage befinden, die Gegenstand des Antrags auf Stellungnahme ist. Diese ortsfesten Sendeantennen wurden selbst einer vorherigen Bewertung unterzogen, die entweder die Einhaltung des Grenzwerts pro Anlage oder des aufgehobenen Grenzwerts von 3 V/m pro Antenne⁵ bescheinigte. Wenn, wie in Tabelle 2 dargestellt, angenommen wird, dass jede Technologie einer Anlage genau 3 V/m am selben Ort an einem Aufenthaltsort erzeugt, indem eine 6-dB-Reduzierung der Eingangsleistung der 5G NR-Antennen beibehalten wird, die sowohl TDD¹ (1,25 dB) als auch Beamforming² (4,75 dB) verwenden, erzeugt diese Anlage an diesem Ort höchstens einen Expositionsindex bezüglich des kumulativen Grenzwerts von 0,16.

Tabelle 2: Maximaler Beitrag einer Anlage zum kumulativen Grenzwert, wenn jede Technologie 3 V/m am selben Ort an einem Aufenthaltsort erzeugt

Technologie	Niedrigste Frequenz (MHz)	Referenzpegel des kumulativen Grenzwerts (V/m)	Beitrag zu IE_c wenn $E = 3 \text{ V/m}$
GSM (2G)	921	18,63	0,026
DCS (2G)	1805	26,09	0,013
UMTS (3G)	921	18,63	0,026
LTE (4G)	758	16,90	0,031
5G NR ⁶	758	16,90	0,063
Gesamt:			0,16

Bei der Beurteilung, ob die kumulative Grenze eingehalten wird, können zwei Fälle auftreten:

A2.2.1. Höchstens 4 Anlagen, die sich in einem Radius von 300 Metern befinden

Wie in Paragraph A2.1 gezeigt, wird die kumulative Grenze automatisch eingehalten, wenn sich im Beurteilungsgebiet (Kreis mit 300 m Radius um die Anlage, für die eine Stellungnahme beantragt wird) höchstens vier Anlagen, einschließlich der Anlage, für die eine Stellungnahme beantragt wird, befinden und jede von ihnen die Bedingung (A2.4) erfüllt.

A2.2.2. Mehr als 4 Anlagen, die sich in einem Radius von 300 Metern befinden

Wenn sich mindestens fünf Anlagen im Beurteilungsgebiet (Kreis mit einem Radius von 300 Metern um die Anlage, für die eine Stellungnahme beantragt wird) befinden, kann die Einhaltung des

⁴ Erlass der Wallonischen Regierung vom 27. April 2023 zur Festlegung des Nahbereichs auf der Grundlage der gleichwertigen isotropischen Strahlleistung der vorhandenen Antennen und des Bruchteils der kumulativen Grenze, ab der eine im Bereich befindliche Antenne berücksichtigt werden muss. Belgisches Staatsblatt, 12. Juni 2023.

⁵ Diese Grenze gilt seit dem 26. Dezember 2022 nicht mehr.

⁶ Die Berechnung berücksichtigt eine Reduzierung der maximalen Leistung um 6 dB am Eingang der 5G-NR-Antennen, die TDD und Beamforming verwenden.

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

kumulativen Grenzwerts in Schritten zunehmender Komplexität überprüft werden, von einer einfachen Zählung bis hin zu Simulationen auf der Grundlage eines Rechenmodells.

a) Berücksichtigung der Anzahl der Anlagen, für die eine Stellungnahme über den aufgehobenen Grenzwert von 3 V/m vorliegt

Wenn am Standort ortsfester Sendeantennen Antennen, für die Stellungnahmen nach dem aufgehobenen Grenzwert von 3 V/m vorliegen, und Anlagen, für die Stellungnahmen nach der aktuellen Norm vorliegen oder beantragt wurden, nebeneinander bestehen, wird der kumulative Grenzwert automatisch eingehalten, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$n \times 0,25 + m \times 0,16 \leq 1 \quad (\text{A2.10})$$

wobei n die Anzahl der Anlagen ist, die nach dem Grenzwert pro Anlage bewertet wurden, und m die Anzahl der Anlagen ist, für die eine Stellungnahme bezüglich des aufgehobenen Grenzwerts von 3 V/m abgegeben wurde.

