

Ruimtelijke ongelijkheid in blootstelling aan stedelijke hitte en luchtvervuiling in Amsterdam

Biko Sintenie (635824)
Aarde economie & duurzaamheid
Vrije Universiteit Amsterdam
Begeleider: E.Koomen
Datum: juni 2025

Abstract

Door toenemende stedelijke verdichting en klimaatverandering worden steeds meer steden gevoelig voor het Urban Heat Island (UHI)-effect. Dit houdt in dat stedelijke gebieden warmer zijn dan omliggende landelijke gebieden. In deze thesis wordt onderzocht of sociaal-economisch kwetsbare groepen disproportioneel blootgesteld worden aan dit effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam. De nadruk ligt hierbij op de fijnstof PM2.5.

Met behulp van ruimtelijke en statistische analysemethoden is gezocht naar ruimtelijke patronen in de UHI-index, luchtvervuiling en aanwezigheid van kwetsbare groepen. De onderzochte kwetsbare groepen zijn hier 65-plussers, mensen met een migratieachtergrond en mensen met lage inkomens. De analyse is uitgevoerd op buurtniveau waarbij datasets van de gemeente Amsterdam, Atlas Leefomgeving en het RIVM de basis vormden.

De resultaten tonen aan dat het UHI-effect en PM2.5-concentraties duidelijk hoger zijn in het centrum van Amsterdam. Er zijn 2 statistisch significante positieve verbanden gevonden tussen sociaal-economische groepen en blootstelling aan het UHI-effect. Deze zijn mensen met een migratieachtergrond en 65-plussers die een zwak negatief verband tonen, wat aangeeft dat deze groepen minder last hebben van stedelijke hitte. Met PM2.5-concentraties is slechts één statistisch significant verband ontdekt met de groep 65-plussers. Ook deze is zwak negatief, wat aangeeft dat deze groep minder blootgesteld zou worden. Daarnaast is het duidelijk dat met name het centrum van Amsterdam wordt blootgesteld aan stedelijke hitte en PM2.5-concentraties. Dit kan leiden tot gezondheidsrisico's voor de bewoners van deze buurten.

Het onderzoek benadrukt het belang van mitigerend en preventief beleid tegen luchtvervuiling, en vooral PM2.5, met name in centraal gelegen buurten. Wanneer dit wordt gemitigeerd dalen de negatieve gezondheidseffecten en cumulatieve blootstelling het hele jaar door. Verdere onderzoeken naar kwaliteit van woningen, gezondheid en mobiliteit kunnen bijdragen aan een volledig beeld naar de kwetsbaarheid en gezondheidsrisico's binnen Amsterdam. Ook toont het dat de onderzochte kwetsbare groepen binnen Amsterdam niet disproportioneel blootgesteld worden aan stedelijke hitte en PM2.5-concentraties.

Inhoud

1. Inleiding	3
2. Theoretisch kader	4
2.1 Het Urban Heat Island (UHI)-effect	4
2.2 Sociaal-economisch kwetsbare groepen	5
2.3 Luchtvervuiling en UHI's	6
2.4 Verwachtingen van het onderzoek	7
3. Methodologie	8
3.1 Onderzoeksopzet	8
3.2 Geografisch kader en gebruikte datasets	9
3.3 Koppeling van deelvragen aan de methode	11
4. Resultaten	13
4.1 Kwetsbare sociaal-economische groepen en hun ruimtelijke spreiding	13
4.2 Overlap tussen het UHI-effect en PM2.5	15
4.3 Disproportionele blootstelling aan het UHI-effect	18
5. Discussie	23
5.1 Belangrijkste bevindingen	23
5.2 Reflectie op de resultaten	24
5.3 Beperkingen van het onderzoek	25
5.4 Aanbevelingen en vervolgonderzoeken	26
5.5 Beleidsimplicaties	26
6. Conclusie	27
Literatuurlijst	29
Appendix	33
Appendix 1	33
Appendix 2	34
Appendix 3	35

1. Inleiding

“Hitterecord gebroken in westen van VS, zeker acht mensen overleden”(NOS, 2024), *“Nederlandse steden niet gebouwd op hitte: 'Te veel ongezond warme huizen' ”* (NU.nl, 2024), *“Experiment Amsterdam: 'nepbomen' tegen hittestress”* (RTL, 2025). Dit zijn slechts 3 van de vele krantenkoppen uit de afgelopen jaren die aantonen dat de aarde, en in het bijzonder steden, steeds heter en moeilijker leefbaar wordt. Een van de eerste wetenschappelijke beschrijvingen van de hitte in steden werd gedaan door Oke (1982), die aantoonde dat steden gemiddeld warmer zijn dan hun landelijke omgeving. Dit temperatuurverschil ontstaat doordat stedelijke oppervlakten meer energie absorberen, deze langer vasthouden, en minder efficiënt afgeven. Dit verschil van landelijk tegenover stedelijke temperatuur wordt het Urban Heat Island (UHI)-effect genoemd.

Uit onderzoek blijkt dat stedelijke verdichting en wereldwijde klimaatverandering het Urban Heat Island-effect versterken. Hierdoor neemt de blootstelling aan hittestress in stedelijke gebieden toe (Chapman et al., 2017). Volgens de WHO (2009) is het vaak zo dat gevolgen van klimaatverandering, sociaal kwetsbare groepen het hardst treffen. Zij beschikken vaak over minder middelen om zich te beschermen tegen hittegolven of luchtvervuiling, waardoor hun gezondheidsrisico's toenemen.

Ondanks dat er al onderzoeken zijn gedaan naar de blootstelling aan UHI's binnen Amsterdam, biedt dit onderzoek aanvullende inzichten door specifieke aandacht te besteden aan de ruimtelijke spreiding van sociaal-economisch kwetsbare groepen in relatie tot stedelijke hitte. Door deze gecombineerde benadering wordt het mogelijk om blootgestelde gebieden niet alleen fysiek maar ook sociaal in kaart te brengen, wat van waarde kan zijn voor gericht beleid en toekomstige stadsontwikkeling. Een extra reden dat dit zo belangrijk is komt doordat UHI's en luchtvervuiling vaak samenkomen op dezelfde plek. Wanneer kwetsbare groepen aan deze effecten worden blootgesteld, zijn de gevolgen voor de gezondheid nog groter dan deze zouden zijn voor minder kwetsbare groepen.

Dit onderzoek heeft als doel om te bepalen of er binnen Amsterdam bepaalde kwetsbare groepen disproportioneel blootgesteld worden aan het UHI-effect. Mogelijk blijkt hieruit juist dat deze effecten niet sociaal ongelijk verdeeld zijn.

Op basis van deze waarnemingen is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

“Zijn er ruimtelijke en sociaal-economische verschillen in blootstelling aan het Urban Heat Island-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

Deze hoofdvraag wordt ondersteund met de volgende deelvragen:

“Welke sociaal-economische groepen worden als meest kwetsbaar beschouwd aan hitte?”

“In welke mate overlappen de ruimtelijke patronen in het urban heat island-effect en luchtvervuiling?”

“Welke sociaal-economisch kwetsbare groepen worden disproportioneel blootgesteld aan het UHI-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

In het volgende hoofdstuk wordt het theoretisch kader verder uiteengezet. Hierin wordt verder ingegaan op de werking van het UHI-effect, de rol van luchtvervuiling en de kwetsbaarheid van bepaalde bevolkingsgroepen.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt het theoretische kader uiteengezet dat de basis vormt voor de analyse in deze thesis. Het UHI-effect is het overkoepelende thema. Hier wordt naar gekeken vanuit een sociaal-economisch oogpunt en vanuit de hoek van luchtvervuiling en hoe deze 3 factoren elkaar kunnen beïnvloeden.

2.1 Het Urban Heat Island (UHI)-effect

Zoals de inleiding al aangaf, zorgen urbanisatie en de opwarming van de aarde ervoor dat stedelijke hitte een steeds urgenter probleem wordt. Hieraan is het zogenoemde Urban Heat Island (UHI)-effect onlosmakelijk verbonden. Het UHI-effect is het verschijnsel waarbij stedelijke gebieden significant warmer zijn dan de omliggende landelijke gebieden. Dit temperatuurverschil wordt voornamelijk veroorzaakt door verschillen in de energiebalans tussen stad en platteland: stedelijke oppervlakken nemen meer warmte op, houden deze langer vast, en geven deze minder efficiënt af aan natuurlijke ondergronden (Oke, 1982).

De intensiteit van het UHI-effect wordt beïnvloed door een combinatie van fysieke en ruimtelijke factoren. Volgens Santamouris (2015) zijn de belangrijkste factoren het aandeel verhard oppervlak, de aanwezigheid van vegetatie, het albedo van de stedelijke materialen, de bebouwingsdichtheid, de mate van ventilatie door middel van luchtstroom en de menselijke warmteproductie (denk hierbij aan verkeer en verwarming) in de intensiteit van het UHI-effect. Samen bepalen deze factoren hoeveel warmte er wordt opgenomen, hoelang die wordt vastgehouden en in hoeverre de stad weer afkoelt. Het UHI-effect is doorgaans het sterkst tijdens nachtelijke uren, omdat landelijke gebieden sneller afkoelen dan stedelijke (Oke, 1982).

In Nederland wordt onder meer het Natural Capital Model gebruikt (RIVM & VITO, 2017) om de UHI waarde te bepalen. Dit wordt vervolgens gebruikt in het kader van stedelijke klimaatadaptatie. Hierin worden vergelijkbare elementen meegenomen in de berekening als bij Santamouris. In dit Nederlandse model wordt het maximale UHI-effect berekend op basis van bevolkingsdichtheid en windsnelheid op 10 meter hoogte. Verharding en groen hebben op kleinere schaal invloed op het effect. Echter geeft het RIVM ook aan dat het temperatuurverschil tussen stad en landelijk gebied veel hoger kan oplopen dan de maximale waarde in dit model.

De stedelijke hitte kan in veel gevallen zorgen voor gezondheidsrisico's voor de bevolking. Volgens onderzoek (Ballester et al., 2023) zijn in Europa naar schatting 61.672 hitte gerelateerde sterfgevallen in 2022. De sterfte ontstaat vaak door al onderliggende medische aandoeningen. Uit dit onderzoek bleek ook dat de duur van de hitteperiodes en hoge nachttemperaturen belangrijke aspecten waren op de hoogte van het gezondheidsrisico voor de bevolking. Wanneer het 's nachts niet afkoelt heeft het lichaam geen kans zich te herstellen van de hete dag, wat cruciaal is voor kwetsbare mensen.

Er zijn meerdere historische voorbeelden waarbij het UHI-effect al grote impact heeft gehad. In Chicago in 1995 vielen er tijdens een hittegolf meer dan 700 doden, waarvan de meeste woonden in arme, dichtbebouwde buurten met weinig groen (Klinenberg, 2002). Uit een onderzoek van Laaidi et al. (2012) bleek dat in Parijs de nachtelijke UHI-index tot wel 4°C

hoger lag, wat leidde tot verhoogde sterfte onder ouderen in dichtbebouwde wijken. Tot slot bleek in Utrecht dat het verschil in temperatuur in buiten- en binnenstad tot wel 7°C kon zijn (KNMI, 2016).

Deze voorbeelden illustreren dat het UHI-effect veel sociale gevolgen kan hebben. Vooral ouderen en mensen met een lager inkomen worden hier harder door getroffen. In de volgende paragraaf wordt verder ingegaan op sociaal-economische kwetsbaarheid in relatie tot stedelijke hitte.

2.2 Sociaal-economisch kwetsbare groepen

Het zijn vaak de sociaal meest kwetsbare groepen die de grootste gezondheidsrisico's ervaren tijdens hittegolven. Hierbij zijn twee termen erg belangrijk, namelijk environmental injustice en climate vulnerability.

