



Universiteit Leiden

Opleiding Informatica

OpenPhoneMap

Het bereik van mobiele zendmasten op de kaart gezet

Name: Tom van Dijkhuizen

Date: 24/06/2018

1st supervisor: Cor J. Veenman

2nd supervisor: Walter A. Kusters

BACHELOR THESIS

Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS)

Leiden University

Niels Bohrweg 1

2333 CA Leiden

The Netherlands

Het bereik van mobiele zendmasten op de kaart gezet

Tom van Dijkhuizen

Samenvatting

Tijdens onderzoeken naar misdrijven kunnen Nederlandse autoriteiten gegevens opvragen bij telecomproviders. In veel gevallen gebeurt dit niet ten tijde van een misdrijf, maar juist achteraf. Om die reden is het niet mogelijk om de exacte locatie van een toestel te schatten door het uit te peilen op het mobiele netwerk. De gegevens die autoriteiten in zulke situaties aangeleverd krijgen, bestaan uit een tijdvak en een identificatienummer van de zendmast waarmee het toestel in dat tijdvak verbonden is geweest. Dit verslag behandelt een methode om aan de hand van grote hoeveelheden historische gegevens en door gebruik te maken van *kernel density estimation* een beeld te creëren van waar mensen geweest kunnen zijn, gegeven dat hun mobiele telefoon is verbonden aan een bepaalde zendmast en hoe dat een kaart kan worden getoond. Deze historische gegevens zijn afkomstig van een online platform genaamd OpenCellID, dat identificatienummers van zendmasten en GPS-posities van toestellen verzamelt. Met hulp van vele deelnemers is een database opgebouwd die vrij beschikbaar is.

Inhoudsopgave

Samenvatting	i
1 Introductie	2
1.1 Overzicht	3
1.2 Plaatsbepaling van mobiele telefoons met behulp van het netwerk	3
1.3 Invloeden van buitenaf	4
1.4 Verplaatsing van zendmasten	6
1.5 Probleem	6
1.6 Gerelateerd werk	7
1.7 Mobiele telefonie onderzocht	7
1.8 Geografische visualisatie	7
1.9 Statistiek en beleid	8
2 Aanpak	9
2.1 Datagestuurde plaatsbepaling achteraf	9
2.2 Verschijningsgebieden van waarnemingen bepalen	12
2.3 Een kansdichtheidsfunctie schatten	13
2.4 Integreren van de kansdichtheidsfunctie	15
2.5 Visualiseren	16
3 Resultaten	17
3.1 Berekeningsmethode voor de bandbreedte	17
3.2 Verschijningsgebieden op de kaart	19
3.3 Het programma	21
4 Conclusies	23
4.1 Vervolgonderzoek	24
Bibliografie	25

Hoofdstuk 1

Introductie

In de inmiddels beruchte Deventer moordzaak is er veel fout gegaan; in de media wordt zelfs gesproken van een justitiële dwaling. De hoofdverdachte in de zaak, Ernest Louwes, is tot twaalf jaar gevangenisstraf veroordeeld [1] en 2009 vrijgekomen nadat hij tweederde van zijn straf had uitgezeten. Louwes beweert zelf dat hij ten tijde van de moord een telefoongesprek voerde vanaf de A28 ter hoogte van Harderwijk — hemelsbreed ruim dertig kilometer van de plaats delict. Zijn mobiele telefoon straalde op dat moment echter een zendmast aan in Deventer, wat zou betekenen dat Louwes op of bij de plaats delict geweest zou kunnen zijn. Uit een onderzoek uit 2007 [2, 3] is echter gebleken dat het als gevolg van de weersomstandigheden op de dag van de moord goed mogelijk is dat Louwes zich inderdaad op de A28 bevond. Verder zou Louwes' telefoon niet de dichtstbijzijnde zendmast hebben aangestraald, maar juist de dichtstbijzijnde die opereerde op een bepaalde frequentie.

Het mag duidelijk zijn dat telefoongegevens van een verdachte kunnen helpen zijn alibi te bevestigen of juist te ontkrachten. Wanneer een verdachte een goed alibi heeft, kan dat zijn vrijspraak betekenen, waarmee wordt voorkomen dat hij mogelijk onschuldig en dus onterecht tot een gevangenisstraf wordt veroordeeld.

1.1 Overzicht

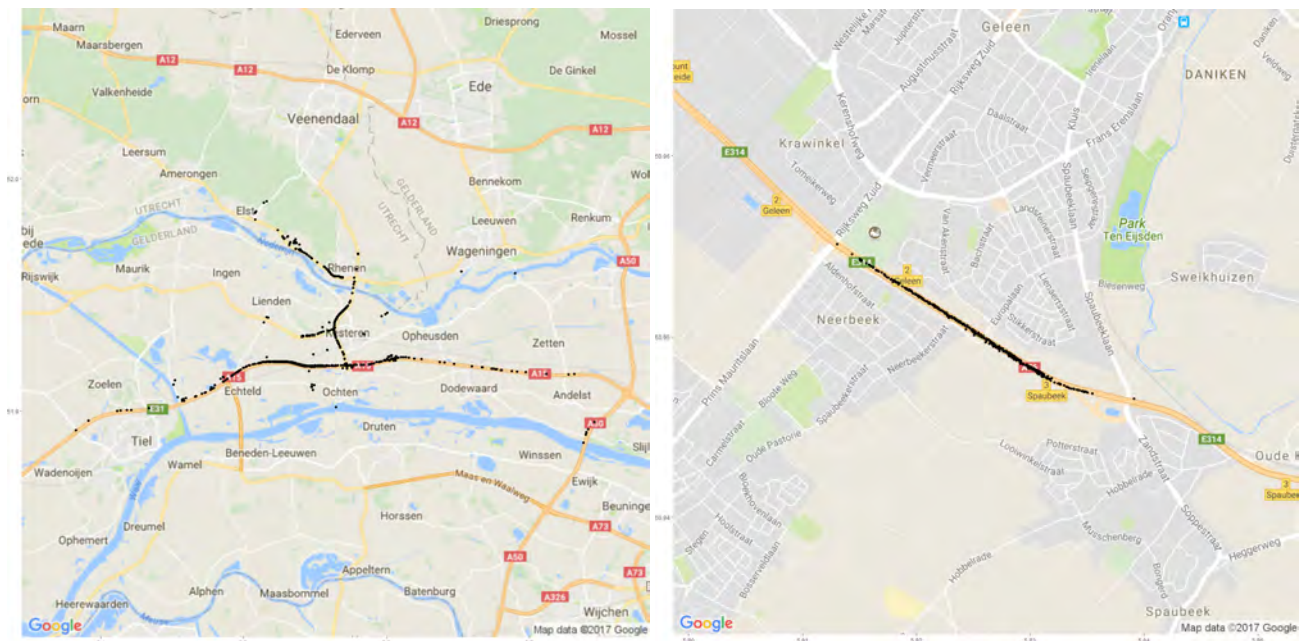
In Hoofdstuk 1.2 van deze bachelorscriptie wordt ingegaan op plaatsbepaling van mobiele telefoons aan de hand van het netwerk. Daarna worden enkele factoren behandeld die van invloed zijn op het netwerk. Vervolgens wordt het voor zojuist besproken scenario van de Deventer moordzaak een achterliggend probleem besproken en als laatste wordt ingegaan op enkele gerelateerde onderzoeken. In Hoofdstuk 2 wordt een aanpak gegeven om dit probleem op te lossen. Daarna zullen in Hoofdstuk 3 resultaten worden getoond en in Hoofdstuk 4 wordt een conclusie geformuleerd, waarbij nog kort wordt ingegaan op de Deventer moordzaak. Ook wordt er een drietal onderwerpen voor vervolgonderzoek wordt gegeven.

1.2 Plaatsbepaling van mobiele telefoons met behulp van het netwerk

De nauwkeurigste manier om aan de hand van een smartphone te bepalen waar iemand zich bevindt, is door deze te volgen via GPS. Moderne smartphones beschikken doorgaans over hard- en software om hun plaats te bepalen. Sommige toestellen gebruiken daarnaast ook nog andere systemen, zoals het Russische GLONASS en het Europese Galileo [4, 5].

Om een smartphone met behulp van deze systemen te volgen, is toegang tot het toestel vereist; hetzij fysiek, hetzij softwarematig. Omdat dat vaak niet mogelijk is, zal men het toestel moeten volgen door het uit te peilen met een driehoeksmeting [6]. Door de afstand tussen de telefoon en een drietal zendmasten in te schatten, kan men de locatie van het toestel bij benadering bepalen. Dit kan echter alleen “live” — men moet dus voor, tijdens of direct na een misdrijf beginnen. Vaak gaat dit niet, omdat de autoriteiten pas achteraf op de hoogte zijn van het misdrijf en in het bijzonder van mogelijke betrokkenen. Daarom gebruikt men in de regel metadata zoals: de datum en het tijdstip van aanvang en einde van de verbinding tijdens een gesprek of bij het verzenden of ontvangen van een sms-bericht; de telefoonnummers van de beller en de gebelde; en de cell-ID, een uniek nummer voor een gegeven zendmast, bij het begin van de verbinding [7]. Hierbij moet worden opgemerkt dat het na een aantal gerechtelijke uitspraken [8, 9] voor providers niet langer verplicht is dergelijke gegevens te bewaren. Een wetsvoorstel [10, 11] om een nieuwe bewaarplicht in te voeren, is in behandeling. In de nieuwe bewaarplicht zouden de criteria voor toegang tot de opgeslagen metadata een stuk strenger zijn dan in de oude. Hoe men momenteel aan metadata komt, is verder niet van belang voor dit verslag: het gaat hier alleen om de gegevens zélf en niet om het verkrijgen daarvan. Daarnaast staat de afwezigheid van de bewaarplicht providers niet in de weg om gegevens alsnog te bewaren. Ze kunnen daartoe immers ook ander rechtvaardigingsgronden hebben.

Plaatsbepaling aan de hand van metadata varieert sterk in nauwkeurigheid. Zo kan een zendmast een gebied ter grootte van enkele voetbalvelden bedienen, maar ook een gebied ter grootte van vele vierkante kilometers.



(a) Waarnemingen van een GSM-mast verspreid over een gebied waarvan de doorsnede bijna 30 kilometer is. (b) Waarnemingen van een UMTS-mast verspreid over een gebied waarvan de doorsnede ongeveer 2 kilometer is.

Figuur 1.1: Verschil in spreiding van waarnemingen van een GSM-mast en een UMTS-mast.

Dit is duidelijk te zien in Figuur 1.1. Daarom is het interessant te berekenen hoe waarschijnlijk het is dat een persoon in een bepaald gebied is geweest op basis van de metadata¹; in het bijzonder de cell-ID van de zendmast waarmee zijn telefoon verbinding heeft gehad.

