

Verkennde studie naar mogelijkheden tot
technische aanpassingen/optimalisatie draadloze
netwerken (gsm, umts, 4G, WiFi, ...) om humane
blootstelling aan elektromagnetische straling te
beperken

Referentie nr LNE/OL201100025/12088/M&G

Uitgeschreven door
**Vlaamse Overheid Departement Leefmilieu, Natuur en
Energie**
AFDELING LUCHT, HINDER, RISICOBEBEHEER, MILIEU &
GEZONDHEID

Auteurs

Ir. Margot Deruyck
Dr. ir. David Plets
Dr. ir. Günter Vermeeren
Dr. ir. Emmeric Tanghe
Prof. dr.ir. Wout Joseph
Prof. dr. ir. Luc Martens

Datum

November 2013

Referentie

iMinds-WiCa/LNE/
OL201100024/12031/M&G

Contents

Contents.....	2
1 Inleiding.....	5
2 Inventarisatie.....	5
2.1 Overzicht van draadloze technologieën, toepassingen en uitbouw van netwerken.....	5
2.1.1 Communicatienetwerken.....	12
2.1.1.1 Wireless Personal Network (WPAN).....	12
2.1.1.1.1 Bluetooth IEEE 802.15.1	12
2.1.1.1.2 IEEE 802.15.4.....	13
2.1.1.2 WLAN	13
2.1.1.2.1 IEEE 802.11b.....	13
2.1.1.2.2 IEEE 802.11a.....	14
2.1.1.2.3 IEEE 802.11g.....	14
2.1.1.2.4 IEEE 802.11n.....	14
2.1.1.2.5 IEEE 802.11ac	15
2.1.1.2.6 IEEE 802.11ad.....	15
2.1.1.3 WMAN	15
2.1.1.3.1 IEEE 802.16.....	15
2.1.1.3.2 IEEE 802.20.....	16
2.1.1.3.3 IEEE 802.22.....	16
2.1.1.4 WWAN.....	16
2.1.1.4.1 GSM	16
2.1.1.4.2 GPRS.....	17
2.1.1.4.3 EDGE	17
2.1.1.4.4 UMTS	17
2.1.1.4.5 HSPA.....	17
2.1.1.4.6 LTE	17
2.1.1.4.7 LTE-Advanced.....	18
2.1.1.4.8 5G	18
2.1.1.4.9 TETRA.....	19
2.1.1.4.10 DECT.....	19
2.1.2 Broadcasttechnologieën	19
2.1.2.1 DVB-T.....	19
2.1.2.2 DVB-H.....	20
2.1.2.3 DVB-T2.....	20
2.1.2.4 DVB-NGH.....	20
2.1.2.5 DAB	20

2.1.2.6	FM	20
2.2	Trends in mobilofoons en hun straling	20
2.2.1	Straling	20
2.2.2	Trends	21
2.3	Gebruikerstrends	22
2.4	Toekomstige netwerken en optimalisatie van bestaande en toekomstige netwerken	23
2.4.1	Nieuwe types netwerken	23
2.4.1.1	Cognitieve netwerken	23
2.4.1.2	Symbiotische netwerken	24
2.4.1.3	Smart grids en smart metering	24
2.4.1.4	Machine-tot-machine communicatie	24
2.4.2	Optimalisatie van bestaande netwerken	24
2.4.2.1	Optimalisatie van de positionering van basisstations	24
2.4.2.1.1	GRAND	25
2.4.2.1.2	WHIPP	25
2.4.2.2	Heterogene netwerken	25
2.4.2.3	Cell zooming/breathing	26
2.4.2.4	Sleep modes	26
2.4.2.5	Massive MIMO	26
2.5	Blootstellingsmaten en –normen en reductie van blootstellingsbelasting	26
2.5.1	Stralingsbelasting	26
2.5.2	Literatuuronderzoek blootstellingsmaten	27
2.5.2.1	Vermogendichtheid, elektrisch veld en magnetisch veld	27
2.5.2.2	Methoden om de blootstelling te bepalen	27
2.5.2.3	Blootstellingsverhoudingen	29
2.5.2.4	Specific Absorption Rate (SAR)	29
2.5.2.5	Dosis	31
2.5.3	Discussie 'nieuwe blootstellingsindex'	32
2.5.4	Technische aanpassingen aan basisstationnetwerken om de stralingsblootstelling van bevolking te reduceren	34
3	Kosten en baten	34
3.1	Veronderstellingen	34
3.2	Scenario's	39
3.3	Aanpak	40
3.3.1	Capaciteitsgebaseerde 3D planningstool voor ontwerpen en optimaliseren van draadloze toegangsnetwerken	40
3.3.2	Optimalisatie naar kost	41

3.3.3	Optimalisatie naar blootstelling.....	42
3.3.4	Performantie ontworpen netwerken	42
3.4	Resultaten.....	42
3.4.1	Spatiale blootstelling: gemiddeld E_{avg} en maximaal E_{max}	43
3.4.2	Verwachtingswaarde CapEx en verwachtingswaarde OpEx/jaar	46
3.4.3	Kosten versus blootstelling	48
3.5	Sensitiviteitsanalyse.....	50
3.5.1	Sensitiviteitsanalyse van PL_{max}	50
3.5.2	Sensitiviteitsanalyse van de kosten.....	51
4	Beleidsaanbevelingen	51
5	Besluit	52
6	English summary	53
	Referenties	54

1 Inleiding

Deze studie brengt de recente ontwikkelingen op gebied van draadloze telecommunicatie en de gevolgen van deze ontwikkeling op het gebied van stralingsbelasting in kaart. Daarnaast wordt er ook bekeken hoe nieuwe evoluties en technieken in staat zijn om de stralingsbelasting in een netwerk te reduceren.

In het eerste onderdeel wordt er een overzicht gegeven van de diverse huidige draadloze technologieën, welke evolutie er heeft plaatsgevonden op gebied van draadloze toestellen en hoe het gedrag van de gebruiker hierdoor al dan niet gewijzigd is. Er wordt ook besproken hoe toekomstige netwerken er zullen uitzien en wat voor invloed dit zal hebben op de stralingsbelasting. In het tweede deel bespreken we een kosten-baten analyse voor het aanpassen van bestaande netwerken met nieuwe technologieën of technieken om zo de stralingsbelasting te verminderen. In het derde en laatste deel zullen er ten slotte beleidsaanbevelingen geformuleerd worden.

2 Inventarisatie

In deze stap wordt eerst een overzicht gegeven van de verschillende draadloze technologieën, hun toepassingen en de uitbouw van netwerken, alsook de trends in mobilifoons en het gebruikersgedrag. Daarnaast wordt een overzicht gegeven over nieuwe technieken die gebruikt zullen worden in toekomstige netwerken en hoe bestaande netwerken geoptimaliseerd kunnen worden met behulp van dergelijke nieuwe technieken. Ten slotte wordt besproken wat de mogelijke stralingsbelasting en het aandeel in de totale stralingsbelasting van geoptimaliseerde en toekomstige technologieën en netwerken zal zijn.

2.1 Overzicht van draadloze technologieën, toepassingen en uitbouw van netwerken

In dit onderdeel wordt een inventarisatie gegeven van alle relevante beschikbare data rond de verscheidene draadloze technologieën, opgedeeld in communicatie (WPAN (Wireless Personal Area Network), WLAN (Wireless Local Area Network), WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), WWAN (Wireless Wide Area Network)) en broadcasting. Tabel 1 vat de verscheidene draadloze technologieën samen (bespreking verder). In de kolom 'blootstelling' staat bij sommige technologieën 'niet van toepassing'. Deze technologieën zijn recent ontworpen technologieën die nog niet in de praktijk worden ingezet. De aangegeven waarden voor de blootstelling zijn typische waarden teruggevonden in de literatuur. Bij elke waarde wordt de desbetreffende studie vermeld waarin alle informatie omtrent de omstandigheden waaronder deze waarde werd opgemeten kan teruggevonden worden.

Draadloze technologieën worden vastgelegd door een technische standaard. Een IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standaard bijvoorbeeld, wordt gevormd door een groep van mensen die een zogenaamde PAR (Project Authorization Request) indienen [1]. In het geval van mobile WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) bijvoorbeeld is dit PAR P802.16e. Wanneer deze PAR goedgekeurd wordt, kan er een nieuwe werkgroep gevormd worden (bv. 802.16) of een nieuwe task group binnen een werkgroep (bv. TGe) die dan de PAR P802.16e behandelt. Die nieuwe work- of taskgroup werkt een draft document uit dat een goedkeuringsproces moet ondergaan doorheen het IEEE en dan uiteindelijk een officieel nummer krijgt. Bijvoorbeeld het document van TGe werd dan uiteindelijk de standaard IEEE Std 802.16e-2005. Iedereen kan lid worden van bovenstaande groepen op voorwaarde dat hij of zij regelmatig de vergaderingen bijwoont. Die persoon krijgt dan meteen ook stemrecht. Meer informatie omtrent deze procedure voor bv. de WiMAX technologie, kan teruggevonden worden in [2].

De hierboven beschreven procedure betreft de technische standaard. Daarnaast heb je ook de zogenaamde commerciële standaarden. Hierbij gaat een organisatie typisch een beperkt aantal parameters uit de technische standaard selecteren waaraan je moet voldoen om op de apparatuur te vermelden dat het compatibel is met die commerciële standaard. Aan de volledige technische standaard voldoen – met al zijn parameters – is commercieel gezien onhaalbaar waardoor ook de productie van apparatuur uitermate duur zou worden. Een voorbeeld van dergelijke organisaties zijn de 'Wi-Fi alliance'

die WiFi apparatuur gebaseerd op de IEEE 802.11 standaarden en het 'WiMAX forum' die dit doet voor WiMAX gebaseerd op de IEEE 802.16 standaarden [3,4].

Naast de IEEE organisatie bestaan er ook andere standaardisatie-organisaties zoals 3GPP (3rd Generation Partnership Project) en ETSI (European Telecommunications Standards Institute) die onder andere GSM (Global System for Mobile communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HSPA (High Speed Packet Access) en LTE (Long Term Evolution) standaardiseren [5,6]. Elke organisatie heeft uiteraard zijn eigen procedures die gevolgd moet worden.

Technologie	Type	Frequentie	Toepassingen (ook in Vlaanderen)	Maximum theoretische fysische bit rate	Blootstelling
Bluetooth IEEE 802.15.1 [7]	Communicatie WPAN	2.4 GHz	* Connecteren van randapparatuur * Ondersteunen van ad-hoc netwerken * Bridgen van netwerken	24 Mbps	* Gemiddeld elektrisch veld = 0.3 V/m [8,9] * Worst case sterkte elektrisch veld = 1.0 Vm ⁻¹ [9,10]
IEEE 802.15.4 [11]	Communicatie WPAN	868 MHz 2.4 GHz	* Sensornetwerken: monitoren van bepaalde fysische parameters zoals bv. temperatuur, geluidsniveau, etc.	20 kbps (868 MHz) 250 kbps (2.4 GHz)	
WiFi IEEE 802.11b [12]	Communicatie WLAN	2.4 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen typisch laptops en tablets	11 Mbps	* Worst case sterkte elektrisch veld = 1.1 Vm ⁻¹ [10] * Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.03 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 1.1% [13]
WiFi IEEE 802.11a [15]	Communicatie WLAN	5 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen typisch laptops en tablets	54 Mbps	* Gemiddeld elektrisch veld = 0.16 V/m * Worst case sterkte elektrisch veld = 1.78 V/m
WiFi IEEE 802.11g [16]	Communicatie WLAN	2.4 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen typisch laptops en tablets	54 Mbps	* Gemiddelde en worst case sterkte elektrisch veld = 0.03 Vm ⁻¹ [8,10,13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 1.1% [13] * Maximale sterkte elektrische veld van

					intern netwerk = 3.2 Vm^{-1} [14].
WiFi IEEE 802.11n [17]	Communicatie WLAN	2.4 GHz 5 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen, typisch laptops en tablets	600 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.03 Vm^{-1} (2.4 GHz) [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 1.1% [13] * Gemiddeld elektrisch veld = 0.16 V/m (5 GHz) * Worst case sterkte elektrisch veld = 1.78 V/m (5 GHz) * Maximale sterkte elektrische veld van intern netwerk = 3.2 Vm^{-1} [14].
WiFi IEEE 802.11ac [18]	Communicatie WLAN	5 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen typisch laptops en tablets	7 Gbps	Niet van toepassing
WiFi IEEE 802.11ad [19]	Communicatie WLAN	2.4 GHz 5 GHz 60 GHz	* Draadloze toegang tot internet voor mobiele toestellen typisch laptops en tablets	7 Gbps	Niet van toepassing
Fixed WiMAX IEEE 802.16-2004 [20]	Communicatie WMAN	3.5 GHz	* Draadloze mobiele breedbandtoegang met vast en nomadische toegang	15 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.07 Vm^{-1} [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 0.2% [13]
Mobile WiMAX IEEE 802.16 ^e [21]	Communicatie WMAN	2.5 GHz	* Draadloze mobiele breedbandtoegang	75 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.07 Vm^{-1} [13]

					* Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 0.2% [13]
IEEE 802.20 [22]	Communicatie WMAN	Gelicentieerde banden onder 3.5 GHz	* Draadloze mobiele breedbandtoegang	80 Mbps	Niet van toepassing
IEEE 802.22 [23]	Communicatie WMAN	VHF/UHF banden	* Draadloze mobiele breedbandtoegang voor uitgestrekte, moeilijk bereikbare gebieden met een lage bevolkingsdichtheid	19 Mbps	Niet van toepassing
GSM (2G) [24]	Communicatie WWAN	900 MHz 1800 MHz	* Digitale mobiele telefonie	12.2 kbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.49 Vm^{-1} (900 MHz) = 0.24 Vm^{-1} (1800 MHz) [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 53.2% (900 MHz) = 15.1% (1800 MHz) [13]
GPRS [25]	Communicatie WWAN	900 MHz 1800 MHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	170 kbps	Zie GSM
EDGE/EGPRS [26]	Communicatie WWAN	900 MHz 1800 MHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	300 kbps	Zie GSM
UMTS (3G) [27]	Communicatie WWAN	900 MHz 2.1 GHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	3 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.16 Vm^{-1} [13] * Fractionele bijdrage tot het totale

					elektrische veld = 5.7% [13]
HSPA [28]	Communicatie WWAN	900 MHz 2.1 GHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	14 Mbps	* Zie UMTS
LTE (3.9G) [29,30]	Communicatie WWAN	800 MHz 1800 MHz 2.6 GHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	300 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.19 Vm^{-1} [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 0.4% [13]
LTE-Advanced (4G) [31]	Communicatie WWAN	800 MHz 1800 MHz 2.6 GHz	* Digitale mobiele telefonie * Zenden en ontvangen van mobiele data	1 Gbps	* Niet van toepassing
TETRA [32,33]	Communicatie WWAN	380-400	* Telefoon- en dataverkeer voor hulpdiensten	9.6-28.8 kbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.04 Vm^{-1} [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 0.5% [13]
DECT [34]	Communicatie WWAN	1.8-1.9 MHz	* Telefooncentrales binnen huis of bedrijf * Babyfoons	2 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.15 Vm^{-1} [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 11.3% [13] * Worst case elektrisch veld = 2.9 Vm^{-1} [8] * Worst case elektrisch veld in thuisomgeving = 0.47 Vm^{-1} [14]
DVB-T [35-37]	Broadcast	174-230 MHz 470-598 MHz	* Digitale terrestriële televisie	36.2 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld

		598-862 MHz			= 0.09 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 4.7% [13]
DVB-H [38-41]	Broadcast	174-230 MHz 470-598 MHz 598-862 MHz	* Broadcasttoegang aan hoge snelheid voor mobiele terminals (GSMs of draagbare toestellen in zakformaat)	36.2 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.09 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 4.7% [13]
DVB-T2 [42-45]	Broadcast	174-230 MHz 470-598 MHz 598-862 MHz	* Broadcast van HDTV	50.3 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.09 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 4.7% [13]
DVB-NGH [46]	Broadcast	174-230 MHz 470-598 MHz 598-862 MHz	* Broadcasttoegang aan hoge snelheid voor mobiele terminals (GSMs of draagbare toestellen in zakformaat)		Niet van toepassing
DAB [47]	Broadcast	174-230 MHz 1452-1492 MHz	* Digitale radio broadcast	2.4 Mbps	* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.04 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 0.1% [13]
FM	Broadcast	87.5-108 MHz	* Broadcast van radio-uitzendingen		* Gemiddelde sterkte elektrisch veld = 0.15 Vm ⁻¹ [13] * Fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld = 7.6% [13]

Tabel 1 Samenvatting van de draadloze technologieën

2.1.1 Communicatienetwerken

Communicatienetwerken of ook wel WANS (Wide Area Network) genoemd zorgen voor dekking in een groot gebied. Ze worden meestal opgedeeld naargelang de grootte van het gebied (zie ook Tabel 1).

2.1.1.1 Wireless Personal Network (WPAN)

WPAN staat voor Wireless Personal Network en heeft typisch een bereik van enkele centimeters tot enkele meters.

2.1.1.1.1 Bluetooth IEEE 802.15.1

De IEEE 802.15.1 standaard is beter bekend onder de naam Bluetooth [7]. Het doel van deze technologie is om met een eenvoudige chip die tegen lage kost is vervaardigd een draadloos netwerk op te zetten. Typische scenarios zijn de connectie van randapparatuur zoals toetsenborden, muizen, headsets, oortjes voor mobiele telefoons etc., de ondersteuning van ad-hoc netwerken (i.e., netwerken van mobiele apparaten waarbij het netwerk geen vaste structuur heeft maar zichzelf organiseert) en het zogenaamd bridgen van netwerken (dat toelaat dat twee of meerdere netwerken een nieuw geaggregeerd netwerk creëren).

Bluetooth maakt gebruik van FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) waarbij het informatiesignaal verspringt van de ene naar de andere frequentie over een brede band om interferentie tegen te gaan [48]. De volgorde waarin het signaal verspringt is gekend door zowel zender en ontvanger en noemt men de hopping sequence. Binnen Bluetooth zijn 79 kanalen gedefinieerd met elk een bandbreedte van 1 MHz. De ruimte tussen twee carriers bedraagt ook steeds 1 MHz.

De Bluetooth transceivers maken gebruik van Gaussian FSK (Frequency Shift Keying) als techniek om het digitaal signaal om te zetten naar een analoog signaal. Ze worden opgedeeld in drie verschillende klassen naargelang de beoogde afstand zoals aangegeven in onderstaande tabel.

Klasse	Afstand	Maximum vermogen	Minimum vermogen	Nominaal vermogen	Vermogen controle
Power class I	Lang (tot ± 100 m)	100 mW	1 mW	n.v.t.	Verplicht
Power class II	Normaal (tot ± 10 m)	2.5 mW	0.25 mW	1 mW	Optioneel
Power class III	Kort (10 cm tot 1 m)	1 mW	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

(n.v.t. = niet van toepassing)

Tabel 2 Bluetooth transceiver klassen [48]

Er bestaan reeds 4 versies van de Bluetooth standaard. Versie 1 laat fysische data rates tot maximum 1 Mbps toe. In versie 2.1 wordt deze data rate verhoogd tot 2 Mbps en is er ook een verbeterde spraakkwaliteit en audio-overdracht. Versie 2.0 dateert van 2004 en laat een 3 keer zo hoge data rate toe ondanks een verlaagd stroomverbruik en een verbeterde foutcorrectie en een verbeterde mogelijkheid om te verbinden met meerdere apparaten. De data rate werd in 2009 nog eens verhoogd met de komst van versie 3.0 + HS (High Speed) tot 24 Mbps. Hierbij wordt de data echter niet verzonden over een Bluetooth link maar over een WiFi link. De Bluetooth link wordt enkel gebruikt voor het opzetten van de verbinding. De laatste versie, versie 2004, geïntroduceerd in 2010 focust op energiezuinigheid. Het bevat drie verschillende protocols: classic Bluetooth (omvat de reeds bestaande Bluetooth protocols uit de vorige versies), Bluetooth High Speed (gebaseerd op WiFi zoals bij versie 3.0) en Bluetooth Low Energy (BLE). Deze laatste focust op een laag energieverbruik en een korte opzettijd van connecties voor apparaten met een kort bereik (tot 50 m).

Bluetooth maakt gebruik van de 2.4 GHz band.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door Bluetooth bedraagt typisch 0.3 Vm^{-1} voor afstanden lager dan 30 cm [8,9]. In een worst case scenario veroorzaakt Bluetooth een elektrisch veld van 1 Vm^{-1} op een afstand van 100 cm [9,10] (zie Tabel 1).

Typische radio chips voor Bluetooth zijn: Broadcom BCM2048 en BCM2049, MFDLY electronics RF-0417C, STMicroelectronics STM32W108HB, STM32W108CC, STM32W108CB en STM32W108CZ, Flexipanel LinkMatik 2.0 en Atheros AR3001 [49-53].

2.1.1.1.2 IEEE 802.15.4

Een netwerk bestaat typisch uit een aantal 'lagen'. Elke laag voegt functionaliteit toe aan de vorige laag. Dit wordt het OSI (Open Systems Interconnect) model genoemd. In totaal zijn er zeven lagen: de fysische laag (beschrijft de elektrische en mechanische karakteristieken van het medium), de datalink of MAC (Medium Access Control) laag (verantwoordelijk voor het betrouwbaar verzenden van de data), de netwerklaag (verantwoordelijk voor het verzenden van de data, foutafhandeling en routing), de transportlaag (verantwoordelijk voor het probleemloze transport van data voor de applicaties, typische protocollen die hier worden gebruikt zijn TCP (Transmission Control Protocol) en UDP (User Datagram Protocol)), de sessielaag (verantwoordelijk voor het opstarten, onderhouden en beëindigen van sessies tussen applicaties), de presentatielaag (verantwoordelijk voor de formattering en structurering van data zodat deze lees- of interpreteerbaar is) en de applicatielaag (wat overeenkomt met de eigenlijk applicatie of toepassing gebruikt door de gebruiker). De IEEE 802.15.4 standaard specificeert enkel de MAC en de fysische laag [11]. Voor de hogere lagen is de Zigbee standaard de meest gekende. Zigbee maakt geen deel uit van de IEEE 802.15.4 standaard.

De IEEE 802.15.4 standaard vindt men typisch terug in sensor netwerken. Een sensor meet een bepaalde fysieke grootheid en converteert het in een signaal dat gelezen kan worden door een waarnemer of een instrument. De standaard wordt gekenmerkt door een lage complexiteit, een lage data rate en een zeer laag vermogenverbruik. Het typische bereik bedraagt dan ook maar ongeveer 50 m. Het gebruikt DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) waarbij de benodigde bandbreedte voor het verzenden van het signaal bewust wordt 'gespreid' in het frequentiedomein wat resulteert in een signaal met een bredere bandbreedte [48].

In Europa werkt de IEEE 802.15.4 standaard in de 868 MHz band en de 2.4 GHz band [48]. In de 868 MHz band is er slechts één kanaal beschikbaar met een data rate beperkt tot 20 kbps. Het voordeel van deze lage frequentieband zijn de betere condities voor propagatie. In de 2.4 GHz band zijn er 16 kanalen beschikbaar met een bandbreedte van 5 MHz en een data rate van 250 kbps per kanaal.

In de 802.15.4-2006 uitbreiding werd de data rate van 20 kbps opgetrokken tot 250 kbps door nieuwe modulatie technieken te introduceren [54]. Naast deze uitbreiding, werden recentelijk ook de 802.15.4-2007 en 802.15.4d-2009 uitbreidingen gedefinieerd, maar deze focussen hoofdzakelijk op nieuwe frequenties voor Azië [55,56].

De E.I.R.P (Equivalent Isotropically Radiated Power) geeft het uitgestraalde vermogen in de hoofdstraalrichting ten opzichte van een isotrope antenne (i.e., een antenne die gelijk vermogen in alle richtingen uitzendt) weer. Het wordt berekend door de som te nemen van het vermogen gevoed aan de antenne en de gain van de antenne verminderd met mogelijke verliezen die kunnen optreden. De E.I.R.P voor 802.15.4 transceivers bedraagt typisch 1mW [57].

Typische radio chipsets zijn: Texas Instruments CC1100, CC2420 en CC2520, Atmel AT86RF210, AT86RF212, AT86RF231-ZU en AT86RF231-ZF, Amber Wireless AMB8423 en Moteiv Corporation Tmote Sky [57-64].

2.1.1.2 WLAN

WLAN of Wireless Local Area Network zijn typisch beperkt in hun bereik tot gebouwen, een campus, etc. en worden vaak ingezet om bijvoorbeeld de bekabeling in kantoren te beperken. Daarnaast wordt WiFi ook ingezet voor de zogenaamde hotspots. Een hotspot kan zowel binnenshuis of buitenshuis geplaatst worden en voorziet een bepaald gebied van een WiFi signaal waardoor de gebruiker met zijn smartphone, tablet of laptop online kan. Een hotspot kan vaak teruggevonden worden op openbare plaatsen zoals stations, luchthavens, maar ook in restaurants of hotels. Deze hotspots worden vaak uitgebaat door providers van internet of mobiele telefonie, maar recentelijk kan ook de router bij de gebruiker thuis, de zogenaamde homespot, opgesteld worden voor andere gebruikers.

2.1.1.2.1 IEEE 802.11b

De 802.11b standaard was een zeer populair standaard en is wellicht de standaard waarmee WiFi populair is geworden [12]. Dit heeft het te danken aan het feit dat de focus op point-to-multipoint verbindingen lag waardoor bijvoorbeeld verschillende laptops tegelijkertijd draadloos toegang hadden tot

het internet via een WiFi toegangspunt. Voor de toegang van verschillende gebruikers wordt hier gebruik gemaakt van DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum), waardoor de fysische data rate beperkt was tot maximaal 11 Mbps. Er zijn 14 kanalen gedefinieerd waarvan er 13 gebruikt kunnen worden in Europa. Elk van deze kanalen heeft een bandbreedte van 22 MHz en er zijn in totaal 3 niet-overlappende kanalen aanwezig. Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door WiFi bedraagt 0.03 Vm^{-1} , wat overeenkomt met 1.1% van het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen volgens [13] (zie ook Tabel 1). In een worst-case scenario veroorzaakt 802.11b een elektrisch veld van 1.1 Vm^{-1} op een afstand van 100 cm [10]. De 802.11b standaard maakt gebruik van de 2.4 GHz band. De E.I.R.P. is beperkt tot 100 mW [65].

Typische radio chipsets zijn: Microchip MRF 24WB0MA/MRF24WB0MB en ZG2100M/ZG2101M [66,67].

2.1.1.2.2 IEEE 802.11a

Hoewel de 802.11a standaard gedefinieerd werd voor de 802.11b standaard, werd deze toch pas onder het brede publiek bekend na de introductie van de 802.11b standaard [15]. Deze standaard was beduidend minder populair dan de 802.11b standaard, hoewel hij fysische data rates tot maximaal 54 Mbps ondersteunt. Dit komt doordat 802.11a gebruik maakt van OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) als techniek om meerdere gebruikers tot het medium toe te laten. Bij OFDM worden de gebruikers opgedeeld in het frequentiedomein.

De 802.11a standaard maakt gebruik van de 5 GHz band. Er zijn 12 niet-overlappende kanalen aanwezig met elk een kanaalbandbreedte van 16.6 MHz. ETSI (European Telecommunications Standards Institute) definieert twee frequentiebanden voor Europa (5.15-5.35 GHz en 5.47-5.725 GHz) en vereist daarnaast ook twee mechanismen, namelijk DFS (Dynamic Frequency Selection) en TPC (Transmission Power Control). Bij DFS zal het WiFi access point automatisch een frequentiekanaal kiezen met de laagste interferentie. TPC is een techniek waarbij men het vermogen gaat aanpassen naargelang de ondervonden interferentie. Op deze manier probeert men onnodige interferentie in het netwerk tegen te gaan. De maximale E.I.R.P. voor de lage frequentieband (die binnenshuis gebruikt wordt) bedraagt 200 mW, terwijl de maximale E.I.R.P. voor de hogere frequentieband (die zowel binnenshuis als buitenshuis gebruikt wordt) 1 W bedraagt [68]. DFS en TPC zijn echter niet verplicht zolang de E.I.R.P. onder de 50 mW blijft en de 5.15-5.25 GHz band gebruikt wordt.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door IEEE 802.11a bedraagt 0.16 V/m . In een worst-case scenario bedraagt dit elektrische veld 1.78 V/m .