Environmental injustice is het fenomeen waarbij zwakkere sociaal-economische groepen onevenredig worden blootgesteld aan schadelijke milieueffecten. Denk hierbij aan luchtvervuiling, geluidsoverlast en hittestress. Volgens Chakraborty en Maantay (2011) komt deze ongelijke verdeling met name door historische planvorming, woonsegregatie en gebrek aan politieke invloed van deze groepen.

De term climate vulnerability wordt door het IPCC (2001) uitgelegd als "de mate waarin een systeem vatbaar is voor, of niet in staat is om om te gaan met, nadelige effecten van klimaatverandering, inclusief klimaatvariabiliteit en extremen". Deze kwetsbaarheid is volgens het IPCC afhankelijk van de blootstelling aan klimaatverandering, de gevoeligheid van het systeem, en het aanpassingsvermogen.

Volgens de WHO (2009) wordt deze kwetsbaarheid onder andere bepaald door leeftijd, gezondheid, mobiliteit en woningkwaliteit. Hieruit blijkt dat vooral ouderen met een zwakke gezondheid en bewoners van slecht geïsoleerde of dichtbebouwde gebieden extra risico lopen op hittestress. Dit blijkt ook uit onderzoek dat aantoonde dat hitte gerelateerde sterfte met name stijgt in gebieden met beperkte afkoelingsmogelijkheden, waarbij vooral ouderen en sociaal zwakke groepen kwetsbaar zijn (Heaviside et al., 2017). Hiernaast toont een wereldwijde systematische review van Slesinski et al. (2025) dat plekken met een hoger aandeel immigranten vaak een hogere hitte-index hadden.

De potentiële ongelijke verdeling van blootstelling is de belangrijkste basis voor dit onderzoek. De woningkwaliteit wordt hier niet in meegenomen. Maar wel wordt er binnen Amsterdam gekeken naar ruimtelijke en sociaal-economische ongelijkheid aan het UHI-effect binnen Amsterdam.

2.3 Luchtvervuiling en UHI's

Naast de sociaal-economische factoren en het UHI-effect, kunnen gevolgen voor de gezondheid ook versterkt worden door omgevingsfactoren zoals luchtvervuiling. In stedelijke gebieden is de concentratie van schadelijke stoffen vaak hoger dan in landelijke gebieden. Dit komt vooral door verkeersintensiteit en industrie (RIVM, 2020). In dit onderzoek zal de nadruk liggen op drie veel voorkomende stoffen namelijk: stikstofdioxide (NO_2), fijnstof kleiner dan 2,5 micrometer ($\text{PM}_{2.5}$) en fijnstof kleiner dan 10 micrometer (PM_{10}).

Studies tonen aan dat er een sterke correlatie bestaat tussen $\text{PM}_{2.5}$ -concentraties en sterfte aan, cardio en respiratoire ziekten. De gezondheidsgevolgen worden groter bij hogere concentraties (Hoek et al., 2013). Een review van bestaande literatuur (Grigorieva & Lukyanets, 2021) toont hiernaast nog dat hitte en luchtvervuiling samen een versterkt effect hebben op de respiratoire gezondheid. Hoge temperaturen zorgen voor minder vermenging van luchtverontreinigende stoffen waardoor de concentraties toenemen. Hierdoor pieken concentraties van deze stoffen vaak tijdens periodes van langdurige hitte.

De drie stoffen en stedelijke hitte komen dus vaak voor in dezelfde gebieden binnen de stad. Vooral dichtbebouwde buurten met weinig groen zijn kwetsbaar en worden door Zhao et al. (2018) ook wel beschreven als “urban pollution islands”. In deze gebieden zijn zowel de temperatuur als de luchtvervuiling hoger dan op andere plekken, wat leidt tot een versterking van negatieve effecten en gezondheidsrisico's.

De gezondheidseffecten van deze stoffen zijn al breed onderzocht en gelinkt aan een verhoogd sterftecijfer. Hart- en vaatziekten, luchtwegaandoeningen en verminderde longfunctie komen het meeste voor (WHO, 2006). Het ontstaan van deze stoffen is voornamelijk veroorzaakt door verbrandingsprocessen in het verkeer en industrie. Hierdoor zijn deze in steden veel aanwezig. $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} zijn beide vormen van fijnstof, wat eigenlijk kleine deeltjes zijn die zweven in de lucht. $\text{PM}_{2.5}$ is kleiner en dringt hierdoor makkelijker door in de longen waardoor deze vaak als schadelijker wordt gezien. (RIVM, 2020).

Volgens de WHO (2021) is de drempelwaarde van $\text{PM}_{2.5}$ -concentraties $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In Nederland wordt echter de Europese richtlijn gehanteerd in beleid van maximaal $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (European Parliament & Council, 2008). Echter stelt het WHO rapport uit 2021 dat er geen veilige ondergrens is en dat $\text{PM}_{2.5}$ zelfs onder de drempelwaarde schadelijk is.

2.4 Verwachtingen van het onderzoek

In dit theoretische kader is uitgelegd hoe het UHI-effect tot stand komt en welke gezondheidsrisico's hier samen mee vallen. In het bijzonder is gekeken naar de link met sociaal-economische status en luchtvervuiling. De verwachting is op basis van deze theorie dat in Amsterdam het UHI-effect ruimtelijk en sociaal ongelijk verdeeld is.

Uit eerdere literatuur kan de conclusie worden getrokken dat buurten met relatief veel ouderen, migranten of een lage sociaal-economische status, gemiddeld een hogere UHI-waarde hebben en hiermee ook een slechtere luchtkwaliteit.

Het vervolg van deze thesis zal kijken of deze verwachting onderbouwd kan worden binnen Amsterdam.

3. Methodologie

Dit hoofdstuk zal ingaan op de wijze waarop de data in dit onderzoek zijn verkregen en welke stappen zijn genomen om tot het eindresultaat te komen. Hierbij is gebruikgemaakt van zowel statistische als ruimtelijke analyses.

Ten eerste wordt de onderzoeksopzet besproken. Hierna zal verder worden ingegaan op de data die gebruikt zijn en op welke manier deze bijdragen aan het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Tot slot worden enkele beperkingen van de gebruikte data nog uitgelicht.

3.1 Onderzoeksopzet

Dit onderzoek heeft als insteek een kwantitatief, ruimtelijke analyse met als doel om eventuele ongelijkheid in blootstelling aan het UHI-effect in Amsterdam in kaart te brengen. De hoofdvraag die hiermee beantwoord wordt luidt:

“Zijn er ruimtelijke en sociaal-economische verschillen in blootstelling aan het Urban Heat Island-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

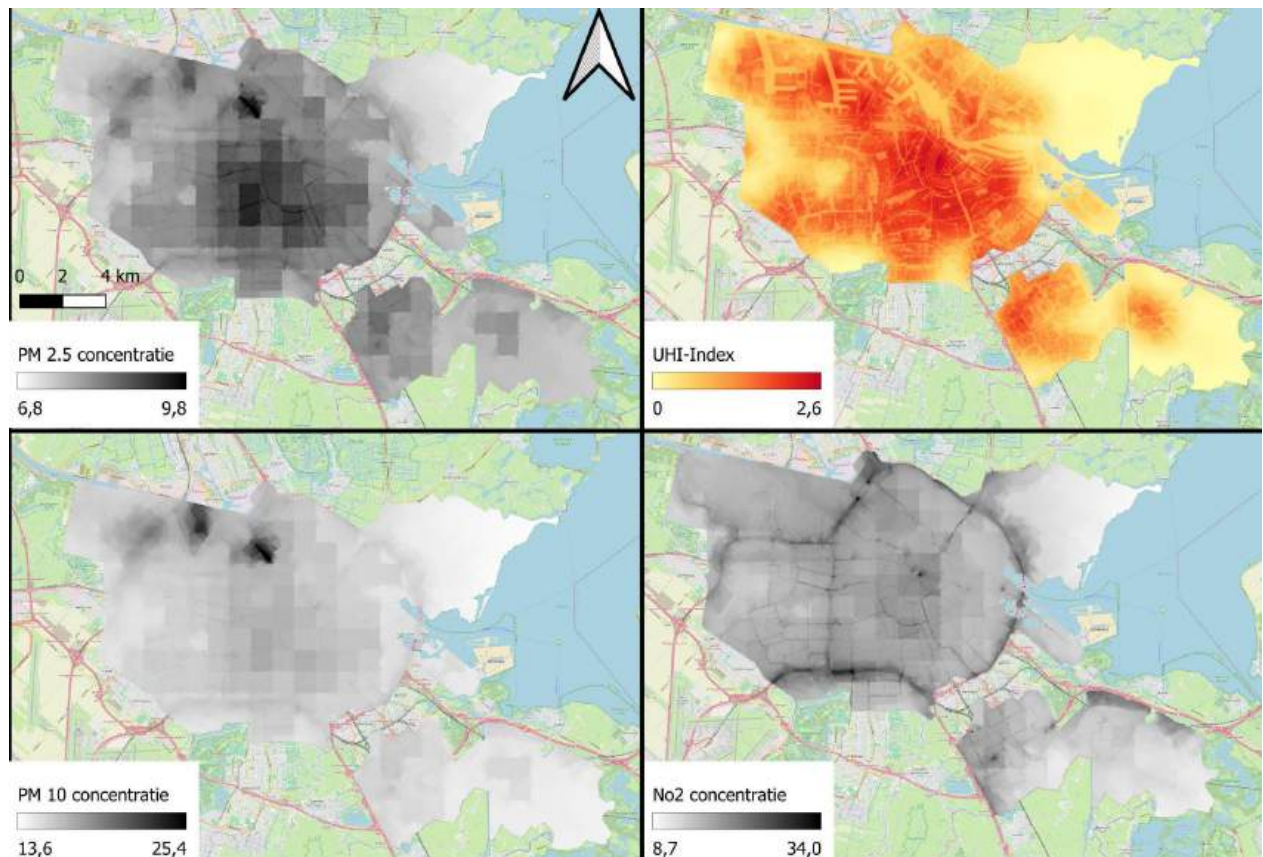
Om deze vraag te beantwoorden worden verschillende technieken gebruikt. Het gaat hier om ruimtelijke en statistische analyses. Aan de hand van de ruimtelijke analyses zal duidelijk worden waar in Amsterdam de blootstelling het hoogst ligt. De statistische analyses focussen zich met name op welke groepen er dan het meest blootgesteld worden. Samen kunnen deze hiermee tonen welke groepen disproportioneel blootgesteld worden en waar deze zich bevinden.

3.2 Geografisch kader en gebruikte datasets

Het geografische kader van dit onderzoek is helder afgebakend: de analyse richt zich namelijk op de grenzen van de gemeente Amsterdam. Hierbij is gebruikgemaakt van officiële buurtgrenzen. Dit maakt het mogelijk om buurten met elkaar te vergelijken. Appendix 1 toont een overzicht van de gebruikte datasets inclusief bron, resolutie en het type data.

De gebruikte datasets zijn afkomstig uit verschillende jaren, maar representeren in alle gevallen de meest recent beschikbare data. De UHI-index die getoond wordt geeft aan hoeveel graden celsius warmer het in Amsterdam is ten opzichte van omliggend landelijk gebied. Het gaat hier om zomergemiddelden over 24 uur (juni-augustus). Het zijn dus niet enkel piekmomenten overdag of 's nachts, maar een gemiddelde waarde over de hele zomer. Dit model is gekozen omdat de hoge resolutie (100x100 meter) scherp genoeg is om op buurtniveau duidelijk te krijgen hoe de UHI's zich vormen.