1.3 Invloeden van buitenaf

Het is nooit exact bekend hoe het straalgebied van een mobiele zendmast eruit ziet. Wanneer zendmasten gelijkmatig over een gebied verspreid zijn, ze allemaal even sterk zenden en er geen sprake is van interferentie, zullen hun straalgebieden de vorm van regelmatige zeshoeken gaan aannemen [12], zoals te zien is in Figuur 1.2a². In de praktijk is er echter altijd wel sprake van interferentie van andere stralingsbronnen, zoals aan andere zendmasten, alsmede vele andere zaken die het straalgebied en dus de dekking van een zendmast — en daarnaast elektromagnetische straling in het algemeen — beïnvloeden; hiervan volgt nu een korte uiteenzetting.

Allereerst is er de zendmast zelf. Het signaal van een antenne die met een laag vermogen zendt, zal minder ver weg te ontvangen zijn dan dat van een antenne die met een hoog vermogen zendt. Dit geldt ook aan de zijde van de mobiele telefoon: als deze niet sterk genoeg kan zenden, zal de zendmast zijn signaal niet kunnen ontvangen en zal er geen verbinding zijn.

¹Eigenlijk: soortgelijke gegevens.

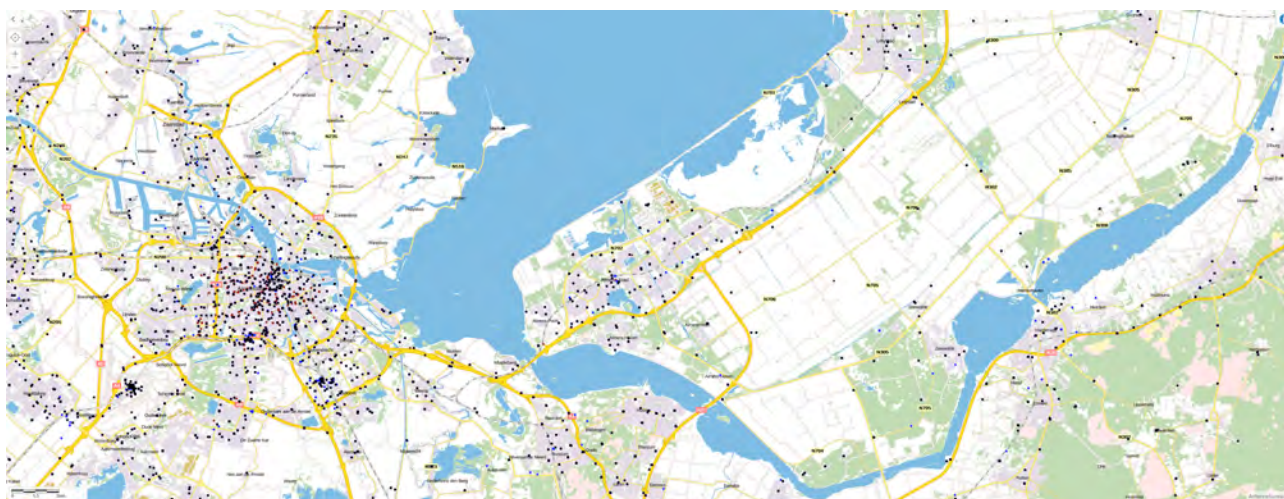
²Bewerkt; origineel via https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network#Concept



Figuur 1.2: Schematische weergaven van enkele verdelingen van zendmasten.

In de praktijk is het niet zo dat de zendmasten geplaatst zijn volgens de theoretische verdeling. Integendeel zelfs: Figuur 1.3³, die is verkregen via het Antenneregister, laat duidelijk zien dat er in een grote stad als Amsterdam veel meer zendmasten staan dan in een landelijk gebied als de Flevopolder. Dit ter compensatie van de vele gebouwen die in een stedelijk gebied het signaal verstoren. Dit probleem doet zich op het platteland uiteraard veel minder voor. Ook zijn er in de Flevopolder veel minder mensen — en dus minder mobiele telefoons — dan in Amsterdam, met als gevolg dat het op het netwerk in Amsterdam drukker is dan op het platteland.

Een nauwkeurigere verdeling wordt geschetst in Figuur 1.2b⁴. Ook deze verdeling sluit echter niet geheel aan bij de werkelijkheid. Vanwege de in dit gedeelte beschreven invloeden zullen de straalgebieden per dag — of zelfs per dagdeel — aan kleine veranderingen onderhevig zijn. Een nóg betere visualisatie is daarom gegeven in Figuur 1.2c⁵.



Figuur 1.3: Plaatsing van GSM-, UMTS- en LTE-masten in en rond Amsterdam en Almere.

³Bewerkt. Verkregen op 7 augustus 2017 via <http://www.antenneregister.nl/>.

⁴Bewerkt; origineel via <https://nl.wikipedia.org/wiki/Voronoi-diagram>

⁵Bewerkt; origineel via https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi_diagram#Generalizations_and_variations

Ook het type zendmast is van invloed. GSM-masten hebben een ander straalgebied dan UMTS- of LTE-masten. Dit komt doordat de verschillende soorten zendmasten op andere frequentiebanden werken. Over het algemeen ondervindt hoogfrequente elektromagnetische straling grotere problemen met obstakels dan laagfrequente. Bij obstakels kan worden gedacht aan bouwwerken, maar ook aan elementen van het landschap zoals bomen en heuvels. Om die reden zal een zendmast op het platteland betere dekking bieden dan een vergelijkbare zendmast in een stedelijk gebied. Het zal menig smartphonebezitter ook bekend voorkomen dat zijn toestel binnen een gebouw een slechtere verbinding heeft dan buiten — hoewel de mate waarin dat gebeurt natuurlijk gedeeltelijk afhangt van het gebouw.

Daarnaast heeft de atmosfeer invloed op de propagatie van een radiosignaal. Onder normale omstandigheden neemt de temperatuur in de lucht af met de hoogte. Er zijn echter situaties waarin dit niet het geval is. De temperatuur blijft dan gelijk of neemt zelfs toe met de hoogte. Deze twee verschijnselen worden respectievelijk isothermie en inversie genoemd [13, p. 16]. Al decennialang is bekend [13, p. 236] dat radio- en televisiesignalen beïnvloed worden door inversies. Radioamateurs spreken op internetsites en -fora in dergelijke situaties van een duct. In de praktijk kan men dit ervaren wanneer normale radioapparatuur, zoals autoradio's, buitenlandse radiozenders kan ontvangen. Andere zichtbare effecten van temperatuurinversies zijn laaghangende bewolking en smog [14].

1.4 Verplaatsing van zendmasten

De politie beschikt zelf over lijsten van zendmasten⁶ met hun locaties. Het komt echter voor dat een cell-ID verplaatst. Dit kan een probleem zijn bij het bepalen met welke zendmast een mobiele telefoon verbonden is geweest: de telefoon kan immers in de straalgebieden van twee of meer verschillende zendmasten met dezelfde cell-ID zijn geweest.

1.5 Probleem

Het in dit onderzoek onderhavige probleem is tweeledig. Enerzijds moet duidelijk worden gemaakt of en met welke waarschijnlijkheid een mobiele telefoon in een bepaald gebied kan zijn geweest, gegeven de cell-ID van de zendmast die de telefoon heeft aangestraald. Te denken valt bijvoorbeeld aan een bepaalde straat of woonwijk, een park of een winkelcentrum. Anderzijds moet van iedere cell-ID duidelijk worden gemaakt welke gebieden de bijbehorende zendmast ooit heeft bediend. Deze twee gegevens moeten inzichtelijk worden gemaakt door een en ander op een kaart weer te geven.

⁶Eigenlijk: hun cell-ID's.

1.6 Gerelateerd werk

Dit onderzoek heeft raakvlakken met een aantal vakgebieden. Centraal staat de mobiele telefonie. Over mobiele telefoons en mobiele netwerken is in de afgelopen twee decennia veel te doen geweest en dat zal in de toekomst ook het geval zijn. Daarnaast komt de statistiek aan bod. Er wordt aandacht besteed aan een techniek waarmee een discrete verzameling kan worden beschreven als continue functie. Als laatste komt geografische visualisatie aan bod, aangezien het doel van dit project is om zaken op een kaart te tekenen.

1.7 Mobiele telefonie onderzocht

Al sinds de uitvinding van antennes ruim honderd jaar geleden wordt er onderzoek gedaan naar antennes en de signalen die ze voortbrengen. In [15] worden in het kort de geschiedenis en uitvoerig de werking van antennes en radiogolven uiteengezet. In [16] wordt ingegaan op de propagatie van radiogolven en in het bijzonder op de afname van de sterkte van een signaal naarmate de afstand tussen zender en ontvanger toeneemt en hoe dit een eigenschap is van golven met een bepaalde golflengte. Dit alles is natuurlijk zeer relevant voor mobiele telefonie: elektromagnetische golven staan aan de basis.

Recenter, namelijk in 2015, is een masterscriptie [17] gepubliceerd waarin de auteur, Johan Alexander Nordstrand, een tweetal algoritmes presenteert om aan de hand van grote hoeveelheden gebruikersdata, verkregen via het online platform OpenCellID, de locatie van een mobiele zendmast te berekenen.

Enkele jaren eerder is er een onderzoek [18] verschenen waarin men probeert de locatie van mobiele telefoons te bepalen door te “luisteren”. De onderzoekers gebruikten een telefoon met aangepaste software om signalen tussen telefoons en zendmasten te onderscheppen. Aan de hand van de signaalsterkte proberen ze de locatie van een gegeven zendmast te bepalen. Met de combinatie van die gegevens zijn zij in staat om van een telefoonnummer te bepalen of de bijbehorende telefoon was verbonden met een gegeven zendmast. Zo kan tot op een relatief klein gebied — in een stad ongeveer een vierkante kilometer — de locatie van de telefoon worden ingeschat. Dit alles hebben zij gedaan met een normale laptop en met apparatuur die voor een paar honderd dollar te koop is.

1.8 Geografische visualisatie

In dit verslag speelt ook geografische visualisatie — ook wel afgekort tot geovisualisatie — een zeer belangrijke rol. Op dat gebied wordt veel gedaan. Zo is er in eigen land bijvoorbeeld de Geodienst van de

Rijksuniversiteit Groningen, die zich bezighoudt met maatschappelijk relevante en uiteenlopende onderwerpen zoals afstanden tussen woningen en stembureaus [19], waar de dichtstbijzijnde OV-fiets te vinden [20] is, maar ook zaken als de aanrijtijden van ambulances [21] en de opwekking van verschillende soorten duurzame energie. Dit zijn voorbeelden van geografische-informatiesystemen. De Nederlandse overheid levert informatie die kan worden gebruikt in zo'n informatiesysteem via [22].

Heden ten dage wordt geoinformatie voornamelijk geproduceerd en verwerkt met computers. Er zijn opensourcepakketten die daarin gespecialiseerd zijn. Een aantal bekende zijn: Geographic Resources Analysis Support System [23], GeoTools [24] en OpenLayers [25]. Naast gespecialiseerde software zijn er ook andere dataverwerkingspakketten met modules voor verwerking van geoinformatie. Te denken valt aan de Mapping Toolbox voor Matlab [26] en ggmap voor R [27]. Laatstgenoemde komt in Hoofdstuk 2.5 aan de orde.