2.1.1.2.3 IEEE 802.11g

De 802.11g standaard is eigenlijk een uitbreiding van de 802.11b standaard [16]. Deze standaard voegt 802.11a functionaliteiten toe aan 802.11b zoals bijvoorbeeld de OFDM techniek (in plaats van DSSS) en nieuwe modulatieschema's zodat ook in de 2.4 GHz band een maximale fysische data rate van 54 Mbps kan bekomen worden. Net zoals bij de 802.11b standaard, beschikt 802.11g over 3 niet-overlappende kanalen met elk een bandbreedte van 22 MHz. Ook de E.I.R.P. is opnieuw beperkt tot 100 mW. Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door WiFi bedraagt 0.03 Vm^{-1} , wat overeenkomt met 1.1% van het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen [8,13]. Dit is eveneens de worst case scenario wat het elektrische veld betreft op 100 cm [10]. Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door het interne WiFi netwerk bedraagt maximaal 3.2 Vm^{-1} [14].

Typische radio chipsets zijn: RFS Solutions W5100 WiFLEX, Libertas 88W8010, 88W8310, 88W8000G en 88W8510, Maxim MAX2831, MAX2832, MAX2828 en MAX2829 en Broadcom BCM4326 en BCM4328 [69-75]. Merk ook op dat een groot deel van deze chipsets ook de 802.11a en de 802.11b standaard ondersteunen.

2.1.1.2.4 IEEE 802.11n

In de 802.11n standaard werd heel wat nieuwe functionaliteit toegevoegd [17]. Eén van de belangrijkste toevoegingen was de ondersteuning voor MIMO (Multiple Input Multiple Output) [76]. MIMO betekent dat er gebruik gemaakt wordt van meerdere zend- en ontvangstantennes voor het zenden en ontvangen van data. De vorige WiFi standaarden lieten enkel toe om één antenne te gebruiken aan de ontvangstzijde en één antenne aan de zendszijde. De 802.11n daarentegen biedt ondersteuning om tot maximaal 4 zend- en 4 ontvangstantennes (i.e., 4x4 MIMO) te gebruiken.

Daarnaast werd de bandbreedte opgetrokken tot 40 MHz. In de vorige standaarden kon er enkel gebruik gemaakt worden van een kanaalbandbreedte van 20 MHz. In de 802.11n standaard wordt zowel 20 MHz als 40 MHz ondersteund.

Met het toevoegen van de hierboven besproken functionaliteiten is het ook mogelijk om aanzienlijk hogere data rates te bekomen. Met de 802.11n standaard kan een fysische data rate van maximaal 600 Mbps bereikt worden.

Tot slot laat de 802.11n standaard ook toe om zowel de 2.4 GHz band als de 5 GHz te gebruiken. De vorige standaarden beperkten zich steeds maar tot 1 frequentieband (2.4 GHz voor 802.11b/g en 5 GHz voor 802.11n). Uiteraard is de regelgeving omtrent E.I.R.P. hier ook van toepassing. Voor de 2.4 GHz band geldt dezelfde beperking als besproken voor 802.11b en voor de 5 GHz band zoals besproken voor 802.11a. De gemiddelde sterkte van het elektrisch veld veroorzaakt door IEEE 802.11n bij 2.4 GHz bedraagt 0.03 Vm^{-1} wat overeenkomt met een fractionele bijdrage tot het totale elektrische veld van 1.1% [13]. Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door IEEE 802.11n bij 5 GHz bedraagt 0.16 Vm^{-1} , terwijl dit in een worst case scenario kan oplopen tot 1.78 Vm^{-1} . Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door het interne WiFi netwerk bedraagt maximaal 3.2 Vm^{-1} [14].

Typische radio chipsets zijn: Realtek RTL8256, Broadcom BCM4322, EnGenius EMP-9602, Redpine Signals RS9110-N-11-02, RS9110-N-11-03 en RS9116, Ralink RT2700 en Airgo AGN400 [77-84].

2.1.1.2.5 IEEE 802.11ac

De belangrijkste uitbreiding in de IEEE 802.11ac is de ondersteuning voor MU-MIMO (Multiple User-MIMO) [18]. In de IEEE 802.11n standaard werd ook al ondersteuning aangeboden voor MIMO, maar dit beperkte zich tot SU-MIMO (Single User-MIMO). Hierbij worden de streams die gecreëerd worden door gebruik te maken van verschillende antennes verzonden naar één terminal om zo een betere communicatie of een hogere bit rate te bekomen. Bij MU-MIMO kunnen deze streams toegewezen worden aan verschillende onafhankelijke terminals. Hierdoor kunnen tot 4 gebruikers tegelijkertijd bediend worden.

Daarnaast worden ook hogere kanaalbandbreedtes ondersteund in de IEEE 802.11ac standaard. Naast 20 MHz en 40 MHz ondersteunt IEEE 802.11ac ook 80 MHz en 160 MHz. Deze hogere kanaalbandbreedtes in combinatie met nog nieuwe modulatieschema's om het digitaal signaal om te zetten in een analoog signaal laten hogere data rates toe. De fysische data rate bedraagt hier maximaal 7 Gbps.

De 802.11ac standaard maakt enkel gebruik van de 5 GHz frequentieband. Dezelfde beperkingen voor de E.I.R.P. als besproken in 802.11a zijn dus van toepassing.

Typische radio chipsets zijn: Broadcom BCM4360 en BCM43526 en Marvell Avastar 88W8897 [85-87].

2.1.1.2.6 IEEE 802.11ad

De grootste vernieuwing in de 802.11ad standaard is dat naast de 2.4 GHz en de 5 GHz frequentieband, ook de 60 GHz band zal gebruikt worden [19]. Hierdoor kunnen er opnieuw hogere data rates bekomen worden. De maximale fysische data rate zou 7 Gbps bedragen. The Wireless Gigabit Alliance (WiGig) promoot de adoptie van multi-gigabit draadloze communicatie technologie in de 60 GHz band [88].

De 802.11ad standaard is een zeer recente standaard. De release dateert slechts van December 2012. Een concurrerende standaard is WirelessHD [89], een industriegedreven specificatie voor draadloze HD transmissie voor consumentenelektronica.

Typische radio chipsets zijn: Hittite HMC6000 en HMC6001, Wilocity Wil6100 en Wilocity Wil6200 en Qualcomm Atheros R9004TB [90-94].

2.1.1.3 WMAN

Met WMANs (Wireless Metropolitan Area Network) worden typisch gebieden ter grootte van een stad gedekt.

2.1.1.3.1 IEEE 802.16

De op de IEEE 802.16 standaard gebaseerde draadloze technologie voor breedband communicatie is wellicht beter bekend onder de naam WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [20,21]. De karakteristieken van de technologie en de product certificatie is gespecificeerd door het WiMAX forum om interoperabiliteit tussen de verschillende fabrikanten te ondersteunen.

Twee belangrijke profielen kunnen onderscheid worden: IEEE 802.16-2004, beter bekend als fixed WiMAX [20] en IEEE 802.16e ofwel mobile WiMAX [21].

Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door WiMAX bedraagt 0.07 Vm^{-1} , wat overeenkomt met 0.2% van het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen [13] (Tabel 1).

De IEEE 802.16-2004 standaard, ook gekend als fixed WiMAX, biedt ondersteuning voor de zogenaamde vaste en nomadische toegang [20]. Dit betekent dat de zender en de ontvanger zich op een vaste positie bevinden gedurende de communicatie waardoor fixed WiMAX een goed alternatief biedt voor vaste bedrade netwerken.

Fixed WiMAX maakt gebruik van de 3.5 GHz band in België en belooft theoretische peak data rates tot 15 Mbps in de downlink. De kanaalbandbreedte bedraagt 3.5 MHz. Het ingangsvermogen van de antenne mag niet meer bedragen dan 35 dBm, wat overeenkomt met ongeveer 3.16 W [95].

Typische radio chipsets voor fixed WiMAX zijn: Atmel AT86RF535A en Maxim MAX2837 [96,97].

In de IEEE 802.16e interface ofwel, is ondersteuning voor mobiliteit toegevoegd waardoor gebruikers ook kunnen communiceren wanneer ze in beweging zijn [21]. De belangrijkste wijziging ten opzichte van fixed WiMAX is dat mobile WiMAX gebruik maakt van SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access) als techniek om meerdere gebruikers tegelijkertijd tot het medium toe te laten, terwijl fixed WiMAX gebruik maakt van OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [98]. Het verschil tussen beiden technieken dat SOFDMA schaalbaar is. Dit betekent dat mobile WiMAX kan kiezen uit een reeks bandbreedtes naargelang de kwaliteit van het kanaal. De beschikbare bandbreedtes zijn: 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz en 20 MHz. Hierdoor kan een maximale bit rate van 75 Mbps in de downlink bekomen worden.

Daarnaast zijn ook verbeteringen aangebracht aan de ondersteuning voor MIMO, het vermogen management zodat mobiele toestellen langer kunnen werken op hun batterij en er is ook ondersteuning voor handovers tussen verschillende basisstations toegevoegd.

Mobile WiMAX maakt gebruik van de 2.5 GHz band in België.

Typische radio chipsets voor mobile WiMAX zijn: Maxim MAX2837, GCT semiconductor GDM7205 en GDM7213, Seasolve Mobile WiMAX PHY IP Core en Texas Instruments TRF1x/2x RF chipsets [97,99-102].

2.1.1.3.2 IEEE 802.20

IEEE 802.20 is een standaard voor mobiele breedbandtoegang. IEEE publiceerde de standaard in 2008. Sindsdien werd de standaard niet verder meer ontwikkeld [22]. De standaard is bedoeld voor gelicentieerde frequentiebanden onder 3.5 GHz en haalt datasnelheden van 80 Mbps. Het doel van deze standaard is in vele opzichten gelijkaardig aan dat van de IEEE 802.16e standaard (mobile WiMAX).

2.1.1.3.3 IEEE 802.22

IEEE 802.22 is een standaard voor mobiele breedbandtoegang voor uitgestrekte, moeilijk te bereiken gebieden met lage bevolkingsdichtheden (typisch rurale gebieden) [23]. Typerend aan de standaard is dat ze gebruik maakt van "cognitive radio" technieken om opportunistisch gebruik te maken van ongebruikt spectrum in banden oorspronkelijk toegewezen aan TV uitzendingen VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) banden, de VHF band komt overeen met frequenties van 30 MHz tot 300 MHz en de UHF band met frequenties van 300 MHz tot 3 GHz). De standaard gebruikt OFDMA om flexibel van frequentiekanaal te veranderen om zo interferentie met deze TV uitzendingen te vermijden.

2.1.1.4 WWAN

De WWANs (Wireless Wide Area Network) zorgen voor de dekkingen van hele grote gebieden en zijn dan ook de grootste netwerken in dit overzicht.

2.1.1.4.1 GSM

GSM staat voor Global System for Mobile Communications en is ook bekend als 2G (2nd Generation) telefonie. Het werd ontwikkeld door ETSI (European Telecommunications Standards Institute). GSM is de eerste technologie die digitale mobiele telefonie toeliet [24]. De grote verbeteringen ten opzichte van analoge mobiele netwerken zijn de hogere geluidskwaliteit en de constante bereikbaarheid.

In Europa werkt GSM op twee verschillende frequenties, nl. 900 MHz en 1800 MHz. Bij 900 MHz beschikt GSM over 124 kanalen, terwijl bij 1800 MHz 374 kanalen beschikbaar zijn. In beide gevallen hebben de kanalen elk een bandbreedte van 200 kHz. De maximum data rate is beperkt tot 12.2 kbps.

Er werd daarnaast ook een GSM systeem geïntroduceerd voor het Europees spoorwegensysteem genaamd GSM-R (GSM-Rail). GSM-R werkt niet alleen op aparte (en dus andere) frequenties. Het heeft ook toegang tot een aantal extra services die niet beschikbaar zijn in het publieke GSM zoals bijvoorbeeld

noodoproepen met ontvangstbewijs, een spraak broadcast service, zeer korte opzettijd voor gesprekken, etc.

Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door GSM bedraagt 0.49 Vm^{-1} bij 900 MHz en 0.24 Vm^{-1} bij 1800 MHz wat overeenkomt met een bijdrage van 53.2% bij 900 MHz, respectievelijk 15.1% bij 1800 MHz tot het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen [13].

Typische radio chipsets voor GSM zijn: Hitachi HD155121F en Silicon Laboratories Si4210-GM [103,104].

2.1.1.4.2 GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) is een uitbreiding op GSM en wordt gedefinieerd in Release 97 [25]. Het netwerk is niet langer een circuit switched netwerk zoals het geval was bij GSM, maar een packet switched netwerk. Hierdoor werden een aantal nieuwe services mogelijk gemaakt zoals bijvoorbeeld internet browsing, WAP (Wireless Access Protocol) dat web-diensten mogelijk maakt op mobiele telefonen, SMS (Short Messaging Service) waardoor kleine berichten tussen mobiele telefonen kunnen verzonden en ontvangen worden en MMS (Multimedia Messaging Service) wat een opvolger is van SMS en toelaat om naast tekst ook een afbeelding of een stukje video te verzenden.

GPRS laat ook hogere data rates toe. Een data rate van 170 kbps is hierbij mogelijk.

Dezelfde frequenties en kanaalbandbreedtes als voor GSM worden gebruikt voor GPRS.

Typische radio chipsets voor GPRS zijn: Texas Instruments TCS family of advanced GSM/GPRS chipset solutions, Spreadtrum SC6531, SC6620, SC6800h, SC6530, Silicon Laboratories Aero/Aero+/Aero II GSM/GPRS transceiver chipsets en Analog Devices AD6548 Othello-G complete GSM/GPRS transceiver [105-112]. Merk op dat deze chipsets in de meeste gevallen ook GSM ondersteunen.

2.1.1.4.3 EDGE

EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), soms ook aangeduid als EGPRS (Enhanced GPRS), is op zijn beurt een uitbreiding van GPRS [26]. Het belangrijkste verschil is het toevoegen van een extra modulatieschema, 8PSK (Eight Phase Shift Keying), dat toelaat om de binaire bitstream om te vormen naar een analoog signaal [48]. Dankzij dit extra modulatieschema kunnen er hogere data rates bekomen worden dan met GPRS. De gemiddelde downlink data rate in commerciële EDGE netwerken is 300 kbps. Net zoals bij GPRS, maakt EDGE gebruik van dezelfde frequenties en kanaalbandbreedtes als GSM.

Typische radio chipsets voor EDGE zijn: Spreadtrum SC6810 en SC6820, Analog Devices AD6546 en Infineon PMB6952 [113-116].

2.1.1.4.4 UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) is de opvolger van GSM en GPRS en is ontworpen door ETSI [27,98]. De technologie is ook beter bekend als 3G (3rd Generation). UMTS werd gespecificeerd als een oplossing die zowel mobiele telefonie als data verkeer toelaat. Het biedt de mobiele operatoren voldoende capaciteit en breedband mogelijkheden aan om zowel telefonie als data gebruikers te bedienen, vooral in stedelijke gebieden.

UMTS maakt gebruik van de 900 MHz en 2.1 GHz band en biedt een maximum bit rate van 3 Mbps in de downlink aan. De kanaalbandbreedte bedraagt 5 MHz.

Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door UMTS bedraagt 0.16 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 5.7% tot het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen [13].

Typische radio chipsets voor UMTS zijn: Infineon PMB5699 en PMB5701, Freescale semiconductor RFX300-30 en RFX300-40 en Texas Instruments TCS4105 [117-121].

2.1.1.4.5 HSPA

HSPA (High Speed Packet Access) is op zijn beurt de opvolger van UMTS [98,28]. Het belooft hogere data rates, een hogere throughput in de cel en voor de gebruiker en een verlaagde vertragingstijd gedurende de transmissie.

Net als UMTS werkt HSPA ook in de 900 MHz en 2.1 GHz band en beschikt over een bandbreedte van 5 MHz. De maximum bit rate in de downlink is echter wel verhoogd tot 14 Mbps.

Typische radio chipsets voor HSPA zijn: Fujitsu MB86L01A, Skyworks SKY74210, Analog Devices ADF4602, Spreadtrum SC8802g, SC8801g, SC8800g, SC8805g en SC8810, Lime microsystems LMS6002D en Infineon PMB5701 [122,131].

2.1.1.4.6 LTE

De nieuwste technologie is LTE (Long Term Evolution) en wordt vaak commercieel aangeduid als 4G (4th Generation) technologie, hoewel het eigenlijk 3.9G is. LTE-Advanced, de opvolger van LTE, is 4G. De technologie is gestandaardiseerd door 3GPP (3rd Generation Partnership Project). De voorbije jaren werden verschillende releases van deze technologie gedefinieerd. Release 8 en 9 zijn beter bekend als LTE, terwijl Release 10 bekend staat als LTE-Advanced [29,30,31]. Deze laatste release wordt in detail besproken in de volgende sectie, in deze sectie bespreken we enkel Release 8 en 9.

Net zoals mobile WiMAX, maakt LTE gebruik van OFDMA zodat modulatie schema, coding rate en bandbreedte kunnen gewijzigd worden naargelang de kwaliteit van het kanaal [136]. Er zijn vijf mogelijke bandbreedtes gedefinieerd in LTE: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz en 20 MHz. Hierdoor zou het mogelijk zijn om peak data rates van 10 Mbps tot 300 Mbps te bereiken in de downlink.

LTE maakt gebruik van de 1.8 MHz en de 2.6 GHz band. In de toekomst zal LTE ook de 800 MHz band gebruiken. Dit is momenteel al het geval in Scandinavië. In Finland is LTE momenteel ook al uitgerold op 700 MHz. In België is er een commerciële uitrol bij 1800 MHz sinds 2012.

Het gemiddelde elektrisch veld veroorzaakt door LTE bedraagt 0.19 Vm^{-1} , wat overeenkomt met een bijdrage van 0.4% tot het totale elektrische veld van RF signalen [13]. De hier vermelde bijdrage van LTE aan het totale veld is beperkt door deze technologie pas in 2012 in Vlaanderen werd aangeboden waardoor de hoeveelheid beschikbare meetdata beperkt is.

Typische radio chipsets zijn: Spreadtrum SC9610, GCT semiconductor GDM7240, Maxim MAX2837 en Infineon SMARTi LTE Transceiver IC [132-135].

2.1.1.4.7 LTE-Advanced

Zoals aangegeven in de vorige sectie, is LTE Release 10 beter bekend als LTE-Advanced [31]. Merk hierbij op dat LTE en LTE-Advanced eigenlijk dezelfde technologie is en LTE-Advanced dus compatibel is met LTE. Dit betekent dat LTE-Advanced apparatuur kan communiceren met LTE apparatuur en omgekeerd, alleen zal LTE apparatuur niet gebruik kunnen maken van functionaliteiten die gedefinieerd zijn in LTE-Advanced. De vier belangrijkste functionaliteiten toegevoegd aan LTE-Advanced zullen hier in detail besproken worden [136,137].

De eerste functionaliteit is *carrier aggregation* (CA). Dit is een techniek die toelaat om een bandbreedte tot 100 MHz te gebruiken voor transmissie door verschillende zogenaamde *component carriers* te verzenden naar één bepaald toestel. Deze component carriers bevatten naast controle data ook de data die verzonden worden door of naar het toestel. Elk van deze component carriers kan een bandbreedte van 1 tot 20 MHz hebben en men kan maximaal vijf component carriers (niet noodzakelijk allemaal met dezelfde bandbreedte) naar één apparaat verzenden. Hierdoor kunnen uiteraard hogere data rates bekomen worden.

Een tweede functionaliteit is een betere ondersteuning voor *heterogene netwerken*. In heterogene netwerken gaat men verschillende types van basisstations (zoals bijvoorbeeld macrocel, microcel, femtocel, etc.) laten samenwerken in een netwerk. LTE gebaseerde heterogene netwerken bestaan typisch uit twee lagen met macrocel (eNodeB) en femtocel (home-eNodeB) basisstations. Hoewel dit reeds ondersteund werd in LTE Release 8/9, introduceert LTE-Advanced een betere interferentie management tussen de verschillende cellen in het netwerk.

Daarnaast biedt LTE-Advanced ook een *uitgebreidere support voor MIMO* aan. Hierbij is het mogelijk om een systeem met maximaal 8 zenderantennes en 8 ontvangerantennes (i.e., 8x8 MIMO) te gebruiken.

Tot slot werd met LTE-Advanced ook de ondersteuning voor *relaying* geïntroduceerd. Relaying betekent dat een terminal met het netwerk communiceert via een *relay node* in plaats van rechtstreeks met het basisstation. Deze relay node is eigenlijk een klein basisstation op zich dat draadloos verbonden is met het basisstation. Het grote voordeel van een dergelijke node is dat het de dekking op moeilijk bereikbare plaatsen (zoals bijvoorbeeld binnenshuis) kan verbeteren. Voor de terminal lijkt het alsof er rechtstreeks met het basisstation communiceert.

2.1.1.4.8 5G

Wanneer er over 5G (5th Generation) wordt gesproken, bedoelt men technologieën of standaarden na 4G en dus de toekomstige standaarden gaat aanduiden. Momenteel echter wordt er met 5G nog geen specifieke standaard aangegeven. Het is een term die vaak gebruikt wordt in onderzoeksliteratuur. Samsung vermeldde op 14 mei 2013 dat ze de eerste transceiver hebben ontworpen die werkt in het

millimetre-wave (MMW) spectrum [138]. Dit spectrum werkt bij zeer hoge frequenties, typisch 30 GHz en hoger. Deze ontwikkeling is een eerste stap om 5G technologie in de toekomst mogelijk te maken.

2.1.1.4.9 TETRA

TETRA staat voor Terrestrial Trunked Radio. Trunked radio systemen beschikken over verschillende carriers waarbij een specifieke carrier slechts voor een korte periode wordt toegewezen aan een bepaalde gebruiker. ETSI standaardiseerde het TETRA systeem zodat er een gemeenschappelijk systeem in Europa kon gebruikt worden [32,33]. De twee belangrijkste services gedefinieerd binnen TETRA zijn een Voice+Data (V+D) service en een packet data optimized (PDO) service. Daarnaast zijn er nog enkele andere services die een data rate van maximaal 28.8 kbps voor onbeveiligde transmissie en 9.6 kbps voor beveiligde transmissie toelaten.

TETRA maakt gebruik van vier kanalen met elk een bandbreedte van 25 kHz en DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) als modulatie.

In België is het TETRA systeem beter bekend onder de naam ASTRID (All-round Semi-cellular Trunking Radio communication system with Integrated Dispatching). Het wordt onder andere gebruikt door de hulpdiensten (politie, brandweer, ambulance), de douane, de kustwacht, ziekenhuizen, het Rode Kruis, het departement van Justitie, nutsdiensten, luchthavens, havens en het leger. Hier wordt gebruik gemaakt van frequenties tussen 380 MHz en 400 MHz.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door TETRA bedraagt 0.04 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 0.5% tot het totale elektrische veld veroorzaakt door RF signalen [13].

2.1.1.4.10 DECT

De DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) technologie vindt men vaak terug bij telefooncentrales binnen huis of een bedrijf, hoewel ook DECT-babyfoons en DECT-headsets verkrijgbaar zijn in de handel [34]. Een dergelijk telefonienetwerk bestaat typisch uit één basisstation dat verbonden is met het vaste telefoonnet en één of meerdere telefoons. De draadloze communicatie vindt uitsluitend plaats tussen de telefoons en het basisstation. Er kan ook van de ene telefoon naar de andere gebeld worden; dit gebeurt via het basisstation, maar de connectie met het vaste telefoonnet wordt hiervoor niet aangesproken. In een thuisnetwerk kunnen er typisch acht telefoons worden aangesloten op één basisstation. Voor grote netwerken zoals bijvoorbeeld binnen een bedrijf kunnen er meer kanalen aanwezig zijn.

DECT werkt met frequenties tussen de 1800 MHz en 1900 MHz. Er zijn 10 frequentiekanalen met elk een bandbreedte van 1.728 MHz. De gebruikte modulatie is GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Per verbinding wordt steeds één frequentiekanaal gebruikt.

Het gemiddelde uitgezonden vermogen bedraagt 10 mW met een maximaal vermogen van 250 mW [48]. Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door DECT bedraagt 0.15 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 11.3% tot het totale elektrische veld van RF signalen [13]. In een worst case scenario bedraagt het elektrische veld 2.9 Vm^{-1} op een afstand van 100 cm [8]. DECT blijkt vooral in de thuisomgeving dominant te zijn. Een maximale waarde van 0.47 Vm^{-1} is daar aangetroffen [14].

Typische radio chipsets zijn Atmel T2801, National semiconductor LMX4168, LMX4268 en LMX3161, Analog Devices AD6411 en Philips UAAA3545 [139-144].

2.1.2 Broadcasttechnologieën

In deze sectie bespreken we de verscheidene broadcasttechnologieën (zie ook Tabel 1).

2.1.2.1 DVB-T

DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) is een standaard voor broadcasttransmissie van digitale terrestrische televisie [35-37]. Het gebruikt OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) en broadcast gecompriëerde digitale audio, video en andere data via een MPEG (Moving Picture Expert Group) transport stream. Het is het meest gekende formaat voor digitale broadcast in de wereld.- en gebruikt de broadcastfrequentiebanden: de VHF band III (174-230 MHz), de UHF band IV (470-598 MHz) of de UHF band V (598-862 MHz). Ondersteunde kanaalbandbreedtes zijn 5, 6, 7 of 8 MHz.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door DVB-T bedraagt 0.09 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 4.7% tot het elektrische veld van alle RF signalen [13].

Typische radio chipsets zijn: Conexant CX22700 en VLSI Technology VES9600 [145-146].

2.1.2.2 DVB-H

DVB-H (Digital Video Broadcasting - Handheld) is een standaard voor hogesnelheidsbroadcasttoegang voor mobiele terminals (bv. GSM's of draagbare toestellen op zakformaat, gevoed door batterijen) [38-41]. Het is gebaseerd op DVB-T, maar voert enkele aanpassingen in om ontvangst op batterijgevoede toestellen mogelijk te maken. Het breedbanddownstreamkanaal laat een nuttige datasnelheid van meerdere Mbps toe en kan gebruikt worden voor audio- en videostreamingapplicaties, file downloads en vele andere diensten. DVB-H was erop gericht de zogenoemde broadcastfrequentiebanden te gebruiken, gebruikmakend van een gestandaardiseerde kanaalbandbreedte van 5, 6, 7 of 8 MHz. Vanaf 2012 zijn alle DVB-H-diensten geannuleerd, door de opkomst van performantere technologieën, bv. DVB-NGH of 4G/LTE.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door DVB-T bedraagt 0.09 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 4.7% tot het elektrisch veld van alle RF signalen [13].

Typische radio chipsets zijn: Analog Devices ADMTV102 en STMicroelectronics STV0362 [147-148].

2.1.2.3 DVB-T2

DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) is een verbetering van DVB-T, vooral op gebied van datasnelheid door een beter gebruik van het frequentiespectrum [42-45]. Op die manier laat DVB-T2 het broadcasten van HDTV (High Definition Television) toe. DVB-T2 gebruikt dezelfde frequentiebanden als DVB-T. Ondersteunde kanaalbandbreedtes zijn 1.7, 5, 6, 7, 8, of 10 MHz.

Het gemiddeld elektrisch veld veroorzaakt door DVB-T bedraagt 0.09 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 4.7% tot het elektrisch veld van alle RF signalen [13].

Een typische radio chipset is: Broadcom BCM7563 [149].

2.1.2.4 DVB-NGH

DVB-NGH (Digital Video Broadcasting – Next Generation Handheld) is een verbetering van DVB-H, op gebied van spectrale efficiëntie en flexibiliteit in mogelijke modulaties en codering [46]. DVB-NGH gebruikt de broadcastbanden: de VHF band III (174-230 MHz), de UHF band IV (470-598 MHz), de UHF band V (598-862 MHz), de UHF L-band (1452-1492 MHz), en stukken van de S-band (2 – 4 GHz). De eerste toestellen in Europa worden verwacht in de loop van 2013. Ondersteunde kanaalbandbreedtes zijn 1.7, 5, 6, 7, 8, 10, 15, of 20 MHz.

2.1.2.5 DAB

DAB (Digital Audio Broadcasting) is een standaard voor digitale radiobroadcast [47]. Het biedt niet alleen een betere kwaliteit dan FM, maar gebruikt het frequentiespectrum bovendien op een efficiëntere wijze. In Europa zijn twee frequentiebanden voorzien voor DAB: de VHF band III (174-230 MHz) en de UHF L-band (1452-1492 MHz). De DAB-kanaalbandbreedte is 1.536 MHz.

Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door DAB bedraagt 0.04 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 0.1% tot het totale elektrische veld van alle RF signalen [13].

2.1.2.6 FM

FM (Frequency Modulation) wordt gebruikt voor radio-uitzendingen en is genoemd naar de modulatietechniek, frequentie modulatie, die gebruikt wordt om het digitale signaal om te zetten naar een analoog signaal. Deze modulatietechniek laat grotere bandbreedtes toe wat leidt tot een betere geluidskwaliteit.

Het gemiddelde elektrische veld veroorzaakt door FM bedraagt 0.15 Vm^{-1} wat overeenkomt met een bijdrage van 7.6% tot het totale elektrische veld van alle RF signalen [13, 14].

De zogenaamde FM-band, i.e., de frequentieband van 87.5 MHz tot 108 MHz, wordt hiervoor gebruikt.

