

# Samenvatting proefschrift

## De bepaling van de validiteit van blootstellingsmodellen voor milieuepidemiologie: het voorspellen van elektromagnetische velden afkomstig van telefoon zendmasten

Johan Beekhuizen<sup>1</sup>

Mensen worden in het dagelijks leven blootgesteld aan allerlei omgevingsfactoren, zoals luchtverontreiniging, geluidsoverlast, chemicaliën en elektromagnetische velden (EMV). Het onderzoeksveld van de milieu-epidemiologie probeert antwoord te geven op de vraag of er een verband is tussen deze omgevingsfactoren en de volksgezondheid.

Eén van de belangrijkste uitdagingen in milieu-epidemiologie is het bepalen van de blootstelling van de bevolking aan deze omgevingsfactoren. Studies in milieu-epidemiologie richten zich vaak op gezondheidsrisico's van blootstelling aan relatief lage concentraties van omgevingsfactoren. Hierdoor zijn grote studiepopulaties nodig om mogelijke verbanden tussen de blootstelling en gezondheidsrisico's met genoeg statistische zeggingskracht aan te tonen.

Metingen zijn een betrouwbare manier om de blootstelling aan omgevingsfactoren te bepalen, maar het is bij milieu-epidemiologische studies echter vaak niet haalbaar om op elke locatie of voor elke persoon metingen te doen. Daarom zijn er ruimtelijke modellen ontwikkeld om de blootstelling te berekenen. Deze modellen zijn afhankelijk van de beschikbaarheid van ruimtelijke data. Voor de opslag, verwerking en analyse van de ruimtelijke data worden Geografische Informatie Systemen (GIS) gebruikt. Het meest eenvoudige blootstellingsmodel is 'nabijheid tot bron', dat de blootstelling van individuen classificeert op basis van de afstand tot de bron. Dit model werkt op basis van de aanname dat hoe dicht een individu bij de bron van de blootstelling woont, des te hoger de blootstelling zal zijn. In geavanceerdere modellen wordt rekening gehouden met de verspreiding van de belastende factor in de omgeving.

De validiteit van deze ruimtelijke blootstellingsmodellen voor gebruik in milieu-epidemiologie is vaak onbekend. In dit proefschrift worden verscheidene aspecten die van belang zijn voor het kwantificeren van de validiteit en onzekerheid in modelvoorspellingen besproken. We richten ons specifiek op het modelleren van radiofrequente elektromagnetische velden (RF-EMV) van mobiele telefoonzendmasten, maar veel van de resultaten zijn ook toepasbaar op de validering van andere omgevingsfactoren.

Voor het modelleren van blootstellingen met een hoge ruimtelijke variabiliteit, zoals RF-EMV, is nauwkeurige positiebepaling voor zowel de modelvalidatie als de modelinvoer van belang. Apparatuur dat de positie bepaalt met behulp van het Global Positioning System (GPS) biedt een veelbelovende manier om de locatie buitenshuis

te bepalen.

In **hoofdstuk 2** onderzoeken we daarom de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van GPS-apparatuur voor gebruik in milieu-epidemiologische studies. Om dit te bepalen hebben we twee studies gedaan. In de eerste studie zijn de heen-en-weer reis van twaalf personen van werk naar huis met meerdere GPS-apparaten gemeten, waarbij de personen van verschillende transportmiddelen gebruik hebben gemaakt. De mediaan van de fout in de positiebepaling van de GPS-apparaten was voor wandelen 3.7 m, fiets 2.9 m, trein 4.8 m, bus 4.9 m, en met de auto 3.3 m.

Daarnaast hebben we een studie in Amsterdam gedaan, waar een persoon met meerdere GPS-apparaten door zes verschillende stedelijke gebieden heeft gelopen. Hierdoor konden we het effect van bebouwing op de GPS-fout bepalen. De fouten waren het grootst op de Zuidas, een gebied met hoge kantoorgebouwen (mediaan van de fout was 7.1 m). De fouten waren het kleinst in een woongebied met lage huizen (mediaan van de fout was 2.2 m). Over alle GPS-metingen was 85% van de fouten kleiner dan 10 m. We concluderen dat GPS-apparaten nuttig zijn voor de positiebepaling buitenshuis voor blootstellingsmodellen in milieu-epidemiologische studies. Echter, GPS-fouten kunnen wel degelijk een negatieve invloed hebben op de nauwkeurigheid van blootstellingsmodellen, zeker in stedelijke gebieden en voor omgevingsfactoren met een sterke ruimtelijke variabiliteit.