1.9 Statistiek en beleid

Inzichten die verkregen zijn door toepassing van technieken uit de statistiek, kunnen gevolgen hebben in het dagelijks leven. Enerzijds kunnen deze inzichten door beleidsmakers worden gebruikt. Anderzijds kunnen diezelfde methodes ook gebruikt worden om de gevolgen van het gevoerde beleid te beschrijven. Een voorbeeld van dat laatste is een onderzoek [28] naar de effecten van het fiscaal beleid in Australië op de vraag naar private zorgverzekeringen. Dichter bij huis is een onderzoek van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu [29] waarin in vier Nederlandse steden wordt geteld hoeveel fietsers en voetgangers — al dan niet in strijd met de verkeersregels — gebruikmaken van de beschikbare infrastructuur en hoe zij dat doen. Met die informatie wordt berekend hoe veilig de bestudeerde voet- en fietspaden zijn. Aan de hand van die berekeningen wordt een aantal aanbevelingen gedaan aan wegbeheerders, waarmee de inrichting van nieuwe of bestaande infrastructuur veiliger kan worden gemaakt.

Hoofdstuk 2

Aanpak

In dit Hoofdstuk wordt een manier gepresenteerd om een beeld te vormen van waar mobiele telefoons — en dus de eigenaar of houder daarvan — zich kunnen hebben bevonden, gegeven de cell-ID van de zendmast die ze hebben aangestraald. Daartoe wordt eerst ingegaan op een aantal projecten die locatiegegevens van mobiele telefoons van gebruikers verzamelen. Daarna wordt een methode beschreven waarmee de gegevens die zijn verkregen met behulp van één van die projecten, te visualiseren. Als laatste wordt bekeken hoe dit alles met behulp van de online kaartendienst Google Maps concreet zichtbaar kan worden gemaakt.

2.1 Datagestuurde plaatsbepaling achteraf

Vanwege de problemen die genoemd zijn in Hoofdstuk 1.3, is het nodig om op een andere manier inzicht te verkrijgen in de straalgebieden van zendmasten. De in 1.7 aangehaalde onderzoeken gaan hoofdzakelijk over de plaatsing en eigenschappen van antennes. Hier is gekozen voor een andere aanpak, namelijk het analyseren van historische locatiegegevens van mobiele telefoons en gegevens over de verbindingen die ze maken met het netwerk.

Er zijn een aantal projecten die zulke gegevens in anonieme vorm opslaan. Zulke gegevens worden doorgaans observaties of waarnemingen genoemd. Deze twee termen worden door elkaar heen gebruikt. Doel van dergelijke projecten is om enkele miljoenen of zelfs miljarden van deze observaties op te slaan in een database en beschikbaar te stellen aan derden voor verdere verwerking. Van deze diensten zijn de onbewerkte gegevens doorgaans niet openbaar, vaak in verband met de privacy van gebruikers en betrokkenen. Dit geldt voor de locatiedienst Mozilla Location Service, zoals de organisatie aangeeft in [30]. Een andere dienst is <https://www.radiocells.org>. Als laatste is er <http://www.opencellid.org>. Omdat de laatstgenoemde over aanzienlijk meer gegevens beschikt, heeft deze de voorkeur gekregen.

De data van OpenCellID bestaat uit ongeveer veertig bestanden in het CSV-formaat [31]. In Tabel 2.2¹ staat hiervan een korte samenvatting. Omdat dit project alleen gericht is op Nederland, wordt het deel van de OpenCellID-data met andere landcodes dan 204 en negatieve X- en Y-coördinaten weggelaten. Verder richt dit project zich hoofdzakelijk op de cell-ID en de coördinaten van de waarnemingen. De meeste waarnemingen bevatten slechts een deel van de beschreven velden; dat blijkt ook uit de beschrijvingen ervan: sommige velden komen alleen voor bij waarnemingen met een bepaald type netwerk.

mcc	net	area	cell	x	y	signal	measured	created	(...)	radio	(...)
204	8	3330	11372	7.064985	52.323708	-100	1481532901	1481533101	(...)	GSM	(...)
204	16	1519	13372820	4.9233998	52.3429735		1481528954	1481529977	(..)	UMTS	(...)
204	16	520	6745610	5.5882367	52.1438572		1481526956	1481530055	(...)	LTE	(...)

Tabel 2.1: Drie voorbeelden van waarnemingen zoals verkregen uit de OpenCellID-database. Een aantal kolommen zijn hier weggelaten en de waarden van *measured* en *created* zijn uitgedrukt in seconden in plaats van milliseconden.

In Tabel 2.1 zijn drie voorbeelden opgenomen van waarnemingen uit de OpenCellID-database. Van alle netwerktypes die in Nederland worden gebruikt, wordt één waarneming gegeven.

Veld	Betekenis	Beschrijving
MCC	Mobile country code	Landcode; voor Nederlandse zendmasten is dit getal 204, alhoewel deze landcode ook in Duitsland en België blijkt voor te komen.
Net	Mobile network code	Code die in combinatie met de MCC een netwerk identificeert; bij CDMA-netwerken is dit de <i>System identification number (SID)</i> .
Area	Location area code	Code voor GSM- en UMTS-netwerken. Zie tac voor LTE-netwerken en nid voor CDMA-netwerken
Cell	cell-ID/BID	Code die een zendmast identificeert; bij CDMA-netwerken is dit het <i>Base station identification number (BID)</i> .
Lon	Longitude	Lengtegraad van de GPS-positie van het toestel ten tijde van de waarneming vanaf hier: X-coördinaat. In het kader van eenduidigheid en eenvoud is deze kolom in de database hernoemd naar x .
Lat	Latitude	Breedtegraad van de GPS-positie van het toestel ten tijde van de waarneming vanaf hier: Y-coördinaat. In het kader van eenduidigheid en eenvoud is deze kolom in de database hernoemd naar y .
Signal Measured		Maat voor de signaalsterkte van de verbinding met het netwerk. Aantal milliseconden sinds het Unix-epoch (1 januari 1970 om 00:00:00 UTC) ten tijde van de waarneming.
Created		Aantal milliseconden sinds het Unix-epoch op het moment dat de waarneming aan de OpenCellID-database is toegevoegd.
Rating Speed		Maat voor de nauwkeurigheid van de GPS-positie in meters. Snelheid waarmee het toestel zich voortbewoog ten tijde van de waarneming.
Direction		Richting waarin het toestel zich voortbewoog ten tijde van de waarneming.

Tabel gaat verder op de volgende pagina.

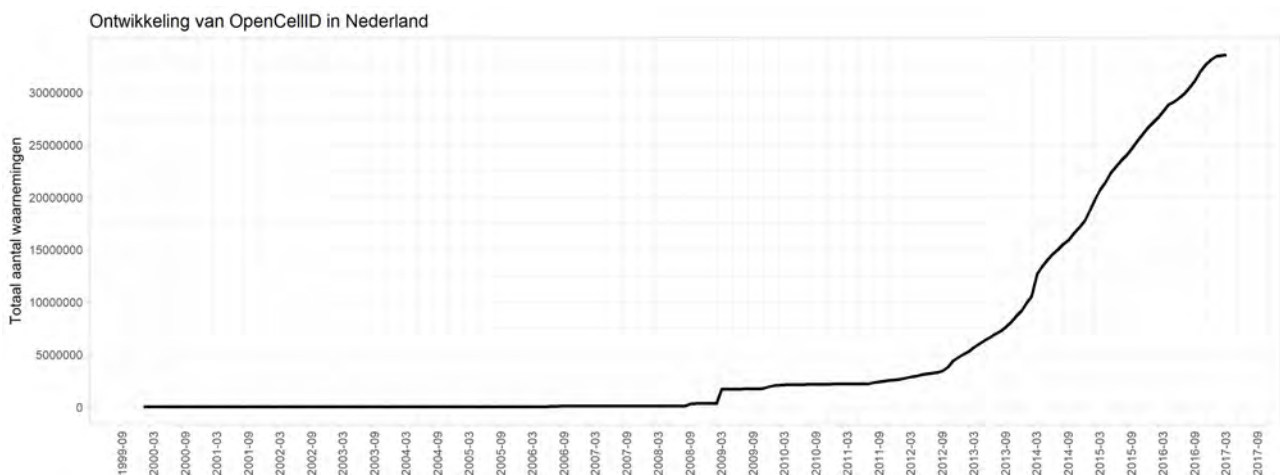
¹In 2017 is <http://www.opencellid.org> overgenomen. Inmiddels is de bewuste webpagina (wiki.opencellid.org/wiki/Menu_map_view) gewijzigd, waarbij veel informatie is verwijderd. De versie waaraan hier gerefereerd wordt, is op het moment van schrijven te vinden op https://web.archive.org/web/20170809162852/http://wiki.opencellid.org/wiki/Menu_map_view#measurements_2A_CSV_file_format.

Veld	Betekenis	Beschrijving
Radio	Netwerktipe	Eén van de volgende strings: GSM; UMTS; LTE; CDMA. In het hier gebruikte deel van de OpenCellID-data geen waarnemingen voor op CDMA-netwerken. Dit suggereert dat dit type netwerk niet in Nederland operationeel is of is geweest.
ta	Timing advance	Alleen gedefinieerd voor GSM- en LTE-netwerken.
rnc	Radio network controller	Alleen gedefinieerd voor UMTS-netwerken.
cid	Cell ID	Alleen gedefinieerd voor UMTS-netwerken.
psc	Primary scrambling code	Alleen gedefinieerd voor UMTS-netwerken.
tac	Tracking area code	Alleen gedefinieerd voor LTE-netwerken.
pci	Physical cell ID	Alleen gedefinieerd voor LTE-netwerken.
sid	System identification number	Alleen gedefinieerd voor CDMA-netwerken.
nid	Network ID	Alleen gedefinieerd voor CDMA-netwerken.
bid	Base station ID	Alleen gedefinieerd voor CDMA-netwerken.

2

Tabel 2.2: Beschrijving van de OpenCellID-data.

Om een idee te geven over de ontwikkeling van de OpenCellID-data staat in Figuur 2.1 een grafiek van het aantal waarnemingen in Nederland. In totaal zijn er in Nederland ruim 33 miljoen waarnemingen gedaan. Uit statistieken op een pagina van 2015 blijkt [32] dat er tot dat moment ruim 49.000 vrijwilligers hebben meegewerkt aan het verzamelen van de data.



Figuur 2.1: Het aantal observaties in Nederland tussen januari 2000 en maart 2017, gebaseerd op de database van OpenCellID.

De allereerste Nederlandse waarnemingen dateren uit het jaar 2000. Dit zijn er ongeveer 300. Van de jaren daarna zijn geen gegevens, tot 2006: in dat jaar begint de database enigszins te groeien. Overigens is OpenCellID in 2008 is begonnen. Vanaf dat moment wordt de database vrijwel elk halfjaar groter, waarbij de sterkste groei zich voordoet in de laatste vijf jaar. De gegevens van voor dat jaar zijn mogelijk afkomstig uit samenwerkingen met andere projecten: in ieder geval in 2014 is OpenCellID een samenwerkingsverband aangegaan met Mozilla [33] en heeft daarbij gegevens uitgewisseld. Het is niet ondenkbaar dat men ook met andere partijen heeft samengewerkt.