Typische radio chipsets zijn: Atmel U4065B, Motorola MC2833, Silicon Labs si4720/21-B20, Philips TEA5767/68 en Texas Instruments TRF5901 [150-154].

2.2 Trends in mobilifoons en hun straling

2.2.1 Straling

Het deel van de straling afkomstig van onze mobiele telefoon dat indringt in het menselijk lichaam wordt omgezet in warmte. Om deze opwarming te karakteriseren, wordt er gebruik gemaakt van de grootheid SAR (Specific Absorption Rate) die het specifieke absorptietempo in het lichaam aangeeft en uitgedrukt

wordt in Watt per kg (W/kg). De straling van een mobiele telefoon is echter zeer toestel afhankelijk. In Europa, is de fabrikant verplicht bij het op de markt brengen van de mobiele telefoon om de maximale lokale SAR waarde te bepalen en een conformiteitsverklaring te geven waarin gesteld wordt dat de maximale lokaal uitgemiddelde (over 10g weefsel) SAR van de telefoon onder de Europese norm van 2 W/kg ligt [155]. De SAR waarde van een specifiek mobilifoon/smartphone model kan teruggevonden worden in de handleiding van het toestel of op de website <http://www.sardatabase.com>. Wanneer er met de mobiele telefoon in een zone met goed of zelfs gemiddeld bereik belt, zal de waarde veel lager zijn dan aangegeven. Het is enkel bij een slecht bereik dat de maximale waarde van het toestel behaald zal worden.

Daarnaast kan de gebruiker zelf ook een aantal maatregelen treffen waardoor hij/zij de blootstelling van zijn/haar mobiele telefoon kan verlagen [9]:

- Een mobiele telefoon aanschaffen met een lage SAR waarde
- Gebruikmaken van een headset, een oortje of de luidspreker tijdens het bellen. Zo wordt de mobiele telefoon verder van het lichaam gehouden. Bluetooth headsets stralen ook minder dan mobiele telefoons.
- Een SMS sturen in plaats van te telefoneren. Op deze manier wordt de mobiele telefoon opnieuw verder van het lichaam gehouden en de telefoon zendt ook maar kort een signaal uit.
- Opzoeken van plaatsen met een goed bereik. Zoals reeds eerder vermeld, zal een mobiele telefoon dan minder hard moeten stralen om de antenna van het basisstation te bereiken.
- De mobiele telefoon weghouden van het hoofd bij het opstarten van een gesprek. De mobiele telefoon straalt dan het meest; zodra de gesprekspartner hoorbaar is zal de straling weer verlagen.
- Niet gebruik maken van valse afschermers voor antennes of dummytoestellen zoals anti-stralingsstickers of -chips. Deze bereiken het omgekeerde effect en doen het mobiele toestel meer stralen in plaats van de straling te verminderen.

2.2.2 Trends

In 1993 verschijnt de eerste praktisch bruikbare mobiele telefoon op de markt. In België werd het eerste GSM-netwerk opgericht in 1994, waarna er nog twee andere GSM-operatoren bijkwamen. Het gebruik van de mobiele telefoon in ons dagelijks leven is ondertussen vanzelfsprekend geworden. Vanaf 1995, wordt de in Europa immens populaire SMS dienst aangeboden zowel in het netwerk als op de mobiele toestellen. De GSM raakt steeds meer ingeburgerd wanneer in 1996 de pre-paid SIM (Subscriber Identity Module) wordt geïntroduceerd. In 2000 worden de GPRS diensten geïntroduceerd, gevolgd door UMTS in 2001, EDGE in 2003 en HSPA in 2005. Vanaf 2002, wordt ook MMS aangeboden. Gedurende deze tijd groeit het aantal gebruikers aanzienlijk. In 2005 zijn er wereldwijd maar liefst 1.5 miljard abonnees. De mobiele telefoons uit deze periode worden gekenmerkt door een scherm (al dan niet in kleur) met een cijfer-toetsenbord. In het begin was het nog noodzakelijk om een antenne uit te trekken, bij de latere modellen hoeft dit echter niet. In het begin was het enkel mogelijk om te telefoneren met deze toestellen, later komt daar SMS bij en nog later MMS. Zodra GPRS beschikbaar was, was het op sommige modellen ook mogelijk om beperkt te surfen op het internet. Uiteraard streefden de fabrikanten naar een zo licht mogelijk toestel met een zo lang mogelijke autonomie op de batterij.

Naast de mobiele telefoon werden ook de zogenaamde PDAs (Personal Digital Assistant), ook wel gekend onder de benaming palmtop, zakcomputer of handpalmcomputer) populair. Een PDA is eigenlijk een klein draagbaar toestel dat een modern digitaal alternatief vormt voor de papieren agenda. Het biedt typisch een adresboek, kladblok en agenda aan. Vaak zijn er nog meer functies zoals rekenbladen, tekstverwerking, databasemanagement, uurwerk, rekenmachine, spelletjes, etc. De eerste PDA werd gelanceerd in 1984 door Psion. In 1990 bracht Psion een tweede versie uit waarvan er ongeveer een 500 000 tal verkochten werden. De derde versie kwam er in 1993. De interesse van veel bedrijven voor de PDA markt werd gewekt door het grote succes van Psion. Al snel kwamen er heel wat gelijkaardige producten op de markt waarvan de meeste vernieuwende wellicht in 1995 de Pilot-toestellen waren van Palm Computing. Deze toestellen hadden namelijk geen fysiek toetsenbord meer.

De filosofie van de PDA waaide over naar de mobiele telefonie sector en al gauw kreeg men de eerste zogenaamde smartphone die het einde van het succes van de PDA inluidde. Een smartphone is een mobiele telefoon die uitgebreide computermogelijkheden heeft en eigenlijk kan beschouwd worden als

een PDA die tegelijk ook een telefoon is. De eerste smartphone dateert van 1996 en werd ontwikkeld door Nokia en bestond uit een scherm met een fysiek toetsenbord. Dit type smartphone won aan populariteit met de introductie van de Blackberry in 1999. Vooral in de zakenwereld kende de Blackberry heel wat toepassingen. De smartphone zoals we hem nu kennen, met een aanraakscherm en zeer uitgebreide lijst aan toepassingen, de zogenaamde applications of apps, kwam eind 2007 op de Europese markt met de komst van de Apple iPhone. Tegenwoordig is er een ruim aanbod aan smartphones te verkrijgen. Zo zijn naast de iPhone, de smartphones met Android als besturingssysteem zeer populair. Een andere mogelijkheid is Microsoft's Windows Mobile.

In de voorbije twintig jaar werd niet alleen telefonie mobiel, maar ook de laptop deed zijn intrede. De eerste desktop PC (Personal Computer) werd in de jaren 70 voorgesteld aan het grote publiek en al snel volgde het idee voor een mobiele versie ervan. De laptop was geboren. In September 1975 was de eerste commerciële laptop een feit. Vandaag is de laptop bijzonder populair. Dankzij de draadloze netwerken, meestal op WiFi gebaseerd, is het dan ook mogelijk om bijna overal de laptop in te zetten. Ook laptops ondergingen de laatste jaren grote veranderingen. Naast de klassieke zogenaamde full-size laptops, worden er ook netbooks en ultrabooks aangeboden. Een netbook is lichter en kleiner waardoor hij nog gemakkelijker te transporteren is dan de full-size laptop, maar is vaak ook minder krachtig dan een gewone laptop. De ultrabook gaat nog verder op deze filosofie. Dit is een ultradunne versie van een laptop, vaak niet dikker dan 1 inch.

Een ander mobiel apparaat dat ook verder gaat op de filosofie van de laptop is de tablet-pc. Dit is eigenlijk opnieuw een kleine computer die in de hand kan gebruikt worden. Het kan gezien worden als een grote krachtiger PDA of een kleine laptop met enkel een scherm. De eerste tablet kwam begin jaren 90 op de markt en werd toen nog met een stylus bediend. De huidige tablets worden echt volledig met de vingers bediend net zoals bij de hedendaagse smartphones. Een tablet kan typisch door middel van WiFi met het internet verbonden worden. In sommige modellen kan men ook via een 3G kaart toegang krijgen tot het internet. Het grote succes van tablets kent zijn oorsprong in 2010 toen Apple zijn iPad voorstelde. Als snel volgden tablets gebaseerd op Android of Windows Mobile.

2.3 Gebruikerstrends

Ongeveer 95.2% van alle Vlamingen heeft een mobiele telefoon waardoor de laatste jaren het adoptieniveau van mobiele telefonie ongeveer constant blijft [156]. 72.9% van de mobiele telefoon gebruikers heeft een 'standaard GSM'(mobilofoon), terwijl 38.5% gebruik maakt van een smartphone. 16.2% heeft zelfs zowel een standaard GSM als een smartphone. Verder zien we dat het adoptieniveau van de standaard GSM aan het dalen is, terwijl het adoptieniveau van de smartphone ongeveer gelijk blijft ten opzichte van vorige jaren. Wat het gebruik van het toestel betreft, wordt de standaard GSM vooral gebruikt voor persoonlijke doeleinden, terwijl de smartphone zowel op persoonlijk als op professioneel vlak wordt ingezet. In het algemeen is de populairste activiteit van de mobiele telefoon (zowel voor de standaard GSM als voor de smartphone) het telefoneren en in tweede instantie pas het verzenden van tekstberichten (SMS), hoewel dit laatste echter wel dagelijks gebeurt. De mobiele telefoon wordt ook vaak gebruikt als alarm klok en als agenda. De smartphone gaat daarnaast ook vaak gebruikt worden op emails te lezen en sociale netwerken te bezoeken, gevolgd door het effectief verzenden van emails en het zoeken naar informatie op het internet. Ongeveer 1 op 2 smartphone gebruikers gaat muziek streamen op hun toestel, maar slechts 9% doet dit op dagelijkse basis. Streamen van muziek wordt wel steeds populairder. Ten opzichte van 2011 is er een stijging van 13%. Daarnaast gaan steeds meer smartphone gebruikers GPS (Global Positioning System) gebruiken. In 2011 was dit aantal nog ongeveer 6 op 10, terwijl in 2012 dit ongeveer 9 op 10 bedraagt. Ook het gebruik van Bluetooth wordt steeds populairder: ongeveer 6 op 10 maakt er gebruik van, wat overeenkomt met een stijging van 10% ten opzichte van 2011. De minst populaire activiteiten op een smartphone zijn online shopping en het downloaden van films of series.

Het aantal mobiele data abonnementen steeg aanzienlijk in 2012, ongeveer 12%, ten opzichte van 2011. 73.1% van de smartphonegebruikers heeft een mobiel data abonnement, terwijl dit in 2011 nog maar 51.3% was [156]. Opvallend is dat 6 van de 10 smartphone-gebruikers een applicatie gebruikt die toelaat om gratis tekstberichten te sturen via het mobiel data abonnement.

4.8% van de Vlaamse populatie is niet in het bezit van een mobiele telefoon [156]. De redenen hiervoor zijn dat ze altijd de vaste telefoon gebruiken (40.4%), ze niet overal en altijd bereikbaar willen zijn (39.2%), ze niet kunnen werken met een mobiele telefoon (11.6%), ze een mobiele telefoon te duur vinden (8.7%) en/of schrik hebben voor hun gezondheid (5.7%).

In 2012 is 27.7% van de Vlaamse populatie in het bezit van een tablet [156]. Dit is een stijging met 14.6% ten opzichte van 2011. In 2011 bevond de tablet zich nog in het 'early-adopters' stadium, terwijl in 2012 reeds het 'early majority' stadium bereikt wordt. Er is geen enkel teken dat het succes van de tablet de komende jaren zal afnemen. In Vlaanderen wil 6.8% nog in het komende jaar een tablet aanschaffen. In tegenstelling tot de mobiele telefoon is de tablet een toestel dat door meerdere mensen binnen het gezin gebruikt wordt. Ongeveer 3 op 4 gebruikers geeft aan de tablet te delen met één of meerdere gezinsleden. De tablet wordt hoofdzakelijk voor persoonlijke doeleinden gebruikt (70%) of gecombineerd voor persoonlijke en professionele doeleinden (30%). Een zeer kleine minderheid gebruikt de tablet enkel voor school of voor het werk. De tablet wordt dan ook hoofdzakelijk thuis gebruikt. Ongeveer 20% gebruikt de tablet ook wanneer ze onderweg zijn. Bijna alle tablet gebruikers (94.2%) maken connectie met het internet via het draadloos (WiFi) thuisnetwerk. Ongeveer 1 op 3 connecteert via een WiFi Fon spot van Belgacom (actief sedert November 2011) of een homespot van Telenet (actief sedert February 2012). Andere mogelijkheden zijn: het draadloos netwerk van anderen (24.2%), een publieke hotspot (23.9%), 3G (19.7%), tethering (waarbij men via de draadloze connectie van de mobiele telefoon connectie probeert te maken met het internet) of een persoonlijke hotspot (16.6%). 0.9% beweert niet te surfen op de tablet.

De populairste activiteiten op de tablet zijn het lezen en verzenden van emails, het zoeken naar informatie en het bezoeken van sociale netwerk sites [156]. Iets minder populair zijn het lezen van boeken of magazines, luisteren naar muziek en het bekijken van foto's. De minst populaire activiteiten zijn opnieuw het online shoppen en het downloaden van films of series.

In 2012, bezat 80.1% van de Vlaamse gezinnen een laptop [156]. Dit is een stijging van 3.8% met het vorige jaar. 20.1% bezit zowel een tablet, een desktop computer als een laptop. Met een stijging van 10.5% ten opzichte van vorig jaar, wordt dit wellicht de nieuwe standaard situatie binnen een Vlaams gezin. 80.4% van de computergebruikers maakt gebruik van draadloos internet. Dit kan gebeuren via het draadloos thuisnetwerk (95.3%), een WiFi Fon spot of homespot (20.2%), 3G (13.9%), publieke hotspots (13.9%), het draadloos netwerk van iemand anders (13.3%) of tethering (11.7%).

Verwacht wordt dat in de toekomst mobiel internet steeds een belangrijker rol gaat spelen. Het WWRF (Wireless World Research Forum) voorspelt in 2017 maar liefst 7 triljoen draadloze apparaten die 7 miljard gebruikers zullen bedienen [157]. Ook PwC publiceerde onlangs een rapport waarbij het aandeel van mobiel internet in 2017 tot 54% zou stijgen [158]. Deze stijging hangt nauw samen met de stijgende verkoop van tablets en smartphones. Draadloze technologieën zullen dus in de toekomst aan belang winnen.

2.4 Toekomstige netwerken en optimalisatie van bestaande en toekomstige netwerken

2.4.1 Nieuwe types netwerken

2.4.1.1 Cognitieve netwerken

Cognitieve netwerken [159,160] zijn netwerken die gebruik maken van informatie over de netwerkomstandigheden om op basis hiervan hun prestatie (throughput, energieverbruik [161], Quality of Service,...) te verbeteren. Deze informatie kan van alle lagen van het OSI-model afkomstig zijn (fysische laag, netwerklag,...). Op basis van de verzamelde info 'leert' het netwerk over zijn algehele toestand en hierop voert een beslissingseenheid veranderingen door om aldus het vereiste doel van het netwerk te bereiken. Vaak is een cognitief netwerk gebaseerd op spectrum-sensing [162,163], waarbij het gebruik van de frequentiekanalen in kaart wordt gebracht. Dit laat toe om interferentie te vermijden door het gebruikte frequentiekanaal te kiezen in een ongebruikte band. Cognitieve radio wordt ook onderzocht

voor de toegang tot de zogenaamde TV White Spaces, de UHF- en VHF-spectrumbanden die geografisch gezien vrijkomen na de digitale switchover [164].

2.4.1.2 Symbiotische netwerken

Symbiotische netwerken [165] zijn co-existerende homogene (dezelfde technologie gebruiken, bv. twee onafhankelijke WiFi-netwerken van verschillende bedrijven die hun access points delen) of heterogene (bv. WiFi en UMTS-netwerken die een smartphone toelaten data te downloaden) netwerken die samenwerken op basis van 'incentives' door het delen van hun infrastructuur en hun resources. Incentives zijn netwerkdoelen die moeten worden verbeterd opdat de verschillende netwerken zouden overwegen om samen te werken met andere netwerken. Voorbeelden van incentives zijn een verlaagd energieverbruik [161], een lagere blootstelling aan elektromagnetische straling, een langere levensduur van batterijgevoede toestellen, een lagere interferentie, een hogere throughput, een betere Quality of Service, enz. Symbiotische netwerken maken de weg vrij voor echte cross-networkoptimalisatie en het verdwijnen van netwerkgrenzen.

2.4.1.3 Smart grids en smart metering

Een smart meter wordt gebruikt door nutsbedrijven en zijn de nieuwe generatie verbruiksmeters voor aardgas en elektriciteit. Ze worden net als de huidige meters bij de gebruiker thuis geïnstalleerd en meten elektronisch het elektriciteits- en aardgasverbruik in de woning. Daarnaast bevatten ze ook communicatietechnologie die het mogelijk maakt om informatie te verzenden en te ontvangen naar de netbeheerder. Typische gegevens die verzonden worden zijn meterstanden of alarmen. De meter kan ook signalen ontvangen zoals bijvoorbeeld een signaal om de toevoer af te sluiten. Deze communicatie kan gebeuren via het elektriciteitsnetwerk zelf, een bestaande telefoonlijn, de kabel van een tv-aansluiting of via een RF signaal. Het netwerk bestaande uit onder andere het informatie- en metersysteem met smart meters wordt een smart grid genoemd.

Studies toonden aan dat de blootstelling veroorzaakt door smart meters aanzienlijk lager is in vergelijkbaar met andere toestellen aanwezig binnenshuis, zelfs op een korte afstand [166]. De RF blootstelling afkomstig van een smart meter die continu uitzendt op een afstand van 1 tot 3 m is 125 tot 1250 keer lager dan de blootstelling veroorzaakt door een mobiele telefoon waarmee men aan het telefoneren is. Een smart meter gaat typisch maximaal 1 keer om de 15 minuten informatie doorzenden

2.4.1.4 Machine-tot-machine communicatie

Bij machine-tot-machine (M2M) communicatie gaan twee of meerdere apparaten met dezelfde mogelijkheden communiceren met elkaar zonder tussenkomst van de mens [167]. Populaire markten voor M2M systemen zijn de automatisering van gebouwen en in de industrie, en smart grid applicaties. De communicatie tussen de apparaten kan zowel bedraad als draadloos. In het draadloze geval zijn er nog eens drie mogelijkheden: cellulaire M2M, capillary M2M en een hybride oplossing. Bij cellulaire M2M gaat men uiteraard gebruik maken van cellulaire technologieën zoals GSM, GPRS, EDGE, UMTS, WiMAX, HSPA, LTE, LTE-Advanced, etc. Bij capillary M2M gaat men eerder gebruik maken van technologieën met een zeer kort bereik. De hybride oplossing combineert cellulaire M2M met capillary M2M. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een technologie met een zeer kort bereik tot aan de cellulaire aggregator.

2.4.2 Optimalisatie van bestaande netwerken

2.4.2.1 Optimalisatie van de positionering van basisstations

Bij het optimaliseren en het ontwerpen van netwerken zal het in de toekomst belangrijk zijn om de basisstations en access points optimaal te positioneren. Hierbij kan men onderzoeken wat de beste fysieke plaatsen zijn om de basisstations te plaatsen in het gespecificeerde gebied. Hierbij is het uiteraard belangrijk dat er een goede dekking wordt bekomen. Door de optimale positionering van de basisstations kan men echter ook de blootstelling voor de mens minimaliseren alsook het energieverbruik van de basisstations. Dit resulteert in een zogenaamd 'groen' netwerk i.e., een netwerk waarbij zowel het energieverbruik als de blootstelling voor de mens is geminimaliseerd.

In [168] wordt een dergelijk groen netwerk ontworpen voor DAB en DVB systemen. [169] tracht het netwerk te optimaliseren zodat het uitgezonden vermogen geminimaliseerd wordt. In [170], worden energie-efficiënte WiFi netwerken ontworpen door in te spelen op de actuele vraag naar bandbreedte door de gebruikers van het netwerk.

Daarnaast bestaan er ook heel wat commerciële tools. Voorbeelden hiervan voor netwerken buitenshuis zijn: Entrepriise, atoll, ICS Telecom, Mentum Planet, FUN, EDX signal Pro [171-176]. Voorbeelden voor netwerken binnenshuis zijn EDX signal PRO, Aerohive en AWE [176-178].

De WiCa (Wireless & Cable) onderzoeksgroep ontwikkelde twee planningsalgoritmes GRAND en WHIPP specifiek voor het ontwerpen van groene netwerken respectievelijk, binnenshuis en buitenshuis. De focus ligt hier op het ontwerpen van groene netwerken met een minimaal energieverbruik en minimale blootstelling van de mens voor elektromagnetische straling. Hiervoor wordt onder andere gebruik gemaakt van de optimale positionering van basisstations of access points. Beide planningsalgoritmes worden in de volgende secties besproken.

Om groene toegangsnetwerken te ontwerpen, hoeft men zich niet enkel te beperken tot draadloze netwerken. Ook een intelligente combinatie van draadloze netwerken en bedrade netwerken kan leiden tot een groener netwerk zoals besproken in [179].

2.4.2.1.1 GRAND

GRAND (Green Radio Access Network Design) is een heuristische planningstool voor groene draadloze outdoor netwerken waarbij zowel het energieverbruik als de blootstelling voor de mens geminimaliseerd wordt [98,180,181]. Als input ontvangt het algoritme een shapefile van het te bedekken gebied. Een shapefile geeft onder andere aan waar er gebouwen staan in het te onderzoeken gebied alsook meer informatie over het gebouw zelf zoals bijvoorbeeld de vorm, hoogte, etc. Op basis van een dergelijke shapefile is het mogelijk om vast te leggen op welke locaties een basisstation mag geplaatst worden voor nieuwe netwerken of welke locaties er kunnen hergebruikt worden bij het optimaliseren van een reeds bestaand netwerk.

GRAND maakt gebruik van een genetisch algoritme om de locaties en de instellingen van de basisstations te bepalen. In een eerste stap zal geprobeerd worden om de beoogde dekking te behalen. Bij het bepalen van de dekking wordt ook rekening gehouden met de invloed van de gebouwen in de omgeving van de individuele basisstations. Zodra de beoogde dekking bereikt is, zal het algoritme het netwerk optimaliseren naar energieverbruik en blootstelling toe.

Als output geeft GRAND een overzicht waar de basisstations geplaatst moeten worden alsook meer informatie over de configuratie van het basisstation en de bijhorende velden.

Volgende draadloze technologieën zijn geïmplementeerd in GRAND: WiMAX, UMTS, HSPA, LTE(-Advanced) en WiFi.

2.4.2.1.2 WHIPP

Het heuristische planningsalgoritme WHIPP (WiCa Heuristic Indoor Propagation Prediction) is ontwikkeld en gevalideerd voor de predictie van padverliezen in indooromgevingen [182,183]. Het brengt de invloed van de omgeving op het draadloos propagatiekanaal in rekening en is ontwikkeld voor padverliespredicties in zones van ongeveer 5m² of op specifieke locaties. De WHIPP-algoritmes laten zowel berekening van een gegeven netwerk toe, als de automatische optimale planning van een nieuw netwerk, gebaseerd op bandbreedtevereisten van de gebruiker. Het algoritme baseert zijn berekeningen op de bepaling van het dominante pad tussen zender en ontvanger [184]. Dit is het pad waarlangs het signaal de minste obstructie waarneemt. Het dominante pad wordt bepaald door een multidimensioneel optimalisatiealgoritme, dat het laagste totale padverlies zoekt. Dit totale verlies bestaat uit een afstandsverlies (gerelateerd aan de lengte van het propagatiepad), een gecumuleerd muurpenetratieverlies (gerelateerd aan het aantal en type muren dat het pad doorkruist), en een interactieverlies (gerelateerd aan de bochten die het propagatiepad neemt tussen zender en ontvanger). Validatie in verschillende gebouwen toonde een uitstekende overeenkomst tussen metingen en predicties. Ondersteunde technologieën zijn WiFi in de 2.4 GHz en 5 GHz-band, LTE (2.6 GHz), UMTS (1.8 GHz), en Zigbee (2.4 GHz).

2.4.2.2 *Heterogene netwerken*

De continue groei van mobiele gebruikers en hun nood voor steeds hogere data rates vraagt een 'verdichting' van het draadloze toegangsnetwerk. Vele operatoren hebben dan ook het aantal macrocell basisstations in hun netwerk verhoogd. In grote steden is de afstand tussen twee macrocell basisstations vaak maar enkele honderden meters.

Een alternatief voor het plaatsen van extra macrocell basisstations is om kleinere nodes met een laag vermogen te gaan plaatsen in de cel van een macrocell basisstation. Dit noemt men een heterogeen

netwerk of ook wel een gelaagd netwerk [136,137]. Hierbij is het niet noodzakelijk dat de kleinere node volledige dekking voorziet in de cel van het macrocell basisstation. In dit laatste geval zal de kleinere node voor extra capaciteit binnen de cel zorgen. De gebruikers buiten het bereik van de kleinere node kunnen connecteren op het macrocell basisstation. Wanneer de operator dergelijke kleine nodes plaatst, zijn dit de zogenaamde picocell basisstations. Een alternatief hiervoor is het zogenaamd femtocell basisstation, ook wel home-eNodeB genoemd [137]. Dit is een klein basisstation dat door de eindgebruiker in zijn/haar huis geplaatst wordt en connectie maakt met het operator netwerk door gebruik te maken van de bedrade breedbandverbinding van de eindgebruiker. LTE-Advanced maakt gebruik van dit laatste concept. Een eenvoudig voorbeeld van een heterogeen symbiotisch netwerk is een WiFi-UMTS of WiFi-LTE netwerk waarbij een user device automatisch connecteert met een WiFi access point indien dit voorhanden is, en zoniet een UMTS- of LTE-verbinding maakt.

2.4.2.3 Cell zooming/breathing

Bij cell zooming of cell breathing wordt de celgrootte van een basisstation dynamisch aangepast naargelang de belasting van het basisstation [185-188]. Hoe groter de belasting van het basisstation, hoe kleiner de celgrootte zal zijn. Omgekeerd, hoe lager de belasting van het basisstation, hoe groter de cel is. In dit laatste geval kan het zelfs zijn dat de cel gaat overlappen met andere cellen van naburige basisstations, waardoor dit basisstation 'overbodig' wordt. Dit basisstation kan dan in sleep mode geplaatst worden. Cell zooming/breathing en sleep modes zijn dus duidelijk met elkaar gerelateerd.

2.4.2.4 Sleep modes

In toekomstige netwerken zullen basisstations in sleep modes geplaatst kunnen worden [189-194]. Wanneer een basisstation in sleep mode geplaatst wordt, zal het geen gebruikers meer gaan bedienen. Dit betekent echter niet dat het basisstation volledig wordt uitgezet. Bepaalde fundamentele componenten van het basisstation zullen actief gehouden worden zodat wanneer nodig het basisstation snel volledig actief kan worden gebracht en terug gebruikers gaan bedienen. Dit gebeurt aan de hand van een zogenaamd 'wake-up' signaal.

Wanneer het basisstation zich in sleep mode bevindt, verbruikt het uiteraard veel minder energie dan in actieve toestand en zal ook de elektromagnetische straling afkomstig van dit basisstation veel lager zijn. Naargelang de duur om het basisstation terug actief te maken, kunnen er verschillende sleep modes gedefinieerd worden. Een basisstation in *micro sleep mode* zal bijvoorbeeld rapper opgewekt kunnen worden dan een basisstation in *deep sleep mode* [194].

Basisstations zullen typisch in sleep mode geplaatst worden wanneer er weinig of geen activiteit aanwezig is in de cel van het basisstations. Eventuele gebruikers kunnen dan bediend worden door omliggende basisstations die wel actief zijn.

Sleep mode is dus een veelbelovend techniek om zowel het energieverbruik als de blootstelling van de mens aan elektromagnetische straling te verlagen op momenten waarbij er weinig activiteit is in het netwerk. De combinatie van beiden kan het energieverbruik van een netwerk verlagen met 14.4% [188].

2.4.2.5 Massive MIMO

Massive MIMO is geen draadloze communicatiestandaard, eerder een recent telecommunicatie-concept dat zich op dit moment nog in de onderzoeksfase bevindt. Massive MIMO gaat over het gebruik van een zeer groot aantal antennes (100 of meer) aan zend- en/of ontvangstzijde [195,196]. Elke antenne verbruikt hierbij een heel laag vermogen opdat het totaal uitgestraald vermogen van alle antennes samen beperkt zou zijn.

Massive MIMO biedt een aantal voordelen ten opzichte van systemen met een klein aantal antennes: de karakteristieken van het draadloze kanaal zijn meer deterministisch, de uitmiddeling van de thermische ruis kan nu gebeuren over een zeer groot aantal antennes en spatiale focusering (beamforming) technieken bezitten nu een ongekende grote resolutie.