Wir stellen fest, dass wenn $n = 1$, ist die Bedingung (A2.10) erfüllt, wenn $m \leq 4$; wenn $n = 2$, ist die Bedingung (A2.10) erfüllt, wenn $m \leq 3$; wenn hingegen $n = 3$, ist die Bedingung (A2.10) nur erfüllt, wenn $m \leq 1$. So wird in den ersten beiden Fällen die kumulative Grenze auch dann eingehalten, wenn die Gesamtzahl der Anlagen $N(= m + n)$ in der Bewertungszone mit einem Radius von 300 Metern fünf beträgt.

b) Andere Fälle

Die Bedingung (A2.10) wird erfüllt, indem angenommen wird, dass jede Anlage von Mobilfunknetzen, auf die in den Stellungnahmen nach dem aufgehobenen Grenzwert verwiesen wird, alle zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der aktuellen Norm existierenden Technologien, d. h. GSM, DCS 1800, UMTS, LTE und 5G NR, mit den in Tabelle 2 aufgeführten Frequenzen und damit den niedrigsten Grenzwerten nutzt. Dies ist in der Regel nicht der Fall: Zum einen nutzt die Mehrheit der Anlagen nur einen Teil dieser Technologien; zum anderen nutzen die im Einsatz befindlichen Technologien nicht unbedingt das niedrigste Sendefrequenzband für diese Technologie, sodass der diesbezügliche Grenzwert nicht immer der strengste ist. Der Beitrag einer Anlage zum kumulativen Grenzwert gleich 0,16 ist also ein Höchstwert. Ein Beispiel wird in Tabelle 3 beschrieben. Der Beitrag dieser fiktiven Anlage zum Index für den kumulativen Grenzwert beträgt nur noch 0,051, also fast ein Drittel des Höchstwertes.

Tabelle 3: Beispiel für die Berechnung des Beitrags einer fiktiven Anlage zum kumulativen Grenzwert, wenn jede Technologie 3 V/m am selben Ort an einem Aufenthaltsort erzeugt

In der Stellungnahme erwähnte Technologie	Niedrigste Frequenz (MHz)	Referenzpegel des kumulativen Grenzwerts (V/m)	Beitrag zu IE_c wenn $E = 3 \text{ V/m}$
GSM (2G)	921	18,63	0,026
UMTS (3G)	2110	27,40	0,012
LTE (4G)	1805	26,09	0,013
Gesamt:			0,051

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

Dieser Ansatz bleibt vor allem deshalb sicherheitsorientiert, weil er weder die Abnahme der Stärke des elektromagnetischen Feldes mit der Entfernung noch den Leistungsverlust in der betrachteten Richtung im Vergleich zu der Richtung mit der höchsten Strahlungsintensität berücksichtigt (Formel A2.1).

Wenn eine Überschreitung des kumulativen Grenzwerts auf der Grundlage der oben beschriebenen Methode nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, reicht in der Regel eine Bewertung auf der Grundlage eines vereinfachten Modells, das die in den Anträgen auf Stellungnahme und den bestehenden Stellungnahmen enthaltenen Daten verwendet, aus, um die Einhaltung des kumulativen Grenzwerts nachzuweisen. Dazu wird für jede Anlage im Bewertungsgebiet ein vereinfachter Expositionsindex I definiert, der sich mit der Entfernung wie folgt ändert:

$$I = \begin{cases} I_{max} & \text{si } d \leq D_{max} \\ I_{D_{max}} \left(\frac{D_{max}}{d} \right)^2 & \text{si } d > D_{max} \end{cases} \quad (\text{A2.11})$$

wobei D_{max} der maximale Radius des Bereichs ist, in dem die Einhaltung des Grenzwerts pro Anlage oder des aufgehobenen Grenzwerts bewertet wird.

Wenn die Anlage nach dem Grenzwert pro Anlage bewertet wurde, dann

$$I_{max} = 0,25 \times IE_{i,max} \quad (\text{A2.12})$$

$$I_{D_{max}} = 0,25 \quad (\text{A2.13})$$

wobei $IE_{i,max}$ der Höchstwert (≤ 1) des Expositionsindex bezogen auf den Grenzwert pro Anlage ist.

Wenn keine Daten über Aufenthaltsorte und Expositionspegel vorliegen, besteht ein sicherheitsorientierter Ansatz darin, den Wert $IE_{i,max} = 1$ anzunehmen; der Abstand D_{max} ist dann der maximale Abstand von der Anlage, bei dem der Grenzwert pro Anlage erreicht werden kann, er ergibt sich aus der Formel

$$D_{max} = \sqrt{30 \sum_f \frac{EIRP_f}{E_{r,f,i}^2}} \quad (\text{A2.14})$$

wobei $EIRP_f$ die maximale äquivalente isotrope Strahlungsleistung in Watt (W) ist, gegeben durch:

$$EIRP_f = \sum_k P_{f,k} \cdot 10^{g_{f,k}/10} \quad (\text{A2.15})$$

wobei $P_{f,k}$ die maximale Eingangsleistung der Antenne k bei der Frequenz f , ausgedrückt in Watt (W), ist und $g_{f,k}$ der maximale Gewinn, ausgedrückt in dBi, der Antenne k bei derselben Frequenz f ist.