²In 2017 is <http://www.opencellid.org> overgenomen. Inmiddels is de bewuste webpagina (wiki.opencellid.org/wiki/Menu_map_view) gewijzigd, waarbij veel informatie is verwijderd. De versie waaraan hier gerefereerd wordt, is op het moment van schrijven te vinden op https://web.archive.org/web/20170809162852/http://wiki.opencellid.org/wiki/Menu_map_view#measurements_2A_CSV_file_format.

2.2 Verschijningsgebieden van waarnemingen bepalen

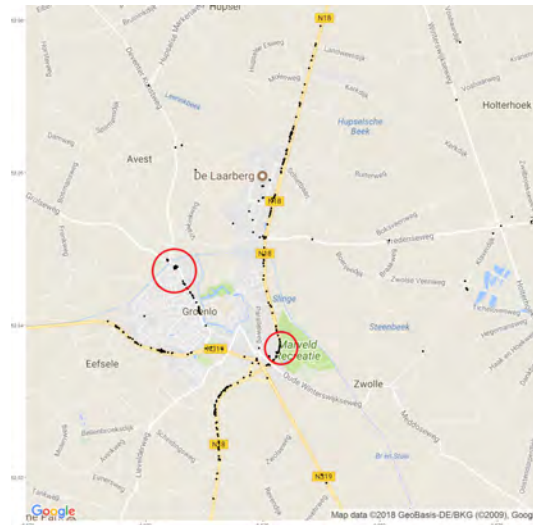
Zoals in de Hoofdstukken 1.3 en 2.1 is besproken, is het exacte straalgebied van een zendmast vrijwel nooit bekend. Vandaar dat voor een datagerichte aanpak is gekozen op basis van de OpenCellID-database. Ook op basis daarvan is het echter niet mogelijk om het straalgebied te bepalen. Het kan immers zo zijn dat de data van een gegeven cell-ID onvolledig is. Hierdoor kan het voorkomen dat, blijkens de database, waarnemingen van die cell-ID in een gebied voorkomen, terwijl er in werkelijkheid ook toestellen buiten dat gebied zijn geweest en toch dezelfde zendmast aangestraald hebben. Daarom bepalen de waarnemingen niet zozeer het straalgebied van de zendmast, maar juist een *verschijningsgebied*: het gebied waarbinnen zich alle waarnemingen behorend bij een zendmast zich bevinden. Het straalgebied van de zendmast is minimaal het verschijningsgebied, maar kan uiteraard groter zijn.

Om antwoord te geven op de vraag of een mobiele telefoon in een bepaald gebied kan zijn geweest, gegeven dat deze een bepaalde zendmast heeft aangestraald, is het van belang om te weten of er überhaupt mobiele telefoons in dat gebied komen en zo ja, of ze dan diezelfde zendmast hebben aangestraald. Daarnaast is het interessant om aan de hand van de OpenCellID-data een kansberekening te maken: hoe groot is de kans dat de telefoon in kwestie in het aangegeven gebied is geweest?

Om deze vragen te beantwoorden, moet van de data een model worden gemaakt. Een mogelijkheid daartoe is om een tweetal histogrammen te combineren: één voor de horizontale as en één voor de verticale as. Nadeel hiervan is dat voor het maken van een histogram het aantal kolommen bekend moet zijn. Daarnaast kan het voorkomen dat een histogram een datapunt in een kolom plaatst waar het feitelijk niet verwacht wordt. Een ander probleem is de aanwezigheid van ruis, ook wel uitschieters of *outliers* genoemd. Deze zullen zeer nadrukkelijk naar voren komen in het eindresultaat.

Om de invloed van ruis te beperken, kan een bekende functie gebruikt worden om de posities van waarnemingen te beschrijven, in plaats van histogrammen. Door aan te nemen dat de waarnemingen zich gedragen volgens een bekende verdeling, zou een schatting gemaakt kunnen worden van de kans dat een telefoon zich in het gevraagde gebied heeft bevonden. Die aanname is echter fout: het is niet aannemelijk dat de waarnemingen zich zodanig zullen gedragen dat ze zich laten vastleggen in een eenvoudige verdeling — bijvoorbeeld de Gaussverdeling. Dit komt doordat mensen zich hoofdzakelijk verplaatsen langs straten en wegen. Dit is duidelijk te zien in Figuur 2.2. Hier zijn twee gebieden omcirkeld waar zich veel waarnemingen bevinden. Als de waarnemingen met één Gaussverdeling zouden worden beschreven, zouden de twee groepen niet meer zichtbaar zijn. Een andere mogelijkheid is om de verzameling te beschrijven als som van twee Gaussverdelingen, waarbij het gemiddelde van de verdelingen precies in de omcirkelde gebieden ligt. Ook dat is niet voldoende: het feit dat de waarnemingen het stratenpatroon volgen, gaat daarmee verloren. Ook moeten voor een Gaussverdeling het gemiddelde en de spreiding worden vastgesteld. Dat is niet triviaal

en zal hier dan ook vaak verkeerd uitpakken. Om die reden is zal er dus een andere manier moeten worden gebruikt om een verzameling waarnemingen te beschrijven.



Figuur 2.2: Twee groepen van observaties met cell-ID 56351 die dicht bij elkaar liggen.

2.3 Een kansdichtheidsfunctie schatten

Een andere mogelijkheid om de waarnemingen te beschrijven, is om rond alle waarnemingen een Gaussverdeling te zetten met een vaste spreiding van 1 en het resultaat te sommeren. De resulterende functie benadert de kansdichtheidsfunctie die waarnemingen exact beschrijft. Dat is het principe van *kernel density estimation* (ook: KDE) [34, 35]. Bij KDE is er geen sprake van kolommen, zodat het aantal kolommen niet hoeft worden gekozen. Zo maakt KDE geen aannames over verdelingen. KDE is een methode voor *smoothing* en wordt in dit verslag gebruikt om een discrete dataset te beschrijven met een schatting van de kansdichtheidsfunctie. Deze functie, doorgaans aangeduid met $\hat{f}$, wordt gegeven door:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

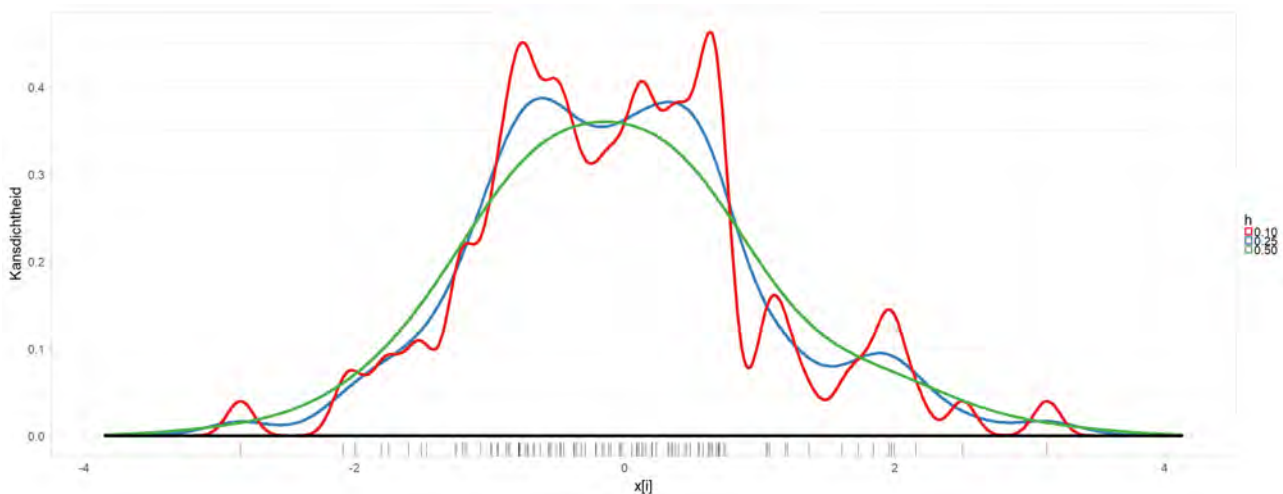
Hierin is K de functie die de Gaussverdeling beschrijft [36, pp. 127–129]. n is het aantal waarnemingen in de gevraagde cell. De resulterende functiewaarde is de kansdichtheid op enig punt x . De geschatte functie berekent deze kansdichtheid op basis van alle x_i voor alle $1 \leq i \leq n$ — dat wil zeggen: een gehele verzameling waarnemingen wordt gebruikt om de kansdichtheid te berekenen. In de regel zullen dat waarnemingen met één cell-ID zijn.

Een waarde die van belang is voor KDE is de bandbreedte, doorgaans aangeduid met de letter h . De waarde van h is bepalend voor de mate van *smoothing* in de resulterende schatting. Dit is duidelijk te zien in Fi-

guur 2.3: hoe groter h , des te “zachter” de resulterende kromme. Wanneer h klein genoeg is, zal de resulterende kromme de onderliggende data zeer dicht benaderen. Daardoor kan het voorkomen dat h zodanig klein wordt gekozen dat er pieken ontstaan. Feitelijk is de resulterende kromme dan een exacte weergave van de oorspronkelijke data, waardoor deze kromme geen nieuwe inzichten oplevert. Ook in dit geval zal ruis een probleem zijn. Aan de andere kant kan er ook informatie verloren gaan door een te grote bandbreedte. Hierom zal een geschikte waarde moeten worden gekozen op basis van de data. Een methode om h te kiezen, is de vuistregel die wordt beschreven in [37]. Deze formule wordt vaak gebruikt vanwege de eenvoud ervan:

$$h = \frac{c \cdot A}{n^{\frac{1}{5}}}$$

waarbij A een schatting is van de standaarddeviatie en c een constante: $c = 1.06$. Deze formule is bekend als de vuistregel van Scott en is afgeleid uit een eerdere formule, gegeven in [38], waarin $c = 0.9$. De laatstgenoemde wordt de vuistregel van Silverman genoemd.