2.5 Blootstellingsmaten en –normen en reductie van blootstellingsbelasting

2.5.1 Stralingsbelasting

De opkomst van draadloze communicatietechnologieën betekende een toename van de stralingsbelasting afkomstig van deze technologieën. Hiebij maken we een onderscheid tussen stralingsbelasting afkomstig van de nabije velden van mobiele toestellen of gebruikerstoestellen en deze afkomstig van de verre

velden van basisstationantennes. Internationale richtlijnen, bv. ICNIRP (zie sectie 2.5.2), werden opgesteld om mensen te beschermen tegen mogelijke schadelijke effecten door de blootstelling aan elektromagnetische straling. Deze richtlijnen specificeren afzonderlijke limieten voor enerzijds de totale-lichaams absorptie veroorzaakt door bijvoorbeeld de verre-veld blootstelling veroorzaakt door basisstationantennes, en, anderzijds, de lokale absorptie geproduceerd door de nabije-veld blootstelling aan mobiele toestellen gebruikt nabij het lichaam. Aan de hand van conformiteitstesten wordt nagegaan of er voldaan wordt aan deze limieten. Bij deze testen wordt er uitgegaan van maximale blootstelling wat aanleiding geeft tot een overschatting van de werkelijke blootstelling.

Om de realistische blootstelling te bepalen wordt uitgegaan van realistische stralingsniveaus. Echter, om de totale stralingsbelasting te bepalen is het noodzakelijk om de verre veldblootstelling en de nabije veldblootstelling gezamenlijk te beschouwen. In het LEXNET project (FP7) wordt een nieuwe blootstellingsindex gedefinieerd die beide blootstellingen combineert met het doel om de totale stralingsbelasting in een omgeving te bepalen [242]. Deze blootstellingsindex laat ook toe de gemiddelde stralingsbelasting in een omgeving te minimaliseren.

De stralingsbelasting van verschillende draadloze technologieën staat opgelijst in Tabel 1. Het combineren van verre- en nabije-veld blootstelling is een recente trend. Een voorbeeld van de totale stralingsbelasting door uplink en downlink signalen wordt gegeven in Sectie 2.5.3.

2.5.2 Literatuuronderzoek blootstellingsmaten

De grootheden die momenteel het meest gebruikt worden om de blootstelling aan radiofrequente (RF) elektromagnetische velden (EMV) te evalueren zijn: de invallende elektrische (E) en magnetische (H) veldsterktes, de invallende vermogendichtheid (S) en de Specific Absorption Rate (SAR). Internationale organisaties, zoals het International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) en de Federal Communications Commission (FCC) hebben richtlijnen uitgevaardigd om de blootstelling van mensen aan EMV te beperken. Deze richtlijnen leggen limieten op aan zowel de totale lichaamsabsorptie (in termen van SAR) als de lokale absorptie uitgemiddeld over 10 g lichaamsweefsel. ICNIRP noemt deze limieten de basisrestricties.

Mobiele toestellen worden gebruikt dichtbij het lichaam (in het nabije veld van de antenne) en vereisen een directe bepaling van de geïnduceerde velden of absorptie in het lichaam. Voor antennes op grote afstand van het lichaam (in het verre veld van de antenne) kan de bepaling van het invallende veld dienen als vervanger voor de geïnduceerde absorptie. De invallende velden of vermogensdichtheid worden dan vergeleken met de zogenaamde referentieniveaus (ICNIRP). Deze niveaus werden afgeleid van de basisrestricties zodat wanneer er voldaan is aan de referentieniveaus er ook voldaan is aan de basisrestrictie. Indien de referentieniveaus overschreden worden, dan moeten de basisrestricties getoetst worden om na te gaan of de blootstelling voldoet.

In deze sectie bespreken we de meest courante blootstellingsmetrieke en geven we een overzicht van de meest gebruikte methodes om deze metrieke te bepalen.

2.5.2.1 Vermogendichtheid, elektrisch veld en magnetisch veld

De blootstelling aan invallende radiofrequente elektromagnetische velden wordt bepaald in termen van vermogensdichtheid, elektrische en magnetisch veld. Deze grootheden zijn eenvoudig te meten in tegenstelling tot de velden geïnduceerd in het menselijke lichaam.

In het verre veld van een bron zijn de vermogendichtheid, het elektrische veld en het magnetische veld gerelateerd door de karakteristieke impedantie in de vrije ruimte:

$$S = \frac{E_{\text{rms}}^2}{Z_0} = Z_0 H_{\text{rms}}^2 \quad (1)$$

met Z_0 de karakteristieke impedantie in de vrije ruimte, E_{rms} het root-mean-squared (RMS) elektrische veld (in V/m) and H_{rms} het RMS magnetische veld (in A/m).

2.5.2.2 Methoden om de blootstelling te bepalen

De methode om de blootstelling te bepalen hangt af van het beoogde doel: (1) het testen of de veldsterktes voldoen aan de blootstellingslimieten of (2) het beoordelen van de typische blootstelling van een persoon. Deze laatste is vaak het ontwerp van epidemiologische studies.

De blootstelling kan bepaald worden met behulp van breedband- en/of frequentieselectieve (smalband) metingen, persoonlijke blootstellingsmeters (ook: exposimeters of dosimeters) en elektromagnetische simulatiesoftware. Deze drie mogelijkheden worden nu in detail besproken.

De blootstelling van invallende elektromagnetische velden kan bepaald worden door metingen met behulp van **breedband en/of frequentie-selectieve meetapparatuur**. *Breedbandmetingen* meten een frequentieband in één keer op (bv. 100 kHz – 3 GHz) en worden uitgevoerd door een veldmeter en een breedband probe of antenne. De blootstelling in de volledige frequentieband wordt weergegeven met één waarde. *Een frequentieselectieve of smalbandmeting* wordt uitgevoerd door een antenne te combineren met een spectrumanalyzer. In tegenstelling tot de breedbandmetingen, bekomt men nu voor elke onderzochte frequentieband een waarde voor de blootstelling. Frequentieselectieve metingen laten toe om het aandeel van een draadloze technologie in de totale blootstelling te bepalen.

Persoonlijke blootstellingsmeters (ook: exposimeters of dosimeters) worden vaak gebruikt in epidemiologische studies om de persoonlijke blootstelling van een populatie in kaart te brengen en deze te relateren aan mogelijke ziektebeelden. Exposimeters worden op het lichaam gedragen. Het zijn smalbandtoestellen die de blootstelling gelijktijdig meten in meerdere frequentiebanden. Exposimeters zijn erg handig te hanteren maar vereisen een meetprotocol, hebben een grote onzekerheid door o.a. de invloed van het lichaam, hebben een gelimiteerde dynamisch bereik met typisch een maximum waarde van 5 V/m en hebben vaak een groot aantal opmetingen die beneden de detecteerbare limiet van het toestel liggen [197,198]. Voorbeelden van commerciële dosimeters zijn: EME Spy 210/121/140 en de ESM 140 [199-201].

Naast metingen worden ook **numerieke berekeningen** gebruikt bij het onderzoek naar de blootstelling aan elektromagnetische straling, bv. 3D ray-tracing software wordt gebruikt om tijdens de ontwerpfase van een netwerk de blootstelling in een bepaald gebied te voorspellen. Simulaties worden voornamelijk gebruikt bij de modellering van de geïnduceerde velden in en de totale veld distributies rond het lichaam van een persoon. Maar numerieke berekeningen zijn beperkt toepasbaar: ze vereisen een ideale benadering van de werkelijkheid, vragen een vaak lange rekentijd en vereisen een grote reken- en verwerkingskracht. De modellen van de mens en mobiele toestellen zijn meestal beperkt in nauwkeurigheid waardoor ook de resultaten van de geïnduceerde velden en dus de SAR in het lichaam een lage nauwkeurigheid hebben.

De blootstelling varieert zowel in tijd als over de ruimte en wordt gekarakteriseerd door distributies met gemiddelde waarden en piekwaarden (over de ruimte of in de tijd). De uitmiddeling in de tijd en over de ruimte kan op verschillende manieren gebeuren.

We onderscheiden twee methodes bij **spatiale uitmiddeling** of uitmiddeling over de ruimte: de sweeping methode en de raster methode. Bij de sweeping methode wordt een klein gebied (volume) gescand door de antenne te bewegen in elke richting en polarisatie, bij de raster methode worden metingen uitgevoerd op een aantal plaatsen in een gegeven raster. De piekblootstelling wordt bekomen door enkel de maximale waarde vast te houden (spectrumanalyzer ingesteld op max-hold [202-205]), voor de gemiddelde blootstelling middelen we uit over alle meetwaarden en bij de gewogen gemiddelde blootstelling worden gemiddelde waarden gecombineerd met maximale waarden (bv. 95^{ste} percentiel van het elektrische veld). Hierna volgen enkele voorbeelden van uitmiddelingen in standaarden en de wetenschappelijke literatuur.

Om de blootstelling van het volledige lichaam overeenkomstig met de CENELEC standaard EN 50492 te bepalen is een uitmiddeling van de velden noodzakelijk [206]. De gemiddelde waarde wordt bekomen door de isotropische veldwaarden uit te middelen over de N meetpunten. CENELEC EN 50492 specificeert drie meetpunten te gebruiken, maar afhankelijk van de locatie en de vereiste accuraatheid, kan dit opgetrokken worden naar zes meetpunten. IEC 62232 definieert een meetrooster voor referentiemetingen voor spatiale uitmiddelingen [207].

Naast de piek en de gemiddelde blootstelling vinden we in de literatuur ook **gewogen gemiddelde veldwaarden** terug. Deze worden o.a. gebruikt om de blootstelling te minimaliseren in kantooromgevingen [211]. De blootstellingsmetriek E_M komt overeen met het gewogen gemiddelde van de mediaan van de elektrisch veldsterkte (E_{50}) en de 95%-percentiel (E_{95}) van deze elektrisch veldsterkte:

$$E_M = \frac{w_1 E_{50} + w_2 E_{95}}{w_1 + w_2} \quad (2)$$

met w_1 en w_2 de wegingsfactoren voor de 50% percentiel waarde E_{50} en de 95% percentiel E_{95} , respectievelijk. E_{50} brengt de mediaan blootstelling in rekening, terwijl E_{95} de maximale blootstellingswaarden in rekening brengt. Er wordt verondersteld dat beiden een gelijke invloed hebben op de metriek wanneer beide wegingsfactoren de waarde 0.5 aannemen.

Bij **tijdsuittmiding** middelt men uit over een bepaald tijdsinterval. ICNIRP specificeert een uitmiddelingperiode van 6 minuten voor het kwadraat van de RMS veld niveaus (E_{rms}^2 , H_{rms}^2 , en B_{rms}^2) en de vermogensdichtheid (S) te bepalen [208]. Voor deze grootheden specificeert FCC echter een periode van 6 minuten om over uit te middelen om de beroepsblootstelling te bepalen en een periode van 30 minuten (of zelfs geen uitmiddeling indien dit onuitvoerbaar zou blijken) voor de blootstelling van de algemene bevolking [209]. In de praktijk kan men stellen dat een periode van minder dan één minuut voldoende is om over uit te middelen [210].

2.5.2.3 Blootstellingsverhoudingen

In het geval van blootstelling veroorzaakt door meerdere bronnen, worden er andere metrieken gebruikt gebaseerd op de bijdrage van iedere bron tot de totale blootstelling. Richtlijnen en normen, zoals ICNIRP [208] en CENELEC [213], definiëren verhoudingen om de conformiteit te evalueren in het geval van simultane blootstelling aan velden van verschillende frequenties.

Andere definities van blootstellingsverhoudingen kunnen teruggevonden worden in de wetenschappelijk literatuur. In [212] en [214] worden de blootstellingsverhoudingen gedefinieerd die de gemiddelde bijdrage (AC, Actual Contribution) en de maximale bijdrage (MC, Maximal Contribution) van de verschillende bronnen tot de totale blootstellingen bepalen. Bijvoorbeeld, voor de vermogensdichtheid, is de AC en de MC bijdrage van elke signaal tot de totale blootstelling gedefinieerd als volgt, voor $X = AC$ of MC :

$$X = u \left(\frac{S_{signal}}{S_{tot}} \right) 100[\%] \quad (3)$$

waarbij $u()$ een functie is van S voor een RF signaal (bijvoorbeeld, GSM, LTE, ...) i.e., S_{signal} , en S_{tot} is de totale blootstelling ten gevolge van alle RF signalen op het gemeten punt.

2.5.2.4 Specific Absorption Rate (SAR)

De Specific Absorption Rate (SAR) is de snelheid waarmee elektromagnetische energie in het lichaam wordt omgezet in warmte per massa-eenheid. Deze grootheid is een maat voor het geïnduceerde elektromagnetisch veld in het menselijk lichaam en is gedefinieerd als volgt:

$$SAR(r) = \frac{\sigma(r)E_{rms}(r)^2}{\rho(r)} \quad (4)$$

met r de locatie in het lichaam, σ de conductiviteit (S/m) en ρ de massadichtheid (kg/m^3).

Afhankelijk van de toepassing en het beoogde doel bestaan er vijf grootheden gebaseerd op de SAR: de totale lichaams-SAR (SAR_{wba}), piek lokale SAR, orgaanspecifieke SAR (SAR_{osa}), de SAR_{OTA} en de SAR/kbps.

De **totale lichaams-SAR (SAR_{wba})** is de uitgemiddelde SAR over de volledige massa van het menselijk lichaam. Deze waarde komt dus overeen met de verhouding van het totale vermogen geabsorbeerd door het lichaam ten opzichte van de massa van dit lichaam. De SAR_{wba} wordt als volgt berekend:

$$SAR_{wba} = \langle SAR \rangle_M = \frac{1}{M} \int_R SAR(r) dm = \frac{1}{M} \int_R \sigma(r) E_{rms}(r)^2 dV = \frac{P_{abs}}{M} \quad (5)$$

met M de totale massa van het menselijk lichaamsmodel (in kg), V de totale volume van het weefsel van het menselijk lichaamsmodel, R het gebied van het lichaam en P_{abs} het geabsorbeerd vermogen (in W).

De SAR_{wba} is de basis voor de ICNIRP referentieniveaus. Hierbij wordt blootstelling als schadelijk beschouwd als de SAR_{wba} een waarde oplevert hoger dan 4 W/kg uitgemiddeld over de volledige massa van het lichaam. Om te vergelijken met de ICNIRP richtlijn moet de SAR_{wba} uitgemiddeld worden over een tijdsinterval van 6 minuten.

In gesloten omgevingen, zoals in een kamer, kan de SAR_{wba} bepaald door het meten van de reverberatietijd in de ruimte een keer wanneer er mensen aanwezig zijn in de ruimte en een keer wanneer er geen mensen aanwezig zijn. Op basis van het verschil in reverberatietijd kan de SAR_{wba} berekend worden [215]. Deze meetmethode is gebaseerd op de room electromagnetics theorie [216].

Vermits het onmogelijk is om de geïnduceerde velden in het lichaam op te meten in een levend wezen, kan de SAR_{wba} in een mens enkel gekarakteriseerd worden door middel van een numerieke analyse. Hiervoor zijn realistische modellen van het menselijk lichaam noodzakelijk. Een aantal realistische heterogene modellen worden momenteel gebruikt voor elektromagnetische veldsimulaties en bestaan uit een groot aantal datasets verkregen door MRI (Magnetic Resonance Imaging), CT (Computer Tomography) en anatomische beelden. Deze data wordt voorgesteld door voxel beelden van dunne plakjes lichaam waarbij iedere voxel correspondeert met een specifiek type lichaamsweefsel. Het laatste decennium werden heel wat realistische modellen ontwikkeld zoals bijvoorbeeld de Virtual Family [217], de Virtual class room [217], een Japanees model [218], Koreaans model [219, 220], Chinese volwassen modellen [221], Norman and Naomi model [222, 223], het volwassen model van Zubalt en het visible human model [224, 225].

De SAR_{wba} wordt gebruikt voor conformiteitstesten en het bepalen van realistische of typische blootstelling. Conformiteitstesten in termen van SAR_{wba} kunnen enkel gebeuren op basis van numerieke technieken beschikbaar in 3D elektromagnetische simulatietools. Een voorbeeld van een dergelijke conformiteitstest is het bepalen van de SAR_{wba} geïnduceerd in arbeiders die vlak voor een basisstationantenne aan het werk zijn. De ICNIRP [208] en FCC richtlijnen specificeren een limiet van 0.4 W/kg voor beroepsblootstelling en 0.08 W/kg voor algemene publieke blootstelling in termen van SAR_{wba} .

Blootstellingslimieten beschreven in de richtlijnen limiteren naast de totale lichaams-SAR ook de lokale absorptie uitgemiddeld over de massa: **de piek lokaal uitgemiddelde SAR (psaSAR)**. Evenals de totale lichaams-SAR wordt de piek lokale absorptie ook uitgemiddeld in de tijd. In Europa worden de ICNIRP richtlijnen gebruikt waarbij uitgemiddeld wordt over een periode van 6 minuten en over elke 10 g aaneengrenzend weefsel [208]. De conformiteitstesten voor deze richtlijnen vereisen zowel conformiteit wat de referentieniveaus als de basisrestricties betreft.

Het evalueren van de conformiteit van RF mobiele toestellen kan alleen maar uitgevoerd worden in gespecialiseerde laboratoria die uitgerust zijn met een dosimetrische meetopstelling. Deze opstelling bestaat uit een dosimetrische probe (die gekalibreerd is voor het meten van elektrische velden in vloeistoffen met vergelijkbare dielektrische eigenschappen als lichaamsweefsel), een fantoom gevuld met een vloeistof die weefsel nabootst en een robot voor het verplaatsen van de probe in de vloeistof. Er wordt verondersteld dat de RF mobiele toestellen gedurende de test uitzenden bij maximum vermogen. De standaarden [226,227] beschrijven de procedures voor deze conformiteitstesten en de procedures voor het berekenen van de lokale SAR (bv. hoe een kubus van 10 g weefsel gedefinieerd wordt).

Voor de certificatie van mobiele toestellen zijn metingen vereist, maar numerieke methoden zoals de populaire 'finite-difference time-domain' (FDTD) techniek kunnen gebruikt worden voor het onderzoeken en karakteriseren van de gelokaliseerde SAR in een (realistisch) mensmodel onder verschillende blootstellingsomstandigheden.

De Europese Commissie nam de limieten voorgesteld in de ICNIRP richtlijnen over. ICNIRP maakt onderscheid tussen het hoofd en de romp, en de ledematen [228]. Voor het hoofd en de romp (waar de meest vitale organen zich bevinden) is de basisrestrictie vastgelegd op 2 W/kg voor de piek lokale SAR in 10 g weefsel. Voor de ledematen werd deze basisrestrictie opgetrokken tot 4 W/kg. Deze waarden zijn van toepassing bij algemene publieke blootstelling. Voor beroepsblootstelling zijn de limieten vijf keer groter, i.e. 10 W/kg voor het hoofd en de romp en 20 W/kg voor de ledematen.

De **orgaanspecifieke SAR** (SAR_{osa}) is gedefinieerd als de SAR uitgemiddeld over de massa van een specifiek orgaan of weefsel in het (menselijk) lichaam (M_{organ}) en wordt gebruikt om de lokalisatie van absorptie van elektromagnetische velden in het lichaam te onderzoeken. De SAR_{osa} kan alleen bepaald worden door numerieke simulaties. De SAR_{osa} wordt als volgt berekend:

$$SAR_{osa} = \frac{1}{M_{organ}} \int_{organ} SAR(r) dm = \frac{1}{M_{organ}} \int_{organ} \sigma(r) E_{rms}(r)^2 dV = \frac{P_{abs}}{M_{organ}} \quad (6)$$

De SAR_{osa} verwerf pas recentelijk belangstelling van de wetenschappelijk gemeenschap waardoor er slechts een klein aantal publicaties beschikbaar zijn in de literatuur. Studies die de SAR_{osa} onderzochten werden uitgevoerd voor de nabije veldblootstelling [217,229-231], de blootstelling aan basisstationantennes [232,233], de blootstelling door een enkelvoudig invallende vlakke golf [234] en voor de realistische blootstelling in multipad omgevingen [235-237].

De recente trend naar het bepalen van de echte blootstelling geïnduceerd door toestellen toont de noodzaak aan voor een nieuwe coöperatieve metriek die zowel de blootstelling als de performantie van het toestel evalueert. Een dergelijke metriek wordt momenteel ontworpen door France Telecom en wordt de **“over-the-air” SAR** (SAR_{ota}) genoemd:

$$SAR_{ota}^{UL} (W/kg) = \frac{SAR_{norm}^{UL}}{G(\theta, \varphi)} (W/kg) \quad (7)$$

met G de gain van het toestel, θ de elevatiehoek, en φ de azimuthhoek.

De SAR/kbps tenslotte kan berekend worden (bijvoorbeeld voor de maximum throughput data rates van een systeem) om de achtereenvolgend bepaalde SAR resultaten voor een individueel communicatie systeem te normaliseren zoals voorgesteld door het Federal Office of Public Health (FOPH) in Zwitserland [238].

2.5.2.5 Dosis

Een recente trend in EMV blootstellingsbepaling is het in rekening brengen van de blootstellingstijd (t). Dit wordt de actuele geabsorbeerde dosis genoemd. Een eerste methode om de actuele geabsorbeerde dosis (J/kg) te bepalen is door de SAR_{wba} of SAR_{psa} (W/kg) te vermenigvuldigen met de blootstellingstijd [239,240]. Dit heeft als voordeel dat de uplink en downlink blootstelling kan gecombineerd en vergeleken worden voor verschillende scenarios.

De SAR_{wba} ten gevolge van de downlink blootstelling (bijvoorbeeld, van een basisstation of transmitter antenne) kan berekend worden als volgt:

$$SAR_{wba}^{DL} (W/kg) = \frac{S_{inc} (W/m^2)}{1 (W/m^2)} \times SAR_{wba, norm}^{DL} (W/kg), \quad (8)$$

met S_{inc} de invallende vermogensdichtheid (die berekend kan worden op basis van het ontvangen vermogen van bijvoorbeeld het mobiel toetsel) en $SAR_{wba, norm}^{DL}$ de (tot een vermogensdichtheid van $1 W/m^2$) genormaliseerde SAR_{wba} ten gevolge van de blootstelling aan een specifiek downlink signaal.

De downlink dosis D_{DL} is dan:

$$D_{DL} (J/kg) = SAR_{wba}^{DL} \times T_{exp}, \quad (9)$$

met T_{exp} de totale blootstellingstijd aan het downlink signaal.

De SAR_{wba} ten gevolge van de uplink blootstelling (bijvoorbeeld, van een mobiele telefoon) kan berekend worden als volgt:

$$SAR_{wba}^{UL} (W/kg) = \frac{TX (W)}{1 (W)} \times SAR_{wba, norm}^{UL} (W/kg), \quad (10)$$

met TX het vermogen uitgezonden door de bron en $SAR_{wba, norm}^{UL}$ de (tot een uitgezonden vermogen van 1 W) genormaliseerde SAR_{wba} ten gevolge van het uplink signaal van de bron.

De downlink dosis D_{UL} is dan:

$$D_{UL} \text{ (J/kg)} = SAR_{wba}^{UL} \times T_{use}, \quad (11)$$

met T_{use} de totale duur van de uplink activiteit van het toestel.

De totale lichaamsdosis is dan: $D_{wba} = D_{UL} + D_{DL}$

In het geval van gelokaliseerde blootstelling (bijvoorbeeld, ten gevolge van de uplink straling van een toestel), kan de dosis D_{loc} als volgt berekend worden:

$$D_{loc} = T_{use} \times SAR_{psa} \times \frac{p_{UL}(W)}{p_{UL,max}(W)} \text{ (J/kg)}, \quad (12)$$

met $p_{UL,max}$ het maximum vermogen uitgestraald door het mobiel toestel, p_{UL} het vermogen uitgestraald door het mobiel toestel en T_{use} de totale gebruiksduur van het toestel. De SAR_{psa} voor een specifiek mobiel toestel kan online teruggevonden worden op <http://www.sardatabase.com/>.

Een tweede methode komt uit de context van de marine waarbij de bemanning wordt blootgesteld aan radars en hoogfrequente antennes. Hierbij wordt de zogenaamde jaarlijkse blootstellingsdosis bepaald door het vermenigvuldigen van het spatiaal uitgemiddeld elektrisch veld met de gemiddelde transmissietijd van de apparatuur en de gemiddelde missietijd van de blootgestelde bemanning ten opzichte van een jaar [241]:

$$D_{ann} \text{ (Vh/m)} = E_{spatial} \times 365 \times 24 \text{ (h)} \times t_{transmit} \times t_{mission}, \quad (13)$$

met $E_{spatial}$ de spatiaal uitgemiddelde E-veld sterkte over een aantal meetpunten, $t_{transmit}$ de gemiddelde transmissietijd van de apparatuur (bijvoorbeeld, als een antenne 15 minuten per uur uitzendt, dan is $t_{transmit} = 0.25$) en $t_{mission}$ is de gemiddelde missietijd van het blootgestelde bemanningslid (bijvoorbeeld, als een missie 9 maand per jaar duurt, dan is $t_{mission} = 0.75$).

De jaarlijkse blootstellingsdosis kan ook als volgt berekend worden (ICNIRP):

$$D_{ann, ICNIRP} \text{ (h)} = \left(\frac{E_{spatial}}{E_{ref}} \right)^2 \times 365 \times 24 \text{ (h)} \times t_{transmit} \times t_{mission}, \quad (14)$$

met E_{ref} het ICNIRP referentieniveau voor de specifieke frequentie van de antenne apparatuur.

2.5.3 Discussie 'nieuwe blootstellingsindex'

Momenteel focust onderzoek over RF blootstelling zich vooral op het niveau van de individuele gebruiker. In het project LEXNET probeert men echter het onderzoek naar blootstelling te verplaatsen van het niveau van de individuele gebruiker naar het netwerk niveau [242]. Hiervoor zal een nieuwe metriek, de blootstellingsindex, ontworpen worden.

De blootstellingsindex (EI) combineert, net zoals de absorptiedosis, de uplink en downlink blootstelling. De blootstellingsindex kan bepaald worden voor de totale lichaamsblootstelling (EI_{wb}) en de lokale blootstelling (EI_{loc}). Beide componenten hangen af van het uitgezonden vermogen van de gebruikerstoestellen (TX) alsook van het vermogen dat de gebruikers ontvangen afkomstig van de basisstationantennes (RX) in het gebied. De blootstellingsindex zal dus zowel de blootstelling afkomstig van de gebruikerstoestellen als die van de netwerkapparatuur in rekening brengen.

De blootstellingsindex voor totale lichaams- en lokale blootstelling kan als volgt berekend worden:

$$EI_{wb} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} D_{wb,i,j}^{UL} \times \bar{P}_{TX,i,j} + D_{wb,i,j}^{DL} \times \bar{S}_{RX,i,j} \quad (15)$$

$$EI_{loc} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} D_{loc,i,j}^{UL} \times \bar{P}_{TX,i,j} + D_{loc,i,j}^{DL} \times \bar{S}_{RX,i,j} \quad (16)$$

met D_{wb}^{UL} en D_{wb}^{DL} respectievelijk de totale lichaamsdosis voor uplink (genormaliseerd naar 1 W uitgestraald vermogen) en downlink (genormaliseerd naar een invallende vermogendichtheid van 1 W/m²) communicatie; D_{loc}^{UL} en D_{loc}^{DL} respectievelijk de piek lokale geabsorbeerde dosis voor uplink (genormaliseerd naar 1 W uitgestraald vermogen) en downlink (genormaliseerd naar een invallende vermogendichtheid van 1 W/m²) communicatie; $\bar{P}_{TX}$ het uitgestraalde vermogen van het mobiele toestel; $\bar{S}_{RX}$ de invallende vermogendichtheid; i sommeert over alle gebruikers (n is het totaal aantal gebruikers) en de sommatie over j sommeert over alle in aanmerking komende technologieën en/of cellen in een bepaald gebied. De parameters D_{wb}^{UL} , D_{wb}^{DL} , D_{loc}^{UL} en D_{loc}^{DL} zijn afhankelijk van het gebied, het gebruikersprofiel, de gebruikersomgeving en/of de tijdsperiode, maar het brengt ook de transferfunctie tussen de zend- en ontvangstzijde en de SAR in rekening en in het bijzonder de SAR_{wba} voor parameters D_{wb}^{UL} en D_{wb}^{DL} en de $psaSAR$ in 10g weefsel voor parameters D_{loc}^{UL} en D_{loc}^{DL} . Tabel 3 toont de afhankelijk van A, B, C, D en van het type gebied.