Wenn die Zusatzdämpfung durch Hindernisse von 3 dB berücksichtigt wird, werden Aufenthaltsorte im Freien (ohne Zusatzdämpfung durch Hindernisse) und Aufenthaltsorte innerhalb von Gebäuden (mit Zusatzdämpfung durch Hindernisse) getrennt bewertet, indem Werte von $IE_{i,max}$ und von D_{max} angenommen werden, die von der Art des Aufenthaltsortes abhängen. Insbesondere ist der Wert von $D_{max,0dB}$ für Aufenthaltsorte im Freien (ohne Zusatzdämpfung durch Hindernisse) durch die Formel (A2.14) gegeben und der Wert von $D_{max,3dB}$ für Aufenthaltsorte in Gebäuden (mit Zusatzdämpfung durch Hindernisse von 3 dB) ist dann

$$D_{max,3dB} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times D_{max,0dB} \cong 0,71 \times D_{max,0dB} \quad (A2.16)$$

Wenn die Anlage nach dem aufgehobenen Grenzwert bewertet wurde, dann ist $I_{max} = I_{D_{max}}$ der Wert, der auf der Grundlage des aufgehobenen Grenzwerts berechnet wurde, wie im Beispiel in Tabelle 3. In diesem Fall gilt:

$$I_{max} = I_{D_{max}} \leq 0,16 \quad (A2.17)$$

$$D_{max} = \frac{\sqrt{30 \times EIRP_{tech,max}}}{3} \quad (A2.18)$$

wobei $EIRP_{tech,max}$ die EIRP in Bezug auf die Technologie mit der größten Gesamt-EIRP ist.

Die Bewertung der Einhaltung der kumulativen Grenze beruht dann auf der folgenden Ungleichung:

$$E_c \leq I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (A2.19)$$

wobei $I_1, I_2, \dots, I_N$ der nach Formel (A2.11) berechnete vereinfachte Expositionsindex für die Anlage 1, 2, ..., N an jedem Aufenthaltsort innerhalb der Zone mit 300 m Radius ist. Die kumulative Grenze wird nicht überschritten, wenn die Summe der in der Ungleichung (A2.19) eingetragenen Indizes kleiner oder gleich 1 ist.

Beachten Sie, dass die folgende Ungleichung (A2.20) zeigt, dass bei gleichen Daten der Wert von D_{max} für den aufgehobenen Grenzwert höher ist als der Wert für den Grenzwert pro Anlage. Daraus folgt, dass alle Aufenthaltsorte, die für die Bewertung der Einhaltung des Grenzwerts pro Anlage auf der Grundlage der Daten relevant wären, die für die Erstellung der Stellungnahme zur Bescheinigung der Einhaltung des aufgehobenen Grenzwerts verwendet wurden, referenziert und berücksichtigt wurden.

$$\begin{aligned} \sum_f \frac{EIRP_f}{E_{r,f,i}^2} &\leq \frac{EIRP_{GSM}}{9,32^2} + \frac{EIRP_{DCS\ 1800}}{13,04^2} + \frac{EIRP_{UMTS}}{9,32^2} + \frac{EIRP_{LTE}}{8,45^2} + \frac{2\ EIRP_{5G\ NR}}{8,45^2} \\ &\leq EIRP_{tech,max} \left(\frac{2}{9,32^2} + \frac{1}{13,04^2} + \frac{3}{8,45^2} \right) \leq EIRP_{tech,max} \frac{1}{3^2} \end{aligned} \quad (A2.20)$$

wobei $EIRP_{GSM}, \dots$ die gesamte EIRP ist, die der im Index erfassten Technologie zugewiesen wird.

A3. Erwägungen zur Bewertungsmethode

Die physikalischen Phänomene, die sich auf die Ausbreitung auswirken, sind so komplex, dass ihre Berücksichtigung nur mit einigen Vereinfachungen möglich ist. Welche Vereinfachungen auch immer in Betracht gezogen werden, es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die so berechnete Immission nicht niedriger ist als der tatsächliche Wert (d. h. der Wert, der vor Ort gemessen werden könnte), insbesondere wenn die berechnete Immission nahe am Grenzwert liegt.

