



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport

Kennisnotitie

Temperatuur-gerelateerde sterfte in Amsterdam

Onderzoek naar ouderen, kwetsbare locaties en de impact van klimaatscenario's rond 2050 en 2100

Samenvatting

Uit de literatuur blijkt dat blootstelling aan hoge en lage temperaturen kan leiden tot gezondheidsklachten en in ernstige gevallen tot vervroegde sterfte. Dit onderzoek toont aan dat in de gemeente Amsterdam in de periode 2007-2019 een verhoogd sterfterisico was bij hoge en lage temperaturen. Bij hoge temperaturen waren de sterfterisico's groter onder ouderen en onder bewoners van buurten met een lagere buurt sociaaleconomische status. Ook waren de sterfterisico's bij hoge temperaturen groter onder bewoners van buurten met minder publiek groen, maar niet onder bewoners van buurten met minder bedekking door boomkronen. Er zijn geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij lage temperaturen gevonden tussen de verschillende populaties. Op basis van temperatuur-sterfterisico's, KNMI'23 klimaatscenario's, en sterfte-prognoses van de gemeente Amsterdam wordt geschat dat het aantal jaarlijkse hitte-gerelateerde sterfgevallen zal toenemen van 110 in 2007-2019 naar 215 - 300 in 2050 en naar 215 - 680 in 2100, afhankelijk van het klimaatscenario. Het geschatte aantal koude-gerelateerde sterfgevallen zal mogelijk ook toenemen door demografische veranderingen.

Inleiding

Het klimaat in Nederland verandert en dat zal er zeer waarschijnlijk toe leiden dat het steeds warmer wordt. Uit de KNMI'23 klimaatscenario's blijkt dat het aantal zomerse dagen en tropische nachten zal stijgen en het aantal vorstdagen zal afnemen (1). Ook zal het aantal hittegolven toenemen en zullen deze nog langer en intenser worden. Blootstelling aan hoge temperaturen is een van de meest ernstige en urgente klimaat-gerelateerde risicofactoren voor de menselijke gezondheid (2). Het kan leiden tot extra belasting op thermo-regulerende processen van het menselijk lichaam (3). Als de hittebelasting te hoog is, kan dat in ernstige gevallen leiden tot ziekenhuisopnames en sterfte (4).

Eerdere onderzoeken in Nederland toonden aan dat er een verhoogde sterfterisico is op warme dagen in vergelijking met minder warme dagen (5, 6). Met name ouderen lijken kwetsbaar te zijn voor de hitte (5, 6). Uit onderzoek blijkt echter ook dat er in Nederland meer koude-gerelateerde sterfte is dan warmte-gerelateerde sterfte (7). Voor het schatten van de mogelijke gezondheidsimpact van het veranderende klimaat is het daarom van belang om onderzoek te doen naar de relatie tussen hoge en lage temperaturen op de gezondheid.

De temperatuur-gerelateerde sterfte in de gemeente Amsterdam is onderzocht door het RIVM in opdracht van de gemeente Amsterdam.

RIVM

A. van Leeuwenhoeklaan 9
3721 MA Bilthoven
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

T 088 689 89 89

Auteurs:

Jochem Klompmaker
Werner Hagens

Centrum:

Duurzaamheid, Milieu en
Gezondheid

Contact:

Jochem Klompmaker
jochem.klompmaker@rivm.nl

Kenmerk:

KN-2025-0093

DOI:

10.21945/RIVM-
KN-2025-0093

Datum:

24-10-2025

Het onderzoek is verdeeld in twee fases: 1) het evalueren van de temperatuur-sterfte relatie en 2) het schatten van de temperatuur-gerelateerde sterfte in de periode 2007-2019 en in KNMI'23 klimaatscenario's in 2050 en 2100. Om mogelijke kwetsbare groepen en locaties te identificeren is de temperatuur-sterfte relatie onderzocht in verschillende leeftijdsgroepen, en in buurten die verschillen in sociaaleconomische status en oppervlakte groen.

Data

Sterfte

Voor alle inwoners van de gemeente Amsterdam (op basis van de gemeentelijke indeling in 2023) zijn gegevens over de dagelijkse sterfte (alle oorzaken) voor de periode 2000 tot en met 2019 verkregen in de afgeschermdde omgeving van het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS). Deze gegevens zijn geanonimiseerd voor het RIVM beschikbaar gesteld en de koppeling met de persoonsgegevens is zodanig uitgevoerd dat personen niet herleidbaar zijn. De dagelijkse sterfte is bepaald vanaf 1 januari 2000 tot en met 31 december 2019. In verband met de COVID-19 pandemie in 2020 is besloten om geen data na 2019 mee te nemen in dit onderzoek.