De luchtvervuilingsdata betreft interpolaties van gemiddelde concentraties uit 2019 voor NO₂, PM_{2.5} en PM₁₀ van Atlas Leefomgeving. Deze data heeft een nog hogere resolutie (25x25 meter) waardoor ook hier buurten goed met elkaar vergeleken worden. De blootstelling aan luchtvervuiling is in tegenstelling tot de UHI's het hele jaar een probleem en niet alleen in de warme zomermaanden. Dit is waarom het hier gaat om gemiddelden die structurele blootstelling aan luchtvervuiling in kaart brengt. De ruimtelijke spreiding van luchtvervuiling en de UHI-index is getoond in figuur 3.1.



Figuur 3.1 Ruimtelijke spreiding van de UHI-index in graden celsius en PM_{2.5}, PM₁₀ en NO₂ concentraties in µg/m³. Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van RIVM (2020) & Atlas leefomgeving (2019)

Op basis van figuur 3.1 is te zien dat NO₂-concentraties zich met name concentreren rond snelwegen, waar weinig tot geen mensen wonen, waardoor het minder relevant is. Daarnaast is er, zoals blijkt uit appendix 3, een hoge correlatie tussen PM2.5 en PM10-concentraties. Omdat PM2.5 als schadelijkst wordt gezien (WHO, 2006) is dit het meest relevant om te onderzoeken.

Voor de sociaal-economische dimensie is gebruikgemaakt van drie variabelen: het percentage 65-plussers per buurt (2024), het percentage bewoners met een migratieachtergrond (2024) en het percentage huishoudens dat valt binnen de laagste 20% inkomenscategorieën in Amsterdam (2021).

Met deze groepen worden zoveel mogelijk van de, in paragraaf 2.2, genoemde redenen voor kwetsbaarheid opgenomen. De 65-plussers representeren mensen die minder mobiel zijn in dit onderzoek. De mensen met lager inkomen representeren de groep met een kwalitatief minder goed huis. En tot slot zijn migranten opgenomen omdat uit andere studies vaak blijkt dat deze disproportioneel blootgesteld worden (Slesinski et al., 2025).

De keuze voor percentage in plaats van absolute aantallen is gemaakt zodat buurten onderling beter met elkaar vergeleken kunnen worden. Hierdoor is de schaal van de variabelen gelijk en wordt ruimtelijke ongelijkheid in blootstelling beter zichtbaar voor deze groepen.

Tot slot wordt er ook met de daadwerkelijke woonplekken van mensen rekening gehouden. Dit wordt gedaan door 100x100 rastercellen met bevolkingsdata van het CBS. Hierin staat per raster het aantal inwoners waardoor de analyse in een hogere resolutie kan worden toegepast dan wanneer er enkel op buurtniveau wordt geanalyseerd. Hiermee worden plekken waar geen mensen wonen niet meegenomen in de analyse. Dit omdat er hier geen blootstelling is.

3.3 Koppeling van deelvragen aan de methode

De, in paragraaf 3.2 genoemde datasets, worden binnen dit onderzoek gebruikt om de deelvragen te kunnen beantwoorden. In deze paragraaf wordt toegelicht hoe deze gebruikt zijn en welke analysemethoden er zijn toegepast.

In de eerste deelvraag wordt onderzocht welke sociaal-economische groepen als meest kwetsbaar worden beschouwd tegen hitte. Deze vraag kan grotendeels beantwoord worden door rapporten van de WHO (2009) en het IPCC (2001). Om dit binnen Amsterdam te analyseren wordt aan de hand van 3 kaarten gekeken hoe deze kwetsbare groepen zich verspreiden over Amsterdam. Het gaat hier zoals in 3.2 al aangegeven is om 65-plussers, mensen met een migratieachtergrond en mensen met een laag inkomen.

Om de data te koppelen aan buurten is gebruikgemaakt van de joins functie in QGIS. Deze maakt het mogelijk om CSV data te koppelen aan buurten door middel van unieke buurtcodes.

Vervolgens is met behulp van de zonal-statistics tool voor elke buurt een gemiddelde waarde gecreëerd voor de UHI- en PM2.5-concentraties. Deze stap maakt het mogelijk om buurten consistent met elkaar te vergelijken op een duidelijke en logische manier.

Voor de blootstelling aan PM2.5 is een andere methode gebruikt namelijk het berekenen van het populatie-gewogen gemiddelde. Hierbij is gebruikgemaakt van de bevolkingsdata van de CBS vierkanten. Door hier een populatie gewogen gemiddelde te nemen wordt voorkomen dat de blootstelling wordt overschat op plekken waar geen mensen wonen.

Een gedetailleerde visuele toelichting hiervan is te vinden in appendix 2 aan de hand van flowcharts.

De tweede deelvraag onderzoekt in welke mate de ruimtelijke patronen van het UHI-effect en luchtvervuiling overlappen. Hiervoor zijn een spreidingsdiagram en een correlatiematrix opgesteld met behulp van Python. Deze laat de sterkte, richting en aard van de relatie tussen beide rasterlagen zien. Hierbij is gebruikgemaakt van een eenvoudige lineaire regressie met PM2.5-concentraties als verklarende en de UHI-index als afhankelijke variabele.

Hiernaast is om ongelijkheid in blootstelling te kwantificeren de jaargemiddelde UHI- en PM2.5-waarden per buurt gekoppeld aan bevolking per buurt. Met behulp van het Gini-coëfficiënt, waarbij 0 perfecte gelijkheid en 1 maximale ongelijkheid in blootstelling aangeeft, wordt gekeken of de verdeling van hitte-eilanden en PM2.5 ongelijk verdeeld is. Dit wordt visueel onderbouwd met Lorenz-curves.

Tot slot wordt er aan de hand van de UHI-index en PM2.5-concentraties een cumulatieve blootstellings kaart gemaakt. Hierin worden UHI-waarden en PM2.5-concentraties gecombineerd door beide rasterlagen met elkaar te vermenigvuldigen. Deze aanpak is gekozen op basis van een rapport van Fever et al. (2022). Deze beschrijft dat om duidelijk te accentueren waar beide stressoren gelijktijdig aanwezig zijn de waarden met elkaar te vermenigvuldigen het best werkt. Aangezien de gemiddelde PM2.5 waardes binnen Amsterdam al structureel boven de WHO-grens ligt van $5 \mu\text{g m}^{-3}$ (WHO, 2021), is er niet genormaliseerd omdat het overal schadelijk is voor de gezondheid. Uitsluitend bewoonde cellen meegenomen op basis van CBS-vierkanten.

De derde deelvraag richt zich op de vraag over de mate waarin de onderzochte sociaal-economische groepen disproportioneel blootgesteld worden aan het UHI-effect en PM2.5 binnen Amsterdam. Hiervoor zijn net als in deelvraag twee spreidingsdiagrammen en een correlatiematrix gebruikt. Hierin wordt de UHI-index als afhankelijke variabele gebruikt en de sociaal economische data als onafhankelijke. Ook wordt er gekeken naar de populatie gewogen gemiddelde PM2.5-concentratie en de gemiddelde UHI-index. Dit wordt gedaan om te bevestigen dat deze dezelfde ruimtelijke patronen laten zien zodat deze analyse betrouwbaar is.

Deze werkwijze zorgt er onderaan de streep voor dat zowel statistische als ruimtelijke verbanden gevonden kunnen worden. De uitkomsten van de correlatiematrix en de spreidingsdiagram geven inzicht in de sterkte en richting van de verbanden. En hiernaast kan dit ruimtelijk onderbouwd worden en zullen knelpunten te zien zijn in de QGIS kaarten

Voor alle statistische toetsen is een significantieniveau van $\alpha = 0.05$ gehanteerd.

Resultaten worden in tabellen en figuren aangeduid met sterren op de volgende manier:

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$.

4. Resultaten

Dit hoofdstuk zal per paragraaf de resultaten tonen voor de bijbehorende deelvraag. Er zal eerst worden gekeken naar de ruimtelijke spreiding van de drie sociaal-economische groepen. Hierop volgt het verband tussen de UHI-index en PM2.5-concentraties die tonen of deze fenomenen vaak samenvallen. Tot slot wordt gekeken naar het verband tussen de sociaal-economische groepen en de UHI-index op buurniveau om te bepalen of hier ook verbanden tussen bestaan.

4.1 Kwetsbare sociaal-economische groepen en hun ruimtelijke spreiding

Deze paragraaf toont de resultaten met betrekking tot deelvraag een die luidde:

“Welke sociaal-economische groepen worden als meest kwetsbaar beschouwd aan hitte?”

Zoals al uitgewerkt in het theoretisch kader zijn volgens het WHO (2009) vooral hoge leeftijd en slechte woningkwaliteit belangrijke factoren voor de kwetsbaarheid van hittestress. In dit onderzoek zijn hiervoor mensen met een migratieachtergrond, 65-plussers en mensen met een lager inkomen onderzocht. De ruimtelijke spreiding van deze groepen in Amsterdam is getoond aan de hand van figuur 4.1a-4.1c. Hierin is met de gemiddelde UHI-index per buurt als achtergrond te zien welk percentage van de bevolking in die buurt bij de betreffende sociaal-economische groep hoort. Aan de grootte van de cirkels is te zien hoeveel inwoners deze buurt heeft.

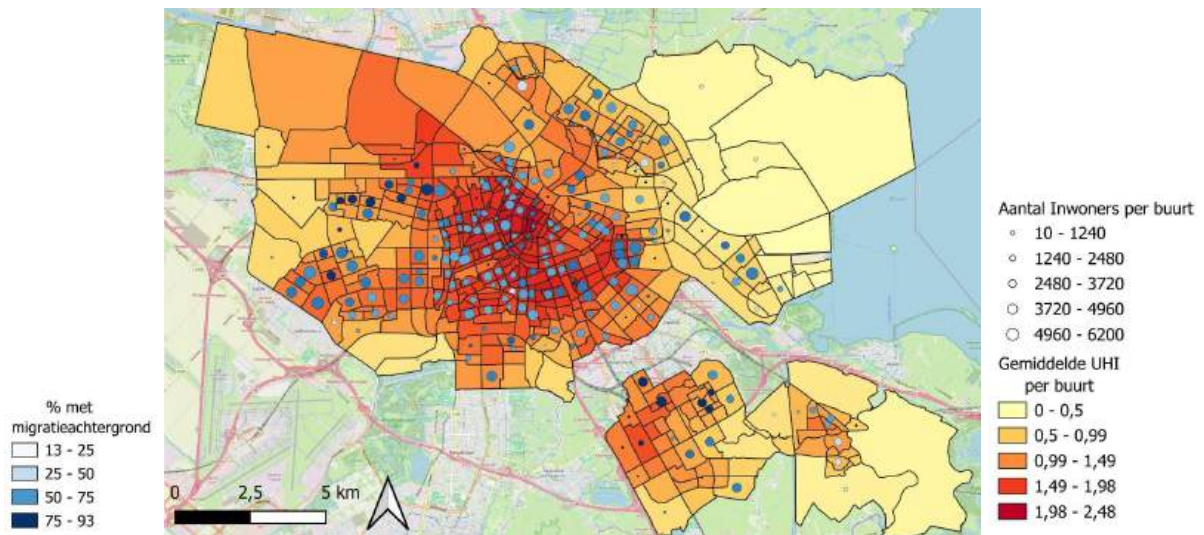
Beginnend met figuur 4.1a, het percentage van mensen met een migratieachtergrond, wordt duidelijk dat deze eigenlijk in heel Amsterdam redelijk hoog ligt. Het aandeel van deze groep is in een aantal buurten zelfs hoger dan 90%. Hier is een patroon in te herkennen, namelijk dat het aandeel migranten in het centrum van Amsterdam vaak relatief lager ligt.

Figuur 4.1b toont vervolgens het aandeel 65-plussers in elke buurt. Hierin is geen sterk patroon te herkennen. Het aandeel van 65-plussers verschilt wel sterk per buurt maar dit lijkt niet in verband te staan met de UHI-index.