Darüber hinaus können einige technische Daten Unsicherheiten enthalten, die sich auf die Unsicherheit des Endergebnisses auswirken werden. Die wichtigsten Quellen von Unsicherheiten werden im Folgenden erläutert.

a) Dämpfung durch Gebäudehülle

Die Dämpfung der Strahlung durch die Gebäudehülle und Hindernisse im Allgemeinen hängt unter anderem von der Größe und Ausrichtung der Fenster, der Art der Glasscheiben, der Dicke und Beschaffenheit der Wände und dem Einfallswinkel der Strahlung ab.

Die Berücksichtigung einer Dämpfung durch die Gebäudehülle von 3 dB (für Aufenthaltsorte in Gebäuden) stellt grundsätzlich sicher, dass die berechnete Immission nicht niedriger ist als der tatsächliche Wert. Diese Wahl beruht zum einen auf dem aktuellen Wissensstand³ und zum anderen auf der Feststellung bei Feldmessungen, dass die tatsächliche Dämpfung in der Regel mehr als 3 dB beträgt. Folglich ist die tatsächliche Immission geringer als die auf der Grundlage einer angenommenen Dämpfung von 3 dB berechnete.

Es sei erwähnt, dass sich ein Hindernis nicht unbedingt im direkten Strahlengang befinden muss, um die Immission zu verringern. Diese Verringerung der Immission lässt sich dadurch erklären, dass sich der Großteil der von einem Sendepunkt zu einem Empfangspunkt übertragenen Leistung in einem bestimmten Bereich (der sogenannten „ersten Fresnelzone“) ausbreitet, der den direkten Weg zwischen den beiden Punkten umgibt. Die Unter-, Ober- und Seitenkanten von Fenstern stellen Elemente dar, die die Ausbreitung der Strahlung zumindest teilweise behindern, wodurch der Immissionspegel gesenkt wird.

b) Unsicherheiten bei einigen technischen Daten

Die meisten der in den Berechnungen berücksichtigten Daten (Azimutwinkel, Entfernungen, Änderungen des Antennengewinns in Abhängigkeit von der Frequenz der Strahlung ...) sind mit einer Unsicherheit behaftet.

c) Dauer der Exposition

Die in Artikel 4 des Dekrets festgelegten Immissionsgrenzwerte sind ein Mittelwert, der über einen beliebigen Zeitraum von 30 Minuten genommen wird. Mit Ausnahme der Antennen des 5G-NR-Netzes, die im 3,6-GHz-Band senden und für die eine effektive Leistung unterhalb der maximalen Leistung verwendet werden kann, basieren jedoch alle Feldberechnungen auf der Sendeleistung, wenn die Anlage unter Volllast betrieben wird. Bei Antennen, die in öffentlichen Mobilfunknetzen verwendet werden, tritt eine solche Situation nur selten und unter besonderen Umständen ein. Grundsätzlich erreicht die durchschnittliche Immission über einen beliebigen Zeitraum von 30 Minuten praktisch nie die Immission, die der Volllast entspricht.

d) Gültigkeit des mathematischen Modells

Die Feldberechnungen werden mit einer vom ISSEP entwickelten Software durchgeführt; diese Software bestimmt die Stärke des elektromagnetischen Feldes mithilfe der Beziehung (A2.1), die im

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

Fernfeldbereich gültig ist. Die Fernfeldnäherung wird normalerweise ab einer Entfernung von mehr als $2D^2/\lambda$ angewendet, wobei D die größte Abmessung (in Metern) der Antenne in der Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung darstellt – tatsächlich ist D die größte Abmessung der Antenne, die von dem betrachteten Punkt aus „gesehen“ wird – und λ die Wellenlänge des abgestrahlten Signals ist. Gemäß der Empfehlung ECC (02)04 - überarbeitet (Bratislava 2003, Helsinki 2007) kann die Näherung erweitert werden auf $[\lambda ; \frac{2D^2}{\lambda}]$. Praktisch bedeutet dies, dass die Näherung ab 40 cm in einer Richtung senkrecht zur Antenne gilt, in anderen Richtungen sogar noch weniger. Außerdem führt die Anwendung der Beziehung (A2.1) im Nahfeldbereich zu einer Überschätzung der elektromagnetischen Feldstärke, wie eine Art Sicherheitsfaktor.

