

Lokalisatie van mobiele toestellen in 4G- en 5G-netwerken: ontwerp en evaluatie van algoritmen op basis van netwerkparameters

Clément Peleman

Studentennummer: 01907533

Promotor: Prof. Dr. ir. David Plets, Prof. Dr. ir. Wout Joseph

Begeleider: ir. Bram Stroobandt, ir. Cedrick De Cock

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten

Lokalisatie van mobiele toestellen in 4G- en 5G-netwerken: ontwerp en evaluatie van algoritmen op basis van netwerkparameters

Clément Peleman

Studentennummer: 01907533

Promotor: Prof. Dr. ir. David Plets, Prof. Dr. ir. Wout Joseph

Begeleider: ir. Bram Stroobandt, ir. Cedrick De Cock

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Dankwoord

Het schrijven van deze masterproef was voor mij persoonlijk een heel boeiend en leerrijk proces. Een proces dat vooral niet mogelijk zou zijn geweest zonder de steun en begeleiding van verschillende personen.

Vooreerst wil ik mijn promotoren, Prof. Dr. ir. David Plets en Prof. Dr. ir. Wout Joseph, bedanken voor de mogelijkheid om dit onderzoek uit te voeren binnen de vakgroep.

Daarnaast wil ik ook mijn begeleiders, ir. Bram Stroobandt en ir. Cedrick De Cock, bedanken voor hun begeleiding en constructieve feedback. Ook voor het op weg helpen met nieuwe software zoals ROMES4 en Qualipoc wil ik in het bijzonder Bram Stroobandt bedanken. Zonder deze spoedcursussen zou deze masterproef niet mogelijk geweest zijn. Bedankt voor de tijd en moeite die jullie hebben geïnvesteerd in het nalezen van mijn teksten en het voorzien van feedback (op nogal korte termijn).

Tot slot wil ik ook mijn ouders (inclusief plusouders) en familie bedanken voor hun steun en aanmoedigingen tijdens mijn studies, alsook mijn vriendin en haar gezin, die er steeds waren op momenten wanneer de moed wat verder te zoeken was. Hun vertrouwen heeft mij gemotiveerd om dit traject tot een goed einde te brengen.

Ik kijk met heel veel vreugde terug op mijn studentenjaren. Niet alleen was dit een periode van intellectuele ontwikkeling, ook op persoonlijk vlak heb ik veel bijgeleerd. Ik ben benieuwd naar wat de toekomst brengt.

Toegang tot bruikleen

“De auteur(s) geeft (geven) de toelating dit afstudeerwerk voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het afstudeerwerk te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit afstudeerwerk.”

Clément Peleman, Januari 2026

Thesis als onderdeel van een examen

“Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst.”

Clément Peleman, Januari 2026

Lokalisatie van mobiele toestellen in 4G- en 5G-netwerken: ontwerp en evaluatie van algoritmen op basis van netwerkparameters

door
Clément Peleman

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Promotor: Prof. Dr. ir. David Plets, Prof. Dr. ir. Wout Joseph

Begeleider: ir. Bram Stroobandt, ir. Cedrick De Cock

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent

Vakgroep Information Technology

Abstract - This thesis investigates positioning algorithms for mobile devices based on cellular network parameters. A Viterbi-based map-matching algorithm combines Timing Advance (TA) measurements from 5G NR with road network constraints. Additionally, RSRP-based distance estimation using path loss models was investigated. Evaluation on 15 measurement trajectories across diverse environments demonstrates a median position error of 75m in urban areas and 117 m overall. The algorithm reconstructs routes with an F1-score of 73.3%. The proposed method offers a practical trade-off between accuracy and low implementation complexity, demonstrating the feasibility of cellular positioning for applications such as emergency call localization.

Kernwoorden - Cellulaire positionering, Timing, Viterbi, 5G NR, 4G LTE, Map matching

Mobile Device Localization in 4G and 5G Networks: Design and Evaluation of Algorithms Based on Network Parameters

Clément Peleman

Department of Information Technology, Ghent University

Supervisor: Prof. Dr. ir. David Plets, Prof. Dr. ir. Wout Joseph

Counsellor: ir. Bram Stroobandt, ir. Cedrick De Cock

Abstract: This thesis investigates positioning algorithms for mobile devices based on cellular network parameters. A Viterbi-based map-matching algorithm combines Timing Advance (TA) measurements from 5G NR with road network constraints. Additionally, RSRP-based distance estimation using path loss models was investigated. Evaluation on 15 measurement trajectories across diverse environments demonstrates a median position error of 75 m in urban areas and 117 m overall. The algorithm reconstructs routes with an F1-score of 73.3%. The proposed method offers a practical trade-off between accuracy and low implementation complexity, demonstrating the feasibility of cellular positioning for applications such as emergency call localization.

Keywords: Cellular positioning, Timing Advance, Viterbi, 5G NR, 4G LTE, Map matching, HMM, RSRP

I. INTRODUCTION

Numerous applications rely on mobile device localization. In emergency situations, missing persons cases, or abductions, the affected party is not always able to actively share location information. Furthermore, GNSS signals can be unreliable in certain scenarios due to spoofing, jamming, poor satellite visibility in urban environments, or when batteries are low and GPS is disabled to conserve power. The proposed method requires no additional energy from the UE, as it leverages signals already processed by the modem for network connectivity.

Current approaches for cellular positioning often do not go beyond Cell-ID [2], resulting in accuracies of hundreds of meters to kilometers, particularly in problematic rural areas with large cells. Better utilization of available network parameters can drastically improve location estimates.

A. Research Question

The central question is: *How can positioning algorithms be designed that determine a device's location based on cellular signals, and how can this estimate be improved using additional techniques?*

II. BACKGROUND

A. Timing Advance

Timing Advance (TA) is a synchronization mechanism where the network instructs the UE to start transmissions

earlier. The TA value is directly related to propagation time and thus distance to the base station:

$$d = \frac{\delta \cdot c}{2} = \frac{N_{TA} \cdot T_c \cdot c}{2} \quad (1)$$

where c is the speed of light and T_c the basic time unit. For 5G NR with 30 kHz subcarrier spacing, this results in a granularity of 39 m—a significant improvement over 78 m (LTE) and 234 m (3G).

B. RSRP-Based Distance Estimation

Reference Signal Received Power (RSRP) can theoretically be translated to distance via a path loss model:

$$PL = PL_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2)$$

where n is the path loss exponent (typically 2–4) and X_σ represents log-normal shadow fading. Analysis showed that RSRP-based estimation exhibits high variance due to environmental factors, making TA the preferred primary measurement for this work.

III. METHODOLOGY

A. Two-Phase Architecture

The system consists of two phases, as illustrated in Figure 1:

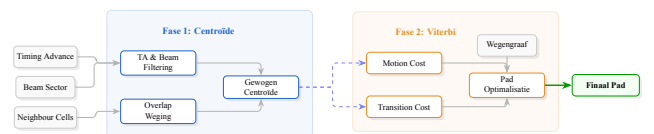


Figure 1: Two-phase positioning system. Phase 1 computes a weighted centroid per timestamp. Phase 2 uses this centroid as input for the Viterbi algorithm.

Phase 1 – Weighted Centroid: Per timestamp, an initial position estimate is calculated by weighting base station locations based on TA distances and sector information. TA rings constrain the search space to circular zones around each tower.

Phase 2 – Viterbi Map-Matching: The centroid serves as observation for a Hidden Markov Model (HMM) [4]. Candidate points are generated on nearby road segments from OpenStreetMap [5]. The cost function combines:

- *Emission cost:* Distance between centroid and candidate

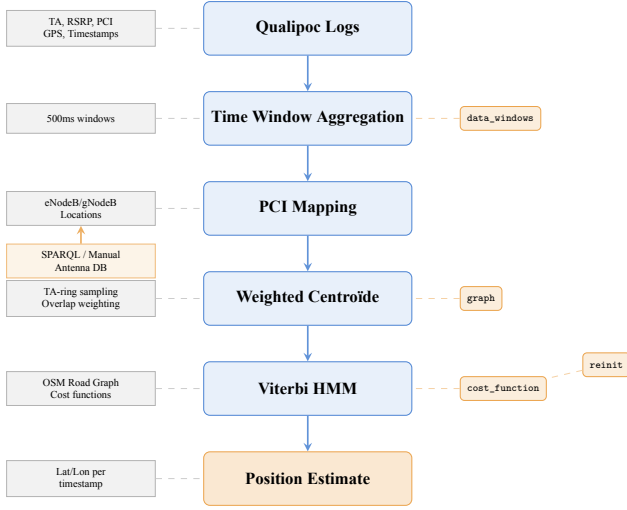


Figure 2: End-to-end data processing pipeline from raw Qualipoc logs to final position estimates.

- *Transition cost*: Deviation between traveled and topological distance
- *Angle penalty*: Penalizes sharp direction changes

Beam search with pruning limits the search space to the k best candidates per timestep.

B. Data Collection

Data was collected using the Qualipoc Android application on the Proximus 4G/5G network along 15 trajectories in East Flanders. Trajectories vary from urban Ghent city center to rural Ronse and include various transport modes: car, bicycle, tram, and on foot.

IV. RESULTS

Table 1 shows positioning accuracy per environment type.

Environment	Med.	P75	F1
Urban	75 m	130 m	71%
Semi-rural	107 m	241 m	69%
Rural	141 m	309 m	77%
Highway	101 m	181 m	78%
Overall	117 m	235 m	73%

Table 1: Positioning accuracy per environment

Best performance is achieved in urban environments due to higher cell density. Highway trajectories benefit from predictable movement patterns despite lower cell density. Recovery mechanisms (re-initialization, stuck detection, centroid catch-up) proved essential for challenging trajectories, reducing the average error significantly on problematic routes.

A. Route Reconstruction

Beyond point accuracy, route reconstruction quality was evaluated using bidirectional overlap analysis (buffer: 20 m). The average F1-score is 73.3%, with best results for trajectories with unambiguous route choices (F1 up to 91.5%). Figure 3 shows four representative trajectories.

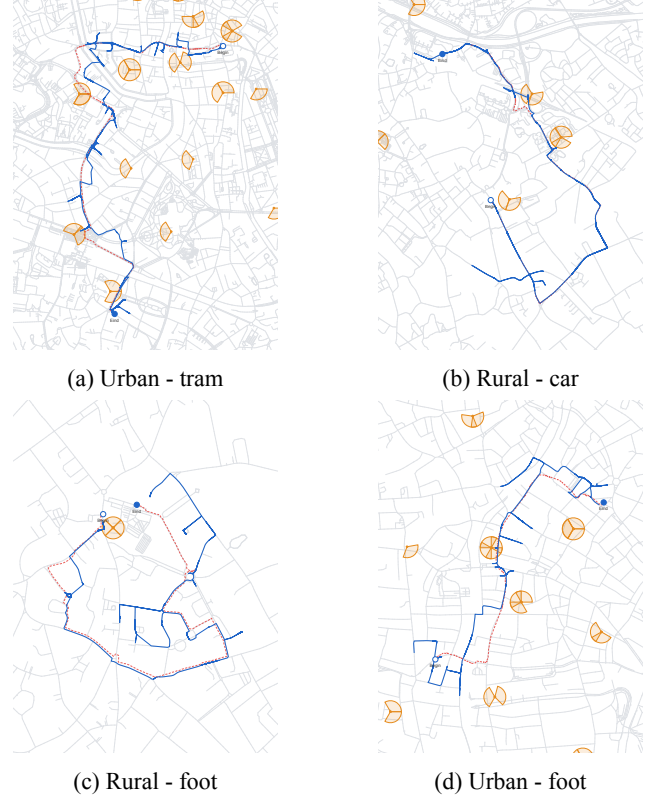


Figure 3: Four trajectories. Blue: Viterbi, gray: GPS.

B. Comparison with Literature

Trogh et al. [1] achieved 112 m median error with 3G TA and map-matching in Ghent. This research achieves 75 m in comparable urban scenarios, an improvement of 33%. The improvement is explained by the finer TA granularity of 5G NR (39 m vs. 234 m) and higher cell density.

V. DISCUSSION

A. Key Insights

- Urban environments consistently outperform rural areas due to higher cell density (lower GDOP) and reduced TA error variance at shorter distances.
- Environment type has a significantly larger impact on accuracy than mobility mode (car, bike, foot).
- Recovery mechanisms (re-initialization, stuck detection) are essential: without them, the algorithm gets stuck on problematic trajectories.
- Manual PCI mapping introduces gaps; access to operator-managed cell databases is critical for deployment.

B. Limitations

- Single ToA measurement per time window; multi-cell ToA could improve accuracy.
- Geographic scope limited to East Flanders (Ghent, Merelbeke, Ronse).
- No indoor measurements; only outdoor trajectories were collected.
- Some areas have incomplete OpenStreetMap coverage, limiting map-matching.

VI. CONCLUSION

This research demonstrates that Viterbi-based map-matching with Timing Advance from 5G NR networks enables practically useful positioning. With a median error of 75 m in urban environments and 117 m overall, the method offers a cost-effective alternative to infrastructure-intensive techniques.

A. Future Work

- Integration of beam indices to narrow sector constraints from 120° to $10\text{--}20^\circ$.
- Automatic mobility and environment detection for real-time parameter adaptation.
- Real-time evaluation of computational requirements for edge deployment.
- Multi-cell ToA integration using Positioning Reference Signals (PRS) from 5G Release 16.

REFERENCES

1. J. Trogh et al., "Outdoor location tracking of mobile devices in cellular networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2019.
2. J. A. del Peral-Rosado et al., "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 20, no. 2, 2018.
3. B. C. Tedeschini et al., "A feasibility study of 5G positioning with current cellular network deployment," *Sci. Rep.*, vol. 13, 2023.
4. P. Newson and J. Krumm, "Hidden Markov map matching through noise and sparseness," in *Proc. ACM SIGSPATIAL*, 2009.
5. OpenStreetMap contributors, "OpenStreetMap," 2024. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org>
6. A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 13, no. 2, 1967.

Table of Contents

Dankwoord	iv
Toegang tot bruikleen	v
Thesis als onderdeel van een examen	vi
Abstract	vii
Uitgebreid abstract	viii
Inhoudsopgave	xi
Lijst van figuren	xv
Lijst van tabellen	xvi
Lijst met Acroniemen	xviii
Voorwoord generatieve AI	1
1 Inleiding	2
2 Achtergrond	4
2.1 Cellulaire netwerkkarchitectuur	4
2.1.1 5G NR	4
2.1.2 Basiscomponenten	4
2.1.3 Primary Cell vs. Secondary Cell	5
2.2 Cellulaire netwerkparameters	6
2.2.1 Celidentificatie	6
2.2.2 Signaalsterkte	6
2.2.3 Tijdsgebonden parameters	8
2.2.4 Bundelspecifieke parameters	9
2.3 3GPP Standaardisatie en Evolutie	9
2.3.1 Pre-5G: LTE Positionering	9
2.3.2 5G Release 15: De 5G NR-baseline	9
2.3.3 5G Release 16: Hoge nauwkeurigheid	10
2.3.4 5G Release 17: RedCap en lagere vertraging	10
2.3.5 5G Release 18: 5G Advanced en AI/ML	10
2.3.6 Samenvattend Release-overzicht	10

3	Literatuuronderzoek	11
3.1	Lokalisatiealgoritmen	11
3.1.1	Fundamentele positioneringstechnieken	11
3.1.2	Enhanced Cell-ID	12
3.1.3	Multi-cell E-CID	12
3.1.4	ToA: Time of Arrival	13
3.1.5	OTDoA: Observed Time Difference of Arrival	13
3.1.6	DL-AoD: Downlink Angle of Departure	13
3.1.7	UL-AoA: Uplink Angle of Arrival	13
3.1.8	Tijdsgebonden beperkingen	13
3.1.9	Vergelijking positioneringsmethoden	14
3.1.10	Algemene uitdagingen voor cellulaire positionering	14
3.2	Map matching	15
3.3	Viterbi	15
3.4	State of the art	15
3.4.1	Nauwkeurigheid in praktijk	16
3.5	Theoretische analyse en simulatie-evaluatie	16
3.5.1	Private vs. publieke netwerken	16
3.5.2	Onderzoek vs. realiteit	16
3.6	Nauwkeurigheidsvereisten	17
3.6.1	Wettelijke vereisten: E911 en E112	17
3.6.2	Operationele vereisten van hulpdiensten	17
3.6.3	Referentieresultaten	18
3.7	Conclusie	18
4	Methode	19
4.1	Dataverzameling	19
4.1.1	Datalogging	19
4.1.2	Software	20
4.1.3	Trajecten	20
4.2	Data-inspectie	20
4.2.1	Beschikbare en relevante parameters	20
4.2.2	Dekking per datatype	21
4.2.3	Loggingsfrequentie en gaps	22
4.2.4	Signaalkarakteristieken en celdensiteit	22
4.3	Methode	22
4.3.1	Afstandsschatting	22
4.3.2	Fysieke basisstationlocaties	25
4.4	Data preprocessing	27
4.4.1	Timestamp aggregatie	27
4.4.2	Gebied-gebaseerde filtering	27
4.4.3	TA-afstandsberekening	27

4.5	Map en graaf	29
4.5.1	Ophalen en discretiseren	29
4.6	Ontwerp positioneringsalgoritme	30
4.6.1	HMM-formulering	30
4.6.2	Tweefasen-architectuur	31
4.6.3	Forward pass en beam search	35
4.6.4	Adaptieve parameters	35
4.7	Implementatie	36
4.7.1	Bibliotheken	36
4.7.2	Module-architectuur	36
4.7.3	Performantie	38
4.7.4	Parameter Tuning	38
4.8	Experimentele opzet	39
4.8.1	Overzicht metingen	39
4.8.2	Evaluatiemetrieën	41
5	Resultaten	42
5.1	Baseline: Gewogen centroïde	42
5.2	Viterbi Map-Matching met herstelstrategieën	42
5.3	Viterbi Map-Matching zonder herstelstrategieën	44
5.4	Visualisatie	45
5.4.1	Vergelijking omgeving	45
5.4.2	Vergelijking mobiliteitstypes	46
5.4.3	Route reconstructie kwaliteit	47
5.5	Herhaalbaarheid	48
5.6	Foutenanalyse	50
5.6.1	Gebruikte methode	50
5.6.2	Verdeling van grote fouten	50
5.6.3	Oorsprong van fouten	51
5.6.4	Clustering van fouten	52
5.7	Conclusie	52
6	Discussie	53
6.1	Vergelijking met literatuur	53
6.2	Inzichten	54
6.3	Beperkingen	54
6.4	Toekomstig onderzoek	54
7	Conclusie	55
7.1	Samenvatting van de bevindingen	55
7.2	Beperkingen en uitdagingen	55
7.3	Toekomstperspectief	56

8 Maatschappelijke reflectie	57
8.1 Veiligheid	57
8.2 Privacy	57
8.3 Duurzaamheid en slimme mobiliteit	58
Bibliography	59
A SQL Schema	62
B Gedetailleerde Resultaten	63
B.1 Gewogen Centroiden Baseline	63
B.2 Viterbi Map-Matching	64
B.3 Foutenanalyse	64
B.4 Route Reconstructie Kwaliteit	65
B.5 Effect Herstelstrategieën	66
C Resultaten per Traject	67

List of Figures

2.1	Architectuur van E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC).	5
2.2	Qualipoc screenshot. De PCell type (rood) is de actieve serving beam; de <i>beam</i> types zijn alternatieve beams van dezelfde cel.	7
3.1	Overzicht van fundamentele positioneringstechnieken in cellulaire netwerken.	12
4.1	Meetopstellingen tijdens de datacollectie.	19
4.2	QualiPoc logbestand toont herhaalde FTP download timeouts gedurende 311 seconden aan het begin van de Merelbeke voetganger meting.	22
4.3	RSRP versus GPS-afstand per cel voor een stedelijke en landelijke omgeving. Rode lijn geeft de trendlijn weer.	23
4.4	Path loss versus GPS-afstand per cel na correctie voor EIRP. Rode lijn geeft de trendlijn weer.	24
4.5	Links: TA-geschatte afstand versus GPS-afstand voor alle trajecten. Rechts: verdeling van de TA-afstandsfout per regio.	25
4.6	Schermafbeelding van de PCI Mapper tool.	26
4.7	Links: scatterplot van TA-geschatte versus GPS-gemeten afstand tot het bepaalde basisstation per regio. Rechts: verdeling van de TA-afstandsfout (IQR gefilterd) met gemiddelde systematische fout μ .	28
4.8	Vereenvoudigde visualisatie van de wegensgraaf voor de Korenmarkt in Gent.	30
4.9	Viterbi traliediagram.	31
4.10	Overzicht van het tweefasen positioneringssysteem. Fase 1 berekent per timestamp een gewogen centroïde. Fase 2 gebruikt deze centroïde als primaire invoer voor het Viterbi-algoritme.	32
4.11	Visualisatie van de TA-ring en beam sector (geel: serving cell, blauw: scellen + buurcellen).	33
4.12	De drie stappen van de centroïdeberekening.	34
4.13	Links: voorbeeld op tijdsvenster t . Rechts: voorbeeld op tijdsvenster $t+1$.	34
4.14	Module-architectuur met dataflow tussen de verschillende componenten.	36
4.15	Effect van <i>beam</i> -margin op de mediaan positioneringsfout per traject.	39
4.16	Effect van herinitialisatie-drempel op de mediaan positioneringsfout per traject.	40
5.1	Positioneringsnauwkeurigheid per traject, gesorteerd op prestatie. Mediaan (volle kleur) en P75 (transparant) per traject. Kleuren geven het omgevingstype aan. Stippellijnen: E112-vereisten voor stedelijk (150 m) en ruraal (300 m).	42
5.2	Positioneringsnauwkeurigheid per traject, gesorteerd op prestatie. Mediaan (volle kleur) en P75 (transparant) per traject. Kleuren geven het omgevingstype aan. Stippellijnen: E112-vereisten voor stedelijk (150 m) en ruraal (300 m).	43
5.3	Vergelijking van de mediaan positioneringsfout met en zonder herstelstrategieën per traject, gesorteerd op verbetering.	44

5.4	Visualisatie van zes representatieve trajecten in verschillende omgevingen. De blauwe lijn toont het geschatte Viterbi-pad, de grijze stippellijn het GPS ground truth traject. . . .	45
5.5	Boxplot van de positiefout per transportmodus. De box toont het interkwartiel bereik, de horizontale lijn de mediaan.	46
5.6	Route reconstructie kwaliteit per traject: F1-score (balk), precisie en recall. De trajecten zijn gesorteerd op F1-score.	47
5.7	Visualisatie van de twee tramtrajecten over dezelfde route. Blauw: Viterbi-schatting, rood gestippeld: GPS.	49
5.8	Visualisatie van dezelfde route in Merelbeke, afgelegd per auto en te voet. Blauw: Viterbi-schatting, rood gestippeld: GPS.	50
5.9	Percentage meetpunten boven vaste foutdrempels, opgesplitst per omgevingstype. . . .	51
5.10	Classificatie van foutbronnen per omgevingstype.	51
C.1	Resultaten van de Viterbi positionering (Trajecten 1–6).	67
C.2	Resultaten van de Viterbi positionering (Trajecten 7–15).	68

List of Tables

2.1	Timing Advance granulariteit per technologie en subcarrier spacing (FR1 = sub-6 GHz, FR2 = mmWave).	9
2.2	Evolutie van 3GPP releases met betrekking tot lokalisatie.	10
3.1	Vergelijking van positioneringstechnieken. Gebaseerd op [1, 2].	14
3.2	Overzicht positioneringsnauwkeurigheid per methode.	16
3.3	Wettelijke nauwkeurigheidsvereisten voor noodoproepen. Bronnen: FCC Fourth Report and Order [3], EU Regulation 2019/320 [4].	17
3.4	Positioneringsresultaten uit Trogh et al. [5] met het AMT-algoritme op een 3G-netwerk in België.	18
3.5	Nauwkeurigheidsdoelstellingen (P75) afgeleid uit wettelijke en operationele vereisten. . .	18
4.1	Parameterdekking per traject	21
4.2	Statistieken van de RSRP-afstand correlatie per regio.	24
4.3	Statistieken van de TA-afstand correlatie.	25
4.4	Systematische TA-afstandsfout per regio (IQR gefilterd).	28
4.5	Standaarddeviatie van de TA-fout per afstandsklasse.	28
4.6	Verdeling van TA-metingen per frequentieband per regio.	29
4.7	Gemiddelde celzichtbaarheid per meetgebied. Percentages geven aan hoeveel Viterbi-punten door meer dan 1, 2 of 3 cellen worden bevestigd.	33
4.8	Gemiddelde afstand tot het vorige basisstation op het moment van handover per gebied, en de gekozen maximale overlap afstand voor buurcellen zonder TA-waarde.	33

4.9	Configuratieparameters per omgeving en mobiliteitstype	35
4.10	Overzicht van alle meettrajecten. Afstanden en snelheden berekend uit GPS-data. $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid, v_{95} = 95e percentiel.	40
5.1	Impact van herstelstrategieën op de mediaanfout per traject.	44
5.2	Positioneringsnauwkeurigheid per omgevingstype.	45
5.3	Positioneringsnauwkeurigheid per mobiliteitstype, gesorteerd op mediaan fout.	46
5.4	Vergelijking van twee tramtrajecten over dezelfde route in Gent.	48
5.5	Vergelijking van dezelfde route in Merelbeke, afgelegd per auto en te voet.	49
6.1	Vergelijking positioneringsnauwkeurigheid met literatuur.	53
B.1	Gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van de gewogen centroïde methode per tra- ject. Afstanden in meters ten opzichte van GPS ground truth.	63
B.2	Gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van het Viterbi algoritme per traject. Afs- tanden in meters ten opzichte van GPS ground truth.	64
B.3	Gedetailleerde verdeling van grote fouten per traject. *Voor rurale omgevingen wordt een drempel van >440 m gehanteerd in de derde kolom en >500 m voor stedelijke omgevingen.	64
B.4	Classificatie van foutbronnen voor fouten boven de omgevings specifieke drempel (>150 m stedelijk, >440 m ruraal) per traject. Centroïde = foute centroïde schatting; Beide = zowel centroïde als Viterbi fout; Viterbi = Viterbi afwijking van correcte centroïde.	65
B.5	Gedetailleerde route reconstructie resultaten per traject: precisie (correctheid), recall (dekking) en F1-score (kwaliteit). Buffer: 20 m.	65
B.6	Effect van herstelstrategieën op de mediaan positioneringsfout per traject. Positieve waar- den geven aan dat de fout lager is met herstelstrategieën.	66

Lijst met Acroniemen

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G NR	5G New Radio
5GC	5G Core
ADC	Analog-to-Digital Converter
AGV	Automated Guided Vehicle
API	Application Programming Interface
BS	Base Station
DAC	Digital-to-Analog Converter
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EKF	Extended Kalman Filter
EN-DC	E-UTRAN New Radio - Dual Connectivity
EPC	Evolved Packet Core
eNodeB	Evolved Node B
FFT	Fast Fourier Transform
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
GDOP	Geometric Dilution of Precision
gNodeB	Next Generation Node B
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HMM	Hidden Markov Model
IIoT	Industrial Internet of Things
LOS	Line-of-Sight
LPP	LTE Positioning Protocol
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLoS	Non-Line-of-Sight
NLOS	Non-Line-of-Sight
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OSM	OpenStreetMap
OTDoA	Observed Time Difference of Arrival
PCI	Physical Cell Identity
PCell	Primary Cell
PRS	Positioning Reference Signal
PSCell	Primary Cell from secondary cell group
PTPv2	Precision Time Protocol version 2
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RMSE	Root Mean Square Error
RRC	Radio Resource Control
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSTD	Reference Signal Time Difference
SCell	Secondary Cell
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SQL	Structured Query Language
SSB	Synchronization Signal Block
TA	Timing Advance
TAG	Timing Advance Group
TDD	Time Division Duplex
TDoA	Time Difference of Arrival
UE	User Equipment
UKF	Unscented Kalman Filter
V2X	Vehicle-to-Everything

Voorwoord generatieve AI

Omwille van transparantie vermeldt deze thesis het beperkte en gecontroleerde gebruik van generatieve AI-tools.

Claude (Anthropic) en Gemini (Alphabet Inc.) werden voornamelijk gebruikt als programmeerassistenten voor de ontwikkeling van de algoritmen en analysescripts. Specifiek werden deze modellen ingezet voor:

- Het debuggen van code en het oplossen van technische problemen
- Het schrijven van routinematige implementaties en hulpfuncties
- Het refactoren en verbeteren van de codestructuur
- Het genereren van visualisaties en interactieve tools

ChatGPT (OpenAI) werd gebruikt voor tekstuele ondersteuning, met name voor het verduidelijken van formuleringen, het verbeteren van de tekstflow en het structureren van hoofdstukken.

Alle analyse, algoritme-ontwerp, interpretatie en besluitvorming zijn volledig van de auteur zelf. AI-gegenereerde suggesties, zowel tekstueel als programmatisch, werden behandeld als concepten die kritisch werden geëvalueerd en waar nodig herzien of verworpen. Geen enkele resultaat, claim of conclusie werd direct door AI gegenereerd.

De verantwoordelijkheid voor de inhoud, correctheid en originaliteit van deze thesis ligt bij de auteur. Waar AI-ondersteunde tekst of code behouden is, werd deze bewerkt voor nauwkeurigheid, stijl en coherentie zodat het de intentie van de auteur weerspiegelt. Code voorgesteld door AI-modellen werd niet direct geïmplementeerd maar geïnspecteerd, aangepast en getest voor opname.

Clément Peleman, January 8, 2026

Inleiding

Talrijke toepassingen steunen op het kennen of delen van de locatie van een gebruiker. Naast dagelijkse navigatie en locatiegebonden diensten zijn er situaties waarin het delen van die locatie cruciaal is, bijvoorbeeld bij noodsituaties, vermissingen of ontvoeringen. In dergelijke gevallen is de betrokkene echter niet altijd in staat om zijn of haar locatie actief te delen. Bovendien kunnen GNSS-signalen in bepaalde toepassingen, zoals drone-surveillance, doelbewust gespoofd of verstoord worden, waardoor positionering en navigatie onbetrouwbaar worden [2].

Cellulaire netwerken bieden een alternatief voor GNSS-gebaseerde positionering. De evolutie van 4G LTE naar 5G NR brengt belangrijke verbeteringen voor lokalisatie door grotere bandbreedtes en verbeterde tijdsresolutie [1]. Moderne cellulaire netwerken bevatten netwerkparameters die informatie verschaffen over de afstand tussen een toestel en nabije basisstations. Echter, de nauwkeurigheid van deze methoden hangt sterk af van de netwerkdichtheid en -geometrie [6].

In landelijke omgevingen, daalt de nauwkeurigheid drastisch [2, 7]. Deze degradatie wordt veroorzaakt door de grotere geometric dilution of precision (GDOP) en het beperkte aantal zichtbare basisstations. Huidige praktische benaderingen gaan dan ook vaak niet verder dan het bepalen van de cel waarin de gebruiker zich bevindt, een grove schatting die in landelijke gebieden een bereik van meerdere kilometers kan omvatten.