Tot slot is in figuur 4.1c het aandeel van mensen in de laagste 20% van de inkomens in Nederland getoond. Hier lijkt wel degelijk een ruimtelijk patroon aanwezig, namelijk dat deze vooral buiten het centrum van Amsterdam gevestigd zijn. Dit patroon komt ook terug bij mensen met een migratieachtergrond, die ook vaker buiten het centrum wonen.

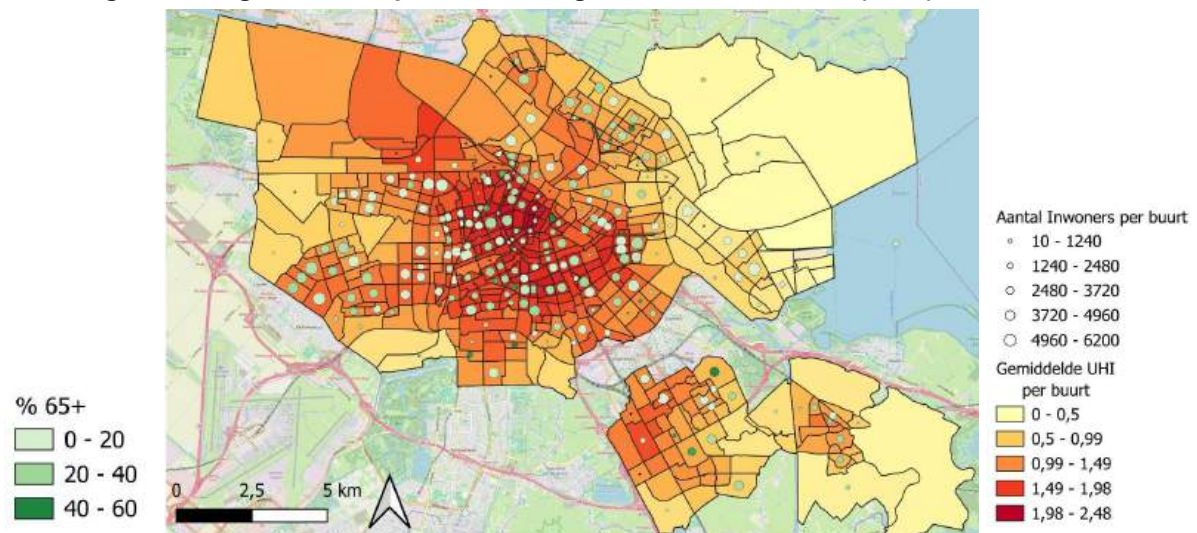
Toelichting bij figuur 4.1.

Kaart met aandelen van populatie met migratieachtergrond, van 65 jaar en ouder en die vallen in de laagste 20% van inkomens in Nederland op buurniveau Met als achtergrond de gemiddelde UHI-index in die buurt. De cirkels geven met kleurtinten het aandeel van inwoners in een bepaalde groep aan. De cirkelgrootte correspondeert met het aantal inwoners.



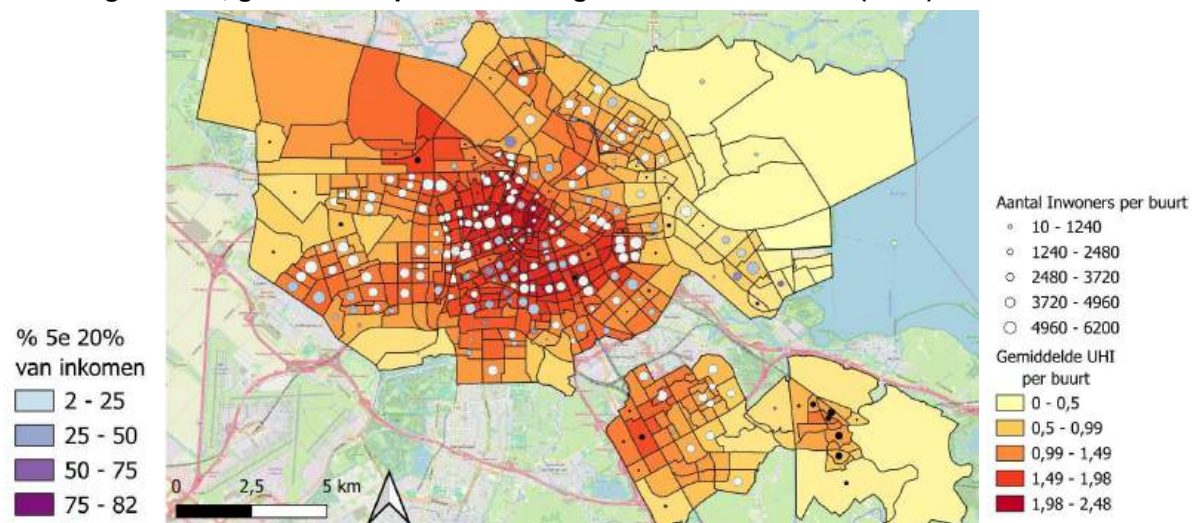
Figuur 4.1a % inwoners met een migratieachtergrond per buurt.

Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van de gemeente Amsterdam (2024)



Figuur 4.1b % inwoners van 65+ per buurt.

Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van de gemeente Amsterdam (2024)



Figuur 4.1c % inwoners met een inkomen in de laagste 20% per buurt. (zwart = geen data)

Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van de gemeente Amsterdam (2021)

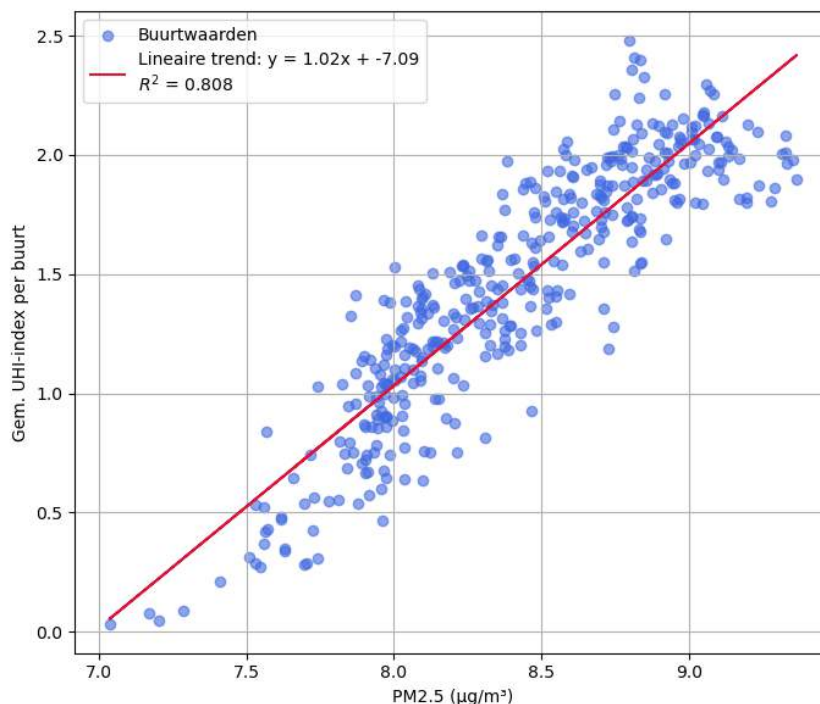
4.2 Overlap tussen het UHI-effect en PM2.5

Deze paragraaf bevat resultaten betreffend de tweede deelvraag die luidde:

"In welke mate overlappen de ruimtelijke patronen in het urban heat island-effect en luchtvervuiling?"

Om deze vraag te beantwoorden is gekeken naar de buurtgemiddelden van de UHI-index en PM2.5-concentraties aan de hand van een spreidingsdiagram (figuur 4.2). Ten tweede wordt gekeken naar de verdeling van het UHI-effect en PM2.5-concentraties aan de hand van het Gini-coëfficiënt. Tot slot wordt in figuur 4.4 gekeken naar de ruimtelijke verdeling van cumulatieve blootstelling aan de hand van rasters.

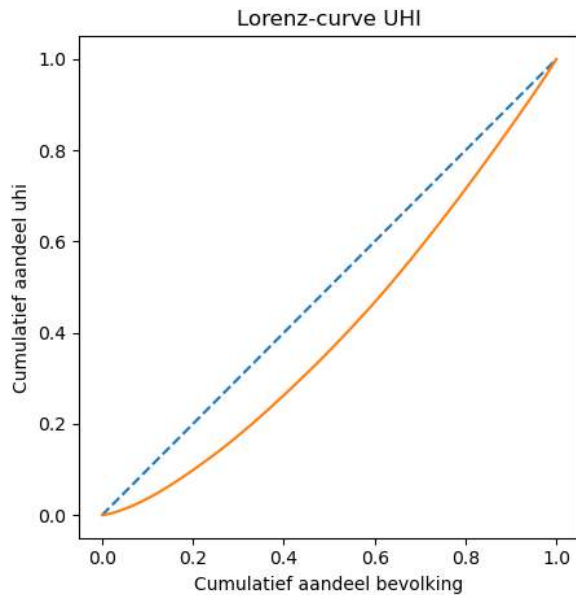
Figuur 4.2 toont zoals aangegeven het spreidingsdiagram waarin per buurt de gemiddelde PM2.5-concentratie is uitgezet tegen de gemiddelde UHI-index (n=407). De regressie toont een sterk positief verband tussen de UHI-index en PM2.5-concentraties op buurtniveau. Dit verband is statistisch significant op het niveau van $p < 0.001$ ($R^2 = 0.81$; $p = 2.255e-147$). Dit wijst erop dat buurten met hogere luchtvervuiling over het algemeen ook een hogere UHI-index hebben.



Figuur 4.2. Spreidingsdiagram van de gemiddelde PM2.5-concentratie versus de gemiddelde UHI-index per buurt (n=407). De regressielijn is sterk positief en statistisch significant* ($R^2 = 0.808$; $p = 2.255e-147$).**

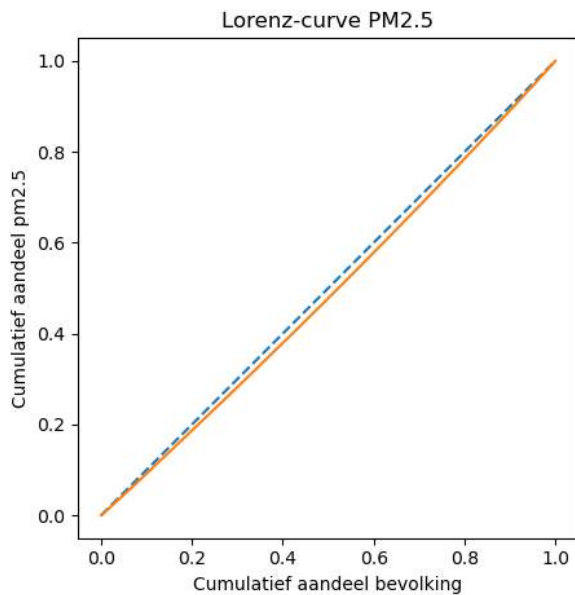
Eigen spreidingsdiagram, gebaseerd op data RIVM (2020) en Atlas Leefomgeving (2019)

Figuur 4.3 laat duidelijk zien dat de verdeling van hittestress ongelijker is dan die van PM2.5. Bij de UHI's ligt de Lorenz curve onder de gelijkheidslijn. Het Gini-coëfficiënt dat hierbij hoort is 0.19, wat in de literatuur wijst op lichte ruimtelijke ongelijkheid (Boyce et al., 2014). Voor PM2.5 geldt daarentegen dat de curve bijna perfect loopt op de gelijkheidslijn. Het Gini-coëfficiënt is dan ook maar 0.03. Dit betekent dat de blootstelling aan PM2.5 ruimtelijk bijna gelijk is verdeeld over de gehele bevolking in Amsterdam.



