

Optimale plaatsing van een nieuwe brandweerkazerne in regio Tubbergen

Yanna Kraakman¹
Bachelorscriptie

4 juli 2018, University of Twente, Enschede, Nederland

Samenvatting

In deze scriptie wordt een optimale locatie gezocht voor de plaatsing van een nieuwe brandweerkazerne in omgeving Tubbergen. Dit probleem is een voorbeeld van een *facility location problem*. Het vinden van de optimale locatie wordt beschouwd als een bicriteria optimalisatieprobleem, waarbij criterium 1 het minimaliseren van de aanrijtijden en criterium 2 het maximaliseren van het dekkingsgebied binnen tien minuten is. Om het probleem aan te pakken worden drie methodes gebruikt. Bij de eerste methode wordt de gemiddelde aanrijtijd naar een incident geminimaliseerd, bij de tweede methode wordt het deel van het gebied dat binnen tien minuten kan worden bereikt gemaximaliseerd en bij de derde methode worden de eerste twee gecombineerd, waarbij gebruik wordt gemaakt van Pareto efficiëntie. Met behulp van grafen en historische data van incidenten wordt een wiskundig model gemaakt om de methodes op toe te passen. Uit de validatie van het model volgen 95 %-betrouwbaarheidsintervallen voor de optimale locatie, de gemiddelde aanrijtijd en het dekkingspercentage binnen 5, 6, 8 en 10 minuten bij plaatsing van de kazerne. Het resultaat is dat de optimale plek voor de kazerne ten noordwesten van het dorp Geesteren is. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident zal bij plaatsing van de nieuwe kazerne niet veel verminderen, maar uitschieters zullen verdwijnen. Het gevolg is dat 100 % van het gebied binnen tien minuten bereikbaar is en 95 % van het gebied binnen 8 minuten. Momenteel is dat respectievelijk 95 % en 85 %.

Sleutelwoorden: facility location problem, bicriteria optimalisatieprobleem, Pareto efficiëntie, brandweerkazerne, grafen.

1 Introductie

In de regio Tubbergen in Overijssel zijn plannen om een tweede brandweerkazerne te bouwen, omdat een aantal plekken door de brandweer niet binnen de gewenste tijd te bereiken is. Uit een gesprek met de brandweer Enschede blijkt dat vooral in het noordwesten van het dorp Tubbergen brandweerwagens pas na een lange tijd kunnen arriveren. Het is belangrijk dat een nieuwe

¹Begeleiders vanuit University of Twente: Maurits de Graaf en Marie-Colette van Lieshout. Begeleider vanuit Brandweer Enschede: Emiel Sanders.

kazerne op een goede plek wordt gebouwd, op zo'n manier dat de brandweer zo snel mogelijk bij de brandgevaarlijke plekken in omgeving Tubbergen kan komen en er daardoor zo min mogelijk slachtoffers en schade bij de branden zullen zijn. Immers, een brand kan zich uitbreiden met vele malen zijn omvang per minuut (Betancur et al., 2015). Echter, het vinden van een optimale plek voor de brandweerkazerne is niet eenvoudig. Er is namelijk een afweging tussen het plaatsen van de brandweerkazerne dichtbij gebieden met veel branden om daarmee gemiddeld sneller bij de branden te kunnen zijn, of juist dichtbij afgelegen gebieden om deze sneller te kunnen bereiken. Het vinden van een optimale locatie voor een brandweerkazerne is een voorbeeld van wat in de wiskunde ook wel een *facility location problem* wordt genoemd: het probleem van de plaatsing van een faciliteit. In deze scriptie wordt een optimale locatie voor het plaatsen van de nieuwe brandweerkazerne in regio Tubbergen gevonden door het maken en analyseren van een wiskundig model.

Deze scriptie is als volgt opgebouwd: in Sectie 2 is een literatuurcontext gegeven; in Sectie 3 is de probleemoriëntatie beschreven; in Sectie 4 is de gebruikte methode toegelicht; in Sectie 5 zijn de resultaten gegeven; in Sectie 6 is het model gevalideerd; in Sectie 7 is de aanbeveling voor de brandweer gedaan; in Sectie 8 zijn mogelijk heuristieken uitgewerkt; in Sectie 9 is de conclusie gegeven.

2 Literatuurcontext

Het eerste facility location problem werd in 1750 geformuleerd door Thomas Simpson (Simpson, 1750) en wordt tegenwoordig het Weber probleem genoemd. Het Weber probleem betreft een transportatiekostenprobleem: als er drie punten zijn waar goederen moeten worden geleverd, waar bouwt men dan de opslagplaats zodat transportatiekosten naar de drie punten zo laag mogelijk zijn? Een wiskundige formulering van dit probleem is:

$$\min_{i \in \mathbb{R}^2} \sum_{j=1}^3 \|d_j - i\|, \quad (1)$$

met i een plek voor de opslagplaats, d_j plek j waar goederen moeten worden geleverd en $\|X\|$ de Euclidische norm. De eerste oplossingen voor het Weber probleem waren geometrisch en in 1972 vond Luc-Normand Tellier een numerieke oplossing (Tellier, 1972). Tellier loste het probleem op door de punten waar goederen moeten worden geleverd in het Euclidische vlak te zetten en te verbinden om zo een polygoon te vormen. Het punt P waar de opslagplaats moet staan zette hij in het vlak in de polygoon en werd verbonden met alle hoekpunten. Aan de hand van trigonometrie vond Tellier de groottes van de hoeken van de polygoon en daarmee de locatie van het punt P . Naast de numerieke oplossing te geven, vertaalde Tellier het probleem van een transportatiekostenprobleem naar een algemeen facility location problem en breidde hij het probleem uit naar een probleem betreffende meer dan drie punten. Aan punten die meermaals moesten worden bereikt, voegde hij een gewicht toe (Tellier, 1972).

Naar facility location problems is in de wiskundige en economische literatuur veel onderzoek gedaan. Zo worden er verschillende soorten facility location problems onderscheiden, waarvan de belangrijkste 'minimum' en 'minimax' zijn. Voor beide geldt dat het om een metrisch of non-metrisch en capacitated of uncapacitated facility location problem kan gaan. Een minimum facility location problem is een probleem over een verzameling L van mogelijke plekken voor faciliteiten en

een verzameling D van vraagpunten die service van een faciliteit nodig hebben. Het doel is om faciliteiten te openen op de plekken van een verzameling $F \subseteq L$ zodat de som van de afstanden van elk vraagpunt naar de dichtstbijzijnde faciliteit en de openingskosten van de faciliteiten op de plekken in F wordt geminimaliseerd. Wiskundig gezien is het probleem als volgt:

$$\min_{F \subseteq L} \left(\sum_{j \in D} \min_{g \in F} \|j - g\| + \sum_{g \in F} f_g \right), \quad (2)$$

met f_g de plaatsingskosten van faciliteit $g \in F$. Binnen de sommatie over j wordt de beste faciliteit uit F om het vraagpunt service mee te bieden gevonden. Het doel bij een minimax facility location problem is om faciliteiten te openen op de plekken van een verzameling $F \subseteq L$, met $|F| = k$, zodat de maximale afstand van een vraagpunt naar de dichtstbijzijnde faciliteit wordt geminimaliseerd. Wiskundig gezien is het probleem als volgt:

$$\begin{aligned} & \min_{F \subseteq L} \max_{j \in D} \min_{g \in F} \|j - g\|, \\ & \text{zodat } |F| = k. \end{aligned} \quad (3)$$

Als een probleem metrisch is, zijn afstanden tussen vraagpunten en faciliteiten ongericht en geldt de driehoeksongelijkheid. De norm zoals gebruikt in optimalisatieproblemen (2) en (3) is dan de Euclidische norm. Bij een non-metrisch probleem zijn er geen aannames over de afstanden tussen vraagpunten en faciliteiten. Hierbij is de norm zoals gebruikt in optimalisatieproblemen (2) en (3) geen Euclidische norm. Als een probleem capacitated is, kan een bepaalde faciliteit slechts service bieden aan een bepaald aantal vraagpunten. Bij een non-capacitated probleem kan een bepaalde faciliteit service bieden aan een ongelimiteerd aantal vraagpunten.

Resultaten van facility location problems kunnen worden gebruikt om bijvoorbeeld goede locaties te vinden voor openbare toiletten, ziekenhuizen en winkels. Ook het vinden van goede locaties voor brandweerkazernes is een facility location problem waar verschillende oplossingen voor zijn gegeven. Zo hebben Guild en Rollin in 1972 een analytisch model gemaakt voor het plaatsen van n brandweerkazernes in een gebied, waarbij zowel bouw- en onderhoudskosten als blustijd en schadetekosten werden meegenomen (Guild & Rollin, 1972). In 1981 maakte Schreuder een analytisch model van het vinden van m locaties voor brandweerkazernes in Rotterdam met behulp van grafentheorie, waarbij het dubbele dekkingsprincipe (waarbij bepaalde incidenten door meer dan één brandweerwagen moeten worden bereikt), het wegnnet en verschillende gebouwensoorten in Rotterdam werden meegenomen (Schreuder, 1981). In 2015 maakten Betancur et al. een model voor het vinden van drie locaties voor nieuwe brandweerkazernes in Concorde, waarbij onder andere populatiedichtheid en -groei, data van incidenten en het wegnnet werd meegenomen (Betancur et al., 2015). Betancur et al. maakten gebruik van *Geographical Information System* (GIS) om de toen huidige situatie te analyseren en aanbevelingen te geven. In 2015 maakte Adams (Adams, 2015) eenzelfde soort model als Betancur et al. aan de hand van GIS. Verder is onderzoek gedaan door Kilbury naar het plaatsen van brandweerkazernes, waarbij niet de locatie van de brandweerkazerne werd gezocht, maar juist wanneer en waarom het nuttig is om een nieuwe brandweerkazerne te bouwen (Kilbury, 2008).

In deze scriptie wordt een wiskundig model voor het plaatsen van een brandweerkazerne in regio Tubbergen gemaakt en gevalideerd, waarbij gebruik wordt gemaakt van historische data van incidenten in Twente. Bij eerdere onderzoeken werd geen historische incidentendata meegenomen,

geen wiskundig model gemaakt of het model niet gevalideerd. Het onderzoek beschreven in deze scriptie is dan ook een waardevolle toevoeging aan huidige onderzoeken: door gebruik te maken van de eerdergenoemde data kan een locatie voor een brandweerkazerne worden gevonden die niet alleen het gebied dekt, maar ook in de buurt is van plekken waar wordt verwacht dat branden zullen zijn. De resultaten zullen bruikbaar zijn, omdat het wiskundige model goed gevalideerd kan worden. Een aantal aspecten die in eerdere onderzoeken zijn gebruikt zal in dit onderzoek niet worden meegenomen. Voorbeelden hiervan zijn gebouwensoorten, geschikte bouwplekken, het dubbele dekkingsprincipe en bevolkingsgroei. Hier is voor gekozen om het model niet te complex te maken en zo rekentijd te verminderen. Resultaten van een onderzoek waarin deze aspecten wel worden meegenomen zullen accurater zijn dan de resultaten van het onderzoek in deze scriptie, maar toch niet veel verschillen, omdat in dit onderzoek de belangrijkste data (data van incidenten en het wegennet) is meegenomen.

Het wiskundige model dat wordt gebruikt geeft een numerieke oplossing, net als dat van Tellier. Ook wordt bij beide modellen gewerkt met gewichten voor de punten die moeten worden bereikt. Er is echter een aantal verschillen tussen het model van Tellier en het model uitgewerkt in deze scriptie. Het grootste verschil is dat bij het model in deze paper de ruimte gediscrètiseerd wordt en bij het model van Tellier niet. Dit wordt gedaan om ervoor te zorgen dat berekeningen binnen het model niet te lang duren. Tellier had met te lange berekeningen in zijn model niet te maken, omdat zijn model met drie punten wordt gewerkt, waar in het model in deze paper met ruim 13.000 punten wordt gewerkt. Een ander verschil is dat Tellier werkt met een metrisch facility location problem. Het model in deze scriptie is een non-metrisch facility location problem, omdat de reistijd tussen twee plekken niet alleen afhangt van de afstand, maar ook van de te behalen snelheid op het traject. Verder is het model uncapacitated, omdat er geen limiet is aan het aantal incidenten dat een brandweerkazerne kan dekken.

3 Probleemoriëntatie

Het probleem van het vinden van een optimale locatie voor een nieuwe brandweerkazerne zal in meer detail uitgewerkt worden. Hiervoor zijn de begrippen ‘aanrijtijd’, ‘uitruktijd’ en ‘reistijd’ van belang. De tijd tussen het ontvangen van een melding van een incident en de aankomst van een brandweerwagen bij het incident wordt de aanrijtijd genoemd. De aanrijtijd bestaat uit de uitruktijd (de tijd tussen het ontvangen van een melding van een incident en het verlaten van de brandweerkazerne) en de reistijd (de tijd tussen het verlaten van de kazerne en de aankomst bij het incident).

Om slachtoffers en schade te voorkomen of beperken, is het belangrijk dat brandweerwagens zo snel mogelijk bij een incident kunnen arriveren. Een intuïtieve manier om daarvoor te zorgen is om een locatie zo te kiezen dat de gemiddelde aanrijtijd naar een incident zo kort mogelijk is. Wiskundig gezien is het probleem dan als volgt:

$$\min_{i \in L} \sum_{j \in D} \min_{B \in \{i, K\}} \frac{\|j - B\|}{|D|}, \quad (4)$$

met L het gebied rondom Tubbergen, D een verzameling van alle incidenten in het gebied L , B de brandweerkazerne waarvanuit incident j wordt bereikt en K de reeds bestaande brandweerkazernes

in het gebied L .² Voor elk incident j wordt een brandweerkazerne B gevonden die het snelst bij het incident kan zijn. Dit kan één van de reeds bestaande brandweerkazernes (een kazerne in verzameling K) of de nieuw te plaatsen brandweerkazerne i zijn. De aanrijtijden naar alle incidenten $j \in D$ worden opgeteld en gedeeld door het totaal aantal incidenten $|D|$ om de gemiddelde aanrijtijd naar een incident te bepalen. Vervolgens wordt plaats $i \in L$ gezocht waarvoor deze gemiddelde aanrijtijd het kortst is.

Een gevaarlijk gevolg van deze manier van optimaliseren is dat aanrijtijden worden gemiddeld, waardoor het kan zijn dat een aantal incidenten erg snel bereikt kan worden, maar andere, afgelegen incidenten pas na een (te) lange tijd. Een andere manier om slachtoffers en schade te voorkomen is daarom om de brandweerkazerne zo te plaatsen dat een zo groot mogelijk deel van het gebied rondom Tubbergen binnen een redelijke tijd kan worden gedekt - dat wil zeggen: bereikt door de brandweer. Wiskundig gezien is het probleem dan als volgt:

$$\max_{i \in L} \iint_{\mathbf{x} \in L} a(\mathbf{x}, i) d\mathbf{x} , \quad (5)$$

waarbij geldt:

$$a(\mathbf{x}, i) = \begin{cases} 1 & \text{als } \min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq \text{redelijke tijd,} \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (6)$$

Hierbij is $\mathbf{x}$ een locatie met coördinaten (x, y) .

Het vinden van een optimale locatie voor een brandweerkazerne in regio Tubbergen is dus niet zomaar een optimalisatieprobleem, maar een bicriteria optimalisatieprobleem. De twee criteria voor de optimalisatie zijn:

- de gemiddelde aanrijtijd naar een incident in het gebied moet zo kort mogelijk zijn;
- een zo groot mogelijk deel van het gebied moet binnen een redelijke tijd te bereiken zijn.