	D_{wb}^{UL} en D_{loc}^{UL}	D_{wb}^{DL} en D_{loc}^{DL}
Type gebied		X
Gebruikersomgeving	X	X
Tijdsperiode (netwerk belasting)		X
Gebruikersprofiel	X	

Tabel 3 Afhankelijkheden tussen parameters D_{wb}^{UL} , D_{wb}^{DL} , D_{loc}^{UL} en D_{loc}^{DL} en het type gebied, de gebruikersomgeving, tijdsperiode en het gebruikersprofiel ('x' geeft een afhankelijkheid aan)

Volgende informatie kan meegegeven worden over het type gebied, de gebruikersomgeving, de tijdsperiode en het gebruikersprofiel:

- Type gebied
 - Stedelijk, halfstedelijk of ruraal
 - Oppervlakte
 - Aantal (outdoor) cellen en hun grootte (bv. een radius van 250 m)
 - Bevolkingsdichtheid
- Gebruikersomgeving
 - Binnenshuis (opgedeeld in thuisomgeving, kantoor, etc.), buitenshuis of publiek transport
 - Netwerken (bv. 2G, 3G, etc.)
 - Kleine cellen (bv. WiFi router, femtocel, etc.)
 - Kind of volwassen
- Tijdsperiode
 - Verschillende belastingen van het netwerk op verschillende tijdstippen gedurende de dag
 - TX is niet gecorreleerd met de periode van de dag
 - Twee trafieekprofielen: één voor data en één voor telefoongesprekken
- Gebruikersprofiel
 - (gemiddeld) aantal minuten voor een telefoongesprek (per dag)
 - (gemiddeld) hoeveelheid data (per dag)

De parameters D_{wb}^{UL} , D_{wb}^{DL} , D_{loc}^{UL} en D_{loc}^{DL} in (15) kunnen dan ruwweg als volgt bepaald worden:

$$D_{wb,i,j}^{UL} = t_{use}^{i,j} \times SAR_{wb,TX}^j \quad (17)$$

$$D_{wb,i,j}^{DL} = t_{exp}^{i,j} \times SAR_{wb,RX}^j \times d_{load}^j \quad (18)$$

$$D_{loc,i,j}^{UL} = t_{use}^{i,j} \times SAR_{10g,TX}^j \quad (19)$$

$$D_{loc,i,j}^{DL} = t_{exp}^{i,j} \times SAR_{10g,RX}^j \times d_{load}^j \quad (20)$$

met

- $t_{use}^{i,j}$ is de tijd dat persoon i een toestel gebruikt met technologie j ;

- $t_{exp}^{i,j}$ is de blootstellingstijd van persoon i door technologie/cel j ;
- $SAR_{wb, TX/RX}^j$ is de SAR_{wba} voor technologie j genormaliseerd naar een zender van 1 W of een ontvanger van 1 W/m^2 , respectievelijk;
- $SAR_{10g, TX/RX}^j$ is de SAR_{psa} in 10 g weefsel voor technologie j genormaliseerd naar een zender van 1 W of een ontvanger van 1 W/m^2 , respectievelijk;
- d_{load}^j is de distributie van de traffic voor technologie/cel j ;

Deze blootstellingsindices stellen dus een gemiddelde blootstellingsdosis (whole-body of gelokaliseerd) per gebruiker voor in het te onderzoeken gebied of scenario voor een bepaald tijdsinterval (bv. 24 uur).

Voor het optimaliseren van de blootstelling zijn er nu twee mogelijkheden:

- Optimaliseren van het lokale gedeelte en dan een beoordeling van de whole-body index, of
- Optimaliseren van het whole-body gedeelte en dan de lokale index updaten.

Omtrent deze blootstellingsindex is er veel discussie maar de bedoeling is dus zowel downlink als uplink de blootstelling in rekening te brengen.

2.5.4 Technische aanpassingen aan basisstationnetwerken om de stralingsblootstelling van bevolking te reduceren

Onderzoek [244] heeft aangetoond dat het plaatsen van femtocellen in indooromgevingen (zoals bv. in bureauruimtes) de blootstelling aan de straling van de mobiele toestellen verlaagt.

Ook de introductie van sleep modes kan er voor zorgen dat de straling van het netwerk beperkt wordt. Momenteel staan alle basisstations in een netwerk aan, ook wanneer deze niet gebruikt worden door een gebruiker. Deze basisstations produceren dan een zekere straling in het netwerk, terwijl deze eigenlijk niet nodig is. Wanneer deze basisstations in sleep mode zouden geplaatst worden, zou dit resulteren in een verlaagde blootstelling op de tijdstippen dat het basisstation niet gebruikt wordt.

Optimaliseroutines kunnen ontwikkeld worden die de blootstelling minimaliseren zonder dat hierbij ingeboet wordt op de kwaliteit van de informatieoverdracht. Zowel de netwerktopologie als het dataverkeer over verschillende netwerktechnologieën kan geoptimaliseerd worden naar een minimale blootstelling zonder kwaliteitsverlies. Deze optimalisatie vereist een nieuwe blootstellingsmetriek welke de totale blootstelling in een gebied kwantificeert en zowel de blootstelling van basisstationantennes (verre veld- of downlink-blootstelling) als deze van de mobiele toestellen (nabij veld- of uplink-blootstelling) in rekening brengt. Binnen het Europese FP7 project LexNet wordt een globale blootstellingsmetriek ontwikkeld die toelaat de blootstelling te evalueren en te minimaliseren op netwerkniveau.

3 Kosten en baten

Het doel van dit onderdeel van de studie is om de evolutie in blootstelling in kaart te brengen bij een hogere (data)gebruiksvraag. Hiervoor zal er gekeken worden naar het huidige tijdstip en een toekomstig tijdstip. Voor het toekomstige tijdstip zullen er verschillende scenario's onderzocht worden en de invloed van toekomstige netwerken en technieken op *blootstelling* en *kost* zal bestudeerd worden.

De berekeningen van deze scenario's moeten ook de complexiteit omwille van de vele parameters blootleggen. Deze berekeningen hebben dan ook een educatief karakter.

Alle keuzes die hierna worden voorgesteld werden vastgelegd in samenspraak met LNE en de Belgische operatoren. Hierbij was het belangrijk dat we tot realistische 'worst-case' scenario's kwamen. Een worst-case scenario houdt hierin dat het netwerk ontworpen wordt voor het moment van de dag waarop het grootste aantal simultane gebruikers actief is.

3.1 Veronderstellingen

Volgende veronderstellingen werden gemaakt in samenspraak met LNE en de Belgische operatoren:

1. Alle blootstellingsscenario's zullen uitgerekend worden voor het gebied van de stad Gent gelegen binnen de binnenring. Hierna het "blootstellingsgebied" genoemd. Er wordt voor dit gebied gekozen omdat hiervan een 3D model beschikbaar was. Dit gebied werd vastgelegd in samenspraak met de operatoren en LNE. Dit gebied is in Figuur 1 omkaderd in het rood.



Figuur 1 Blootstellingsgebied in Gent

2. Voor het ontwerpen van het netwerk wordt vertrokken van een "greenfield" roll-out:
 - a. "Greenfield" betekent hier echter dat er initieel zal uitgegaan worden van de plaatsen van de huidige antennes van de drie operatoren op de masten en gebouwen in het blootstellingsgebied (afgeleid uit de kaart van sites.bipt.be). De mix van deze locaties van de drie operatoren zal gebruikt worden. Dit gaat om ongeveer een 75-tal sites. Indien deze locaties ontoereikend zouden blijken, kunnen er in tweede instantie nieuwe locaties worden toegevoegd. Deze zullen bepaald worden op basis van de gebouwen in het blootstellingsgebied. Als beperking kan bijvoorbeeld enkel maar gebruikt gemaakt worden van gebouwen hoger dan 30 m. Hierdoor kunnen een extra 30 locaties gebruikt worden indien noodzakelijk.
 - b. Het netwerk wordt uitgerold voor 1 operator met 33% penetratiegraad in het gebied.
3. Enkel de blootstelling van de basisstation antennes wordt beschouwd, de blootstelling van de draadloze gebruikersapparaten behoort niet tot de bevoegdheid van het Vlaams Gewest.
 - a. Er wordt enkel vertrokken van **outdoor** antennes. Het installeren van indoorantennes is meestal op initiatief van de eigenaar of huurder(s) van het gebouw, en dus niet onder controle van de operatoren.
4. Alle basisstations worden **outdoor** geplaatst, maar er wordt ook **indoor coverage** voor de gebruikers voorzien.
5. Als 3G technologie wordt HSPA beschouwd bij een frequentie van 2.1 GHz. Als 4G technologie wordt LTE-Advanced beschouwd bij een frequentie van 1.8 GHz en 800 MHz (licenties toegekend op 12/11/2013). De scenario's voor 4G technologie zullen dus allen twee keer uitgerekend worden: één keer bij 1.8 GHz en één keer bij 800 MHz.

Voor het bepalen van de traffic veroorzaakt door de gebruikers zullen we volgende veronderstellingen gebruiken:

1. De traffic veroorzaakt door de gebruikers kan in twee categorieën worden opgedeeld: “voice calls” wat overeenkomt met een mobiel telefoongesprek en “data calls” wat overeenkomt met een gebruiker die aan het surfen is, email aan het lezen is, video of muziek aan het streamen is, etc.
2. Bij het bepalen van de traffic wordt gebruik gemaakt van een aantal parameters ($x_1, y_1, z_1, s_1, g_1, x_2, y_2, z_2, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_g, g_u$ en g_2). Deze parameters stellen vertrouwelijke informatie voor ontvangen van de Belgische mobiele operatoren.
3. Het aantal simultane voice calls op een bepaald tijdstip/uur wordt als volgt bepaald:
 - a. In het vooropgestelde gebied gebeuren ongeveer x_1 voice calls per dag (informatie ontvangen van de operatoren).
 - b. Op basis van de voice traffic distribution per dag (informatie ontvangen van de operatoren) weten we hoeveel percent van deze voice calls plaatsvinden op elk uur van de dag. Bijvoorbeeld in een tijdslot van één uur vinden $y_1\%$ van de totale voice calls per dag plaats. Dit resulteert dus in: $y_1/100 * x_1$ voice calls per dag = z_1 voice calls in dit tijdslot. Dit is het aantal voice calls geaggregeerd over één uur en niet het aantal gebruikers dat simultaan aanwezig is.
 - c. Om het aantal simultane voice calls te bepalen, moeten we gebruik maken van de gemiddelde duur van een voice call. Deze bedraagt gemiddeld s_1 seconden (informatie ontvangen van de operatoren).
 - d. In de veronderstelling dat de startmomenten van deze voice calls uniform verdeeld zijn binnen een tijdslot van een uur, kunnen we het aantal **simultane** voice calls als volgt bepalen: z_1 voice call per uur * s_1 seconden/3600 seconden = g_1 simultane voice gebruikers. Merk op dat het aantal simultane gebruikers een geheel getal is. Het resultaat van bovenstaande berekening zal dus naar boven afgerond worden.

Op deze manier hebben we de worst case binnen het beschouwde uur bepaald. Op basis van deze worst case zal het netwerk voor dat uur ontworpen worden. Om correcte resultaten te bekomen voor dit netwerk, zullen voor dit uur meerdere simulaties uitgevoerd worden. Een 40-tal simulaties volstaat om een accurate verwachtingswaarde voor de verschillende parameters (blootstelling en kost) te bekomen. Het aantal simultane data calls op een bepaald tijdstip/uur wordt als volgt bepaald:

- a. In het vooropgestelde gebied wordt dagelijks een datavolume van x_2 gigabyte vewerkt (informatie ontvangen van de operatoren).
- b. Op basis van de data traffic distribution per dag (informatie ontvangen van de operatoren) weten we hoeveel percent van dit datavolume verwerkt wordt op elk uur van de dag. Bijvoorbeeld in een tijdslot van één uur zal $y_2\%$ van het totaal datavolume per dag verwerkt worden. Dit resulteert dus in een datavolume van $y_2/100 * x_2$ gigabyte per dag = z_2 gigabyte per uur voor dit tijdslot.
- c. Om het aantal simultane data calls te bepalen, moeten we weten hoeveel data gebruikers actief zullen zijn over het tijdslot van één uur. Hiervoor bepalen we eerst hoeveel data één gebruiker zal gebruiken gedurende één uur.
 - i. In [245] vinden we per device het gebruikte datavolume per maand terug. Dit kan omgerekend worden naar gebruikt datavolume per uur:
 - Smartphone: 342 MB per maand -> $(342/30)/24$ MB per uur = 0.475 MB per uur
 - Non-smartphone: 6.8 MB per maand -> 0.009 MB per uur
 - Tablet: 820 MB per maand -> 1.138 MB per uur
 - USB/modem: 2503 MB per maand -> 3.476 MB per uur
 - ii. Op basis van de verdeling van de verschillende device types (d_i = aantal van device i , informatie ontvangen van operatoren) kunnen we het gemiddeld verbruik van een device per uur bepalen:
 - Smartphone: $d_1/100 * 0.475$ MB per uur
 - Non-smartphone: $d_2/100 * 0.009$ MB per uur
 - Tablet: $d_3/100 * 1.138$ MB per uur

- USB/modem: $d_4/100 * 3.476$ MB per uur

De som van bovenstaande getallen resulteert in het gemiddeld verbruik van een (referentie) device per uur: d KB per uur.

- iii. Er wordt verondersteld dat er per gebruiker eigenlijk $d_5\%$ device wordt gebruikt (informatie ontvangen van de operatoren). d_5 is een factor die in rekening brengt dat gebruikers vaak over meerdere draadloze gebruikerstoestellen beschikken (bv. tablet, mobiele telefoon en laptop). Dit resulteert dan in een gebruik van $d_5/100 * d$ KB per uur = d_g KB per gebruiker per uur.
- iv. Op basis van het verwerkte datavolume per uur en het dataverbruik van een gebruiker per uur kunnen we bepalen hoeveel datagebruikers er actief zijn binnen een tijdslot van een uur: z_2 gigabyte per uur/ d_g KB per uur = g_u gebruikers per uur. Dit is het aantal gebruikers geaggregeerd over één uur en niet het aantal gebruikers dat simultaan aanwezig is.

- d. Om het aantal simultane gebruikers te kennen, moeten we opnieuw de gemiddelde duur dat een datagebruiker actief is kennen.

In [246] werd de gemiddelde gebruiksduur van mobiele applicaties bestudeerd. Op basis van de gebruiksduur van applicaties die dataverkeer gebruiken (browser, applicatie van newssites, mail, etc.) kunnen we de gemiddelde duur dat een datagebruiker actief is per uur bepalen. Deze bedraagt ongeveer 1 minuut per uur.

- e. In de veronderstelling dat de data calls uniform verdeeld zijn binnen een tijdslot van een uur, kunnen we het aantal **simultane** data calls als volgt bepalen:

g_u gebruikers per uur * 60 seconden/3600 seconden = g_2 simultane datagebruikers.

Op deze manier hebben we de worst case binnen het beschouwde uur bepaald. Op basis van deze worst case zal het netwerk voor dat uur ontworpen worden. Om correct resultaten te bekomen omtrent dit netwerk, zullen voor dit uur meerdere simulaties uitgevoerd worden. Een 40-tal simulaties volstaat om stabiele gemiddelde en maximale waarden voor de blootstelling en kost parameters te bekomen.

4. Voor de bit rate worden volgende veronderstellingen aangenomen:

- a. Een voice call gebruikt typisch 64 kbps (zowel op het huidige als het toekomstige tijdstip)
- b. Een data call gebruikt 1 Mbps op het huidige tijdstip en 2 Mbps op het toekomstige tijdstip (ruwe data inclusief overhead).

Hetzelfde aantal simultane gebruikers zal verondersteld worden op het huidige en toekomstige tijdstip. Enkel de bit rate voor data calls zal verschillen.

5. Het totaal aantal gebruikers (dus voice call en data call gebruikers samen) zal uniform verdeeld worden over het blootstellingsgebied.
6. Via de operatoren hebben we de kosten voor de verschillende types basisstations en scenarios ontvangen als een percentage. Dit percentage zal omgerekend worden op een unit. Zo zal een kost van 100% overeenkomen met 100 units, terwijl een kost van 25% overeenkomt met 25 units.
7. Voor de 3G technologie wordt SISO (1 antenne in basisstation en 1 antenne in gebruikersapparaat) verondersteld. Voor de 4G technologie wordt MIMO (2 antennes in basisstation en 2 antennes in gebruikersapparaat) verondersteld. In het linkbudget zal rekening gehouden worden met de winst door MIMO.
8. Voor path loss modellen zal het Walfisch Ikegami suburban path loss model worden gebruikt.
9. Volgende link budgetten zullen gebruikt worden in deze studie:
 - a. 3G Macrocell base station

Parameter	Value
Frequency	2.1 GHz
Maximum input power base station antenna	43 dBm
Antenna gain of base station	17.4 dBi
Antenna gain of receiver	0 dBi
Feeder loss base station	2 dB
Feeder loss receiver	0 dB
Fade margin	10 dB
Yearly availability	99.995%

Interference margin	5.23 dB
Noise figure of receiver	9 dB
Implementation loss of receiver	0 dB
MIMO	1x1
Coverage requirement	90%
Receiver SNR	[-3.1 0.1 3.4 6.0 7.1 9.6 15.6] (1)
Bandwidth	5 MHz
Soft handover gain receiver	1.5 dB
Building penetration loss	18 dB

(1) Format: [1/4 QPSK, 1/2 QPSK, 3/4 QPSK, 3/4 8-QAM, 1/2 16-QAM, 3/4 16-QAM, 3/4 64-QAM]

b. 4G Macrocell base station

Parameter	Value
Frequency	1.8 GHz en 800 MHz
Maximum input power base station antenna	43 dBm
Antenna gain of base station	18 dBi
Antenna gain of receiver	0 dBi
Feeder loss base station	2 dB
Feeder loss receiver	0 dB
Fade margin	10 dB
Yearly availability	99.995%
Interference margin	5.23 dB
Noise figure of receiver	8 dB
Implementation loss of receiver	0 dB
MIMO	2x2
Coverage requirement	90%
Receiver SNR	[-1.5 3 10.5 14 19 23 29.4] ⁽¹⁾
Bandwidth	5 MHz
Soft handover gain receiver	0 dB
Building penetration loss	18 dB

(1) Format: [1/3 QPSK, 1/2 QPSK, 2/3 QPSK, 1/2 16-QAM, 2/3 16-QAM, 1/2 64-QAM, 2/3 64-QAM]

c. 4G small cell

Parameter	Value
Frequency	1.8 GHz en 800 MHz
Maximum input power base station antenna	33 dBm
Antenna gain of base station	4 dBi
Antenna gain of receiver	0 dBi
Feeder loss base station	2 dB
Feeder loss receiver	0 dB
Fade margin	10 dB
Yearly availability	99.995%
Interference margin	5.23 dB
Noise figure of receiver	8 dB
Implementation loss of receiver	0 dB
MIMO	2x2
Coverage requirement	90%
Receiver SNR	[-1.5 3 10.5 14 19 23 29.4] ⁽¹⁾
Bandwidth	5 MHz
Soft handover gain receiver	0 dB
Building penetration loss	18 dB

(1) Format: [1/3 QPSK, 1/2 QPSK, 2/3 QPSK, 1/2 16-QAM, 2/3 16-QAM, 1/2 64-QAM, 2/3 64-QAM]

3.2 Scenario's

De scenario's werden bekomen na overleg met LNE en feedback van de mobiele operatoren. Elk scenario krijgt een nummer en een logische naam voor de duidelijkheid.

Scenario I: huidige tijdstip-macro

Het netwerk voor dit tijdstip zal ontworpen worden voor een 3G technologie waarbij enkel macrocellen gebruikt zullen worden. Dit scenario geeft een idee over het huidige netwerk. *Hierbij wordt voor de vereiste capaciteit de laagste kost nagestreefd. Er wordt hierbij niet gestreefd naar minimale blootstelling; er moet enkel voldaan worden aan de Vlaamse blootstellingsnorm.*

Het toekomstige tijdstip: Als geavanceerde technieken zal gekeken worden naar 4G (LTE-Advanced) en een mix van macrocellen en small cells.

Scenario IIa: toekomstig-3G-macro-kost

Het netwerk wordt ontworpen voor een 3G technologie waarbij enkel macrocellen gebruikt zullen worden. *Hierbij wordt voor de vereiste capaciteit de **laagste kost** nagestreefd. Er wordt hierbij niet gestreefd naar minimale blootstelling; er moet enkel voldaan worden aan de Vlaamse blootstellingsnorm.*

Scenario IIb: toekomstig-3G-macro-blootstelling

Het netwerk wordt ontworpen voor een 3G technologie waarbij enkel macrocellen gebruikt zullen worden. *Hierbij wordt naast de vereiste capaciteit geoptimaliseerd naar de **blootstelling**. Kostoptimalisatie wordt niet uitgevoerd.*

Scenario IIIa: toekomstig-4G-macro-kost

Het netwerk wordt ontworpen voor een 4G technologie waarbij enkel macrocellen gebruikt zullen worden. *Hierbij wordt voor de vereiste capaciteit de **laagste kost** nagestreefd. Er wordt hierbij niet gestreefd naar minimale blootstelling; er moet enkel voldaan worden aan de Vlaamse blootstellingsnorm.*

Scenario IIIb: toekomstig-4G-macro-blootstelling

Het netwerk wordt ontworpen voor een 4G technologie waarbij enkel macrocellen gebruikt zullen worden. *Hierbij wordt naast de vereiste capaciteit geoptimaliseerd naar de **blootstelling**. Kostoptimalisatie wordt niet uitgevoerd.*

Scenario IVa: toekomstig-4G-mix-kost

Het netwerk wordt ontworpen voor een 4G technologie waarbij gebruik gemaakt wordt van een mix van macrocellen en small cells. 70% van alle basisstations zullen macrocellen zijn en 30% small cells. *Hierbij wordt voor de vereiste capaciteit de **laagste kost** nagestreefd. Er wordt hierbij niet gestreefd naar minimale blootstelling; er moet enkel voldaan worden aan de Vlaamse blootstellingsnorm.*

Scenario IVb: toekomstig-4G-mix-blootstelling

Het netwerk wordt ontworpen voor een 4G technologie waarbij gebruik gemaakt wordt van een mix van macrocellen en small cells. 70% van alle basisstations zullen macrocellen zijn en 30% small cells. *Hierbij wordt naast de vereiste capaciteit geoptimaliseerd naar de **blootstelling**. Kostoptimalisatie wordt niet uitgevoerd.*

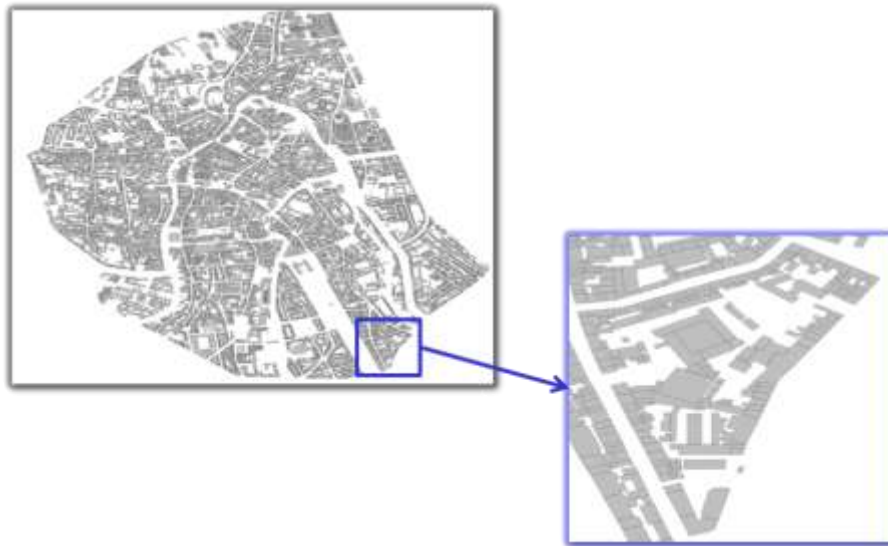
Scenario I is het referentiescenario en geeft een beeld van het huidige netwerk. In alle andere scenario's zal een netwerk voor de toekomst ontworpen worden (waarbij (data)gebruiksvraag verhoogd is ten opzichte van het eerste scenario), waardoor de invloed van onder de andere keuze van technologie en

het type basisstation op de kost en de blootstelling onderzocht kan worden. Veel gegevens van deze berekeningen zijn inschattingen op basis van literatuur en de input van de operatoren via LNE.

3.3 Aanpak

3.3.1 Capaciteitsgebaseerde 3D planningstool voor ontwerpen en optimaliseren van draadloze toegangsnetwerken

Voor het ontwerpen van de netwerken zal gebruik gemaakt worden van een capaciteitsgebaseerde planningstool [247,248]. Capaciteitsgebaseerd betekent dat de tool netwerken zal ontwerpen die reageren op de ogenblikkelijke bit rate gevraagd door de gebruikers. 3D betekent dat de tool de gebouwen in het beschouwde gebied in rekening zal brengen om te bepalen of een gebruiker zich in line-of-sight of non-line-of-sight bevindt ten opzichte van een bepaald basisstation. De 3D data omtrent de beschouwde omgeving wordt in rekening gebracht door middel van een shapefile. Dit bestand geeft ons informatie omtrent de locatie van de gebouwen en enkele andere karakteristieken (zoals bijvoorbeeld de hoogte van het gebouw). Figuur 2 toont de shapefile voor het beschouwde blootstellingsgebied.



Figuur 2 Shapefile van het blootstellingsgebied

Vermits deze tool capaciteitsgebaseerd is, is het belangrijk om gebruik te maken van realistische traffic. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een aantal statistische distributies:

- Gebruikersdistributie: deze distributie geeft het aantal actieve gebruikers op een bepaald moment weer. In deze studie zal hiervoor gebruik gemaakt worden van de informatie ontvangen van de operatoren.
- Duur distributie: deze distributie geeft aan hoe lang een gebruiker actief blijft in het netwerk en is een lognormale distributie. In deze studie beschouwen we echter één tijdstip, namelijk dit tijdstip met het maximale aantal simultane gebruikers, waardoor deze distributie hier niet zal toegepast worden. Locatiedistributie: deze distributie bepaalt de locatie van iedere gebruiker. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een uniforme distributie.
- Bit rate distributie: deze distributie geeft voor iedere gebruiker de gevraagde bit rate terug. In deze studie zullen we twee type gebruikers hebben: de voice gebruikers (die aan het telefoneren zijn) en de datagebruikers.

Door de statistische distributies die gebruikt worden in deze tool is het noodzakelijk om voor elk scenario de simulatie meerdere keren uit te voeren zodat er een goede schatting kan gemaakt worden van de verwachtingswaarde van de parameters (meerdere simulaties verkleinen de foutvariantie op berekende verwachtingswaarde). Zoals eerder vermeld volstaan 40 simulaties om een goede schatting te maken.

Het idee achter het algoritme in deze tool is dat men probeert gebruikers zoveel mogelijk te connecteren op door het algoritme reeds geplaatste basisstations, vermits een extra basisstation toevoegen aan het netwerk ook een extra kost met zich meebrengt. Een gebruiker kan enkel connecteren op een reeds geplaatst basisstation indien dit basisstation de capaciteit gevraagd door de gebruiker ook kan leveren en wanneer het padverlies ondervonden door de gebruiker lager is dan het maximaal toegelaten padverlies zodat de kwaliteit van het signaal ook voldoende is.

3.3.2 Optimalisatie naar kost

In de scenario's waarbij geoptimaliseerd wordt naar kost, rekening houdend met de Vlaamse blootstellingsnorm, zal de in deze sectie beschreven aanpak gebruikt worden.

Een belangrijke input parameter voor deze scenario's is de Vlaamse blootstellingsnorm [249]:

- Een cumulatieve immissienorm afhankelijk van de gebruikte frequentie:

Frequentie f [MHz]	Elektrische veldsterkte E [V/m]
10 tot 400	13.7
400 tot 2000	$0.686\sqrt{f}$
2000 tot 10000	30.7

- Een bijkomende norm voor beperking van de maximum blootstelling per antenne voor verblijfplaatsen, opnieuw frequentie-afhankelijk:

Frequentie f [MHz]	Elektrische veldsterkte E [V/m]
10 tot 400	2
400 tot 2000	$0.1\sqrt{f}$
2000 tot 10000	4.48

In deze studie zal de bijkomende norm voor beperking van de maximum blootstelling per antenne voor verblijfplaatsen niet enkel voor verblijfplaatsen worden toegepast, maar overal worden toegepast. Dit is dus een iets strengere eis.

Voor het bepalen van de blootstelling zal gebruik gemaakt worden van een grid over het blootstellingsgebied. Dit grid bevat 2737 punten met zowel in verticale als in horizontale richting een afstand van 50 m tussen twee punten. Het is belangrijk te weten wat de minimale beschouwde afstand (horizontaal) tussen een zendantenne en een gridpunt voor het evalueren van de blootstelling is. Deze afstand wordt hier d_s genoemd en is voor deze studie vastgelegd op 25 m. Dit is ook de afstand vanaf waar ons padverlies model geldig is. Indien we verder over afstand spreken, zal de geometrische afstand tussen basisstation en gebruiker gebruikt worden (dus niet de horizontale afstand). Merk dus op dat wanneer een punt op een afstand kleiner dan 25 m van een basisstation ligt (op grid), de blootstelling van dit basisstation niet in rekening zal gebracht worden voor dit punt.