Figuur 4.3a

a: Lorenz-curve voor blootstelling aan UHI. Kromme toont het cumulatieve aandeel van UHI's uitgezet tegen het cumulatieve bevolkingsaandeel per buurt. De blauwe stippellijn geeft een gelijke verdeling aan (Gini-coëfficiënt = 0.19)



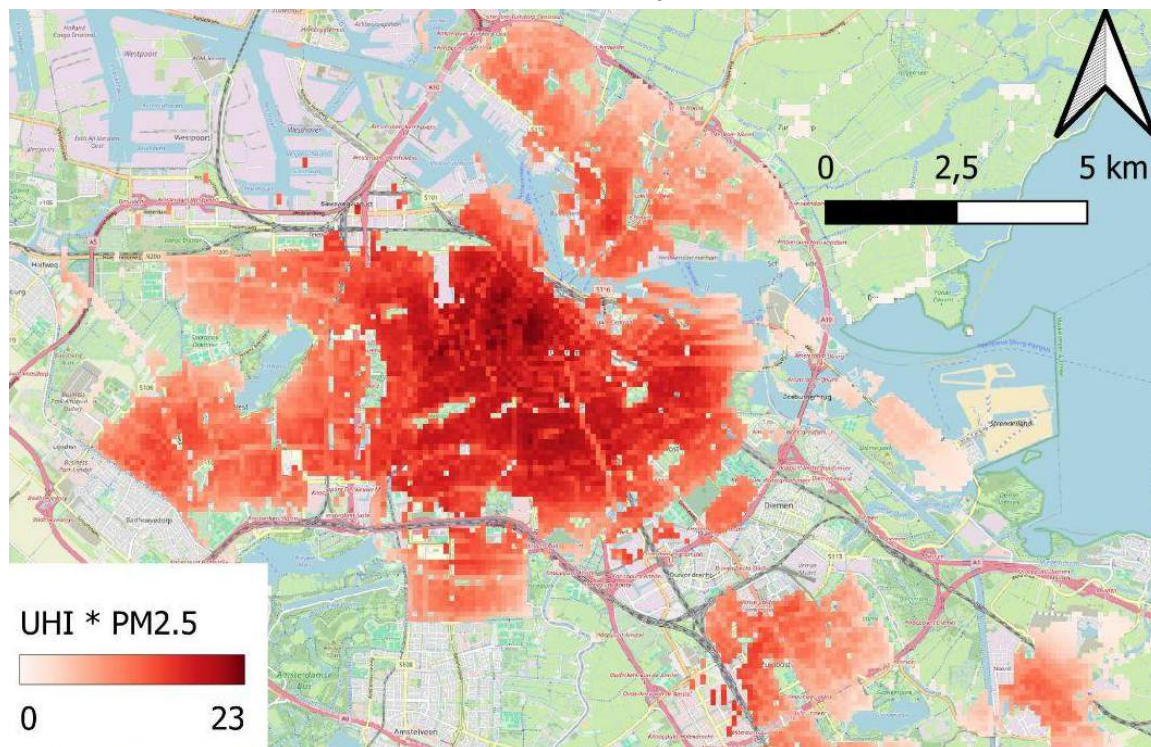
Figuur 4.3 b

b: Lorenz-curve voor blootstelling aan PM2.5. Kromme toont het cumulatieve aandeel van PM2.5-concentraties, uitgezet tegen het cumulatieve bevolkingsaandeel per buurt. De blauwe stippellijn geeft een gelijke verdeling aan (Gini-coëfficiënt = 0.03)

Eigen Lorenz-curve, gebaseerd op data RIVM (2020), Atlas Leefomgeving (2019) en gemeente Amsterdam (2024)

Figuur 4.4 toont de ruimtelijke verdeling van cumulatieve blootstelling aan UHI's en PM2.5. Deze is zoals in de methodologie uitgelegd, verkregen door beide waarden met elkaar te vermenigvuldigen. Hierin zijn alleen gebieden meegenomen waar daadwerkelijk mensen wonen.

Figuur 4.4 laat zien dat de hoogste cumulatieve blootstelling zich bevindt in het centrum van Amsterdam. Hierbuiten is het echter ook vaak zo dat PM2.5-concentraties hoger zijn dan de grenswaarde die de WHO sinds 2021 aanhoudt namelijk $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Echter wordt in Nederlands beleid de Europese richtlijn van maximaal $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aangehouden (European Parliament & Council, 2008) waar het wel onder blijft.



Figuur 4.4 Cumulatieve blootstelling aan het UHI-effect in combinatie met PM2.5. gaat van 0 (geen cumulatieve blootstelling) tot 23 (hoge cumulatieve blootstelling)
Eigen kaart, gebaseerd op data van het RIVM (2020) & Atlas leefomgeving (2019)

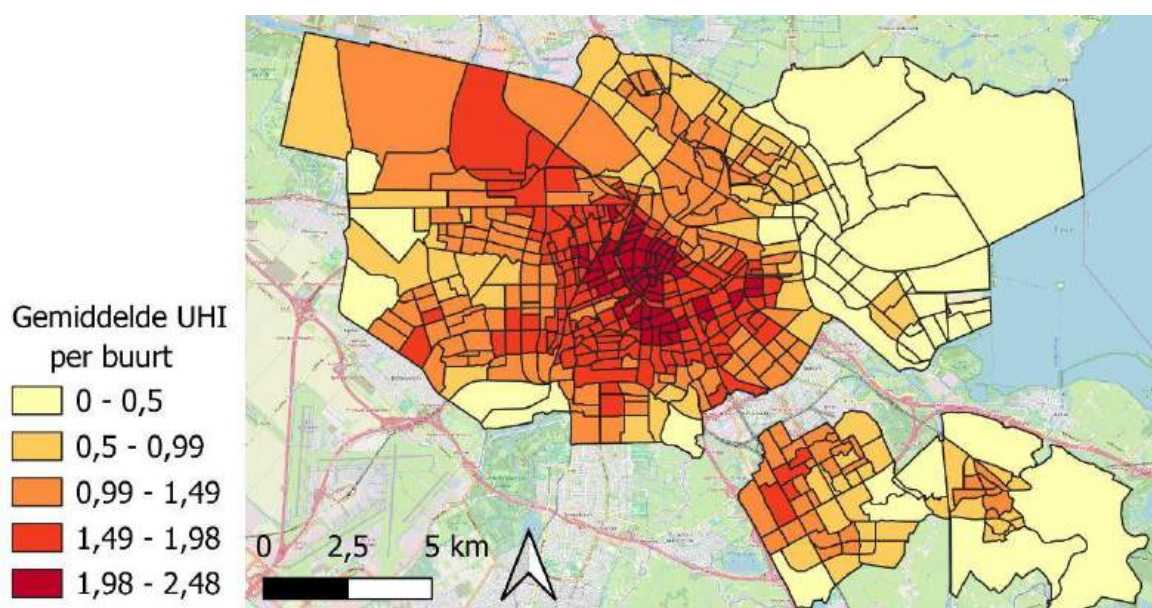
Onder aan de streep tonen deze analyses weinig resultaten die niet in de lijn der verwachting lagen. Het geeft duidelijk aan dat het centrum van Amsterdam een stuk gevoeliger is voor UHI's. Daarnaast zijn de PM2.5-concentraties ook hoger in het centrum dan daarbuiten. De patronen van PM2.5-concentraties en de UHI-index komen hierin overeen.

4.3 Disproportionele blootstelling aan het UHI-effect

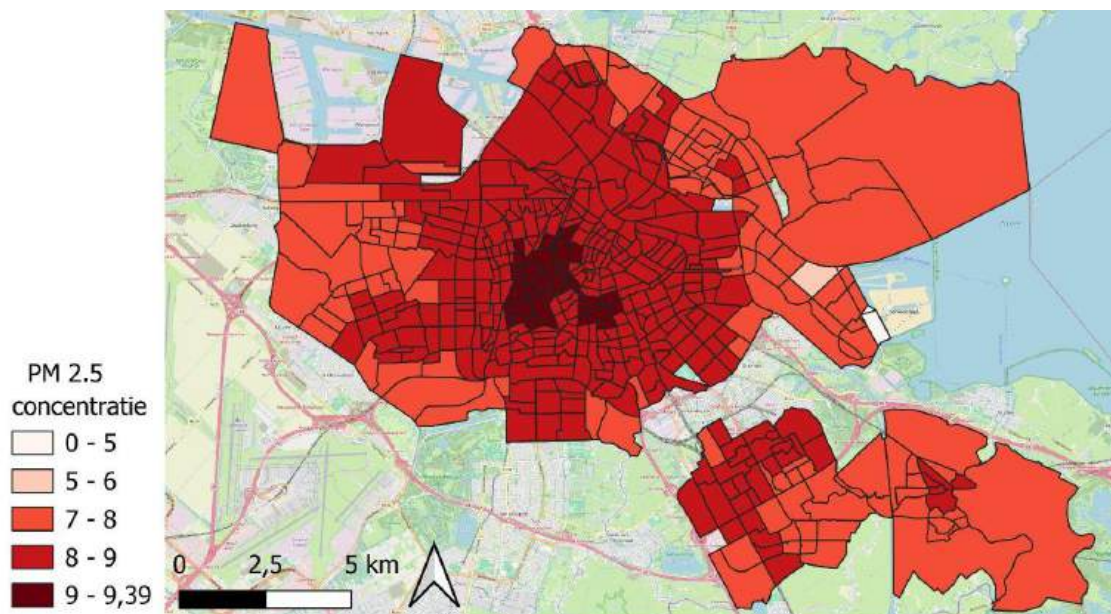
Tot slot de derde deelvraag die luidde:

“Welke sociaal-economisch kwetsbare groepen worden disproportioneel blootgesteld aan het UHI-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

Figuur 4.5 toont de gemiddelde UHI-index per buurt die relevant is voor deze analyse. Hierin is, zoals zichtbaar in figuur 3.1, vooral het centrum van Amsterdam gevoelig. Hetzelfde blijkt in figuur 4.6 over de gemiddelde PM2.5-concentratie. Hierin is gebruikgemaakt van een populatie gewogen gemiddelde om alleen buurten mee te nemen waar daadwerkelijk mensen wonen. In de vorige paragraaf bleek op rasterniveau dat vooral het centrum veel blootstelling had en dit patroon blijft aanwezig wanneer de analyse op buurniveau wordt gedaan.