Om te zorgen dat een locatie aan het eerste criterium voldoet, zal deze zo dicht mogelijk bij plekken waar veel branden worden verwacht moeten zijn. Om te zorgen dat een locatie aan het tweede criterium voldoet, zal deze zoveel mogelijk in het midden van een momenteel ongedekt stuk van het gebied moeten zijn. Aangezien in het midden van een momenteel ongedekt stuk van het gebied niet per se de meeste branden worden verwacht (in tegenstelling: daar waar veel branden worden verwacht, staat logischerwijs al een kazerne die het gebied dekt) zal een locatie die optimaal is voor criterium 1 niet optimaal zijn voor criterium 2 en vice versa. Er is daarom (waarschijnlijk) niet één optimale locatie om de brandweerkazerne in te plaatsen. In plaats daarvan zal een aantal locaties als optimaal worden bestempeld en hangt de conclusie af van hoe belangrijk criterium 1 en criterium 2 ten opzichte van elkaar worden geacht.

Om het probleem op te lossen, staat de volgende data tot onze beschikking:

- data van verschillende soorten incidenten waarbij de brandweer uitrukte in Twente van januari 2004 t/m december 2016;

²In de Appendix, Sectie 10.1, is een tabel gegeven met een beschrijving van alle variabelen die in deze scriptie worden gebruikt.

- data van verschillende gebouwsoorten en hun locaties in Twente;
- het wegennet van Twente;
- uitruktijden van de brandweerkazernes in Twente van 2014 tot 2016;
- inwonersaantallen van gebieden in Twente in 2014.

Verder zijn er wettelijke tijdnormen die aangeven binnen hoeveel tijd na de melding van een incident de brandweer moet zijn gearriveerd. Deze normen zijn als volgt (Veiligheid en Justitie, 2017):

1. vijf minuten bij gebouwen met een winkelfunctie met een gesloten constructie, gebouwen met een woonfunctie boven een gebouw met een winkelfunctie of gebouwen met een celfunctie;
2. zes minuten bij portiekwoningen, portieklats of gebouwen met een woonfunctie voor verminderd zelfredzamen;
3. acht minuten bij gebouwen met een andere woonfunctie dan bedoeld onder 1 en 2, of met een winkelfunctie, gezondheidszorgfunctie, onderwijsfunctie of logiesfunctie;
4. tien minuten bij gebouwen met een kantoorfunctie, industrie functie, sportfunctie, bijeenkomstfunctie of een overige gebruiksfunctie.

Als de aanrijtijden voor bepaalde locaties afwijken van deze tijdnormen, dient de keuze van deze locatie en de afwijking te worden gemotiveerd. Elke locatie dient in ieder geval een aanrijtijd van niet hoger dan 18 minuten te hebben. Uit de wettelijke tijdnormen volgt dat elk gebouw binnen tien minuten bereikt moet worden. Voor de ‘redelijke tijd’ die in het tweede criterium wordt genoemd wordt dus tien minuten, ofwel 600 s, gebruikt. Verder moet het gehele gebied binnen 18 minuten, of 1080 s, bereikbaar zijn.

De onderzoeksvraag luidt als volgt: wat is het beste gebied in de regio Tubbergen om een nieuwe brandweerkazerne te bouwen, zodat de gemiddelde aanrijtijd naar een incident in regio Tubbergen zo kort mogelijk is, er een zo groot mogelijk deel van de regio binnen tien minuten te bereiken is en de gehele regio binnen 18 minuten te bereiken is?

Het probleem kan wiskundig op de volgende manier worden geformuleerd:

$$\min_{i \in L} \left(\sum_{j \in D} \min_{B \in \{i, K\}} \frac{\|j - B\|}{|D|}, - \iint_{\mathbf{x} \in L} a(\mathbf{x}, i) d\mathbf{x} \right), \quad (7)$$

zodat $\min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq 1080 \quad \forall \mathbf{x} \in L,$

waarbij L het gebied rondom Tubbergen is, D de verzameling van incidenten, K de reeds bestaande brandweerkazernes en $a(\mathbf{x}, i)$ de functie zoals gedefiniëerd in (6). Let wel: aangezien het hier om een minimalisatie gaat, is de dubbele integraal over $a(\mathbf{x}, i)$ negatief gemaakt. Er geldt namelijk dat het maximum over x het minimum over $-x$ is. Verder is de norm die wordt gebruikt in optimalisatieprobleem (7) niet de Euclidische norm, maar een functie die de aanrijtijd van een brandweerwagen van de ene naar de andere plek geeft.

4 Methode

Voor het oplossen van het bicriteria optimalisatieprobleem zullen drie methodes worden gebruikt. Methode 1 is het minimaliseren van de gemiddelde aanrijtijd naar een incident in het gebied. Methode 2 is het maximaliseren van het gedeelte van het gebied dat binnen tien minuten te bereiken is. Methode 3 is het minimaliseren van de gemiddelde aanrijtijd naar een incident, met de voorwaarde dat minimaal $Q\%$ van het gebied binnen tien minuten (600 s) te bereiken moet zijn. Bij alle methodes moet het hele gebied binnen 18 minuten (1080 s) te bereiken zijn. De derde methode komt het meest overeen met het originele optimalisatieprobleem (7), omdat met beide criteria rekening wordt gehouden.

Methode 1: minimale gemiddelde aanrijtijd

De optimale locatie voor een brandweerkazerne wordt gegeven door

$$\min_{i \in L} \sum_{j \in D} \min_{B \in \{i, K\}} \frac{\|j - B\|}{|D|}, \quad (8)$$

$$\text{zodat} \quad \min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq 1080 \quad \forall \mathbf{x} \in L.$$

Methode 2: maximaal dekkingsgebied in 10 minuten

De optimale locatie voor een brandweerkazerne wordt gegeven door

$$\max_{i \in L} \iint_{\mathbf{x} \in L} a(\mathbf{x}, i) d\mathbf{x}, \quad (9)$$

$$\text{zodat} \quad \min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq 1080 \quad \forall \mathbf{x} \in L,$$

waarbij geldt:

$$a(\mathbf{x}, i) = \begin{cases} 1 & \text{als } \min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq 600, \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (10)$$

Methode 3: minimale gemiddelde aanrijtijd met dekkingsvoorwaarde

De optimale locatie voor een brandweerkazerne wordt gegeven door

$$\min_{i \in L} \sum_{j \in D} \min_{B \in \{i, K\}} \frac{\|j - B\|}{|D|}, \quad (11)$$

$$\text{zodat} \quad \iint_{\mathbf{x} \in L} a(\mathbf{x}, i) d\mathbf{x} \geq \frac{Q}{100} \cdot \text{opp}(L),$$

$$\min_{B \in \{i, K\}} \|\mathbf{x} - B\| \leq 1080 \quad \forall \mathbf{x} \in L,$$

met Q het minimale percentage van het gebied dat binnen tien minuten bereikbaar moet zijn en $a(\mathbf{x})$ de functie zoals gedefiniëerd in vergelijking (10).

Er wordt een wiskundig model van de situatie gemaakt om het probleem goed aan te kunnen pakken. Aangezien er veel aspecten komen kijken bij het maken van zo'n model, wordt er itererend gewerkt: er wordt eerst een zeer basaal model gemaakt, waar steeds een aspect aan toe wordt gevoegd. Op deze manier geeft het model steeds beter weer wat er gebeurt. Er zijn drie modellen gemaakt, waarvan het eerste het meest basale en het derde het meest complexe. Van elk van de modellen wordt een uitleg gegeven en in Sectie 5 de resultaten. Aan de hand van deze verschillende resultaten kan aan het einde een robuustheidsanalyse worden gedaan.

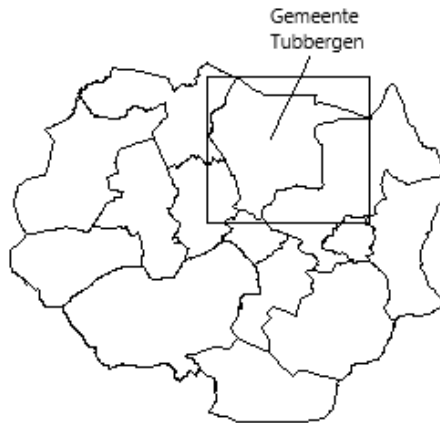
De modellen zijn op de volgende manier opgebouwd:

- **Model 1:** er wordt gewerkt met een gebied direct om gemeente Tubbergen heen, reeds bestaande brandweerkazernes worden niet meegenomen en de reistijd tussen twee plekken is slechts afhankelijk van de afstand;
- **Model 2:** er wordt gewerkt met een groter gebied om gemeente Tubbergen heen, waarbij de vijf reeds bestaande brandweerkazernes worden meegenomen. De reistijd tussen twee plekken is slechts afhankelijk van de afstand;
- **Model 3:** er wordt gewerkt met het grotere gebied om gemeente Tubbergen heen, waarbij de vijf reeds bestaande brandweerkazernes worden meegenomen en de reistijden afhangen van het wegennet van omgeving Tubbergen.

4.1 Model 1: Gebied direct om gemeente Tubbergen

Om het probleem concreet te maken is het belangrijk om de regio Tubbergen te definiëren. Voor het probleem is de gemeente Tubbergen van belang, omdat in de gemeente Tubbergen momenteel een gebied niet goed bereikbaar is. Het gaat hierbij om het gebied ten noordwesten van het dorp Tubbergen. Daarom wordt gekozen om het gebied dat precies de gemeente Tubbergen omvat te gebruiken. Dit gebied, weergegeven door de rechthoek in Figuur 1, heeft coördinaten $x \in [240000, 261000]$, $y \in [483000, 500000]$ en wordt in optimalisatieproblemen (8), (9) en (11) aangegeven met verzameling L .

Het probleem van het vinden van een optimale locatie om een brandweerkazerne te bouwen is een continu probleem, want er is een continuüm aan locaties in het gebied rondom Tubbergen. Het aantal incidenten tussen 2002 en 2014 in dit gebied, aangegeven met verzameling D in optimalisatieprobleem (8), (9) en (11), is ruim 10.000. Als berekeningen voor een optimale locatie op eenzelfde, Euclidische manier worden gedaan als Tellier (Tellier, 1972) deed, dan zijn ruim 10.000 punten nodig, waarvoor ruim 30.000 niet-lineaire vergelijkingen met ruim 30.000 onbekenden worden opgesteld. Berekeningen doen met deze vergelijkingen kost veel tijd en om het probleem beter aan te kunnen pakken wordt het gebied daarom gediscretiseerd door het in ongeveer 1000 vierkanten van 500 bij 500 meter op te delen, zie Figuur 2a. De ruim 10.000 incidenten worden nu verdeeld over de vierkanten, zodat elk incident bij het vierkant hoort dat de locatie van het incident bevat. Er kan nu met de vierkanten worden gewerkt in plaats van de individuele incidenten, waardoor verzameling D nog maar ongeveer 1000 elementen bevat. Dit reduceert de complexiteit van het probleem.

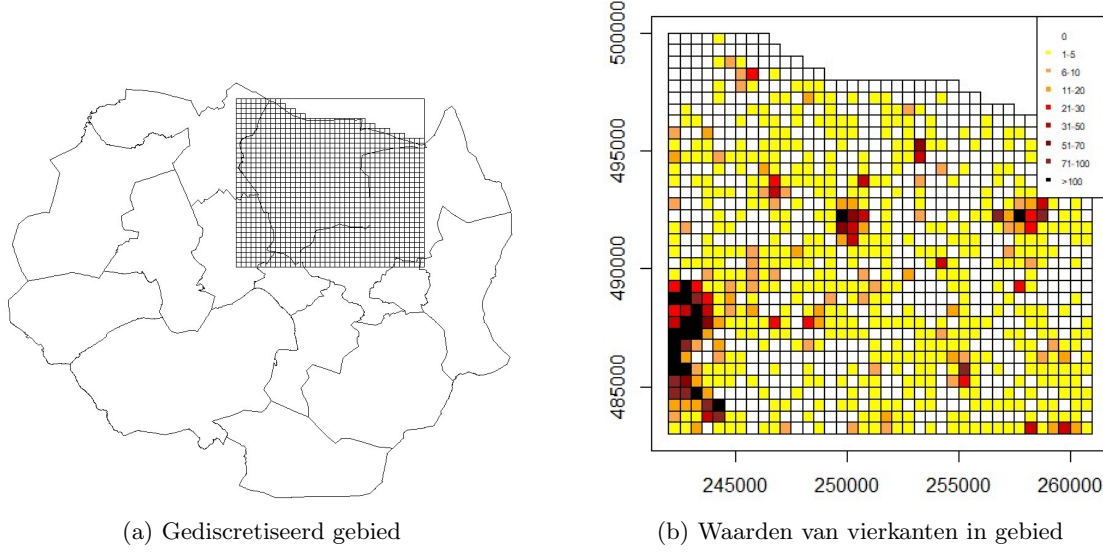


Figuur 1: Model 1- gebied rondom Tubbergen

Elk vierkant krijgt een waarde toegewezen, die aangeeft hoeveel incidenten in dat vierkant zijn geweest tussen 2004 en 2016. Deze waarde geeft in zekere zin aan hoe belangrijk het is om dit vierkant snel te kunnen bereiken met een brandweerwagen. Immers, als er in een gebied veel incidenten zijn geweest, verwachten we dat daar veel gebouwen staan en mensen wonen of brandgevaarlijke stoffen opgeslagen zijn. Gezien het feit dat populatiedichtheid een sleutelrol speelt in de behoefte aan brandweerservice (Kilbury, 2008), verwachten we dat daar in de toekomst weer veel incidenten zullen zijn. Als in een bepaald vierkant vaak incidenten zijn, zal de brandweer daar vaker naar moeten uitrukken en is het belangrijk dat een brandweerwagen daar snel kan komen. Het algoritme dat is gebruikt om deze waardes toe te kennen aan de vierkanten is te vinden in de appendix, Sectie 10.2. In Figuur 2b is met een kleurcode de waarde van de vierkanten weergegeven.

In Figuur 2b is een aantal donkere gebieden te zien; hier zijn veel incidenten geweest tussen 2004 en 2016. Het grote gebied linksbeneden is Almelo, het kleinere gebied iets boven het midden is Tubbergen en het kleine gebied rechts van Tubbergen is Ootmarsum. De andere, nog kleinere donkere plekken zijn kleine dorpen.

Voor methode 1, 2 en 3 wordt steeds de norm van twee plekken, ofwel de aanrijtijd van een brandweerwagen van de ene naar de andere plek, gebruikt. De aanrijtijd is de som van de uitruktijd (u) en de reistijd. Voor de uitruktijd is de gemiddelde uitruktijd van alle brandweerkazernes in Twente in 2016 gebruikt. Het resultaat is $u = 231$ s. In dit eerste model is de reistijd slechts afhankelijk van de afstand tussen de twee plekken. Om snel ter plaatse te kunnen zijn, zullen brandweerwagens de kortste route nemen naar een incident. Deze kortste routes tussen plekken worden gevonden door gebruik te maken van Dijkstra's algoritme (Dijkstra, 1959). Om dit te kunnen doen wordt eerst een graaf gemaakt van het gediscretiseerde gebied rondom Tubbergen. De graaf wordt als volgt gevormd: elk midden van een vierkant wordt een knoop in de graaf en elke knoop wordt verbonden met de acht knopen die eromheen liggen (uitgezonderd knopen aan de rand van het gebied: die worden verbonden met minder knopen). Elke knoop representeert (het midden van) het vierkant waar hij in ligt en elke lijn representeert een weg. Elke lijn krijgt een gewicht dat aangeeft wat de reistijd tussen de knopen is. In dit eerste model wordt de situatie abstracter gemaakt door aan te



Figuur 2: Model 1- gebied rondom Tubbergen

nemen dat de brandweerwagens overal even snel rijden, waarbij wordt gekozen voor een snelheid van 60 km/u, omdat deze tussen de maximum snelheid binnen (50 km/u) en buiten (80 km/u) de bebouwde kom ligt. In het derde model wordt rekening gehouden met verschillende snelheden binnen en buiten de bebouwde kom. Voor de gewichten van de lijnen wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten ‘buurvierkanten’: rechte burens en schuine burens.