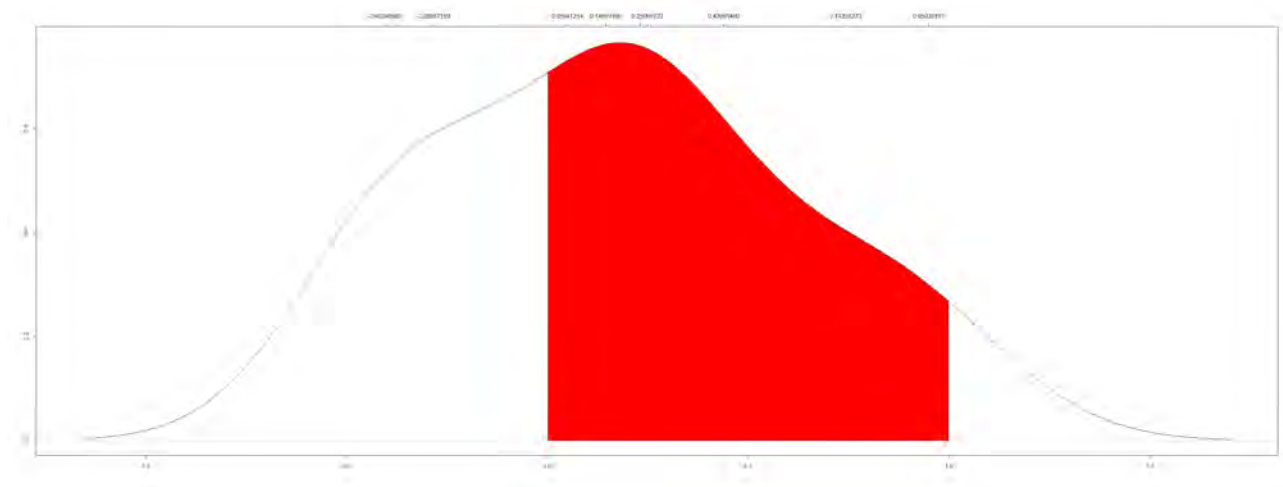
Figuur 2.3: *Kernel density estimation* met verschillende waarden voor h .

Twee andere methodes om de bandbreedte te bepalen, *direct plug-in* (hierna: DPI) en *solve-the-equation* (hierna: STE), zijn gegeven in [39]. De twee methodes zijn volgens de auteurs beter dan de vuistregels, in die zin dat de resulterende kansdichtheidsfunctie dichter bij de werkelijkheid ligt dan bij gebruik van andere methodes. In [36, pp. 127-129] wordt de voorkeur aan deze methodes gegeven boven de eerder genoemde vuistregels, gezien de nauwkeurigheid ervan. In Hoofdstuk 3.1 zal een definitieve keuze vallen, die aldaar nader zal worden toegelicht.

2.4 Integreren van de kansdichtheidsfunctie

Het is niet mogelijk om met de kansdichtheidsfunctie (en dus door middel van KDE) voor één specifiek punt aan te geven hoe groot de kans is dat een mobiele telefoon daar is geweest; die is immers altijd nul. Het is wel mogelijk de kans te berekenen dat een a tussen x_1 en x_2 valt, met $x_1 < x_2$. Dit doet men door $\hat{f}'$ te integreren tussen deze twee waarden: $\int_{x_1}^{x_2} \hat{f}'(x) dx$.

Het integreren van een door KDE geschatte kansdichtheidsfunctie in één dimensie is te zien in Figuur 2.4. De onderliggende data bestaat uit een tiental getallen³. De kansdichtheidsfunctie is bepaald met KDE. De kans dat nu een nieuw datapunt in het interval $[0, 1]$ komt te liggen, bedraagt ongeveer 0,559.



Figuur 2.4: Kansdichtheidsfunctie geïntegreerd op het interval $[0, 1]$.

Omdat de OpenCellID-waarnemingen tweedimensionaal zijn, is de formule voor de kansdichtheidsfunctie hier uitgebreid [36, p. 130] tot

$$\hat{f}_{h_x h_y}(x, y) = \frac{1}{n \cdot h_x \cdot h_y} \cdot \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h_x}\right) \cdot K\left(\frac{y - y_i}{h_y}\right)$$

Hier gelden dezelfde principes als voor KDE in één dimensie. Het lijkt wellicht vreemd dat er niet is gekozen voor een dubbele sommatie. Dit is te verklaren doordat de tweedimensionale variant een specifieke variant is van multidimensionale KDE, waarbij x en x_i als vectoren en h als matrix gezien kunnen worden. Bij k -dimensionale KDE wordt één keer gesommeerd over de producten van k vectoren en roosterpunten [36, p. 131].

³Deze data is gegenereerd met de in R ingebouwde functie `rnorm`, met een standaardafwijking van 0,5.

2.5 Visualiseren

Wanneer er een gebied is berekend waarin een nieuwe waarneming zich zou kunnen bevinden, kan dat gebied op een aantal manieren worden weergegeven: door middel van een heatmap; met contourlijnen voor een gegeven kans, uitgedrukt in procenten; door middel van een convex omhulsel; en door alle waarnemingen te plotten.

De heatmap is bedoeld om aan te geven op welke plaatsen de kans relatief groot, of juist relatief klein is om de waarneming dáár aan te treffen; er kunnen geen exacte kansen aan worden verbonden. Dat is waar de contourlijnen van pas komen: die geven expliciet aan hoe groot de kans is dat het punt zich binnen de lijn bevindt — de contourlijn omvat namelijk dát gebied waarvan na integratie blijkt dat het een gegeven kans vertegenwoordigt. Het convex omhulsel geeft het verschijningsgebied van een gegeven zendmast weer.

Omdat de vier genoemde manieren alleen niet erg gebruiksvriendelijk zijn en op zichzelf erg weinig zeggen, is het wenselijk om er een kaart onder te leggen. Op die manier wordt duidelijk wáár het gevraagde gebied precies ligt. Dit is gedaan met een computerprogramma dat draait op het .NET-framework en gebruikmaakt van de programmeertaal R. Het R-gedeelte voert de een aantal berekeningen, waaronder KDE voor waarnemingen van een gegeven cell-ID, uit en haalt de kaart op, terwijl het .NET-gedeelte de interactie met de gebruiker op zich neemt. Het programma maakt gebruik van de kaartendienst Google Maps⁴. De opgevraagde kaart vormt een zogenaamde laag in de uiteindelijke afbeelding. Hierop kunnen de overige visualisaties ook als lagen getekend worden met het plusteken. Dit wordt in Hoofdstuk 3.3 nader toegelicht. Het programma en de broncode ervan zullen te zijner tijd worden gepubliceerd op <https://sites.google.com/site/openphonemap/>.

Voor het ophalen van de gevraagde kaart, het plotten op die kaart en het uitvoeren van de gevraagde berekeningen wordt een vijftal R-*packages* gebruikt: *plyr*, *textttreshape2*, *ggmap*, *ggplot2* en *MASS*. De laatste wordt uitvoerig behandeld in [36]. *MASS* bevat een functie genaamd *kde2d* die tweedimensionale *kernel density estimation* implementeert.

⁴Zie <https://maps.google.com>

Hoofdstuk 3

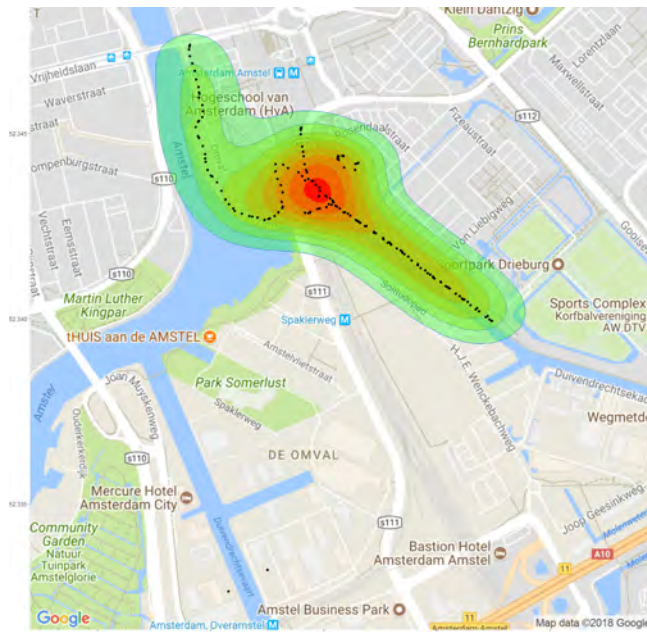
Resultaten

In dit Hoofdstuk wordt alles wat in de voorgaande Hoofdstukken ter sprake is gekomen, concreet gemaakt. Eerst zal een definitieve keuze worden gemaakt uit verschillende methodes voor het berekenen van een parameter h . Deze parameter is van groot belang bij het visualiseren van waarnemingen uit de OpenCellID-data. Daarna wordt een viertal manieren besproken om die data daadwerkelijk te visualiseren. Daarna wordt nog kort ingegaan op het programma dat dit allemaal faciliteert.

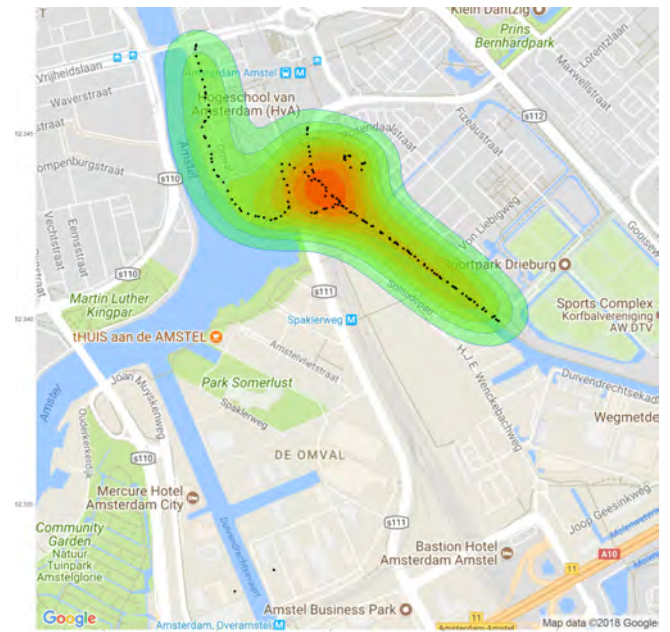
3.1 Berekeningsmethode voor de bandbreedte

Zoals in Hoofdstuk 2.3 ter sprake is gekomen, is de parameter h , die de bandbreedte voor *kernel density estimation* (KDE) voorstelt, van grote invloed op het eindresultaat. In Figuur 3.1¹ zijn duidelijk de verschillen te zien tussen de vier methodes. In deze figuur is een viertal heatmaps te zien. De heatmaps die gebruik maken van de vuistregels van Scott en van Silverman zijn minder gedetailleerd dan de andere twee, die gebruik maken van respectievelijk *direct plug-in* (DPI) en *solve-the-equation* (STE). Vanwege dat feit alleen al verdient één van die methodes de voorkeur. De heatmap in Figuur 3.1d, die gebruikmaakt van de STE-methode, blijkt toch nog gevoelig te zijn voor ruis. Dat is te zien aan hoe “hoekig” de lijnen tussen de kleuren op sommige plekken lopen. Daarnaast lopen die lijnen vrij dicht langs de waarnemingen. Dit komt doordat de kansdichtheidsfunctie die ten grondslag ligt aan deze heatmap, de waarnemingen volgt. Omdat de DPI-methode een wat grotere h oplevert, zal de resulterende kansdichtheidsfunctie iets vloeiender verlopen. Daarom zal hier vanaf nu de DPI-methode gebruikt worden.