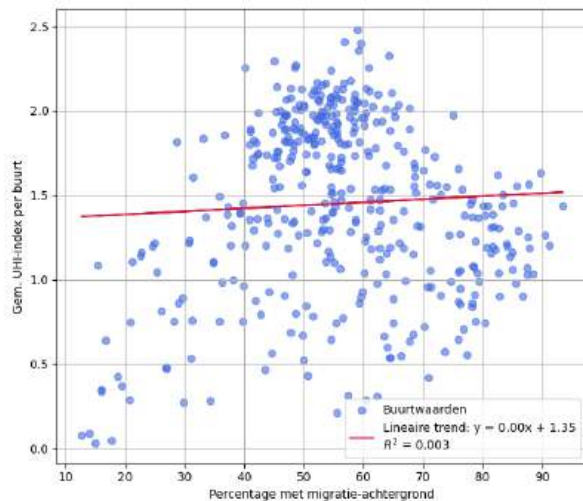
Figuur 4.5 Gemiddelde UHI-index per buurt in Amsterdam in de maanden juni tot augustus.
Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van RIVM (2020)



Figuur 4.6 Gemiddelde PM2.5-concentratie per buurt in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
Bron: Eigen kaart, gebaseerd op data van Atlas leefomgeving (2019)

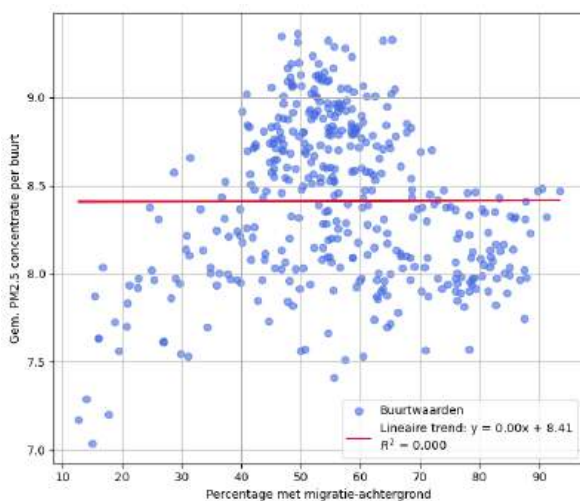
Figuur 4.7 toont twee spreidingsdiagrammen waarin het aandeel van bewoners met een migratieachtergrond per buurt is uitgezet tegen (a) de gemiddelde UHI-index en (b) de gemiddelde PM2.5-concentratie.

Subfiguur 4.7a toont een zwak positief verband tussen de UHI-index en het aandeel migranten. Hiernaast is dit verband niet statistisch significant ($R^2 = 0.003$; $p = 2.626e-01$). Subfiguur 4.7b laat vrijwel geen relatie zien ($R^2 = 0.000$; $p = 9.485e-01$). Beide resultaten impliceren dat mensen met een migratieachtergrond binnen Amsterdam niet disproportioneel blootgesteld worden aan stedelijke hitte en PM2.5-concentraties.



Figuur 4.7a

a: Spreidingsdiagram met de gemiddelde UHI score afgezet tegen het aandeel van de bevolking met een migratieachtergrond op buurtniveau. (n=407). De regressielijn is zwak positief en statistisch niet significant ($R^2 = 0.003$; $p = 2.626e-01$);



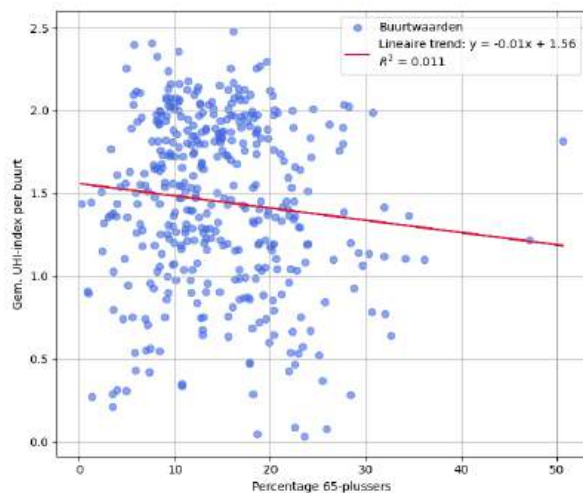
Figuur 4.7b

b: Spreidingsdiagram met de gemiddelde UHI score afgezet tegen het aandeel van de bevolking met een migratieachtergrond op buurtniveau. (n=407). De regressielijn is zwak positief en statistisch niet significant ($R^2 = 0.000$; $p = 9.485e-01$);

Eigen spreidingsdiagram, gebaseerd op data RIVM en gemeente Amsterdam (2020 & 2024)

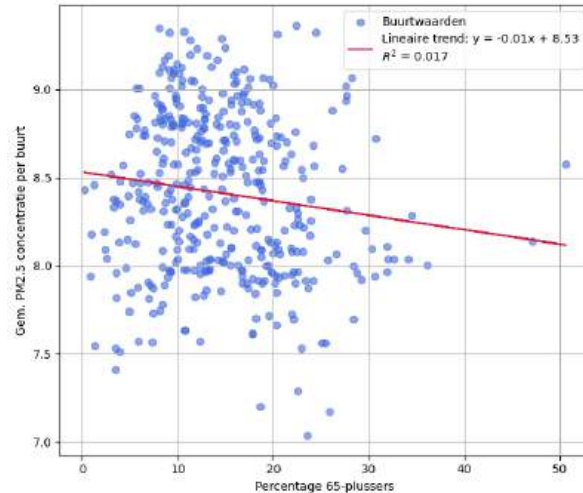
Figuur 4.8 toont twee spreidingsdiagrammen waarin het aandeel van 65-plussers per buurt is uitgezet tegen (a) de gemiddelde UHI-index en (b) de gemiddelde PM2.5-concentratie. Subfiguur 4.8a toont een zwak negatief verband tussen de UHI-index en het aandeel 65-plussers. Dit verband is statistisch significant op $p < 0.05$ niveau ($R^2 = 0.011$; $p = 3.832e-02$).

Subfiguur 4.8b laat een vergelijkbaar zwak negatief verband zien. Ook deze is statistisch significant $p < 0.01$ -niveau ($R^2 = 0.017$; $p = 9.479e-03$). Op buurtniveau lijken 65-plussers hieruit binnen Amsterdam zelfs minder blootgesteld aan zowel stedelijke hitte als PM2.5-concentraties.



Figuur 4.8a

a: spreidingsdiagram met de gemiddelde UHI score afgezet tegen het aandeel van de bevolking van 65 jaar en ouder op buurtniveau. ($n = 407$). De regressielijn is zwak negatief en statistisch significant* ($R^2 = 0.011$; $p = 3.832e-02$);).



Figuur 4.8b

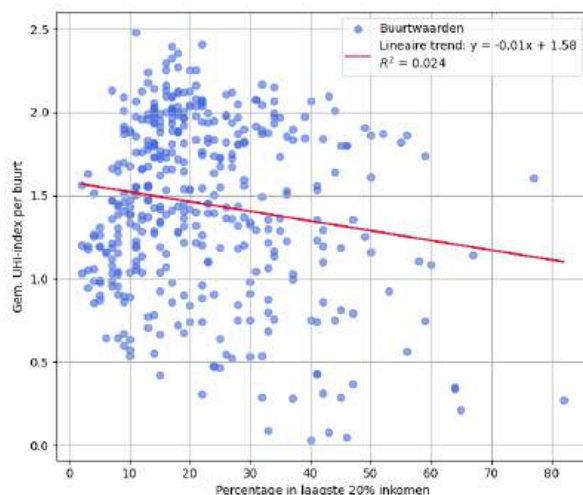
b: spreidingsdiagram met de gemiddelde PM2.5-concentraties afgezet tegen het aandeel van de bevolking van 65 jaar en ouder op buurtniveau. ($n = 407$). De regressielijn is zwak negatief en statistisch significant** ($R^2 = 0.017$; $p = 9.479e-03$);).

Eigen spreidingsdiagram, gebaseerd op data RIVM en gemeente Amsterdam (2020 & 2024)

Figuur 4.9 toont twee spreidingsdiagrammen waarin het aandeel van de bevolking met een inkomen in de laagste 20% per buurt is uitgezet tegen (a) de gemiddelde UHI-index en (b) de gemiddelde PM2.5-concentratie.

Subfiguur 4.9a laat een zwak negatief verband zien tussen de UHI-index en het aandeel lage inkomens. Dit verband is statistisch significant op $p < 0.01$ -niveau ($R^2 = 0.024$; $p = 1.756e-03$).

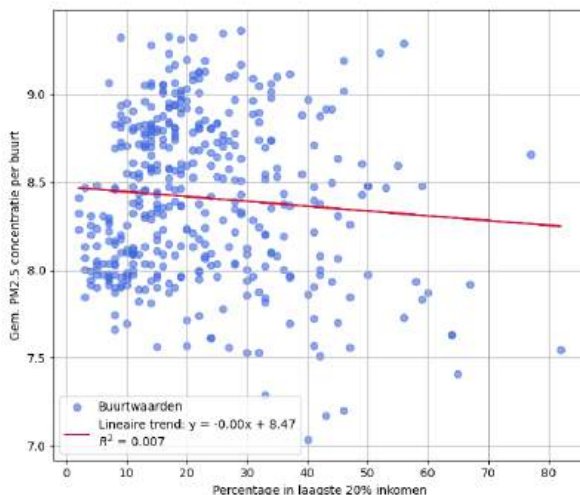
Subfiguur 4.9b toont een vergelijkbaar zwak negatief verband, echter is deze niet statistisch significant ($R^2 = 0.007$; $p = 9.900e-02$). Hieruit kan geconcludeerd worden dat op basis van deze analyse mensen met een lager inkomen niet disproportioneel blootgesteld worden aan hitte-eilanden en PM2.5-concentraties. Het geeft zelfs aan dat deze groep minder bloot wordt gesteld aan de hitte-eilanden.



Figuur 4.9a

a: Spreidingsdiagram met de gemiddelde UHI score afgezet tegen het aandeel van de bevolking in de laagste 20% van het inkomen op buurniveau. (n=407). De regressielijn is zwak negatief en statistisch significant ($R^2 = 0.024$; $p = 1.756e-03$).**

Figuur 4.9b



b: spreidingsdiagram met de gemiddelde PM2.5-concentraties afgezet tegen het aandeel van de bevolking in de laagste 20% van het inkomen op buurniveau. (n=407). De regressielijn is zwak negatief en statistisch niet significant ($R^2 = 0.007$; $p = 9.900e-02$).

Eigen spreidingsdiagram, gebaseerd op data RIVM en gemeente Amsterdam(2020 & 2021)

5. Discussie

Dit hoofdstuk zal verder duiken in de betekenis van de resultaten die getoond zijn in hoofdstuk 4. Als eerst worden de belangrijkste resultaten gepresenteerd om deze weer duidelijk op een rij te hebben. Daarna wordt verder gekeken naar wat deze resultaten betekenen en of er verbanden kunnen worden getrokken, en hoe deze verbanden zich verhouden tot eerdere onderzoeken. Tot slot worden beperkingen van dit onderzoek nog uitgelicht zodat op basis hiervan vervolgonderzoeken en aanbevelingen geformuleerd kunnen worden.

5.1 Belangrijkste bevindingen

Dit onderzoek had als doel om ruimtelijke en sociaal-economische verschillen in blootstelling aan het UHI-effect in kaart te brengen binnen de gemeente Amsterdam. In deze paragraaf worden de belangrijkste bevindingen uit hoofdstuk 4 op een rijtje gezet.

Allereerst bleken de ruimtelijke patronen die te ontdekken waren in de verschillende sociaal-economische groepen de volgende:

- Bij 65-plussers leek er geen duidelijk patroon zichtbaar
- Migranten en mensen met een lager inkomen leken zich vaker te vestigen buiten het centrum van Amsterdam.

Ten tweede liet een spreidingsdiagram, met als afhankelijke variabele de UHI-index en als onafhankelijke variabele PM2.5-concentraties, zien dat hier wel een statistisch significant verband tussen lijkt te bestaan. Dit verband leek lineair en gaf aan dat plekken waar de UHI-index hoger was vaak ook een hogere PM2.5-concentratie toonde. Uit deze data kwam de kaart met cumulatieve blootstelling die, zoals al verwacht was, toonde dat met name het centrum van Amsterdam erg blootgesteld was aan PM2.5 en stedelijke hitte.

Hiernaast gaf het Gini-coëfficiënt van 0.19 aan dat de UHI-index redelijk ongelijk verdeeld was over Amsterdam. Bij PM2.5 was hier geen sprake van.

Tot slot werd op basis van spreidingsdiagrammen de conclusie getrokken dat er wel significante verbanden bestaan tussen de twee sociaal-economische en de UHI-index binnen Amsterdam. Dit waren 65-plussers en mensen met een laag inkomen. De significante verbanden waren zwak negatief, wat zou betekenen dat deze groepen relatief minder blootgesteld worden aan stedelijke hitte.