- Rechte burens: de afstand tussen de knopen is 500 m. De reistijd is dus 30 s;
- Schuine burens: de afstand tussen de knopen is 701 m. De reistijd is dus 42 s.

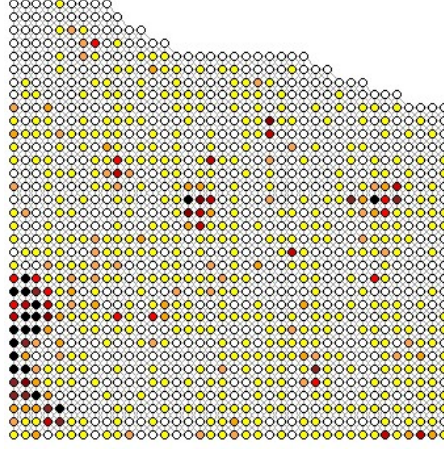
Het algoritme dat is gebruikt om de incidentie matrix voor de graaf te maken wordt gegeven in de Appendix, Sectie 10.3. Elke knoop krijgt een lijst met karakteristieken: de x- en y-locatie van de linkeronderhoek van het vierkant dat de knoop representeert en de eerder gevonden waarde van het vierkant. De x- en y-locatie van elke knoop wordt gebruikt om de graaf de goede vorm te geven. In Figuur 3 wordt de gevonden graaf weergegeven. Hierbij wordt dezelfde kleurcode gebruikt als in Figuur 2b.

Door middel van Dijkstra’s algoritme (Dijkstra, 1959) kan nu een matrix ‘shpaths’ worden gemaakt die de kortste reistijd tussen alle knopen weergeeft:

$$\text{shpaths}(i, j) = \text{shpaths}(j, i) = \text{kortste reistijd tussen knoop } i \text{ en knoop } j.$$

Om te minimaliseren en te maximaliseren over $i \in L$ bij methode 1, 2 en 3 wordt voor elke $i \in L$ de waarde van de te minimaliseren of maximaliseren functie berekend, om vervolgens de minimale dan wel maximale waarde te vinden. Bij methode 1 en 3 krijgt deze functie de naam ‘gewgem(i)’:

$$\text{gewgem}(i) = \sum_{j \in D} \min_{B \in \{i, K\}} \frac{\|j - B\|}{|D|}. \quad (12)$$



Figuur 3: Model 1- graaf van gebied rondom Tubbergen

Voor dit eerste model worden de reeds bestaande brandweerkazernes niet meegenomen, dus geldt $K = \emptyset$. Verder wordt gewerkt met de knopen en hun waarde in plaats van met de individuele incidenten. Hiervoor krijgt elke knoop een weegfactor w als zijn waarde w is, omdat van een knoop met waarde w wordt verwacht dat de brandweer $\frac{w}{|D|} \cdot 100$ % van de keren uitrukt naar deze knoop. Let wel: $\sum_i \text{waarde}(\text{knoop } i) = |D|$. De functie $\text{gewgem}(i)$ is dus als volgt:

$$\text{gewgem}(i) = \sum_{j=1}^m \frac{(u + \text{shpaths}(i, j)) \cdot \text{waarde}(j)}{|D|}, \quad (13)$$

met $m = 1206$ het aantal knopen in de graaf en u de uitruktijd van de te plaatsen brandweerkazerne.

De continue functie $a(\mathbf{x}, i)$ wordt gediscretiseerd en dan $a_j(i)$ genoemd, omdat er in een discreet gebied wordt gewerkt. De functie $a_j(i)$ is als volgt:

$$a_j(i) = \begin{cases} 1 & \text{als } u + \text{shpaths}(i, j) \leq 600, \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (14)$$

Voor model 1 worden dus de volgende berekeningen gedaan:

Methode 1:

$$\begin{aligned} \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} & \quad \text{gewgem}(i), \\ \text{zodat} & \quad u + \text{shpaths}(i, j) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Methode 2:

$$\begin{aligned} \max_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} & \quad \sum_{j=1}^m a_j(i), \\ \text{zodat} & \quad u + \text{shpaths}(i, j) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (16)$$

waarbij geldt:

$$a_j(i) = \begin{cases} 1 & \text{als } u + \text{shpaths}(i, j) \leq 600, \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (17)$$

Methode 3:

$$\begin{aligned} & \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \text{gewgem}(i), \\ \text{zodat} \quad & \sum_{j=1}^m a_j(i) \geq \frac{Q}{100} \cdot m, \\ & u + \text{shpaths}(i, j) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Methode 1, 2 en 3 worden op de volgende manier uitgevoerd: voor elke knoop $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ wordt de waarde van de te minimaliseren functie berekend. Vervolgens wordt de minimale dan wel maximale waarde genomen als het optimum. Deze methode is dus *brute force*: alle opties voor i worden één voor één afgegaan. In Sectie 8 wordt hier verder op ingegaan en worden heuristieken als alternatieve berekeningswijze gegeven.

Met deze drie methodes worden optimale locaties voor de brandweerkazerne in het gediscrètiseerde probleem gezocht. Het is belangrijk om de relatie tussen het gediscrètiseerde probleem en het continue probleem te benadrukken. Het verschil tussen het continue en het gediscrètiseerde probleem is dat bij het eerste de exacte locaties van de incidenten worden gebruikt en de te plaatsen brandweerkazerne op elke plek in het gebied kan worden geplaatst en bij de laatste de locaties van de incidenten naar het middelpunt van hun vierkanten worden verplaatst en de te plaatsen brandweerkazerne ook slechts op de middelpunten van de vierkanten kan worden geplaatst. Hierdoor kan bij het gediscrètiseerde probleem de locatie van een incident maximaal 250 m horizontaal en 250 m verticaal zijn verplaatst. Als hierbij incident i 250 m naar links is verplaatst en incident j 250 m naar rechts, middelt deze fout uit. Aangezien de kans op een incident rechts van het midden van een vierkant gelijk is aan de kans op een incident links van het midden van een vierkant, is het waarschijnlijk dat deze fouten uitgemiddeld worden en dat de optimale locatie die volgt uit het gediscrètiseerde probleem nauwelijks verschilt van de optimale locatie die bij het continue probleem hoort. Mocht het echter zo zijn dat de fouten in de incidentenlocaties niet uitmiddelen, dan kan de locatie die als optimaal wordt gevonden maximaal 250 m horizontaal en 250 m verticaal van de optimale locatie in het continue probleem liggen.

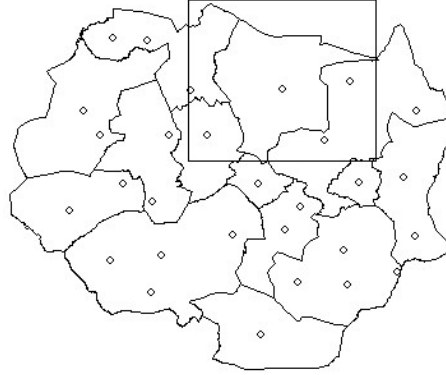
4.2 Model 2: Bestaande brandweerkazernes meenemen

Voor het tweede model wordt het eerste model uitgebreid op de volgende manier:

- Het gebied dat in acht wordt genomen wordt vergroot;
- Reeds bestaande brandweerkazernes worden meegenomen in de aanrijtijd. Hierbij wordt aangenomen dat een incident wordt bereikt vanuit een kazerne waarvan een brandweervan er het snelst kan zijn.

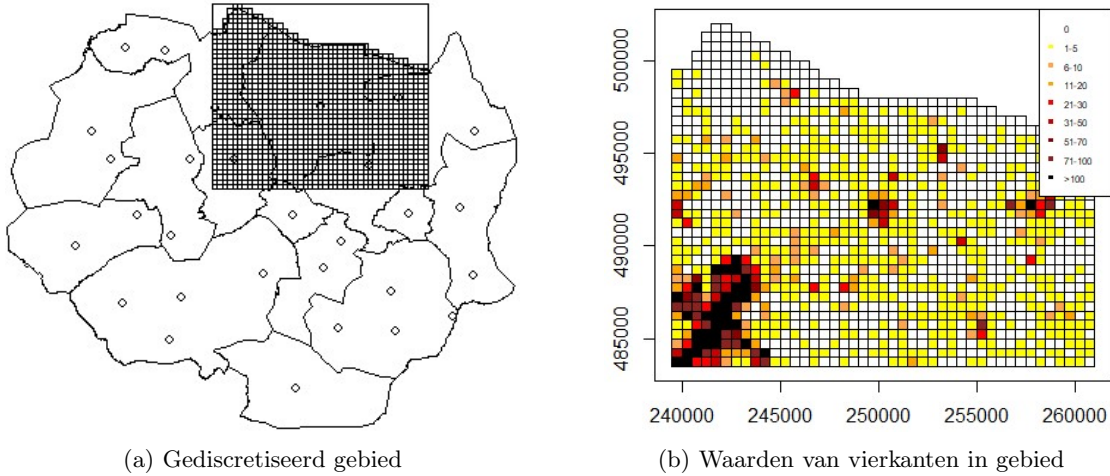
Voor dit model wordt gekozen voor een gebied dat gemeente Tubbergen en de vier direct omliggende brandweerkazernes omvat. Dit gebied is weergegeven door de rechthoek in Figuur 4, waarbij de punten de brandweerkazernes in Twente voorstellen. Dit gebied heeft coördinaten $x \in [239500, 261000]$, $y \in [483500, 502000]$ en wordt in optimalisatieproblemen (8), (9) en (11)

aangegeven met verzameling L .



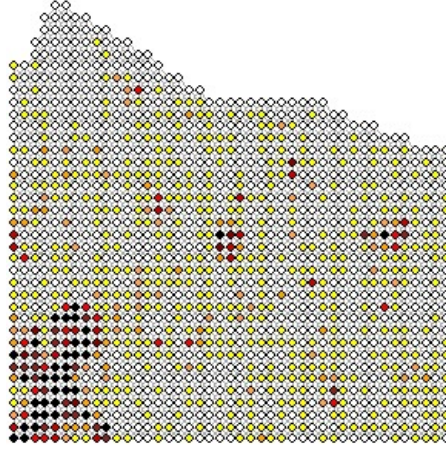
Figuur 4: Model 2- gebied rondom Tubbergen

Net als bij model 1 wordt dit gebied gediscrètiseerd, zie Figuur 5a. Elk vierkant krijgt een waarde toegewezen, die aangeeft hoeveel branden er in dat vierkant zijn geweest tussen 2004 en 2016. In Figuur 5b is met een kleurcode de waarde van de vierkanten weergegeven.



Figuur 5: Model 2- gebied rondom Tubbergen

Voor methode 1, 2 en 3 wordt weer de norm van twee plekken, ofwel de aanrijtijd van een brandweerwagen van de ene naar de andere plek, gebruikt. De reistijd van de ene naar de andere plek wordt op dezelfde manier bepaald als in model 1. Eerst wordt van het gebied een graaf gemaakt, waarbij de waarden van de lijnen op dezelfde manier zijn gekozen als bij model 1. In Figuur 6 wordt de graaf weergegeven die is gemaakt van het gebied. Hierbij wordt dezelfde kleurencode gebruikt als in Figuur 5b.



Figuur 6: Model 2- graaf van gebied rondom Tubbergen

Vervolgens wordt door middel van Dijkstra's algoritme (Dijkstra, 1959) een matrix 'shpaths' gemaakt die de kortste reistijd tussen alle knopen weergeeft:

$$\text{shpaths}(i, j) = \text{shpaths}(j, i) = \text{kortste reistijd tussen knoop } i \text{ en knoop } j.$$

Om te minimaliseren en te maximaliseren over $i \in L$ bij methode 1, 2 en 3 wordt voor elke $i \in L$ de waarde van de te minimaliseren of maximaliseren functie berekend, om vervolgens de minimale dan wel maximale waarde te vinden. Bij methode 1 en 3 krijgt deze functie weer de naam 'gewgem(i)', zoals gedefinieerd in vergelijking (12). Voor dit tweede model worden de vijf reeds bestaande brandweerkazernes in het gebied meegenomen. Elk van deze vijf kazernes heeft een gemiddelde uitruktijd die bekend is. De gemiddelde uitruktijden van deze kazernes zijn als volgt:

- **Kazerne Vriezenveen:** 235,50 s;
- **Kazerne Tubbergen:** 189,00 s;
- **Kazerne Almelo-c:** 77,25 s;
- **Kazerne Weerselo:** 191,00 s;
- **Kazerne Ootmarsum:** 229,00 s.

Over het algemeen is een groot verschil te zien tussen de uitruktijd van een brandweerkazerne met professionele brandweer (zoals die in Almelo-c) en één met een vrijwillige brandweer (zoals die in Vriezenveen). De uitruktijd van kazerne k wordt gegeven door u_k . Verder krijgt elke knoop weer een weegfactor w als zijn waarde w is.

De functie $\text{gewgem}(i)$ is dus als volgt:

$$\text{gewgem}(i) = \sum_{j=1}^m \min_{B \in \{i, K\}} \frac{(u_B + \text{shpaths}(B, j)) \cdot \text{waarde}(j)}{|D|}, \quad (19)$$

met $m = 1301$ het aantal knopen in de graaf en u_B de uitruktijd van brandweerkazerne B .

Voor model 2 worden dus de volgende berekeningen gedaan:

Methode 1:

$$\begin{aligned} \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \quad & \text{gewgem}(i), \\ \text{zodat} \quad & \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Methode 2:

$$\begin{aligned} \max_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \quad & \sum_{j=1}^m a_j(i), \\ \text{zodat} \quad & \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (21)$$

waarbij geldt:

$$a_j(i) = \begin{cases} 1 & \text{als } \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 600, \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (22)$$

Methode 3:

$$\begin{aligned} \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \quad & \text{gewgem}(i), \\ \text{zodat} \quad & \sum_{j=1}^m a_j(i) \geq \frac{Q}{100} \cdot m, \\ & \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (23)$$

waarbij $a_j(i)$ de functie is zoals gedefiniëerd in vergelijking (22).