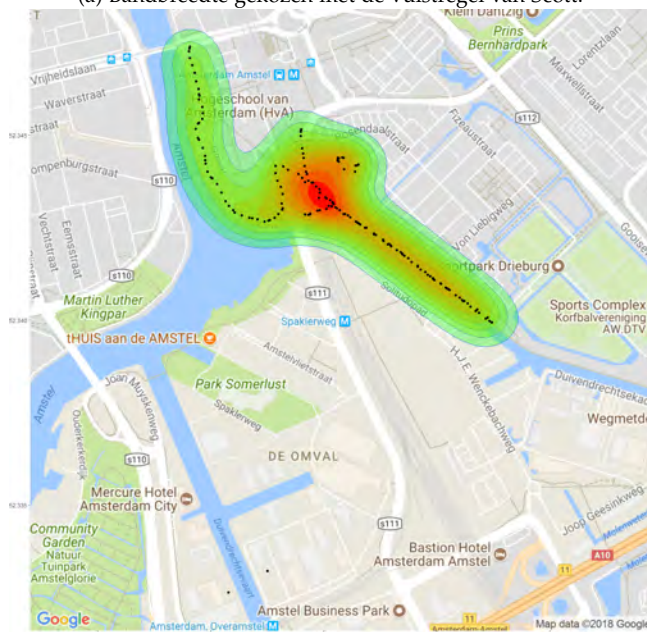
¹Om het effect duidelijker zichtbaar te maken, zijn de berekende bandbreedtes vermenigvuldigd met een factor 4.



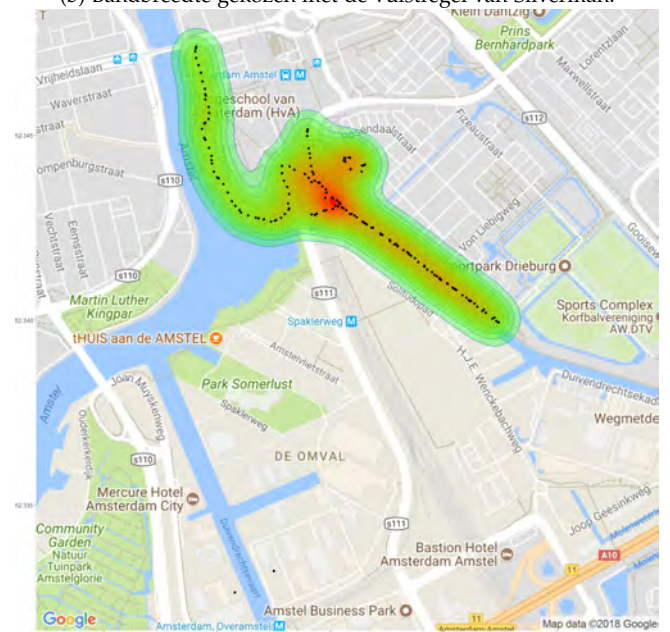
(a) Bandbreedte gekozen met de vuistregel van Scott.



(b) Bandbreedte gekozen met de vuistregel van Silverman.



(c) Bandbreedte gekozen met de DPI-methode.



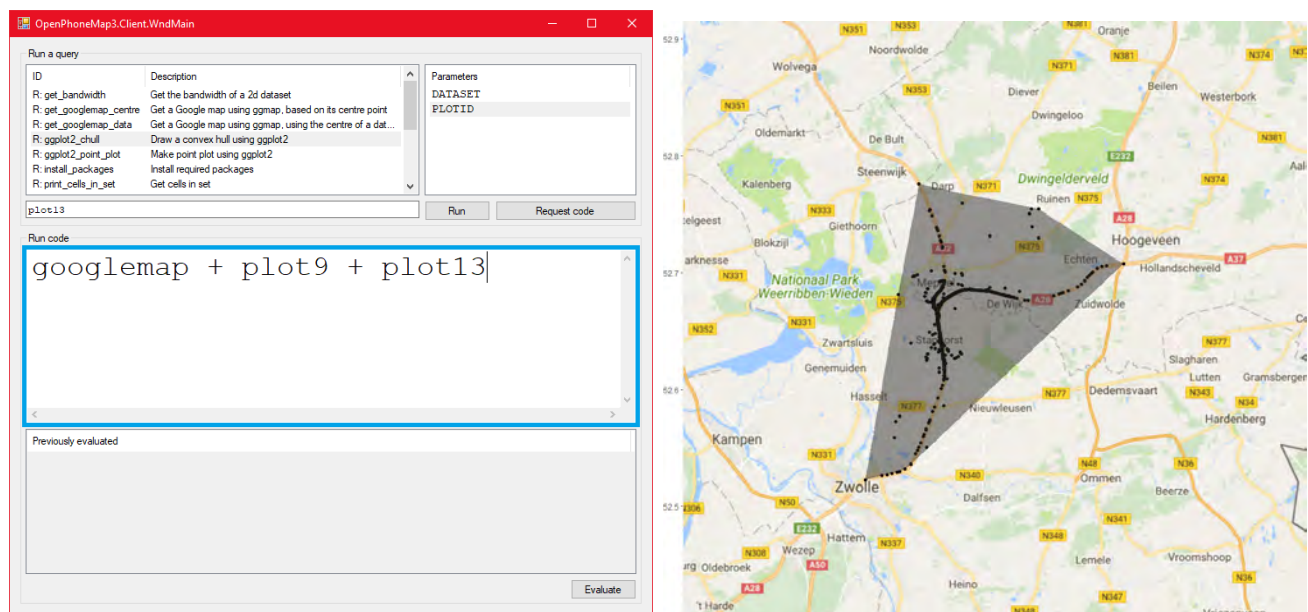
(d) Bandbreedte gekozen met de STE-methode.

Figuur 3.1: Heatmaps van waarnemingen met cell-ID 10763010.

3.2 Verschijningsgebieden op de kaart

Het in Hoofdstuk 2.5 besproken programma is in staat om de OpenCellID-data op vier manieren op een kaart te tonen. Om te beginnen kan er van de waarnemingen uit OpenCellID een veelhoek worden getekend, zodanig dat er buiten die veelhoek géén waarnemingen bevinden, maar de omtrek ervan wel zo klein mogelijk is. Kort gezegd heet zo'n veelhoek een *convex omhulsel*. Als er een convex omhulsel om de waarnemingen met één cell-ID getekend wordt, kan gesteld worden dat het verschijningsgebied precies dat omhulsel is. In Figuur 3.2b is rondom de waarnemingen van cell-ID 62423, gelegen bij Meppel, een convex omhulsel getekend. Deze waarnemingen zijn gedaan tussen 30 september 2008 en 4 februari 2017.

Het werkelijke straalgebied van de Figuur 3.2b getekende waarnemingen is *minimaal* het omhulsel, omdat er een reële kans bestaat dat er mobiele telefoons zijn die zich buiten het door het omhulsel aangeduide gebied bevinden, maar wel de zendmast met dezelfde cell-ID aanstralen als telefoons die zich ten tijde van de waarnemingen binnen dat gebied bevonden. Anders gezegd: het is goed mogelijk dat de OpenCellID-data onvolledig is, waardoor het straalgebied van de bewuste zendmast groter is dan het convex omhulsel doet vermoeden. Dat is ook logisch: lang niet iedere smartphonebezitter deelt zijn gegevens met OpenCellID.



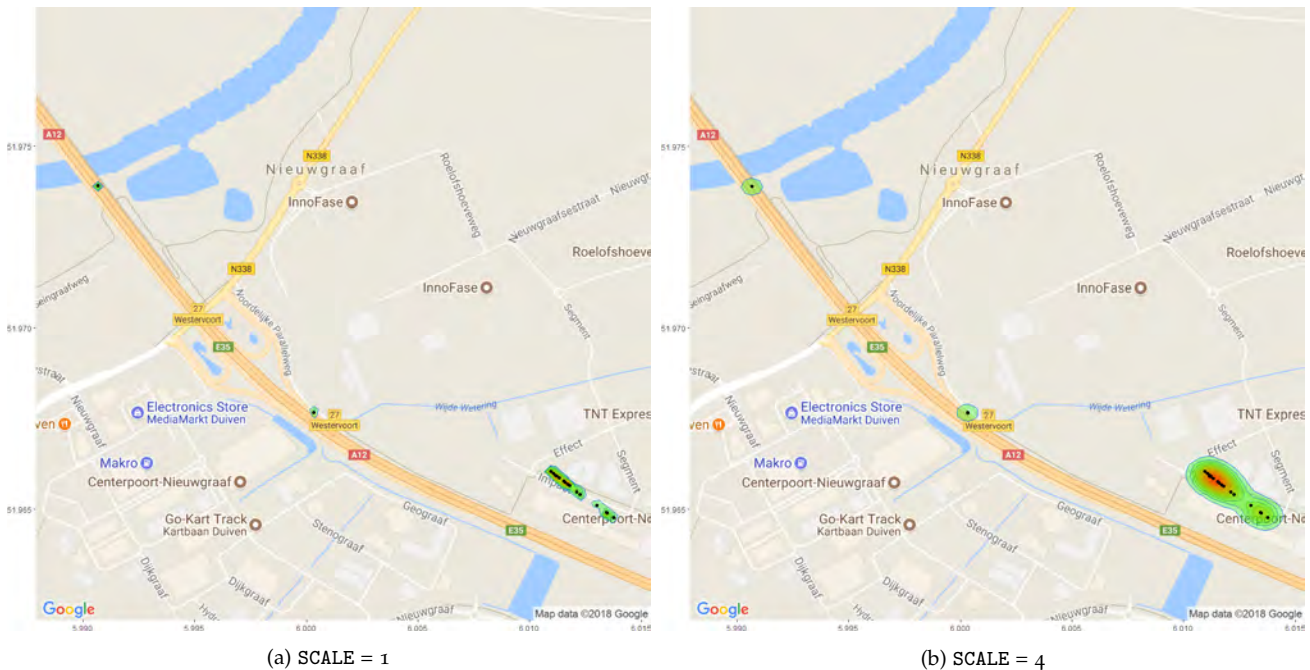
(a) De gebruikte commando's om deze afbeelding te berekenen en te tonen. Ten behoeve van de leesbaarheid is de tekst hier sterk vergroot.

(b) Convex omhulsel rondom de waarnemingen van cell-ID 62423.

Figuur 3.2: Hoofdvvenster van OpenPhoneMap en een afbeelding die ermee gemaakt is.