Het verband met PM2.5-concentraties was alleen aanwezig met het aandeel 65-plussers per buurt. Ook deze was zwak negatief, wat betekent dat 65-plussers minder blootgesteld lijken aan PM2.5-concentraties binnen Amsterdam.

5.2 Reflectie op de resultaten

De resultaten uit dit onderzoek waren op sommige punten verrassend. In Amsterdam is het bijvoorbeeld niet het geval dat kwetsbare groepen meer blootgesteld worden. Twee van de drie onderzochte groepen toonden zelfs een zwak negatief verband, namelijk die van lage inkomens en 65-plussers.

Dit is in contrast met verschillende steden waar een positief verband aanwezig leek te zijn. Bijvoorbeeld in Chicago, waar in 1995 vooral arme wijken hard werden getroffen door een hittegolf (Klinenberg, 2002). Ditzelfde patroon was ook terug te zien in Parijs in 2003 (Laaidi et al., 2012). En recent onderzoek toonde dit ook aan in Madrid waar ouderen en lage inkomensgroepen vaker woonden in wijken met minder verkoeling en een hoger UHI-effect (Barrios-Peña et al., 2021). Tot slot heeft de WHO dit ook onderzocht en bleek dat wereldwijd mensen met een lagere sociaal-economische status en migranten een hoger risico hadden op hittestress en vervuiling (WHO, 2009).

Kortom, er werd op basis van de literatuur een positief verband verwacht tussen de UHI-index en kwetsbare groepen. Echter bleek dit verband niet aanwezig in Amsterdam.

Bij het enige positieve verband met migranten was dit effect echter niet statistisch significant.

De reden van het zwakke negatieve verband lijkt met name ontstaan door het feit dat de UHI-index het hoogst is in het centrum van Amsterdam en de huizen hier over het algemeen duurder zijn. En uit de analyse bleek al dat deze groepen hier in verhouding juist minder wonen dan buiten het centrum.

De samenhang tussen de UHI-index en luchtvervuiling bleek daarentegen wel sterk aanwezig. Zowel de correlatiematrix als de spreidingsdiagram bevestigen dit, en lieten een duidelijke relatie zien. In de delen van Amsterdam waar deze beide sterk aanwezig zijn, is de cumulatieve blootstelling dan ook het grootst. Dit positieve verband was vanuit de literatuur ook te verwachten. Bevindingen hierover zijn dat luchtvervuiling en UHI elkaar versterken, vaak komt dit voor in dichtbebouwde gebieden met weinig ventilatie (Li et al., 2018). Hiernaast is er ook een significante correlatie gevonden tussen Land Surface Temperature (LST) en concentraties van PM_{2.5} in verschillende Chinese steden (Li & Liu, 2019). Deze samenvallende effecten van de UHI-index met luchtvervuiling zorgen samen voor een vergroot risico's voor de gezondheid van de populatie. Ook lijken deze negatieve effecten vooral voor te komen in dichtbevolkte gebieden, wat bleek uit figuur 4.1.

PM_{2.5}-concentraties zijn in heel Amsterdam hoger dan de WHO richtlijn hiervoor. De grenswaarde hiervan is namelijk gemiddeld niet meer dan 5 µg/m³ PM_{2.5} (WHO, 2021). Dit wordt, zoals in figuur 3.1 is te zien, overal overschreden. Uit figuur 4.4 kan de conclusie worden getrokken dat, op basis van dit onderzoek, het centrum van Amsterdam de meest blootgestelde plek is aan UHI's en hoge PM_{2.5}-concentraties. Dit betekent dat ongeacht de sociaal-economische status de gezondheidsrisico's hier het grootst zijn.

5.3 Beperkingen van het onderzoek

Dit onderzoek kent ook een aantal beperkingen die de resultaten en de interpretatie hiervan wellicht beïnvloed hebben.

Ten eerste zijn er grote verschillen in ruimtelijke resolutie tussen de gebruikte datasets. De UHI-Index is gebaseerd op rastercellen van 100 bij 100 meter, PM2.5-concentraties op 25 bij 25 meter, en sociaal-economische data zijn op buurniveau beschikbaar. Omdat in dit onderzoek veel is omgezet naar gemiddelden voor buurten, kunnen lokale variaties binnen buurten zijn verdwenen. Hierdoor kunnen kleine kwetsbare gebieden binnen buurten worden gemaskeerd in dit gemiddelde. Het gevolg hiervan is dat de ruimtelijke verbanden binnen buurten niet zichtbaar zijn in deze analyse.

Daarnaast stammen de gebruikte datasets uit verschillende jaren. De UHI-index komt uit 2020, PM2.5-concentraties uit 2019, inkomensdata uit 2021, en andere sociaal-economische factoren uit 2024. Deze temporele verschillen kunnen ervoor zorgen dat de data niet meer accuraat is, waardoor de link tussen blootstelling en bevolkingssamenstelling niet klopt.

Verder zijn de luchtvervuilingsgegevens gebaseerd op interpolaties van gemiddelden. Dit houdt in dat tijdelijke pieken of seizoensinvloeden buiten beeld blijven. Ook kunnen interpolaties op plekken met weinig meetpunten leiden tot onnauwkeurige schattingen.

Tot slot is de kwaliteit van de woningen een variabele die niet mee is genomen in dit onderzoek. Dit terwijl deze kwaliteit een belangrijke factor is in de blootstelling aan hitte binnenshuis. Huizen met een goede airco hebben hier bijvoorbeeld al veel minder last van. Het ontbreken van deze variabelen zorgt ervoor dat de blootstelling op plekken met een goede kwaliteit van woningen hoger uitpakt dan het daadwerkelijk is.

Hiernaast worden in de spreidingsdiagram en kaarten PM10 en NO₂ buiten beschouwing gelaten. Hierdoor kunnen verbanden tussen de UHI en deze stoffen gemist worden. Dit zou wel belangrijk kunnen zijn.

5.4 Aanbevelingen en vervolgonderzoeken

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat het UHI-effect en luchtvervuiling vooral in het centrum van Amsterdam voor grote problemen kunnen zorgen. Dit komt door een tekort aan groen, dichtbebouwde buurten, het vele verkeer en de verharding van de stad hier. Deze factoren creëren samen een verhoogd gezondheidsrisico voor bewoners van deze gebieden.

Hoewel sociaal-economische variabelen in dit onderzoek geen duidelijk verband vertoonden met de intensiteit van de UHI's, betekent dit niet dat kwetsbare groepen geen risico lopen. In de centraal gelegen buurten, waar de blootstelling hoog is, wonen wel degelijk veel mensen met een sociaal-economisch zwakke status. Daarnaast zijn veel belangrijke variabelen zoals woningkwaliteit, huidige gezondheid en mobiliteit buiten beschouwing gebleven. Deze elementen zijn echter wel erg belangrijk voor de kwetsbaarheid van individuen binnen de buurten.

Toekomstig onderzoek zou zich hierdoor dus kunnen richten op:

- Het beter in kaart brengen van kwetsbare huizen binnen buurten.
- Een fijnere resolutie op de spreiding van verschillende sociaal-economische groepen zodat lokale verschillen duidelijker worden.
- Het creëren van duidelijke grenswaarden voor luchtvervuiling en stedelijke hitte in Nederlands beleid.

Tot slot is het belangrijk dat er in toekomstige beleidsplannen naast blootstelling ook wordt gekeken naar blootgestelde groepen. Vooral in dichtbevolkte gebieden met weinig groen en veel verharding lijken grote stappen gemaakt te kunnen worden.

5.5 Beleidsimplicaties

Dit onderzoek biedt tot op zekere hoogte duidelijke kaders om UHI's tegen te gaan in Amsterdam. Vooral de combinatie van een hoge UHI-index met hoge PM2.5-concentraties leidt tot grote risico's. Aan de hand van figuur 4.4, kan dit beleid op de juiste plekken geïmplementeerd worden, ongeacht de sociaal-economische samenstelling.

Dit beleid zal zich met name moeten richten op het af laten nemen van PM2.5-concentraties. Dit omdat dit het hele jaar door zorgt voor blootstelling (Hoek et al., 2013). Ook wordt de WHO-grens van $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ overal in Amsterdam overschreden. Dit terwijl UHI-pieken zoals de analyse liet zien vooral het centrum raken. Ook laat de sterke correlatie tussen hitte-eilanden en PM2.5-concentraties ($R^2 = 0.81$) zien dat ze vaak op dezelfde plek aanwezig zijn. Hierdoor zorgen maatregelen tegen PM2.5 er tegelijkertijd ook voor dat plekken met een hoge UHI-index beter leefbaar worden.

Om PM2.5-concentraties te verminderen zou de gemeente Amsterdam meer kunnen inzetten op lage- en zero emissie zones. Sinds 2017 zijn er al lage-emissiezones in Amsterdam (Gemeente Amsterdam, 2023). Hierdoor zijn PM2.5-concentraties al verminderd in de stad. Studies uit Brussel en Antwerpen laten echter zien dat een verdere aanscherping van maatregelen, zoals het vervroegd opnemen van personenauto's in zero-emissie zones en strikte handhaving, een extra PM2.5 daling van 15-20% kunnen opleveren (Bruyneel et al., 2025).

6. Conclusie

Op basis van dit onderzoek kunnen de hoofd- en deelvragen duidelijk beantwoord worden.

De eerste deelvraag luidde:

“Welke sociaal-economische groepen worden als meest kwetsbaar beschouwd aan hitte?”

Op basis van de literatuur blijkt dat ouderen, mensen met een slechte gezondheid en mensen met beperkte fysieke en financiële middelen het meest kwetsbaar zijn voor hittestress.

“In welke mate overlappen de ruimtelijke patronen in het urban heat island-effect en luchtvervuiling?”

De resultaten tonen een sterke positieve lineaire relatie tussen de aanwezigheid van UHI's en hoge PM2.5-concentraties op buurniveau. Uit de analyse bleek dat deze variabelen vooral in het centrum van Amsterdam veel samenkomen. Hierdoor is het risico op negatieve gevolgen voor de gezondheid van de bevolking hier het grootst.

“Welke sociaal-economisch kwetsbare groepen worden disproportioneel blootgesteld aan het UHI-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

Op basis van de statistische analyse blijkt er geen positief verband te bestaan tussen sociaal-economische groepen en het UHI-effect binnen Amsterdam. Dit lijkt vooral te komen doordat UHI's zich met name vormen in het centrum waar deze groepen relatief minder aanwezig zijn. Hierdoor worden de onderzochte groepen gemiddeld minder blootgesteld aan UHI's dan andere groepen.

Voor luchtvervuiling geldt dat alleen 65-plussers een statistisch significant verband tonen. Ook deze is zwak negatief, wat zou betekenen dat deze groep minder blootgesteld is. Er kan dan ook worden geconcludeerd dat de onderzochte sociaal-economische groepen niet disproportioneel blootgesteld worden aan PM2.5-concentraties.

Deze deelvragen beantwoorden samen de hoofdvraag die luidde:

“Zijn er ruimtelijke en sociaal-economische verschillen in blootstelling aan het Urban Heat Island-effect en luchtvervuiling binnen Amsterdam?”

Het antwoord op deze vraag is dat het UHI-effect een duidelijk ruimtelijk patroon laat zien. Namelijk dat met name de binnenstad hier last van heeft. Dit patroon staat sterk in verband met PM2.5-concentraties die vaak hoog zijn op plekken waar de UHI-index ook hoog is.