Een beter gebruik van de beschikbare signaalsdata zou locatieschattingen aanzienlijk kunnen verbeteren. Door cellulaire metingen te combineren met wegnetwerkbependingen via Hidden Markov Model (HMM) gebaseerde map-matching technieken [8], kan de locatieschatting worden verbeterd door fysiek onmogelijke trajecten uit te sluiten en de temporele consistentie van opeenvolgende positieschattingen te benutten.

De centrale onderzoeksvraag van deze thesis luidt: *Hoe kunnen positioneringsalgoritmen ontworpen en gebruikt worden die de locatie van een toestel bepalen op basis van draadloze signalen uitgewisseld tussen het toestel en het cellulaire netwerk, en hoe kan deze locatieschatting verbeterd worden met behulp van bijkomende technieken?*

Hieruit vloeien de volgende deelvragen voort: (1) Welke signaalparameters bevatten informatie die relevant is voor positieschatting? (2) Hoe kunnen deze signaalparameters gebruikt worden om de locatie van een toestel te bepalen? (3) Hoe kunnen bijkomende technieken, zoals map-matching en wegnetwerkindegratie, gebruikt worden om de locatieschatting te verbeteren? (4) Wat zijn de beperkingen van de aanpak en welke richtingen voor toekomstig onderzoek zijn aanbevolen?

De doelstellingen van dit onderzoek zijn: het uitvoeren van een literatuurstudie naar bestaande cellulaire positioneringsmethoden, het extraheren van relevante signaalparameters uit gemeten data, het ontwikkelen van een positioneringsalgoritme, en het evalueren van de nauwkeurigheid van de voorgestelde aanpak. De aanpak bestaat uit een studie van bestaande benaderingen, dataverzameling met de Qualipoc Android app [9] langs verschillende trajecten met GPS als controle, het ontwerp van het algoritme, en een evaluatie met aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

Deze thesis levert de volgende bijdragen: (1) een implementatie van een Viterbi-gebaseerd positioneringsalgoritme dat wegnetwerkbependingen integreert met cellulaire data, (2) empirische analyse van de haalbaarheid en nauwkeurigheid van cellulaire positionering met behulp van het Proximus netwerk, (3) inzichten in welke netwerkparameters het meest bijdragen aan nauwkeurige positionering, en (4) aan-

bevelingen voor toekomstig onderzoek.

De verdere structuur van deze thesis is als volgt. Hoofdstuk 2 bespreekt de achtergrond van cellulaire netwerken en signaalpropagatie. Hoofdstuk 3 presenteert een literatuuronderzoek van bestaande positioneringsmethoden. Hoofdstuk 4 beschrijft de methodologie en het ontwerp van het Viterbi-algoritme. Hoofdstuk 5 presenteert de resultaten van de experimenten. Hoofdstuk 6 bespreekt deze resultaten en hun implicaties. Tenslotte formuleert Hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

Achtergrond

Dit hoofdstuk beschrijft de technische achtergrond die nodig is om cellulaire positionering te begrijpen. De nadruk ligt op de netwerkarchitectuur van 4G LTE en 5G NR, de meetbare parameters die relevant zijn voor lokalisatie, en de evolutie van positioneringsstandaarden binnen 3GPP.

2.1 Cellulaire netwerkarchitectuur

2.1.1 5G NR

5G *New Radio (NR)* introduceert fundamentele vernieuwingen ten opzichte van 4G *Long Term Evolution (LTE)* die relevant zijn voor positionering. De belangrijkste zijn het gebruik van hogere frequentiebanden, grotere bandbreedtes en bundelvorming.

Frequentiebereiken: FR1 en FR2 5G NR opereert in twee frequentiebereiken:

- *Frequency Range 1 (FR1)*: sub-6 GHz, met bandbreedtes tot 100 MHz. Dit bereik biedt vergelijkbare propagatie-eigenschappen als LTE.
- *Frequency Range 2 (FR2)*: millimetergolf (mmWave), typisch 24–52 GHz, met bandbreedtes tot 400 MHz. Deze hoge frequenties bieden zeer grote bandbreedtes maar hebben beperkter bereik en slechtere penetratie door obstakels.

Bundelvorming Om het beperkte bereik van hogere frequenties te compenseren, maakt 5G NR gebruik van bundelvorming: de antenne bundelt energie in smalle, gerichte stralen (*beams*) in plaats van brede sectorale dekking. In FR1 worden typisch 4–8 richtingen per sector gebruikt, terwijl FR2 tot 64 richtingen per sector kan gebruiken. Elke *beam* krijgt een unieke index voor identificatie. De *User Equipment (UE)* rapporteert metingen per *beam*.

2.1.2 Basiscomponenten

Een cellulair netwerk bestaat uit de volgende fundamentele elementen:

- *User Equipment (UE)*: het toestel dat radioverbindingen opzet en metingen rapporteert.
- *Radio Access Network (RAN)*: het netwerk bestaande uit eNodeB (LTE) of gNodeB (NR) met sectorantennes die signaaldekking leveren en mobiliteit tussen basisstations (*handover*) ondersteunen.
- *Core Network*: EPC (LTE) of 5GC (NR) dat sessies en mobiliteit beheert; *operator policies* bepalen o.a. toegang tot bepaalde radiofuncties.

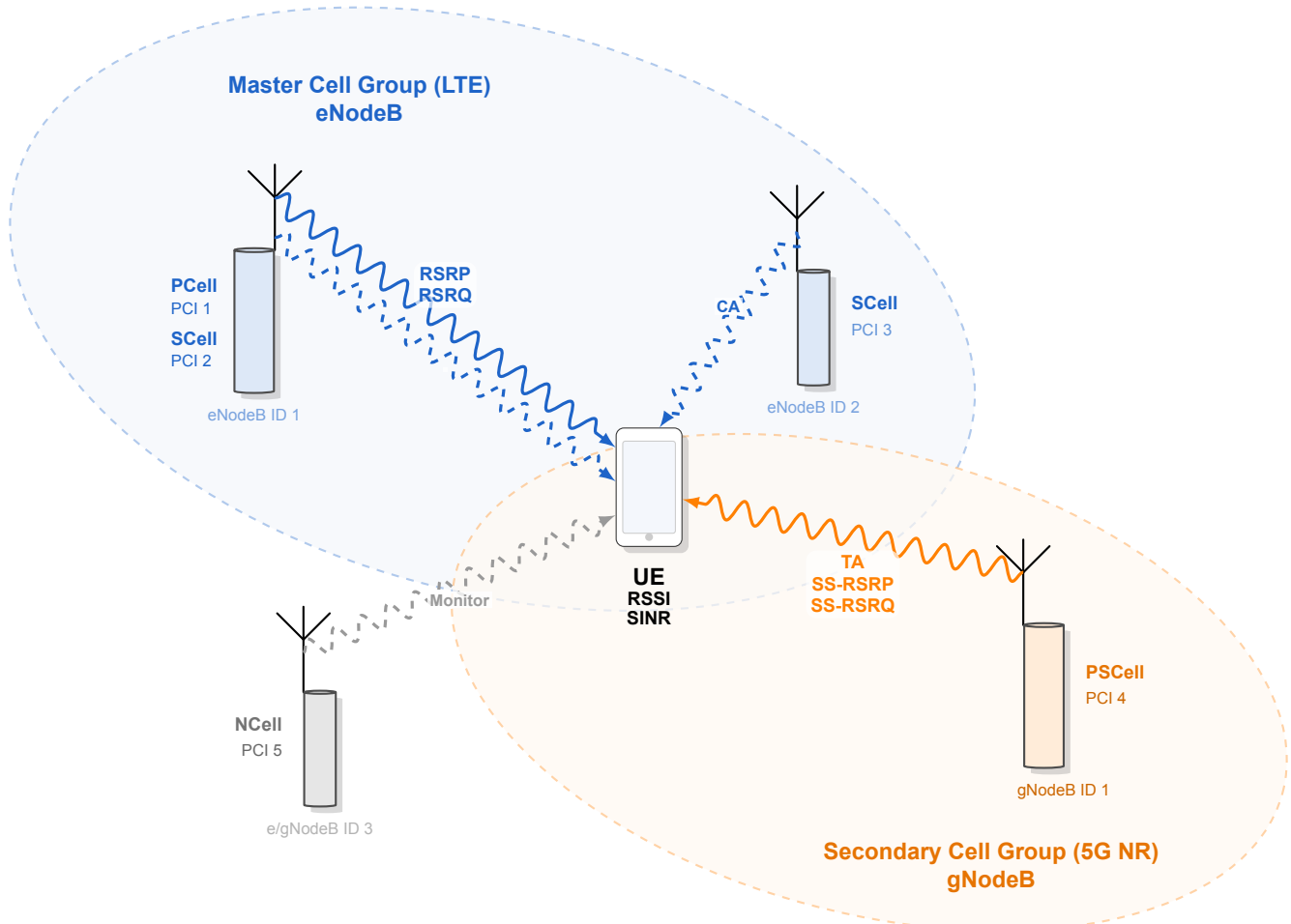


Figure 2.1: Architectuur van E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC).

2.1.3 Primary Cell vs. Secondary Cell

Om zowel capaciteit als robuustheid te benutten, kan een UE gelijktijdige radioverbindingen onderhouden op meerdere carriers en/of met meerdere nodes. Dit gebeurt via *Carrier Aggregation* en *Dual Connectivity*.

Carrier Aggregation

Bij *Carrier Aggregation* is de UE geconfigureerd met meerdere frequenties naar één basisstation:

- *Primary Cell (PCell)*: de hoofdcel waarmee de UE is verbonden. Deze verzorgt de controleverbinding, mobiliteitscontrole en bevat het primaire uplink/downlink kanaal.
- *Secondary Cell (SCell)*: aanvullende cellen die extra bandbreedte leveren via *carrier aggregation*. Deze opereren op andere frequenties maar worden beheerd door dezelfde of een nabijgelegen basisstation.

Dual Connectivity

Dual Connectivity verbindt de UE gelijktijdig met twee basisstations: een master (primaire) en een secondary (secundaire). De UE is daarbij verbonden via twee celgroepen:

- *Master Cell Group (MCG)*: de celgroep van het primaire basisstation, bestaande uit een PCell en eventuele SCells.

- *Secondary Cell Group (SCG)*: de celgroep van het secundaire basisstation, bestaande uit een PSCell (Primary SCell) en eventuele extra SCells. De SCG levert extra capaciteit bovenop de MCG.

Bij EN-DC (E-UTRA-NR Dual Connectivity), de meest gangbare configuratie in huidige netwerken, is de MCG een LTE-verbinding via de eNodeB en de SCG een 5G NR-verbinding via de gNodeB. Dit betekent dat de UE gelijktijdig metingen kan leveren van zowel LTE- als NR-cellen (zie Figuur 2.1). Daarnaast monitort de UE continu signalen van buurcellen die niet tot de actieve celgroepen behoren (linksonder in de figuur). Deze metingen zijn essentieel voor *handover*-beslissingen.

2.2 Cellulaire netwerkparameters

2.2.1 Celidentificatie

De meest fundamentele parameters voor lokalisatie zijn de cel-identifiers. Deze geven aan met welke basisstations de UE verbonden is of welke hij kan detecteren:

- *eNodeB/gNodeB ID*: Unieke identifier voor de fysieke basisstation. Meerdere PCI's delen dezelfde eNodeB ID wanneer één mast meerdere sectoren bedient.
- *Physical Cell Identity (PCI)*: Unieke identifier binnen een lokaal gebied (0–503 voor LTE, 0–1007 voor NR). Omdat PCI's kunnen overlappen tussen verschillende basisstations door de beperkte mogelijkheden, moet deze in combinatie met de eNodeB/gNodeB ID gebruikt worden voor unieke identificatie.
- *Cell Global Identity (CGI/ECGI/NCI)*: wereldwijd unieke identificatie bestaande uit MCC (landcode), MNC (operatorcode), eNodeB/gNodeB ID en Cell ID.

Naast de identifier zelf zijn ook de sectorparameters relevant:

- *Azimuth*: Kompasrichting van de antenne (0–360°)
- *Beamwidth*: Horizontale straalbreedte (typisch 60–120°)
- *Mechanical/Electrical Tilt*: Verticale hoek van de antenne

Deze parameters beperken de zoekruimte tot een bepaalde sector, wat de lokalisatienauwkeurigheid significant kan verbeteren.

2.2.2 Signaalsterkte

Signaalsterkte- en kwaliteitsparameters zijn beschikbaar in de logboeken van de meetgegevens en worden door de UE gerapporteerd aan het netwerk voor cel-selectie en *handover*-beslissingen.

LTE: RSRP en CRS In LTE wordt de signaalsterkte gemeten via *Reference Signal Received Power (RSRP)*. Het netwerk zendt *Cell-specific Reference Signals (CRS)* uit. Dit zijn bekende pilootsignalen die verspreid zijn over de volledige bandbreedte en elk subframe binnen de gebruikte LTE frequentieband. De UE meet de ontvangen vermogensdichtheid van deze CRS en rapporteert dit als RSRP (in dBm). Gerelateerde parameters hieraan zijn:

- *RSRQ (Reference Signal Received Quality)*: verhouding RSRP tot totale ontvangen vermogen, indicatief voor de mate van interferentie met naburige cellen
- *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*: totaal ontvangen vermogen inclusief ruis en interferentie met naburige cellen
- *SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)*: signaal-ruisverhouding

5G NR: SS-RSRP en SSB In 5G NR is de signaalsterkte-meting fundamenteel anders door de introductie van het *Synchronization Signal Block (SSB)* [10]. Het SSB is een compact blok van 4 OFDM-symbolen dat periodiek wordt uitgezonden en drie essentiële signalen bevat:

- *PSS (Primary Synchronization Signal)*: voor initiële tijdsynchronisatie
- *SSS (Secondary Synchronization Signal)*: voor cel-identificatie (PCI)
- *PBCH (Physical Broadcast Channel)*: voor systeeminformatie

De UE meet de signaalsterkte per SSB en rapporteert *SS-RSRP (Synchronization Signal RSRP)* voor de sterkste beam(s). Figuur 2.2 toont een voorbeeld van 5G NR beam-metingen in de Qualipoc app: de PCell is de actieve serving beam, terwijl de overige beams (van dezelfde cel) worden gemonitord voor eventuele *beam switching* indien een andere *beam* betere eigenschappen heeft.

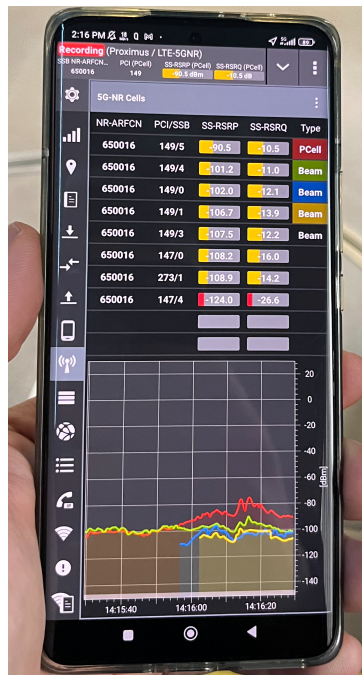


Figure 2.2: Qualipoc screenshot. De PCell type (rood) is de actieve serving beam; de *beam* types zijn alternatieve beams van dezelfde cel.

Bruikbaarheid voor positionering In theorie kan signaalsterkte via een padverliesmodel worden vertaald naar afstand [11]:

$$PL = PL_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.1)$$

waarbij n de padverliesexponent is (typisch 2–4, afhankelijk van de omgeving) en X_σ een log-normaal verdeelde stochastische term is die shadow fading modelleert. Door deze onzekerheid is de afstandsschatting fundamenteel ruisgevoelig.

In de literatuur worden de signaalsterkteparameters bijna uitsluitend voor fingerprinting-methodes gebruikt. Dit zijn methodes waarbij op voorhand met drive tests een omgeving in kaart gebracht wordt door per locatie de signaalkarakteristieken te meten en op te slaan in een database. Tijdens lokalisatie wordt de huidige meting gematcht met de meest gelijkende fingerprint. Dit vormt een beperking op de toepassingsomvang: de methode werkt enkel in vooraf gemeten gebieden en vereist periodieke vernieuwing bij netwerk wijzigingen.

2.2.3 Tijdsgebonden parameters

Tijdsgebonden parameters zijn directer gerelateerd aan de fysieke afstand tot de cellen dan signaalsterkte. De belangrijkste parameter in deze categorie is *Timing Advance (TA)*. Daarnaast bestaan er ook Time of Arrival (ToA) metingen op basis van *Positioning Reference Signals (PRS)* of *Synchronization Signal Blocks (SSB)* [12]. PRS zijn speciale referentiesignalen die door het netwerk worden uitgezonden specifiek voor positioneringsdoeleinden, terwijl SSB (zoals eerder besproken) primair voor synchronisatie en cel-identificatie dienen maar ook voor ToA-metingen kunnen worden gebruikt.

TA is primair een synchronisatiemechanisme: het netwerk instrueert de UE om transmissies vroeger te starten, zodat uplink-signalen synchroon aankomen bij het basisstation. Omdat de benodigde tijdscorrectie afhankelijk is van de propagatietijd, bevat de TA-waarde inherent afstands-informatie. Bij een *Line-of-Sight (LoS)* verbinding zonder reflecties kan de TA direct vertaald worden naar de afstand tussen UE en basisstation. De TA-waarde wordt bepaald uit het *Physical Random Access Channel (PRACH)* bericht dat de UE verstuurt. Het basisstation meet de aankomsttijd en berekent de benodigde tijdscorrectie die wordt teruggestuurd naar de UE. In 5G NR bevat het TA-commando 12 bits (waarden 0–3846), wat een theoretisch bereik van circa 300 km toelaat [13]. Dit betekent dat deze waarde beschikbaar is in de logboeken.

De tijdsoffset δ die de UE moet toepassen wordt uitgedrukt als:

$$\delta = N_{TA} \cdot T_c \quad \text{met} \quad T_c = \frac{1}{f_{SCS} \cdot N_{FFT}} \quad (2.2)$$

waarbij f_{SCS} de *subcarrier spacing* is (zie hieronder) en N_{FFT} de FFT-grootte. De waarde $N_{TA} = TA \times 16$ volgt uit de 3GPP specificatie [13]: de TA-index (0–3846) wordt vermenigvuldigd met 16 om de granulariteit in eenheden van T_c te verkrijgen. De afstand volgt uit de heen en terug propagatietijd.

$$d = \frac{\delta \cdot c}{2} = \frac{N_{TA} \cdot T_c \cdot c}{2} \quad (2.3)$$

met c de lichtsnelheid. De resulterende afstandsresolutie is afhankelijk van f_{SCS} : een hogere subcarrier spacing leidt tot een fijnere TA-granulariteit.

Subcarrier Spacing In OFDM-gebaseerde systemen zoals LTE en 5G NR wordt de beschikbare bandbreedte verdeeld in meerdere smalle frequentiebanden, de subcarriers. De afstand tussen deze subcarriers, de *subcarrier spacing (SCS)*, bepaalt de symboolduur:

$$T_{\text{symbol}} = \frac{1}{f_{SCS}} \quad (2.4)$$

Een hogere SCS resulteert in kortere symbolen, wat twee voordelen biedt: (i) verhoogde robuustheid tegen Doppler-effecten bij hoge snelheden, en (ii) verbeterde precisie van tijdsgebonden metingen door de kortere T_c (de basis tijdseenheid).

LTE gebruikt uitsluitend 15 kHz SCS, terwijl 5G NR flexibele *subcarrier spacing* ondersteunt: 15, 30, 60 en 120 kHz voor verschillende frequentiebanden [10]. Voor sub-6 GHz banden (FR1), waaronder de n78-band (3.5 GHz), wordt typisch 30 kHz SCS gebruikt. Uit de bovenstaande formules volgt dat de TA-granulariteit halveert bij verdubbeling van de SCS: van 78 m bij 15 kHz naar 39 m bij 30 kHz.

Tabel 2.1 toont de evolutie over de mobiele generaties.

Deze discrete granulariteit introduceert een fundamentele foutondergrens: zelfs bij perfecte metingen kan de afstand slechts tot op de granulariteit nauwkeurig worden bepaald.

Timing Advance varianten Er bestaan twee varianten van de *Timing Advance* metingen:

- TA type 1 (heen en terug): Een heen en terug meting waarbij het basisstation de tijd meet tussen het verzenden van een downlink-sigitaal en het ontvangen van de uplink-respons. Het voordeel is dat geen kloksynchronisatie tussen UE en basisstation vereist is, aangezien de klokoffset in zowel de heenweg als de terugweg aanwezig is en dus wegvalt. TA type 1 is echter gevoelig voor asymmetrische propagatiekanalen (verschillende paden voor uplink en downlink).

Generatie	TA-stap (ns)	SCS	Granulariteit (m)
3G (UMTS)	3690	–	554
4G (LTE)	520	15 kHz	78
5G NR (FR1)	520	15 kHz	78
5G NR (FR1)	260	30 kHz	39
5G NR (FR1)	130	60 kHz	19.5
5G NR (FR2)	65	120 kHz	9.8

Table 2.1: Timing Advance granulariteit per technologie en subcarrier spacing (FR1 = sub-6 GHz, FR2 = mmWave).

- TA type 2 (enkel): Een enkele meting die werkt in *Time Division Duplex (TDD)*-systemen zoals 5G NR n78. In TDD delen uplink en downlink dezelfde frequentie, waardoor frame-synchronisatie tussen UE en basisstation inherent aanwezig is. Hierdoor kan de propagatietijd uit een enkel uplink-frame worden afgeleid. Het voordeel is robuustheid tegen asymmetrische kanalen en potentieel snellere updates.

De specificatie van deze TA-varianten is beschreven in 3GPP TS 38.213 [13].

2.2.4 Bundelspecifieke parameters

Zoals eerder vermeld introduceert 5G NR bundelspecifieke observaties, zoals *beam-index* en *beam-gefilterde metingen* (SS-RSRP, SS-SINR). Dit kan de lokalisatie-informatie verrijken doordat de beam een exactere richting naar de UE geeft. Waar traditionele basisstations met 3 of 4 sectoren een beamwidth van 90–120° hebben, kunnen 5G NR beams zo smal zijn als 10–15°, wat een aanzienlijk fijnere hoekresolutie oplevert.

Het benutten van beam-informatie voor positionering vereist echter kennis van de antennenetopologie: de azimuth, elevatiehoek en bundelpatroon van elke sector moeten gekend zijn.

2.3 3GPP Standaardisatie en Evolutie

Het *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* is het internationale samenwerkingsverband dat mobiele telecommunicatiestandaarden ontwikkelt [14]. De standaardisatie verloopt in genummerde *releases*, waarbij elke *release* een verzameling specificaties vormt die nieuwe technologieën en functionaliteiten definiëren. Wanneer een *release* wordt 'bevroren' (*frozen*), worden geen nieuwe functies meer toegevoegd en is de specificatie stabiel voor implementatie.

De ontwikkeling van cellulair gebaseerde lokalisatie wordt sterk gedreven door deze opeenvolgende *releases*, die elk nieuwe positioneringsfunctionaliteiten en nauwkeurigheidsdoelen introduceren. TS 38.305 is de technische specificatie die beschrijft hoe positionering werkt in 5G NR [14].

2.3.1 Pre-5G: LTE Positionering

LTE introduceert positioneringsmethoden zoals *Observed Time Difference of Arrival (OTDOA)*. De focus lag primair op het voldoen aan wettelijke vereisten voor noodoproepen: bij een 112-oproep (Europa) of 911-oproep (VS) moet het netwerk de locatie van de beller automatisch kunnen bepalen en doorgeven aan hulpdiensten, zodat deze de persoon in nood kunnen vinden [3, 4]. Hoewel er in opeenvolgende releases incrementele verbeteringen kwamen, werden geen fundamenteel nieuwe positioneringsmethoden toegevoegd tot de introductie van 5G NR.

2.3.2 5G Release 15: De 5G NR-baseline

Release 15 (2018) specificeert de eerste 5G NR-standaard. Voor lokalisatie lag de focus voornamelijk op het voldoen aan wettelijke eisen (zoals E911 en E112) [3, 4] met basisprestaties vergelijkbaar met 4G

LTE. De ondersteunde methoden in TS 38.305 omvatten voornamelijk Enhanced Cell-ID (E-CID). Hoewel de fysieke laag van NR flexibeler is dan LTE (hogere bandbreedtes, variabele SCS), bevatte Release 15 nog geen specifieke PRS voor precieze positionering. PRS zijn geoptimaliseerd voor ToA-metingen: ze zijn interferentie-vrij, hebben hoge bandbreedte en worden niet gebruikt voor datatransmissie, waardoor ze nauwkeuriger tijdsgebonden metingen mogelijk maken dan reguliere signalen zoals SSB [12].

2.3.3 5G Release 16: Hoge nauwkeurigheid

Release 16 (2020) wordt beschouwd als de grote stap voorwaarts voor 5G-lokalisatie. Het introduceerde NR-specifieke PRS, volledig herontworpen ten opzichte van LTE PRS met ondersteuning voor hogere bandbreedtes (tot 400 MHz) en flexibele configuraties. Daarnaast introduceerde het nieuwe meetmethoden:

- Round Trip Time (RTT): *multi-cell RTT* om synchronisatiefouten tussen basisstations te elimineren.
- Angle of Arrival / Departure (AoA/AoD): gebruikmakend van de bundelvorming van 5G. Met meerdere antenne-elementen (een *array*) kan de hoek waaronder een signaal aankomt (AoA) of vertrekt (AoD) worden gemeten [12]. Grotere arrays met meer elementen bieden een fijnere hoekresolutie, waardoor de richting naar de UE nauwkeuriger kan worden bepaald.
- Time Difference of Arrival (TDoA): verbeterd voor NR.

Het doel is hogere nauwkeurigheid (< 3m binnen, < 10m buiten) te halen voor commerciële toepassingen en Industrial IoT.

2.3.4 5G Release 17: RedCap en lagere vertraging

Release 17 (2022) verfijnde deze technieken voor specifieke use-cases zoals IIoT. Het introduceerde verbeteringen voor vertragingkritieke applicaties en ondersteuning voor *RedCap* (*Reduced Capability*) toestellen, zoals sensoren en *wearables*, die minder complex zijn maar toch locatiebepaling nodig hebben. De nauwkeurigheidseisen werden verder aangescherpt tot centimeter-niveau (< 20cm) voor specifieke industriële scenario's, bereikt door *carrier phase measurements*: in plaats van enkel de aankomsttijd te meten wordt ook de fase van de draaggolf gebruikt, wat een fijnere resolutie biedt.

2.3.5 5G Release 18: 5G Advanced en AI/ML

Release 18 (2024), ook wel '5G Advanced' genoemd, onderzoekt de integratie van *AI en Machine Learning* om lokalisatie te verbeteren in uitdagende omgevingen (bv. voor NLoS-detectie en foutcorrectie). Daarnaast ligt de focus op *Sidelink Positioning*, waarbij toestellen elkaar kunnen lokaliseren via *Vehicle-to-Everything* (V2X)-communicatie zonder directe tussenkomst van het netwerk.

2.3.6 Samenvattend Release-overzicht

Release	Focus	Lokalisatie-features
Pre-5G	LTE positionering	OTDOA, E-CID, A-GNSS. Focus op E911/E112 naleving.
Rel-15	Basis 5G	Cell-ID, E-CID. Baseline voor huidige commerciële netwerken.
Rel-16	Hogere nauwkeurigheid	Introductie NR PRS, Multi-RTT, DL-AoD, UL-AoA.
Rel-17	Specifieke toepassingen	Lagere vertraging, RedCap ondersteuning, cm-level nauwkeurigheid voor industrie.
Rel-18	AI/ML	AI-gestuurde positionering, Sidelink (V2X).

Table 2.2: Evolutie van 3GPP releases met betrekking tot lokalisatie.

Literatuuronderzoek

Dit hoofdstuk bespreekt de bestaande literatuur over lokalisatiemethoden die gebruikmaken van cellulaire netwerkparameters. De nadruk ligt op de algoritmen en technieken die in de literatuur zijn voorgesteld, hun sterktes en zwaktes, en de gerapporteerde nauwkeurigheden. De technische achtergrond over netwerkarchitectuur, meetbare parameters en 3GPP-standaardisatie werd behandeld in het voorgaande hoofdstuk (Achtergrond).

Er bestaan meer positioneringsmethoden dan hier besproken worden. Dit hoofdstuk beperkt zich tot methoden waarvan de meetdata toegankelijk is via de netwerkszijde. Hoewel de logboeken uitgelezen worden aan de UE-zijde, is deze data ook beschikbaar aan de netwerkszijde.

3.1 Lokalisatiealgoritmen

Dit onderzoek richt zich op methoden die economisch haalbaar zijn voor implementatie in bestaande publieke netwerken, zonder significante infrastructuurinvesteringen. Hoewel 3GPP Release 16 en latere standaarden geavanceerde technieken specificeren zoals Multi-RTT en AoA (zie Hoofdstuk 2), zijn deze functies in publieke consumentennetwerken niet beschikbaar [2] (zie Sectie 3.5.1 voor een uitgebreide bespreking). De focus ligt daarom op methoden die gebruikmaken van reeds beschikbare parameters en algoritmische verbeteringen.

Lokalisatiealgoritmen in cellulaire netwerken kunnen worden ingedeeld op basis van de gebruikte meettechniek en de entiteit die de positie berekent. Del Peral-Rosado et al. [2] onderscheiden twee hoofd-categorieën: *mobile-based* (het toestel berekent zelf zijn locatie) en *network-based* (de netwerkserver berekent de positie). In huidige en toekomstige systemen domineert de *network-based* aanpak vanwege de gecentraliseerde controle door de operator.

3.1.1 Fundamentele positioneringstechnieken

De literatuur onderscheidt vijf fundamentele positioneringstechnieken. De keuze voor een specifieke techniek hangt af van beschikbare metingen, vereiste infrastructuur, en gewenste nauwkeurigheid:

1. **Trilateratie:** Bepaling van de positie door intersectie van afstandscirkels of hyperbolen, gebaseerd op TDoA of signaalsterkte.
2. **Triangulatie:** Gebruik van AoA om de positie te bepalen via de intersectie van richtingslijnen vanuit minimaal twee zenders.
3. **Nabijheid:** De bekende zenderpositie wordt toegewezen als UE-positie. Het bekendste voorbeeld is Cell-ID, waarbij de positie van de *serving cell* wordt gebruikt.
4. **Fingerprinting:** Matchen van gemeten signaalkarakteristieken met een database van vooraf opgenomen referentiepunten.
5. **Hybride methoden:** Combinatie van bovenstaande technieken om de prestaties te verbeteren of tekortkomingen te compenseren.