We hebben de dagelijkse sterfte bepaald per leeftijdsklassen (0-74 en 75+ jaar), buurt sociaaleconomische status (SES) en twee buurt groen indicatoren. De buurt SES- en groen-data zijn verkregen bij de gemeente Amsterdam en te vinden op <https://onderzoek.amsterdam.nl/interactief/dashboard-kerncijfers> en <https://onderzoek.amsterdam.nl/dataset/groen-in-amsterdam>

Voor buurt SES hebben we de SES laag (SKSES234) indicator gebruikt, gebaseerd op het jaar 2023. SES is een inschatting van iemands sociaaleconomische positie op de maatschappelijke ladder op basis van het inkomens- en opleidingsniveau. De SES-indicator heeft een waarde tussen 2 en 10. Elke inwoner van Amsterdam krijgt 1 tot 5 punten voor het opleidingsniveau en eveneens 1 tot 5 punten voor het gestandaardiseerde huishoudinkomen. De SES laag indicator geeft het percentage weer van het aantal inwoners in een buurt met een SES van 2 tot en met 4. De buurt SES-indicator is vervolgens verdeeld in twee categorieën: hoog-normale SES en laag-normale SES¹.

Er zijn twee buurt-groen indicatoren gebruikt: het aandeel publiek groen naar oppervlakte van de publieke ruimte (hierna genoemd: buurt publiek groen) en het aandeel van de publieke ruimte bedekt door boomkronen (hierna genoemd: buurt boomkronen). De groen data zijn gebaseerd op data uit 2024. De buurt publiek groen en boomkronen indicatoren zijn verdeeld in twee categorieën: hoog-normaal (>mediaan) en laag-normaal (≤mediaan). Voor elke categorie is de dagelijkse sterfte bepaald.

¹ De mediaan voor de buurt indicatoren is gebaseerd op de buurten van Amsterdam. Als het percentage inwoners met een lage SES in een buurt groter is dan de mediaan, is de buurt gecategoriseerd als laag-normale SES; als het percentage inwoners met een lage SES kleiner is dan de mediaan, is de buurt gecategoriseerd als hoog-normale SES.

Temperatuur

Data over de dagelijkse gemiddelde temperatuur gemeten op meetstation Lijnden-NH in de periode 1991-2019 is verkregen bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Gemodelleerde data over de dagelijkse gemiddelde temperatuur op dit meetstation in de KNMI'23 klimaatscenario's in 2050 en 2100 is gedownload via

<https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/tijdreeks>. Er zijn in totaal zes KNMI klimaatscenario's beschikbaar voor 2050 en voor 2100. Het gaat om:

- Hd-klimaatscenario: Hoge CO₂-uitstoot (SSP5-8.5), verdrogend;
- Hn-klimaatscenario: Hoge CO₂-uitstoot (SSP5-8.5), vernattend;
- Md-klimaatscenario: Matige CO₂-uitstoot (SSP2-4.5), verdrogend;
- Mn-klimaatscenario: Matige CO₂-uitstoot (SSP2-4.5), vernattend;
- Ld-klimaatscenario: Lage CO₂-uitstoot (SSP1-2.6), verdrogend;
- Ln-klimaatscenario: Lage CO₂-uitstoot (SSP1-2.6), vernattend

In de lage uitstootscenario's (L) vermindert de uitstoot van broeikasgassen snel in lijn met het Klimaatakkoord van Parijs (1). In de hoge uitstootscenario's (H) neemt de uitstoot tot 2080 sterk toe en zal de mondiale opwarming rond 2100 ongeveer 4,9°C zijn (1). Vanwege de beperkte temperatuurverschillen tussen de verdrogende (d) en vernattende (n) scenario's, zijn in de analyses alleen Ln, Md en Hd voor 2050 en 2100 meegenomen. Meer informatie over de scenario's is te vinden op <https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/>.