Naast het convex omhulsel kan er ook een heatmap worden gemaakt. Met zo'n heatmap kan een eerste inventarisatie worden gemaakt van een verzameling waarnemingen zonder een en ander te kwantificeren. Op die manier kan een heatmap een eerste beeld schetsen van de ligging en kansverdeling van waarnemingen. Een tweetal heatmaps is gegeven in Figuur 3.3. De waarnemingen zijn gedaan tussen 21 november 2015 en 12 februari 2017. In deze figuur wordt getoond hoe de schaalfactor van de bandbreedte het resultaat beïnvloedt:

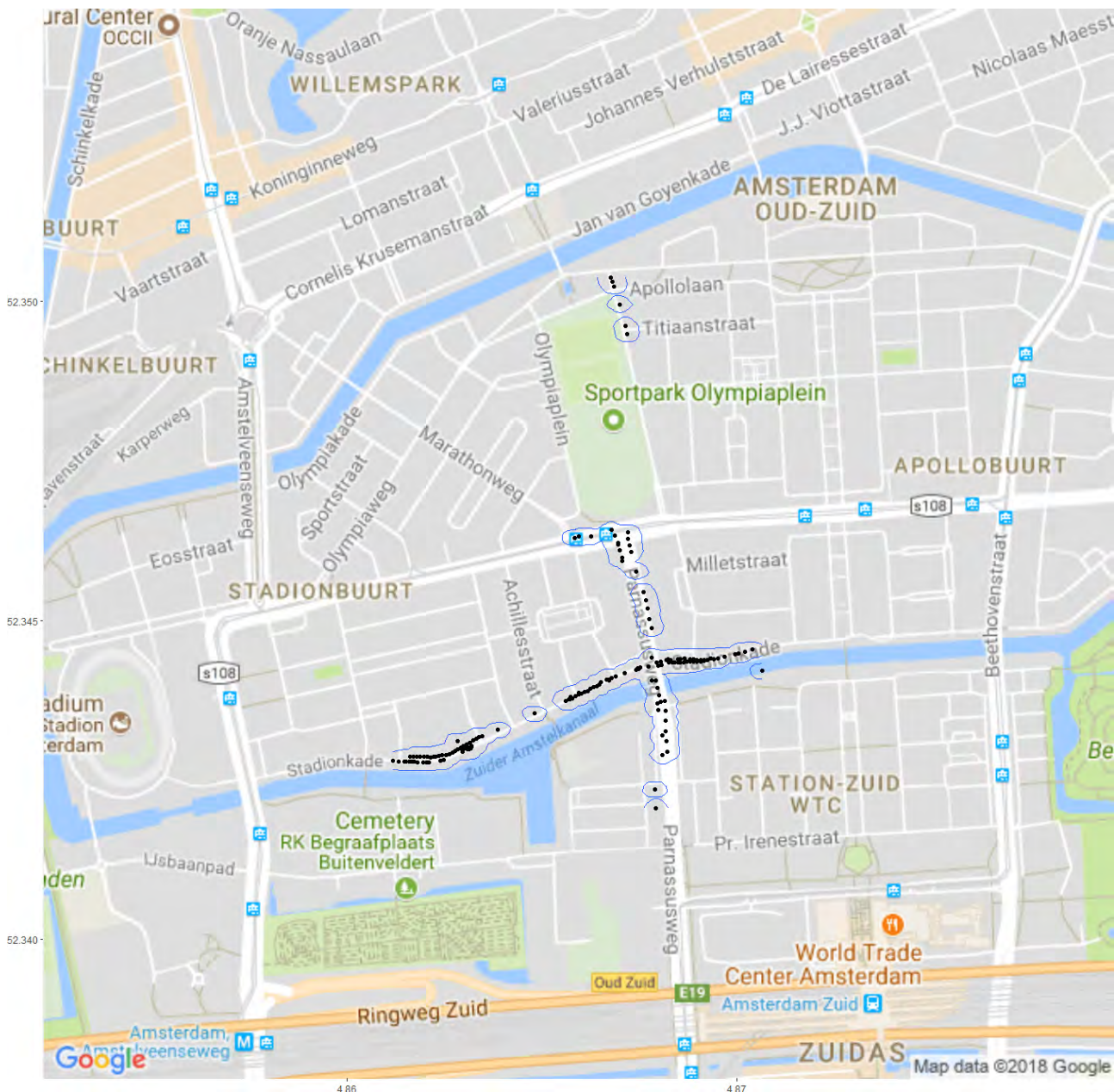
de figuur rechts heeft een bandbreedte die vier keer zo groot is als die van de figuur links. De heatmaps zijn bedoeld om een beeld te schetsen van de ligging en kansverdeling van waarnemingen zonder deze te kwantificeren.



Figuur 3.3: Twee heatmaps van de waarnemingen van cell-ID 10187589.

In Figuur 3.4 zijn contourlijnen te zien rondom 90% van een groep waarnemingen met cell-ID 46086881. Deze contourlijnen zijn de tweedimensionale variant van wat in Hoofdstuk 2.4 is besproken: het integreren van de kansdichtheidsfunctie op een beperkt interval. De heatmap kan worden gezien als een generalisatie van de contourlijnen.

In deze figuur is duidelijk te zien dat een probleem van de huidige implementatie van invloed is op de resulterende contourlijnen. Bij de groep waarnemingen bij het Olympiaplein en de Apollolaan houdt de lijn aan de noordzijde spontaan op. Ten zuiden van deze groep waarnemingen loopt het domein door, waardoor de lijnen wel doorlopen. De functie die deze contourlijn berekent, gebruikt de X- en Y-coördinaten van de waarnemingen in de gebruikte verzameling. Het gebied waarbinnen deze functie werkt, kan worden omschreven met de kleinste rechthoek die alle waarnemingen omvat; dat wil zeggen: één hoek van de rechthoek ligt precies op het punt dat overeenkomt met de kleinste X- en de kleinste Y-coördinaat die voorkomt in de verzameling. De overstaande hoek ligt op het punt dat overeenkomt met de grootste X- en de grootste Y-coördinaat. Mogelijk is dit probleem op te lossen door deze functie zodanig aan te passen, dat het werkgebied kan worden gekozen.



Figuur 3.4: Contourlijnen voor 90% van de waarnemingen van cell-ID 46086881.

3.3 Het programma

Het programma dat deze visualisaties uitvoert, draagt de naam OpenPhoneMap. Het is in staat om kaarten via Google Maps op te halen en door middel van zogenaamde lagen een en ander op die kaarten te tekenen. Het tekenen op een kaart is hier niets anders dan het bij elkaar optellen van de lagen. Zulke lagen zijn bijvoorbeeld: het convex omhulsel dat rond een verzameling waarnemingen is getekend; de waarnemingen indien die zijn getekend als stippen; delen van de heatmap en van de contourlijnen; en de kaart zelf. Het optellen van de lagen is niet commutatief: de laag die links van het plusteken staat, wordt eerst getekend.

Daaroverheen komt de rechtse laag. In dit geval dus wordt eerst de kaart, daarna de waarnemingen en als laatste het convex omhulsel getekend. Dit wordt concreet weergegeven in Figuur 3.2a. In het met blauw omlijnde tekstveld worden de drie lagen opgeteld. Het resultaat is de afbeelding in Figuur 3.2b.

Hoofdstuk 4

Conclusies

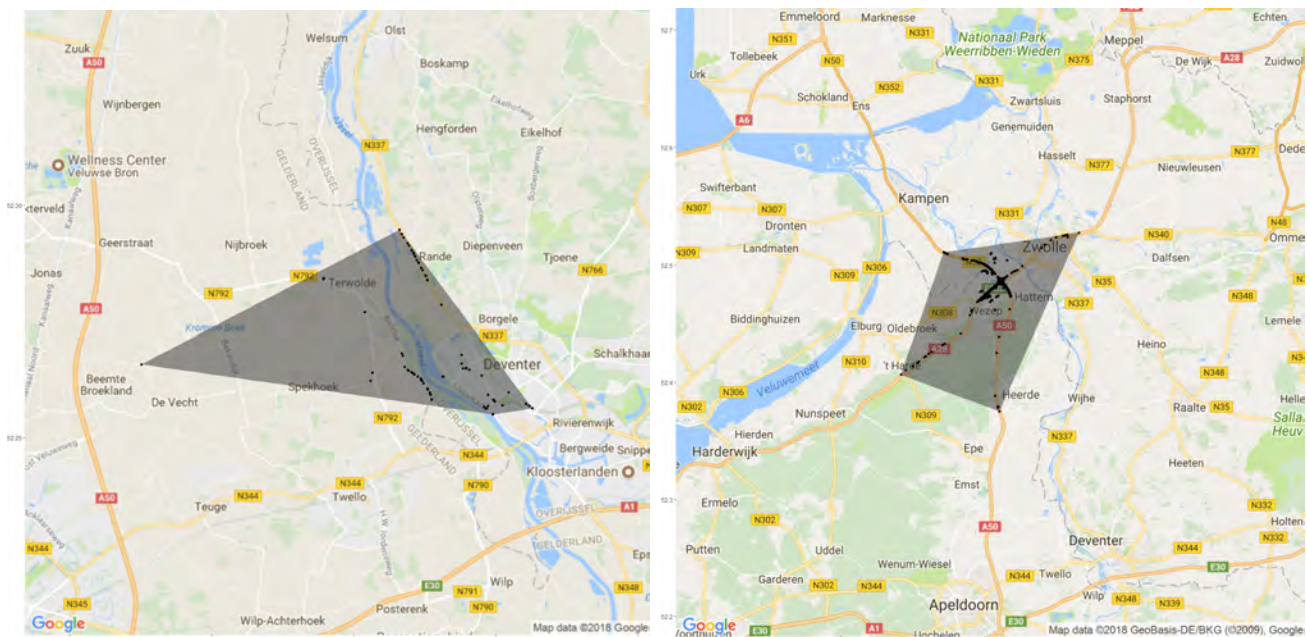
In dit verslag is gepresenteerd hoe door middel van *kernel density estimation* inzichtelijk kan worden gemaakt in welke gebieden in Nederland mensen geweest kunnen zijn, gegeven het feit dat hun mobiele telefoon een bepaalde zendmast heeft aangestraald. Het is mogelijk gebleken om op basis van grote hoeveelheden historische gegevens — in dit geval afkomstig uit de online database van OpenCellID — een gebied waarvan blijkt dat een nieuwe waarneming zich daarin zal bevinden, op een kaart te tonen. Ook kan gekwantificeerd worden hoe groot de kans is dat dat gebeurt.

De database van OpenCellID bestaat uit zogenaamde waarnemingen; dat wil zeggen: locatiegegevens van een smartphone en een aantal gegevens over de verbinding tussen die smartphone en het mobiele netwerk op een bepaald tijdstip. In het bijzonder bevat de database het identificatienummer van de zendmast waarmee het toestel op dat moment communiceert: de cell-ID. Het is gebleken dat het regelmatig voorkomt dat er een aantal groepen van waarnemingen één zo’n nummer hebben, maar feitelijk twee of meer verschillende groepen zijn vanwege de grote afstand tussen deze groepen.

Het gebied waarbinnen zich alle waarnemingen met één cell-ID bevinden, kan worden omvat met een convex omhulsel. Ook dat gebied kan op de kaart getoond worden. Gesproken wordt dan van een verschijningsgebied. Het verschijningsgebied geeft inzicht in het straalgebied van een zendmast, in die zin dat dat straalgebied minstens even groot is als het verschijningsgebied.