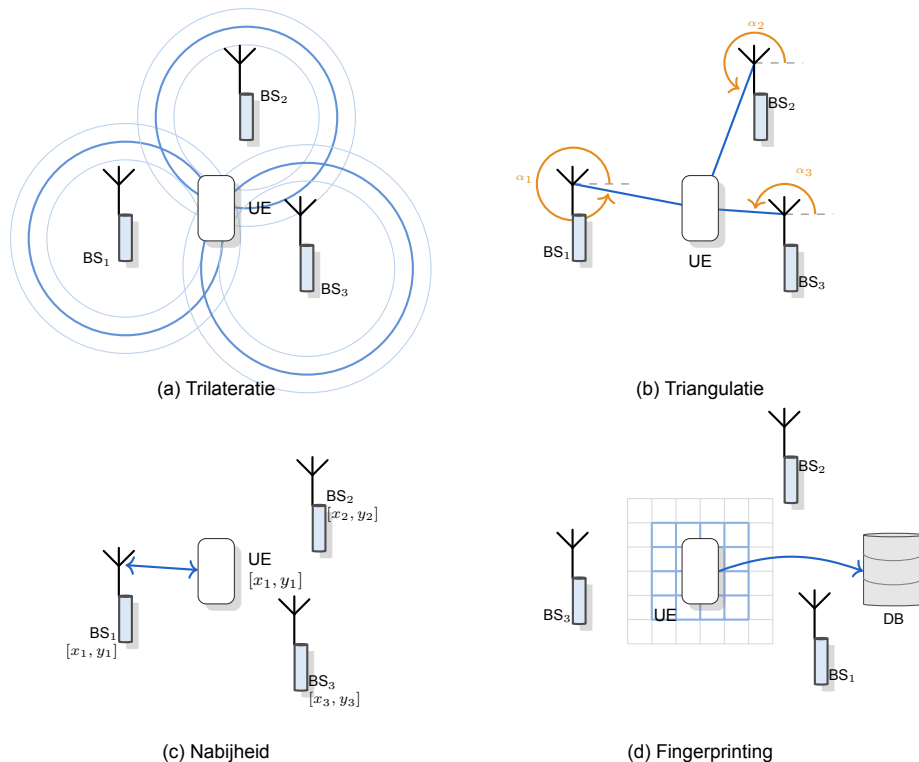


Figure 3.1: Overzicht van fundamentele positioneringstechnieken in cellulaire netwerken.

3.1.2 Enhanced Cell-ID

De eenvoudigste methode gebruikt enkel de Cell-ID: de UE-positie wordt geschat als de locatie van de *serving cell*. De nauwkeurigheid is beperkt tot de celgrootte, typisch honderden meters tot kilometers.

Enhanced Cell-ID (E-CID) verbetert dit door aanvullende metingen te gebruiken. Een belangrijk voordeel van E-CID is dat het direct implementeerbaar is in bestaande *LTE/NR Radio Access Networks* zonder extra hardware of infrastructuurwijzigingen. Dit maakt E-CID een praktische methode voor operators die positionering willen aanbieden zonder significante investeringen in bijkomende hardware. Volgende aanvullende metingen worden vaak gebruikt om bij te dragen aan de nauwkeurigheid [12, 15]:

- **Timing Advance**: Geeft de afstand tussen UE en basisstation, waardoor de positie wordt beperkt tot een ring rond de cel.
- **RSSPLM**: Signaalsterktemetingen inclusief *path loss* model voor verdere verfijning binnen een sector. Hier wordt de positie opnieuw beperkt tot een ring rond de cel.
- **Sectoridentificatie**: In traditionele E-CID wordt de azimuth in combinatie met de straalbreedte van de *serving sector* gebruikt om de zoekruimte te beperken. Dit is een grove hoekschatting gebaseerd op de vaste sectorrichting en straalbreedte. In *5G Release-15* kan dit worden verfijnd met *beam*-informatie.

3.1.3 Multi-cell E-CID

Een uitbreiding van E-CID combineert metingen van meerdere cellen: de *serving cell* en buurcellen die door de UE worden gerapporteerd. Voor de *serving cell* is TA, PCI en RSRP beschikbaar; voor buurcellen enkel PCI en RSRP (TA is alleen beschikbaar voor de verbonden cel, zoals gespecificeerd in de 3GPP measurement requirements [12]).

Door de overlap tussen zichtbare cellen te analyseren, kan de zoekruimte worden beperkt. Een kandidaatpositie die binnen het bereik van meerdere gerapporteerde cellen valt, is waarschijnlijker dan een positie die slechts één cel kan observeren. Deze multi-cell aanpak vereist geen extra infrastructuur en is direct toepasbaar op standaard meetgegevens verzonden over het netwerk.

3.1.4 ToA: Time of Arrival

Time of Arrival (ToA) meet de tijd die een signaal nodig heeft om van een basisstation naar de UE te reizen. Op basis van deze aankomsttijd kan de afstand worden bepaald via $d = c \cdot t$, waarbij c de lichtsnelheid is en $t = RTT/2$. ToA wordt typisch gemeten op basis van PRS of SSB.

3.1.5 OTDoA: Observed Time Difference of Arrival

OTDoA combineert ToA metingen van meerdere basisstations. De UE observeert en rapporteert *Reference Signal Time Difference (RSTD)*-waarden, waarmee de positie via multilateratie kan worden berekend. OTDoA vereist minimaal drie waarneembare cellen en een nauwkeurige kloksynchronisatie tussen de basisstations onderling [6].

Een belangrijke praktische beperking van OTDoA is de toegankelijkheid van de meetdata: PRS-metingen zijn niet beschikbaar via standaard API's op commerciële smartphones. Toegang tot deze metingen vereist een LPP-sessie met de *Location Server*, die typisch enkel wordt opgezet in het kader van noodoproepen of geautoriseerde locatieverzoeken. Hierdoor is deze methode in de praktijk uitsluitend toepasbaar door netwerkoperatoren met directe toegang tot de cellulaire infrastructuur.

3.1.6 DL-AoD: Downlink Angle of Departure

In 5G NR kan de DL-AoD worden afgeleid uit *beam* informatie. Het netwerk bepaalt welke *beam* optimaal is voor communicatie met de UE, en deze *beam*-selectie impliceert een hoekschatting.

Hoewel deze informatie theoretisch zeer waardevol is voor positionering en smalle *beams* (10–15°) significante hoekresolutie bieden, is de praktische bruikbaarheid opnieuw beperkt. De mapping tussen *beam-index* en fysieke azimuth is enkel gekend door operatoren en niet gestandaardiseerd. DL-AoD is daarom, net als OTDOA, enkel bruikbaar door operatoren met toegang tot de interne netwerkdata.

3.1.7 UL-AoA: Uplink Angle of Arrival

UL-AoA is de complementaire methode van DL-AoD: het basisstation meet de hoek waaronder het uplink-signaal van de UE aankomt. Beide methoden leveren in theorie dezelfde hoekinformatie (de richting tussen BS en UE), maar vanuit tegengestelde meetperspectieven.

Merk op Merk op dat de hier besproken hoekgebaseerde methoden verschillen van de hoge-precisie AoA/AoD-technieken die pas in Release 16 zijn gestandaardiseerd [12]. Die laatste maken gebruik van fase-coherente metingen over *antenna-arrays* voor hoge hoekresoluties. De hier beschreven implementaties leiden de hoek af uit discrete *beam-indices*, wat een grovere maar praktisch beschikbare benadering biedt.

3.1.8 Tijdsgebonden beperkingen

Een fundamentele beperking van tijdgebaseerde positioneringsmethoden is de *timestamping*-resolutie. Chaloupka [1] analyseert deze beperkingen als volgt:

Timing Advance Significante synchronisatiefouten treden op wanneer er gelijktijdige metingen gedaan worden waarbij verschillende basisstations gebruikt worden [1]. In het geval van TA komt dit niet voor doordat deze steeds beperkt wordt tot één enkel basisstation, namelijk die van de serving cell. Het nadeel hiervan is dat er maar één afstandsschatting per tijdstip gemaakt kan worden.

OTDoA en ToA OTDoA gebruikt ToA-metingen van verschillende basisstations om een hogere nauwkeurigheid te bereiken. Dit vereist echter strikte synchronisatie tussen basisstations (< 50 ns offset). In praktijk is de synchronisatiefout in huidige netwerken $\pm 1,5$ μ s (PTPv2-standaard) [1], wat correspondeert met een

afstandsfout tot 450 m [16]. Zonder compensatie van deze klokfouten is nauwkeurige ToA-positionering niet haalbaar.

RF-keten beperkingen Naast timingresolutie speelt de RF-keten een rol: propagatietijden door versterkers, filters en ADC/DAC introduceren systematische fouten die gecompenseerd moeten worden. Het *timestamping*-referentiepunt is gedefinieerd aan de antenneconnector, maar de daadwerkelijke meting vindt plaats in de baseband-processor [1].

3.1.9 Vergelijking positioneringsmethoden

Tabel 3.1 vergelijkt de besproken positioneringstechnieken op basis van hun gevoeligheid voor omgevingsfactoren, technische vereisten en praktische haalbaarheid.

Methode	LOS-gevoeligheid	Interferentie	Synchronisatie	Resolutie	Nauwkeurigheid	Dekking	Complexiteit
GNSS	Hoog	Zeër hoog	Zeër hoog	Enkele ns	Zeër hoog	Overall	Zeër hoog
Angle of Arrival (AoA)	Zeër hoog	Laag	–	–	Medium	Overall	Laag
RSS + Path-Loss Model	Hoog	Medium	–	–	Laag	Overall	Laag
Timing Advance (TA)*	Hoog	Laag	–	≈ 521 ns	Medium	Overall	Laag
ToA*	Hoog	Laag	–	Tot ≈ 16 ns	Hoog	Overall	Medium
OTDoA**	Hoog	Medium	Zeër hoog	Tot ≈ 16 ns	Zeër hoog	Beperkt	Hoog

*Eén basisstation: kloksynchronisatie tussen basisstation en UE (reeds aanwezig).

**Meerdere basisstations: kloksynchronisatie tussen basisstations.

Table 3.1: Vergelijking van positioneringstechnieken. Gebaseerd op [1, 2].

Uit deze vergelijking blijkt dat OTDoA de hoogste potentiële nauwkeurigheid biedt, maar ten koste van strikte synchronisatievereisten en beperkte beschikbaarheid in publieke netwerken. Timing advance-gebaseerde methoden bieden een praktisch compromis: breed beschikbaar en redelijke nauwkeurigheid zonder synchronisatie-eisen, wat ze geschikt maakt voor E-CID-gebaseerde positionering in bestaande netwerken.

3.1.10 Algemene uitdagingen voor cellulaire positionering

Ongeacht de gekozen positioneringstechniek zijn er gemeenschappelijke uitdagingen die de nauwkeurigheid beperken. Del Peral-Rosado et al. [2] identificeren de volgende fundamentele beperkingen:

- Dekking en GDOP: Cellulaire netwerken zijn geoptimaliseerd voor communicatie, niet positionering. De geometrie tussen beschikbare basisstations bepaalt de *Geometric Dilution of Precision* (GDOP). Een slechte geometrie (bv. alle cellen in dezelfde richting) leidt tot grote onzekerheid in de positieschatting.
- Synchronisatie: Tijdgebaseerde methoden (ToA, TDoA) vereisen nauwkeurige kloksynchronisatie tussen basisstation en UE of basisstations onderling. Klokfouten vertalen zich rechtstreeks naar positiefouten.
- Multipath en NLoS: In stedelijke en indoor omgevingen wordt het signaal gereflecteerd en geblokkeerd door gebouwen. Dit veroorzaakt *multipath*-propagatie en NLoS-condities, waardoor tijdmetingen groter zijn omdat ze een langer pad afleggen.
- Discrete momentopnames: Cellulaire metingen zijn sterk afhankelijk van de omgeving op dat moment. Dit zorgt ervoor dat opeenvolgende meetpunten significant kunnen verschillen ten opzichte van elkaar. Wanneer hiermee een algoritme ontworpen wordt, bezitten de geschatte locaties van nature een grote spreiding.

Om deze beperkingen deels aan te pakken, worden vaak technieken zoals map matching en Viterbi gebruikt [8, 17]. In de volgende sectie wordt onderzocht hoe deze worden toegepast op cellulaire positionering.

3.2 Map matching

Map matching beperkt kandidaatposities tot het wegennet en verhoogt de fysieke plausibiliteit van gereconstrueerde trajecten. Deze aanpak is geschikt voor cellulaire positionering omdat de inherente onnauwkeurigheid van cellulaire metingen goed gecompenseerd wordt door de constraint dat de UE zich op wegen bevindt.

3.3 Viterbi

Viterbi maakt gebruik van een *Hidden Markov Model (HMM)* om de samenhang tussen opeenvolgende positiewaarnemingen te modelleren. Waar klassieke map matching-methoden elke observatie onafhankelijk behandelen, integreert de Viterbi-aanpak zowel ruimtelijke als temporele informatie, wat leidt tot robuustere trajectreconstructies bij ruisige en discrete data.

In een HMM-systeem worden de volgende componenten gedefinieerd:

- *Hidden states*: Wegsegmenten in het netwerk waarop de gebruiker (UE) zich kan bevinden.
- Observaties: Ruisige positiewaarnemingen, bijvoorbeeld afgeleid uit cellulaire metingen.
- Emissieprobabiliteit: De waarschijnlijkheid dat een bepaalde positiewaarneming wordt geobserveerd onder de aanname dat de gebruiker zich op een gegeven wegsegment bevindt.
- Transitieprobabiliteit: De waarschijnlijkheid van overgang tussen twee wegsegmenten, gebaseerd op wegtopologie, toegestane richtingen en verwachte reistijd of afstand.

Het Viterbi-algoritme bepaalt vervolgens via dynamische programmering de meest waarschijnlijke sequentie van verborgen toestanden (wegsegmenten) gegeven de volledige observatiereeks. Hierdoor wordt niet enkel de lokale beste match gekozen, maar een globaal optimaal traject dat consistent is met zowel het wegennet als het bewegingsgedrag van de gebruiker.

Dit maakt deze aanpak geschikt voor cellulaire positionering, waar de positioneringsfouten aanzienlijk groter zijn dan bij GPS en de samplerate vaak laag is. Door de temporele afhankelijkheden te benutten, kan Viterbi onwaarschijnlijke sprongen tussen niet-aangrenzende wegsegmenten onderdrukken en trajecten reconstrueren die fysisch en topologisch waarschijnlijker zijn.

Empirische studies rapporteren een hoge nauwkeurigheid voor HMM-gebaseerde map matching, met meer dan 95% correcte segmentmatching zelfs bij lage samplefrequenties (ongeveer 1 Hz). De werken van Newson en Krumm [8] en Lou et al. [17] vormen de basis van hedendaagse Viterbi-implementaties.

3.4 State of the art

Recente literatuur toont significante vooruitgang in cellulaire positionering, voornamelijk gedreven door de introductie van 5G NR met hogere bandbreedtes en verbeterde signaalverwerkingstechnieken.

5G Veldproeven Tedeschini et al. [16] publiceerden in *Nature Scientific Reports* een haalbaarheidsstudie in het Vodafone 5G-netwerk in Milaan (n78 band, 3.68 GHz) met ToA-metingen. Zonder klokcompensatie behaalden zij 111 m RMSE; met *Extended Kalman Filter (EKF)*-compensatie van klokoffset en -skew verbeterde dit naar 8.2 m RMSE in stedelijke omgeving. De studie identificeert kloksynchronisatie als de dominante foutbron in 5G Release 15 implementaties, wat typisch is voor ToA-gebaseerde methoden.

Joint Positioning and Synchronization Koivisto et al. [18, 19] ontwikkelden een EKF/UKF framework voor gelijktijdige positie- en klokschatting in 5G ultra-dense networks, gepubliceerd in *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Hun aanpak modelleert klokoffset als state variable, wat de afhankelijkheid van perfecte netwerksynchronisatie vermindert.

LTE Geolocatie Shakir et al. [20] presenteerden op IEEE WAMICON een algoritme dat TA combineert met RSRP-metingen. In een *drive test* behaalden zij een gemiddelde RMSE van 70–191 meter, afhankelijk van het aantal beschikbare cellen.

Map Matching Newson & Krumm [8] en Lou et al. [17] legden de basis voor HMM-gebaseerde map-matching in ACM SIGSPATIAL. Deze technieken zijn bijzonder relevant voor cellulaire positionering, waar de grotere meetonzekerheid (vergeleken met GPS) gecompenseerd kan worden door temporele consistentie en wegnettbeperkingen. Recente studies rapporteren >95% correcte segmentmatching zelfs bij lage samplerates.

3.4.1 Nauwkeurigheid in praktijk

Tabel 3.2 vat de gerapporteerde nauwkeurigheden samen.

Methode	Nauwkeurigheid	Bron
Cell-ID	Celradius (100–1000 m)	del Peral-Rosado [2]
E-CID + TA	50–150 m	3GPP TS 36.305 (Release 9) [15]
TA + RSRP	70–191 m RMSE	Shakir et al. [20]
OTDOA	50–200 m	del Peral-Rosado [2]
TA + Map-matching	50–100 m	Trogh et al. [5]
5G + Klokcompensatie	8–11 m RMSE	Tedeschini et al. [16]

Table 3.2: Overzicht positioneringsnauwkeurigheid per methode.

3.5 Theoretische analyse en simulatie-evaluatie

3.5.1 Private vs. publieke netwerken

Waar *Release-16*-positioneringsfuncties (zoals multi-RTT, AoA en PRS) wel zijn uitgerold, betreft het vrijwel uitsluitend private 5G-netwerken voor industriële toepassingen. Voorbeelden hiervan zijn autonome logistiek in autofabrieken, *Automated Guided Vehicle (AGV)-tracking* in o.a. warenhuizen en havenautomatisering. In publieke consumentennetwerken bieden operatoren deze functies (anno 2025) niet aan eindgebruikers aan. De voornaamste redenen hiervoor zijn: (i) hoge infrastructuur- en implementatiekosten voor nauwkeurige locatiebepaling, (ii) strenge synchronisatie-eisen tussen base stations (bv. voor TDoA), en (iii) het ontbreken van een duidelijk consumentenbusinessmodel voor cm-nauwkeurige lokalisatie.

3.5.2 Onderzoek vs. realiteit

Een daaropvolgend belangrijk inzicht uit de literatuur is dat de geavanceerde methoden uit Release 16 en verder voornamelijk geëvalueerd worden in simulatie- of gecontroleerde testomgevingen.

Dit komt doordat de benodigde infrastructuur (zoals *massive MIMO-arrays* voor nauwkeurige AoA of gesynchroniseerde base stations voor precieze TDoA) in veel commerciële netwerken nog niet volledig beschikbaar of toegankelijk is voor eindgebruikers. Simulatieomgevingen zoals MATLAB 5G Toolbox [21] of NS-3 [22] laten onderzoekers toe om:

- De theoretische ondergrens (Cramér-Rao Lower Bound) te bepalen onder ideale omstandigheden.
- Het effect van specifieke kanaalimperfecties (multipath, NLoS) geïsoleerd te bestuderen.
- Complexe netwerktopologieën te testen zonder de kosten van een fysieke testomgeving.

Ondanks deze kloof tussen simulatie en commerciële realiteit blijft theoretisch en simulatiegedreven onderzoek essentieel als richtinggevend kader voor innovatie. Simulatiestudies maken het mogelijk om nieuwe meetmethoden en algoritmen onder expliciete aannames reproduceerbaar te evalueren, nog voor grootschalige uitrol in publieke netwerken. Hoewel deze resultaten zich niet één-op-één vertalen naar reële omstandigheden, geven ze wel inzicht in de foutgrenzen, gevoeligheid voor NLoS/multipath en

randvoorwaarden zoals netwerksynchronisatie [23]. Wanneer de vereiste netwerkfunctionaliteit in commerciële netwerken breder beschikbaar en toegankelijk wordt, kunnen dergelijke inzichten worden vertaald naar concrete ontwerpkeuzes en een stapsgewijze verbetering van de positioneringsnauwkeurigheid.

3.6 Nauwkeurigheidsvereisten

Nu duidelijk is wat technisch haalbaar is, is het interessant om te gaan kijken naar de nauwkeurigheidsvereisten. Deze moeten voortkomen uit de probleemstelling en niet louter de technische haalbaarheid. De doelstelling van dit onderzoek richt zich op noodsituaties, vermissingen en scenario's waarin GNSS onbeschikbaar of onbetrouwbaar is. Cherian en Rudrapatna [24] identificeren verschillende relevante gebruiksscenario's voor cellulaire lokalisatie, waaronder noodoproepen (E911/E112), ondersteuning van wetshandhaving, het lokaliseren van vermiste personen of eigendommen, en vlootbeheer. Aangezien deze gebruiksscenario's vaak geen duidelijke nauwkeurigheidseisen hebben, kan de vereiste positioneringsnauwkeurigheid afgeleid worden van de bestaande operationele noden van hulpdiensten.

3.6.1 Wettelijke vereisten: E911 en E112

Zowel de Verenigde Staten (E911) als de Europese Unie (E112) hebben wettelijke nauwkeurigheidseisen vastgelegd voor noodoproepen via mobiele netwerken.

Regelgeving	Horizontale nauwkeurigheid	Verticale nauwkeurigheid
FCC E911 (VS)	≤ 50 m voor 80% van oproepen	≤ 3 m (verdiepingsniveau)
EU E112	≤ 50 m (stedelijk), ≤ 100 m (ruraal)	Niet verplicht

Table 3.3: Wettelijke nauwkeurigheidsvereisten voor noodoproepen. Bronnen: FCC Fourth Report and Order [3], EU Regulation 2019/320 [4].

Deze eisen zijn geformuleerd met de beschikbaarheid van GNSS in gedachten. Voor scenario's waarin enkel cellulaire data beschikbaar is, zijn deze doelstellingen minder accuraat. Daarom worden nog verdere beschikbare bronnen onderzocht.

3.6.2 Operationele vereisten van hulpdiensten

Uit onderzoek naar de operationele noden van verschillende hulpdiensten [25] blijken de volgende richtlijnen:

- **Vermiste personen:** Voor het lokaliseren van vermiste personen, reduceert elke verbetering in nauwkeurigheid de zoektijd significant. De *Probability of Detection* stijgt wanneer de zoekzone kleiner wordt. Een nauwkeurigheid van een ~ 100 m is wenselijk [25, 24].
- **Vlootbeheer en logistiek:** Voor commerciële toepassingen zoals het volgen van voertuigen en goederen is een nauwkeurigheid van < 500 m voldoende, met update-intervallen van enkele tientallen seconden [24].
- **SAR (Search and Rescue):** Standaard zoekprotocollen gaan uit van een initiële zoekzone van 1–2 km rondom de laatst bekende positie. Een cellulaire schatting binnen deze marge is operationeel nuttig [25].

3.6.3 Referentieresultaten

Als referentie voor wat haalbaar is met cellulaire lokalisatie in een Belgische context, worden de resultaten van Trogh et al. [5] aangehaald. Deze studie gebruikte 3G-metingen (*propagation delay*, RSCP) in combinatie met een AMT-algoritme (*Antenna, Map, Timing*). De experimenten werden uitgevoerd in Gent en omgeving, vergelijkbaar met dit onderzoek.

Scenario	Mediaan	P95	Netwerk
Stedelijk, te voet	112 m	296 m	3G
Stedelijk, fiets	119 m	367 m	3G
Stedelijk, auto	200 m	467 m	3G
Ruraal, te voet	275 m	821 m	3G
Snelweg (80 km/h)	344 m	1176 m	3G

Table 3.4: Positioneringsresultaten uit Trogh et al. [5] met het AMT-algoritme op een 3G-netwerk in België.

3.7 Conclusie

Op basis van de wettelijke vereisten (E911/E112), operationele noden van hulpdiensten, en de technische haalbaarheid zoals blijkt uit de literatuur kunnen de volgende doelstellingen worden geformuleerd voor cellulaire positionering zonder GNSS.

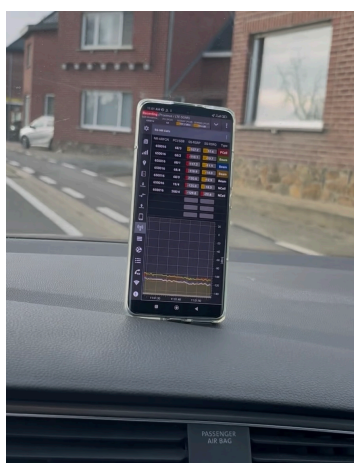
De doelstellingen zijn geformuleerd als P75-waarden (75e percentiel), wat betekent dat 75% van de positieschattingen binnen de gestelde nauwkeurigheid moet vallen. Dit is strenger dan de wettelijke E911-eis van 67%, maar realistischer voor operationele toepassingen.

Omgeving	P75	Motivatie
Stedelijk	< 150 m	Voldoet aan E112 stedelijke eis (50 m) met marge; gebouwidentificatie mogelijk.
Semi-ruraal	< 300 m	Beperkt zoekzone tot enkele straten; ondersteunt vermiste personen scenario's.
Ruraal/snelweg	< 500 m	Voldoet aan E112 rurale eis (100 m) met marge; voldoet aan SAR-protocollen (1–2 km zoekzone); ondersteunt vlootbeheer (<500 m vereist)

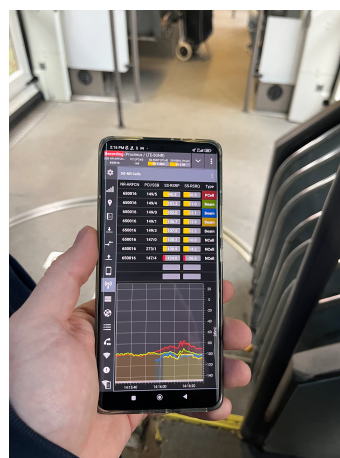
Table 3.5: Nauwkeurigheidsdoelstellingen (P75) afgeleid uit wettelijke en operationele vereisten.

4.1 Dataverzameling

De meetcampagnes werden uitgevoerd met QualiPoc [9] op een Xiaomi 12 Pro (Android 12) met gebruik van het Proximus-netwerk in Gent, Merelbeke, Zwijnaarde en Ronse. Deze logs werden nadien verwerkt in R&S ROMES4 [26] en Python [27]. Tijdens de metingen werd actief dataverkeer gegenereerd via een downloadtaak om de kans op 4G/5G-activiteit te verhogen. Deze taak bestaat uit het downloaden van een bestand van ongeveer 1 GB via FTP, die telkens herhaald wordt wanneer de download voltooid is. Tijdens de voetgangersmetingen werd het toestel in de hand gehouden op een afstand van ongeveer 30 cm van het lichaam. Voor de fietsmetingen werd gebruikgemaakt van een telefoonhouder op het stuur, waarbij het toestel plat lag en er zich geen metalen objecten in de directe nabijheid bevonden. Bij de metingen in de auto werd de smartphone aan de voorruit geplaatst, zoals te zien in de onderstaande afbeelding.



(a) Meetopstelling in wagen



(b) Meetopstelling in tram

Figure 4.1: Meetopstellingen tijdens de datacollectie.

4.1.1 Datalogging

De meetlogs bevatten zowel LTE- als 5G-NR data en een GPS-positie als controle. GPS beschikt standaard over een afwijking van ongeveer 3–5 meter onder optimale omstandigheden [28], maar dit is verwaarloosbaar in vergelijking met de verwachte positioneringsfouten van cellulaire lokalisatie.

Het exact moment van een bepaalde datapunt wordt rechtstreeks overgenomen uit de QualiPoc timestamps in de logbestanden. De loggingfrequentie is niet strikt constant, maar ligt typisch rond 17–20 metingen per seconde. Verschillende parameters kunnen verschillende loggingfrequenties hebben. Zo wordt de *Timing Advance* parameter gemiddeld 2 keer per seconde gelogd, terwijl de signaalsterkteparameters een gemiddelde loggingfrequentie van 20 hebben.

4.1.2 Software

De meetlogs worden door QualiPoc vastgelegd en vervolgens ingeladen in R&S ROMES4. In ROMES4 kunnen de verschillende meetparameters als tijdreeksen worden geïnspecteerd, waarna een selectie van relevante parameters wordt geëxporteerd naar een `.asc`-bestand. Dit `.asc`-bestand bestaat uit twee delen: (i) een tekstgedeelte met meetinformatie en een beschrijving van de geselecteerde parameters, en (ii) een datagedeelte in (puntkomma-gescheiden) tabelvorm met de tijdreeksen.

Voor verdere verwerking worden de `.asc`-bestanden omgezet naar een uniform CSV-formaat met een Python parser (`input_data/parse_qualipoc.py`). Per traject worden daarbij de volgende bestanden aangemaakt:

- `metadata.txt` met meetinformatie (starttijd, duur, toestelconfiguratie)
- `data.csv` met de tijdreeksen.

Voor verdere verwerking wordt deze data geïmporteerd in een SQL-database, waarin de meetdata per traject wordt georganiseerd en de parameters worden onderverdeeld naar categorie: GPS-posities, LTE- en NR-cell metingen (PCell/SCell), buurcelmetingen en basisstationlocaties. Het databaseschema is terug te vinden in de appendix. Vervolgens wordt er via een SPARQL-query ook data uit de Vlaamse zendantennedatabank [29] opgehaald, waaronder de fysieke locaties (latitude, longitude), antenne-eigenschappen (azimuth, openingshoek), en transmissieparameters (vermogen, winst, hoogte).

4.1.3 Trajecten

De dataset bevat metingen in Gent, Merelbeke, Zwijnaarde en Ronse, inclusief twee herhaalde tramtrajecten, en herhaalde metingen in Merelbeke (te voet en met de wagen):

- Gent tram: twee ritten op dezelfde dag (17/12/2025), uitgevoerd op hetzelfde traject maar in tegengestelde rijrichting.
- Merelbeke (auto en te voet): twee metingen op verschillende dagen (22/10/2025 en 30/10/2025) op hetzelfde traject.

4.2 Data-inspectie

De dataset omvat 15 metingen met in totaal circa 320.000 samples. De volgende observaties worden gemaakt op basis van een initiële data-analyse.

4.2.1 Beschikbare en relevante parameters

De QualiPoc-meetlogs bevatten een groot aantal parameters, waarvan er veel niet relevant of onvoldoende beschikbaar zijn voor lokalisatiedoeleinden. De selectie van bruikbare parameters is gebaseerd op twee criteria: (i) relevantie volgens de 3GPP-standaard en literatuur voor positionering, en (ii) voldoende beschikbaarheid in de meetdata. Dit laatste wordt nagegaan door de parameters te visualiseren met behulp van de *2D Chart View* in ROMES4.

Daaruit volgen de volgende parameters:

- **LTE 4G:** RSRP, RSRQ, SINR, RSSI, PCI, eNodeB ID, en buurcelmetingen (NC-RSRP, NC-RSRQ, NC-RSSI).
- **NR 5G:** SS-RSRP, SS-RSRQ, SS-SINR, Timing Advance, PUSCH Pathloss.