Luchtverontreiniging

Data over dagelijkse luchtverontreiniging, gemeten op uurbasis, van 2007 tot en met 2019, is verkregen op achtergrond-locaties van het luchtmeetnet in Amsterdam en gemiddeld per dag. De concentratie fijn stof deeltjes kleiner dan 10 micrometer (Particulate Matter, PM₁₀), stikstofdioxide (NO₂) en ozon (O₃) zijn meegenomen in dit onderzoek.

Populatie- en sterfte-prognoses

Leeftijdsspecifieke populatie- en sterfte-prognoses voor Amsterdam zijn verkregen bij de gemeente Amsterdam, afdeling Onderzoek en Statistiek. De prognoses lopen tot en met 2055; daarom is besloten om de sterfte-prognoses voor 2050 te gebruiken om de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2050 te bepalen en de sterfte-prognoses voor 2055 te gebruiken om de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2100 te bepalen.

Statistische analyse

Uit eerdere analyses blijkt dat de relatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte in Nederland is veranderd na 2006 (5). Daarom is besloten analyses uit te voeren voor de periode 2007-2019. Om de temperatuur-sterfte relatie te evalueren hebben we gebruik gemaakt van tijdserie analyses (quasi-Poisson regressie modellen) met correctie voor lange-termijn, seizoen en dag-van-de-week trends. Voor het evalueren van de temperatuur-sterfte relatie hebben we gebruik gemaakt van *distributed lag nonlinear models* (dlnm) om mogelijke niet-lineaire en vertraagde (de zogenaamde *lag* effecten, de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur een of meerdere dagen eerder) verbanden mee te nemen (8). Aan de hand van de modelresultaten zijn relatieve risico's berekend, deze risico's geven het mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de

minimum mortaliteit temperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen). Analyses zijn uitgevoerd voor de gehele populatie en separaat voor de verschillende leeftijdsgroepen, buurt SES, buurt publiek groen en buurt boomkronen. Om de jaarlijkse temperatuur-gerelateerde sterfte te schatten in huidige en toekomstige klimaatscenario's hebben we gebruik gemaakt van de leeftijdsspecifieke blootstelling-response relaties, de KNMI'23 klimaatscenario's en de demografische prognoses over de sterfte in de verschillende leeftijdsgroepen in de gemeente Amsterdam. In gevoeligheidsanalyses is gecorrigeerd voor mogelijke versturende effecten van PM₁₀, NO₂ en O₃. Er is ook een analyse uitgevoerd voor de periode 2000-2006 om te onderzoeken of de risico's zijn veranderd in de tijd. Meer informatie over de statistische analyse is te vinden in de Bijlage – Statistische analyse.

Resultaten en duiding

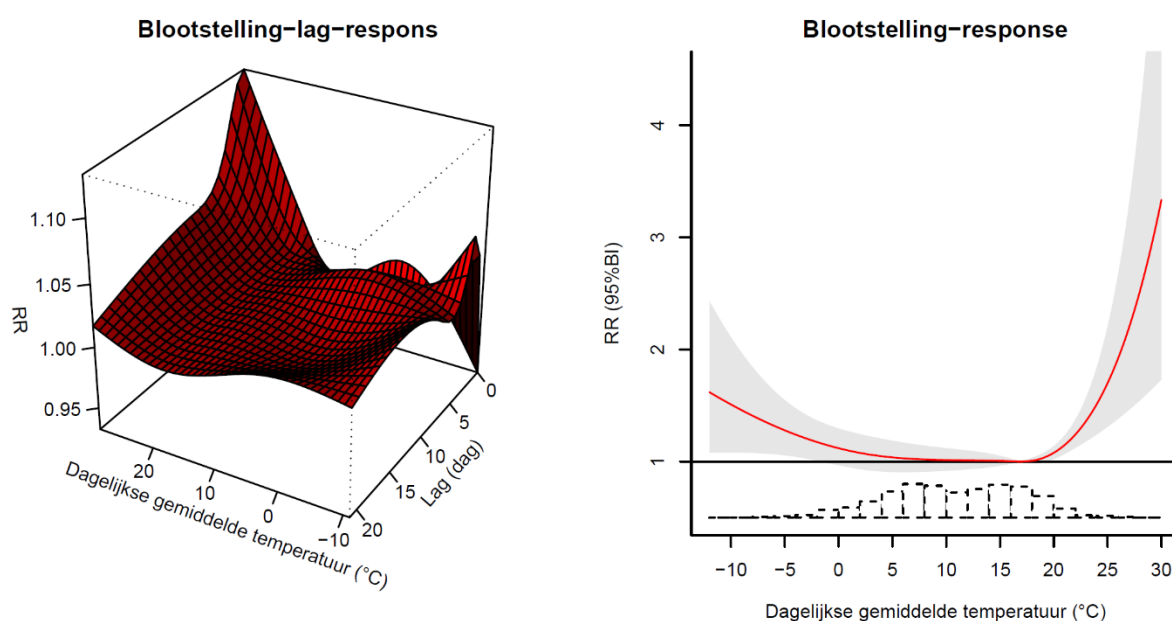
De dagelijkse gemiddelde temperatuur in de periode 2007-2019 was rond de 10.9°C. De hoogste dagelijkse gemiddelde temperatuur was 29.5°C en de laagste dagelijkse gemiddelde temperatuur was -11.5°C. Het gemiddelde aantal dagelijkse sterfgevallen was 15.3.