Voor de drie sociaal-economische groepen bestaat er geen sterk ruimtelijk patroon. Ook vertonen deze geen sterk positief verband met de UHI-waarde. Integendeel, omdat mensen met een lager inkomen vaker buiten het centrum wonen, lijken deze soms zelfs minder blootgesteld. Echter kan dit niet met een statistisch significant verband onderbouwd worden. Sociaal-economisch kwetsbare groepen hebben op basis van dit onderzoek geen last van een grotere blootstelling aan UHI's en PM2.5 binnen Amsterdam. Wel is het duidelijk dat de gezondheidsrisico's voor mensen in de binnenstad hoger zijn, ongeacht achtergrond, omdat de UHI-index en PM2.5-concentraties hier hoger zijn.

Dit onderzoek draagt op deze manier bij aan het inzichtelijk maken van UHI's in Amsterdam. Ook maakt het duidelijk welke buurten extra aandacht verdienen om de inwoners te beschermen tegen hitte. Ondanks dat de onderzochte sociaal-economische groepen niet disproportioneel zijn blootgesteld, blijven individuen wel kwetsbaar. Hierdoor blijft het in de toekomst belangrijk om factoren als sociaal-economische status, woningkwaliteit, gezondheid en mobiliteit mee te nemen in nieuwe onderzoeken.

Literatuurlijst

Atlas Leefomgeving. (2019). *PM_{2.5} – Gemiddelde jaargemiddelde concentratie (25 × 25 m raster)* [Data set]. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
<https://www.atlasleefomgeving.nl/kaarten?config=3ef897de%E2%80%A6>

Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R.F. et al. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nat Med* 29, 1857–1866 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>

Barrios-Peña, C., Sánchez-Romero, C., & Pérez, A. (2021). Urban heat island and air pollution: A study of vulnerable populations in Madrid. *Environmental Research*, 197, 111123. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111123>

Boyce, J. K., Zwickl, K., & Ash, M. (2014). Three measures of environmental inequality. Institute for New Economic Thinking Working Paper 12.

Bruyneel, L., Cox, B., Stauffer, A., Vandenthoren, L., Fierens, F., Nawrot, T. S., & Horemans, C. (2025). *Positive impact of the introduction of low emission zones in Antwerp and Brussels on air quality, socio-economic disparities and health: A quasi-experimental study* (Scientific summary). Mutualités Libres/Onafhankelijke Ziekenfondsen.
https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2025/03/Scientific-summary_Positive-impact-of-the-introduction-of-low-emission-zones-in-Antwerp-and-Brussels-on-air-quality.pdf

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2025). Kaart van 100 meter bij 100 meter met statistieken (vierkanten), editie 2024 [Data set].
<https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/nederland-regionaal/geografische-data/kaart-van-100-meter-bij-100-meter-met-statistieken>

Chakraborty, J., & Maantay, J. A. (2011). Social vulnerability and environmental justice. In M. J. Pastore (Ed.), *The Routledge Handbook of Environmental Justice* (pp. 304–316). Routledge.

Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). *The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: A systematic review*. *Landscape Ecology*, 32(10), 1921–1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>

European Parliament & Council. (2008). *Directive 2008/50/EC of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe* (consolidated version 18 September 2015). *Official Journal of the European Union*, L 152, 1–44.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918>

Fever, S. K., Kahl, J. D. W., Kalkbrenner, A. E., Cerón Bretón, R. M., & Cerón Bretón, J. G. (2022). A new combined air quality and heat index in relation to mortality in Monterrey, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3299.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19063299>

- Grigorieva, E., & Lukyanets, A. (2021). Combined effect of hot weather and outdoor air pollution on respiratory health: literature review. *Applied Geography*, 12(6), 790. <https://doi.org/10.3390/atmos12060790>
- Gemeente Amsterdam. (2025). Dashboard Kerncijfers [Data set]. Onderzoek & Statistiek Amsterdam. <https://onderzoek.amsterdam.nl/interactief/dashboard-kerncijfers>
- Gemeente Amsterdam. (2023). Zero-Emission Mobility in Amsterdam – Implementation Agenda 2023-2026 (PDF). https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/867636/zero-emission_implementation_agenda_2023-2026.pdf
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The urban heat island: Implications for health in a changing environment. *Current Environmental Health Reports*, 4, 296–305.
- Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., & Kaufman, J. D. (2013). Long-term exposure to ambient air pollution and incidence of cardiovascular disease: A meta-analysis of cohort studies. *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 730–738. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205892>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg2/>
- Klinenberg, E. (2002). *Heat wave: A social autopsy of disaster in Chicago*. University of Chicago Press.
- KNMI. (2016). *Stedelijke hitte in Utrecht – metingen en analyse zomer 2015*. <https://www.knmi.nl/>
- Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., et al. (2012). The impact of heat islands on mortality in Paris during the 2003 heat wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254–259. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103532>
- Li, X., & Liu, Y. (2019). Correlation between land surface temperature and PM2.5 concentration in urban areas: A case study of Chinese cities. *Atmospheric Environment*, 200, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.045>
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., & Sodoudi, S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of the Total Environment*, 636, 818–828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.254>
- NOS. (2024, 10 juli). *Hitterecord gebroken in westen van VS: Zeker acht mensen overleden*. <https://nos.nl/artikel/2528236-hitterecord-gebroken-in-westen-van-vs-zeker-acht-mensen-overleden>

NU.nl. (2024, 18 augustus). *Nederlandse steden niet gebouwd op hitte: te veel ongezond warme huizen*.
<https://www.nu.nl/algemeen/6324618/nederlandse-steden-niet-gebouwd-op-hitte-te-veel-ongezond-warme-huizen.html>

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). (2020). *Luchtkwaliteit in Nederland: jaarrapportage 2019*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0036.pdf>

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), & VITO. (2017). *Netherlands Natural Capital Model – Technical documentation: Cooling by vegetation and water in urban areas*. <https://www.atlasnatuurlijkkapitaal.nl/sites/default/files/2019-04/Natural%20Capital%20Model%20%20Technical%20documentation%281%29.pdf>

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2020). Stedelijk hitte-eiland effect (UHI) in Nederland [Data set]. Atlas Natuurlijk Kapitaal.
<https://www.atlasnatuurlijkkapitaal.nl/stedelijk-hitte-eiland-effect-uhi-in-nederland>

RTL Nieuws. (2025, 10 mei). *Amsterdam experimenteert met nepbomen tegen hitte*.
<https://www.rtl.nl/nieuws/economie/artikel/5507927/amsterdam-experimenteert-met-nepbomen-tegen-hitte>

Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43–56.

Slesinski, S. C., Matthies-Wiesler, F., Breitner-Busch, S., Gussmann, G., & Schneider, A. (2025). Social inequalities in exposure to heat stress and related adaptive capacity: A systematic review. *Environmental Research Letters*, 20, 033005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb509>

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384.

World Health Organization. (2006). Air quality guidelines: Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO Regional Office for Europe.
https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

World Health Organization. (2009). Improving public health responses to extreme weather/heat-waves – EuroHEAT. WHO Regional Office for Europe.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf>

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

Zhang, Y., Jiang, W., Zeng, Y., & Zhang, Y. (2018). Combined effects of ambient air pollution and temperature on mortality: A systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 640–641, 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.147>

Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>

Appendix

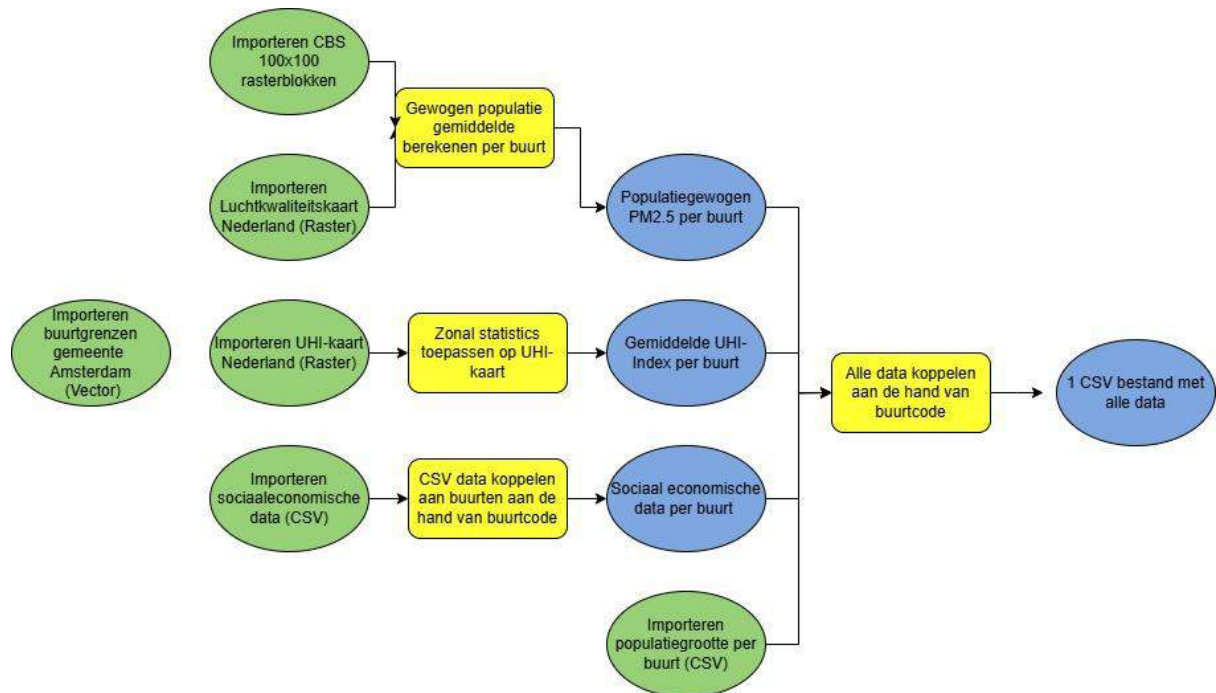
Appendix 1

Dataset	Beschrijving	Bron, jaar	Resolutie	Datatype
UHI	UHI-intensiteit: verschil in graden celsius in warmte in landelijk gebied met in de stad.	RIVM, 2020 Gemiddelden van juni-augustus	100 x 100 m	Raster
Luchtvervuiling	Over heel Nederland NO ₂ , PM2.5, PM10 concentraties als gemiddelde per µg/m ³	Atlas leefomgeving, 2019	25 x 25 m	Raster
Sociaal-economische data	% 65+ers, migratie, laagste 20% inkomen. Op buurniveau	Gemeente Amsterdam, 2024 (inkomen uit 2021)	Buurtniveau	CSV
Populatie	Populatie grootte op buurniveau	Gemeente Amsterdam, 2024	Buurtniveau	CSV
Wijkenkaart Amsterdam	Officiële buurngrenzen	Gemeente Amsterdam, 2022	-	Vector
CBS vierkanten	Bevolkingsdata op 100 bij 100 meter rasters	CBS, 2023	100 x 100 m	Raster

Overzicht van gebruikte datasets, inclusief bron, jaar, resolutie en datatype.

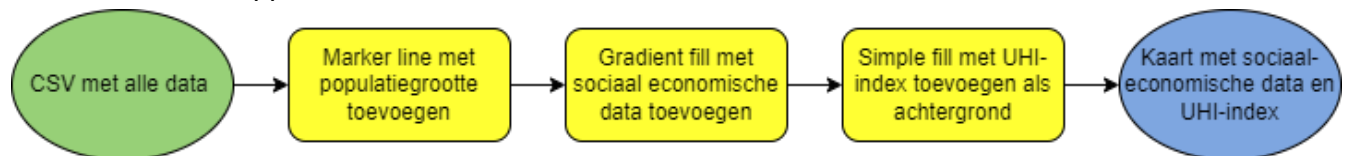
Appendix 2

Flowchart 1



Flowchart 2

Flowcharts met stappen van 1 CSV bestand naar kaarten met eindresultaten



Appendix 3