Bevindingen:

- *Timing Advance* is enkel beschikbaar voor de 5G NR *serving cell*, niet voor de LTE *serving cell* of buurcellen. Dit is inherent aan de EN-DC architectuur waarbij de UE afzonderlijke TA-waarden onderhoudt per *Timing Advance Group (TAG)*. In de NSA-configuratie van Proximus rapporteert QualiPoc enkel de NR TA, vermoedelijk omdat de 5G-cel het actieve datapad (*user plane*) draagt terwijl de LTE-cel primair functioneert als *control plane* anker.
- In dit onderzoek wordt Timing advance type 2 gebruikt, aangezien de TA-metingen afkomstig zijn van de 5G NR *serving cell*. QualiPoc rapporteert de TA direct in nanoseconden.
- De dataset bevat eNodeB ID (4G), maar geen gNodeB ID (5G).
- De PCI van de 5G-cel is in Gent en Merelbeke zo goed als altijd gelijk aan de PCI van de respectievelijke 4G-cel. In Zwijnaarde en Ronse is dit niet het geval.
- De dataset bevat geen informatie over de fysieke positie van de basisstations.
- *PUSCH Pathloss* is geen onafhankelijke meting, maar wordt door de UE berekend als $PL = \text{referenceSignalPower} - \text{SS-RSRP}$ [13]. De *referenceSignalPower* is een netwerk-geconfigureerde parameter die niet in de meetdata beschikbaar is. Aangezien SS-RSRP al bekend is, biedt *PUSCH Pathloss* geen extra lokalisatie-informatie.

4.2.2 Dekking per datatype

De dekkingspercentages zijn berekend per unieke timestamp (niet per sample, aangezien één timestamp meerdere parameterrijen kan bevatten). Tabel 4.1 toont de beschikbaarheid van de belangrijkste parameters per route.

Locatie	Type	n	GPS (%)	LTE RSRP (%)	NR SS-RSRP (%)	NR TA (%)
Gent	tram	981	100	100	100	100
Gent	tram	899	99	100	99	99
Gent	auto	624	100	100	96	96
Gent	voet	1714	100	100	100	100
Gent	voet	1027	100	100	62	62
Gent	fiets	850	100	100	100	100
Gent	auto (E17/E40)	461	100	100	99	99
Merelbeke	voet	1603	100	100	100	100
Merelbeke	auto	1179	100	100	99	99
Merelbeke	voet	3175	100	100	89	72
Merelbeke	auto (N60)	1087	100	100	84	84
Zwijnaarde	voet	1065	100	100	100	100
Zwijnaarde	fiets	856	100	100	100	100
Zwijnaarde	fiets	773	100	100	80	80
Ronse	auto	1073	100	100	97	97

Table 4.1: Parameterdekking per traject

GPS en LTE (RSRP) zijn in vrijwel alle timestamps beschikbaar (99–100%). De 5G NR-dekking varieert van 80% (Gent-Zwijnaarde fiets) tot 100%, met lagere waarden op snelwegroutes (N60: 84%). De TA volgt doorgaans de NR-dekking, want enkel de 5G-specifieke TA is beschikbaar. Een uitzondering hierop is de route Merelbeke voetganger waar TA slechts 72% bedraagt bij een NR-dekking van 89%.

Dit verschil wordt veroorzaakt door herhaalde FTP download timeouts aan het begin van de meting (Figuur 4.2). De FTP-taak, die continu actief dataverkeer moet genereren om 5G-activiteit te stimuleren, faalt gedurende de eerste minuten van de meting. Pas na deze periode slaagt de download en wordt de 5G-verbinding volledig geactiveerd, waarna TA-metingen beschikbaar komen. Hoewel vergelijkbare timeouts sporadisch voorkomen in andere metingen, is dit het langste aaneengesloten interval zonder actief dataverkeer in de dataset.

```

14:29:29.003 FTP DL started
14:29:29.003 QualiPoc Test Name: FTP DL
14:29:29.018 Used Access Point: internet.proximus.be
14:29:29.280 Local IP Address: 157.193.135.34
14:29:29.280 Host IP Address: 100.72.113.108
14:30:59.030 Test timeout
14:30:59.038 QualiPoc FTP DL failed
14:30:59.042 QualiPoc session 1-1 failed!
14:30:59.151 QualiPoc session 1-2 started!
14:30:59.152 FTP DL started
14:30:59.152 QualiPoc Test Name: FTP DL
14:30:59.163 Used Access Point: internet.proximus.be
14:30:59.291 Local IP Address: 157.193.135.34
14:30:59.291 Host IP Address: 100.72.113.108
14:32:29.169 Test timeout
14:32:29.172 QualiPoc FTP DL failed
14:32:29.179 QualiPoc session 1-2 failed!
14:32:29.284 QualiPoc session 1-3 started!
14:32:29.284 FTP DL started
14:32:29.284 QualiPoc Test Name: FTP DL

```

Figure 4.2: QualiPoc logbestand toont herhaalde FTP download timeouts gedurende 311 seconden aan het begin van de Merelbeke voetganger meting.

4.2.3 Loggingsfrequentie en gaps

De loggingsfrequentie varieert van 15 tot 24 samples per seconde. De hoogste waarden worden gemeten in rurale omgevingen met autoverkeer (Ronse: 24/sec, N60: 19/sec), terwijl stadscentra lagere rates vertonen (Gent centrum: 15/sec). Maximale gaps tussen opeenvolgende samples bedragen 3–5 seconden; er zijn geen significante datapauzes (>5s) gedetecteerd. Voor TA-metingen komen sporadisch langere gaps voor: 5 van de 15 metingen bevatten gaps langer dan 10 seconden, met een maximum van 311 seconden. Deze gaps zijn te wijten aan FTP download timeouts, waarbij de 5G-verbinding tijdelijk inactief is.

4.2.4 Signaalkarakteristieken en celdensiteit

De signaalsterkte (RSRP) varieert typisch tussen -90 en -95 dBm voor zowel LTE als NR, terwijl de TA uiteenloopt van 0 tot ≈ 64.000 ns.

LTE-metingen werden voornamelijk uitgevoerd op Band 3 (1800 MHz, 70%) en Band 7 (2600 MHz, 28%). Voor NR domineert Band n78 (3500 MHz, 68%), gevolgd door n1 (2100 MHz, 29%). De celdensiteit verschilt sterk per omgeving: in stedelijk gebied (Gent) werden gemiddeld 15–17 unieke PCI's waargenomen per traject, tegenover slechts 5–6 in ruraal gebied (Merelbeke). Het gemiddeld aantal LTE-buurcellen per sample bedraagt 2, met uitschieters tot 12 op de N60 snelweg.

4.3 Methode

4.3.1 Afstandsschatting

Om de afstand tussen de *User Equipment* (UE) en het basisstation te schatten, zijn binnen de beschikbare dataset twee primaire metrieken beschikbaar: de signaalsterkte (gebaseerd op het *path loss* model) en de *Timing Advance*. Aangezien signaalsterktedata (RSRP) in veel grotere volumes beschikbaar is dan TA-samples, wordt eerst de bruikbaarheid hiervan onderzocht.

Evaluatie signaalsterktemetrieken

De relatie tussen signaalsterkte en afstand wordt typisch gemodelleerd via het *one-slope path loss* model [30]:

$$PL = PL_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

waarbij PL het totale signaalverlies is (dB), PL_0 het verlies op referentieafstand d_0 (typisch 1–10 m), n de path loss exponent (2 voor free space, 3–4 voor stedelijke omgeving), en X_σ een log-normale shadowing factor.

De RSRP-afstand relatie wordt geanalyseerd per cel, aangezien de signaalsterkte sterk afhankelijk is van de lokale omgeving rond elk basisstation. Factoren zoals gebouwhoogte, vegetatie, terreinprofiel en de aanwezigheid van obstakels bepalen in grote mate het propagatieprofiel. Bovendien varieert de propagatie ook per richting (azimuth) door de directionele antenne-patronen en lokale obstakels. Elke cel heeft daardoor een uniek path loss-model. Dit betekent dat er genoeg data verzameld moet worden vooraleer een schatting van de pathloss te kunnen maken voor die cel, wat niet ideaal is voor real-time toepassingen.

Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de Vlaamse zendantennedatabase van Departement Omgeving [29], waaruit de transmissieparameters (vermogen en winst) werden opgehaald zoals beschreven in sectie 4.1. Er wordt een path loss-analyse uitgevoerd waarbij rekening wordt gehouden met het effectief uitgestraald vermogen (EIRP) en de frequentieband van elke cel. EIRP combineert het zendvermogen P_{TX} met de antenneversterking G_{TX} :

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [\text{dBm}]$$

Het werkelijke path loss kan dan worden berekend als $PL = EIRP - RSRP - G_{RX}$, waarbij de ontvangstantenne gain G_{RX} als constant wordt beschouwd (≈ 0 dBi voor omnidirectionele smartphone antennes). De frequentieband speelt een rol doordat metingen worden gematcht aan de correcte antenneparameters (vermogen en winst) voor die specifieke band (LTE Band 3/7, NR Band n78/n1), waardoor de EIRP-correctie frequentie-specifiek is. Deze correctie is noodzakelijk omdat verschillende cellen met verschillende vermogens en antennes uitzenden; zonder EIRP-correctie zou een cel met hoger zendvermogen ten onrechte als dichtbij worden ingeschat.

Figuur 4.3 toont de RSRP versus afstand per cel voor beide regio's. Figuur 4.4 toont het berekende path loss na EIRP-correctie. Er wordt gefilterd op de 9 cellen met de meeste punten.

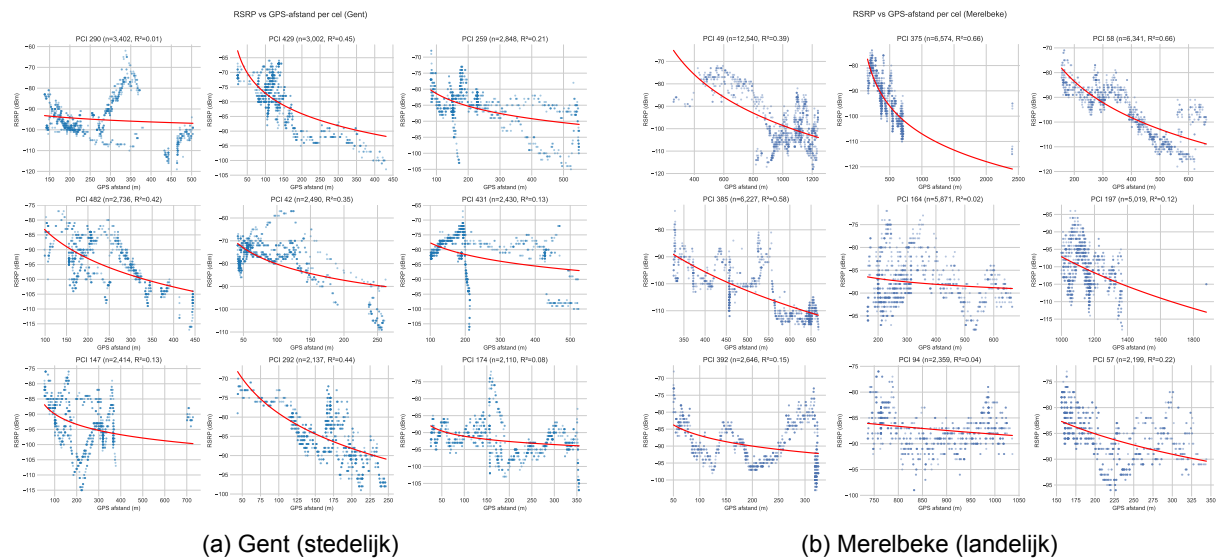


Figure 4.3: RSRP versus GPS-afstand per cel voor een stedelijke en landelijke omgeving. Rode lijn geeft de trendlijn weer.

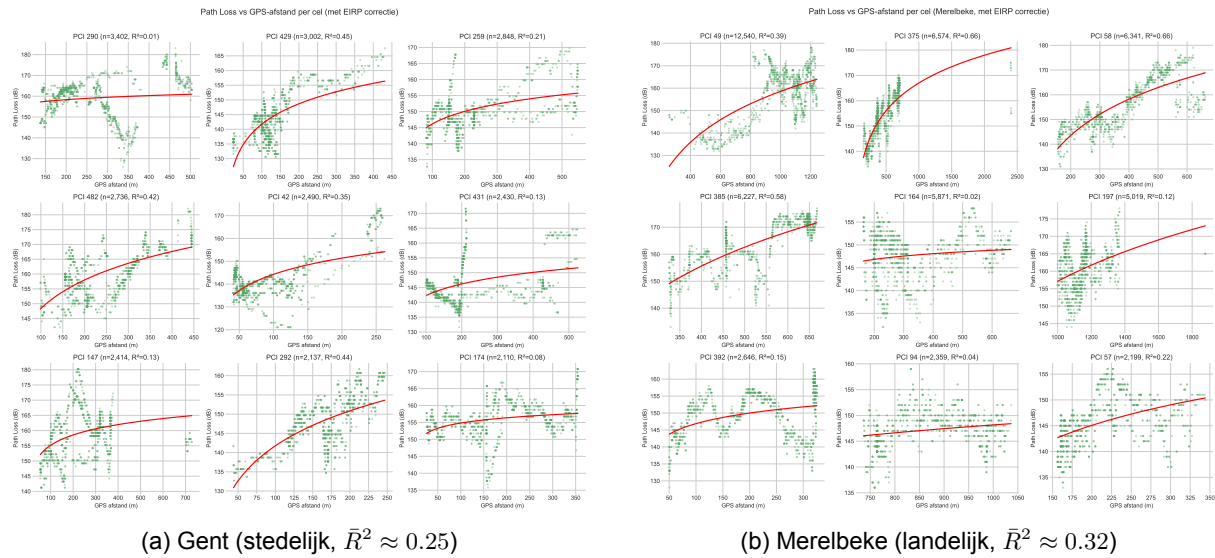


Figure 4.4: Path loss versus GPS-afstand per cel na correctie voor EIRP. Rode lijn geeft de trendlijn weer.

Hoewel de EIRP-correctie theoretisch een nauwkeuriger model oplevert, toont de data aan dat de correlatie tussen signaalsterkte en afstand laag blijft. Tabel 4.2 toont de statistieken van deze analyse. De gemiddelde R^2 -waarden van respectievelijk 0.29 (Gent) en 0.37 (Merelbeke) bevestigen de zwakke correlatie. De grote spreiding wordt vermoedelijk veroorzaakt door dominante factoren zoals multipath fading, shadowing en NLoS. Dit wordt deels bevestigd door het verschil tussen stedelijke en landelijke data.

Regio	Omgeving	n	Cellen	$\bar{d}$ (m)	RSRP (dBm)	$\bar{R}^2$
Gent	stedelijk	54.075	54	217 ± 128	-89.4 ± 9.9	0.294
Merelbeke	landelijk	53.465	13	619 ± 365	-94.4 ± 10.4	0.374

Table 4.2: Statistieken van de RSRP-afstand correlatie per regio.

Hieruit blijkt dat RSRP, zelfs met EIRP-correcties, onvoldoende betrouwbaar is voor de gewenste nauwkeurigheid van 50–150 meter: de lage R^2 -waarden (0.29–0.37) en grote standaarddeviaties (± 128 – 365 m) overtreffen ruimschoots de doelstellingen. Uit het *path loss* model volgt dat een verschil van 10 dB in RSRP overeenkomt met een afstandsverhouding van $10^{1/n}$. Met $n = 3$ betekent 10 dB dus ruwweg een verdubbeling van de afstand. Daarom wordt de timing advance parameter als alternatief onderzocht.

Evaluatie timing advance

De *Timing Advance* (TA) is een metriek die de *round-trip* tijd van het signaal meet tussen de UE en het basisstation. Deze kan direct worden omgerekend naar een afstandsschatting:

$$d_{TA} = \frac{(TA_{ns}) \cdot c}{2}$$

waarbij $c = 3 \cdot 10^8$ m/s de lichtsnelheid is.

In tegenstelling tot RSRP is de TA-afstandsrelatie minder afhankelijk van de specifieke cel of omgeving. De TA meet de propagatietijd van het signaal, die rechtstreeks afhangt van de fysieke afstand en de lichtsnelheid. *Multipath* en reflecties kunnen weliswaar een kleine vertragingfout introduceren [31, 32], maar deze effecten zijn significant kleiner dan de amplitude-fluctuaties die RSRP beïnvloeden.

Dit wordt empirisch bevestigd door het verschil in R^2 bij het combineren van data over alle cellen. De gecombineerde R^2 wordt berekend door alle data van verschillende cellen te aggregeren en één globaal model te fitten, als vergelijkingsmaatstaf om de consistentie van de metriek te evalueren. Voor RSRP

daalt de gecombineerde R^2 (0.28) ten opzichte van het per-cel gemiddelde (0.31), wat aantoont dat elke cel een uniek propagatiemodel vereist en aggregatie niet zinvol is. Voor TA stijgt de gecombineerde R^2 daarentegen van 0.51 (per-cel gemiddelde) naar 0.92 (gecombineerd).

Figuur 4.5 toont de TA-geschatte afstand versus de GPS-gemeten afstand. De gecombineerde data van alle trajecten in Gent en Merelbeke toont een sterk lineair verband met een $R^2 = 0.92$, wat de robuustheid van de TA-metrick bevestigt.

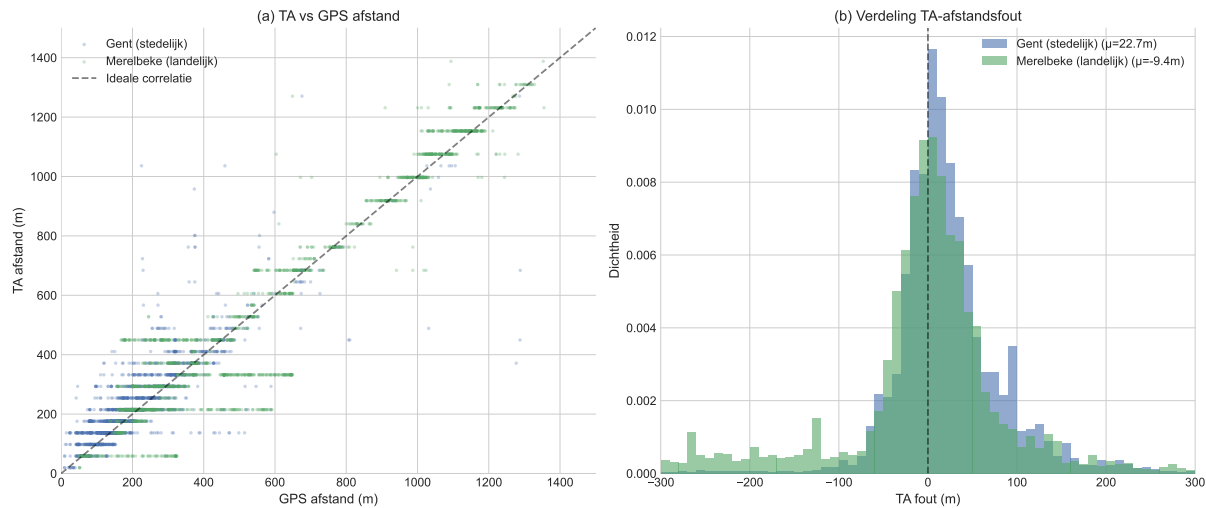


Figure 4.5: Links: TA-geschatte afstand versus GPS-afstand voor alle trajecten. Rechts: verdeling van de TA-afstandsfout per regio.

Tabel 4.3 toont de statistieken van de TA-afstandscorrelatie. Gecombineerd over alle trajecten bedraagt de $R^2 = 0.92$. De gemiddelde fout $\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum (d_{TA} - d_{GPS})$ is slechts +7.6 m met een standaarddeviatie van 132 m, waarbij d_{TA} de TA-geschatte afstand is en d_{GPS} de GPS-gemeten afstand.

Regio	Omgeving	TA-samples	R^2	$\bar{\epsilon}$ (m)
Gent	stedelijk	14367	0.742	$+22.7 \pm 79.2$
Merelbeke	landelijk	12677	0.917	-9.4 ± 171.4
Totaal	–	27044	0.921	$+7.6 \pm 131.7$

Table 4.3: Statistieken van de TA-afstand correlatie.

De hogere correlatie van TA met de afstand ten opzichte van RSRP bevestigt dat de tijdsgebonden afstandsschatting robuuster is tegen omgevingsfactoren zoals multipath en shadowing. De TA wordt daarom als primaire afstandsmetrick gebruikt in het positioneringsalgoritme.

4.3.2 Fysieke basisstationlocaties

Nauwkeurige positionering vereist kennis van de exacte fysieke locaties van basisstations en hun bijbehorende cel-identificaties (PCI's). Aangezien deze informatie niet publiek beschikbaar is, werd een hybride aanpak gehanteerd om PCI's te mappen aan hun fysieke locatie.

Voor de regio Gent werden initieel terreinmetingen uitgevoerd rondom bekende basisstationlocaties. Uit empirische observaties blijkt dat basisstations met meerdere fysieke sectoren (zoals geregistreerd in de Zedantennedatabank van Vlaanderen) vaak domineren als *serving cells*. Dit is te wijten aan hun gunstige locatie en hoogte, waardoor meerdere operatoren dezelfde infrastructuur delen en er zich bijgevolg meerdere fysieke cellen op één basisstation bevinden.

De koppeling tussen PCI en fysieke sector werd vastgesteld door de verandering in verbonden PCI te observeren als functie van de azimuth ten opzichte van de mast. In de praktijk vertaalt dit zich naar een meetcampagne rondom een basisstation. Bij LTE-cellen bood het eNodeB-ID een bijkomende validatiemogelijkheid: verschillende PCI's die aan eenzelfde fysieke basisstation hangen, delen eenzelfde

eNodeB-ID. De 5G-cellen in Gent bleken dezelfde fysieke locaties te delen als de LTE-masten, wat de mapping vereenvoudigde, hoewel dit een assumptie blijft die niet in alle gevallen volledig geverifieerd kon worden.

Voor regio's waar hoge variatie op de PCI's langsheen de route zit, werd een semi-automatische methode ontwikkeld gebaseerd op *Timing Advance*. De TA geeft een afstandsschatting van de UE tot de mast; door deze afstandscirkels vanuit meerdere GPS-posities langsheen de route te combineren, wordt de kandidaat-mast geïdentificeerd als het snijpunt van de cirkels.

Ter ondersteuning van dit proces werd een interactieve *PCI mapper tool* ontwikkeld (Figuur 4.6). Deze webgebaseerde applicatie visualiseert het GPS-traject op een kaart, waarbij elk kleurenssegment een unieke PCI representeert. Bij selectie van een cel toont de tool de TA-afstandscirkel vanuit elke GPS-positie. Het kandidaat-basisstation, afkomstig uit de Vlaamse antennedatabank, wordt weergegeven als markering; groen voor reeds gemaakte masten, geel voor ongemapt. De tool berekent automatisch welke mast het vaakst binnen de TA-tolerantie valt en markeert deze als beste kandidaat (rood). De TA-tolerantie bedraagt $2 \times 19,5$ m, wat overeenkomt met de granulariteit van de TA-meting. In de praktijk bleef vaak slechts één kandidaat-basisstation over, die vervolgens manueel werd geverifieerd door middel van een terreinmeting met LoS conditie.

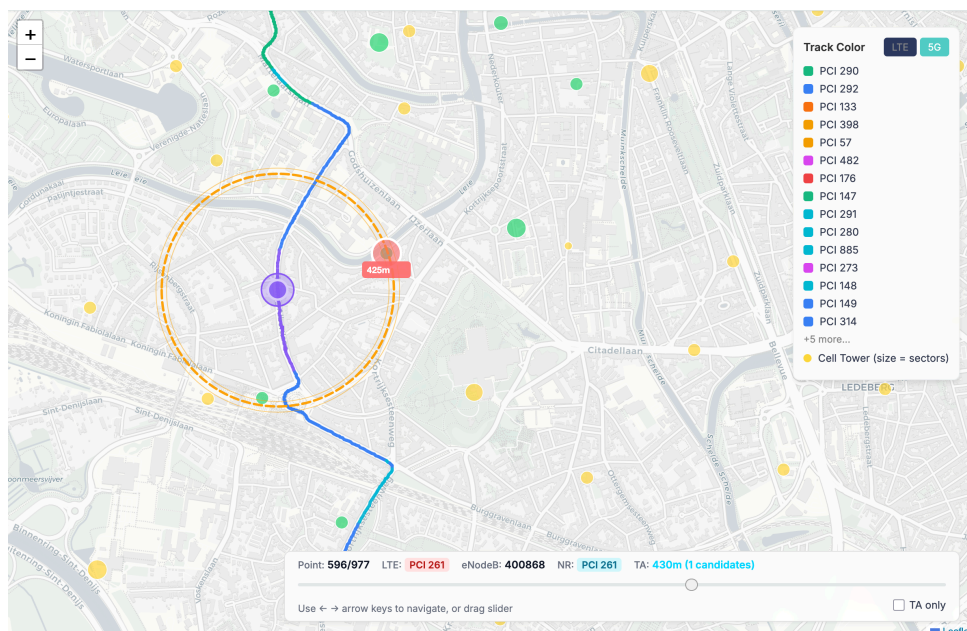


Figure 4.6: Schermafbeelding van de PCI Mapper tool.

Deze combinatie van manuele terreinmetingen en semi-automatische TA-analyse resulteerde in een betrouwbare database van fysieke basisstationlocaties en hun bijbehorende PCI's, die als basis dienen voor het positioneringsalgoritme.

De mappings worden opgeslagen in CSV-bestanden per geografische regio (Gent, Merelbeke, Zwijnaarde, Ronse, N60). Elke rij bevat de PCI's van een fysieke basisstation, het eNodeB-ID, de coördinaten (lat/lon), en de azimuth per sector. De overgrote meerderheid (94%) van de basisstations gebruikt een 3-sector configuratie met azimuth verschillen van 120° , waarbij slechts enkele stations in Gent een 4-sector configuratie (90° azimuth verschillen) gebruiken. Deze structuur maakt het mogelijk om:

- Meerdere PCI's te koppelen aan dezelfde fysieke locatie (sectorisatie)
- De straalrichting en -breedte per PCI vast te leggen voor sectorfiltering. Deze informatie wordt verkregen uit de Vlaamse antenne database.
- Per regio enkel de relevante masten te laden voor efficiëntere verwerking en overlap tussen PCI's uit te sluiten.

Ondervonden problemen Het manuele karakter van de terreinmetingen en PCI-verificatie maakte het proces arbeidsintensief en tijdrovend. Dit introduceerde ook een risico op menselijke fouten bij het handmatig invoeren van mappings of het interpreteren van azimuth-patronen. Een bijkomende complicatie was dat sommige basistations eNodeB-ID's met verschillende prefixen delen (bijvoorbeeld 4003XX en 4503XX voor hetzelfde fysieke basistation), wat verwarring kon veroorzaken bij het valideren van PCI's. Bovendien focust deze methodologie hoofdzakelijk op *serving cells* (PCells), terwijl buurcellen (neighbor cells) slechts beperkt in de mapping worden opgenomen. Over alle trajecten heen werden gemiddeld 2,6 keer zoveel unieke neighbor cells gedetecteerd als serving cells, met een variatie van $1,4\times$ in stedelijk Gent tot $4,6\times$ in landelijk Zwijnaarde. Dit betekent dat aanzienlijke potentieel bruikbare afstands-informatie van nabijgelegen cellen niet volledig wordt benut in het positioneringsalgoritme. Concreet zijn er gemiddeld per tijdsvenster 0,4 tot 0,5 buurcellen zichtbaar. In stedelijke omgevingen is slechts 15% hiervan ongemapt, terwijl op de snelweg en in rurale gebieden dit oploopt tot bijna 50%. Hierdoor gaat beschikbare informatie verloren.

4.4 Data preprocessing

De meetdata ondergaat de volgende preprocessing stappen vooraleer deze aan het positioneringsalgoritme wordt aangeboden.

4.4.1 Timestamp aggregatie

Aangezien meerdere parameters met verschillende frequenties worden gelogd, bevat de dataset meerdere rijen per timestamp. Deze worden geaggregeerd tot één observatie (een tijdsvenster van een halve seconde) volgens de volgende regels:

- *GPS*: Eerste non-null coördinaat (positie bij aanvang van het tijdsvenster).
- *TA en PCI*: Laatste rij met geldige timing advance. De TA wordt gemiddeld tweemaal per timestamp gelogd, hier wordt het tijdsvenster op gebaseerd. Mogelijke gaten in de data blijven leeg.
- *RSRP, RSRQ, SINR*: Rekenkundig gemiddelde van alle metingen binnen hetzelfde tijdsvenster. Gemiddeld 9 metingen per tijdsvenster, met een standaarddeviatie van 1 dB. Voor RSRP wordt het gemiddelde berekend op de dBm-waarden zelf (niet op lineaire vermogenswaarden), wat een kleine overschatting introduceert. Voor RSRQ en SINR (dB, ratio's) is het rekenkundig gemiddelde correct.

4.4.2 Gebied-gebaseerde filtering

Omdat PCI's een beperkt bereik hebben (0–503 voor LTE, 0–1007 voor NR), kunnen dezelfde PCI-waarden voorkomen in verschillende regio's zoals Gent, Merelbeke, Zwijnaarde en Ronse. Aangezien voor 5G geen gNodeB-ID beschikbaar is in de dataset, wordt er uitsluitend op PCI gefilterd, wat tot conflicten kan leiden. Om deze PCI-conflicten te voorkomen, worden cellocaties per meetgebied opgeslagen en wordt per route enkel de relevante regio geraadpleegd. Een bijkomende complicatie doet zich voor in Ronse, waar de 4G- en 5G-PCI's niet met elkaar overeenkomen: dezelfde PCI kan daar verwijzen naar verschillende fysieke basistations voor 4G en 5G. In dergelijke gevallen wordt de betreffende PCI uitgesloten van de mapping.

4.4.3 TA-afstandsberekening

Validatie van TA-nauwkeurigheid

Om de nauwkeurigheid van de TA-afstandsberekening te valideren, wordt de TA-geschatte afstand vergeleken met de werkelijke afstand tussen GPS-positie en bepaalde basistationlocatie. De fout wordt gedefinieerd als $e = d_{TA} - d_{GPS}$, waarbij een positieve fout betekent dat de TA de afstand overschat. Figuur 4.7 toont deze analyse per regio, gefilterd met de IQR-methode [33] om uitschieters te verwijderen en een robuuste schatting van de offset te verkrijgen [34]. De *Interquartile Range (IQR)* definieert

uitschieters als datapunten die buiten het bereik $[Q_1 - 1,5 \times IQR, Q_3 + 1,5 \times IQR]$ vallen, waarbij Q_1 en Q_3 respectievelijk het eerste en derde kwartiel zijn.