De waarde voor de blootstelling in elk van de gridpunten komt overeen met de geaggregeerde blootstelling (i.e., de blootstelling ondervonden op dit punt afkomstig van alle basisstations van het netwerk) op dit punt.

Aan de hand van de voorwaarde dat aan de Vlaamse blootstellingsnorm moet voldaan worden in ieder gridpunt, zal er voor elke mogelijke basisstation site berekend worden wat de maximale EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) is. Dit laat op zijn beurt toe om te bepalen wat de maximale input power van de antenne is voor deze site. Het netwerk kan nu ontworpen worden rekening houdend met de beperkingen in EIRP (en dus in input power van de antenne). Deze aanpak werd in [250] voorgesteld voor binnenshuisomgevingen en werd aangepast naar buitenomgevingen relevant voor deze studie.

Optimaliseren van een netwerk naar de kost resulteert in een netwerk met een zo laag mogelijk aantal basisstations waarbij natuurlijk wel voldoende dekking wordt geleverd zodat de gebruikers bediend kunnen worden met de vereiste bit rate. Hiervoor wordt het algoritme voorgesteld in [247] gebruikt (zie ook sectie 3.3.1). Dit algoritme ontwerpt eigenlijk netwerken geoptimaliseerd naar energieverbruik, wat

eigenlijk overeenkomt met kost. Wanneer er wordt geoptimaliseerd naar energieverbruik probeert men ook een zo laag mogelijk aantal basisstations te bekomen.

3.3.3 Optimalisatie naar blootstelling

In de scenario's waarbij geoptimaliseerd wordt naar blootstelling zal de volgende aanpak gebruikt worden. Deze aanpak werd in [250] voorgesteld voor indoor omgevingen en werd aangepast voor de outdoor omgeving relevant voor deze studie. Merk op dat onderstaande stappen enkel de opeenvolgende stappen van het algoritme uitleggen en niet overeenkomen met de stappen voor een uitrol.

In de eerste stap zal het netwerk ontworpen worden waarbij het ingangsvermogen van de antennes beperkt wordt. Voor 4G zal het ingangsvermogen beperkt worden tot 20 dBm, terwijl voor 3G dit beperkt zal worden tot 40 dBm. Het ingangsvermogen voor 3G is hoger dan die voor 4G omdat het in deze stap belangrijk is dat we een goede dekking van de gebruikers krijgen. Het ontwerpen van dit netwerk zal opnieuw gebeuren met het algoritme besproken in Sectie 3.3.2 en voorgesteld werd in [247].

In de tweede stap zal geprobeerd worden om twee basisstations te laten samensmelten tot één nieuw basisstation (mogelijks op een andere locatie). Enkel basisstations die in 125% van elkaars bereik liggen zullen onderzocht worden. 125% bleek een goede afweging zodat we geen combinatie van basisstations moeten onderzoeken die niet in aanmerking komen voor samensmelting en we sluiten hiermee ook geen combinaties van basisstations uit die wel in aanmerkingen komen voor samensmelting. Een samensmelting zal enkel aanvaard worden indien dit leidt tot een lagere blootstelling veroorzaakt door het netwerk en als de reeds bediende gebruikers nog steeds bediend kunnen worden.

In de derde stap wordt er geprobeerd om een basisstation te verwijderen uit het netwerk door het ingangsvermogen van één of meerdere omliggende basisstations te verhogen. Opnieuw zal de aanpassing enkel gebeuren wanneer dit leidt tot een lagere blootstelling veroorzaakt door het netwerk en als de reeds bediende gebruikers nog steeds bediend kunnen worden.

In de laatste stap zal gecontroleerd worden of het ingangsvermogen van elk basisstation verlaagd kan worden. Hierbij is het uiteraard belangrijk dat de reeds bediende gebruikers nog steeds bediend kunnen worden.

3.3.4 Performantie ontworpen netwerken

De netwerken ontworpen voor de verschillende scenario's zullen beoordeeld worden op basis van hun kost en de veroorzaakte blootstelling.

Voor het bepalen van de kost zal het aantal basisstations vermenigvuldigd worden met de kost (in units) overeenkomstig met het type en de situatie (reeds bestaande site of een nieuwe site). Op basis van de 40 simulaties per scenario zal een betrouwbare verwachtingswaarde voor zowel de CapEx als de OpEx kost bekomen worden. De CapEx (Capital Expenditures) kost geeft de initiële kost voor het aanschaffen en plaatsen van een basisstation weer. De OpEx/jaar (Operating Expenditures) kost geeft de jaarlijkse terugkerende kosten aan voor het onderhouden en operationeel houden van het basisstation.

Op basis van de 40 simulaties van de blootstellingswaarden in de gridpunten (zie Sectie 3.3.2) zal de spatiaal gemiddelde en spatiaal maximale (95^{ste} percentiel) blootstellingswaarde bepaald worden.

3.4 Resultaten

In Tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de absolute waarden voor de performantieparameters van de netwerken ontworpen voor de verschillende scenario's. Volgende parameters worden weergegeven:

- E_{avg} : geeft het spatiaal gemiddelde weer voor de blootstelling veroorzaakt door het netwerk (in mV/m)
- E_{max} : geeft het spatiaal maximum (95^{ste} percentiel) weer voor de blootstelling veroorzaakt door het netwerk (in mV/m)
- $\langle CapEx \rangle$: geeft de verwachtingswaarde voor de CapEx van het netwerk (in units)

- <OpEx/jaar>: geeft de verwachtingswaarde voor de OpEx/jaar van het netwerk (in units)
- <dekking>: geeft de verwachtingswaarde voor het percentage van gebruikers dat gedekt is door het netwerk (in %)

In de volgende secties zullen de resultaten voor elke parameter in detail besproken worden.

Scenario	Tijdstip	E_{avg} [mV/m]	E_{max} [mV/m]	E[CapEx] [units]	E[OpEx/jaar] [units]	E[dekking] [%]
Scen 1 (ref scen)	Huidig	188	575	718	39	99.6
Scen 2a	Toekomst	237	746	1054	57	98.3
Scen 2b	Toekomst	116	370	1131	61	94.1
Scen 3a @1800MHz	Toekomst	152	463	457	28	99.5
Scen 3a @800MHz	Toekomst	120	352	387	23	100
Scen 3b @1800MHz	Toekomst	13	40	690	42	99.6
Scen 3b @800MHz	Toekomst	13	38	606	37	99.9
Scen 4a @1800MHz	Toekomst	110	327	368	22	99.1
Scen 4a @800MHz	Toekomst	99	271	349	32	100
Scen 4b @1800MHz	Toekomst	24	71	449	27	99.4
Scen 4b @800MHz	Toekomst	10	27	409	24	99.9

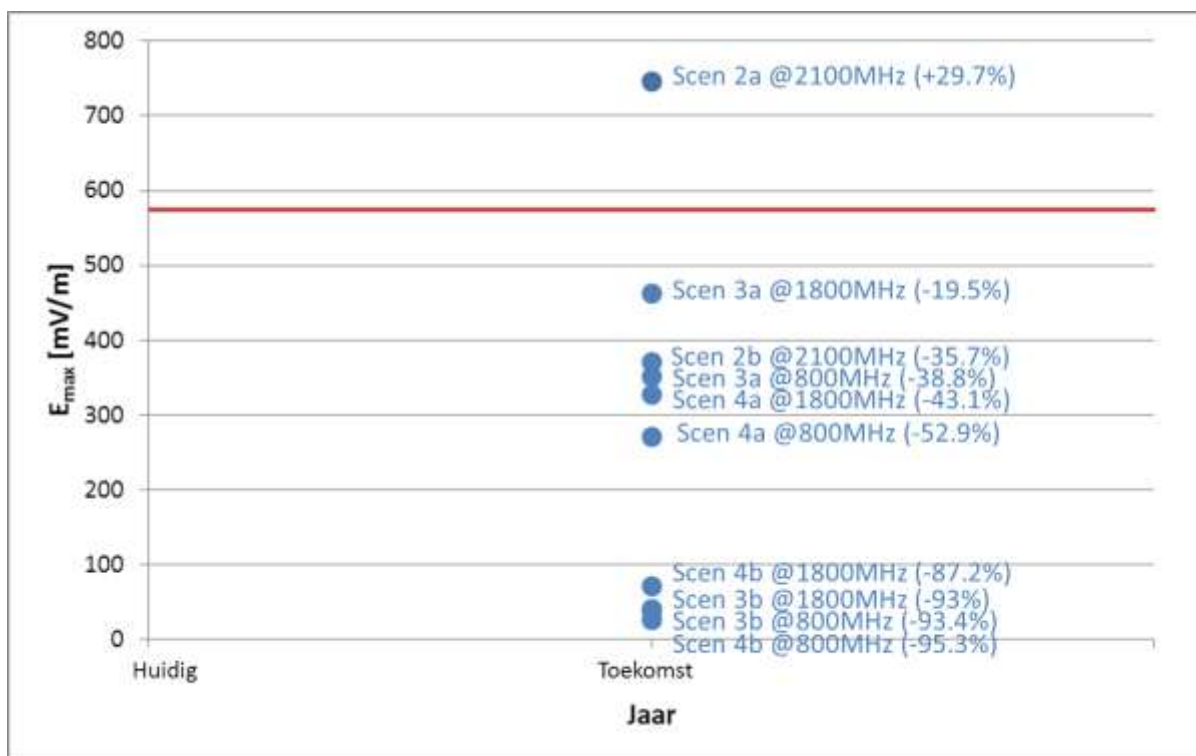
Tabel 4 Overzichtstabel van de resultaten voor de verschillende scenario's

3.4.1 Spatiale blootstelling: gemiddeld E_{avg} en maximaal E_{max}

Figuur 3 en Figuur 4 geven een overzicht van de resultaten voor de verschillende scenario's voor de spatiaal gemiddelde blootstelling E_{avg} en de spatiaal maximaal blootstelling E_{max} . Het referentiescenario, scenario 1, wordt in deze figuren aangeduid met een rode lijn. Alle andere scenario's zijn aangegeven met een blauwe cirkel en vermelden ook het relatief verschil in E_{avg} , respectievelijk E_{max} , (in %) ten opzichte van het referentiescenario. Een hogere blootstelling leidt tot een positief relatief verschil, een lagere blootstelling tot een negatief relatief verschil. In het algemeen zien we dezelfde verhoudingen in E_{avg} als voor E_{max} .



Figuur 3 Gemiddelde spatiale blootstelling E_{avg} voor de verschillende scenario's



Figuur 4 Maximale spatiale blootstelling E_{max} voor de verschillende scenario's

Scenario 2a leidt tot een hogere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 237 mV/m i.e. 26.1% hoger t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 746 mV/m i.e. 29.7% hoger t.o.v. 575 mV/m). De reden hiervoor is dat voor het toekomstige tijdstip de datagebruikers een bit rate van 2 Mbps vereisen in tegenstelling tot de 1 Mbps voor het huidige tijdstip. Door deze verhoging in bit rate zullen meer basisstations nodig zijn wat leidt tot een hogere bit rate. Scenario 2a is overigens geoptimaliseerd naar kost en niet naar blootstelling.

Scenario 3a leidt tot een lagere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 152 mV/m bij 1800 MHz i.e. 19.1% lager en 120 mV/m bij 800 MHz i.e. 36.2% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 463 mV/m bij 1800 MHz i.e. 19.5% lager en 352 mV/m bij 800 MHz i.e. 38.8% lager t.o.v. 575 mV/m). Het gebruik van 4G technologie en 2x2 MIMO resulteert in een hogere bereik en een hogere capaciteit per basisstation. Hierdoor kunnen meer gebruikers bediend worden door één basisstation waardoor het netwerk dus minder basisstations nodig zal hebben. Merk ook op dat de Vlaamse blootstellingsnorm (Sectie 3.3.2) een lagere maximale blootstelling oplegt voor lagere frequentie wat dus ook resulteert in lagere E_{max} . Daarnaast is de blootstelling ook lager bij 800 MHz dan bij 1800 MHz. De lagere frequentie zal leiden tot een hoger bereik van een basisstation waardoor ook verder gelegen gebruikers door één basisstation bediend kunnen worden. Ook hier zal de Vlaamse blootstellingsnorm een rol spelen. Merk echter wel op dat de penetratie van elektromagnetische straling in het lichaam hoger is bij 800 MHz dan bij 1800 MHz. De verhouding van de volledige lichaamsabsorptie SAR_{wb} (in een stedelijke multipad omgeving) van 800 MHz t.o.v. 1800 MHz bedraagt namelijk 1.15 voor eenzelfde totale invallende vermogendichtheid [251,252].

Scenario 2b leidt tot een lagere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 116 mV/m i.e. 38.3% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 370 mV/m i.e. 35.7% lager t.o.v. 575 mV/m). De reden hiervoor is dat scenario 2b is geoptimaliseerd naar blootstelling in tegenstelling tot het referentie scenario (en scenario 2a). Scenario 2b heeft echter een hogere blootstelling dan de andere scenario's (scenario 3b en 4b) geoptimaliseerd naar blootstelling door het gebruik van 3G, terwijl in de andere scenario's gebruik gemaakt wordt van 4G en 2x2 MIMO.

Scenario 4a leidt tot een lagere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 110 mV/m bij 1800 MHz i.e. 41.5% lager en 99 mV/m bij 800 MHz i.e. 47.3% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 327 mV/m bij 1800 MHz i.e. 43.1% lager en 271 mV/m bij 800 MHz i.e. 52.9% lager t.o.v. 575 mV/m) door het gebruik van 4G technologie en 2x2 MIMO zoals bij scenario 3a. Scenario 4a heeft ook echter een lagere E_{avg} dan scenario 3a door het gebruik van femtocellen. Deze femtocellen hebben een beperkt bereik door een lagere input power van de antenne en zorgen dus voor minder blootstelling. Merk ook op dat de Vlaamse blootstellingsnorm (Sectie 3.3.2) een lagere maximale blootstelling oplegt voor lagere frequentie wat dus ook resulteert in lagere blootstelling. De E_{avg} en E_{max} is opnieuw lager bij 800 MHz dan bij 1800 MHz door de lagere frequentie. Ook hier zal de Vlaamse blootstellingsnorm opnieuw een rol spelen.

Scenario 4b bij 1800 MHz heeft een lagere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 24 mV/m i.e. 87.2% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 71 mV/m i.e. 87.7% lager t.o.v. 575 mV/m) vermits dit netwerk geoptimaliseerd is naar blootstelling daar waar het referentie scenario geoptimaliseerd is naar kost. Daarnaast wordt in scenario 4b bij 1800 MHz ook gebruik gemaakt 4G technologie en 2x2 MIMO wat resulteert in een hoger bereik en capaciteit per basisstation. De blootstelling bij scenario 3b is echter lager dan voor scenario 4b bij 1800 MHz. Dit is te wijten aan het feit dat bij 1800 MHz het bereik van de femtocellen beperkt is. Hierdoor moeten er meer femtocellen ingezet worden om een macrocel te vervangen dan bij 800 MHz wat resulteert in een hogere blootstelling.

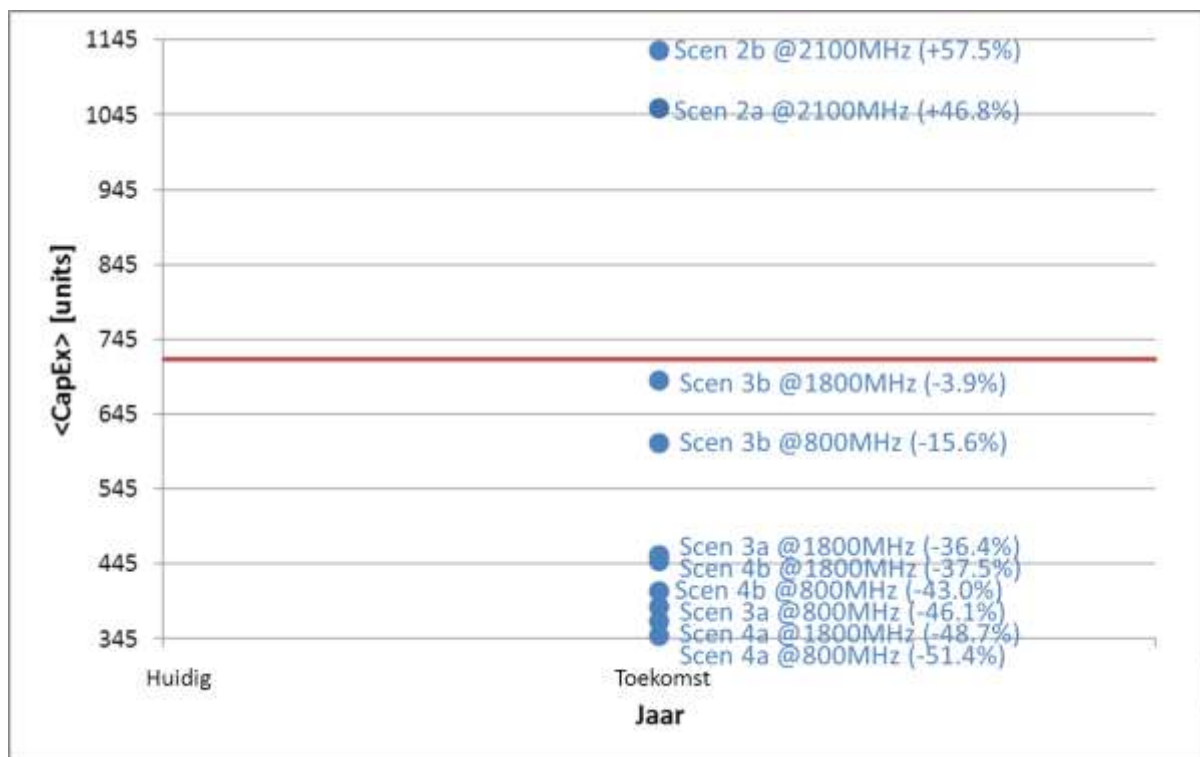
Scenario 3b heeft een lagere E_{avg} en E_{max} dan voor het referentie scenario (E_{avg} : 13 mV/m i.e. 93.1% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 40 mV/m i.e. 93% lager t.o.v. 575 mV/m). Dit is logisch gezien dit netwerk geoptimaliseerd is naar blootstelling daar waar het referentie scenario is geoptimaliseerd naar kost. Er wordt ook gebruik gemaakt van 4G en 2x2 MIMO.

Scenario 4b bij 800 MHz heeft tenslotte de laagste E_{avg} en E_{max} ten opzichte van het referentie scenario (E_{avg} : 10 mV/m i.e. 94.7% lager t.o.v. 188 mV/m en E_{max} : 27 mV/m i.e. 95.3% lager t.o.v. 575 mV/m). Dit netwerk is opnieuw geoptimaliseerd naar blootstelling waardoor een lagere blootstelling is gekomen. De

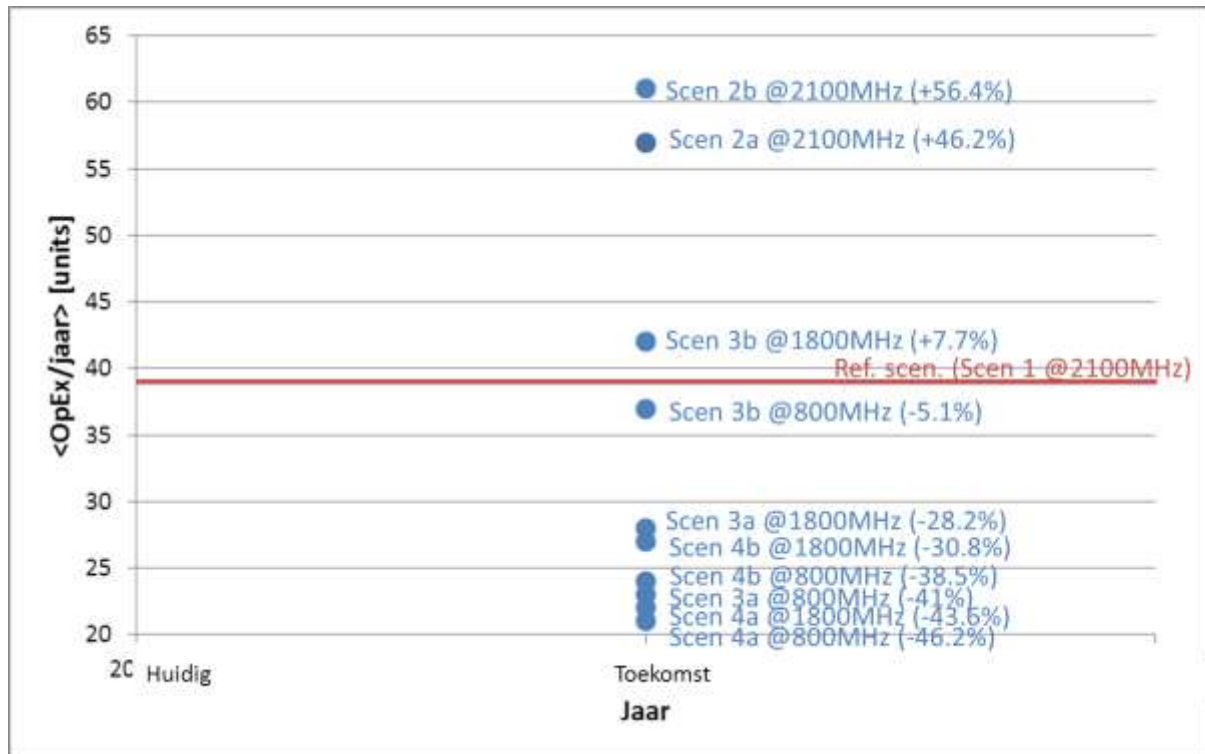
blootstelling is lager dan bekomen voor Scenario 3b omwille van het gebruik van femtocellen, analoog zoals het verschil in blootstelling tussen Scenario 3a en Scenario 4a. Scenario 4b bij 800 MHz heeft een lagere blootstelling dan bij 1800 MHz door het gebruik van een lagere frequentie.

3.4.2 Verwachtingswaarde CapEx en verwachtingswaarde OpEx/jaar

Figuur 5 en Figuur 6 geven een overzicht van de resultaten voor de verschillende scenario's voor de verwachtingswaarde van de CapEx kost en de OpEx/jaar kost, respectievelijk. Het referentie scenario, scenario 1, wordt in deze figuren aangeduid met een rode lijn. Alle andere scenario's zijn aangegeven met een blauwe cirkel en vermelden ook het relatief verschil in CapEx kost en in OpEx kost per jaar (in %) ten opzichte van het referentiescenario. Een hogere kost leidt tot een positief relatief verschil, een lagere kost tot een negatief relatief verschil.



Figuur 5 Verwachtingswaarde CapEx voor de verschillende scenario's



Figuur 6 Verwachtingswaarde OpEx/jaar voor de verschillende scenario's

Scenario 2b heeft de hoogste CapEx en OpEx/jaar (57.5% hogere CapEx en 56.4% hogere OpEx/jaar dan 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar voor het referentie scenario). De reden hiervoor is dat in scenario 2b enkel maar gebruik gemaakt van macrocellen en 3G technologie en de gevraagde bit rate door de data gebruikers verhoogd is (toekomstig tijdstip). Daarnaast is het scenario ook geoptimaliseerd naar blootstelling.

Scenario 2a heeft ook een hogere CapEx en OpEx/jaar dan het referentie scenario (46.8% hogere CapEx en 46.2% hogere OpEx/jaar t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar voor het referentie scenario). De reden hiervoor is dat in scenario 2a meer basisstations nodig zijn dan voor het referentie scenario door de verhoogde bit rate van de data gebruikers en er enkel gebruik gemaakt wordt van macrocellen. Scenario 2a heeft een lagere kost dan scenario 2b omdat scenario 2a naar kost geoptimaliseerd is en scenario 2b naar blootstelling.

Scenario 3b heeft een lagere (bij 1800 MHz iets lagere) CapEx en OpEx/jaar kost dan het referentie scenario (36.4% lagere CapEx en 28.2% lagere OpEx/jaar bij 1800 MHz en 46.1% lagere CapEx en 46.1% lagere OpEx/jaar bij 800 MHz t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar) door het gebruik van 4G en 2x2 MIMO waardoor één basisstation een hogere capaciteit en een hoger bereik heeft en dus meer gebruikers op één basisstation kunnen connecteren. Hierdoor wordt het aantal basisstations nodig in het netwerk gereduceerd. Scenario 3b heeft wel de hoogste kost van alle 4G scenario's vermits het geoptimaliseerd is naar blootstelling en niet naar kost en enkel maar gebruik maakt van macrocellen (die een hogere kost hebben ten opzichte van femtocellen). Een optimalisatie naar blootstelling resulteert in een netwerk met een hoog aantal basisstations met een laag zendvermogen, terwijl een optimalisatie naar kost resulteert in een netwerk met een laag aantal basisstations met een hoog zendvermogen (en dus een hogere blootstelling). Het verschil in kost bij 800 MHz en 1800 MHz is te wijten aan het feit dat bij 800 MHz het basisstation een groter bereik heeft en er dus minder basisstations nodig zijn bij 800 MHz om de gebruikers te bedienen.

Scenario 3a bij 1800 MHz heeft een lagere CapEx en OpEx/jaar kost dan het referentie scenario (457 units CapEx en 28 units OpEx/jaar t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar). Dit komt doordat in dit scenario gebruik gemaakt wordt van 4G en 2x2 MIMO waardoor één basisstation een hogere capaciteit en een hoger bereik heeft en dus meer gebruikers op één basisstation kunnen connecteren. Hierdoor wordt het aantal basisstations nodig in het netwerk gereduceerd. Scenario 3a bij 1800 MHz heeft daarnaast ook een lagere kost dan scenario 3b omdat het geoptimaliseerd is naar kost.

Scenario 4b bij 1800 MHz heeft een lagere CapEx en OpEx/jaar kost dan het referentie scenario (37.5% lagere CapEx en 30.8% lagere OpEx/jaar t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar) vermits het gebruik maakt van 4G technologie en 2x2 MIMO waardoor minder basisstations nodig zijn voor het netwerk. Het heeft een iets lagere kost dan scenario 3a bij 1800 MHz door het gebruik van femtocellen die goedkoper zijn in zowel CapEx als in OpEx/jaar kost dan de macrocellen, maar het presteert in termen van kosten wel minder goed dan scenario 3a bij 800 MHz en scenario 4a (zowel bij 800 MHz als bij 1800 MHz) vermits het geoptimaliseerd is naar blootstelling in plaats van naar kost.

Scenario 4b bij 800 MHz heeft een lagere CapEx en OpEx/jaar kost dan het referentie scenario (43% lagere CapEx en 38.5% lagere OpEx/jaar t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar) vermits het ook gebruik maakt van 4G technologie, 2x2 MIMO en femtocellen die goedkoper zijn dan in zowel CapEx kost als OpEx/jaar kost dan macrocellen. Het heeft een iets lagere kost dan scenario 3a bij 1800 MHz door het gebruik van een lagere frequentie (wat resulteert in een hoger bereik per basisstation) maar het presteert in termen van kost minder goed dan scenario 3a bij 800 MHz en scenario 4a (zowel bij 800 MHz als bij 1800 MHz) vermits het geoptimaliseerd is naar blootstelling.

De reden dat scenario 3a bij 800 MHz een lagere CapEx en OpEx/jaar kost heeft dan het referentie scenario (46.1% lagere CapEx en 41% lagere OpEx/jaar t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar) is analoog aan scenario 3a bij 1800 MHz. Scenario 3a bij 800 MHz heeft echter een lagere kost dan dit laatste scenario omdat het gebruik maakt van een lagere frequentie wat resulteert in een hoger bereik per basisstation en dus in een lager aantal basisstations in het netwerk.

Scenario 4a heeft tenslotte de laagste CapEx en OpEx/jaar ten opzichte van het referentie scenario (48.7% lagere CapEx en 43.6% lagere OpEx/jaar bij 1800 MHz en 51.4% lagere CapEx en 46.2% lagere OpEx/jaar bij 800 MHz t.o.v. 718 units CapEx en 39 units OpEx/jaar) door opnieuw het gebruik van 4G en 2x2 MIMO, maar ook door het gebruik van femtocellen die goedkoper in zowel CapEx kost als OpEx/jaar kost zijn dan de macrocellen. De lagere kost bij 800 MHz dan bij 1800 MHz voor dit scenario is opnieuw te wijten aan de lagere frequentie.

In het algemeen kan men besluiten dat binnen een bepaalde technologie en frequentie de optimalisatie naar blootstelling een hogere kost met zich zal meebrengen. Daarnaast kan de introductie van 4G technologie in combinatie met 2x2 MIMO ook zorgen voor een lagere blootstelling. Dankzij het grotere bereik en de hogere capaciteit van deze basisstations zullen minder basisstations aanwezig zijn in het netwerk wat ook de kost zal reduceren. Tenslotte kan in sommige gevallen ook de introductie van small cells resulteren in een lagere blootstelling.