In **hoofdstuk 3** hebben we onderzocht hoe nauwkeurig de blootstelling aan RF-EMV van mobiele telefoonzendmasten *buitenshuis* voorspeld kan worden met het model NISMap. NISMap is een ruimtelijk model dat de verspreiding van RF-EMV door de omgeving berekend met behulp van informatie over de bronnen van RF-EMV (de zendmasten) en de belangrijkste obstakels (bebouwing). Het model is gevalideerd met herhaalde continue metingen langs voorgedefinieerde 2 km lange routes in vijf verschillende gebieden in Amsterdam. Deze meetstrategie stelde zowel de ruimtelijke als de temporele variantie in RF-EMV vast. De metingen toonden aan dat er relatief weinig temporele variantie in de elektrische veldsterktes was, aangezien maar 1% van de totale variantie in meetwaarden een gevolg is van de meetdag. Het model was in staat om de blootstelling aan RF-EMV van GSM900 en UMTS zendmasten goed te ordenen, met een Spearman correlatie van respectievelijk 0.86 en 0.85 tussen gemodelleerd en gemeten waarden. Echter, de absolute model-

<sup>1</sup> Promotie instituut: Universiteit Utrecht; promotiedatum: 9 oktober 2014

nauwkeurigheid was laag, aangezien modelvoorspellingen vaak enkele factoren afweken van de gemeten waarden.

In **hoofdstuk 4** hebben we de nauwkeurigheid van NISMap voor het voorspellen van de blootstelling aan RF-EMV van mobiele zendmasten *binnenshuis* berekend. De modelnauwkeurigheid binnenshuis is van belang voor epidemiologische studies, aangezien de meeste mensen het grootste deel van hun tijd in een gebouw zijn. We hebben in 263 kamers, verspreid over 101 basisscholen en 30 woonhuizen in Amsterdam metingen gedaan. Dit leverde een Spearman correlatie van 0.73 tussen de gemodelleerde en gemeten RF-EMV. Het model was, net als voor buitenshuis, niet in staat om de absolute RV-EMF sterkte te bepalen, aangezien de modelvoorspellingen vaak enkele factoren groter of kleiner waren dan de gemeten waarden. Daarnaast hebben we bepaald of informatie over gebouweigenschappen, die invloed kunnen hebben op de verspreiding van RF-EMV, de prestaties van het model konden verbeteren. Om dit te bepalen is op elke meetlocatie informatie over de beglazing (enkel of dubbelglas) en de materiaalsoort van de muur en het raamkozijn verzameld. Deze informatie verbeterde de modelvoorspellingen echter niet.

In **hoofdstuk 5** wordt besproken welke invoerdata nodig zijn om betrouwbare modelvoorspellingen voor RF-EMV te maken. In veel epidemiologische studies zijn namelijk niet alle invoerdata aanwezig, zoals 3D-gebouwdaten en gedetailleerde informatie over de antennes van mobiele telefoon-zendmasten. We hebben daarom het model NISMap met diverse datasets laten rekenen, en de modeluitkomsten vergeleken met de metingen buitenshuis (zie hoofdstuk 3). De resultaten laten zien dat het model in staat is om de blootstelling te ordenen wanneer er 3D-gebouwdaten en basisinformatie over antennes (de locatie, hoogte, frequentie en richting) beschikbaar zijn; de Spearman correlaties waren in het algemeen hoger dan 0.6. Het model blijkt niet nauwkeuriger te worden door de parameters aan te passen die de mate van demping van radiogolven door gebouwen beschrijven. Antennespecifieke informatie over de verticale hellingshoek (antennes zijn meestal een paar graden naar beneden gericht), het type en het vermogen hadden geen invloed op de nauwkeurigheid van het model; de resultaten waren vergelijkbaar met het gebruik van standaardwaarden voor deze parameters.

In **hoofdstuk 6** wordt de invloed van onzekerheid in de invoerdata van NISMap op de modelnauwkeurigheid besproken. Ruimtelijke modellen, zoals NISMap, zijn grotendeels afhankelijk van accurate invoerdata, aangezien fouten in de invoerdata een grote invloed kunnen hebben op de modelvoorspellingen. Met Monte Carlo simulatie hebben we het effect van onzekerheid in de invoerdata op de modelberekeningen van NISMap bepaald. De totale onzekerheid in de modelvoorspellingen door onzekerheden in de invoer was groot; de mediaan van de variatiecoëfficiënt was 1.5. De grootste onzekerheden in de modelvoorspellingen zijn het

gevolg van onzekerheden in de invoerdata die bepalen of de antenne in zicht is van de locatie waar de blootstelling voor bepaald wordt, en waarin fouten van enkele meters of meer kunnen zitten. Dit zijn de volgende invoerdata: gebouwhoogte, antenne-locatie, en de locatie en hoogte van de ontvanger. Onzekerheden in de gebouwdempingparameters en het vermogen van de antennes hadden een grote invloed op de absolute modelnauwkeurigheid, maar weinig invloed op de relatieve nauwkeurigheid (i.e. het ordenen van blootstelling van hoog naar laag). Onzekerheden in de hoogte en transmissierichtingen van de antennes (zowel horizontaal als verticaal) hadden weinig invloed op de modelvoorspellingen. We concluderen dat de Monte Carlo onzekerheidsanalyse gebruikt kan worden om de belangrijkste bronnen van onzekerheid te vinden en om de algehele betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen beter te interpreteren.

In het laatste hoofdstuk worden belangrijke aspecten voor het bepalen van de validiteit van blootstellingsmodellen voor epidemiologische studies besproken. We concluderen dat GPS-apparaten waardevol zijn voor het verkrijgen van positionele informatie in epidemiologische studies, maar potentiële fouten moeten wel overwogen worden voor omgevingsfactoren die sterk kunnen variëren binnen een afstand van een paar meter (zoals RF-EMV). Een overzicht van validaties van diverse RF-EMV verspreidingsmodellen laat zien dat geen van de modellen in staat was om de absolute RF-EMV van mobiele telefoonzendmasten accuraat te voorspellen. Echter, een aantal modellen was in staat om met een redelijke betrouwbaarheid de blootstelling te ordenen en classificeren. Voor ruimtelijke modellen is de beschikbaarheid en kwaliteit van de invoerdata belangrijk. We hebben aangetoond dat vooral de invoerdata die bepaalt of de ontvanger in zicht is van de antenne belangrijk is om betrouwbare modelvoorspellingen met NISMap te maken. Daarnaast is het belangrijk om rekening te houden met de mobiliteit van de bevolking om de validiteit van verspreidingsmodellen te bepalen; in epidemiologische studies wordt namelijk vaak de blootstelling van de studieparticipanten bepaald op basis van één locatie waar de persoon veel tijd doorbrengt, zoals de slaapkamer. Mensen zijn zelden alleen maar op deze plek, maar het is erg lastig om voor alle locaties waar een persoon zich bevindt de blootstelling te bepalen. Daarom wordt vaak de blootstelling op één locatie als indicator gebruikt voor de totale blootstelling van die persoon. Om deze afname in modelnauwkeurigheid (door de totale individuele blootstelling met gemodelleerde blootstelling op één vaste locatie te bepalen) hebben we persoonlijke metingen over een hele dag vergeleken met modelvoorspellingen. Dit leverde een lage Spearman correlatie van 0.36 op. Er is dus een sterke misclassificatie, waardoor grote epidemiologische studies nodig zullen zijn om mogelijke gezondheidseffecten te bevestigen dan wel te weerleggen. In onze laatste analyse hebben we bepaald of het NISMap model een gesimuleerd gezondheidseffect kan voorspellen. We vonden een attenuatie van 70% in

de risicoschattingen wanneer we de blootstelling als een continue variabele modelleerden (i.e. 'klassieke' fout). De attenuatie was veel lager wanneer we de blootstelling in drie categorieën opdeelden, gebaseerd op de < 50, 50-90 en >90 percentielen, maar de statistische significantie van de resultaten was lager (i.e. 'Berkson' fout).

Dit proefschrift laat zien hoe de nauwkeurigheid en onzekerheid in een ruimtelijk blootstellingsmodel gekwantificeerd kan worden. Met deze informatie kunnen zowel de geschiktheid als de limitaties van het blootstellingsmodel voor gebruik in milieu-epidemiologie beoordeeld worden, wat uiteindelijk de betrouwbaarheid van epidemiologische studies vergroot.

---