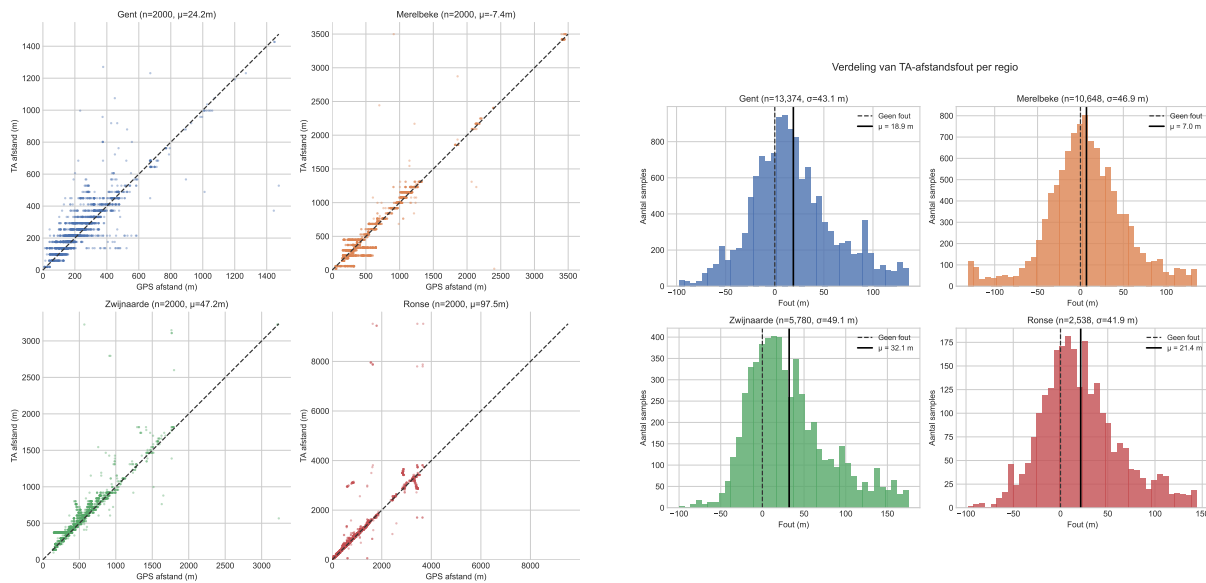


Figure 4.7: Links: scatterplot van TA-geschatte versus GPS-gemeten afstand tot het bepaalde basisstation per regio. Rechts: verdeling van de TA-afstandsfout (IQR gefilterd) met gemiddelde systematische fout μ .

Regio	n	μ (m)	σ (m)
Gent	13.374	+18,9	43,1
Merelbeke	10.648	+7,0	46,9
Zwijnaarde	5.780	+32,1	49,1
Ronse	2.538	+21,4	41,9

Table 4.4: Systematische TA-afstandsfout per regio (IQR gefilterd).

De analyse toont een systematische overschatting van de afstand in alle regio's. Gemiddeld bedraagt de systematische fout circa +20 m, wat overeenkomt met een offset van 130 ns (equivalent aan 19,5 m). Deze empirisch bepaalde offset wordt geïntegreerd in de TA-afstandsformule (verwijzen naar formule in "Evaluatie timing advance") om de systematische bias te compenseren. Hoewel GPS-metingen zelf een nauwkeurigheid van ongeveer 5 meter hebben [28], middelt de GPS-fout zich uit over de grote dataset doordat deze willekeurig in verschillende richtingen optreedt, waardoor de systematische TA-offset betrouwbaar kan worden geschat.

De spreiding (σ) varieert aanzienlijk per regio, met hogere waarden in Zwijnaarde (49,1 m) dan in Gent (43,1 m) of Ronse (41,9 m). Verdere analyse toont twee dominante bronnen van TA-meetfouten:

Effect van afstand tot basisstation De standaarddeviatie van de TA-fout stijgt sterk naarmate de afstand tot de basisstation toeneemt (Tabel 4.5).

Afstand tot mast	Standaarddeviatie σ
0–200 m	48 m
200–400 m	73 m
400–700 m	131 m
>700 m	271 m

Table 4.5: Standaarddeviatie van de TA-fout per afstandsklasse.

In landelijke omgevingen zoals Merelbeke liggen de basisstations verder uit elkaar, waardoor metingen vaker op grotere afstanden plaatsvinden met bijhorend hogere foutspreiding.

Effect van frequentieband Opvallend is dat alle extreme fouten ($|\epsilon| > 150$ m) vaker voorkomen bij metingen op band n78 (3500 MHz). Om te verifiëren dat dit verschil aan de frequentieband ligt en niet aan regionale factoren, wordt de analyse uitgevoerd exclusief Gent (waar enkel n78-metingen beschikbaar zijn). Ook zonder Gent toont band n1 (2100 MHz) een significant lagere foutspreiding ($\sigma = 39$ m, 10% extreme fouten) vergeleken met band n78 ($\sigma = 48$ m, 15% extreme fouten). Dit insinueert dat hogere frequenties gevoeliger zijn voor *multipath*-reflecties en NLOS-condities.

Tabel 4.6 toont de verdeling van TA-metingen over de frequentiebanden per regio.

Regio	n1 (2100 MHz)	n28 (700 MHz)	n78 (3500 MHz)
Gent	119	0	14514
Merelbeke	8932	316	3704
Zwijnaarde	757	0	5749
Ronse	722	663	1479
N60	1273	45	1723
E40/E17 Regio Gent	353	0	1122
% van totaal	29,3%	2,5%	68,2%

Table 4.6: Verdeling van TA-metingen per frequentieband per regio.

Hoewel deze bevindingen waardevolle inzichten bieden over de foutkarakteristieken van TA-metingen, werden ze in het huidige positioneringsalgoritme niet expliciet gemodelleerd. Een mogelijke uitbreiding zou kunnen bestaan uit afstands- of frequentieafhankelijke onzekerheidsmarges, maar dit viel buiten de scope van dit onderzoek.

De TA in nanoseconden kan dus worden omgerekend naar een afstand aan de hand van volgende formule:

$$d_{TA} = \frac{(TA_{ns} - 130) \cdot c}{2}$$

waarbij $c = 3 \cdot 10^8$ m/s de lichtsnelheid is en de factor 130 ns de systematische offset compenseert. De deling door 2 is nodig omdat de TA-waarde in 5G NR (Type 2) de tijdsverschuiving meet die nodig is om de uplink-transmissie te synchroniseren met het downlink-frame, wat effectief de propagatietijd in beide richtingen omvat door de TDD-frame structuur.

4.5 Map en graaf

Het positioneringsalgoritme vereist een discrete representatie van het wegennetwerk waarop mogelijke trajecten kunnen worden berekend (zie sectie 3.2 voor de theoretische achtergrond van map matching en Viterbi-gebaseerde trajectreconstructie). Hiervoor wordt een gerichte graaf opgebouwd op basis van OpenStreetMap (OSM) data [35].

4.5.1 Ophalen en discretiseren

De wegensgrafiek wordt opgebouwd met de OSMnx-bibliotheek. Op basis van de bounding box van de meting wordt een bufferzone van 500 meter toegevoegd omdat uit empirische testen blijkt dat dit ruim alle kandidaten dekt die het algoritme bevat. Hierdoor is het zeker dat er geen beperkingen worden opgelegd door een te kleine regio te voorzien van wegendata. Vervolgens worden alle wegen binnen dit gebied opgehaald. Er wordt voor het type 'all' gekozen om zowel voetganger- als auto- en fietspaden te gebruiken. De graaf wordt vereenvoudigd door opeenvolgende wegsegmenten zonder kruispunten samen te voegen tot een tak.

Deze OSM-graaf met variabele segmentlengtes wordt omgezet naar een uniforme roostergrafiek. Hierbij worden punten met een vaste afstand van 3 meter langs elke weg geïnterpoleerd.

De keuze voor 3 m spacing vloeit voort uit de minimale nauwkeurigheidsvereiste voor kandidaatselectie. Voor het voetgangerstype met een maximale snelheid van 12 m/s en een gemiddelde tijdsvenstergrootte van 0,5 s bedraagt de maximale verplaatsing tussen opeenvolgende tijdsvensters 6 m. Om meerdere kandidaten in elke richting te kunnen selecteren, wordt een spacing van 3 m gehanteerd, wat resulteert in minimaal twee kandidaat-nodes binnen de maximale verplaatsingsafstand.

Voor elk knooppunt in de graaf worden de volgende attributen berekend:

- Coördinaten: latitude en longitude
- Heading: de richting (bearing) van het wegsegment, opgeslagen voor *transition cost*.

Deze discrete representatie wordt opgeslagen als een *NetworkX DiGraph* [36], een datastructuur uit de NetworkX-bibliotheek voor Python die efficiënte graafbewerkingen mogelijk maakt. Een gerichte graaf is noodzakelijk omdat het Viterbi-algoritme de bewegingsrichting moet kunnen modelleren: een overgang van node A naar node B is niet noodzakelijk hetzelfde als van B naar A (bijvoorbeeld bij eenrichtingsverkeer of verschillende kosten voor voor- en achteruitrijden).

De resulterende NetworkX DiGraph bevat typisch 1–2 miljoen *nodes* voor een meetgebied, met edges die de afstand in meters als gewicht dragen. De graaf wordt *gecached* als pickle-bestand om herhaalde OSM-*queries* te vermijden.

Figuur 4.8 toont een vereenvoudigde visualisatie van de wegensgraaf voor de Korenmarkt in Gent, waarbij de *nodes* (donkere punten) en *edges* (verbindingen) duidelijk zichtbaar zijn.

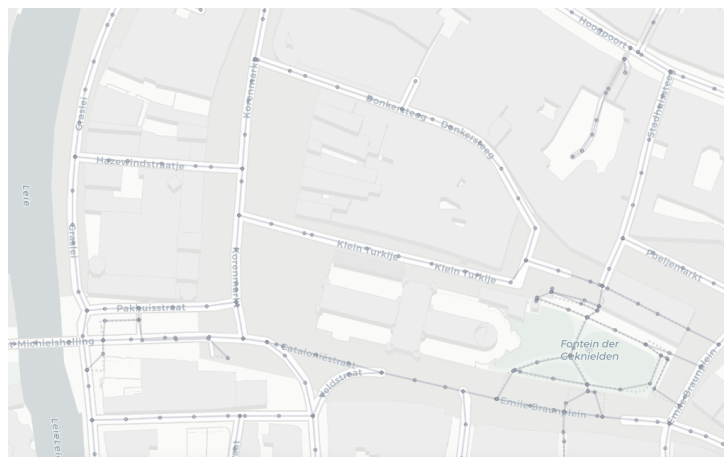


Figure 4.8: Vereenvoudigde visualisatie van de wegingraaf voor de Korenmarkt in Gent.

4.6 Ontwerp positioneringsalgoritme

Het positioneringsalgoritme is gebaseerd op het Viterbi-algoritme, een dynamisch programmeeralgoritme voor het vinden van de meest waarschijnlijke toestandssequentie in een Hidden Markov Model (HMM).

4.6.1 HMM-formulering

Het positioneringsprobleem wordt geformuleerd als een HMM. De gebruiker beweegt langs een onbekend pad op het wegennetwerk, en de cellulaire metingen vormen de enige observeerbare gegevens. Het doel is om de meest waarschijnlijke sequentie van posities te reconstrueren.

HMM-componenten

- Verborgen toestanden (s_t): de werkelijke positie op het wegennetwerk, gerepresenteerd als een node in de gediscretiseerde wegengraaf.
- Observaties (o_t): de cellulaire metingen per tijdstip; de TA, verbonden PCI, en zichtbare buurcellen.
- Emissiekans $P(o_t|s_t)$: de waarschijnlijkheid dat de observatie o_t wordt gemeten wanneer de gebruiker zich op positie s_t bevindt. Een node dicht bij de centroïde (geschatte positie afkomstig uit cellulaire berekeningen, zie Tweefasen-architectuur) heeft een hoge emissiekans.
- Transitiekans $P(s_t|s_{t-1})$: de waarschijnlijkheid van een overgang van s_{t-1} naar s_t , afhankelijk van de afstand via het wegennetwerk en de snelheidsbeperking.

Viterbi-recursie Het Viterbi-algoritme vindt de meest waarschijnlijke padsequentie door dynamisch programmeren:

$$V_t(s) = \max_{s'} [V_{t-1}(s') \cdot P(s|s') \cdot P(o_t|s)]$$

In praktijk wordt gewerkt met kosten (negatieve log-likelihood) in plaats van kansen:

$$C_t(s) = \min_{s'} [C_{t-1}(s') + C_{\text{trans}}(s', s) + C_{\text{emission}}(s)]$$

Figuur 4.9 visualiseert deze recursie als een traliediagram. De totale kost van een pad naar toestand s_t wordt bepaald door twee componenten: de transitiekost C_{trans} tussen opeenvolgende toestanden (weergegeven op de pijlen) en de emissiekost C_{emission} van de toestand zelf (weergegeven bij de nodes).

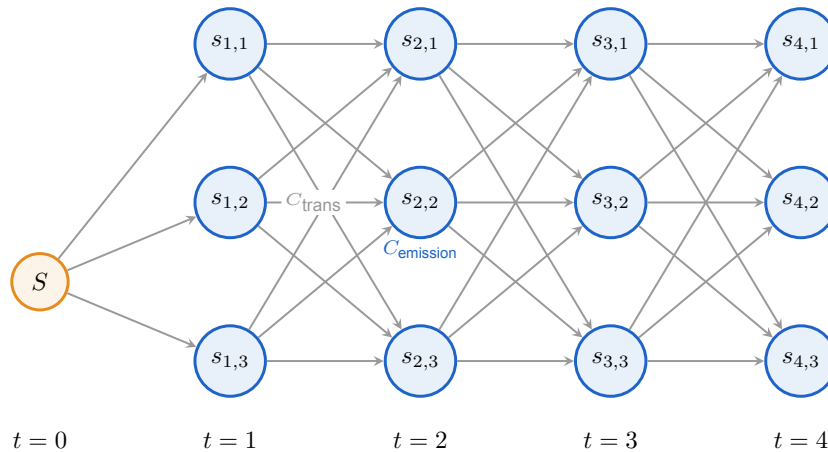


Figure 4.9: Viterbi traliediagram.

4.6.2 Tweefasen-architectuur

Het positioneringsalgoritme bestaat uit twee fasen die sequentieel worden uitgevoerd (Figuur 4.10):

1. Fase 1 Centroïdeberekening: Per timestamp wordt een gewogen (zie Sectie 4.6.2) centroïde berekend op basis van de TA-ring, de *serving cell* antenne-sector (of *beam sector*) en de overlapping van meerdere cellen (*cell overlap*).
2. Fase 2 Viterbi-optimalisatie: Het Viterbi-algoritme vindt het meest waarschijnlijke pad op het wegennetwerk, gestuurd door de centroïde uit Fase 1.

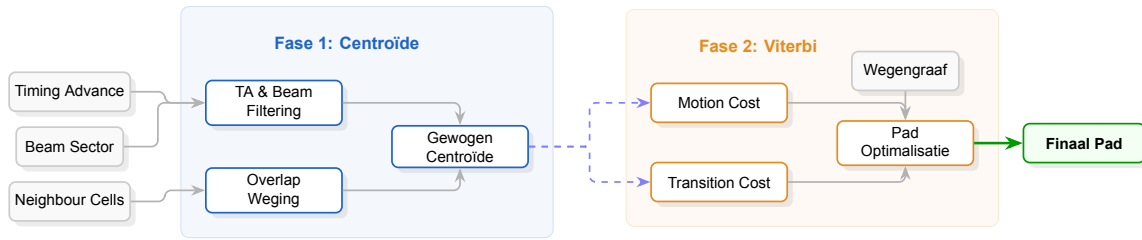


Figure 4.10: Overzicht van het tweefasen positioneringssysteem. Fase 1 berekent per timestamp een gewogen centroide. Fase 2 gebruikt deze centroide als primaire invoer voor het Viterbi-algoritme.

Fase 1: Gewogen Centroide

De centroideberekening (Figuur 4.12) combineert meerdere data tot één positieschatting per tijdsvenster.

Beam sector berekening De *beam sector* definieert het zichtbaarheidsgebied vanuit een basisstation. Gegeven de azimuth θ (de hoofdrichting van de antenne) en de nominale bundelwijdte β , worden de grenzen berekend met een configureerbare marge:

$$\theta_{\text{start}} = \left(\theta - \frac{\beta}{2} - m \right) \bmod 360 \quad (4.1)$$

$$\theta_{\text{end}} = \left(\theta + \frac{\beta}{2} + m \right) \bmod 360 \quad (4.2)$$

waarbij $m = \beta \cdot p$ de marge is en p het margpercentage, 10%. Dit wordt als variabele geprogrammeerd om impact van deze parameter te onderzoeken. De bundelwijdte β wordt afgeleid uit het aantal sectoren per mast: 120° voor 3-sector sites en 90° voor 4-sector configuraties.

Kandidaatfiltering Voor elk punt op het gediscretiseerde wegennetwerk worden twee constraints gecontroleerd:

1. TA-ring: De afstand d tot de mast moet binnen de TA-geschatte afstand liggen: $d_{\text{TA}} - m_{\text{TA}} \leq d \leq d_{\text{TA}} + m_{\text{TA}}$, met $m_{\text{TA}} = 19,5$ m. Dit volgt uit de theoretische resolutie van de TA-parameter (39m).
2. Beam sector: De *bearing* ϕ van mast naar kandidaat moet binnen de beam sector liggen: $\theta_{\text{start}} \leq \phi \leq \theta_{\text{end}}$.

Punten die aan beide constraints voldoen worden behouden als geldige kandidaten.

Overlap weging Kandidaten worden gewogen op basis van hoeveel extra cellen (SCells en buurcellen) het punt kunnen “zien”. Voor elke extra cel wordt gecontroleerd of het kandidaatpunt binnen de beam sector én maximale afstand van die cel ligt. Het gewicht volgt een kubische functie:

$$w = (1 + N_{\text{overlap}})^3 \quad (4.3)$$

waarbij N_{overlap} het aantal overlappende cellen op die kandidaatslocatie is. Deze kubische weging bevordert sterk de kandidaten met veel celbevestiging.

De keuze voor een kubische exponent is empirisch bepaald en past binnen het kader van *Weighted Centroid Localization* (WCL) methoden [37]. Een hogere exponent zorgt ervoor dat kandidaten met veel celbevestiging exponentieel zwaarder wegen: een punt bevestigd door 3 cellen ($w = 64$) weegt 8× zwaarder dan een punt met slechts 1 cel ($w = 8$). Dit onderdrukt effectief kandidaten die enkel aan de serving cell constraint voldoen, bijvoorbeeld aan de andere kant van de TA-ring dan waar de UE zich bevindt en daar dus geen bevestiging krijgen van buurcellen.

Tabel 4.7 toont de gemiddelde celzichtbaarheid per meetgebied. In meer dan 90% van de gevallen zijn er meerdere cellen zichtbaar, wat de effectiviteit van de overlap-weging rechtvaardigt.

Gebied	Gem.	>1 (%)	>2 (%)	>3 (%)
Gent	3,25	95,0	67,5	37,4
Merelbeke	2,62	94,5	50,5	14,2
N60	3,56	100,0	89,5	47,0
E40/E17 Regio Gent	2,80	87,8	60,3	25,0
Zwijnaarde	2,93	93,4	59,2	30,4
Ronse	3,93	100,0	90,5	59,0

Table 4.7: Gemiddelde celzichtbaarheid per meetgebied. Percentages geven aan hoeveel Viterbi-punten door meer dan 1, 2 of 3 cellen worden bevestigd.

De parameter `max_overlap_distance` (zie Tabel 4.9) bepaalt de maximale afstand waarop buurcellen en *SCells* worden beschouwd in de overlap-berekening. Aangezien deze cellen geen eigen TA-waarde bezitten, wordt een harde afstandslimiet opgelegd gebaseerd op de gemiddelde afstand tot het vorige basisstation op het moment van *handover*. Tabel 4.8 toont deze gemiddelde handover afstanden per gebied. Voor stedelijke gebieden wordt 600 m gebruikt, terwijl rurale gebieden een grotere limiet van 1700 m hanteren.

Deze afstanden representeren de gemiddelde maximale reikwijdte van de *serving cell*. Aangezien buurcellen en *SCells* doorgaans verder verwijderd zijn dan de *serving cell*, worden de limieten ruim naar boven afgerond om voldoende dekking te garanderen. De hoge overlap-percentages in Tabel 4.7 bevestigen dat deze waarden effectief zijn.

Gebied	Gem. handover afstand (m)	Max overlap distance (m)
Stedelijk (Gent, Zwijnaarde)	503	600
Ruraal (Merelbeke, N60, Ronse)	1440	1700

Table 4.8: Gemiddelde afstand tot het vorige basisstation op het moment van handover per gebied, en de gekozen maximale overlap afstand voor buurcellen zonder TA-waarde.

Centroïde en Projectie Het gewogen gemiddelde van de coördinaten van de kandidaten geeft de centroïde:

$$\bar{lat} = \frac{\sum_i w_i \cdot lat_i}{\sum_i w_i}, \quad \bar{lon} = \frac{\sum_i w_i \cdot lon_i}{\sum_i w_i} \quad (4.4)$$

Omdat kandidaten binnen de TA-ring liggen, zal de centroïde naar binnen buigen doordat een centroïde van punten die op een boog liggen, altijd aan de binnenkant van de boog zal liggen. De centroïde wordt daarom terug geprojecteerd naar de TA-ring door de *bearing* van mast naar centroïde te berekenen en het punt via deze rechte naar het midden van de TA-ring te projecteren.

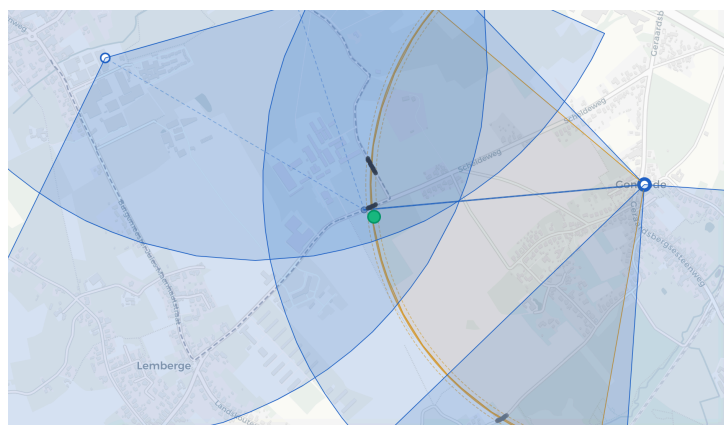


Figure 4.11: Visualisatie van de TA-ring en beam sector (geel: serving cell, blauw: scellen + buurcellen).

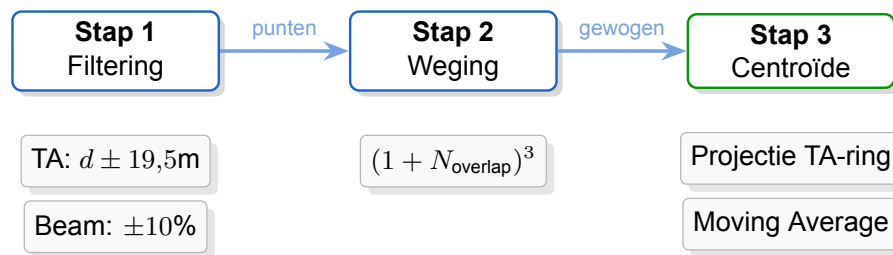
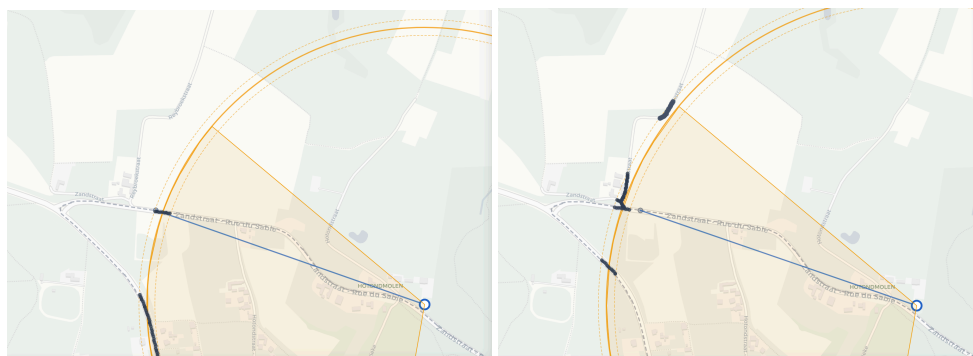


Figure 4.12: De drie stappen van de centroïdeberekening.

Tot slot reduceert een *moving average filter* (venstergrootte = 2 om impact minimaal te houden) het heen en weer springen doordat er kort een weg loodrecht op de effectieve weg staat en deze abrupt veel kandidaten genereert. Onderstaande afbeeldingen geven een dergelijke situatie weer. Een *moving average filter* helpt om deze sprongen te minimaliseren.

Figure 4.13: Links: voorbeeld op tijdsvenster t . Rechts: voorbeeld op tijdsvenster $t+1$.

Fase 2: Viterbi Optimalisatie

Hoewel de centroïde uit Fase 1 een goede positieschattingen geeft, zijn deze niet gebonden in tijd en kunnen deze schattingen onmogelijke sprongen maken tussen opeenvolgende tijdsvensters. In Fase 2 wordt het Viterbi-algoritme toegepast om deze schattingen te beperken tot een fysiek mogelijk pad over het wegennetwerk.

Het doel is om de sequentie van posities $\{s_1, s_2, \dots, s_T\}$ te vinden die:

1. de centroïde-schattingen zo dicht mogelijk volgt, en
2. een fysiek haalbaar traject vormt over de wegengraaf.

Kandidaatgeneratie Bij elke tijdstap t worden kandidaat-nodes geïdentificeerd vanuit de actieve hypothesen van tijdstap $t - 1$. Voor elke actieve kandidaat worden alle bereikbare nodes binnen een maximale afstand gezocht:

$$d_{\max} = v_{\max} \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

waarbij $v_{\max}$ de snelheidsbeperking is (afhankelijk van mobiliteitstype, zie Tabel 4.9) en Δt de tijd tussen de opeenvolgende tijdsvensters met geldige TA-waarden (zie Sectie 4.2.2). Deze waarden worden gebruikt om de bereikbaarheid van verdere kandidaten te bepalen. Door de lage samplefrequentie van TA is het moeilijk om een effectieve snelheidsbeperking op te leggen. Daardoor zijn de opgelegde snelheidsbeperkingen vaak groter dan nodig. De kost naar een kandidaat wordt bepaald via het kortste pad op de gewogen graaf (Dijkstra's algoritme), waardoor alleen topologisch verbonden nodes als kandidaat worden beschouwd.

Kostenfunctie Elke kandidaat-node wordt geëvalueerd met een kostenfunctie die twee aspecten combineert:

Emission Cost De afstand tussen de kandidaat-node en de centroïde uit Fase 1:

$$C_{\text{emission}} = w_{\text{emission}} \cdot d(\text{kandidaat}, \text{centroïde}) \quad (4.6)$$

Deze functie bepaalt hoe nauw het Viterbi-pad de centroïde moet volgen.

Transition Cost Penaliseert onrealistische bewegingen tussen opeenvolgende posities:

$$C_{\text{trans}} = w_{\text{transition}} \cdot (|d_{\text{actual}} - d_{\text{expected}}| + \frac{\Delta\theta}{180^\circ} \times 20) \quad (4.7)$$

waarbij d_{actual} de werkelijke afgelegde afstand over de graaf is, d_{expected} de afstand gebaseerd op de centroïde-bewegingen, beide voor elk tijdsvenster. $\Delta\theta$ is het verschil in *bearing* ten opzichte van de verwachte bewegingsrichting (verschil tussen richting van kandidaat op t-1 naar kandidaat op t en richting van centroïde op t-1 naar centroïde op t). De schaaftactor 20 (empirisch bepaald, zie Sectie 4.7.4) zorgt ervoor dat een volledige ommekeer (180°) equivalent is aan 20 meter afwijking, wat vloeiendere trajecten bevordert.

Cumulatieve kost De totale kost voor een kandidaat s op tijdsvenster t is de som van de eigen kosten en de minimale gecumuleerde kost van de voorganger:

$$C_t(s) = \min_{s' \in \text{prev}} [C_{t-1}(s') + C_{\text{trans}}(s', s)] + C_{\text{emission}}(s) \quad (4.8)$$

Dit is de standaard Viterbi-recursie [38], waarbij voor elke kandidaat de optimale voorganger wordt bijgehouden voor latere backtracking.

4.6.3 Forward pass en beam search

Het algoritme verwerkt de tijdvensters sequentieel in een forward pass. Per tijdvenster worden alle bereikbare nodes vanuit de huidige kandidaten geëvalueerd, en de top- k kandidaten met de laagste cumulatieve kost worden behouden (*beam search pruning* [39]). De standaardwaarde is $k = 50$ kandidaten.

4.6.4 Adaptieve parameters

De algoritmeparameters worden aangepast aan de omgeving en het mobiliteitstype. Meerdere parameters worden gelijk gesteld met oog op mogelijke toekomstige verbetering. Omgevingsspecifieke parameters worden in (zie Sectie 4.7.4) gestaaft.

Parameter	Stedelijk	Landelijk	
TA marge (m)	19,5	19,5	
Beam marge (%)	10	10	
Herinitialisatie drempel (m)	350	1000	
Max. overlap distance (m)	600	1700	
	Te voet	Fiets	Auto
Max. snelheid (m/s)	12	20	35

Table 4.9: Configuratieparameters per omgeving en mobiliteitstype

Door het discrete karakter van de timing advance, die minimaal in sprongen van 39m varieert, fungeert de maximale snelheid in de praktijk als een zoekstraal voor kandidaat-nodes, eerder dan een werkelijke snelheidsbeperking. Aangezien een tijdsvenster gemiddeld een halve seconde beslaat, betekent

een zoekstraal van 12 m voor voetgangers dat alle nodes binnen 6 meter van de huidige positie als bereikbaar worden beschouwd. Dit voorkomt onnodige uitbreiding van de zoekruimte terwijl realistische bewegingspatronen worden toegelaten. Uit empirische testen bleek dat lagere snelheidsbeperkingen leiden tot betere prestaties, tot een kritische drempelwaarde waarbij het algoritme faalt door een tekort aan bereikbare kandidaten. De gekozen parameters liggen net boven deze drempel, met een veiligheidsmarge van ongeveer 2 m/s om robuustheid te garanderen.

4.7 Implementatie

De implementatie is volledig in Python 3 geschreven en maakt gebruik van de volgende bibliotheken:

4.7.1 Bibliotheken

- NetworkX (v3.x): graafrepresentatie en Dijkstra-pathfinding
- OSMnx (v1.x): ophalen en verwerken van OpenStreetMap data
- DuckDB: SQL-database voor efficiënte opslag en queries van meetdata
- NumPy/Pandas: numerieke berekeningen en datamanipulatie
- Matplotlib: visualisatie van resultaten

4.7.2 Module-architectuur

De implementatie is opgedeeld in de volgende modules:

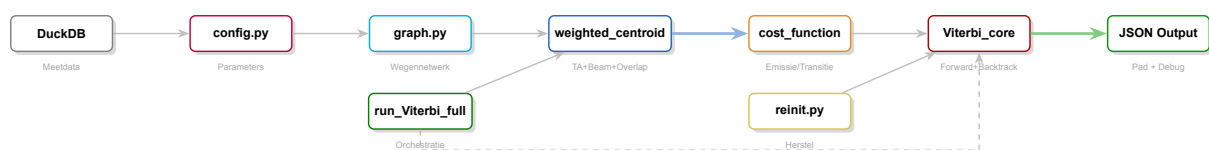


Figure 4.14: Module-architectuur met dataflow tussen de verschillende componenten.