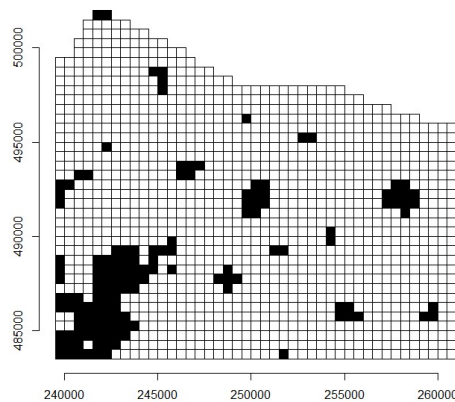
4.3 Model 3: Meename wegennet

Voor het derde model wordt het wegennet van regio Tubbergen meegenomen. Verder is het model gelijk aan model 2. Het enige dat verandert is dus de functie die de reistijd tussen knoop i en knoop j aangeeft: $\text{shpaths}(i, j)$. Om deze functie te veranderen, wordt het gewicht dat aan de lijnen in de graaf wordt verbonden veranderd. Dit gewicht geeft de reistijd tussen de knopen aan. Er wordt aangenomen dat de brandweerwagens binnen de bebouwde kom gemiddeld 50 km/u en buiten de bebouwde kom gemiddeld 80/u rijden, omdat brandweerwagens in beide gevallen sneller dan de maximum snelheid mogen rijden, maar bij stoplichten of kruisingen worden afgeremd tot onder de maximum snelheid. De gewichten worden dus als volgt:

- Rechte bureen:
 1. Binnen bebouwde kom: 36,0 s;
 2. Buiten bebouwde kom: 22,5 s.

- Schuine buren:
 1. Binnen bebouwde kom: 50,0 s;
 2. Buiten bebouwde kom: 31,5 s.

Gezien er bijna in elk 500 bij 500 meter vierkant in regio Tubbergen wegen zijn, is het niet nuttig om na te gaan of het mogelijk is om van elk 500 bij 500 meter vierkant naar elk aanliggende 500 bij 500 meter vierkant te rijden. In plaats daarvan wordt aangenomen dat dit het geval is. Voor het vinden van de vierkanten die tot binnen of buiten de bebouwde kom worden gerekend, kan gebruik worden gemaakt van de inwonersaantallen van de vierkanten of van de waarde van de vierkanten. Er is geen literatuur die aangeeft wat de bevolkingsdichtheid van een gebied minimaal moet zijn om het tot binnen de bebouwde kom te rekenen, dus wordt er na nadere beschouwing van de inwonersaantallen van het gebied voor gekozen om een vierkant als binnen de bebouwde kom te beschouwen als het ten minste 100 inwoners heeft. De vierkanten met meer dan 100 inwoners zijn getoond in Figuur 7 door de zwarte kleur.



Figuur 7: Vierkanten met meer dan 100 inwoners

Kilbury laat in zijn artikel zien dat populatiedichtheid een sleutelrol speelt in de behoefte aan brandweerservice (Kilbury, 2008) en dus in het aantal incidenten. Als Figuur 7 wordt vergeleken met Figuur 5b is inderdaad een overeenkomst tussen de vierkanten binnen de bebouwde kom en de incidentenaantallen te zien. Een minimum van 100 inwoners lijkt dus een goede richtlijn om een vierkant tot binnen de bebouwde kom te rekenen. Omdat niet goed te valideren is of 100 inwoners inderdaad een goede grens is, wordt ook een andere methode gebruikt om een vierkant tot binnen de bebouwde kom te rekenen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de waarde van het vierkant. Plekken waar veel incidenten zijn, zijn niet altijd dichtbevolkt. Denk hierbij aan plekken waar wordt gewerkt met brandgevaarlijke stoffen of waar deze worden opgeslagen. Echter, in het grootste deel van de gevallen zal dit wel het geval zijn. Daarom wordt er in dit model aangenomen dat een vierkant met een hoge waarde dichtbevolkt is en zich daarom binnen de bebouwde kom bevindt. Om te bepalen wanneer een waarde als hoog wordt beschouwd, wordt gekeken naar Figuur 5b. De figuur toont duidelijk een aantal steden en dorpen: onder anderen Almelo, Tubbergen, Ootmarsum, Weerselo, Vasse, Geesteren en Langeveen zijn goed te vinden door hun donkere kleuren. Omdat er vaak gemakkelijk langs erg kleine dorpen kan worden gereden, wordt ervoor gekozen om vierkanten

pas als binnen de bebouwde kom te beschouwen als er minimaal 21 branden zijn geweest tussen 2004 en 2016.

In het geval dat een vierkant binnen de bebouwde kom is, wordt aan alle lijnen naar de burens van het betreffende vierkant een gewicht gegeven dat geldt voor binnen de bebouwde kom. Alle overige lijnen krijgen een gewicht dat geldt voor buiten de bebouwde kom.

Er worden twee modellen gemaakt: het ene werkt met de inwonersaantallen om een vierkant tot binnen de bebouwde kom te rekenen, het andere met de waarden van de vierkanten. De modellen worden respectievelijk model 3a en model 3b genoemd.

Voor beide modellen worden de volgende berekeningen gedaan, waarbij de functie $\text{gewgem}(i)$ is gedefiniëerd zoals bij model 2.

Methode 1:

$$\begin{aligned} & \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \text{gewgem}(i), \\ & \text{zodat} \quad \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Methode 2:

$$\begin{aligned} & \max_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \sum_{j=1}^m a_j(i), \\ & \text{zodat} \quad \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (25)$$

waarbij geldt:

$$a_j(i) = \begin{cases} 1 & \text{als } \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 600, \\ 0 & \text{anders.} \end{cases} \quad (26)$$

Methode 3:

$$\begin{aligned} & \min_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \text{gewgem}(i), \\ & \text{zodat} \quad \sum_{j=1}^m a_j(i) \geq \frac{Q}{100} \cdot m, \\ & \quad \min_{B \in \{i, K\}} (u_B + \text{shpaths}(B, j)) \leq 1080 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (27)$$

waarbij $a_j(i)$ de functie is zoals gedefiniëerd in vergelijking (26).

5 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van alle modellen gegeven.

5.1 Resultaten model 1

Voor model 1 worden voor optimalisatiemethode 1, 2 en 3 de resultaten gegeven.

Methode 1: minimale gemiddelde aanrijtijd

De locatie die als optimaal wordt gevonden is gegeven in Figuur 8a door de vergrote knoop. Het resultaat is dus het gebied $x \in [249000, 249500]$, $y \in [489000, 489500]$. De gemiddelde aanrijtijden naar alle vierkanten zijn gegeven in Figuur 8b. De legenda voor deze figuur is gegeven in Figuur 8c. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident is 660,0 s, of 11 minuten. 62,4 % van de knopen, dat zijn 719 knopen, kan niet binnen tien minuten bereikt worden. Alle knopen kunnen binnen 18 minuten bereikt worden. In de tabel in Figuur 9 zijn de resultaten samengevat.

Het resultaat van deze methode is dat de brandweerkazerne ten zuidwesten van het midden van het gebied moet worden geplaatst. Dit is goed te verklaren: om ervoor te zorgen dat alle vierkanten binnen 18 minuten bereikt kunnen worden, zal de kazerne niet ver van het midden van het gebied kunnen worden geplaatst. Verder ligt in het zuidwesten van het gebied de stad Almelo, waar verreweg de meeste incidenten van het gebied geweest. Om gemiddeld zo snel mogelijk bij een incident te kunnen zijn is het logisch om de kazerne zo dicht mogelijk bij de meeste incidenten te plaatsen.

Methode 2: maximaal dekkinggebied in 10 minuten

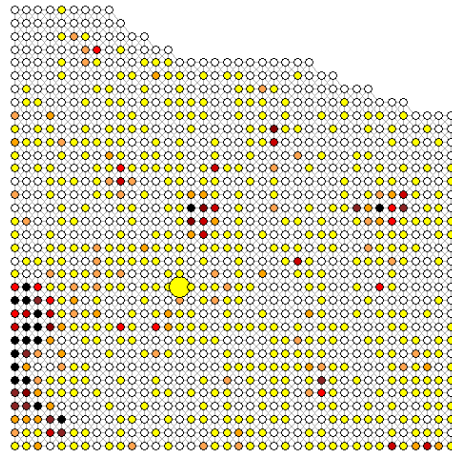
Voor methode 2 wordt een groep locaties als optimaal gevonden, zoals weergegeven in Figuur 10 door de vergrote knopen. Dit is het gebied $x \in [249000, 255000]$, $y \in [489000, 492000]$. De gemiddelde aanrijtijden zitten dan tussen de 660,0 s of 11 minuten (voor de knoop in de linker onderhoek) en 869,7 s of 14,5 minuten (voor de knoop in de meest rechter kolom, de een na bovenste rij). 62,4 % van de knopen, dat zijn 719 knopen, kan niet binnen tien minuten worden bereikt. Alle knopen kunnen binnen 18 minuten worden bereikt.

Het resultaat van deze methode is dat de brandweerkazerne in het midden van het gebied moet worden geplaatst. Dit is niet verrassend: hoe meer een kazerne in het midden van het gebied staat, hoe meer plekken binnen een redelijke tijd kunnen worden bereikt.

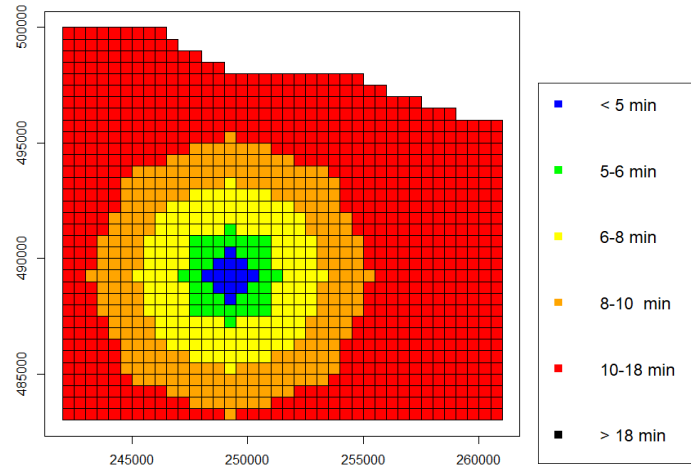
Methode 3: minimale aanrijtijden met dekkingvoorwaarde

Er wordt voor verschillende waarden van Q een optimale locatie berekend, zodat het aantal knopen dat kan worden bereikt binnen tien minuten minstens $Q\%$ is en de gemiddelde aanrijtijden minimaal zijn. Daarna wordt hetzelfde gedaan, waarbij bovendien geldt dat alle knopen binnen 18 minuten te bereiken moeten zijn. Er worden geen knopen gevonden die meer dan 50 % van de vierkanten binnen tien minuten kunnen bereiken. De resultaten voor $Q < 50$ zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 11 en 12.

In de tabel in Figuur 11 is het resultaat voor $Q \leq 25$ steeds gelijk. Dit betekent dat bij het minimaliseren van de aanrijtijden altijd een knoop wordt gevonden die in ieder geval 27,8 % van de knopen binnen tien minuten kan bereiken. Ook voor de knoop die werd gevonden met methode 1 geldt dit.



(a) Optimale locatie



(b) Gemiddelde aanrijtijden

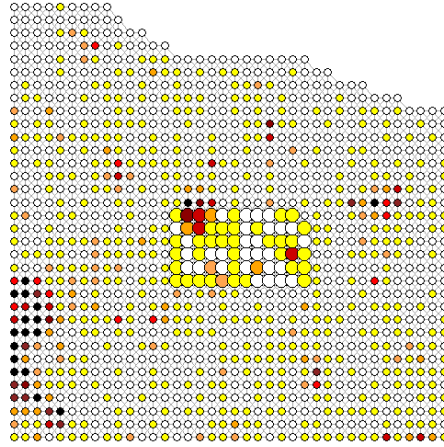
(c) Legenda

Figuur 8: Model 1- methode 1

gemiddelde aanrijtijd (s)	% > 10 minuten	% > 18 minuten
660,0	62,4	0

Figuur 9: Resultaten model 1 methode 1

In de tabel in Figuur 12 is het resultaat voor $Q \leq 45$ steeds gelijk. De reden hiervoor is hetzelfde: als in ieder geval alle knopen binnen 18 minuten bereikt moeten worden en de gemiddelde aanrijtijd wordt geminimaliseerd, wordt een knoop gevonden die in ieder geval 45,9 % van de knopen binnen tien minuten kan bereiken. De knoop die dit betreft is de knoop die werd gevonden met behulp van methode 1.



Figuur 10: Model 1- methode 2

Q	45	40	35	30	25	20
% binnen 10 mins	45,9	40,1	36,3	41,0	27,8	27,8
% binnen 18 mins	100	95,5	91,0	86,3	83,9	83,9
gemiddelde aanrijtijd (s)	591,6	575,2	560,5	551,4	547,0	547,0

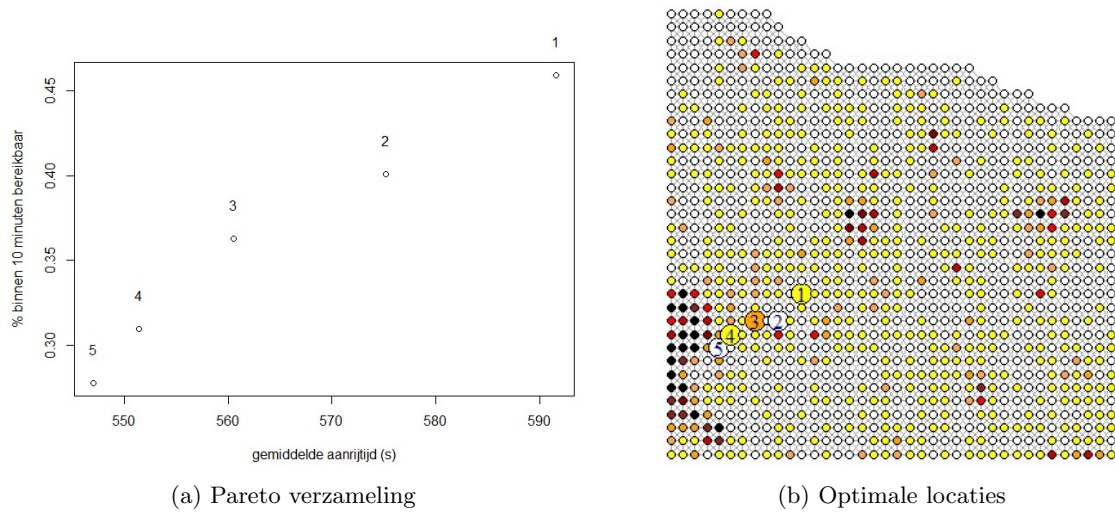
Figuur 11: Resultaten model 1 methode 3

Q	45	40	35	30	25	20
% binnen 10 minuten	45,9	45,9	45,9	45,9	45,9	45,9
% binnen 18 minuten	100	100	100	100	100	100
gemiddelde aanrijtijd (s)	591,6	591,6	591,6	591,6	591,6	591,6

Figuur 12: Resultaten model 1 methode 3, alles binnen 18 minuten

Om het eerste geval, waarbij niet 100 % van de knopen binnen 18 minuten bereikt hoeft te worden, te analyseren, wordt Pareto efficiëntie gebruikt. Een Pareto efficiënte staat is een staat waarvandaan het onmogelijk is om een nieuwe staat te vinden waarvoor geldt dat deze in ieder geval voor één van de criteria beter is, en voor de overige niet verslechterd. Een Pareto verzameling is de verzameling van alle Pareto efficiënte staten. Elk punt in een Pareto verzameling kan dus worden gezien als een punt dat optimaal is voor beide criteria. Het is nu afhankelijk van persoonlijke voorkeur welk punt als optimaal wordt gekozen. De punten die bij de waarden in Figuur 11 horen, worden gebruikt als Pareto efficiënte staten. In Figuur 13a is de Pareto verzameling getoond. Elk van de aangegeven punten kan dus worden gezien als optimaal. In Figuur 13b zijn met vergrote knopen de optimale locaties uit Figuur 13a weergegeven.