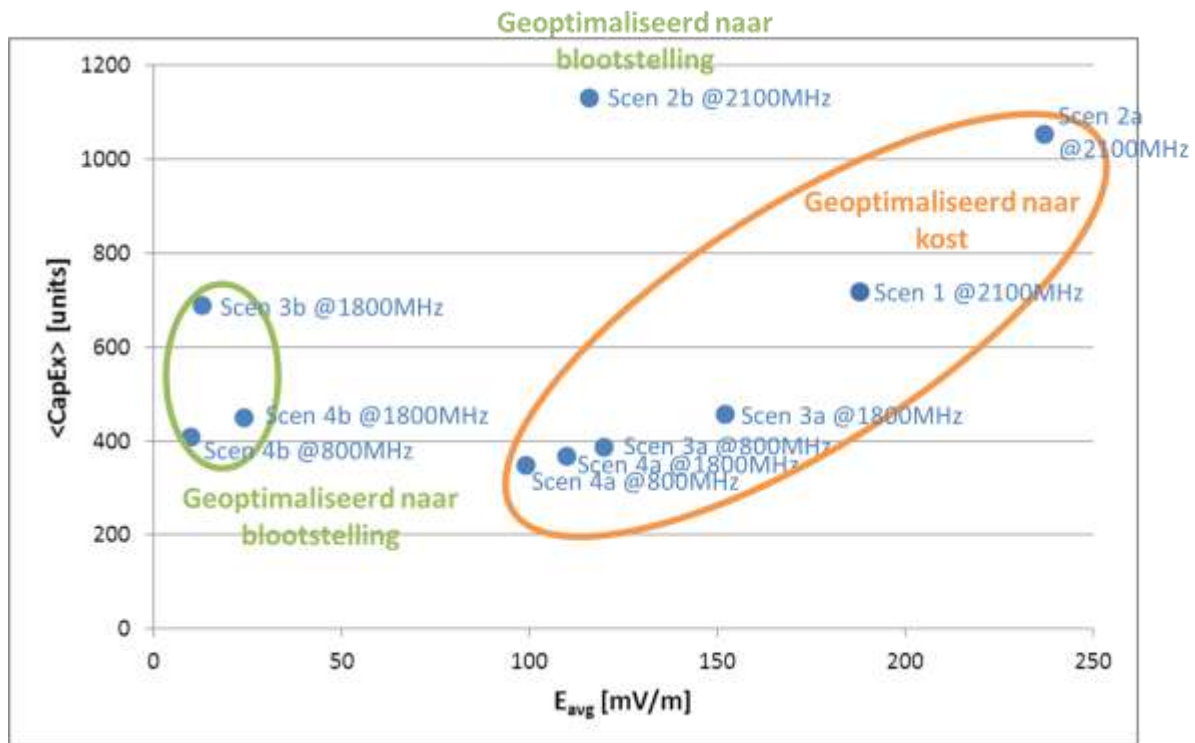
3.4.3 Kosten versus blootstelling

Figuur 7 en Figuur 8 tonen respectievelijk, de CapEx kosten als functie van het gemiddelde elektrische veld E_{avg} en de OpEx/jaar kosten als functie van E_{avg} . Op deze figuren is opnieuw duidelijk te zien dat binnen een bepaalde technologie en frequentie de optimalisatie naar blootstelling een hogere kost met zich zal meebrengen (cfr. Scenario 3a (geoptimaliseerd naar kost) en scenario 3b (geoptimaliseerd naar blootstelling) voor 4G bij 1800 MHz).

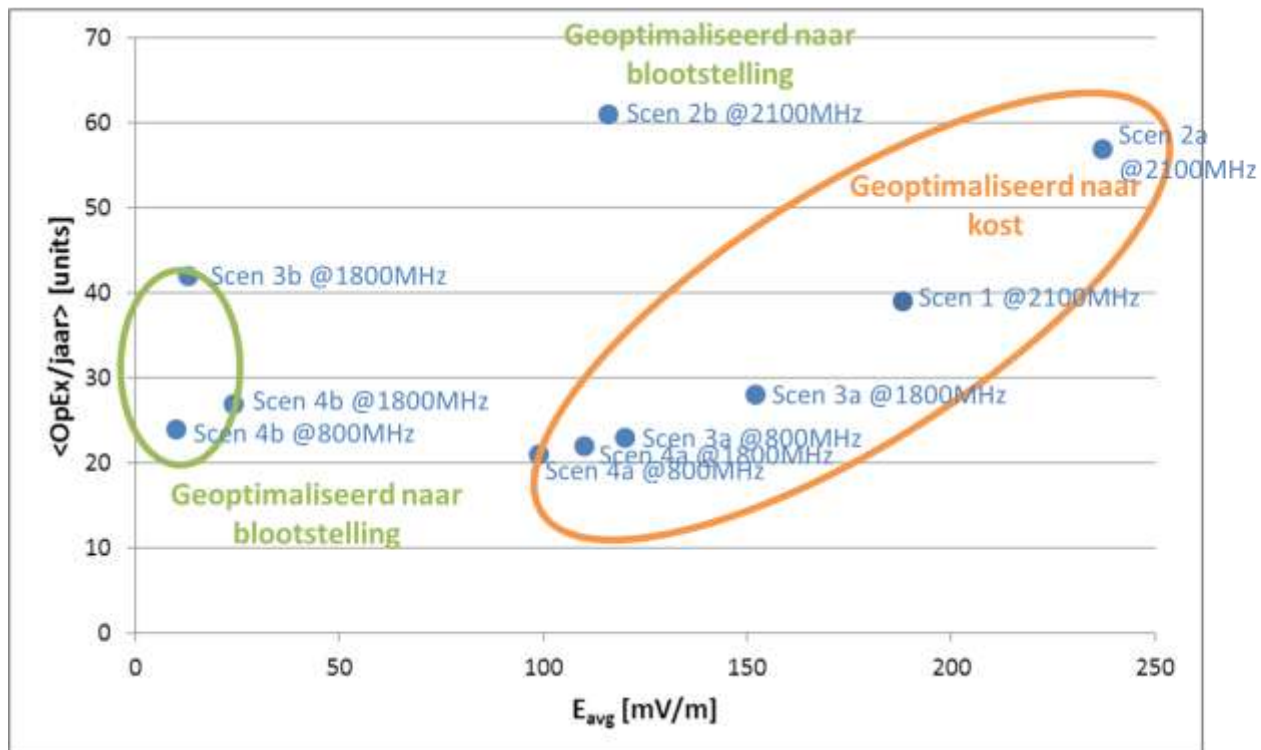
De blootstelling kan verlaagd worden door gebruik te maken van 4G en 2x2 MIMO en in sommige gevallen ook door het introduceren van femtocellen.

Om de kost te optimaliseren is het belangrijk dat het basisstation een groot bereik heeft en een grote capaciteit kan aanbieden zodat een minimum aan basisstations nodig is voor het netwerk. Het gebruik van 4G en 2x2 MIMO kan hierbij ook een oplossing zijn.

Analoge resultaten kunnen gemaakt worden voor de kosten als functie van het maximaal elektrische veld $E_{\max}$.



Figuur 7 Verwachtingswaarde CapEx kosten in functie van de gemiddelde spatiale blootstelling E_{avg} voor de verschillende scenario's



Figuur 8 Verwachtingswaarde OpEx/jaar kosten in functie van de gemiddelde spatiale blootstelling E_{avg} voor de verschillende scenario's

3.5 Sensitiviteitsanalyse

In deze studie werd gebruik gemaakt van een groot aantal parameters, daarom is het belangrijk om af te toetsen wat de invloed is op de resultaten wanneer de waarde van deze parameters zou wijzigen. In een eerste stap wordt er onderzocht hoe de resultaten wijzigen wanneer het maximaal toegelaten padverlies PL_{max} uit sectie 3.1 10 dB hoger of lager zou liggen dan verondersteld is. Een verhoging met 10 dB van PL_{max} komt overeen met een vermindering van 10 dB in de ontvanger gevoeligheid en betekent dus een verbetering van de ontvanger gevoeligheid. In een tweede stap wordt de invloed op de kosten onderzocht. In beide gevallen zal scenario 3b bij 800 MHz gebruikt worden.

3.5.1 Sensitiviteitsanalyse van PL_{max}

In dit onderdeel wordt onderzocht wat de invloed is op de resultaat wanneer PL_{max} van elk basisstation in het netwerk verhoogd en verlaagd wordt met 10 dB. Scenario 3b bij 800 MHz wordt hierbij verondersteld. Tabel 5 geeft een numeriek overzicht van deze resultaten.

Wanneer PL_{max} vermindert met 10 dB (de gevoeligheid van de ontvanger stijgt met 10 dB dus slechtere ontvangers) verhoogt E_{avg} met 15.3% en E_{max} met 18.4% ten opzichte van de originele resultaten (i.e., de resultaten bekomen in sectie 3.4). Ook de kosten verhogen met respectievelijk 9.4% en 8.1% ten opzichte van de originele resultaten. De reden hiervoor is dat wanneer PL_{max} verminderd wordt met 10 dB het bereik van het basisstation verkleint waardoor er meer basisstations nodig zijn om alle gebruikers te dekken. Dit resulteert in een hogere blootstelling en een hogere kost.

Het omgekeerde resultaat is terug te vinden wanneer PL_{max} wordt vermeerderd met 10 dB. Deze vermeerdering resulteert in een groter bereik van het basisstation waardoor er minder basisstations nodig

zullen zijn om alle gebruikers te dekken. Hierdoor verlaagt de blootstelling (E_{avg} met 53.8% en E_{max} met 60.5%) van het netwerk alsook de kosten (CapEx kost met 20.8% en OpEx/jaar kost met 21.6%).

Betere en gevoeligere ontvangers en gebruikerstoestellen kunnen de velden en kosten dus verlagen.

Scenario	E_{avg} [mV/m]	ΔE_{avg} [%]	E_{max} [mV/m]	ΔE_{max} [%]	<CapEx> [units]	Δ <CapEx> [%]	<OpEx/jaar> [units]	Δ <OpEx/jaar> [%]	<dekking> [%]
PL _{max} -10 dB	15	+15.4	45	+18.4	663	+9.4	40	+8.1	99.8
PL _{max}	13	0	38	0	606	0	37	0	99.9
PL _{max} +10 dB	6	-53.8	15	-60.5	480	-20.8	29	-21.6	100

Tabel 5 Overzicht van de invloed op de resultaten bij het verhogen en verlagen van PL_{max} met 10 dB

3.5.2 Sensitiviteitsanalyse van de kosten

In dit onderdeel wordt de invloed van wijzigingen in de kosten op de resultaten onderzocht. Opnieuw wordt Scenario 3b bij 800 MHz verondersteld. Verder beschouwen we enkel de CapEx kosten, voor de OpEx/jaar kosten zal men dezelfde resultaten bekomen.

Tabel 6 geeft de verwachtingswaarde van de CapEx kosten als functie van E_{avg} en E_{max} weer.

Tabel 6 toont aan dat E_{avg} en E_{max} niet wijzigt. Dit is logisch vermits alle parameters voor het basisstation constant worden gehouden. Enkel de kosten worden met 10 units verhoogd of verlaagd. Een verhoging met 10 units resulteert in een 30% hogere CapEx kost. Een vermindering met 10 units resulteert in een 30% lagere CapEx kost.

Scenario	E_{avg} [mV/m]	E_{max} [mV/m]	<CapEx> [units]	Δ <CapEx> [%]	<dekking> [%]
CapEx per BS – 10 units	13	38	422	-30.4	99.9
CapEx per BS	13	38	606	0	99.9
CapEx per BS + 10 units	13	38	789	+30.2	99.9

Tabel 6 Overzicht van de invloed op de resultaten bij het verhogen en verlagen van de CapEx kost per basisstation met 10 units

4 Beleidsaanbevelingen

In de eerste plaats kunnen we besluiten dat beleidsaanbevelingen voor de reductie van de blootstelling van elektromagnetische straling van draadloze cellulaire netwerken een zeer complexe zaak is. Zoals uit de studie blijkt, hebben we hier te maken met een zeer groot aantal parameters die elk hun invloed op de resultaten hebben. Het is overigens niet altijd even gemakkelijk om een goede inschatting of voorspelling in de toekomst voor deze parameters te maken. Zo werd bijvoorbeeld verondersteld dat het aantal gebruikers op het huidige tijdstip en het toekomstig tijdstip gelijk is maar het gebruikersgedrag zal mogelijks veranderen, mede onder invloed van nieuwe toestellen die op de markt komen of gaan komen zoals bijvoorbeeld smart watches en google glasses. Daarnaast winnen ook open WiFi netwerken aan populariteit en is het niet duidelijk of gebruikers in de toekomst verder via deze netwerken zullen connecteren of toch eerder voor de 4G technologie zullen kiezen. Merk op dat WiFi geen substituum voor 4G is maar eerder complementair is aan 4G. De kwaliteit van WiFi kan niet gegarandeerd worden vermits het gebruikt wordt in een ongelicentieerde band. Daarnaast is het bereik van WiFi ook beperkt in vergelijking met 4G.

We wensen te benadrukken dat deze studie een educationeel karakter heeft om uitleg te verschaffen. Te meer omdat er gezien de complexiteit van de studie een aantal beperkingen werden verondersteld. Zo is de blootstelling veroorzaakt door 2G en 3G, technologieën die ongetwijfeld in de toekomst nog actief zullen blijven, niet in rekening gebracht. Daarnaast werd ook de impact op de “quality of service” en “quality of experience” niet onderzocht. Er werd ook uitgegaan van één referentietoestel, daar waar in de

realiteit een diversiteit aan types toestellen (bv. smartphones, gewone mobiele toestellen, laptops, tablets, draagbare spelconsoles, etc.) op de markt zijn.

Algemeen kunnen we wel besluiten uit de kosten-baten analyse dat een netwerk met een lagere blootstelling voor eenzelfde technologie (en frequentie) zal resulteren in een hogere kost. De verlaagde blootstelling moet dus afgewogen worden tegen de verhoogde kost. Een netwerk geoptimaliseerd naar kost zal typisch een netwerk zijn met een minimaal aantal basisstations met hoge ingangsvermogens, daar waar een netwerk geoptimaliseerd naar blootstelling typisch bestaat uit een groot aantal basisstations met een laag ingangvermogen van de antenne. Daarnaast kan ook de introductie van 4G technologie in combinatie met 2x2 MIMO leiden tot een lagere blootstelling bij ongewijzigde datavolumes. Dit compenseert echter niet de toename ten gevolge van de exponentiële datagroei. Ook een lagere kost kan bekomen worden door introductie van 4G technologie in combinatie met 2x2 MIMO. Tot slot draagt ook de introductie van small cells bij tot het verlagen van blootstelling en kost.

Ook in de literatuurstudie uitgevoerd binnen het kader van deze studie vonden we enkele maatregelen voor het verlagen van de blootstelling binnen het netwerk. Het ondersteunen van sleep modes zorgt ervoor dat de blootstelling verlaagd wordt op die momenten waarbij het basisstation niet actief hoeft te zijn. Zo kan bijvoorbeeld een basisstation in een kantoorgebouw uitgeschakeld worden buiten de werkuren om de blootstelling van omwonenden te verminderen. In de literatuur wordt ook onderzoek gevoerd naar het kiezen van de optimale netwerktopologie waarbij de optimale mix tussen verschillende types basisstations (bv. macrocellen en small cells) bepaald wordt zodat de totale blootstelling geminimaliseerd wordt. Daarnaast wordt ook onderzocht hoe men het dataverkeer kan versturen over die technologie die de laagste blootstelling veroorzaakt terwijl men toch voldoende kwaliteit aanlevert.

Het is uiteraard ook steeds mogelijk om zelf enkele maatregelen te nemen om de blootstelling van gebruikerstoestellen te minimaliseren. Zo verhoogt het gebruik van handsfree-kits en oortjes de afstand tussen het toestel en het lichaam wat een lagere blootstelling tot gevolg heeft. Daarnaast kan je het GSM toestel ook van je weg houden bij het initialiseren van het gesprek (wanneer je de beltoon hoort) totdat je je gesprekspartner hoort, gezien bij initialisatie van het gesprek de blootstelling het grootst is. Ook het opzoeken van een plaats met een goede signaalkwaliteit kan de blootstelling reduceren.

Ook de WiFi adapter in laptops, smartphones of tablets kan uitgeschakeld worden indien deze niet gebruikt wordt om de blootstelling te reduceren. Bij een laptop kan er eventueel geopteerd worden om bedraad te verbinden met het vast netwerk in plaats van draadloos.

Een vervolgstudie op deze studie is zeker interessant: de verdeling van de verschillende toestellen en sensitiviteiten kan in rekening gebracht worden, het gebruikersgedrag in de toekomst kan in rekening gebracht worden, de achtergrond blootstelling van 2G en 3G kan in rekening gebracht worden, er kan gebruik gemaakt worden van nieuwe blootstellingsmetrieken, etc. We wensen wel te benadrukken dat een dergelijke vervolgstudie enkel zinvol is wanneer bepaalde veronderstellingen verfijnd kunnen worden ten opzichte van deze die aangenomen zijn in deze studie.

5 Besluit

In deze studie werd een inventarisatie gemaakt van huidige en toekomstige draadloze technologieën. Voor elk van deze technologieën werd hun doel en gebruik toegelicht, alsook aangegeven wat de relevante frequenties zijn. Daarnaast werd ook aangegeven wat hun bijdrage is tot de totale stralingsbijdrage (indien mogelijk).

Hierbij aansluitend werd er onderzoek gedaan naar nieuwe netwerken en technieken die toelaten om de blootstelling binnen het netwerk of van gebruikerstoestellen te optimaliseren.

Er werd een literatuurstudie uitgevoerd omtrent blootstelling en bestaande en nieuwe blootstellingsmetrieken werden opgelijst en toegelicht. Een nieuwe blootstellingsmetriek wordt internationaal ontwikkeld die zowel blootstelling van basisstations (downlink) als van gebruikerstoestellen (uplink) tesamen in rekening brengt.

Tot slot werd een kosten-baten analyse uitgevoerd. Zeven verschillende scenario's werden beschouwd waarbij naar het huidige tijdstip en een toekomstig tijdstip werd gekeken. Hierbij werd er zowel gekeken naar 3G technologie als 4G technologie. Daarnaast werd ook de invloed van toekomstige technieken zoals MIMO en small cells op de blootstelling en de kost van het netwerk bekeken.

In het algemeen kan besloten worden dat het optimaliseren van een netwerk naar blootstelling (binnen een technologie en een frequentie) zal resulteren in een hogere kost. Het introduceren van 4G technologie in combinatie met 2x2 MIMO kan echter de blootstelling en de kost reduceren bij ongewijzigde datavolumes. Dit compenseert echter niet de toename ten gevolge van exponentiële datagroei. Ook het introduceren van small cells kan leiden tot een lagere blootstelling en kost.

We wensen te benadrukken dat deze kosten-baten analyse enkel een educationeel karakter heeft.

6 English summary

The first part of this study is a literature study to define the state-of-the-art and future wireless technologies, networks and techniques. In addition to this, an overview of current and future exposure metrics is made based on literature.

For the overview of recent and future wireless technologies, we define two categories: communication networks and broadband technologies. For the communication networks, a further distinction is made between wireless personal area networks (WPANs), wireless local area networks (WLANs), wireless metropolitan area networks (WMANs), and wireless wide area networks (WWANs). For each technology, a short survey is given whereby it is indicated what the purpose of the technology is, which frequencies it is using, and if possible some typical chipsets are given. If relevant, the contribution of each technology to the total radiation exposure is determined. Furthermore, a short history of mobile devices is given and it is indicated how the trends are influencing the user behaviour. Also future user trends are given. Finally, it is discussed how networks will be adapted in the future. Techniques such as cognitive networks, symbiotics networks, smart grid, machine-to-machine communication, sleep modes, heterogeneous networks, cell zooming, etc. are here considered. For each technique, a short summary is given.

Next to this overview of recent and future wireless technologies and networks, the exposure metrics currently used in literature are listed and explained. A discussion about a new exposure metric that is internationally being developed is added. This metric will allow taking both the exposure of the user devices (uplink) and the base stations (downlink) into account.

In the second part of this study, a cost-benefit analysis is made. Seven scenarios are considered for a current timestamp and a future timestamp, each evaluated both for exposure and costs. Some of these scenarios are optimized towards costs, the others towards exposure. The network for each scenario is developed by a 3D capacity based deployment tool. Capacity based means that the network will respond to the instantaneous bit rate required by the users. 3D means that the buildings in the considered area are taken into account for determining if it is a line-of-sight or non-line-of-sight situation. The scenarios and the parameters for these scenarios are carefully selected in cooperation with the Belgian mobile operators. The scenarios consider 3G technology, 4G technology supporting 2x2 MIMO, and 4G with 2x2 MIMO and a mixture of macrocells and small cells. In general, it is concluded that a lower exposure (for a certain technology and frequency) results in higher costs. A network optimized towards cost will typically consist of a low number of base stations with a high input power of the antenna, however a network optimized towards exposure will typically consist of a high number of base stations with a low input power of the antenna. Introducing 4G and 2x2 MIMO allows to reduce both exposure and cost. Also the introduction of small cells can reduce the exposure and cost. Remark that such an analysis is a very complex case and it is difficult to make a good estimation of the parameters, especially towards the future. Therefore, we want to emphasize that this analysis has only an educational purpose. Because of the difficulty to make good estimations for the future, a sensitivity analysis is also performed for path loss and cost.

Based on the literature study, we can conclude that the exposure of the network can also be reduced by introducing sleep modes in the network. When there is no activity taking place in the cell of a base station, a base station can be put into sleep mode. For example, in an office building, the base station can be turned off (or put in sleep mode) after working hours and so reducing the exposure of residents living in this area. In the morning when people are coming to work, the base station can be wakened up. In literature, there is also research towards optimizing the network topology by using an optimal mix of different types of base stations. A conclusion that can also be drawn from our analysis as mentioned above. Furthermore, one will also try to send the data traffic to the most optimal technology giving the lowest exposure but still offering enough signal quality. Also better antennas will reduce the exposure as these antennas will need lower input powers.

Finally there are also some actions that can be taken by the user self. The use of handsfree-kits or headphones increases the distance between the user device and the body and reduces the exposure. When initializing a phone call (when you hear the ringtone), it is recommended to keep the mobile phone away from the body until you hear the other person on the phone as the exposure during initialization is the highest. It is also recommended to search for places with a good signal quality as this also reduces the exposure due to your own device. WiFi adapters in laptops, mobile phones or tablets can also be switched off when you don't use them. For the WiFi adapter in a laptop, it is also possible to connect to the fixed network instead of using the wireless interface.

Referenties

- [1] <http://www.ieee.org>
- [2] D. Pareit, B. Lannoo, I. Moerman, P. Demeester, *The History of WiMAX: A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, No. 4, 2012, pp. 1183-1211.
- [3] <http://www.wi-fi.org/>
- [4] <http://www.wimaxforum.org/>
- [5] <http://www.3gpp.org/>
- [6] <http://www.etsi.org/>
- [7] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, June 2005.
- [8] G. Neubauer, M. Rösli, M. Feychting, Y. Hamnerius, L. Kheifets, N. Kuster, I. Ruiz, J. Schüz, R. Überbacher, J. Wiart, *Study on the Feasibility of Epidemiological Studies on Health Effects of Mobile Telephone Base Stations – Final report*,
- [9] Telenet, *Informatiebrochure over wifi- en gsm-straling*
- [10] S. Kühn, U. Lott, A. Kramer, N. Kuster, *Assessment Methods for Demonstrating Compliance With Safety Limits of Wireless Devices Used in Home and Office Environments*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, No. 3, August 2007, pp. 519-525.
- [11] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, October 2003.
- [12] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Supplement to IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band*, September 1999
- [13] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren, L. Martens, *Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments*, Health Physics, Vol. 12, No. 2, February 2012, pp. 161-172.
- [14] L. Verloock, W. Joseph, L. Martens, *Opzetten van een meetcampagne om de stralingsblootstelling van nieuwe technologieën en Wifi in scholen te bepalen – Overzichtsrapport*

- v2.0, Studie uitgevoerd in opdracht van het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid, Bestek nr. LNE/OL201100024/12031/M&G, Mei 2013.
- [15] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Supplement to IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band*, September 1999.
 - [16] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz band*, June 2003.
 - [17] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 15: Enhancements for Higher Throughput*, October 2009.
 - [18] The 802.11 Working Group of the 802 Committee, *IEEE P802.11ac/D4.0 – Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz*, October 2012.
 - [19] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz band*, December 2012.
 - [20] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, *Air interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, October 2004.
 - [21] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, *Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems: Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed bands and Corrigendum 1*, Februari 2006.
 - [22] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 20: Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems Supporting Vehicular Mobility – Physical and Media Access Control Layer Specification*, August 2008.
 - [23] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems – Wireless Regional Area Networks (WRAN) – Specific requirements – Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands*, July 2011.
 - [24] ETSI, *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); GSM Cordless Telephony System (CTS), Phase 1; CTS radio interface layer 3 specification (GSM 04.56 version 7.1.1 Release 1998)*, ETSI EN 302 406 v7.1.1, August 2000.
 - [25] ETSI, *Digital cellular communications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Overall description of the GPRS radio interface; Stage 2 (3GPP TS 03.64 version 8.12.0 Release 1999)*, ETSI TS 101 350 v8.12.0, April 2004.
 - [26] ETSI, *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical Layer on the Radio Path (General Description) (3GPP TS 45.001 version 4.0.1 Release 4)*, ETSI TS 145 001 v4.0.1, October 2000.
 - [27] 3GPP, *3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network, UE Radio Transmission and Reception (TDD) Release 1999, TR 25.102 v3.13.0*, October 2006.
 - [28] 3GPP, *3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network: Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (Release 4), TR 25.848 v4.0.0*, Maart 2001.
 - [29] 3GPP, *3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User equipment (UE) Radio Transmission*

- and Reception, TS 36.101 v8.17.0 Release 8, 2008.
- [30] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User equipment (UE) Radio Transmission and Reception, TS 36.101 v9.1.0, 2009.
 - [31] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User equipment (UE) Radio Transmission and Reception, TS 36.101 v10.1.0 Release 10, 2011.
 - [32] ETSI, Terrestrial Trunked Radio (TETRA), Voice plus Data (V+D), ETS 300 392 series of standards.
 - [33] ETSI, Terrestrial Trunked Radio (TETRA), Packet Data Optimized (DPO), ETS 300 393 series of standards.
 - [34] ETSI, Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); DECT Packet Radio Service (DPRS), ETSI EN 301 649 v1.4.1, December 2004.
 - [35] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EN 300 744 v1.6.1, January 2009.
 - [36] ETSI, Mega-Frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization, TR 101 191 v1.4.1, June 2004
 - [37] ETSI, Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmissions aspects, TR 101 190 v1.3.2, May 2011.
 - [38] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H), EN 302 304 v1.1.1, November 2004.
 - [39] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EN 300 744 v1.5.1, November 2004.
 - [40] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission to Handheld Terminals (DVB-H); Validation Task Force Report, TR 102 401 v1.1.1, May 2005.
 - [41] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines, TR 102 377 v1.4.1, June 2009.
 - [42] ETSI, Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), EN 302 755 v1.3.1, April 2012.
 - [43] ETSI, Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), TS 102 831 v1.2.1, August 2012.
 - [44] ETSI, Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), January 2012.
 - [45] ETSI, Structure and modulation of optional transmitter signatures (T2-TX-SIG) for use with the DVB-T2, TS 102 992 v1.1.1, September 2010.
 - [46] ETSI, Next Generation broadcasting system to Handheld, physical layer specification (DVB-NGH), DVB Bluebook A160, November 2012.
 - [47] ETSI, Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, EN 300 401 v1.4.1, June 2006.
 - [48] Jochen Schiller, *Mobile Communications second edition*, Addison-Wesley, ISBN: 0-321-12381-6.
 - [49] Broadcom BCM2048, <http://elcodis.com/parts/6048071/BCM2048.html#datasheet>
 - [50] Broadcom BCM2049, <http://elcodis.com/parts/6168447/bcm2049.html#datasheet>
 - [51] STMicroelectronics STM32W108HB, STM32W108CC, STM32W108CB, STM32W108CZ, <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00248316.pdf>
 - [52] Flexipanel LinkMatik 2.0, <http://www.flexipanel.com/Docs/LinkMatik%202.0%20DS379.pdf>
 - [53] Atheros AR3001, http://www.qca.qualcomm.com/media/product/product_64_file1.pdf
 - [54] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, September 2006.
 - [55] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) – Amendment 1: Add Alternate PHYs*, August 2007.
 - [56] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate*

Wireless Personal Area Networks (WPANs) – Amendment 3: Alternative Physical Layer Extension to support the Japanese 950 MHz band, April 2009.