Configuratie (config.py)

Alle parameters zijn gecentraliseerd in de klasse `ViterbiConfig`. De configuratie ondersteunt omgevings *presets* met verschillende parameters voor stedelijke en landelijke omgevingen, mobiliteits*presets* met aangepaste snelheidslimieten en individuele kostgewichten per component.

Wegennetwerk (graph.py)

Deze module construeert twee verschillende wegennetwerk-representaties uit OpenStreetMap data:

- Visualisatiegraaf (15m *spacing*): Een lichtere graaf voor de interactieve kaartvisualisatie. De grotere spacing reduceert geheugengebruik voor visualisatie en foutopsporing.
- Viterbi-graaf (3m *spacing*): Een dichtere graaf voor nauwkeurige padberekeningen. Deze graaf zorgt voor de kandidaatberekening en map-matching op het wegennetwerk.

Beide grafen worden *cached* als pickle bestanden voor snellere laadtijden.

Coördinatie (`run_Viterbi_full.py`)

Dit script is het toegangspunt voor de volledige Viterbi-uitvoering. Het haalt meetdata op van DuckDB en koppelt cellocaties, groepeer samples in tijdsvensters, voegt LTE/NR neighbours toe aan elk window voor overlap-berekening, roept `run_Viterbi` aan met de geconfigureerde parameters, en exporteert resultaten als JSON voor visualisatie.

Initialisatie (`initialization.py`)

De initialisatiemodule bepaalt de startpositie van het algoritme door de vooraf berekende centroïde op te halen voor het eerste tijdsvenster. Binnen een zoekradius van 50 meter worden alle nodes opgezocht en gerangschikt op afstand tot de centroïde. De top- $k = 50$ kandidaten worden geretourneerd als initiële Viterbi-hypothesen.

Kostenfunctie (`cost_function.py`)

De kostenfunctie berekent de totale kost voor elke kandidaatpositie als gewogen som van vijf componenten:

- TA-kost: afwijking van de kandidaat tot de TA-ring
- Beam-kost: afwijking tot de beam sector van de verbonden cel
- Overlap-bonus: negatieve kost voor kandidaten binnen bereik van meerdere buurcellen
- Emission-kost: afwijking tot de voorspelde centroïde-positie
- Transitiekost: penaliserings van niet-vloeiende overgangen

Viterbi Core (`Viterbi_core.py`)

De `run_Viterbi` functie implementeert de forward pass van het Viterbi-algoritme. Voor elk tijdsvenster worden kandidaten geëvalueerd op basis van de kostenfunctie en per kandidaat wordt de optimale voorganger bepaald (minimale gecumuleerde kost). *Beam search* ($k = 50$) beperkt het aantal actieve hypothesen. Na de forward pass volgt backtracking om het optimale pad te reconstrueren.

Herinitialisatie (`reinit.py`)

Deze herstelstrategieën worden geïmplementeerd als nood om beperkingen van het algoritme te omzeilen. De benodigde implementaties worden achterhaald door het visualiseren en opsporen van fouten in de *outputs* van het algoritme. Dit volgt een iteratief ontwerpproces. Het Viterbi-algoritme kan in bepaalde situaties afdrijven van de werkelijke positie, bijvoorbeeld door topologische beperkingen van het wegen-netwerk of door een foute startkeuze, die zich dan verderzet doorheen de volledige reconstructie. Drie herstelstrategieën worden toegepast, elk met een eigen trigger:

- Herinitialisatie: Wanneer de afstand tussen de beste Viterbi-kandidaat en de centroïde een drempelwaarde overschrijdt, worden nieuwe kandidaten rondom de centroïde geïnitieerd. Een kost penaliseert de discontinuïteit, waardoor het pad kan *resetten* als de huidige hypothesen te ver zijn afgedwaald.
- Vastloop detectie: Detecteert wanneer het pad gedurende meerdere tijdsvensters op dezelfde node blijft staan, bijvoorbeeld door topologische kenmerken zoals doodlopende straten die parallel aan de effectieve route lopen. Door de beperking die opgesteld wordt aan het algoritme om enkel verbonden *nodes* te gebruiken, blijft het pad vastgelopen staan als deze foute keuze lang genoeg duurt. Om dit op te lossen worden kandidaten binnen een straal rondom de huidige positie toegevoegd om het pad te deblokkeren en terug op de juiste route te geraken.

- **Centroid inhalen:** Activeert na vastloop detectie wanneer de centroïde ver van de huidige positie ligt. Via Dijkstra wordt het kortste pad naar de centroïde berekend, waarbij tussenliggende nodes als kandidaten worden toegevoegd. Deze strategie is voornamelijk verantwoordelijk voor het verwerken van gaten in de TA-metingen.

Inhalen wordt alleen uitgevoerd als de centroïde berekend is met meerdere cellen (serving + neighbors). In rurale gebieden met lage celdensiteit zijn soms enkel serving cells zichtbaar, wat resulteert in korte onbetrouwbare centroïdes. In dat geval wordt inhalen overgeslagen om te voorkomen dat het pad naar een onjuiste positie springt.

4.7.3 Performantie

Voor een typische meting van 1500 tijdvensters met $k = 50$ kandidaten bedraagt de verwerkingstijd circa 120 seconden op een Apple M4 Pro chip. De wegensgrafiek (1–2 miljoen nodes) wordt gecached om herhaalde berekeningen te vermijden. De herstelstrategieën nemen het grootste deel van de verwerkingstijd in beslag, omdat er gebruik gemaakt wordt van geneste *loops*.

4.7.4 Parameter Tuning

Om de optimale configuratie te vinden wordt een geautomatiseerde *parameter sweep* uitgevoerd. Hierbij worden verschillende combinaties van parameters getest op meerdere trajecten, met de GPS-afwijking als evaluatiemetriek.

Bevindingen De meeste parameters tonen een beperkte en inconsistente invloed: verbetering op één traject leidt vaak tot verslechtering op een ander. De enige significante en consistente verbetering wordt gevonden in de *emission weight* (w_{emission}), wat de invloed van de centroïde-afstand bepaalt.

Uit de sweep blijkt dat een *emission weight* van $w_{\text{emission}} = 15$ een goede balans biedt tussen:

- het nauw volgen van de centroïde (hogere waarden)
- het toelaten van vloeiende trajectcorrecties (lagere waarden)

Te lage waarden ($w_{\text{emission}} < 5$) laten het pad te ver afdrijven van de centroïde, terwijl te hoge waarden ($w_{\text{emission}} > 30$) het pad te rigide maken en minder tolerant voor centroïde-fouten.

De overige kostcomponenten (TA-kost, beam-kost, overlap-bonus) werden getest maar blijken in de huidige tweefasen-architectuur redundant met de centroïdeberekening. Hun gewichten worden daarom op 1 gehouden zodat mogelijke toekomstige verbeteringen eenvoudige te modelleren zijn door deze parameters aan te passen.

Omgevingsspecifieke parameters Een bijkomende parameter *sweep* werd uitgevoerd om de omgevingsspecifieke parameters in kaart te brengen. Deze bestaan uit:

- *beam-margin*: bepaalt hoeveel extra marge (als percentage van de *beam*-breedte) wordt toegestaan bij het filteren van kandidaten.
- *Herinitialisatie-drempel*: bepaalt vanaf welke afstand tussen Viterbi-kandidaat en centroïde een herinitialisatie kan worden geactiveerd.

Figuur 4.15 toont dat de optimale *beam-margin* rond 10% ligt, met een gemiddelde verbetering van 6 m. De dip die terugkomt is te verklaren door het fenomeen dat wanneer de UE zich aan de rand van een bepaalde sector bevindt, de SCell op dat moment vaak de sector is die fysiek naast de huidige sector ligt. Door de marge ontstaat een overlap tussen deze twee sectoren. Dit fenomeen bevordert dus kandidaten die zich in dit gebied bevinden door de kubische weging. Wanneer de marge echter te groot wordt, worden te veel kandidaten gegenereerd waardoor de kans op foutieve keuzes ook stijgt.

Figuur 4.16 toont de invloed van de herinitialisatie-drempel op vijf rurale en snelwegroutes, waarbij de stippellijnen het aantal herinitialisaties weergeven. De resultaten leiden tot de volgende inzichten:

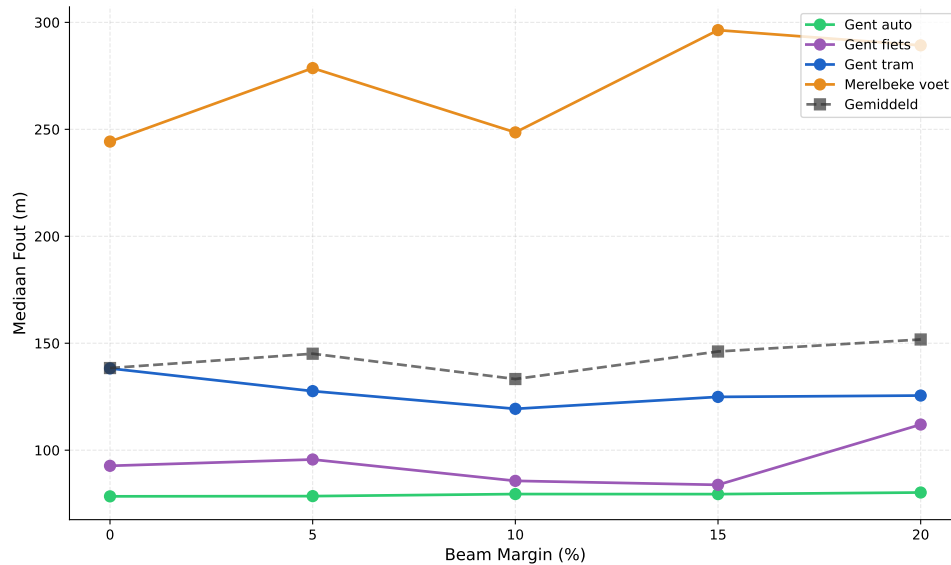


Figure 4.15: Effect van *beam*-margin op de mediaan positioneringsfout per traject.

- Bij lage drempels (50–250 m) neemt het aantal herinitialisaties explosief toe. Voor het N60-traject (M8) loopt dit op tot 60 resets bij 50 m. Dit doorbreekt de continuïteit van het Viterbi-pad te frequent, wat het doel van het algoritme tegenwerkt.
- Voor vrijwel alle rurale trajecten wordt de laagste mediaanfout bereikt rond een drempel van 1000 m. Bij deze waarde is het algoritme robuust genoeg om tijdelijke centroïde-afwijkingen te overbruggen (door te vertrouwen op de padcontinuïteit), maar grijpt het nog steeds in bij fundamentele fouten.
- Stedelijke omgevingen bezitten van nature amper herinitialisaties. Daarom wordt voor een drempelwaarde van 350 m gekozen aangezien 1000 m niet zou voorkomen in stedelijke omgevingen.
- Bij een drempel van 1250 m zien we voor sommige trajecten (zoals M5) een plotse toename in fout. Dit wijst erop dat de drempel te laks wordt, waardoor het algoritme te lang op een foutief pad blijft hangen alvorens te corrigeren.

4.8 Experimentele opzet

4.8.1 Overzicht metingen

In totaal werden 15 metingen uitgevoerd in verschillende omgevingen en met verschillende transport-modi. Tabel 4.10 geeft een overzicht van alle trajecten.

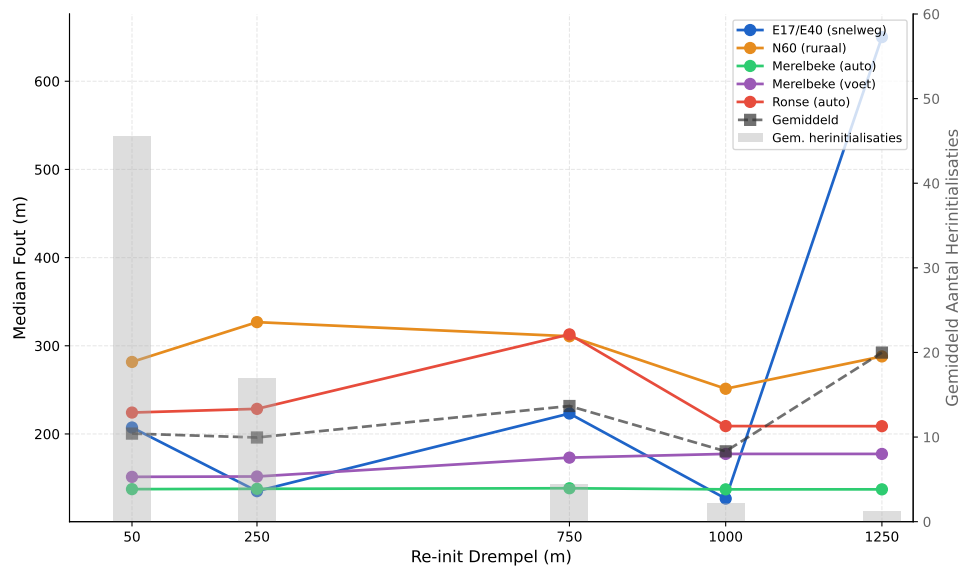


Figure 4.16: Effect van herinitialisatie-drempel op de mediaan positioneringsfout per traject.

ID	Traject	Omgeving	Mobiliteit	Densiteit (masten/km ²)	Samples (voor tijdsvenster)	Duur (min)	Afstand (km)	$\bar{v}$ (km/h)	v_{95} (km/h)
1	Gent tram 1	Stedelijk	Tram	2.53	17.517	16	4,1	18	40
2	Gent tram 2	Stedelijk	Tram	2.47	15.431	15	3,7	16	29
3	Gent centrum	Stedelijk	Auto	3.45	9.546	10	4,8	29	61
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	0.98	13.877	13	4,5	22	27
5	Gent autostrade	Snelweg	Auto	0.55	9.737	8	13,9	109	132
6	Gent centrum	Stedelijk	Te voet	4.33	27.036	29	2,8	6	7
7	Merelbeke centrum	Ruraal	Te voet	0.32	31.733	27	2,7	6	7
8	N60	Ruraal	Auto	0.25	21.028	18	25,6	88	121
9	Zwijnaarde campus	Semi-ruraal	Te voet	1.44	18.956	18	1,7	6	7
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	1.00	17.526	14	4,9	21	27
11	Gent fiets	Stedelijk	Fiets	4.27	14.579	14	4,2	18	24
12	Gent te voet	Stedelijk	Te voet	4.39	15.603	17	1,5	5	7
13	Merelbeke	Ruraal	Auto	0.43	23.640	20	6,0	19	32
14	Merelbeke	Ruraal	Te voet	0.45	58.028	53	5,4	6	7
15	Ronse	Ruraal	Auto	0.34	25.879	18	12,1	41	67
Totaal				–	320.116	287	97,9	–	–

Table 4.10: Overzicht van alle meettrajecten. Afstanden en snelheden berekend uit GPS-data. $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid, v_{95} = 95e percentiel.

Voor de snelheidskarakterisatie wordt het 95e percentiel (v_{95}) gerapporteerd in plaats van het maximum. Dit elimineert uitschieters veroorzaakt door GPS-meetfouten of kortstondige datasprongen, terwijl de representatieve topsnelheid behouden blijft.

Omgevingscategorieën

De metingen zijn ingedeeld in drie categorieën op basis van celdensiteit (zie kolom Densiteit in Tabel 4.10):

- **Stedelijk:** Hoge celdensiteit (2,5–4,4 masten/km²), frequente handovers, korte afstanden tot masten. De dichte bebouwing zorgt voor multipath-effecten maar ook voor meer referentiepunten.
- **Semi-ruraal:** Gemengde omgeving met zowel open ruimtes als bebouwing. Middelmatige celdensiteit (1,0–1,5 masten/km²).
- **Ruraal:** Lage celdensiteit (0,25–0,55 masten/km²), grotere afstanden tot masten. Minder handovers maar ook minder correctiemogelijkheden bij fouten.

Transportmodi

De keuze voor verschillende transportmodi is bewust gemaakt om de robuustheid van het algoritme te testen over een breed snelheidsbereik:

- Te voet (5–6 km/h): Baseline scenario met lage snelheid.
- Fiets (18–22 km/h): Middelmatige snelheid met frequente richtingsveranderingen.
- Tram (16–36 km/h): Gelijkaardige gemiddelde snelheid als fiets maar meer versnellingen en vertragingen door frequent stoppen aan haltes.
- Auto (19–132 km/h): Hogere snelheden die de update-frequentie van het algoritme testen. Snelwegtrajecten (autostrade, N60) omvatten snelheden tot 130 km/h.

Invloed *Faraday* kooi effect Om het effect van metalen afscherming op de signaalsterkte te evalueren, wordt de gemiddelde RSRP-waarden vergeleken tussen verschillende mobiliteitstypes.

Voor stedelijke omgeving worden de volgende gemiddelde RSRP-waarden gemeten:

- Te voet (2 trajecten): -85.5 dBm en -96.1 dBm
- Fiets: -86.2 dBm
- Tram (2 trajecten): -93.1 dBm en -96.6 dBm
- Auto: -80.1 dBm

Het gemiddelde verschil tussen outdoor metingen (te voet + fiets: -89.3 dBm) en voertuigen (tram + auto: -90.0 dBm) bedraagt slechts -0.7 dB, wat verwaarloosbaar is.

Voor rurale omgevingen worden de volgende waarden gemeten:

- Te voet (2 trajecten): -96.2 dBm en -94.1 dBm (gemiddeld -95.2 dBm)
- Auto: -92.7 dBm

In Merelbeke vertoont de auto zelfs een beter signaal ($+2.4$ dB) dan de voetgangerstrajecten.

Deze resultaten tonen aan dat het verwachte *Faraday* kooi-effect niet consistent waarneembaar is in de dataset. Mogelijke verklaringen zijn dat andere factoren zoals locatie, tijdstip van de dag en netwerkbelasting een groter effect hebben op de RSRP dan de afscherming door het voertuig.

4.8.2 Evaluatiemetriecken

De nauwkeurigheid van het positioneringsalgoritme wordt geëvalueerd door de geschatte posities te vergelijken met de GPS controle. Voor elk tijdsvenster wordt de afstand berekend tussen de geschatte en werkelijke positie.

De volgende metriecken worden gerapporteerd voor de schattingsfout:

- *Mediaan*: de centrale waarde; robuust tegen uitschieters
- *P75*: 75% van de fouten ligt onder deze waarde
- *P95*: 95% van de fouten ligt onder deze waarde; indicatief voor grote fouten
- *Gemiddelde*: gevoelig voor uitschieters, maar bruikbaar voor vergelijking

Daarnaast wordt het percentage meetpunten gerapporteerd waarvan de afstandsfout binnen bepaalde afstandsrempels valt (50m, 100m, 300m). Dit geeft inzicht in de praktische bruikbaarheid voor toepassingen met verschillende specifieke nauwkeurigheidseisen.

5.1 Baseline: Gewogen centroïde

Als baseline voor de evaluatie van het Viterbi map-matching algoritme wordt de gewogen centroïde methode gebruikt (zie Sectie 4.6.2).

De resultaten van deze methode worden weergegeven in grafiek 5.1.

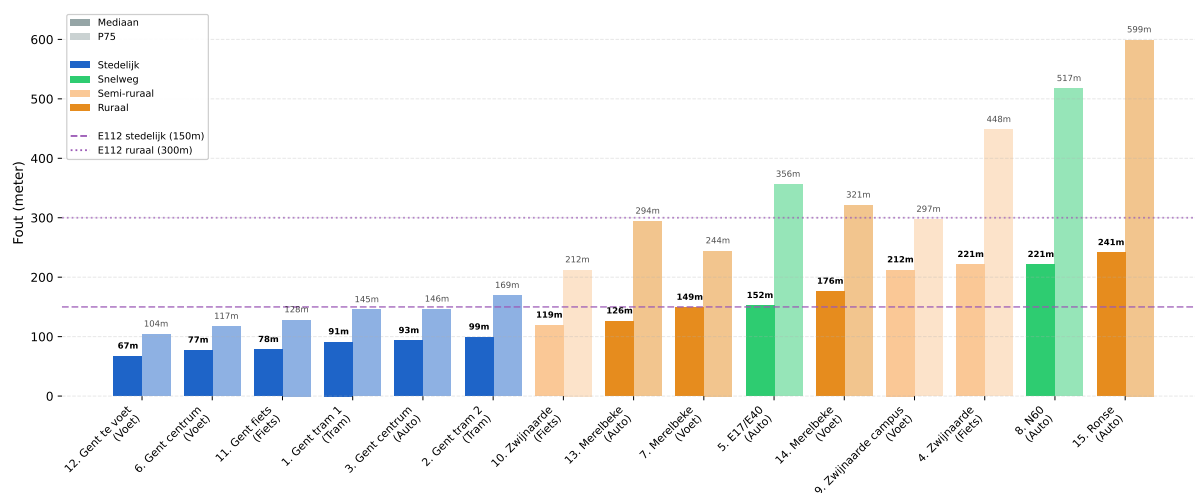


Figure 5.1: Positioneringsnauwkeurigheid per traject, gesorteerd op prestatie. Mediaan (volle kleur) en P75 (transparant) per traject. Kleuren geven het omgevingstype aan. Stippellijnen: E112-vereisten voor stedelijk (150 m) en ruraal (300 m).

5.2 Viterbi Map-Matching met herstelstrategieën

Figuur 5.2 toont de positioneringsnauwkeurigheid (mediaan en P75) van het Viterbi algoritme voor alle 15 trajecten. De gedetailleerde resultaten bevinden zich in appendix B.2.

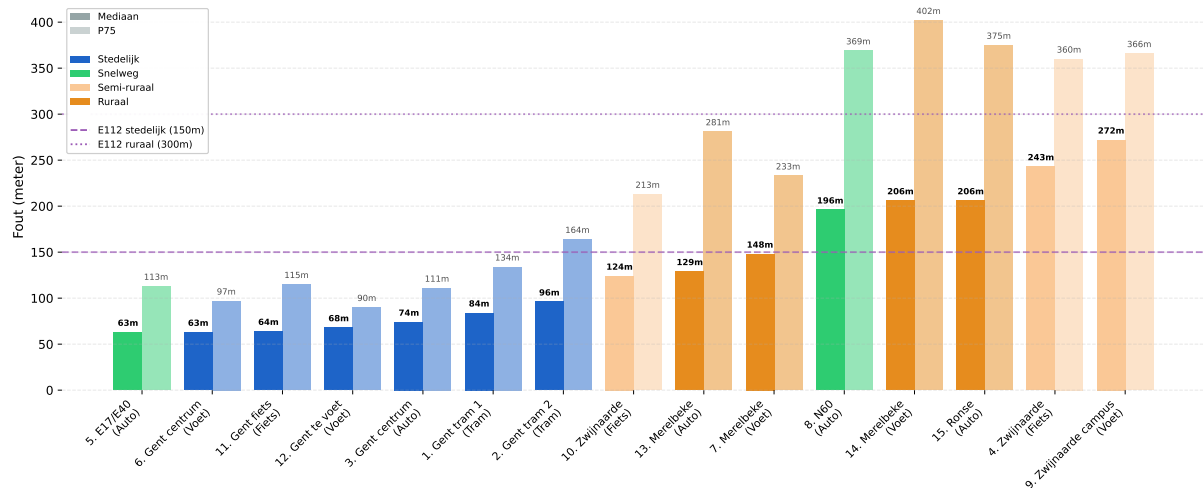


Figure 5.2: Positioneringsnauwkeurigheid per traject, gesorteerd op prestatie. Mediaan (volle kleur) en P75 (transparant) per traject. Kleuren geven het omgevingstype aan. Stippellijnen: E112-vereisten voor stedelijk (150 m) en ruraal (300 m).

Observaties Uit figuur 5.1 en figuur 5.2 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Beste prestaties: Trajecten 5 (E17/E40, snelweg), 6 (Gent centrum, voet) en 11 (Gent fiets) behalen de laagste mediaan fouten van 63–64 m. De goede resultaten van deze trajecten in Gent kunnen verklaard worden door de hoge celdensiteit. Het snelwegtraject 5 krijgt de grootste positieve impact door het Viterbi-algoritme.
- Spreiding binnen trajecten: De P75-waarden liggen typisch ongeveer 40 m hoger dan de mediaan in stedelijke omgeving, wat wijst op een consistente maar variabele nauwkeurigheid binnen deze trajecten. De grootste spreiding is zichtbaar bij rurale autotrajecten (8, 14, 15) waar P75 tot 2 maal de mediaan bedraagt.
- E112-naleving: Alle stedelijke trajecten voldoen ruim aan de E112-vereiste van 150 m. De mediaan van de rurale trajecten blijft onder de 300 m-grens, de P75 ligt echter vaker boven deze grens.
- Mobiliteitstype: Binnen stedelijke omgevingen presteren alle mobiliteitstypes (tram, fiets, voet, auto) vergelijkbaar (63–96 m mediaan). In rurale gebieden is de variatie groter (129–206 m), wat suggereert dat omgeving een grotere rol speelt dan transportmodus.
- De trajecten in Zwijnaarde tonen betere prestaties wanneer enkel de gewogen centroïde methode gebruikt wordt. Het Viterbi-algoritme heeft hier een negatieve invloed.

5.3 Viterbi Map-Matching zonder herstelstrategieën

Om de meerwaarde van de herstelstrategieën (herinitialisatie, vastloop detectie, centroid inhalen) te kwantificeren, wordt een analyse uitgevoerd waarbij de trajecten worden verwerkt zonder deze mechanismen. De gedetailleerde resultaten per traject bevinden zich in Appendix B.5.

Traject	Met herstelstrategieën	Zonder	Vershil	% Verandering
M8 N60	231 m	8883 m	+8652 m	+3749%
M5 Autostrade	84 m	487 m	+403 m	+477%
M4 Zwijnaarde fiets	247 m	327 m	+80 m	+32%
M15 Ronse auto	216 m	262 m	+46 m	+21%
<i>Stedelijke trajecten</i>	≈ 75 m	≈ 75 m	<2 m	<2%
Gemiddeld	136 m	748 m	+612 m	+451%

Table 5.1: Impact van herstelstrategieën op de mediaanfout per traject.

De resultaten tonen dat herstelstrategieën de prestaties verbeteren voor 8 van de 15 trajecten. De gemiddelde mediaanfout zonder de herstelstrategieën bedraagt 748 m, wat impliceert dat het algoritme (voor enkele trajecten) onbruikbaar is zonder deze strategieën toe te passen. In het geval van de N60-route, geraakt de positieschatting zelfs niet tot de eindbestemming. Deze grote fout ontstaat door het vastlopen van het algoritme in een manier waarop er geen betere alternatieve kandidaten zijn. Dit kan door o.a. een doodlopende straat komen. Ook op de Autostrade (M5) daalt de fout van 487 m naar 84 m. Beide snelwegtrajecten bevatten langdurige onjuiste centroid-schattingen door lage celdensiteit, die zonder herinitialisatie het Viterbi-pad permanent kunnen laten afdrijven.

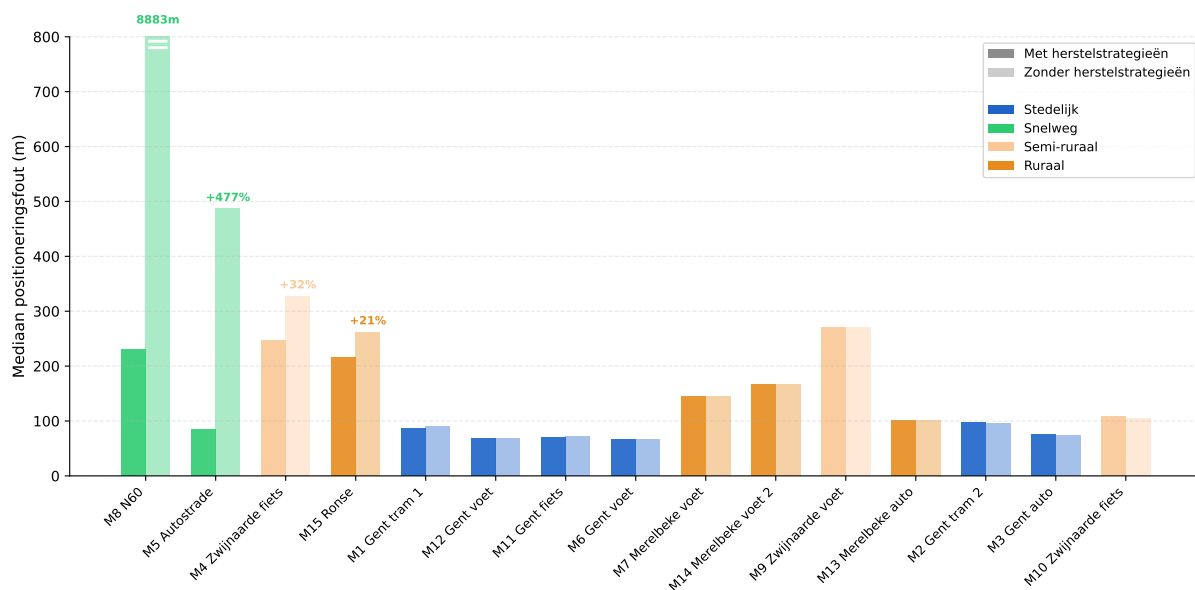


Figure 5.3: Vergelijking van de mediaan positioneringsfout met en zonder herstelstrategieën per traject, gesorteerd op verbetering.

5.4 Visualisatie

In de figuren 5.4a–5.4f zijn zes trajecten met verschillende omgevingen en mobiliteitstypes weergegeven.



Figure 5.4: Visualisatie van zes representatieve trajecten in verschillende omgevingen. De blauwe lijn toont het geschatte Viterbi-pad, de grijze stippellijn het GPS ground truth traject.

5.4.1 Vergelijking omgeving

Omgeving	# Trajecten	n	Gem. Mediaan	Gem. P75
Stedelijk	6	5548	75 m	119 m
Ruraal	6	7942	158 m	296 m

Table 5.2: Positioneringsnauwkeurigheid per omgevingstype.

De semi-rurale trajecten in Zwijnaarde zijn uitgesloten van deze vergelijking wegens beperkte kwaliteitsvolle data, ontbrekende wegengridpunten op de campus, een ontbrekende brug in de OSM-dataset en hoge PCI-variabiliteit die de *matching* bemoeilijkt. Dit zou een onrealistisch beeld van het algoritme geven.

In stedelijke omgevingen is de mediaan fout gemiddeld twee keer lager dan in rurale gebieden. Dit verschil wordt verklaard door de hogere celdensiteit en de lagere TA-fouten door kortere afstanden tot de masten.