Im Falle der Einführung von 5G NR im 3,6-GHz-Band sind zwei neue Elemente zu berücksichtigen. Zum einen wird in diesem Frequenzband Zeitmultiplexing betrieben, d. h. die Antennen senden nicht während des Teils der Zeit, der für die Uplink-Kommunikation (vom Gerät zur Antenne) reserviert ist. Die Antennen senden während eines Zyklus nur drei Viertel der Zeit. Andererseits weist die Strahlung von sogenannten adaptiven Antennen, d. h. Antennen, die die Technik des *Beamforming* verwenden, eine große räumliche Variabilität auf, um die Nutzer gezielter ansprechen zu können.

Um diese beiden Elemente zu berücksichtigen, kann eine effektive Leistung verwendet werden, die niedriger ist als die maximale Leistung. Eine Reduktion von 6 dB, die in der veröffentlichten Literatur Konsens zu sein scheint, wird auf die maximale Leistung angewandt: Die tatsächlich in den Simulationen verwendete Leistung entspricht einem Viertel der maximalen Leistung am Eingang der adaptiven Antenne.

Bei der Bewertung, ob die kumulative Grenze eingehalten wird, kann eine Reihe zusätzlicher Elemente berücksichtigt werden:

- Bei mehreren Antennen am Standort ortsfester Sendeantennen ist es sehr unwahrscheinlich, dass alle Antennen ihr Maximum genau am selben Ort produzieren. Zum einen sind die Richtantennen auf demselben Untergrund selten alle in dieselbe Richtung (Azimut und Elevation) ausgerichtet und sie haben unterschiedliche Eigenschaften. Andererseits kann bei mehreren Anlagen, die um ein Gebäude herum angeordnet sind, die von ihnen erzeugte maximale Exposition an verschiedenen Orten erreicht werden.
- Bei Antennen für Mobilfunknetze schwankt die von den Antennen abgestrahlte Leistung mit der Zeit, sodass die maximale Leistung nur gelegentlich erreicht wird. Mit Ausnahme der Antennen des 5G NR-Netzes, die die *Beamforming*-Technik verwenden, für die eine effektive Leistung unterhalb der maximalen Leistung verwendet werden kann, basiert die Überprüfung der Einhaltung der Immissionsgrenze jedoch auf der maximalen Leistung. Das Feld wird daher in den meisten Fällen kleiner sein als der so berechnete Wert. Bei einer Strahlenexposition durch mehrere Antennenanlagen ist die Wahrscheinlichkeit, dass alle gleichzeitig (und erst recht innerhalb eines beliebigen Zeitraums von 30 Minuten) mit maximaler Leistung senden, sehr gering. Das Maximum der kumulierten Strahlung dieser Antennengruppe wird deutlich geringer sein als die Summe der Maxima, die von jeder einzelnen Antenne erzeugt werden.
- Die in Paragraph A2.2.2 beschriebene Methode zur Berechnung des Expositionsindex für den kumulativen Grenzwert berücksichtigt nicht die Variabilität der Exposition in Abhängigkeit vom Azimutwinkel. Die in Mobilfunknetzen verwendeten Richtantennen strahlen jedoch nur in einem begrenzten Bereich in der horizontalen Ebene. So werden mehrere Antennen so platziert, dass sie

Hinweis: Dieser Anhang darf nur mit Zustimmung des Instituts vervielfältigt werden, wenn nicht vollständig.

einen Bereich von 360° abdecken. Das Feld, das jede außerhalb ihres Sektors (oder der einzelnen Keulen beim *Beamforming*) erzeugt, ist daher schwächer oder sogar vernachlässigbar, insbesondere hinter der Antenne.

- Im Fernfeldbereich ist die Feldstärke umgekehrt proportional zur Entfernung. Unter der sicherheitsorientierten Annahme, dass eine ortsfeste Sendeantennenanlage für Mobilfunknetze in einem Abstand von 150 Metern von den Antennen eine maximale Exposition in Höhe des Anlagengrenzwertes verursacht, beträgt ihr Beitrag zum Expositionsindex bezüglich des kumulativen Grenzwertes in einem Abstand von 300 Metern von den Antennen 1/16. Dies deutet darauf hin, dass in einer Entfernung von mehr als 300 Metern von einer Antennenanlage ihr Beitrag im Hinblick auf die kumulative Grenze gering wird.

Zusammenfassend deuten die verschiedenen in diesem Abschnitt dargelegten Elemente darauf hin, dass der Ansatz, der bei der Bewertung der Einhaltung des Grenzwerts pro Anlage und des kumulativen Grenzwerts verfolgt wurde, insgesamt zu einer Überschätzung der Exposition führt. Eine solche Überschätzung ist akzeptabel, da sie wie eine Art Sicherheitsfaktor wirkt.