De optimale knopen die zijn weergegeven in Figuur 13b zijn goed te verklaren. Knoop 1 is een knoop die zoveel mogelijk knopen binnen tien minuten kan bereiken. Deze knoop is geen deel van de verzameling knopen die werd gevonden met behulp van methode 2, weergegeven in Figuur 10,

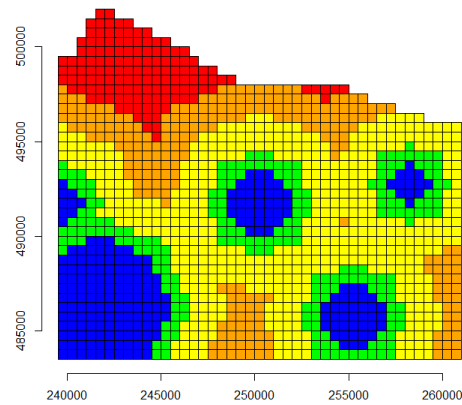


Figuur 13: Model 1- methode 3

omdat niet alle knopen vanuit deze knoop binnen 18 minuten bereikt kunnen worden. Knoop 5 is een knoop die een zo kort mogelijke gemiddelde aanrijtijd heeft. Knopen 2, 3 en 4 liggen tussen knoop 1 en knoop 5 in qua dekkingsgraad en gemiddelde aanrijtijd, zoals ook te zien in Figuur 13b.

5.2 Resultaten model 2

Voor model 2 worden eerst de huidige gemiddelde aanrijtijden naar de vierkanten weergegeven in Figuur 14. De legenda voor deze figuur is gegeven in Figuur 8c.



Figuur 14: Model 2- huidige situatie

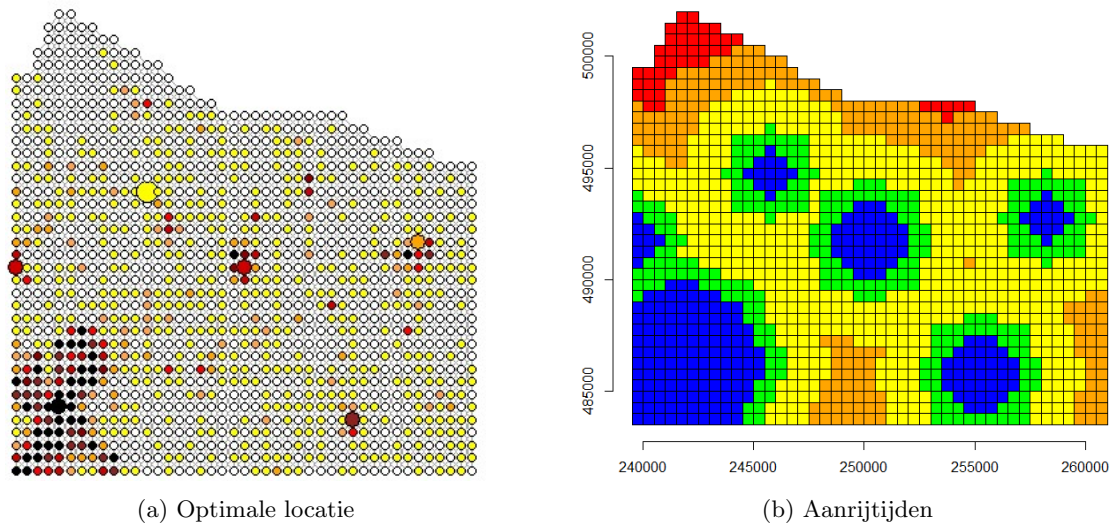
In Figuur 14 is een duidelijk probleem te zien linksboven in het gebied: hier zijn veel plekken pas

na tien minuten te bereiken. Dit probleem is ook aangegeven door de brandweer Enschede.

Vervolgens worden voor optimalisatiemethode 1, 2 en 3 de resultaten weergegeven.

Methode 1: minimale gemiddelde aanrijtijd

De locatie die als optimaal wordt gevonden is gegeven in Figuur 15a door de grootste, gele knoop. De vijf andere vergrote knopen zijn de reeds bestaande brandweerkazernes. Het resultaat is dus het gebied $x \in [245500, 246000]$, $y \in [494500, 49500]$. De gemiddelde aanrijtijden naar alle vierkanten zijn gegeven in Figuur 15b. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident is 216,8 s, of 3,6 minuten. 3,4 % van de knopen, dat zijn 44 knopen, kan niet binnen tien minuten bereikt worden. Alle knopen kunnen binnen 18 minuten bereikt worden. In de tabel in Figuur 16 zijn de resultaten samengevat.



Figuur 15: Model 2- methode 1

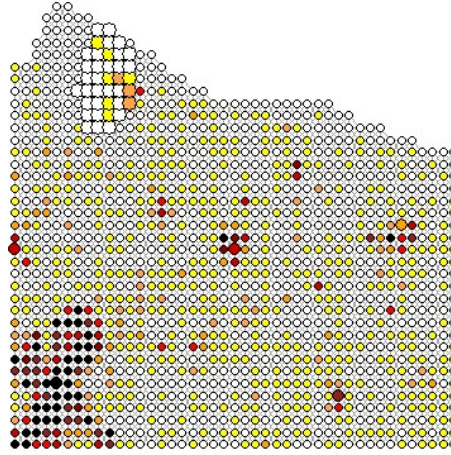
gemiddelde aanrijtijd (s)	% > 10 minuten	% > 18 minuten
216,8	3,4	0

Figuur 16: Resultaten model 1 methode 1

Methode 2: maximaal dekkingsgebied in 10 minuten

Voor methode 2 wordt een groep locaties als optimaal gevonden, zoals weergegeven in Figuur 17 door de vergrote knopen. Het resultaat is grofweg het gebied $x \in [243000, 245500]$, $y \in [496500, 501000]$. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident ligt tussen de 217,1 s, of 3,6 minuten (voor de knoop in de bovenste rij, de meest linker kolom) en 219,1 sec, of 3,7 minuten (voor de knoop in de onderste

rij, de meest rechter kolom). 0,5 % van de knopen, dat zijn 6 knopen, kan niet binnen tien minuten bereikt worden. Alle knopen kunnen binnen 18 minuten bereikt worden.



Figuur 17: Model 2- methode 2

Methode 3: minimale gemiddelde aanrijtjd met dekkingsvoorwaarde

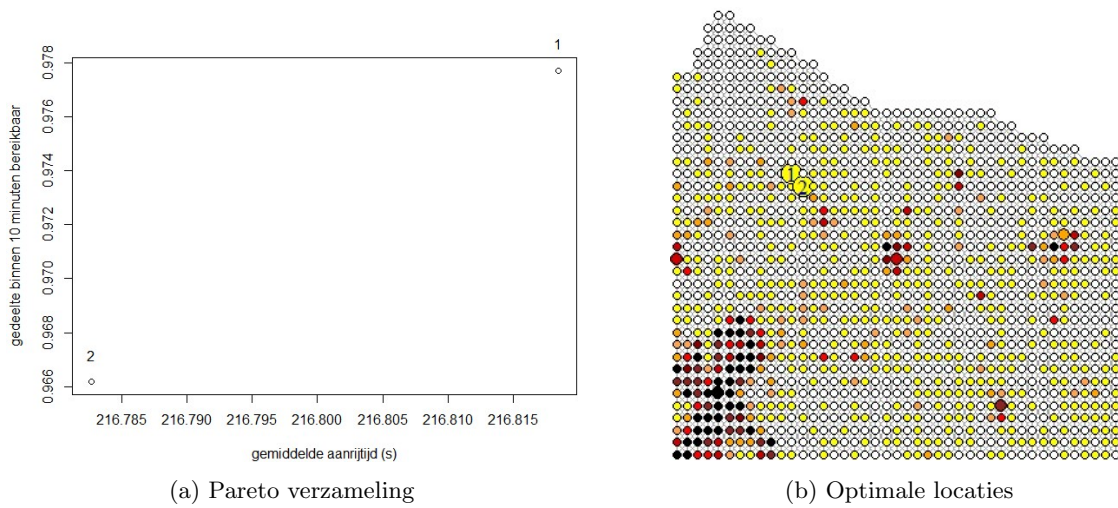
Er wordt voor verschillende waarden van Q een optimale locatie berekend, zodat het aantal vierkanten dat binnen tien minuten kan worden bereikt minstens $Q\%$ is en de gemiddelde aanrijtjd naar een incident minimaal is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 18. De resultaten voor $Q \leq 95$ zijn allemaal gelijk. Deze verklaring hiervoor is dat bij het minimaliseren van de aanrijtijden in ieder geval een knoop wordt gevonden die ten minste 96,6 % van de knopen binnen tien minuten kan bereiken.

Q	97,5	95	92,5	90	87,5
% binnen 10 mins	97,8	96,6	96,6	96,6	96,6
% binnen 18 mins	100	100	100	100	100
gemiddelde aanrijtjd (s)	216,82	216,78	216,78	216,78	216,78

Figuur 18: Resultaten model 2 methode 3

Voor het analyseren van de resultaten wordt Pareto efficiëntie gebruikt. De punten die bij de waarden in Figuur 18 horen, worden gebruikt als Pareto efficiënte staten. In Figuur 19a is de Pareto verzameling getoond. Beide punten kunnen dus worden gezien als optimaal. In Figuur 19b zijn met vergrote knopen de optimale locaties uit Figuur 19a weergegeven.

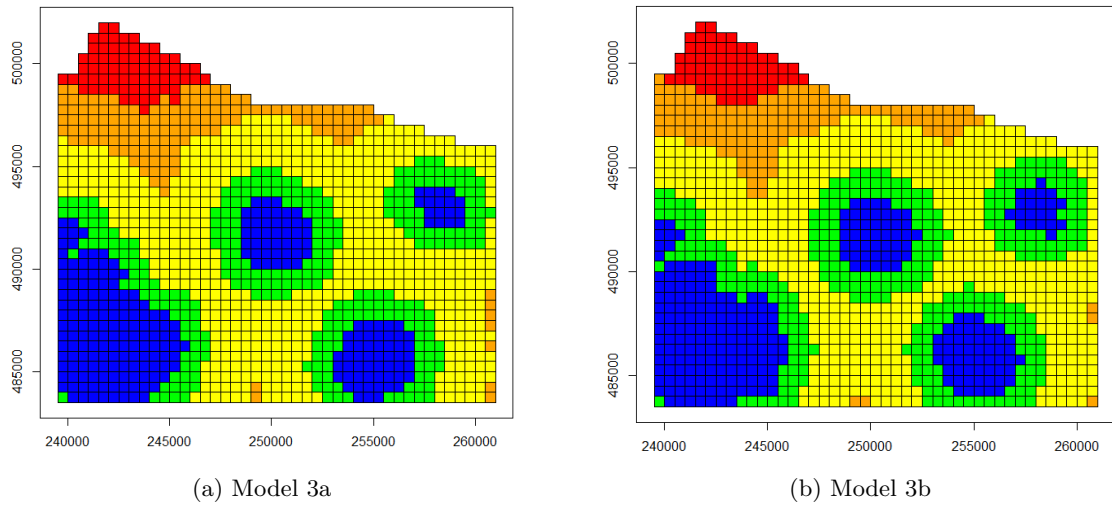
De optimale knopen die zijn weergegeven in Figuur 19b zijn goed te verklaren. Knoop 1 is een knoop die zoveel mogelijk knopen binnen tien minuten kan bereiken. Deze knoop is dan ook deel van de verzameling knopen die werd gevonden met behulp van methode 2, weergegeven in Figuur 17. Knoop 2 is een knoop die een zo kort mogelijke gemiddelde aanrijtjd heeft. Deze knoop is dan ook de knoop die is gevonden aan de hand van methode 1, weergegeven in Figuur 15a.



Figuur 19: Model 2- methode 3

5.3 Resultaten model 3

Voor model 3 worden eerst de huidige gemiddelde aanrijtijden naar de vierkanten weergegeven in Figuur 20. De legenda voor deze figuur is gegeven in Figuur 8c. In deze figuur is opnieuw een duidelijk probleem te zien linksboven in het gebied: hier zijn veel plekken pas na tien minuten te bereiken. Dit probleem is ook aangegeven door de brandweer Enschede.



Figuur 20: Model 3- huidige situatie

Voor optimalisatiemethode 1, 2 en 3 worden de resultaten weergegeven.

Methode 1: minimale gewogen gemiddelde van de aanrijtijden

De locatie die als optimaal wordt gevonden is gegeven in Figuur 21 door de grootste, gele knoop. De vijf andere vergrote knopen zijn de reeds bestaande brandweerkazernes. Het resultaat is dus voor model a het gebied $x \in [245500, 246000]$, $y \in [494500, 495000]$. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident is 223,5 s, of 3,7 minuten. 0,2 % van de knopen, dat zijn 3 knopen, kan niet binnen tien minuten bereikt worden. Alle knopen kunnen binnen 18 minuten bereikt worden. Voor model b is het resultaat het gebied $x \in [245000, 245500]$, $y \in [495000, 495500]$. De gemiddelde aanrijtijd naar een incident is 225,1 s, of 3,8 minuten. Alle knopen kunnen binnen tien minuten worden bereikt.

Het resultaat voor model 3a en model 3b is ongeveer gelijk: de optimale locaties die worden gevonden liggen 500 m in de x -richting en 500 m in de y -richting uit elkaar. Ook de gemiddelde aanrijtijd naar een incident is voor beide modellen ongeveer gelijk.

In Figuur 22 worden de resultaten samengevat.

Methode 2: maximaal dekkinggebied in 10 minuten

Voor methode 2 wordt een groep locaties als optimaal gevonden, zoals weergegeven in Figuur 23. Het resultaat is grofweg het gebied $x \in [239500, 244500]$, $y \in [465000, 502000]$. Voor model 3a zit de gemiddelde aanrijtijd naar een incident tussen de 223,6 s, of 3,7 minuten (voor de knoop in de derde rij van onder, de een na rechter kolom) en 226,1 s, of 3,8 minuten (voor de knoop in de bovenste rij in de linker kolom). Alle knopen kunnen binnen tien minuten bereikt worden.

Voor model 3b zit de gemiddelde aanrijtijd naar een incident tussen de 225,1 s, of 3,8 minuten (voor de knoop in de vierde rij van onder, in de één na rechter kolom) en 227,7 s, of 3,8 minuten (voor de knoop in de bovenste rij in de linker kolom). Alle knopen kunnen binnen tien minuten bereikt worden.

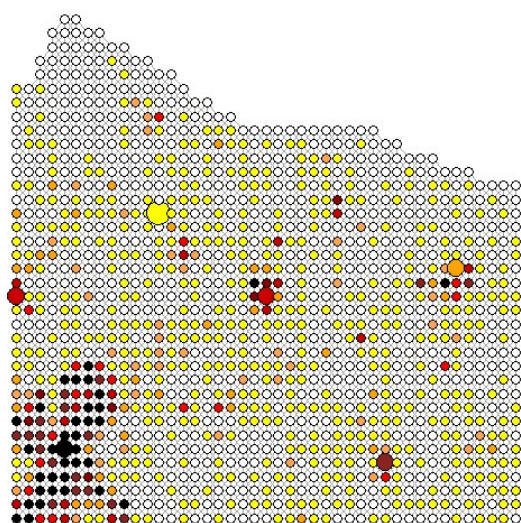
Methode 3: minimale gemiddelde aanrijtijden met dekkingvoorwaarde

Er wordt voor verschillende waarden van Q een optimale locatie berekend, zodat het aantal vierkanten dat kan worden bereikt binnen tien minuten minstens $Q\%$ is en de gemiddelde aanrijtijd naar een incident minimaal is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 24 en 25 voor respectievelijk model 3a en model 3b.