5.4.2 Vergelijking mobiliteitstypes

Om de invloed van transportmodus op de positioneringsnauwkeurigheid te analyseren, worden alle meetpunten gegroepeerd per mobiliteitstype. Figuur 5.5 toont de verdeling van de positiefout per transportmodus.

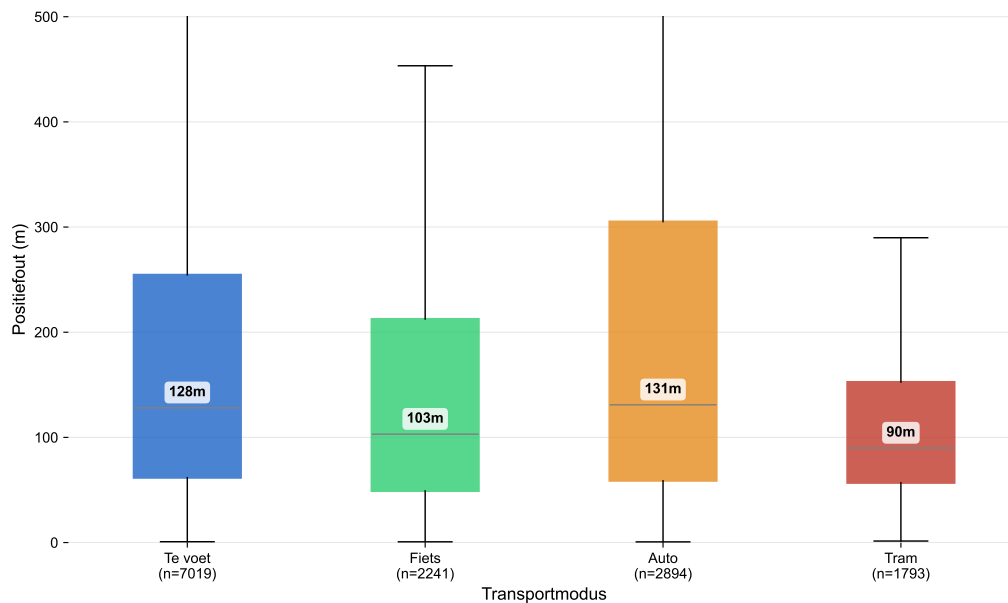


Figure 5.5: Boxplot van de positiefout per transportmodus. De box toont het interkwartiel bereik, de horizontale lijn de mediaan.

Het is duidelijk dat alle transportmodi ongeveer dezelfde lagere interkwartiel hebben (gemiddeld $\approx 51m$). Dit duidt op een fysieke ondergrens van de mogelijkheden van het algoritme en komt inderdaad in de buurt van de TA-resolutie $\approx 39m$. De maat van spreiding (bovenste interkwartiel) duidt op de variabiliteit van de positiefout van een desbetreffende transportmodus.

Mobiliteit	n	Mediaan	P75	P95
Tram	1793	90 m	153 m	226 m
Fiets	2241	103 m	213 m	438 m
Te voet	7019	128 m	255 m	512 m
Auto	2894	131 m	305 m	916 m

Table 5.3: Positioneringsnauwkeurigheid per mobiliteitstype, gesorteerd op mediaan fout.

Opvallend is dat tram de beste prestaties levert met een mediaan fout van 90 m en een P75 van slechts 153 m. Dit kan verklaard worden doordat tramroutes uitsluitend in stedelijke gebieden met hoge celdensiteit liggen. Terwijl andere modi in meerdere omgevingen terugkomen. Fiets presteert iets beter dan te voet.

Auto toont de hoogste P75 (305 m), voornamelijk veroorzaakt door de rurale snelwegtrajecten zoals N60 en E17/E40 waar celdensiteit laag is en hogere snelheden minder correctiemomenten bieden. In stedelijke omgevingen (Gent centrum) presteert auto vergelijkbaar met andere modi.

Statistische analyse De variantie-analyse (ANOVA) wordt toegepast omdat deze methode geschikt is om te bepalen of de gemiddelden van een continue variabele (de positioneringsfout) significant verschillen tussen meerdere categorische groepen (omgevingstypes of transportmodi), en om de relatieve grootte van die verschillen te kwantificeren [40].

De analyse op alle meetpunten, zonder Zwijnaarde-trajecten door de eerder vermelde reden, bevestigt dat de omgevingsfactor een significant grotere invloed heeft dan het mobiliteitstype.

- Omgeving: Verklaart 15.2% van de variantie in de positioneringsfout ($\eta^2 = 0.152$).
- Mobiliteitstype: Verklaart 6.1% van de variantie ($\eta^2 = 0.061$).

Het effect van de omgeving is ongeveer 2.5 keer groter dan die van het mobiliteitstype.

5.4.3 Route reconstructie kwaliteit

Naast punt per punt nauwkeurigheid is het ook relevant te onderzoeken in welke mate het Viterbi-algoritme de werkelijk afgelegde route reconstrueert. Een route kan geometrisch correct zijn (juiste weg gekozen) maar toch een offset hebben door bijvoorbeeld parallelle rijstroken of oscillaties tussen nabije straten.

Voor route reconstructie kwaliteit worden drie complementaire metrieken gehanteerd:

- *Precisie*: Percentage van Viterbi-punten binnen 20 m van de GPS ground truth route. Meet hoeveel van het voorspelde pad correct is.
- *Recall*: Percentage van GPS-punten binnen 20 m van het Viterbi-pad. Meet hoeveel van de werkelijke route wordt gedekt.
- *F1-score*: Harmonisch gemiddelde van precisie en recall, als gecombineerde kwaliteitsindicator.

De buffer van 20 m is gekozen om oscillaties tussen parallelle straten te tolereren terwijl verkeerde routekeuzes wel gedetecteerd worden. Figuur 5.6 geeft een overzicht van de route reconstructie kwaliteit per traject. De gedetailleerde cijfers zijn terug te vinden in Appendix Tabel B.5.

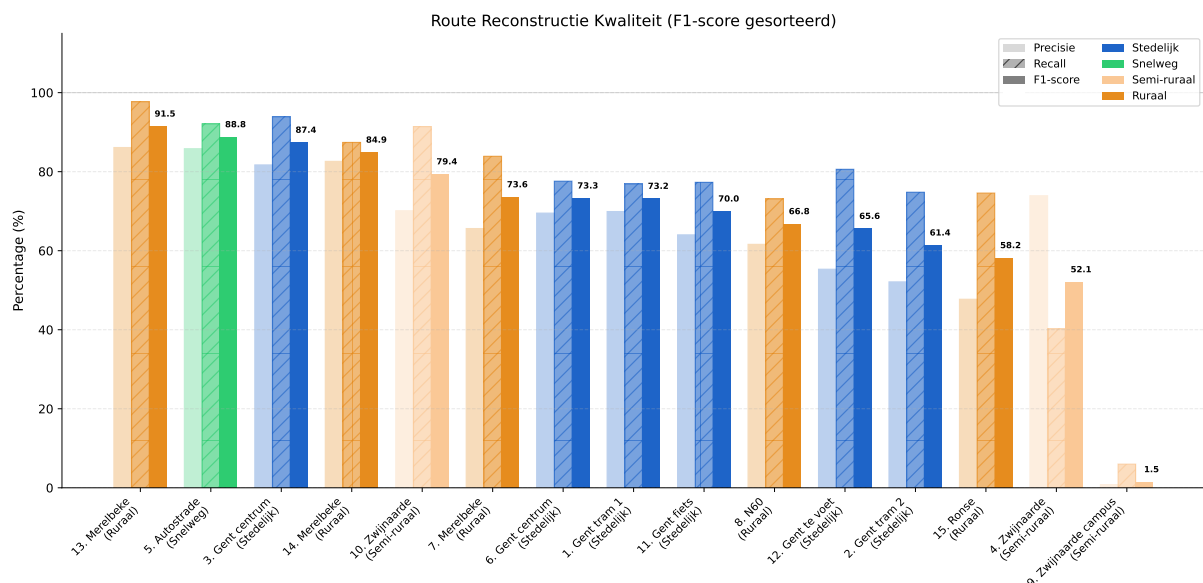


Figure 5.6: Route reconstructie kwaliteit per traject: F1-score (balk), precisie en recall. De trajecten zijn gesorteerd op F1-score.

Analyse De gemiddelde F1-score van 73.3% geeft aan dat het algoritme in de meeste gevallen de correcte route volgt, maar oscillaties en topologische fouten leiden tot significante deviaties. Belangrijkste observaties:

- Beste reconstructie: Trajecten 13 (Merelbeke auto, 91.5%), 5 (autostrade, 88.8%) en 3 (Gent centrum auto, 87.4%). Deze trajecten combineren hoge precisie (correcte routekeuze) met hoge recall (volledige dekking).
- Precisie vs. *Recall* trade-off: *Recall* is gemiddeld hoger (80.1%) dan precisie (69%). Dit wijst erop dat het algoritme meestal de hoofdroute dekt maar extra lussen of oscillaties introduceert die niet overeenkomen met GPS.
- Trajecten met uitzonderlijke resultaten:
 - Traject 9 Zwijnaarde campus: 1.5% F1-score door systematische routefout. Het algoritme slaagt er niet in om op de juiste route te geraken.
 - Traject 4 Zwijnaarde fiets: Lage recall (40.2%) suggereert dat grote delen van de route niet worden gedekt. Dit is veroorzaakt door een brug over de Ringvaart niet in de OSM-dataset aanwezig was, en deze dus ook niet beschikbaar is als graaf. Hierdoor blijft het algoritme vasthangen aan één kant van het water.
 - Traject 15 Ronse: Lage precisie (47.7%) door frequente afwijkingen van correcte route. Een groot deel van de route lijkt precies gereconstrueerd. Ongeveer in het midden zijn er echter enkele grote sprongen, die niet realistisch zijn. Aangezien dit het enige voorval is van dergelijke fouten en het maar over een beperkt stuk van de route gaat, kan dit te wijten zijn aan een *PCI-mapping* fout.

5.5 Herhaalbaarheid

Om de herhaalbaarheid van het positioneringsalgoritme te evalueren, vergelijken we trajecten die dezelfde fysieke route volgen maar op verschillende tijdstippen of met verschillende transportmodi zijn afgelegd.

Tramtrajecten Gent Trajecten 1 en 2 volgen dezelfde tramroute door Gent centrum, afgelegd op verschillende momenten.

Traject	Med. (m)	P75 (m)	P95 (m)	F1 (%)
Tram 1	84	134	223	73.2
Tram 2	96	164	226	61.4
Verschil	12 m	30 m	3 m	–11.8

Table 5.4: Vergelijking van twee tramtrajecten over dezelfde route in Gent.

De mediaan fout verschilt met 12 m (14%) tussen de twee runs. Dit verschil is toe te wijten aan kleine variaties in meetcondities zoals bijvoorbeeld een drukker moment. De P95 blijft vergelijkbaar, wat suggereert dat de grote fouten consistent zijn. Bovendien is duidelijk te zien dat het algoritme dezelfde fouten maakt op beide metingen.



Figure 5.7: Visualisatie van de twee tramtrajecten over dezelfde route. Blauw: Viterbi-schatting, rood gestippeld: GPS.

Merelbeke trajecten Trajecten 13 (auto) en 14 (te voet) volgen grotendeels dezelfde route door Merelbeke, maar met verschillende snelheden en mobiliteitstypes.

Traject	Mobiliteit	Med. (m)	P75 (m)	P95 (m)	F1 (%)
Merelbeke 13	Auto	129	281	475	91.5
Merelbeke 14	Te voet	162	402	856	84.9
Verschil	—	33 m	121 m	381 m	−6.6

Table 5.5: Vergelijking van dezelfde route in Merelbeke, afgelegd per auto en te voet.

Beide trajecten behalen een hoge F1-score: 91.5% (auto) en 84.9% (te voet). Dit toont aan dat het algoritme dezelfde route consistent herkent, ongeacht de transportmodus. De verschillen in mediaan fout (33 m) en P95 (381 m) zijn niet te wijten aan verkeerde routekeuzes, maar aan de karakteristieken van de transportmodi: Opnieuw is te zien dat het algoritme dezelfde fouten maakt.



Figure 5.8: Visualisatie van dezelfde route in Merelbeke, afgelegd per auto en te voet. Blauw: Viterbi-schatting, rood gestippeld: GPS.

De herhaalbaarheidsanalyse toont dat het algoritme consistent presteert met variaties van 10–20% in mediaan fout tussen metingen over dezelfde route. Er kan van uitgegaan worden dat variaties in transportmodus een grotere impact hebben dan temporele variaties bij dezelfde transportmodus.

5.6 Foutenanalyse

Om de oorsprong van positioneringsfouten te achterhalen, worden grote fouten gedefinieerd als alle meetpunten met een fout boven een vaste drempel (300 m, 500 m, 1000 m). Daarnaast wordt gekeken naar fouten als percentage van de maximale fout per traject. De oorsprong van de fouten kan achterhaald worden door *debug*-bestanden te raadplegen. Deze wordt tijdens het uitvoeren van het algoritme aangemaakt en bevat per tijdsvenster o.a.: de gekozen kandidaat met bijbehorende kost, de locatie van de gewogen centroïde, andere overwogen kandidaten met hun kost, en of er een herinitialisatie plaatsvond.

5.6.1 Gebruikte methode

Voor elk tijdsvenster wordt de foutbron geclassificeerd door de centroïde fout (afstand tussen gewogen centroïde en GPS) te vergelijken met de Viterbi fout (afstand tussen Viterbi-positie en GPS). Dit leidt tot drie categorieën:

- Foute centroïde: de gewogen centroïde schatting is ver van GPS (>100 m), terwijl Viterbi de centroïde volgt.
- Viterbi afwijking: de centroïde is dicht bij GPS (<100 m), maar Viterbi wijkt af.
- Beide: zowel centroïde als Viterbi zijn significant fout.

5.6.2 Verdeling van grote fouten

Aangezien stedelijke omgevingen inherent kleinere fouten hebben door hogere celdensiteit, wordt de analyse opgesplitst per omgevingstype. Om een eerlijke vergelijking te maken, worden omgevingsspec-

ifieke drempels gebruikt die schalen met de topologie van het netwerk. Voor stedelijke omgevingen wordt een drempel van >150 m gehanteerd (ongeveer gemiddelde handover-afstand gedeeld door 3). Voor rurale omgevingen wordt deze drempel geschaald >440 m (dezelfde regel als voor stedelijke omgevingen). Figuur 5.9 toont de verdeling. De gedetailleerde resultaten per traject bevinden zich in appendix B.3.

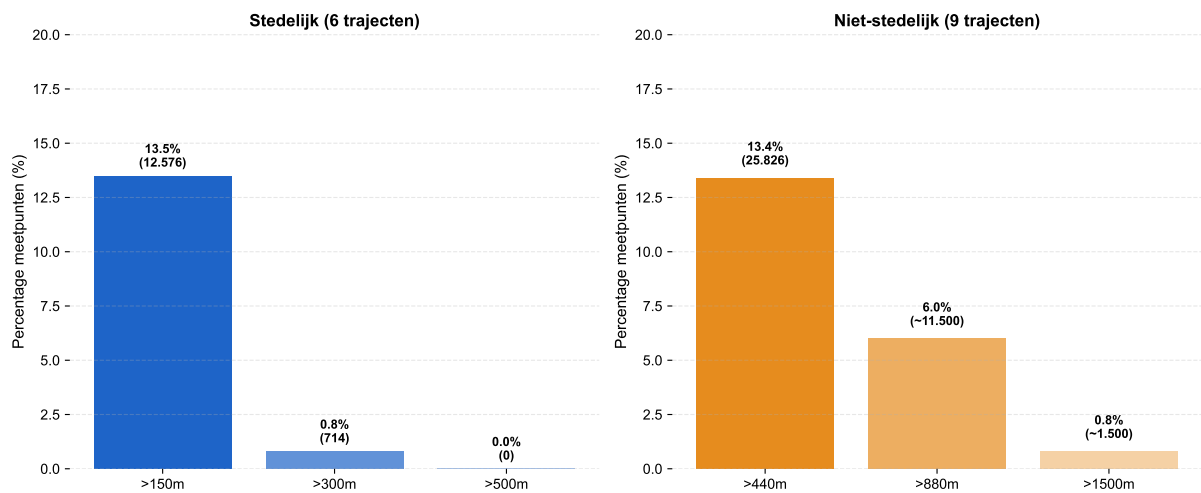


Figure 5.9: Percentage meetpunten boven vaste foutdrempels, opgesplitst per omgevingstype.

5.6.3 Oorsprong van fouten

Figuur 5.10 toont de classificatie van foutbronnen met deze respectievelijke drempels.

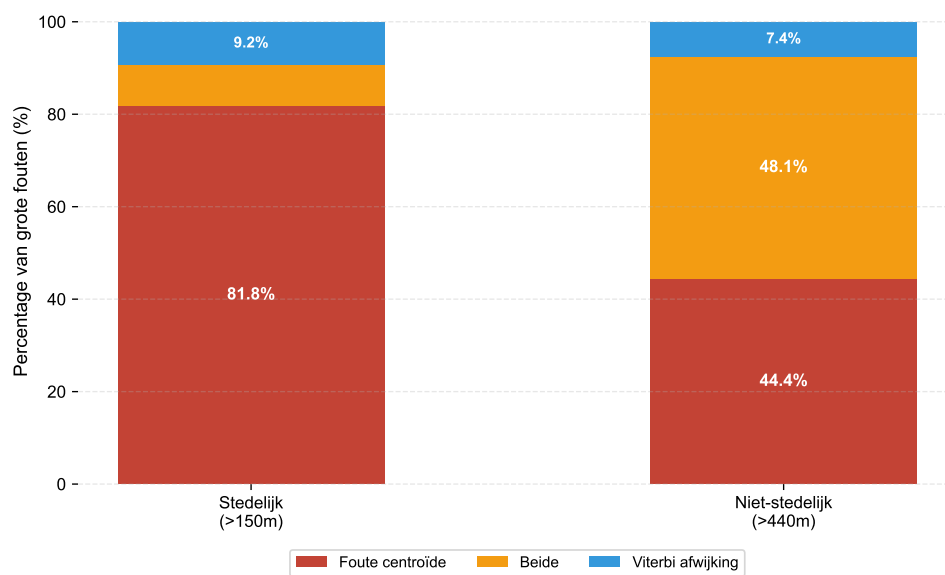


Figure 5.10: Classificatie van foutbronnen per omgevingstype.

Met deze drempels is de foutfrequentie in beide omgevingen vergelijkbaar: 12,6% in stedelijk en 11,7% in ruraal. Het verschil in de verdeling tussen stedelijk en rurale omgevingen is echter te verklaren door de aard van de fouten. In stedelijke omgevingen met hogere celdensiteit en kleinere TA-afstanden is de situatie meer binair: de centroïde is of correct of duidelijk fout, waardoor het Viterbi-algoritme alsnog het juiste wegsegment kan kiezen omdat deze fouten vaak niet lang duren en dus gefilterd worden door het algoritme. In rurale omgevingen is de fout vaker gradueel: de centroïde is niet fout genoeg dat Viterbi een ander segment kiest, maar wel fout genoeg om de uiteindelijke positie te beïnvloeden. Dit resulteert in de hogere "beide" categorie (34% versus 9%).

5.6.4 Clustering van fouten

Grote fouten treden vaak in clusters op. De verdeling per omgevingstype:

- Stedelijk (>150 m): 81 clusters (12,6% van alle meetpunten) met gemiddelde lengte 155 punten.
- Ruraal (>440 m): 46 clusters (11,7% van alle meetpunten) met gemiddelde lengte 561 punten.

Hoewel het percentage foute punten vergelijkbaar is ($\approx 12\%$), is de duur van een fout in rurale gebied gemiddeld 3,6 keer langer. Fouten zijn daar dus minder talrijk (in aantal clusters), maar hardnekkiger als ze optreden.

5.7 Conclusie

De analyse van de resultaten toont aan dat de prestaties van het positioneringssysteem primair worden bepaald door omgevingsfactoren. Stedelijke trajecten presteren met een mediaan fout van 75 m systematisch twee keer beter dan rurale trajecten (158 m). Statistische analyse bevestigt dat de omgeving een significant grotere impact heeft op de nauwkeurigheid dan het mobiliteitstype.

Het Viterbi-algoritme met herstelstrategieën bewijst zijn essentiële waarde in uitdagende scenario's. Zonder deze strategieën faalt het systeem volledig op specifieke rurale en snelwegtrajecten (bijv. N60), waar de fout kan oplopen tot kilometers door het vastlopen van het algoritme. De implementatie van herinitialisatie en vastloop-detectie maakt het systeem robuust tegen gaten in de data en topologische valkuilen.

Wat betreft route reconstructie toont het algoritme een hoge betrouwbaarheid met een gemiddelde F1-score van 73,3%, oplopend tot 91,5% voor bepaalde autotrajecten. Dit impliceert dat het algoritme, zelfs bij een zekere positiefouten, er vaak in slaagt het correcte wegsegment te identificeren. De herhaalbaarheidsanalyse bevestigt bovendien de stabiliteit van het systeem.

Desondanks identificeert de foutenanalyse de gewogen centroïde-schatting als het primaire knelpunt. In rurale gebieden valt 34% van de grote fouten in de categorie waarbij zowel de centroïde als het Viterbi-pad (volgt de centroïde met een zekere vertraging) afwijken. Dit suggereert dat de input kwaliteit in deze regio's onvoldoende is om het algoritme correct te sturen. Verdere verbeteringen dienen zich dan ook te focussen op het verhogen van de kwaliteit van de initiële centroïde, bijvoorbeeld door betere *mapping* van cellocaties of integratie van extra netwerkparameters.

Dit hoofdstuk plaatst de resultaten van dit onderzoek in de context van bestaande literatuur en bespreekt de implicaties, beperkingen en mogelijkheden voor toekomstig onderzoek.

6.1 Vergelijking met literatuur

Tabel 6.1 vergelijkt de resultaten van dit onderzoek met relevante studies uit de literatuur.

Studie	Methode	Mediaan/RMSE	Netwerk	Omgeving
Trogh et al. [5]	TA + map-matching	112 m mediaan	3G	Stedelijk
Tedeschini et al. [16]	ToA (zonder compensatie)	111 m RMSE	5G n78	Stedelijk
Tedeschini et al. [16]	ToA + EKF klokcompensatie	8 m RMSE	5G n78	Stedelijk
Dit werk	TA + Viterbi	75 m mediaan 105 m RMSE	5G n78	Stedelijk
Dit werk	TA + Viterbi	117 m mediaan	5G n78	Gemengd

Table 6.1: Vergelijking positioneringsnauwkeurigheid met literatuur.

Vergelijking met Trogh et al. Trogh et al. [5] behaalden een mediaan fout van 112 m met 3G TA en map-matching in stedelijk Gent. Dit onderzoek behaalt gemiddeld 75 m mediaan in vergelijkbare stedelijke scenario's (Gent centrum), een verbetering van 33%. De verbetering is te verklaren door:

- TA-granulariteit: 5G NR heeft een fijnere TA-granulariteit (39 m vs. 234 m voor 3G).
- Celdensiteit: Hogere celdensiteit in huidige netwerken door 5G NR uitrol. 5G werkt doorgaans op een hogere frequentie waardoor de afstand theoretisch beperkter is en er dus een dichtere cellenstructuur is.

Vergelijking met Tedeschini et al. Tedeschini et al. [16] rapporteerden 111 m RMSE zonder klokcompensatie in het Vodafone 5G-netwerk in Milaan. Dit onderzoek behaalt een RMSE van 105 m in stedelijke omgevingen, wat aantoont dat de prestaties vergelijkbaar en zelfs iets nauwkeuriger zijn dan state-of-the-art resultaten.

Met *Extended Kalman Filter* (EKF) tracking van klokoffset en -skew, kan een theoretische fout van 8 m RMSE worden behaald. Deze techniek vereist echter: (i) Toegang tot meerdere ToA-metingen per tijdstip. (ii) Significante post-processing die de klokoffset en -skew continu bepaalt en bijstuurt.

De TA-gebaseerde Viterbi-aanpak in dit onderzoek werkt direct op standaard UE logboeken zonder enige netwerkaanpassingen of zware *post-processing*.

6.2 Inzichten

- Er is een duidelijk verschil tussen stedelijke en rurale omgevingen. Dit kan hoofdzakelijk worden verklaard door volgende twee redenen:
 1. TA heeft een inherente granulariteit. Daarbovenop bezit TA ook een fout. De variatie in deze fout wordt groter naar mate de UE zich verder van het basisstation bevindt.
 2. Rurale omgevingen hebben een lagere celdensiteit, wat de geometrische spreiding van basisstations verslechtert (hogere GDOP). In tegenstelling tot steden waar masten de UE omringen, staan ze hier vaak op grote afstand of lineair opgesteld, waardoor de positiebepaling minder nauwkeurig is.
- De afwezigheid van een actieve (FTP-)download beperkt de dataoverdracht tussen UE en 5G *serving cell*. Hierdoor is de TA-parameter niet continu beschikbaar. Ondanks dit effect kan het algoritme goed overweg met eventuele gaps.
- Door de manuele PCI mapping worden buurcellen over het hoofd gezien. Dit kan een grote impact hebben op de positioneringsnauwkeurigheid door de hierboven vermelde redenen. Toegang tot een database met basisstationinformatie is gewenst.
- Omgeving heeft een significant groter effect op de nauwkeurigheid van de positiebepaling dan het mobiliteitstype.

6.3 Beperkingen

- Beperkt tot een enkele ToA meting per tijdsvenster. De combinatie van ToA metingen van verschillende basisstations zou meer inzicht kunnen geven in de mogelijke bijkomende nauwkeurigheid en eventuele synchronisatiefouten.
- Geografische *scope* beperkt zich tot de regio Gent, met een enkele meting in Ronse. Om uitgebreide statistiek te kunnen leveren zijn bijkomende trajectmetingen nodig in meer uiteenlopende omgevingen.
- Beperkte variatie aan frequentiebanden doordat de TA enkel afkomstig is van de 5G *serving cell*. De 5G NR band n78 (3.5 GHz) domineert met 68%, gevolgd door n1 (2.1 GHz) met 29%. Zoals ondervonden in de data-analyse is de TA-fout ook afhankelijk van de gebruikte frequentieband, met een grotere fout bij hogere frequenties.
- Geen indoor metingen. De dataset bevat alleen trajecten die in open lucht plaatsvonden. De trajecten in de wagen of tram geven hier geen relevante inzichten in het verschil tussen indoor en open lucht.
- Sommige gebieden (campus, brug over Ringvaart) hebben onvolledige OpenStreetMap dekking, wat map-matching bemoeilijkt en een directe belemmering op het algoritme oplegt.

6.4 Toekomstig onderzoek

- Integratie van het herkennen van de individuele *beams* in het algoritme om een nauwkeurigere sectie af te bakenen en zo vroegtijdig een groot aantal kandidaten uit te sluiten.
- Automatische herkenning van het mobiliteitstype en omgeving om de parameters *real-time* aan te passen naar de correcte preset.
- Real-time implementatie: uitgebreide evaluatie van verwerkingstijd, rekenkracht en geheugengebruik voor mogelijke *edge computing*.
- Implementatie en effect van meerdere ToA metingen per tijdsvenster achterhalen.

Conclusie

Dit onderzoek had als doel de haalbaarheid en nauwkeurigheid te evalueren van een passieve, netwerk-gebaseerde positioneringsmethode voor 5G-netwerken, gebruikmakend van standaard beschikbare parameters zoals *Timing Advance* en cel-identificaties. In een tijdperk waar locatiegegevens cruciaal zijn voor zowel veiligheidstoepassingen (E112) als commerciële diensten, biedt een oplossing die onafhankelijk is van GNSS een waardevolle redundantie.

7.1 Samenvatting van de bevindingen

Het ontwikkelde systeem, gebaseerd op een adaptief Viterbi-algoritme, toont aan dat significante nauwkeurigheidswinsten mogelijk zijn ten opzichte van de standaard Cell-ID methode, zonder dat hiervoor aanpassingen aan het netwerk of de gebruikerstoestellen nodig zijn.

Nauwkeurigheid In stedelijke omgevingen (Gent centrum) behaalde het algoritme een mediane fout van 75 meter. Dit is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de standaard 500+ meter onzekerheid bij pure cel-identificatie en is competitief met complexere, actieve *Time of Arrival* (ToA) methoden uit de literatuur. Over alle gemengde scenario's heen (stedelijk, ruraal, snelweg) werd een mediane fout van 117 meter gerealiseerd.

Methodologie De tweefasen-architectuur bleek effectief:

1. Fase 1 (Gewogen Centroïde): De introductie van een kubisch gewogen overlapmodel zorgt voor een robuuste initiële schatting, vooral in gebieden met hoge celdensiteit.
2. Fase 2 (Viterbi Optimalisatie): Het toepassen van een Hidden Markov Model (HMM) met fysieke bewegingsbeperkingen en map-matching (via OpenStreetMap) reduceert grote uitschieters significant. De toevoeging van herstelstrategieën zorgt ervoor dat het algoritme zo accuraat mogelijk blijft bij signaalonderbrekingen of onjuiste kaartdata.

7.2 Beperkingen en uitdagingen

Ondanks de resultaten, brengt het onderzoek ook duidelijke beperkingen aan het licht:

- **Data-kwaliteit en PCI Mapping:** De grootste knelpunten zijn de beschikbaarheid van accurate mast-locaties. Het manueel mappen van *Physical Cell Identities* (PCI) naar fysieke locaties is foutgevoelig en niet schaalbaar. In alle gevallen ontbreekt essentiële locatie-informatie. Toegang tot een accurate, operator-beheerde database is essentieel voor een operationele uitrol.
- **Omgevingsinvloeden:** In rurale gebieden met lage celdensiteit nemen de prestaties af door de hogere *Geometric Dilution of Precision* (GDOP) en de grotere variatie in fout van de TA-waarden bij grotere afstanden.

- Algoritmische complexiteit: Hoewel Viterbi verbeterde resultaten levert ten opzichte van de baseline, is de rekencomplexiteit aanzienlijk hoger dan die van de baseline. Voor *real-time* moet verder onderzoek gedaan worden naar rekenbenodigdheden.

7.3 Toekomstperspectief

De technologie is matuur genoeg om als basis te dienen voor verdere optimalisaties, die voornamelijk liggen in de integratie van rijkere data die nu nog vaak achter operator-specifieke *interfaces* zit: Het gebruik van *Synchronization Signal Block* (SSB) indices kan de sectoren verder verfijnen van 120° naar smalle beams van $10\text{-}20^\circ$, wat de hoekonzekerheid drastisch zou kunnen verminderen. De integratie van *Positioning Reference Signals* (PRS) uit 5G Release 16 zou multilateratie mogelijk maken, wat de afhankelijkheid van weging en map-matching kan verminderen.

Maatschappelijke reflectie

Technologische innovaties in telecommunicatie hebben een diepgaande impact op de samenleving. 5G wordt vaak gepositioneerd als een fundamentele facilitator voor de vierde industriële revolutie. Binnen deze context is nauwkeurige positiebepaling geen louter technische parameter, maar een functionaliteit met directe gevolgen voor veiligheid, privacy en duurzaamheid. Dit hoofdstuk reflecteert op de maatschappelijke relevantie van dit onderzoek.