1. Evalueren temperatuur-sterfte relatie

In de periode 2007-2019 was er een verhoogd sterfterisico bij lage en hoge temperaturen in de gehele populatie van Amsterdam (Figuur 1). Er is een duidelijk niet-lineair verband; bij lage en hoge temperaturen neemt het sterfterisico toe; bij veelvoorkomende dagelijkse gemiddelde temperaturen (5-20°C) is er geen of een zwakke relatie met sterfte. Dit is in lijn met eerder onderzoek in de gehele Nederlandse populatie (6). Het grootste risico bij hoge temperaturen wordt waargenomen op de dag zelf (lag 0) en de dagen erna (lag 1-3). Sterfterisico's bij lage temperaturen zijn aanmerkelijk minder dan de sterfterisico's bij hoge temperaturen. De minimum mortaliteitstemperatuur ligt rond de 17°C; het aantal dagen met een dagelijkse gemiddelde temperatuur lager dan de minimum mortaliteitstemperatuur is beduidend groter dan het aantal dagen met een dagelijkse gemiddelde temperatuur hoger dan de minimum mortaliteitstemperatuur.

Extra correctie voor luchtverontreiniging heeft geen invloed op de blootstelling-response curves voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte. Veranderingen in de temperatuur-sterfterelaties tussen 2000-2006 en 2007-2019 zijn lastig te evalueren in verband met verschillen in gemeten temperaturen in beide periode, beperkte statistische power en onzekerheden in extrapolaties van de temperatuur-sterfterelaties. Meer informatie over de temporele veranderingen tussen 2000-2006 en 2007-2019 is te vinden in de Bijlage – Temporele veranderingen in temperatuur-sterfterelaties.

Figuur 1. De blootstelling-lag-response curve (links) en de (cumulatieve) blootstelling-response curve (rechts) voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte in de gehele populatie van de gemeente Amsterdam in de periode 2007-2019 (BI=betrouwbaarheidsinterval). De blootstelling-lag-response curve geeft de temperatuur-sterfte relatie weer bij verschillende lags, bij lag 0 is de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur op die dag, bij lag 1 is de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur van één dag eerder. De histogram in de figuur rechts geeft de verdeling van alle dagen in 2007-2019 weer per dagelijkse gemiddelde temperatuur.



Ouderen en kwetsbare locaties

De grootste sterfterisico's bij hoge temperaturen worden gevonden bij ouderen, bij bewoners van buurten met een laag-normale buurt SES en met laag-normaal buurt publiek groen (Figuur 2). Er zijn geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij hoge temperaturen tussen bewoners van buurten met laag-normale en hoog-normale buurt boomkronen. Ook zijn er geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij lage temperaturen tussen de verschillende populaties.

Eerder onderzoek op basis van de gehele Nederlandse populatie toonde aan dat de sterfterisico's bij hoge temperaturen groter zijn onder ouderen dan onder 0-64 en 65-74 jarigen (5, 6). Dit is in lijn met de bevindingen in dit rapport. De grotere sterfterisico's onder ouderen komt onder andere door een minder goed functionerend thermo-regulerend systeem, zoals de mogelijkheid om te kunnen zweten (9), en hogere prevalentie van chronische ziekten. Onder inwoners van buurten met een laag-normale buurt SES zijn sterfterisico's bij hoge temperaturen groter dan onder inwoners van buurten met een hoog-normale buurt SES. De precieze oorzaak van de verschillen in sterfterisico's tussen buurt met een verschillende buurt SES hebben we niet onderzocht. Mogelijk komt het doordat inwoners van buurten met een laag-normale buurt SES minder financiële middelen hebben om hitte-werende