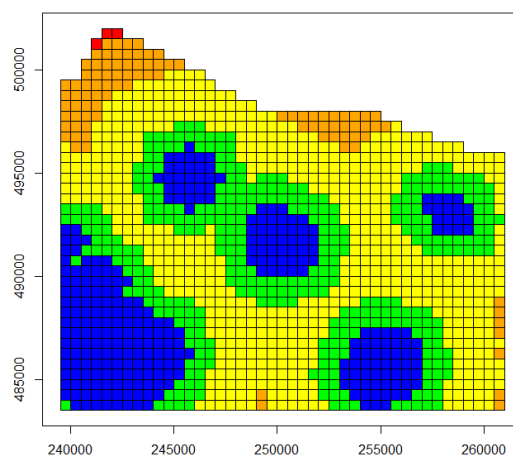
In de tabel in Figuur 24 is het resultaat voor $Q \leq 99,75$ gelijk. Dit betekent dat bij het minimaliseren van de gemiddelde aanrijtijd naar een incident altijd een knoop wordt gevonden die in ieder geval 99,75 % van de knopen binnen tien minuten kan bereiken. Ook voor de knoop die werd gevonden met methode 1 is dit het geval. Voor het analyseren van de resultaten wordt Pareto efficiëntie gebruikt. De punten die bij de waarden horen zijn weergegeven in Figuur 24, worden gebruikt als Pareto efficiënte staten. In Figuur 26a is de Pareto verzameling getoond. Beide punten kunnen worden gezien als optimaal. In Figuur 26b zijn met vergrote knopen de optimale locaties uit Figuur 26a weergegeven.

In Figuur 27 zijn de gemiddelde aanrijtijden naar de vierkanten bij het plaatsen van een brandweerkazerne op respectievelijk plek 1 en plek 2 uit Figuur 26b weergegeven.

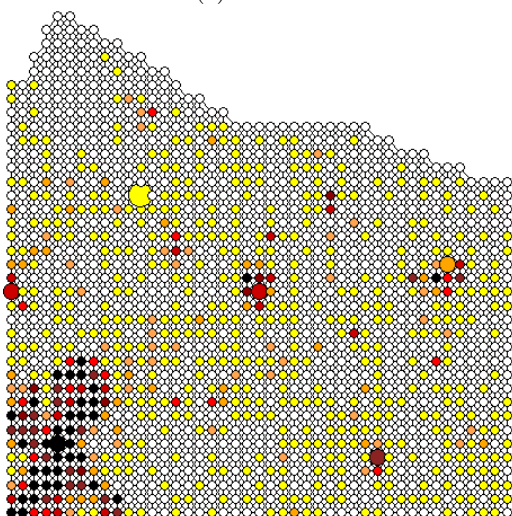
In Figuur 25 is het resultaat voor Q steeds gelijk. Dit betekent dat bij het minimaliseren van de



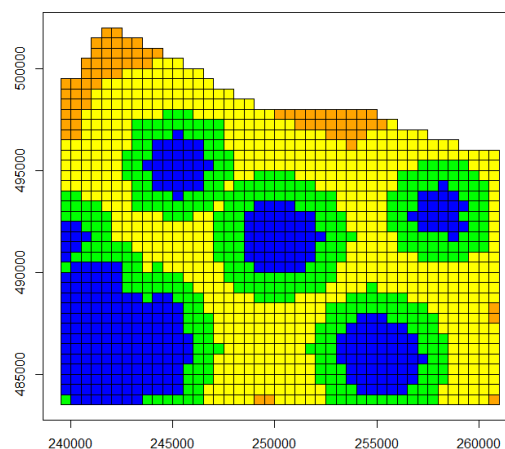
(a) Model 3a



(b) Model 3a



(c) Model 3b



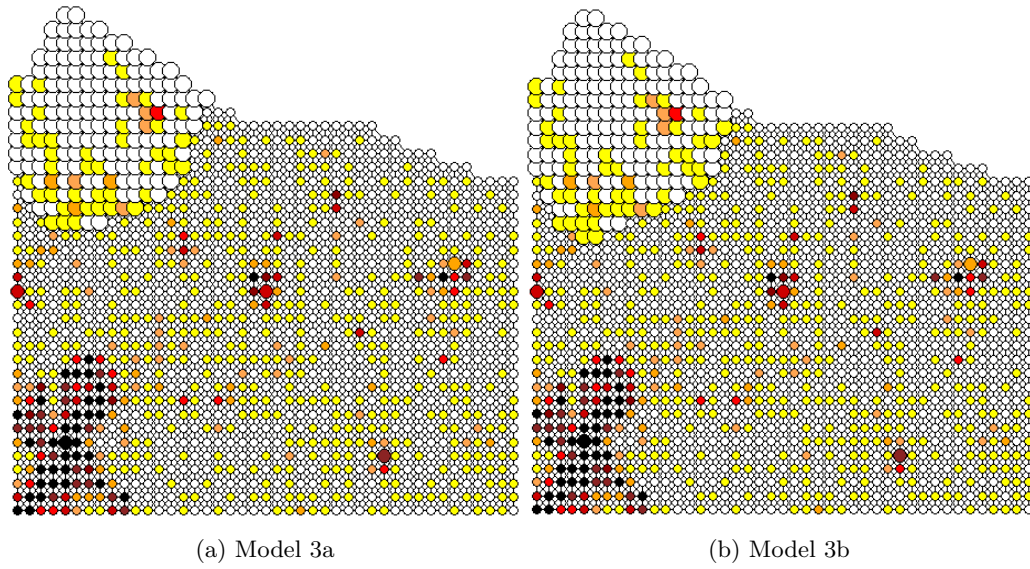
(d) Model 3b

Figuur 21: Model 3- methode 1

Model 3	gemiddelde aanrijtijd (s)	% > 10 minuten	% > 18 minuten
a	223,5	0,2	0
b	225,1	0	0

Figuur 22: Resultaten model 3 methode 1

aanrijtijden altijd een knoop wordt gevonden die 100 % van de knopen binnen tien minuten kan bereiken. De knoop waarvoor dit geldt is de knoop die bij methode 1 werd gevonden.



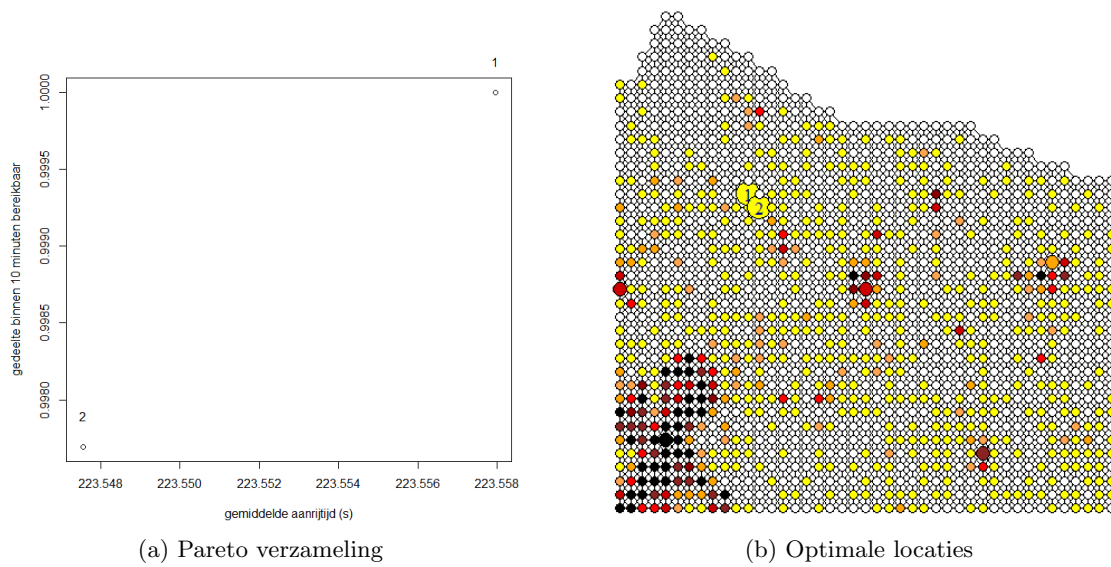
Figuur 23: Model 3- methode 2

Q	100	99,95	99,90	99,85	99,80	99,75	99,70
% binnen 10 mins	100	100	100	100	100	99,77	99,77
% binnen 18 mins	100	100	100	100	100	100	100
gemiddelde aanrijtijd (s)	223,56	223,56	223,56	223,56	223,56	223,55	223,55

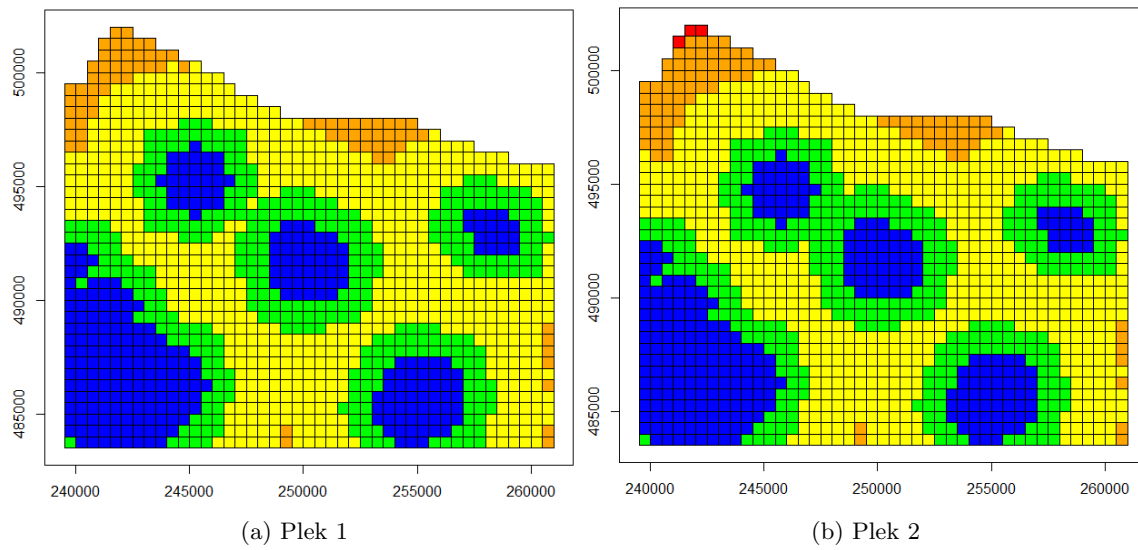
Figuur 24: Resultaten model 3a methode 3

Q	100	99,95	99,90	99,85	99,80	99,75	99,70
% binnen 10 mins	100	100	100	100	100	100	100
% binnen 18 mins	100	100	100	100	100	100	100
gemiddelde aanrijtijd (s)	225,19	225,19	225,19	225,19	225,19	225,19	225,19

Figuur 25: Resultaten model 3b methode 3



Figuur 26: Model 3a- methode 3



Figuur 27: Model 3a- methode 3, aanrijtijden

6 Validatie

Er wordt een robuustheids- en gevoeligheidsanalyse gedaan om het model te valideren. De robuustheidsanalyse bestaat uit het toevoegen van ruis aan het aantal incidenten per vierkant en de gevoeligheidsanalyse bestaat uit het variëren van de uitrijtijd u . Er is gekozen om slechts model 3a en model 3b te valideren, omdat bij deze modellen met de meeste aspecten rekening is gehouden. Er wordt daarom verwacht dat deze modellen het meest robuust en dus betrouwbaar zijn. Bij model 3a wordt de bevolkingsdichtheid meegenomen, waar dat bij model 3b niet wordt gedaan. Een model waarin meer aspecten zijn meegenomen, zal over het algemeen beter de werkelijkheid weergeven dan een model waarbij minder aspecten zijn meegenomen. Er wordt daarom verwacht dat model 3a representatiever is dan model 3b. Uit de analyse zal volgen of model 3a en/of 3b betrouwbaar is.

Er wordt een betrouwbaarheidsinterval voor de optimale locaties zoals gevonden met model 3a en 3b en methode 3, $Q = 100$, gemaakt. Er wordt gekozen voor methode 3, omdat bij deze methode rekening met beide criteria van het bicriteria optimalisatieprobleem wordt gehouden. Er wordt voor $Q = 100$ gekozen, omdat het belangrijk is dat alle gebieden binnen tien minuten kunnen worden bereikt en bij afname van het aantal gebieden dat binnen tien minuten kan worden bereikt de gemiddelde aanrijtijd niet significant toeneemt. Om het betrouwbaarheidsinterval te maken, wordt ruis toegevoegd aan de waarden van de knopen. Er wordt hierbij aangenomen dat de nieuwe waarde met ruis niet meer dan twee keer de originele waarde is. Voor de waarde met ruis van knoop i geldt dan:

$$\text{waarde}_R(i) = \text{waarde}(i) \cdot a, \quad (28)$$

waarbij a een willekeurig getal in $\mathbb{R}$ tussen 0 en 2 is. Voor elke knoop wordt opnieuw een waarde voor a gekozen. Met de nieuwe waarden wordt methode 3 uitgevoerd, met $Q = 100$. X_1 geeft van het vierkant van de optimale plek de coördinaten van de linkeronderhoek, de gemiddelde aanrijtijd naar een incident en het percentage van het gebied dat binnen 5, 6, 8 en 10 minuten kan worden bereikt aan. Vervolgens wordt opnieuw voor elke knoop een waarde met ruis gevonden en wordt een nieuwe optimale plek gevonden, X_2 . Dit wordt n keer gedaan. De stochastische variabelen $X_1, X_2, \dots, X_n$ zijn onderling onafhankelijk en gelijk verdeeld, dus kan de centrale limietstelling worden toegepast. Deze stelling geeft dat, voor grote waarden van n , het steekproefgemiddelde bij benadering normaal verdeeld is, met verwachting μ en standaardafwijking $\frac{s}{\sqrt{n}}$. Voor een 95 %-betrouwbaarheidsinterval geldt:

$$\bar{X} - z \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (29)$$

met $z = 1,95$. Om het interval te vinden is dus het steekproefgemiddelde $\bar{X}$ en de standaardafwijking s nodig. De standaardafwijking wordt gevonden met behulp van de steekproefvariantie (s^2):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (30)$$

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (31)$$

Uit een steekproef van $n = 100$ stochasten volgen de volgende 95 %-betrouwbaarheidsintervallen voor de optimale locatie die volgt uit model 3a, methode 3, $Q = 100$. De intervallen zijn voor de

x -coördinaat en de y -coördinaat van de linkeronderhoek van het vierkant van de optimale locatie, de gemiddelde aanrijtijd naar een incident en het percentage van het gebied dat binnen 5 minuten, 6 minuten, 8 minuten en 10 minuten kan worden bereikt:

$$x \in [243714, 9, 245865, 1], \quad (32)$$

$$y \in [494536, 5, 495903, 5], \quad (33)$$

$$\text{gemiddelde aanrijtijd} \in [212, 1, 236, 8], \quad (34)$$

$$\% \text{ binnen 5 minuten} \in [22, 1, 22, 1], \quad (35)$$

$$\% \text{ binnen 6 minuten} \in [48, 6, 50, 0], \quad (36)$$

$$\% \text{ binnen 8 minuten} \in [92, 8, 96, 5], \quad (37)$$

$$\% \text{ binnen 10 minuten} \in [100, 100]. \quad (38)$$

Uit een steekproef van $n = 100$ stochasten volgen de volgende 95 %- betrouwbaarheidsintervallen voor de optimale locatie die volgt uit model 3b, methode 3, $Q = 100$. De intervallen zijn voor de x -coördinaat en de y -coördinaat van de linkeronderhoek van het vierkant van de optimale locatie, de gemiddelde aanrijtijd naar een incident en het percentage van het gebied dat binnen 5 minuten, 6 minuten, 8 minuten en 10 minuten kan worden bereikt:

$$x \in [244149, 1, 245630, 9], \quad (39)$$

$$y \in [494430, 9, 495899, 1], \quad (40)$$

$$\text{gemiddelde aanrijtijd} \in [213, 7, 237, 2], \quad (41)$$

$$\% \text{ binnen 5 minuten} \in [23, 1, 23, 1], \quad (42)$$

$$\% \text{ binnen 6 minuten} \in [51, 6, 51, 8], \quad (43)$$

$$\% \text{ binnen 8 minuten} \in [93, 6, 96, 3], \quad (44)$$

$$\% \text{ binnen 10 minuten} \in [100, 100]. \quad (45)$$

Ook voor de huidige situatie, zonder het plaatsen van de nieuwe brandweerkazerne, zijn 95%-betrouwbaarheidsintervallen gemaakt. De resultaten zijn gegeven in Sectie 7.