8.1 Veiligheid

De primaire drijfveer achter de standaardisatie van cellulaire positionering was historisch gezien niet commercieel, maar wettelijk verplicht voor noodhulpdiensten. In de Verenigde Staten (E911) en Europa (E112) zijn mobiele operatoren verplicht om de locatie van een noodoproep met een bepaalde nauwkeurigheid door te geven aan de hulpcentrales [4]. In noodsituaties is *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) soms niet beschikbaar of betrouwbaar, bijvoorbeeld binnenshuis, in diepe stadsregio's (urban canyons), of wanneer de batterij van het toestel bijna leeg is. De netwerk-gebaseerde aanpak die in deze thesis is onderzocht, biedt hier een cruciale redundantie. De verbetering van de positioneringsnauwkeurigheid van ≈ 500 m (cel-ID) naar ≈ 75 m (Viterbi-methode) kan in een noodsituatie een significant verschil betekenen. Het stelt hulpdiensten in staat om sneller te reageren, zelfs wanneer de gebruiker zelf niet in staat is om zijn locatie te communiceren.

8.2 Privacy

De keerzijde van nauwkeurige netwerk-gebaseerde positionering is de impact op privacy. In tegenstelling tot GNSS, waar de positieberekening op het toestel zelf gebeurt, stelt de in dit onderzoek gebruikte data (RRC logs, Timing Advance) de netwerkoperator in staat om de locatie van gebruikers te bepalen. Als operatoren in staat zijn om met hoge nauwkeurigheid (≈ 100 m) de verplaatsingen van gebruikers te reconstrueren, kunnen gedetailleerde mobiliteitsprofielen worden opgesteld. Dit roept ethische vragen op over dataminimalisatie en doelbinding, kernprincipes van de Algemene Verordening Gegevensbescherming (AVG/GDPR). Hoewel dit onderzoek zich richt op technische haalbaarheid, onderstreept het de noodzaak voor strikte regulering rond de toegang tot deze data. De techniek is neutraal, maar de toepassing ervan vereist een maatschappelijk kader dat misbruik voorkomt. Het gebruik van map-matching algoritmen zoals Viterbi maakt de data bovendien leesbaarder en dus privacygevoeliger, omdat ruwe coördinaten worden vertaald naar logische routes en dus mogelijks adressen.

8.3 Duurzaamheid en slimme mobiliteit

Op vlak van duurzaamheid draagt nauwkeurige positionering bij aan efficiëntere transportsystemen. De transportsector is verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de globale CO₂-uitstoot.

De ontwikkelde algoritmen kunnen worden ingezet voor:

- **Energie-efficiëntie:** GNSS zijn relatief energie-intensief omdat de ontvanger continu signalen van meerdere satellieten moet verwerken. De in dit onderzoek voorgestelde methode is daarentegen passief; het maakt gebruik van signalen die de modem sowieso verwerkt om verbonden te blijven met het netwerk. Hierdoor is het energieverlies op het toestel verwaarloosbaar. De zwaardere rekenlast van het Viterbi-algoritme wordt verplaatst van het toestel naar de cloud of *edge*-servers, waar energie efficiënter kan worden beheerd.
- **Traffic Management:** Door anonieme, geaggregeerde inzichten in verkeersstromen kunnen steden verkeerslichten en weginfrastructuur optimaliseren zonder dure sensoren te installeren.
- **Intelligente transportsystemen (ITS):** Voor toekomstige toepassingen is de redundantie die het 5G-netwerk biedt essentieel wanneer satellietverbindingen wegvallen.

Bibliography

- [1] Z. Chaloupka, "Technology and standardization gaps for high accuracy positioning in 5g," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 59–65, 2017.
- [2] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1g to 5g," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [3] Federal Communications Commission, "Wireless e911 location accuracy requirements; fourth report and order," Tech. Rep. FCC 15-9, Federal Communications Commission, Jan. 2015.
- [4] "Commission delegated regulation (eu) 2019/320 supplementing directive 2014/53/eu with regard to the application of the essential requirements referred to in article 3(3)(g) in order to ensure caller location in emergency communications from mobile devices," 2019.
- [5] J. Trogh, D. Plets, E. Surewaard, M. Spiessens, M. Versichele, L. Martens, and W. Joseph, "Outdoor location tracking of mobile devices in cellular networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019.
- [6] S. Fischer, "Observed time difference of arrival (otdoa) positioning in 3gpp lte," *Qualcomm Technologies, Inc.*, 2014. Technical overview of OTDOA positioning showing accuracy dependency on geometric dilution of precision (GDOP) which increases significantly in rural deployments.
- [7] J. A. del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, F. Zanier, and M. Crisci, "Evaluation of the lte positioning capabilities under typical multipath channels," in *6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*, pp. 139–146, 2012. Analyzes LTE positioning accuracy under different channel models including urban and rural scenarios.
- [8] P. Newson and J. Krumm, "Hidden markov map matching through noise and sparseness," in *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (GIS '09)*, (Seattle, WA, USA), pp. 336–343, ACM, 2009.
- [9] Rohde & Schwarz, "Qualipoc android – network data collection," 2024.
- [10] "NR; Physical channels and modulation," Tech. Rep. 3GPP TS 38.211 V18.4.0 (2024-09), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sept. 2024. Release 18 – Defines SSB structure, PSS/SSS/P-BCH signals, and physical layer specifications for 5G NR.
- [11] "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)," Tech. Rep. 3GPP TR 38.901 V15.1.0 (2019-09), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sept. 2019.
- [12] "5G; NR; Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN," Tech. Rep. ETSI TS 138 305 V15.0.0 (2018-09), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sept. 2018.
- [13] "NR; Physical layer procedures for control," Tech. Rep. 3GPP TS 38.213 V18.4.0 (2024-09), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sept. 2024. Release 18.
- [14] 3GPP, "About 3gpp," 2024. General information about 3GPP organization and release process.
- [15] "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN," Tech. Rep. ETSI TS 136 305 V15.0.0 (2018-07), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), July 2018.
- [16] B. C. Tedeschini, M. Martalò, M. Brambilla, and M. Nicoli, "A feasibility study of 5g positioning with current cellular network deployment," *Scientific Reports*, vol. 13, p. 12731, 2023.

- [17] Y. Lou, C. Zhang, Y. Zheng, X. Xie, W. Wang, and Y. Huang, "Map-matching for low-sampling-rate gps trajectories," in *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (GIS '09)*, (Seattle, WA, USA), pp. 352–361, ACM, 2009.
- [18] M. Koivisto, M. Costa, J. Werner, K. Heiska, J. Talvitie, and M. Valkama, "Joint device positioning and clock synchronization in 5g ultra-dense networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 2866–2881, 2017.
- [19] M. Koivisto, M. Costa, J. Werner, K. Heiska, J. Talvitie, K. Leppänen, V. Koivunen, and M. Valkama, "Joint 3d positioning and network synchronization in 5g ultra-dense networks using ukf and ekf," in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–7, 2016.
- [20] Z. D. Shakir, J. Zec, and I. Kostanic, "Position location based on measurement reports in lte cellular networks," in *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, pp. 1–6, 2018.
- [21] MathWorks, "5g toolbox," 2024. MATLAB toolbox for 5G NR simulation and testing.
- [22] NS-3 Consortium, "Ns-3 network simulator," 2024. Discrete-event network simulator for research and education.
- [23] F. Roma *et al.*, "From experiments to insights: A journey in 5g positioning with software defined radios," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2023. IMDEA Networks Institute.
- [24] S. S. Cherian and A. N. Rudrapatna, "Lte location technologies and delivery solutions," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 175–194, 2014. Comprehensive overview of LTE location-based services and use cases.
- [25] R. J. Koester, *Lost Person Behavior: A Search and Rescue Guide on Where to Look – for Land, Air and Water*. PhD thesis, University of Portsmouth, 2008. dbS Productions.
- [26] Rohde & Schwarz, "Romes4 network testing software," 2024. Professional network testing and analysis software for mobile networks.
- [27] Python Software Foundation, "Python programming language," 2024. General-purpose programming language used for data analysis and algorithm implementation.
- [28] U.S. Government, "Gps accuracy," 2024. Official GPS performance specifications: civilian GPS horizontal accuracy is typically 3-5 meters under open sky conditions.
- [29] Departement Omgeving, Vlaamse Overheid, "Zendantennes – open data portaal vlaanderen," 2024. Database van zendantennes in Vlaanderen, toegankelijk via SPARQL endpoint.
- [30] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2nd ed., 2002. Standard reference for wireless propagation models including one-slope path loss model.
- [31] Z. Shakir, "Geolocation based on signal level measurement and time advance inside the network," master's thesis, Florida Institute of Technology, 2020. Analysis of TA and RSRP influence on LTE geolocation accuracy.
- [32] H. Ren, W. Liu, Z. Deng, K. Luo, Z. Ma, and J. Wang, "Rsrp-assisted 5g measurement time-based position method," in *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3581, 2023. 5G TOA positioning method assisted by RSRP information to compensate for Tx-Rx delay errors.
- [33] J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977. Seminal work introducing the IQR (Interquartile Range) method for outlier detection.
- [34] P. J. Huber, *Robust Statistics*. John Wiley & Sons, 1981. Standard reference for robust estimation of location and scale parameters in the presence of outliers.
- [35] OpenStreetMap contributors, "Openstreetmap," 2024. Collaborative open-source geographic database.

- [36] A. A. Hagberg, D. A. Schult, and P. J. Swart, "Networkx: Network analysis in python," 2024. Python library for the creation, manipulation, and study of complex networks.
- [37] S. J. Bhat, K. K. S. Kumar, and M. R. Gupta, "Weighted centroid localization algorithm: Theoretical analysis and distributed implementation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, pp. 3403–3413, Oct. 2011.
- [38] A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, pp. 260–269, Apr. 1967.
- [39] B. T. Lowerre, *The HARPY Speech Recognition System*. Doctoral dissertation, Carnegie-Mellon University, 1976.
- [40] R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925. Foundational work establishing Analysis of Variance (ANOVA).



SQL Schema

```
1 CREATE TABLE measurement (
2   measurement_id BIGINT PRIMARY KEY,
3   quali_poc_version VARCHAR,
4   qdi_version VARCHAR,
5   username VARCHAR,
6   vehicle_name VARCHAR,
7   tz_offset_hours DOUBLE,
8   start_utc TIMESTAMP,
9   duration VARCHAR,
10  comment VARCHAR,
11  area VARCHAR
12 );
13
14 CREATE TABLE samples (
15   sample_id BIGINT PRIMARY KEY,
16   measurement_id BIGINT NOT NULL
17   REFERENCES measurement,
18   ts_local VARCHAR,
19   ts_absolute TIMESTAMP,
20   latitude DOUBLE,
21   longitude DOUBLE,
22   nr_serv_pci DOUBLE,
23   lte_neigh_count DOUBLE
24 );
25
26 CREATE TABLE lte_serving_pcell (
27   sample_id BIGINT PRIMARY KEY
28   REFERENCES samples,
29   measurement_id BIGINT NOT NULL
30   REFERENCES measurement,
31   enodeb_id DOUBLE,
32   pci DOUBLE,
33   rsrp_dbm DOUBLE,
34   rsrq_db DOUBLE,
35   sinr_db DOUBLE,
36   band_raw VARCHAR,
37   band_nr DOUBLE,
38   duplex VARCHAR,
39   distance_to_tower_m DOUBLE
40 );
41
42 CREATE TABLE lte_serving_scells (
43   sample_id BIGINT NOT NULL
44   REFERENCES samples,
45   measurement_id BIGINT NOT NULL
46   REFERENCES measurement,
47   scell_idx INTEGER
48   CHECK (scell_idx BETWEEN 1 AND 3),
49   pci DOUBLE,
50   rsrp_dbm DOUBLE,
51   rsrq_db DOUBLE,
52   sinr_db DOUBLE,
53   band_raw VARCHAR,
54   band_nr DOUBLE,
55   duplex VARCHAR,
56   distance_to_tower_m DOUBLE,
57   PRIMARY KEY (sample_id, scell_idx)
58 );
59
60 CREATE TABLE lte_neighbours (
61   sample_id BIGINT NOT NULL
62   REFERENCES samples,
63   measurement_id BIGINT NOT NULL
64   REFERENCES measurement,
65   rank INTEGER
66   CHECK (rank BETWEEN 1 AND 8),
67   phy_cell_id DOUBLE,
68   rsrp_dbm DOUBLE,
69   rsrq_db DOUBLE,
70   rssi_dbm DOUBLE,
71   distance_to_tower_m DOUBLE,
72   PRIMARY KEY (sample_id, rank)
73 );
74
75 CREATE TABLE nr_serving (
76   sample_id BIGINT PRIMARY KEY
77   REFERENCES samples,
78   measurement_id BIGINT NOT NULL
79   REFERENCES measurement,
80   pci_carrier_pcell DOUBLE,
81   ss_rsrp_dbm DOUBLE,
82   ss_rsrq_db DOUBLE,
83   ss_sinr_db DOUBLE,
84   timing_advance_ns DOUBLE,
85   pusch_pathloss_db DOUBLE,
86   band_pcell_raw VARCHAR,
87   band_pcell_nr VARCHAR,
88   distance_to_tower_m DOUBLE
89 );
90
91 CREATE TABLE nr_scells (
92   sample_id BIGINT NOT NULL
93   REFERENCES samples,
94   measurement_id BIGINT NOT NULL
95   REFERENCES measurement,
96   scell_idx INTEGER
97   CHECK (scell_idx >= 1),
98   pci DOUBLE,
99   ss_rsrp_dbm DOUBLE,
100  ss_rsrq_db DOUBLE,
101  ss_sinr_db DOUBLE,
102  timing_advance_ns DOUBLE,
103  pusch_pathloss_db DOUBLE,
104  band_raw VARCHAR,
105  band_nr VARCHAR,
106  PRIMARY KEY (sample_id, scell_idx)
107 );
108
109 CREATE TABLE cell_locations (
110   enodeb_id BIGINT,
111   pci_1 BIGINT,
112   pci_2 BIGINT,
113   pci_3 BIGINT,
114   pci_4 BIGINT,
115   azimuth_1 DOUBLE,
116   azimuth_2 DOUBLE,
117   azimuth_3 DOUBLE,
118   azimuth_4 DOUBLE,
119   latitude DOUBLE,
120   longitude DOUBLE,
121   location_source VARCHAR,
122   PRIMARY KEY (enodeb_id, location_source)
123 );
```

Gedetailleerde Resultaten

B.1 Gewogen Centroïde Baseline

Tabel B.1 toont de gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van de gewogen centroïde methode voor alle 15 trajecten.

ID	Traject	Omgeving	Mob.	Med. (m)	P75 (m)	P95 (m)	<50m (%)	<100m (%)	<300m (%)
Stedelijk									
1	Gent tram 1	Stedelijk	Tram	91	145	231	25	54	96
2	Gent tram 2	Stedelijk	Tram	99	169	248	17	50	98
3	Gent centrum	Stedelijk	Auto	93	146	252	22	53	97
6	Gent centrum	Stedelijk	Voet	77	117	236	27	65	98
11	Gent fiets	Stedelijk	Fiets	78	128	264	31	60	97
12	Gent te voet	Stedelijk	Voet	67	104	264	36	73	95
<i>Gem. Stedelijk</i>				84	135	249	26	59	97
Snelweg									
5	E17/E40 regio Gent	Snelweg	Auto	152	356	938	14	36	69
8	N60	Snelweg	Auto	221	517	1078	10	24	60
<i>Gem. Snelweg</i>				187	437	1008	12	30	65
Semi-ruraal									
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	221	448	766	14	27	58
9	Zwijnaarde campus	Semi-ruraal	Voet	212	297	517	4	16	74
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	119	212	419	23	41	86
<i>Gem. Semi-ruraal</i>				184	319	567	14	28	73
Ruraal									
7	Merelbeke	Ruraal	Voet	149	244	364	14	33	83
13	Merelbeke	Ruraal	Auto	126	294	848	23	43	75
14	Merelbeke	Ruraal	Voet	176	321	523	13	28	70
15	Ronse	Ruraal	Auto	241	599	1346	9	21	55
<i>Gem. Ruraal</i>				173	365	770	15	31	71
Totaal gemiddeld				125	239	586	18	41	81

Table B.1: Gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van de gewogen centroïde methode per traject. Afstanden in meters ten opzichte van GPS ground truth.

B.2 Viterbi Map-Matching

Tabel B.2 toont de gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van het Viterbi algoritme voor alle 15 trajecten.

ID	Traject	Omgeving	Mob.	Vensters	Med. (m)	P75 (m)	P95 (m)	<50m (%)	<100m (%)	<300m (%)
Stedelijk										
1	Gent tram 1	Stedelijk	Tram	937	84	134	223	24	57	97
2	Gent tram 2	Stedelijk	Tram	862	96	164	226	18	49	98
3	Gent centrum	Stedelijk	Auto	595	74	111	168	21	52	97
6	Gent centrum	Stedelijk	Voet	1710	63	97	156	27	65	98
11	Gent fiets	Stedelijk	Fiets	844	64	115	215	32	62	97
12	Gent te voet	Stedelijk	Voet	600	68	90	135	36	72	95
<i>Gem. Stedelijk</i>					75	119	187	26	60	97
Snelweg										
5	E17/E40 regio Gent	Snelweg	Auto	436	63	113	449	15	37	67
8	N60	Snelweg	Auto	856	196	369	1202	9	23	54
<i>Gem. Snelweg</i>					130	241	826	12	30	61
Semi-ruraal										
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	551	243	360	593	15	27	59
9	Zwijnaarde campus	Semi-ruraal	Voet	1059	272	366	489	5	15	72
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	1007	124	213	341	22	41	85
<i>Gem. Semi-ruraal</i>					213	313	474	14	28	72
Ruraal										
7	Merelbeke	Ruraal	Voet	1746	148	233	475	14	33	84
13	Merelbeke	Ruraal	Auto	1372	129	281	475	20	39	75
14	Merelbeke	Ruraal	Voet	2418	206	402	856	13	30	74
15	Ronse	Ruraal	Auto	1114	206	375	1057	11	21	51
<i>Gem. Ruraal</i>					172	323	716	15	31	71
Totaal gemiddeld					124	224	507	18	40	80

Table B.2: Gedetailleerde positioneringsnauwkeurigheid van het Viterbi algoritme per traject. Afstanden in meters ten opzichte van GPS ground truth.

B.3 Foutenanalyse

Tabel B.3 toont de verdeling van grote fouten per traject.

ID	Traject	Omgeving	Punten	>150m	>300m	>500m/>440m*	>1000m
Stedelijk							
1	Gent tram 1	Stedelijk	16.895	2.188 (13,0%)	513 (3,0%)	0	0
2	Gent tram 2	Stedelijk	14.662	2.601 (17,7%)	201 (1,4%)	0	0
3	Gent centrum	Stedelijk	9.035	1.326 (14,7%)	0	0	0
6	Gent centrum	Stedelijk	27.024	3.162 (11,7%)	0	0	0
11	Gent fiets	Stedelijk	14.471	1.927 (13,3%)	0	0	0
12	Gent te voet	Stedelijk	11.126	1.372 (12,3%)	0	0	0
<i>Subtotaal Stedelijk</i>				12.576 (13,5%)	714 (0,8%)	0	0
Ruraal							
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	10.351	–	3.867 (37,4%)	1.713 (16,6%)	0
5	E17/E40	Snelweg	9.147	–	767 (8,4%)	516 (5,6%)	41 (0,4%)
7	Merelbeke	Ruraal	29.377	–	7.106 (24,2%)	3.671 (12,5%)	0
8	N60	Snelweg	17.559	–	5.965 (34,0%)	2.835 (16,1%)	951 (5,4%)
9	Zwijnaarde camp	Semi-ruraal	18.746	–	6.429 (34,3%)	3.139 (16,8%)	0
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	17.446	–	726 (4,2%)	0	0
13	Merelbeke	Ruraal	22.829	–	3.394 (14,9%)	1.482 (6,5%)	100 (0,4%)
14	Merelbeke	Ruraal	42.463	–	12.950 (30,5%)	7.496 (17,7%)	0
15	Ronse	Ruraal	24.973	–	10.027 (40,1%)	4.974 (19,9%)	1.926 (7,7%)
<i>Subtotaal ruraal</i>				–	51.231 (26,6%)	25.826 (13,4%)	3.018 (1,5%)

Table B.3: Gedetailleerde verdeling van grote fouten per traject. *Voor rurale omgevingen wordt een drempel van >440 m gehanteerd in de derde kolom en >500 m voor stedelijke omgevingen.

Tabel B.4 toont de classificatie van foutbronnen voor de omgevings specifieke drempels (>150 m voor stedelijk, >440 m voor rurale omgevingen).

ID	Traject	Omgeving	Totaal >Drempel	Centroïde	Beide	Viterbi
Stedelijk (> 150 m)						
1	Gent tram 1	Stedelijk	3.474	2.712 (78,1%)	421 (12,1%)	341 (9,8%)
2	Gent tram 2	Stedelijk	4.265	4.191 (98,3%)	12 (0,3%)	62 (1,5%)
3	Gent centrum	Stedelijk	721	690 (95,7%)	0 (0,0%)	31 (4,3%)
6	Gent centrum	Stedelijk	1.704	1.306 (76,6%)	198 (11,6%)	200 (11,7%)
11	Gent fiets	Stedelijk	2.057	1.154 (56,1%)	519 (25,2%)	384 (18,7%)
12	Gent te voet	Stedelijk	355	235 (66,2%)	13 (3,7%)	107 (30,1%)
Subtotaal Stedelijk			12.576	10.288 (81,8%)	1.163 (9,2%)	1.125 (8,9%)
Ruraal (> 440 m)						
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	1.713	814 (47,5%)	899 (52,5%)	0 (0,0%)
5	E17/E40	Snelweg	516	23 (4,5%)	194 (37,6%)	298 (57,8%)
7	Merelbeke	Ruraal	3.671	787 (21,4%)	2.818 (76,8%)	66 (1,8%)
8	N60	Snelweg	2.835	1.366 (48,2%)	1.253 (44,2%)	216 (7,6%)
9	Zwijnaarde camp	Semi-ruraal	3.139	2.152 (68,6%)	537 (17,1%)	450 (14,3%)
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	0	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
13	Merelbeke	Ruraal	1.482	1.101 (74,3%)	79 (5,3%)	302 (20,4%)
14	Merelbeke	Ruraal	7.496	1.823 (24,3%)	4.886 (65,2%)	787 (10,5%)
15	Ronse	Ruraal	4.974	3.401 (68,4%)	1.533 (30,8%)	40 (0,8%)
Subtotaal ruraal			25.826	11.467 (44,4%)	12.429 (48,1%)	1.919 (7,4%)

Table B.4: Classificatie van foutbronnen voor fouten boven de omgevingsspecifieke drempel (>150 m stedelijk, >440 m ruraal) per traject. Centroïde = foute centroïde schatting; Beide = zowel centroïde als Viterbi fout; Viterbi = Viterbi afwijking van correcte centroïde.

B.4 Route Reconstructie Kwaliteit

ID	Traject	Omgeving	Mob.	Prec.	Recall	F1
1	Gent tram 1	Stedelijk	Tram	69.9%	76.9%	73.2%
2	Gent tram 2	Stedelijk	Tram	52.1%	74.8%	61.4%
3	Gent centrum	Stedelijk	Auto	81.7%	93.9%	87.4%
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	73.9%	40.2%	52.1%
5	Autostrade	Snelweg	Auto	85.8%	92.1%	88.8%
6	Gent centrum	Stedelijk	Voet	69.5%	77.6%	73.3%
7	Merelbeke	Ruraal	Voet	65.6%	83.9%	73.6%
8	N60	Ruraal	Auto	61.6%	73.1%	66.8%
9	Zwijnaarde campus	Semi-ruraal	Voet	0.8%	6.0%	1.5%
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	Fiets	70.1%	91.4%	79.4%
11	Gent fiets	Stedelijk	Fiets	64.0%	77.3%	70.0%
12	Gent te voet	Stedelijk	Voet	55.3%	80.6%	65.6%
13	Merelbeke	Ruraal	Auto	86.1%	97.7%	91.5%
14	Merelbeke	Ruraal	Voet	82.6%	87.4%	84.9%
15	Ronse	Ruraal	Auto	47.7%	74.6%	58.2%
Gemiddeld (excl. traject 9)				69%	80.1%	73.3%

Table B.5: Gedetailleerde route reconstructie resultaten per traject: precisie (correctheid), recall (dekking) en F1-score (kwaliteit). Buffer: 20 m.

B.5 Effect Herstelstrategieën

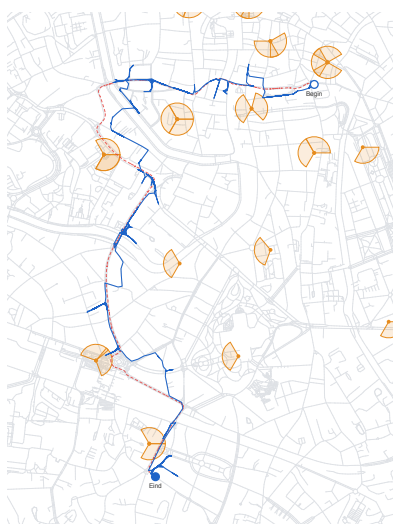
Tabel B.6 toont het effect van de herstelstrategieën (herinitialisatie, vastloop detectie, centroïde inhalen) op de mediaan positioneringsfout voor alle trajecten.

ID	Traject	Omgeving	Met	Zonder	Verschil	% Verandering
Stedelijk						
1	Gent tram 1	Stedelijk	86 m	91 m	+5 m	+5.9%
2	Gent tram 2	Stedelijk	98 m	96 m	-2 m	-1.6%
3	Gent centrum	Stedelijk	76 m	74 m	-2 m	-3.0%
6	Gent centrum	Stedelijk	66 m	66 m	0 m	0.1%
11	Gent fiets	Stedelijk	71 m	71 m	+1 m	0.7%
12	Gent te voet	Stedelijk	68 m	69 m	+1 m	1.5%
Snelweg						
5	Autostrade	Snelweg	84 m	487 m	+403 m	+476.8%
8	N60	Snelweg	231 m	8883 m	+8652 m	+3749.1%
Semi-ruraal						
4	Zwijnaarde	Semi-ruraal	247 m	327 m	+80 m	+32.4%
9	Zwijnaarde campus	Semi-ruraal	271 m	271 m	0 m	0.0%
10	Zwijnaarde	Semi-ruraal	109 m	105 m	-4 m	-3.2%
Ruraal						
7	Merelbeke	Ruraal	146 m	146 m	0 m	0.0%
13	Merelbeke	Ruraal	101 m	101 m	0 m	0.0%
14	Merelbeke	Ruraal	167 m	167 m	0 m	0.0%
15	Ronse	Ruraal	216 m	262 m	+46 m	+21.4%
Gemiddeld			136 m	748 m	+612 m	+451.1%

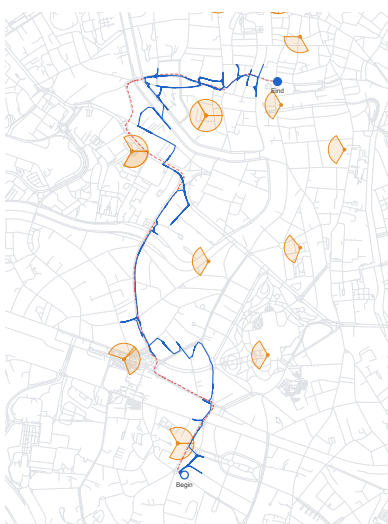
Table B.6: Effect van herstelstrategieën op de mediaan positioneringsfout per traject. Positieve waarden geven aan dat de fout lager is met herstelstrategieën.

Resultaten per Traject

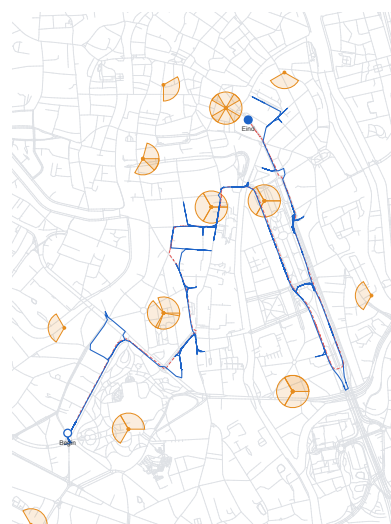
Deze appendix bevat de visuele resultaten van de Viterbi positionering voor alle 15 uitgevoerde metingen. Elk figuur toont het geschatte pad (Viterbi) vergeleken met het GPS referentiepad.



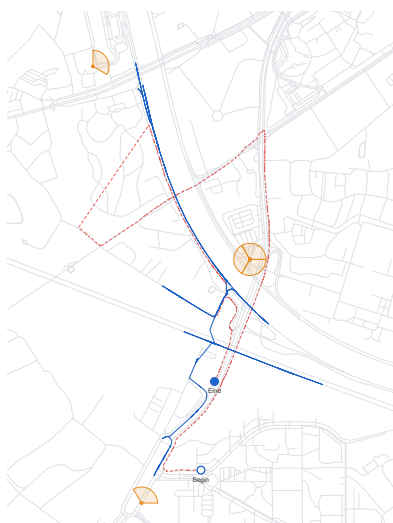
(a) Traject 1: Gent 1 (Tram)



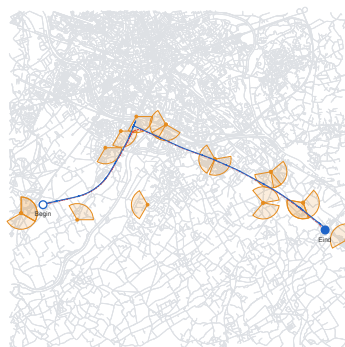
(b) Traject 2: Gent 2 (Tram)



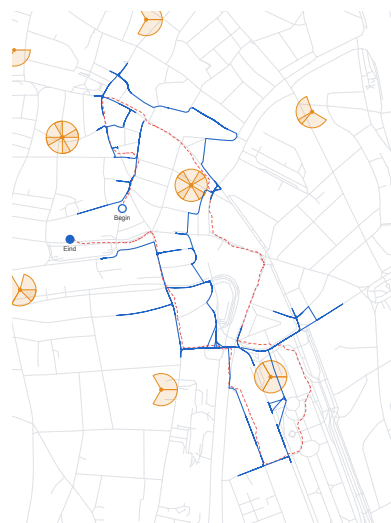
(c) Traject 3: Gent Centrum (Auto)



(d) Traject 4: Zwijnaarde (Fiets)



(e) Traject 5: Autostrade (Auto)



(f) Traject 6: Gent Centrum (Voet)

Figure C.1: Resultaten van de Viterbi positionering (Trajecten 1–6).



Figure C.2: Resultaten van de Viterbi positionering (Trajecten 7–15).

Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten