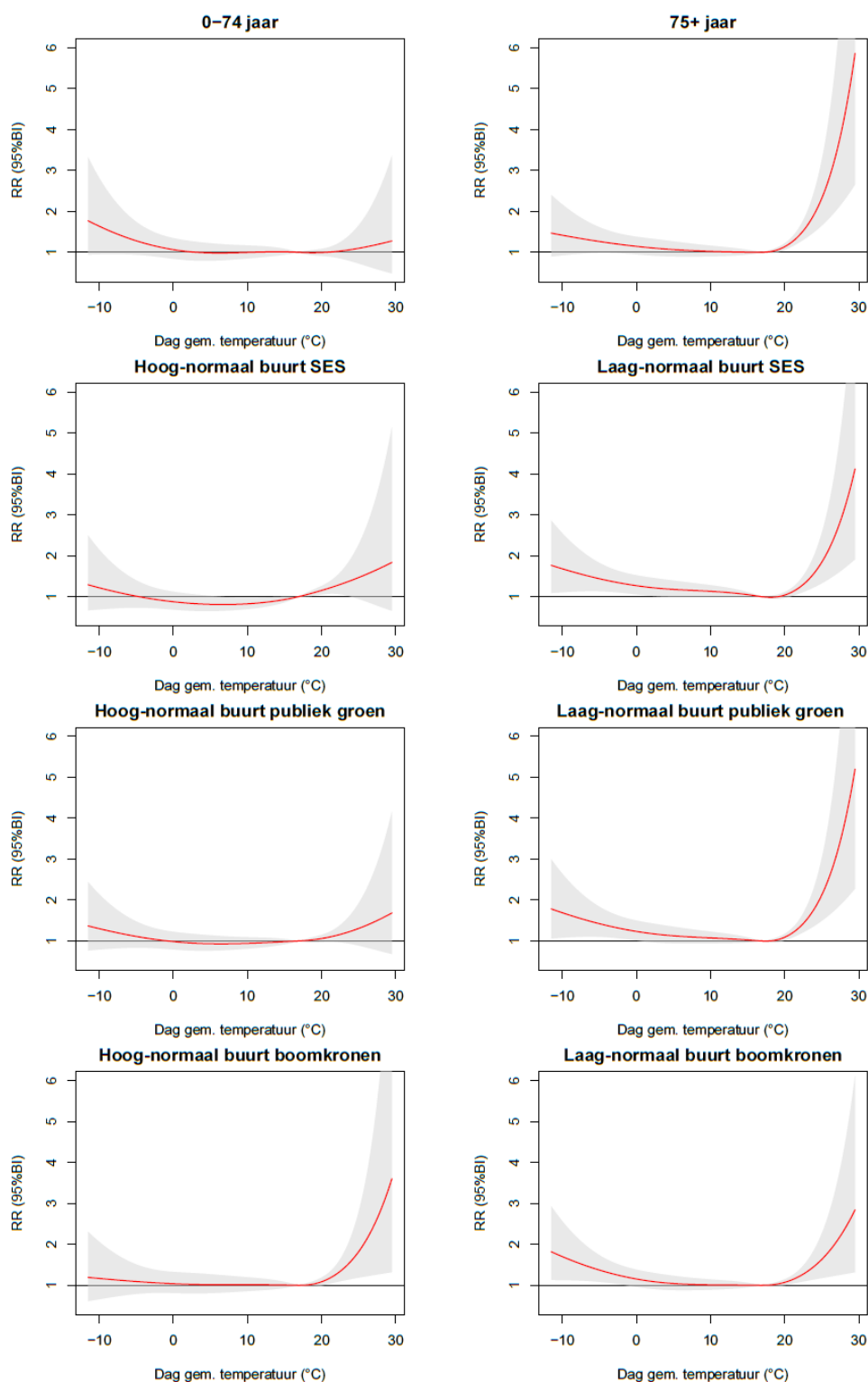
maatregelen te nemen en mogelijk ook een slechtere gezondheid hebben waardoor zij kwetsbaarder zijn voor hitte (10). Een andere verklaring voor het hogere sterfterisico in buurten met een laag-normale buurt SES is dat deze buurten mogelijk meer versteend zijn dan buurten met een hoog-normale buurt SES, waardoor het minder afkoelt op warme dagen. Dit fenomeen is ook wel bekend als het stedelijk hitte-eiland effect. Studies in London en Parijs vonden bij hoge temperaturen ook hogere sterfterisico's in buurten met een lagere SES (11-13). Onderzoek op basis van de gehele Nederlandse populatie liet echter zien dat er in de periode 2010-2019 geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij hoge temperaturen waren tussen inwoners van buurten met een hoge, midden en lage buurt SES (5). Het landelijk beeld wijkt hierbij dus af van de resultaten voor Amsterdam alleen. Er zijn wel verschillen qua opzet, zo is voor de evaluatie van het Nationaal Hitteplan alleen gekeken naar de warme periode. Daarnaast is data van heel Nederland geaggregeerd voor de evaluatie van het Nationaal Hitteplan, waardoor mogelijke verbanden tussen buurt SES en het hitte-eiland vervagen. Ook zijn de buurt SES-categorieën in deze studie gebaseerd op percentielen van de buurten in Amsterdam en niet op percentielen van alle buurten in Nederland.