Uitruktijd variëren

De gebruikte uitruktijd voor de nieuwe brandweerkazerne is $u = 231$ s. Als de kazerne voor professionele brandweer wordt, dan kan de uitruktijd verkorten tot $u = 80$ s, zoals bij de kazerne in Almelo. Als de kazerne voor vrijwillige brandweer wordt, dan kan de uitruktijd verlengen tot $u = 350$ s, zoals bij de kazerne in Boekelo. Voor beide waarden van u is methode 3 nogmaals toegepast. De resultaten zijn gegeven in Figuur 28. In Figuur 29 zijn de gemiddelde aanrijtijden naar de vierkanten weergegeven bij plaatsing van de nieuwe brandweerkazerne op de locaties waarvan de waarden zijn gegeven in Figuur 28.

In Figuur 28 zijn de waarden voor $Q \leq 96$ steeds gelijk. Dit betekent dat bij minimaliseren van de gemiddelde aanrijtijd naar een knoop altijd een knoop wordt gevonden die in ieder geval zoveel procent als in de kolom $Q = 96$ van de knopen binnen tien minuten kan bereiken. Ook is in de figuur te zien dat bij een langere uitruktijd van de nieuwe brandweerkazerne de gemiddelde aanrijtijd naar een incident toeneemt.

Model	u (s)	Q	100	99	98	97	96	95
a	80	% binnen 10 minuten	100	99,2	98,1	98,1	96,8	96,8
		% binnen 18 minuten	100	100	100	100	100	100
		gemiddelde aanrijtijd (s)	212,0	208,0	206,7	206,7	205,8	205,8
a	350	% binnen 10 minuten	100	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5
		% binnen 18 minuten	100	100	100	100	100	100
		gemiddelde aanrijtijd (s)	225,81	225,74	225,74	225,74	225,74	225,74
b	80	% binnen 10 minuten	100	99,2	98,0	98,0	96,6	96,6
		% binnen 18 minuten	100	100	100	100	100	100
		gemiddelde aanrijtijd (s)	213,5	210,2	208,6	206,6	207,0	207,0
b	350	% binnen 10 minuten	100	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
		% binnen 18 minuten	100	100	100	100	100	100
		gemiddelde aanrijtijd (s)	227,4	227,3	227,3	227,3	227,3	227,3

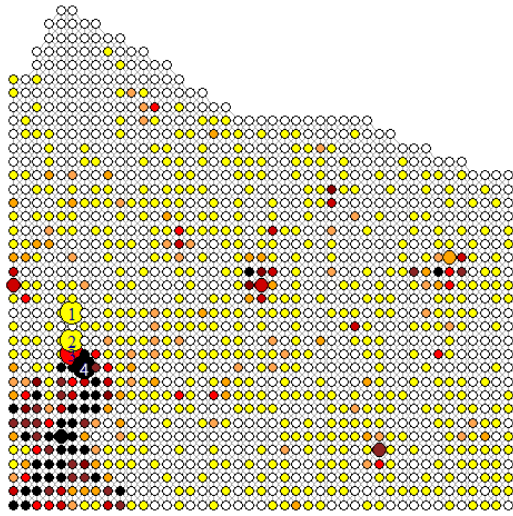
Figuur 28: Resultaten model 3 methode 3, $u=80, 350$

Bij beide modellen verschillen de resultaten voor $u = 80$ s en $u = 350$ s met de eerder gevonden resultaten voor $u = 231$ s. Vooral voor $u = 80$ zijn de resultaten erg anders. De verklaring hiervoor is dat, bij $u = 80$ s, de nieuwe kazerne veel knopen binnen tien minuten kan bereiken vanwege de korte uitruktijd en er dus zelfs vanaf een afstand voor kan zorgen dat de knopen die eerst binnen tien minuten niet te bereiken waren dat nu wel zijn. Om de gemiddelde aanrijtijd naar een incident te verkorten, wordt de nieuwe kazerne dan zo dicht mogelijk bij de meeste branden (die in Almelo zijn) geplaatst. Bij een lange uitruktijd, $u = 350$ s, kan de kazerne niet veel knopen bereiken binnen tien minuten en moet deze dus dichtbij de knopen die binnen tien minuten niet kunnen worden bereikt worden geplaatst. Hierdoor moet de kazerne worden geplaatst op een plek die minder gunstig is voor de gemiddelde aanrijtijd naar een incident.

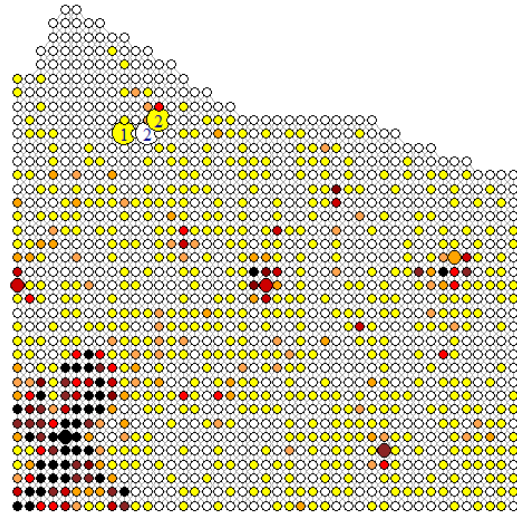
Betrouwbaarheid van de modellen

Een eerste teken van robuustheid van beide modellen is dat ze het probleem zoals geschetst door de brandweer Enschede (dat het gebied linksboven het dorp Tubbergen niet goed bereikbaar is) goed weergeven. Een tweede teken van robuustheid van beide modellen is dat de 95%-betrouwbaarheidsintervallen erg smal zijn. De intervallen voor model 3a zijn over het algemeen breder dan die voor model 3b, waaruit kan worden afgeleid dat model 3b representatiever is dan model 3a. Dit is een onverwacht resultaat. Een verklaring hiervoor is dat bij de steekproef van model 3b niet steeds opnieuw is berekend of een vierkant binnen of buiten de bebouwde kom ligt: het resultaat dat zonder ruis was gevonden is hiervoor gebruikt. Als dit wel steeds was veranderd, was het betrouwbaarheidsinterval waarschijnlijk breder geweest. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de uitkomst van het model op een logische manier verandert als de uitruktijd wordt veranderd. Er kan worden geconcludeerd dat beide modellen betrouwbaar zijn.

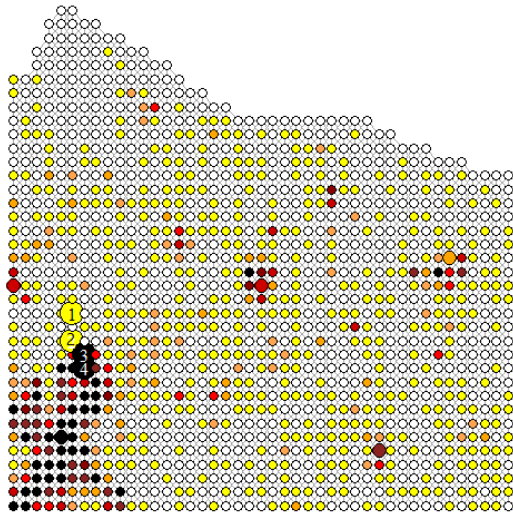
Het valideren van de grens die bepaalt of een gebied binnen of buiten de bebouwde kom ligt is voor beide modellen lastig, omdat hierover geen literatuur is gevonden. Daarom wordt ervoor gekozen om de resultaten van beide modellen mee te nemen in de aanbeveling voor de brandweer.



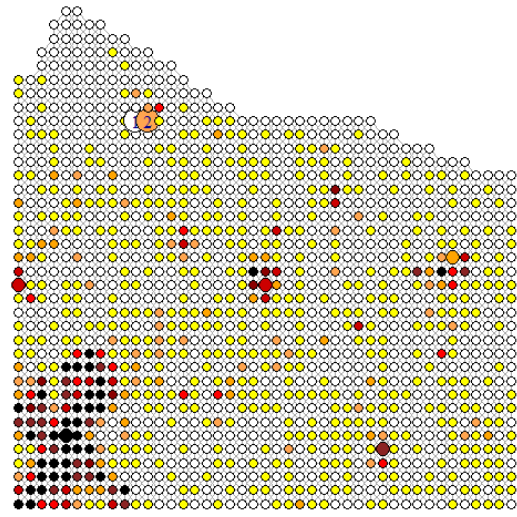
(a) Model 3a- $u=80$



(b) Model 3a- $u=350$



(c) Model 3b- $u=80$

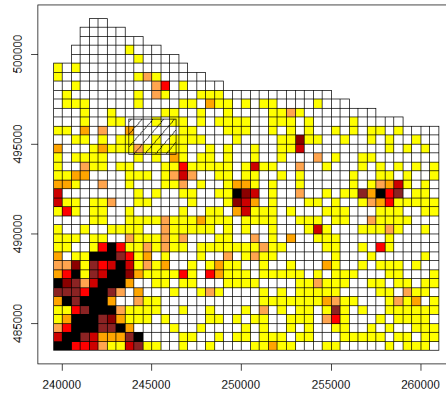


(d) Model 3b- $u=350$

Figuur 29: Model 3- methode 3, $u=80$, 350

7 Aanbeveling

Naar aanleiding van het onderzoek in deze scriptie wordt het volgende aanbevolen wat betreft de plaatsing van de nieuwe brandweerkazerne in regio Tubbergen. De brandweerkazerne kan het beste worden geplaatst in het gebied met de coördinaten x tussen 243715 en 246365 en y tussen 494431 en 496404. Dit gebied is weergegeven in Figuur 30 door de gearceerde rechthoek. Het gebied is dus ten noordwesten van het dorp Geesteren.



Figuur 30: Aanbevelingsplek

Als de kazerne in dit gebied wordt geplaatst, is met 95 % zekerheid het volgende het resultaat:

- De gemiddelde aanrijtijd naar een incident zal tussen de 212,1 s en 237,2 s liggen;
- Het percentage van het gebied dat binnen 5 minuten bereikt kan worden zal tussen de 22,1 en 23,1 liggen;
- Het percentage van het gebied dat binnen 6 minuten bereikt kan worden zal tussen de 48,6 en 51,8 liggen;
- Het percentage van het gebied dat binnen 8 minuten bereikt kan worden zal tussen de 92,8 en 96,5 liggen;
- Het percentage van het gebied dat binnen 10 minuten bereikt kan worden zal 100 zijn.

Momenteel, zonder de nieuwe kazerne, is met 95 % zekerheid het volgende het geval:

- De gemiddelde aanrijtijd naar een incident ligt tussen de 214,6 s 239,1 s;
- Het percentage van het gebied dat binnen 5 minuten bereikt kan worden ligt tussen de 19,9 en 20,9;
- Het percentage van het gebied dat binnen 6 minuten bereikt kan worden ligt tussen de 41,8 en 44,5;

- Het percentage van het gebied dat binnen 8 minuten bereikt kan worden ligt tussen de 84,0 en 84,7;
- Het percentage van het gebied dat binnen 10 minuten bereikt kan worden ligt tussen de 94,5 en 95,2.

Voor deze aanbeveling is aangenomen dat de nieuwe brandweerkazerne voor vrijwillige brandweer met een gemiddelde uitruktijd van 230 s zal zijn. Als wordt aangenomen dat de kazerne voor vrijwillige brandweer met een gemiddelde uitruktijd van ongeveer 350 s zal zijn, dan kan de kazerne beter 1 tot 2 kilometer naar het noorden worden verplaatst, in het zuiden van het dorp Langeveen.

Uit de resultaten blijkt dat de plaatsing van een nieuwe brandweerkazerne nauwelijks invloed zal hebben op de gemiddelde aanrijtijd tot een incident: de plaatsing zal vooral invloed hebben op de extreme aanrijtijden. Zo zal het gebied dat binnen 6 minuten te bereiken is groeien met 5 % van het totale gebied. Het gebied dat binnen 8 minuten te bereiken is zal groeien met 10 % van het totale gebied. Het gehele gebied zal bereikbaar zijn binnen tien minuten.

8 Heuristieken

Het vinden van de optimale locatie voor de brandweerkazerne met zowel methode 1 als 2 als 3 wordt in dit model gedaan door voor elke knoop de gemiddelde reistijd naar alle andere knopen te bepalen. Vervolgens wordt bepaald welk van de knopen gemiddelde de kortste reistijd geeft. Het aantal berekeningen dat moet worden gedaan is hierbij van orde n^2 en neemt dus kwadratisch toe als het in acht te nemen gebied groter wordt. Om te zorgen dat er minder berekeningen nodig zijn kunnen verschillende heuristieken gebruikt worden. Deze heuristieken zorgen ervoor dat een resultaat wordt gegeven dat in ieder geval lokaal optimaal is en wellicht ook globaal optimaal. Er worden twee heuristieken uitgewerkt: Random Restart Hillclimbing Search en Simulated Annealing, een speciaal geval van Restart Hillclimbing.

8.1 Random Restart Hillclimbing

Bij deze heuristiek wordt uit de graaf een willekeurige knoop k gekozen als beginpunt. Deze knoop wordt meteen gezien als optimale knoop. Voor k en zijn burens wordt de gemiddelde aanrijtijd naar een incident berekend. Als één van de burens een kortere gemiddelde aanrijtijd heeft, wordt deze knoop de nieuwe optimale knoop. Dit wordt herhaald tot een knoop i wordt bereikt die geen burens met een kortere gemiddelde aanrijtijd heeft. De knoop i is het optimale punt. Dit algoritme wordt w keer uitgevoerd, elke keer met een willekeurige knoop als beginpunt, en de knoop die uit de w optimale punten de kortste gemiddelde aanrijtijd heeft is het uiteindelijke optimale punt (Jacobson & Yücesan, 2004).

Het nut van het w keer herhalen van het algoritme is dat de kans groter wordt om het globale minimum te vinden. Het algoritme komt namelijk steeds op een lokaal minimum uit. De functie die wordt geminimaliseerd, de gemiddelde aanrijtijd, is niet convex, dus een lokaal minimum is niet per se het globale minimum. Hoe meer lokale minima worden gevonden, hoe groter de kans dat één van deze het globale minimum is.