- [57] Texas Instruments CC2420, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
- [58] Texas Instruments CC1100, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1100.pdf>
- [59] Texas Instruments CC2520, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2520.pdf>
- [60] Atmel AT86RF212, <http://www.atmel.com/Images/doc8168.pdf>
- [61] Atmel AT86RF210, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/atmel/doc5033.pdf>
- [62] Atmel AT86RF213-ZU/AT86RF213-ZF, <http://www.atmel.com/images/doc8111.pdf>
- [63] Amber Wireless AMB8423, http://amber-wireless.de/files/amb8423-em_ds.pdf
- [64] Moteiv Corporation Tmote Sky,
<http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>
- [65] ETSI, *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive*, ETSI EN 328 v.1.7.1, October 2006.
- [66] Microchip MRF24WB0MA/MRF24WB0MB,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70632B.pdf>
- [67] Microchip ZG2100M/ZG2101M, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70624A.pdf>
- [68] ETSI, *Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Guide to the implementation of Dynamic Frequency Selection (DFS)*, ETSI TR 102 651 v.1.1.1, Juni 2009.
- [69] RFS Solutions W5100 WiFLEX, http://www.ic72.com/pdf_file/r/439377.pdf
- [70] Libertas 88W8010, 88W8310, http://datasheet.eeworld.com.cn/pdf/ETC/150190_88W8310.pdf
- [71] Libertas 88W8000G, 88W8510,
http://hitmen.c02.at/files/docs/psp/Libertas_88W8000G_88W8510.pdf
- [72] Maxim MAX2831, MAX2831, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2831-MAX2832.pdf>
- [73] Maxim MAX2828, MAX2829, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2828-MAX2829.pdf>
- [74] Broadcom BCM4326, <http://www.broadcom.com/products/Wireless-LAN/802.11-Wireless-LAN-Solutions/BCM4326>
- [75] Broadcom BCM4328, <http://www.broadcom.com/products/Wireless-LAN/802.11-Wireless-LAN-Solutions/BCM4328>
- [76] Claude Oestges, Bruno Clerckx, *MIMO Wireless Communications: From Real-World Propagation to Space-Time Code Design*, ISBN: 978-0-123-72535-6.
- [77] Realtek RTL8256,
<http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=10&Level=6&Conn=5&ProdID=178>
- [78] Broadcom BCM4322, <http://www.broadcom.com/products/Wireless-LAN/802.11-Wireless-LAN-Solutions/BCM4322>
- [79] EnGenius EMP-9602, http://www.engeniuscanada.com/ESW/Files/EMP-9602-Datasheet_06272008_Module.pdf
- [80] Redpine Signals RS9110-N-11-02, http://www.redpinesignals.com/pdfs/datasheets/RS9110-N-11-02_Module_DataSheet.pdf
- [81] Redpine Signals RS9110-N-11-03, http://redpinesignals.com/pdfs/datasheets/RS9110-N-11-03_Module_DataSheet_v1.31.pdf
- [82] Redpine Signals RS9116, http://www.redpinesignals.com/pdfs/RS9116_PB.pdf
- [83] Ralink RT2700, <http://wikidevi.com/files/Ralink/RT2700%20product%20brief.pdf>
- [84] Airgo AGN400, <http://airgo.sevendesign.com/true/briefs/Specsheet.pdf>
- [85] Broadcom BCM4360, <http://www.broadcom.com/products/Wireless-LAN/802.11-Wireless-LAN-Solutions/BCM4360>
- [86] Broadcom BCM43526, <http://www.broadcom.com/products/Wireless-LAN/802.11-Wireless-LAN-Solutions/BCM43526>
- [87] Marvell Avastar 88W8897, <http://www.marvell.com/wireless/avastar/88W8897/assets/Marvell-Avastar-88W8897-SoC-PB.pdf>

- [88] <http://www.wigig.org>
- [89] <http://www.wirelessHD.org>
- [90] Hittite HMC6000, <http://www.hittite.com/products/view.html/view/HMC6000>
- [91] Hittite HMC6001, <http://www.hittite.com/products/view.html/view/HMC6001>
- [92] Wilocity Wil6100, <http://wilocity.com/resources/Wil6100-Brief.pdf>
- [93] Wilocity Wil6200, <http://wilocity.com/resources/Wil6200-Brief.pdf>
- [94] Qualcomm Atheros AR9004TB,
<http://www.qca.qualcomm.com/corporate/content.php?nav1=119&news=324>
- [95] ETSI, *Fixed Radio Systems; Point-to-multipoint equipment; Time Division Multiple Access (TDMA); Point-to-multipoint digital radio systems in frequency bands in the range 3 GHz to 11 GHz*, ETSI EN 310 021 v1.6.1, July 2003.
- [96] Atmel AT86RF535A, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/148974/ATMEL/AT86RF535A.html>
- [97] Maxim MAX2837, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2837.pdf>
- [98] M. Deruyck, E. Tanghe, W. Joseph, L. Martens, *Modelling and optimization of power consumption in wireless access networks*, Elsevier Computer Communications, Vol. 34, No. 17, November 2011, pp. 2036-2046.
- [99] GCT semiconductor GDM7205, <http://www.gctsemi.com/doc/GDM7205ProductBrief.pdf>
- [100] GCT semiconductor GDM7213, <http://www.gctsemi.com/doc/GDM7213ProductBrief.pdf>
- [101] Seasolve Mobile WiMAX PHY IP Core, <http://www.seasolve.com/wireless-ip-brochures/802-16ePHY.pdf>
- [102] Texas Instruments TRF1x/2x RF chipsets,
<http://www.ti.com/corp/docs/landing/rfchipsets/RFChipsetprodbull.pdf>
- [103] Hitachi HD155121F, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/63658/HITACHI/HD155121F.html>
- [104] Silicon Laboratories Si4210-GM,
http://data.eefocus.com/myspace/5/26152/bbs/1199545836/1199545981_8236f8a8.pdf
- [105] Texas Instruments TCS family of advanced GSM/GPRS chipset solutions,
http://www.ti.com/corp/docs/webemail/ctiamar03/GSM_GPRS_021903.pdf
- [106] Spreadtrum SC6531, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6531>
- [107] Spreadtrum SC6620, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6620>
- [108] Spreadtrum SC6800h, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6800h>
- [109] Spreadtrum SC6530, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6530>
- [110] Silicon Laboratories Aero/Aero+ GSM/GPRS transceiver chipsets,
<http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Silicon%20Laboratories%20PDFs/Aero,%20Aero+%20GSM,%20GPRS%20Trans%20Chipsets.pdf>
- [111] Silicon Laboratories Aero II GSM/GPRS transceiver chipset,
http://www.futurel.bg/datasheets/2/AeroII_PB.pdf
- [112] Analog Devices AD6548 Othello-G complete GSM/GPRS transceiver,
http://www.analog.com/static/imported-files/product_highlights/4341537959270Othello_G_brief2.pdf
- [113] Spreadtrum SC6810, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6810>
- [114] Spreadtrum SC6820, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc6820>
- [115] Analog Devices AD6546, http://www.analog.com/static/imported-files/product_highlights/43629738975398Othello_E_Brief.3.pdf
- [116] Infineon PMB6952, http://www.infineon.com/dgdl/PMB6952-SMARTi_3GE.pdf?folderId=db3a3043163797a6011667b401e00e17&fileId=db3a304316f66ee801179cf226585f5b
- [117] Infineon PMB5699, http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/166/464695_DS.pdf
- [118] Infineon PMB5701, http://www.infineon.com/dgdl/PMB5701-SMARTi_3G_final.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b4120f451827
- [119] Freescale semiconductor RFX300-30,
http://cache.freescale.com/files/wireless_comm/doc/fact_sheet/RFX30030RFFS.pdf?fp=1
- [120] Freescale semiconductor RFX300-40,

- http://www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/fact_sheet/RFX30040RFFS.pdf
- [121] Texas Instruments TCS4105, <http://www.ti.com/corp/docs/webemail/ctiamar03/TCS4105.pdf>
- [122] Fujitsu MB86L01A, http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/pdf/RFTrans_MB86L01A.pdf
- [123] Skyworks SKY74210, <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/200629B.pdf>
- [124] Analog Devices ADF4602, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADF4602.pdf
- [125] Spreadtrum SC8802g, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc8802g>
- [126] Spreadtrum SC8801g, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc8801g>
- [127] Spreadtrum SC8800g, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc8800g>
- [128] Spreadtrum SC8805g, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc8805g>
- [129] Spreadtrum SC8810, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/sc8810>
- [130] Lime microsystems, http://www.limemicro.com/download/LMS6002D_Product_Brief.pdf
- [131] Infineon PMB5701, http://www.infineon.com/dgdl/PMB5701-SMARTi_3G_final.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b4120f451827
- [132] Spreadtrum SC9610, <http://www.spreadtrum.com/en/products/basebands/view/SC9610>
- [133] GCT semiconductor GDM7240, http://www.gctsemi.com/doc/GDM7240_GCT_Semiconductor_ProductBrief.pdf
- [134] Maxim MAX2837, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2837.pdf>
- [135] Infineon SMARTi LTE Transceiver IC, <http://www.infineon.com/dgdl/SMARTi+LTE+product+presentation.pdf?folderId=db3a3043163797a6011667b401e00e17&fileId=db3a3043163797a6011667b7dd4d0e2d>
- [136] M. Deruyck, W. Joseph, B. Lannoo, D. Colle, L. Martens, *Designing Energy-Efficient Wireless Access Networks: LTE and LTE-Advanced*, doi: 10.1109/MIC.2013.6.
- [137] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, ISBN: 978-0-12-385489-6.
- [138] <http://www.totaltele.com/view.aspx?ID=481182&mail=1012>
- [139] Atmel T2801, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56269/ATMEL/T2801.html>
- [140] National semiconductor LMX4168, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/85056/NSC/LMX4168.html>
- [141] National semiconductor LMX4268, http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/50/59748_DS.pdf
- [142] National semiconductor LMX3161, <http://www.ti.com/lit/ds/snos871/snos871.pdf>
- [143] Analog Devices AD6411, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD6411.pdf
- [144] Philips UAA3545, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/UAA3545HL.pdf>
- [145] Conexant CX22700, <http://doc.chipfind.ru/pdf/conexant/cx22700.pdf>
- [146] VLSI technology VES9600, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/VES9600.pdf>
- [147] Analog Devices ADMTV102, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/254659/AD/ADMTV102.html>
- [148] STMicroelectronics STV0362, http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/CD00096818.pdf
- [149] Broadcom BCM7563, <http://www.broadcom.com/products/IPTV/IPTV-Solutions/BCM7563>
- [150] Atmel U4065B, http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/36/365198_1.pdf
- [151] Motorola MC2833, <http://www.tsc.uc3m.es/docencia/LEC/manuales/mc2833rev1a.pdf>
- [152] Silicon Labs si4720/21-B20, <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4720-21-B20.pdf>
- [153] Philips TEA5767/68, http://www.hificat.com/cl5767/PHILIPS_TEA5767.pdf
- [154] Texas Instruments TRF5901, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/trf5901.pdf>
- [155] Directive 1999/5/EC of the European Parliament and of the Council of 9 March 1999 on radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity (R&TTE directive)
- [156] S. De Moor, D. Schuurman, L. De Marez, *Digimeter report 5: Adoption and usage of Media & ICT in Flanders, Wave 5, August – September 2012*

- [157] World Wireless Research Forum, www.wireless-world-research.org
- [158] http://www.standaard.be/cnt/DMF20130605_00611427
- [159] J. Mitola III, G.Q. Maguire Jr., *Cognitive radio: making software radios more personal*, IEEE Personal Communications, Vol. 6, No. 4, August 1999, pp. 13-18.
- [160] G. Quer, H. Meenakshisundaram, B. Tamma, B.S. Manoj, R. Rao, M. Zorzi, *Cognitive Network interference through Bayesian Network Analysis*, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), December 2010, pp.1-6.
- [161] D. Plets, W. Joseph, E. De Poorter, L. Martens, I. Moerman, *Concept and framework of a self-regulating symbiotic network*, EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking 2012:340, 2012.
- [162] G. Ganesanm Y. Li, *Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks*, IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), November 2005, pp. 137-143.
- [163] T. Yucek, H. Arslan, *A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11, No. 1, 2009, pp. 116-130.
- [164] M. Nekovee, *Cognitive Radio Access to TV White Spaces: Spectrum Opportunities, Commercial Applications and Remaining Technology Challenges*, IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, April 2010, pp. 1-10.
- [165] E. De Poorter, B. Latre, I. Moerman, P. Demeester, *Symbiotic networks: towards a new level of cooperation between wireless networks*, Wireless Personal Communications, Vol. 45, No. 4, June 2008, pp. 479-495.
- [166] A Joint Project of the EEI and AEIC Meter Committees, *A Discussion of Smart Meters and RF Exposure Issues – An EEI-AEIC-UTC White Paper*
- [167] M. Dohler, T. Watteyne, J. Alonso-Zarate, *Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm*, Mobilight 2010, MONAMI 2010, PIMRC 2010, Globecom 2010, Berkeley, Sagemcom, C.O.I.T. Madrid, etc.
- [168] G. Koutitas, *Green Network Planning of Single Frequency Networks*, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 56, No. 4, December 2010, pp. 541-550.
- [169] I. Siomina, P. Värbrand, D. Yan, *Automated Optimization of Service Coverage and Base Station Antenna Configuration in UMTS Networks*, IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 16, 2006, pp. 16-25.
- [170] M.A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, *A Simple Analytical Model for the Energy-Efficient Activation of Access Points in Dense WLANs*, Proceedings of the 1st international conference on energy-efficient computing and networking (e-Energy), 2010, pp. 159-168.
- [171] <http://www.aircominternational.com>, February 2012.
- [172] <http://www.forsk.com/atoll>, February 2012.
- [173] <http://www.atdi.com>, February 2012.
- [174] <http://www.mentum.com>, February 2012.
- [175] <http://www.akosim.com>, February 2012.
- [176] <http://www.edx.com>, February 2012.
- [177] <http://www.aerohive.com/planner> , July 2013.
- [178] <http://www.awe-communications.com/Propagation/indoor>, July 2013.
- [179] S. Aleksic, M. Deruyck, W. Vereecken, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, *Energy efficiency of femtocell deployment in combined wireless/optical access networks*, Elsevier Computer Networks, doi: 10.1016/j.comnet.2012.12.013.
- [180] M. Deruyck, W. Joseph, L. Martens, *Power consumption model for macrocell and microcell base stations*, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, doi: 10.1002/ett.2565.
- [181] M. Deruyck, E. Tanghe, W. Joseph, W. Vereecken, M. Pickavet, B. Dhoedt, L. Martens, *Towards a deployment tool for wireless access networks with minimal power consumption*, 21st Annual IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 2010, pp. 294-299.
- [182] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, E. Tanghe, L. Martens, *Coverage Prediction and Optimization Algorithms for Indoor Environments*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking Special Issue on Radio Propagation, Channel Modeling and Wireless Channel Simulation Tools for Heterogeneous Networking Evaluation, Vol. 1, 2012,

- <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/123>
- [183] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, E. Tanghe, L. Martens, *Simple indoor path loss prediction algorithm and validation in living lab setting*, Wireless Personal Communications, pp.1-18, doi: 10.1007/s11277-011-0467-4, <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-011-0467-4>
 - [184] G. Wölfe, R. Wahl, P. Wertz, P. Wildbolz, F. Landstorfer, *Dominant path prediction model for indoor scenarios*, German Microwave Conference (GeMIC), 2005.
 - [185] M. Deruyck, E. Tanghe, W. Joseph, L. Martens, *Characterization and optimization of the power consumption in wireless access networks by taking daily traffic variations into account*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/248>.
 - [186] G. Micallef, P. Mogensen, H.-O. Sheck, *Cell Size Breathing and Possibilities to Introduce Cell Sleep Mode*, European Wireless Conference, 2010, pp. 111-115.
 - [187] C. Peng, S.-B. Lee, S. Lu, H. Luo, H. Li, *Traffic-Driven Power Saving in Operational 3G Cellular Networks*, Annual International Conference on Mobile computing and networking (MobiCom), 2011, pp. 121-132.
 - [188] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, Z. Yang, *Cell Zooming for Cost-Efficient Green Cellular Network*, IEEE Communications Magazine, November 2010, pp. 74-79.
 - [189] M. Deruyck, W. Vereecken, W. Joseph, B. Lannoo, M. Pickavet, L. Martens, *Reducing the power consumption in wireless access networks: overview and recommendations*, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 132, 2012, pp. 225-274.
 - [190] W. Vereecken, I. Haratcherev, M. Deruyck, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, P. Demeester, *The Effect of Variable Wake Up Time on the Utilization of Sleep Modes in Femtocell Mobile Access Networks*, Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), 2012, pp. 63-66.
 - [191] W. Vereecken, M. Deruyck, D. Colle, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, P. Demeester, *Evaluation of the potential for energy savings in macrocell and femtocell networks using a heuristic introducing sleep modes in base stations*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/170>.
 - [192] I. Ashraf, F. Boccardi, L. Ho, *Power Savings in Small Cell Deployments via Sleep Mode Techniques*, Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010, pp. 306-310.
 - [193] L. Saker, S.E. Elayoubi, *Sleep mode implementation issues in green base stations*, Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010, pp. 1681-1686.
 - [194] L.M. Correia, D. Zeller, Y. Jading, I.Gódor, G. Auer, L. Van der Perre, *Challenges and Enabling Technologies for Energy Aware Mobile Radio Networks*, IEEE Communications Magazine, November 2010, pp. 66-72.
 - [195] F. Rusek, D. Persson, Buon Kiong Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, F. Tufvesson, *Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 30, No. 1, January 2013, pp. 40-60
 - [196] T.L. Marzetta, *Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas*, IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 11, November 2010, pp. 3590-3600.
 - [197] S. Mann, *Assessing personal exposures to environmental radiofrequency electromagnetic fields*, Comptes rendus physique, Vol. 11, 2010, pp. 541-555.
 - [198] M. Rössli, P. Frei, J. Bolte, G. Neubauer, E. Cardis, M. Feychting, P. Gajsek, S. Heinrich, W. Joseph, S. Mann, L. Martens, E. Mohler, R.C. Parslow, A.H. Poulsen, K. Radon, J. Schüz, G. Thuroczy, J-F. Viel, M. Vrijheid, *Conduct of a personal radiofrequency electromagnetic field measurement study: proposed study protocol*, Environmental Health: a global access science source, Vol. 9, January 2010, pp. 23.
 - [199] Satimo EME Spy 120/121, Brest, France
 - [200] Satimo EME Spy 140, Brest, France
 - [201] Maschek ESM-140, Bad Wörishofen, Germany
 - [202] C. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek, P. Schmidt, *Determination of the general public*

- exposure around GSM and UMTS base stations, *Rad*, Vol. 124, 2007, pp. 40-47.
- [203] M. Riederer, *EMF exposure due to GSM base stations: measurements and limits*, IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, 2003, pp. 402-405.
 - [204] H. Ryser, *Measuring Campaign for the Assessment of the Non-Ionising Radiation near GSM Base Stations*, International Zurich Symposium on EMC, 2003.
 - [205] M. Schubert, C. Bornkessel, M. Wuschek, P. Schmidt, *Exposure of the general public to digital broadcast transmitters compared to analogue ones*, *Radiat Prot Dosim*, Vol. 124, 2007, pp. 53-57.
 - [206] CENELEC, *Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations*, CENELEC, 2008.
 - [207] International Electrotechnical Commission (IEC), *Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*, IEC, 2011.
 - [208] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, *Health Phys.*, Vol. 4, 1998, pp. 494-522.
 - [209] Federal Communications Commission (FCC), *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields, Supplement C to OET Bulletin 65*, Washington DC: FCC, 2001.
 - [210] N. Neskovic, M. Koprivica, A. Neskovic, G. Paunovic, *Improving the efficiency of measurement procedures for assessing human exposure in the vicinity of mobile phones (GSM/DCS/UMTS) base stations*, *Radiat Prot Dosim*, Vol. 149, 2012, pp. 238-244.
 - [211] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, L. Martens, *Exposure Optimization in Indoor Wireless Networks by Heuristic Network Planning*, PIER, 2013.
 - [212] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren, L. Martens, *Assessment of general public exposure to LTE and RF sources present in an urban environment*, *Bioelectromagnetics*, vol. 31, 2010, pp. 576-579.
 - [213] CENELEC, *Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz-40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service (EN 50400:2006)*, CENELEC, 2006.
 - [214] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren, L. Martens, *Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments*, *Health Physics*, vol. 102, 2012, pp. 161-172.
 - [215] A. Bamba, W. Joseph, J.B. Andersen, T. E. G. Vermeeren, D. Plets, J.Ø. Nielsen, L. Martens, *Experimental Assessment of Specific Absorption Rate Using Room Electromagnetics*, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. Accepted, 2012.
 - [216] J.B. Andersen, J.O. Nielsen, G.F. Pedersen, G. Bauch, M. Herdin, *Room electromagnetics*, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 49, Apr. 2007, pp. 27-33.
 - [217] A. Christ, W. Kainz, E.G. Hahn, K. Honegger, M. Zefferer, E. Neufeld, W. Rascher, R. Janka, W. Bautz, J. Chen, B. Kiefer, P. Schmitt, H.-P. Hollenbach, J. Shen, M. Oberle, D. Szczerba, A. Kam, J.W. Guag, N. Kuster, *The Virtual Family-development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations.*, *Physics in medicine and biology*, vol. 55, Jan. 2010, pp. 23-38.
 - [218] J. Wilén, R. Hörnsten, M. Sandström, P. Bjerle, U. Wiklund, O. Stensson, E. Lyskov, K. Mild, *Electromagnetic field exposure and health among RF plastic sealer operators*, *Bioelectromagnetics*, vol. 25, 2004, pp. 5-15.
 - [219] G. Berg, J. Schüz, F. Samkange-Zeeb, M. Blettner, *Assessment of radiofrequency exposure from cellular telephone daily use in an epidemiological study: German validation study of the international case-control study of cancers of the brain – INTERPHONE-study*, *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, vol. 15, 2005, pp. 217-224.
 - [220] C. H. Kim, S. H. Choi, J. H. Jeong, C. Lee, M. S. Chung, *HDRK-man : a whole body voxel model based on high resolution color slice images of a Korean adult male cadaver.*, *Phys. Med. Biol.*, Vol 53, 2008, pp. 4093-4106.
 - [221] Tongning Wu, *Chinese Adult Anatomical Models and the Application in Evaluation of RF Exposures*, *Phys Med Biol.*, Vol. 56, No. 7, 2011, pp. 2075-2089, doi: 10.1088/0031-

- 9155/56/7/011.
- [222] P. J. Dimbylow, *The development of realistic voxel phantoms for electromagnetic field dosimetry*, Proc Int. Workshop on Voxel Phantom Development (National Radiological Protection Board Report), 1996, pp 1–7.
 - [223] P.J. Dimbylow, *Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields*, Phys Med Biol., Vol. 50, No. 6, 2005, pp.: 1047-1070.
 - [224] I. G. Zubal, C. R. Harrell, E. O. Smith, Z. Rattner, G. Gindi, B. P. Hoffer, *Computerized 3-dimensional segmented Human anatomy*, Phys. Med. Biol., Vol. 21, 1994, pp: 299–302.
 - [225] M. J. Ackerman, *Accessing the visible human project*, http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html
 - [226] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 62209 Part 2, Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz)*, Geneva, Switzerland: IEC, 2009.
 - [227] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 62209 Part 1, Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (Frequency range of 300 MHz to 3 GHz)*, Geneva, Switzerland: IEC, 2005.
 - [228] Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC.
 - [229] P. Crespo-Valero, M. Christopoulou, M. Zefferer, A. Christ, P. Achermann, K. Nikita, N. Kuster, *Novel methodology to characterize electromagnetic exposure of the brain*, Phys Med Biol, vol. 56, 2011, pp. 383–396.
 - [230] R. Huber, J. Schuderer, T. Graf, K. Jütz, A. Borbély, N. Kuster, P. Achermann, *Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate*, Bioelectromagnetics, vol. 24, 2003, pp. 262–276.
 - [231] S. Regel, G. Tinguely, J. Schuderer, M. Adam, N. Kuster, H.-P. Landolt, P. Achermann, *Pulsed radio-frequency electromagnetic fields: dose-dependent effects on sleep, the sleep EEG and cognitive performance*, J Sleep Res, vol. 16, 2007, pp. 253–258.
 - [232] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, E. Piuze, *Human exposure to radio base-station antennas in urban environment*, IEEE Trans Microw Theory Tech, vol. 48, 2000, pp. 1996–2002.
 - [233] A. Thielens, G. Vermeeren, D. Kurup, W. Joseph, L. Martens, *Organ specific averaged SAR near multiple-frequency base station antennas*, 34th Meeting of the bioelectromagnetics society, Brisbane, Australia: 2012.
 - [234] A. Thielens, G. Vermeeren, W. Joseph, L. Martens, *Influence of the incident angle of single plane-waves on the organ specific SAR at 950 MHz*, 34th Meeting of the bioelectromagnetics society, Brisbane, Australia: 2012
 - [235] A. Thielens, G. Vermeeren, W. Joseph, L. Martens, *Stochastic Method for the Determination of Organ-Specific Averaged SAR in Realistic Environments at 950 MHz*, Bioelectromagnetics, 2013, p. submitted.
 - [236] A. Thielens, G. Vermeeren, W. Joseph, L. Martens, *Organ specific averaged SAR for the central nervous system*, 7th ICNIRP international Non-Ionizing Radiation Workshop, Edinburgh, UK: 2012.
 - [237] A. Thielens, G. Vermeeren, W. Joseph, L. Martens, *Organ specific averaged SAR in a realistic environment at 950 MHz*, 33th Meeting of the bioelectromagnetics society, Halifax, Canada: 2011.
 - [238] S. Kühn, N. Kuster, *Development of Procedures for the EMF Exposure Evaluation of Wireless Devices in Home and Office Environments Supplement 1: Close-to-Body and Base Station Wireless Data Communication Devices*, Zurich, Switzerland: IT'IS Foundation, ETH Zurich, 2006.
 - [239] S. Aerts, D. Plets, L. Verloock, W. Joseph, L. Martens, *Assessment and comparison of RF exposure dose in UMTS femtocell and macrocell scenario*, 2013.

- [240] O. Lauer, P. Frei, M. Gosselin, W. Joseph, M. Rösli, J. Fröhlich, *Combining near- and farfield exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: a reference case*, Bioelectromagnetics, 2013.
- [241] V. Baste, K. Mild, B. Moen, *Radiofrequency exposure on fast patrol boats in the royal Norwegian navy - an approach to a dose assessment*, Bioelectromagnetics, vol. 31, 2010, pp. 350–360.
- [242] <http://www.lexnet-project.eu/>
- [243] S. Kühn, E. Cahot, A. Christ, M. Capstick, N. Kuster, *Assessment of the radio-frequency electromagnetic fields induced in the human body from mobile phones used with hands-free kits*, Phys. Med. Biol, Vol. 54, 2009, pp. 5493-5508.
- [244] S. Aerts, D. Plets, L. Verloock, L. Martens, W. Joseph, *Assessment and comparison of total RF-EMF exposure in femtocell and macrocell scenarios*, Radiation Protection Dosimetry, 2013, accepted.
- [245] Cisco, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017*, White paper.
- [246] M. Böhmer, B. Hecht, J. Schöning, A. Krüger, G. Bauer, *Falling Asleep with Angry Birds, Facebook and Kindle – A Large Scale Study on Mobile Application Usage*, Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI), 2011, pp. 47-56.
- [247] M. Deruyck, W. Joseph, E. Tanghe, L. Martens, *Taking user capacity demands into account to reduce power consumption in wireless access networks*, GREENETS joint COST IC1004 workshop on SON algorithms, 2013.
- [248] M. Deruyck, W. Joseph, E. Tanghe, L. Martens, *Designing Advanced Energy-Efficient Wireless Access Networks by a Capacity Based Deployment Tool*, Future Network & Mobile Summit (FuNems), 2013.
- [249] Besluit van de Vlaamse Regering van 19 november 2010 tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne wat betreft de normering van vast en tijdelijk opgestelde zendantennes voor elektromagnetische golven tussen 10 MHz en 10 GHz.
- [250] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, L. Martens, *Exposure Optimization in Indoor Wireless Networks by Heuristic Network Planning*, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 139, 2013, pp. 445-478.
- [251] G. Vermeeren, W. Joseph, C. Olivier, L. Martens, *Statistical Multipath Exposure of A Human in a Realistic Electromagnetic Environment*, Health Physics, Vol. 94, 2008, pp. 345-354.
- [252] W. Joseph, G. Vermeeren, L. Verloock, L. Martens, *Estimation of whole-body SAR from electromagnetic fields using personal exposure metrics*, Bioelectromagnetics, Vol. 31, 2010, pp. 286-295.