Terug naar de Deventer moordzaak, die in de inleiding al ter sprake is gekomen. Een interessante vraag is: kan Ernest Louwes, de veroordeelde en inmiddels weer vrijgelaten hoofdverdachte van de Deventer moordzaak, iets aan dit onderzoek hebben? Het antwoord daarop luidt vooralsnog “nee”, omdat er in de data van OpenCellID geen waarnemingen voorkomen van voor het jaar 2000 en het project zelf is begonnen in 2008. De zaak begon met de moord op het slachtoffer in september 1999. Vanwege de lange tijd tussen de moord en de eerste waarnemingen zal de OpenCellID-data van nu geen afspiegeling zijn van de omstandigheden van

destijds. Daarnaast is het aantal mobiele telefoons in Nederland en daarmee dus ook het aantal zendmasten explosief gegroeid in die periode. Het CBS becijfert [40] dat in slechts vijf jaar tijd het gebruik van smartphones onder personen van 12 jaar en ouder is gestegen van 56,6% naar maar liefst 89%. Al met al is dus niet vast te stellen of die waarnemingen overeenkomen met de werkelijke locaties en metadata van mobiele telefoons in 1999. In rechtbankdocumenten [41] wordt gesproken over cell-ID's 14501 en 14801. Beide zijn te vinden in de OpenCellID-data en bevinden zich respectievelijk in Deventer en bij Zwolle. Op basis van de gegevens van cell 14501 is het niet mogelijk om conclusies te trekken over de vraag of Louwes zich op de A28 heeft kunnen bevinden ten tijde van de moord. Uitspraken over de situatie van toen, op basis van de gegevens van nu is hoogst speculatief en om die reden onverstandig.



(a) Convex omhulsel rondom de waarnemingen van cell 14501.

(b) Convex omhulsel rondom de waarnemingen van cell 14801.

Figuur 4.1: Waarnemingen bij Zwolle en Deventer.

4.1 Vervolgonderzoek

Onlangs is er media-aandacht geweest over plaatsbepaling van mobiele telefoons tijdens het bellen door middel van *advanced mobile location (AML)* [42]. Deze technologie maakt gebruik van onder andere GPS. Het betreft echter alleen noodoproepen bij de 112-centrale en is voornamelijk alleen beschikbaar op Androidtelefoons. Daarom is AML niet geschikt voor plaatsbepaling achteraf bij een misdrijf. Het kan interessant zijn om onderzoek te doen naar een vergelijkbaar systeem voor normale telefoongesprekken, zodat er nauwkeurigere locatiegegevens beschikbaar komen bij onderzoeken naar misdrijven. Daarbij zal in ieder geval onderzocht moeten worden of zo'n systeem uit privacyoverwegingen wenselijk is.

Een ander mogelijk interessant onderwerp om in de toekomst te onderzoeken, is hoe vaak het voorkomt

dat buitengewone propagatie van radiosignalen — en in het bijzonder die radiosignalen die gebruikt worden voor mobiele communicatie — voorkomt als gevolg van een temperatuurinversie. Het in [2] en [3] beschreven onderzoek dateert uit 2007; in de afgelopen elf jaar is mobiele communicatie zeer sterk veranderd, dus is het wellicht interessant om een vergelijkbaar onderzoek opnieuw te doen in de context van de huidige stand van zaken. Mogelijk komt het voor dat het bereik van een zendmast groter, of de kwaliteit van de verbinding beter wordt. Aan de andere kant kan de verbinding ook slechter worden door interferentie van andere zendmasten; hun signalen reiken immers óók verder dan normaal onder invloed van dezelfde temperatuurinversie.

Er is een groot aantal waarnemingen met de Nederlandse landcode 204 die in België, Duitsland of zelfs Noord-Frankrijk liggen. Persoonlijke e-mails met de toenmalig beheerder van OpenCellID hebben uitgewezen dat daarvoor momenteel geen verklaring is. Omdat deze waarnemingen zo ver buiten Nederlands grondgebied liggen en omdat het er zo veel zijn, is het aannemelijk dat dit simpelweg foutieve waarnemingen zijn. Het is desalniettemin zeker interessant om dit nader te onderzoeken.

Bibliografie

- [1] Uitspraak Gerechtshof Arnhem 22 december 2000, ingesteld tegen het vonnis van de arrondissementsrechtbank te Zwolle van 9 maart 2000 in de strafzaak tegen Ernest Louwes. <http://deeplink.rechtspraak.nl/uitspraak?id=ECLI:NL:GHARN:2000:AD8964>. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [2] Samenvatting rapport over het GSM gesprek van Ernest Louwes op 23-9-1999 om 20.36. <http://www.geenonschuldigenvast.nl/Vonnissen%202000/Telefoongesprek.php>, 2007. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [3] J.J.R. Heinen, J.C. Meijer, J.A. Sterrenburg. Rapport van onderzoek GSM inzake time advance gegevens van het GSM-gesprek op 23 september 1999, 2007. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [4] List of smartphones supporting GLONASS navigation. http://research.omicsgroup.org/index.php/List_of_smartphones_supporting_GLONASS_navigation. Geraadpleegd: 22 september 2017.
- [5] UseGalileo — find a galileo-enabled device to use today. <http://www.usegalileo.eu/EN/inner.html#data=smartphone>. Geraadpleegd: 22 september 2017.
- [6] Cell tower triangulation — How it works. <https://wrongfulconvictionsblog.org/2012/06/01/cell-tower-triangulation-how-it-works/>. Geraadpleegd: 20 september 2017.
- [7] Richtlijn 2006/24/EG van het Europees Parlement en de Raad van 15 maart 2006 betreffende de bewaring van gegevens die zijn gegenereerd of verwerkt in verband met het aanbieden van openbaar beschikbare elektronische communicatiediensten of van openbare communicatienetwerken en tot wijziging van Richtlijn 2002/58/EG. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0024:nl:HTML>. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [8] Arrest van het Hof van Justitie van de Europese Unie van 8 april 2014 in de gevoegde zaken Digital Rights Ireland en Seitlinger (C-293/12 en 294/12). <http://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?text=&docid=150642&pageIndex=0&doclang=NL&mode=lst&dir=&occ=first&part=1&cid=550555>. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.

- [9] Vonnis in kort geding van 11 maart 2015 in de zaak tegen de Staat der Nederlanden. <http://deeplink.rechtspraak.nl/uitspraak?id=ECLI:NL:RBDHA:2015:2498>. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [10] Wijziging van de Telecommunicatiewet en het Wetboek van Strafvordering in verband met de bewaring van gegevens die zijn verwerkt in verband met het aanbieden van openbare telecommunicatiediensten en openbare telecommunicatienetwerken (aanpassing bewaarplicht telecommunicatiegegevens). <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-34537-2.html>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [11] Memorie van Toelichting Aanpassing bewaarplicht telecommunicatiegegevens. <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2016/09/14/memorie-van-toelichting-aanpassing-bewaarplicht-telecommunicatiegegevens/TK+memorie+van+toelichtingWijziging+van+de+Telecommunicatiewet.pdf>. Geraadpleegd: 6 augustus 2017.
- [12] R.H. Frenkiel. Cellular radiotelephone system structured for flexible use of different cell sizes, March 13 1979. US Patent 4,144,411.
- [13] F.H. Schmidt. *Inleiding tot de meteorologie*. Uitgeverij Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, vijfde edition, 1976.
- [14] R. Friis. *Essentials of Environmental Health*, page 255. Jones & Barlett Learning, LCC, Sasbury, MA, tweede edition, 2012.
- [15] W. L. Stutzman, G. A. Thiele. *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, derde edition, 1981.
- [16] S.R. Best. Antenna properties and their impact on wireless system performance. 1998.
- [17] J.A. Nordstrand. Localizing cell towers from crowdsourced measurements. Master's thesis, Universiteit van Bergen, Bergen, Noorwegen, 2015.
- [18] D.F. Kune, J. Koelndorfer, N. Hopper, Y. Kim. Location leaks on the GSM air interface. 2012.
- [19] Stemwegwijzer. <https://www.stemwegwijzer.nl/>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [20] Ov-fiets geschiedenis. <http://www.geodienst.xyz/ovfiets/>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [21] Aanrijtijden Ambulances 15 minuten. <https://rug.maps.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=ea29a4e56d144e5585e9733fa738dbbe&extent=4.5624,52.0466,5.8808,52.4455>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [22] Publieke dienstverlening op de kaart Loket — Landsdekkende geo informatie van de overheid. <https://www.pdok.nl/nl>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [23] GRASS GIS. <https://grass.osgeo.org/>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.

- [24] GeoTools — the open source Java GIS toolkit. <http://www.geotools.org/>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [25] OpenLayers — Welcome. <http://openlayers.org/>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [26] Mapping Toolbox — MATLAB. <https://nl.mathworks.com/products/mapping.html>. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [27] D. Kahle, H. Wickham. ggmap: spatial visualization with ggplot2. *The R journal*, 5(1):144–161, 2013.
- [28] X. Gong, J. Gao. Nonparametric kernel estimation of the impact of tax policy on the demand for private health insurance in Australia. 2015. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [29] Verkeersveiligheid van trottoirbanden. 2017. Geraadpleegd: 11 juni 2018.
- [30] MLS — Downloads. <https://location.services.mozilla.com/downloads>.
- [31] Een uitgebreid overzicht van de opencellid-data en het gebruik ervan. http://wiki.opencellid.org/wiki/Menu_map_view#database. Geraadpleegd: 20 juni 2017.
- [32] What is OpenCellID? http://wiki.opencellid.org/wiki/What_is_OpenCellID. Geraadpleegd: 31 juli 2017.
- [33] Page history. http://wiki.opencellid.org/wiki/Page_history#August_1st.2C_2014. Geraadpleegd: 26 augustus 2017.
- [34] M. Rosenblatt. Remarks on some nonparametric estimates of a Density Function. *The annals of mathematical statistics*, 27(3):832–837, 1956.
- [35] E. Parzen. On estimation of a probability density function and mode. *The annals of mathematical statistics*, 33(3):1065–1076, 1962.
- [36] W.N. Venables, B.D. Ripley. *Modern applied statistics with S*. Springer, New York, vierde edition, 2002.
- [37] D.W. Scott. *Multivariate density estimation. theory, practice and visualization*. Wiley, New York, 1992.
- [38] B.W. Silverman. *Density estimation*. Chapman and Hall, London, 1986.
- [39] S.J. Sheather, J.M. Jones. A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 53(3):683–690, 1991.
- [40] CBS StatLine - Internet; toegang, gebruik en faciliteiten. <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=83429NED&D1=5&D2=0&D3=0&D4=a&HDR=T&STB=G1,G2,G3&VW=T>. Geraadpleegd: 10 juni 2018.

- [41] Arrest op een aanvraag tot herziening van een in kracht van gewijsde gegaan arrest van het Gerechtshof te 's-Hertogenbosch van 9 februari 2004, nummer 20/002219-03, ingediend door mr. G.G.J. Knoops, advocaat te Amsterdam, namens: Ernest Cornelis Jacobus Johannes Louwes , geboren te [geboorteplaats] op [geboortedatum] 1953, ten tijde van de aanvraag gedetineerd in de Penitentiare Inrichting "Lelystad" te Lelystad. <http://deeplink.rechtspraak.nl/uitspraak?id=ECLI:NL:HR:2008:BA1024>. Geraadpleegd: 17 mei 2018.
- [42] Advanced mobile location (AML) specifications & requirements. http://www.eena.org/download.asp?item_id=165, 2016. Geraadpleegd: 20 februari 2018.