Het algoritme wordt verduidelijkt met een pseudo code:

Algorithm 1 Random Restart Hillclimbing

```
1:  $n \leftarrow$  aantal knopen
2:  $w \leftarrow$  hoe vaak wordt herhaald
3: herhaal  $w$  keer:
4: loop:
5:  $k \leftarrow$  willekeurige beginknoop
6:  $k.art \leftarrow$  gemiddelde aanrijtijd van knoop  $k$ 
7:  $b.art \leftarrow$  minimale gemiddelde aanrijtijd van buurknopen van  $k$ 
8: if  $b.art < k.art$  then
9:    $k \leftarrow b.$ 
10: goto loop.
11: else bewaar  $k$ , sluit loop.
12: if  $w$  keer herhaald then
13:   optimum  $\leftarrow$  minimum van alle  $k$ 
```

Om lokale minima te vermijden, kan ook worden gekozen om de optimale knoop niet te vergelijken met zijn buurknopen, maar met de burens van de buurknopen, of zelfs met de burens daarvan. Op deze manier wordt er vergeleken over een groter gebied, waardoor een lokaal minimum kan worden verlaten. Het nadeel van deze methode is dat er meer vergelijkingen moeten worden uitgevoerd, waardoor het algoritme minder snel is.

8.2 Simulated Annealing

Bij deze heuristiek is het mogelijk om naar een knoop te gaan met een hogere gemiddelde aanrijtijd, wat de mogelijkheid geeft om een lokaal minimum te omzeilen. Er wordt weer een willekeurige knoop k uit de graaf gekozen als beginpunt, die ook als optimaal wordt gezien. Nu wordt een willekeurige buurknoop b van k gekozen. Voor k en b wordt de gemiddelde aanrijtijd berekend. Als de gemiddelde aanrijtijd van b korter is dan die van k dan wordt b de nieuwe optimale knoop. Als de gemiddelde aanrijtijd van b langer is dan die van k dan wordt b de nieuwe optimale knoop met kans p . Voor kans p geldt het volgende: p hangt af van het verschil in gemiddelde aanrijtijd tussen b en k en van de gemiddelde aanrijtijd van k . p is groter voor een kleiner verschil tussen de gemiddelde aanrijtijd van k en b en p is groter voor een kortere gemiddelde aanrijtijd van k (Jacobson & Yücesan, 2004).

De heuristiek wordt uitgebreider uitgelegd door Jacobson en Yücesan (Jacobson & Yücesan, 2004). Deze heuristiek is een stuk lastiger te implementeren dan de Random Restart Hillclimbing heuristiek.

9 Conclusie

In deze scriptie is onderzoek gedaan naar de optimale plaatsing van een nieuwe brandweerkazerne in regio Tubbergen. Dit probleem is een non-metrisch, uncapacitated *facility location problem*. Twee criteria waar de optimale locatie aan moet voldoen zijn dat de gemiddelde aanrijtijd naar een incident zo kort mogelijk moet zijn en dat het gebied dat binnen tien minuten kan worden bereikt zo groot mogelijk moet zijn. Er zijn drie methodes gebruikt om de optimale locatie te vinden. Bij de eerste methode wordt de gemiddelde aanrijtijd naar een incident geminimaliseerd, bij de tweede methode wordt het gebied dat binnen tien minuten bereikbaar is gemaximaliseerd en bij de derde methode worden de eerste twee gecombineerd. Om de methodes uit te voeren zijn drie wiskundige modellen gemaakt. In het eerste model worden de incidenten van 2004 tot 2016 in het gebied meegenomen. In het tweede model wordt het eerste model aangevuld door vijf reeds bestaande brandweerkazernes in het gebied mee te nemen. In het derde model wordt het tweede model aangevuld door het wegennet van het gebied mee te nemen.

Uit het eerste model volgt dat de optimale locatie tussen Almelo en het midden van het gebied ligt. Uit het tweede model volgt dat de optimale locatie ten noordwesten van het dorp Geesteren ligt. Uit het derde model volgt hetzelfde als uit het tweede model. Uit de validatie van het derde model volgen 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor de coördinaten van de optimale locatie, de gemiddelde aanrijtijd naar een incident en het percentage van het gebied dat binnen 5, 6, 8 en 10 minuten te bereiken is. Er wordt geconcludeerd dat het model betrouwbaar is. Als de uitruktijd van de nieuw te plaatsen kazerne wordt verkort, is de optimale locatie meer naar het noorden van de stad Almelo. Als de uitruktijd van de nieuw te plaatsen kazerne wordt verlengd, is de optimale locatie meer naar het zuiden van het dorp Langeveen.

Bij plaatsing van de nieuwe brandweerkazerne zullen de gemiddelde prestaties van de brandweer (gemiddelde aanrijtijd naar een incident en percentage van het gebied dat binnen 5, 6, 8 en 10 minuten kan worden bereikt) iets verbeteren, maar de voornaamste winst ligt in de uitschieters. Alle gebieden die momenteel niet binnen tien minuten bereikbaar zijn, zullen dat bij plaatsing van de nieuwe kazerne wel zijn. Ook zal ongeveer 90 %, in plaats van 80 %, van het gebied dan binnen 8 minuten te bereiken zijn.

De volgende aspecten kunnen nog in het model worden verwerkt:

- **Gebouwensoorten:** Er kan rekening worden gehouden met verschillende gebouwensoorten en de wettelijke maximale aanrijtijden die daaraan zijn verbonden;
- **Geschikte bouwplek:** Er kan rekening worden gehouden met locaties waar het wel of niet geschikt is om een brandweerkazerne te bouwen, zoals gedaan door Guild en Rollin (Guild & Rollin, 1972);
- **Dubbel dekkingsprincipe:** Er kan rekening worden gehouden met het dubbele dekkingsprincipe, zoals gedaan door Schreuder (Schreuder, 1981);
- **Bevolkingsgroei:** Er kan rekening worden gehouden met bevolkingsgroei, zoals gedaan door Betancur et al. (Betancur et al., 2015).

Het toevoegen van voorgaande aspecten zullen het model meer representatief voor de werkelijkheid maken. Aan de andere kant zullen de toevoegingen zorgen voor een langere rekentijd. Om de

rekentijd te verkorten, kan gebruik worden gemaakt van een van de heuristieken zoals gegeven in Sectie 8.

Dankwoord

Bij het schrijven van dit verslag heb ik van verschillende mensen hulp en steun gehad. Ik zou deze mensen graag bedanken. Ten eerste zijn mijn begeleiders van de University of Twente Maurits de Graaf en Marie-Colette van Lieshout van bijzonder belang geweest; zij hebben mij op ideeën gebracht, mogelijkheden of onduidelijkheden aangekaart en wekelijks commentaar geleverd op mijn bevindingen. Ten tweede wil ik Emiel Sanders bedanken. Hij was mijn contactpersoon bij de brandweer Enschede en heeft mij informatie en data van de situatie gegeven. Ten derde wil ik Tineke School bedanken. Zij staat ook in contact met de brandweer Enschede en heeft mij data van hen aangeleverd. Ook heeft Tineke mij met bij het programmeren goed op weg geholpen en veel vragen beantwoord. Ten slotte wil ik vrienden en familie bedanken, omdat zij mij veel inspiratie voor mijn opdracht hebben gegeven en hebben gezorgd voor steun op de momenten dat het even tegenzat.

Literatuur

- Adams, L. D. (2015). Fire Station Placement Review and Recommendation for Expansion Des Moines Fire Department City of Des Moines, Iowa. *Public Safety Solutions, Inc.*.
- Betancur, J., Blackmon, C., Calvert, M., Douthit, J., Jackson, M. & Neuhaus, S. (2015). City of Concord Fire Station Location Analysis. *University of North Carolina*.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Matematik*, 1(1), 269-271.
- Guild, R. D. & Rollin, J. E. (1972). A fire station placement model. *Fire Technology*, 8(1), 33-43.
- Jacobson, S. & Yücesan, E. (2004). Analyzing the performance of generalized hill climbing algorithms. *Journal of Heuristics*, 10(4), 387-405.
- Kilbury, D. G. (2008). Developing a Methodology for when to add a fire station. *Cape Coral fire, rescue and emergency management services*.
- Schreuder, J. (1981). Application of a location model to fire stations in Rotterdam. *European Journal of Operational Research*, 6(2), 212-219.
- Simpson, T. (1750). *The doctrine and applications of fluxions*. London, United Kingdom.
- Tellier, L.-N. (1972). The weber problem: Solution and interpretation. *Geographical Analysis*, 4(3), 215-233.
- Veiligheid en Justitie. (2017). *Besluit veiligheidsrisico's Art 3.2.1*.

10 Appendix

10.1 Variabelen

In Figuur 31 is een beschrijving gegeven van alle variabelen die zijn gebruikt in deze scriptie.

Variabele	Beschrijving
D	de verzameling van incidenten in het gebied
K	de verzameling van de reeds bestaande brandweerkazernes in het gebied
L	het gebied rondom Tubbergen.
m	het aantal knopen in de graaf
Q	het minimale percentage van het gebied dat binnen tien minuten te bereiken moet zijn
s	de standaardafwijking
s^2	de steekproefvariantie
u	de uitruktijd van de te plaatsen brandweerkazerne
u_B	de uitruktijd van brandweerkazerne B
$\text{waarde}(i)$	het aantal branden in vierkant i

Figuur 31: Beschrijving variabelen

10.2 Waardes toekennen aan vierkanten

Hierbij is de incidentenmatrix de matrix met alle branden tussen 2004 en 2016. De vierkantenmatrixsort is de matrix met de vierkanten die worden gebruikt, gesorteerd op x coördinaat en daarna op y coördinaat.

```

n <- nrow(incidentenmatrix)
locatiematrix <- matrix(nrow = n, ncol = 3) #[i,1]: incident ID, [i,2]: vierkant ID, [i
,3]: nr of vierkant in vierkantenmatrixsort

for (i in 1:n) {
  print(i)
  j <- 1
  foundx <- 0
  while (foundx == 0) {
    if (incidentenmatrix[i,2] >= vierkantenmatrixsort[j,1] && incidentenmatrix[i,2] <
vierkantenmatrixsort[j,1]+500) { #dan incident vanaf rij j
      k <- j
      foundx <- 1
      foundy <- 0
      while (foundy == 0 && vierkantenmatrixsort[k,1] == vierkantenmatrixsort[j,1]) {
        if (incidentenmatrix[i,3] >= vierkantenmatrixsort[k,2] && incidentenmatrix[i,3]
< vierkantenmatrixsort[k,2]+500) {
          foundy <- 1
          locatiematrix[i,1] <- incidentenmatrix[i,1] #incidentID
          locatiematrix[i,2] <- vierkantenmatrixsort[k,4] #vierkantID
          locatiematrix[i,3] <- k #rij in vierkantenmatrixsort
        }
      }
    }
  }
}

```

```

    } else {
      k <- k + 1
    }
  }
  if (foundy == 0) {
    print("Error_404: Vierkant_in_y_not_found")
    foundy <- 1
  }
} else {
  p <- j + 1
  test <- 1
  while (test == 1 && vierkantenmatrixsort[p,1] == vierkantenmatrixsort[j,1]) {
    p <- p + 1
    if (p > 6291) {
      foundx <- 1
      foundy <- 1
      print("Error_404: Vierkant_in_x_not_found")
      test <- 0}
  }
  j <- p
}
}
}

```

10.3 Graaf maken van het gebied rondom Tubbergen

Er wordt een adjacency matrix gemaakt van het gediscrètiseerde gebied rondom Tubbergen.

```

snelheid <- 60
#buren: afstand is 500 m
b <- 3600/snelheid/2
#schuine buren: afstand is 701 m
s <- 3600/snelheid/1000*701

n <- nrow(vierkanttub)

adjmat <- matrix(0, nrow = m, ncol = m)

samecolumn <- 0
finalcolumn <- 0
for (i in 1:m) {
  if (i < m) {
    if (samecolumn == 0) { #bepaal x van volgende kolom
      found <- 0
      j <- i + 1
      while (found == 0) {

```

```

    if(vierkantgroot[i,1] == vierkantgroot[j,1]) {
      j <- j + 1
    } else {
      found <- 1
      newcolumn <- j
      samecolumn <- 1
    }
    if (j == m+1) {
      finalcolumn <- 1
      found <- 1
    }
  }
}
if (i < j-1) { #niet laatste(bovenste) vierkant vd kolom
  if (vierkantgroot[i,2] == vierkantgroot[i+1,2] - 500) { #er ligt een vierkant
    direct boven
    adjmat[i, i+1] <- b
    adjmat[i+1, i] <- b
  }
} else if (i == newcolumn - 1) { #laatste vierkant vd kolom
  samecolumn <- 0
}
if (finalcolumn == 0) {
  if (vierkantgroot[i,1] == vierkantgroot[newcolumn,1] - 500) { #de volgende kolom
    vierkanten ligt er direct naast
    found <- 0
    k <- newcolumn
    while (found == 0) {
      if (vierkantgroot[i,2] > vierkantgroot[k,2] + 500) {
        k <- k + 1
        if (k == m + 1) {
          found <- 1
        } else if (vierkantgroot[i,1] < vierkantgroot[k,1] - 500) { #we zijn een
          kolom te ver
          found <- 1
        }
      }
      if (vierkantgroot[i,2] == vierkantgroot[k,2] + 500) { #vierkant ligt
        er rechts schuin onder
        adjmat[i, k] <- s
        adjmat[k, i] <- s
        k <- k + 1
        if (k == m + 1) {
          found <- 1
        }
      }
    }
  } else if (vierkantgroot[i,2] == vierkantgroot[k,2]) { #vierkant ligt er
    rechts naast

```



```

for (j in 1:m) {
  urgentie <- get.vertex.attribute(tubgraph,"waarde", j)
  closestkaz <- 99999
  for (k in 1:nrow(kazernesgroot)) {
    kaz <- kazernesgroot[k,4]
    if (kazernesgroot[k,3] + shpathsgr[kaz,j] < closestkaz) {
      closestkaz <- kazernesgroot[k,3] + shpathsgr[kaz,j]
    }
  }
  if (closestkaz < u + shpathsgr[i,j]) { #andere kazerne is dichterbij
    aanrijtijden <- aanrijtijden + closestkaz*urgentie
    if (closestkaz > 600) {
      aanrijtijden <- aanrijtijden + penalty
      nrpenalties <- nrpenalties + 1
      if (closestkaz > 1080) {
        nrfalse <- nrfalse + 1
      }
    }
  } else { #nieuwe kazerne is dichterbij
    aanrijtijden <- aanrijtijden + (u + shpathsgr[i,j])*urgentie
    if (u + shpathsgr[i,j] > 600) {
      aanrijtijden <- aanrijtijden + penalty
      nrpenalties <- nrpenalties + 1
      if (u + shpathsgr[i,j] > 1080) {
        nrfalse <- nrfalse + 1
      }
    }
  }
}
aanr[i,1] <- aanrijtijden/aantalbrandengr
aanr[i,2] <- nrpenalties
aanr[i,3] <- aanr[i,1] - (nrpenalties * penalty)/aantalbrandengr
aanr[i,4] <- nrfalse
}

besteaanr <- 99999
bestelocgr <- 0
for (i in 1:m) {
  if (aanr[i,1] < besteaanr) {
    besteaanr <- aanr[i,1]
    bestelocgr <- matrix(i, nrow=1,ncol=1)
  } else if (aanr[i,2] == besteaanr) {
    bestelocgr <- rbind(bestelocgr, i)
  }
}
}

```