Buurt publiek groen heeft mogelijk ook impact op het stedelijk hitte eiland. In buurten met laag-normaal buurt publiek groen is het waarschijnlijk warmer dan in buurten met hoog-normaal buurt publiek groen, waardoor de sterfterisico's bij hoge temperaturen groter zijn. De studies in London en Parijs rapporteerden ook lagere sterfterisico's bij hoge temperaturen in buurten met veel groen (11-13), in lijn met de resultaten uit deze studie. Ook het oppervlakte boomkronen heeft waarschijnlijk impact op het hitte eiland. Echter zien we in deze studie geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij hoge temperaturen tussen buurten met laag-normale en hoog-normale buurt boomkronen.

Verschillen in sterfterisico's bij hoge temperaturen tussen buurten die verschillen op basis van een indicator, zoals buurt SES of publiek groen, impliceert dat deze indicator een effect heeft op de hitte-gevoeligheid van de bewoners van die buurt. We kunnen echter niet uitsluiten dat er mogelijk andere correlerende factoren zijn die sterfterisico's tussen buurten beïnvloeden. Er wordt vaak gedacht dat groene buurten ook buurten zijn met een hogere SES, echter blijkt dat de correlatie tussen buurt SES, boomkronen en publiek groen zwak ($-0.20 < \text{Pearson } R \leq 0.30$) is in Amsterdam. Ook is er een zwakke correlatie tussen buurt SES, boomkronen en publiek groen met het percentage 65+ jarigen per buurt (gebaseerd op kerncijfers wijken en buurten 2023²). Er is wel een sterk negatieve correlatie tussen buurt publiek groen en de buurt omgevingadressendichtheid (Pearson $R \sim -0.75$); buurt boomkronen was niet gecorreleerd met buurt omgevingsadressendichtheid.

² <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/85618NED>

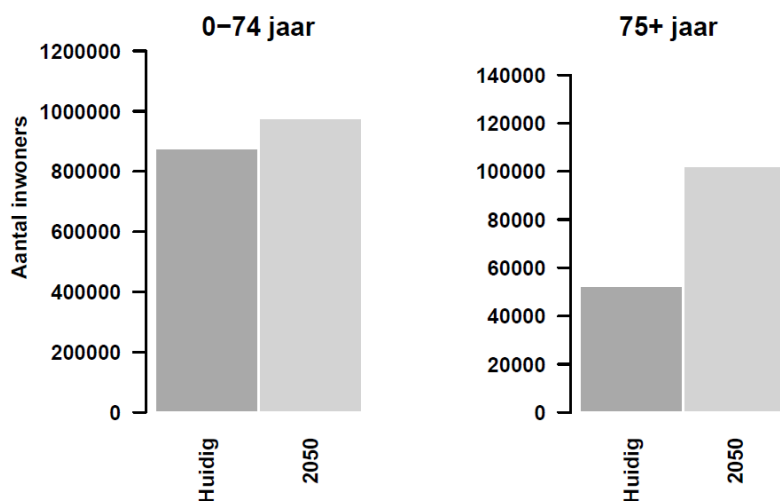
Figuur 2. De (cumulatieve) blootstelling-response curve voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte in subpopulaties van de gemeente Amsterdam in de periode 2007-2019 (BI=betrouwbaarheidsinterval).



2. Schatten temperatuur-gerelateerde sterfte

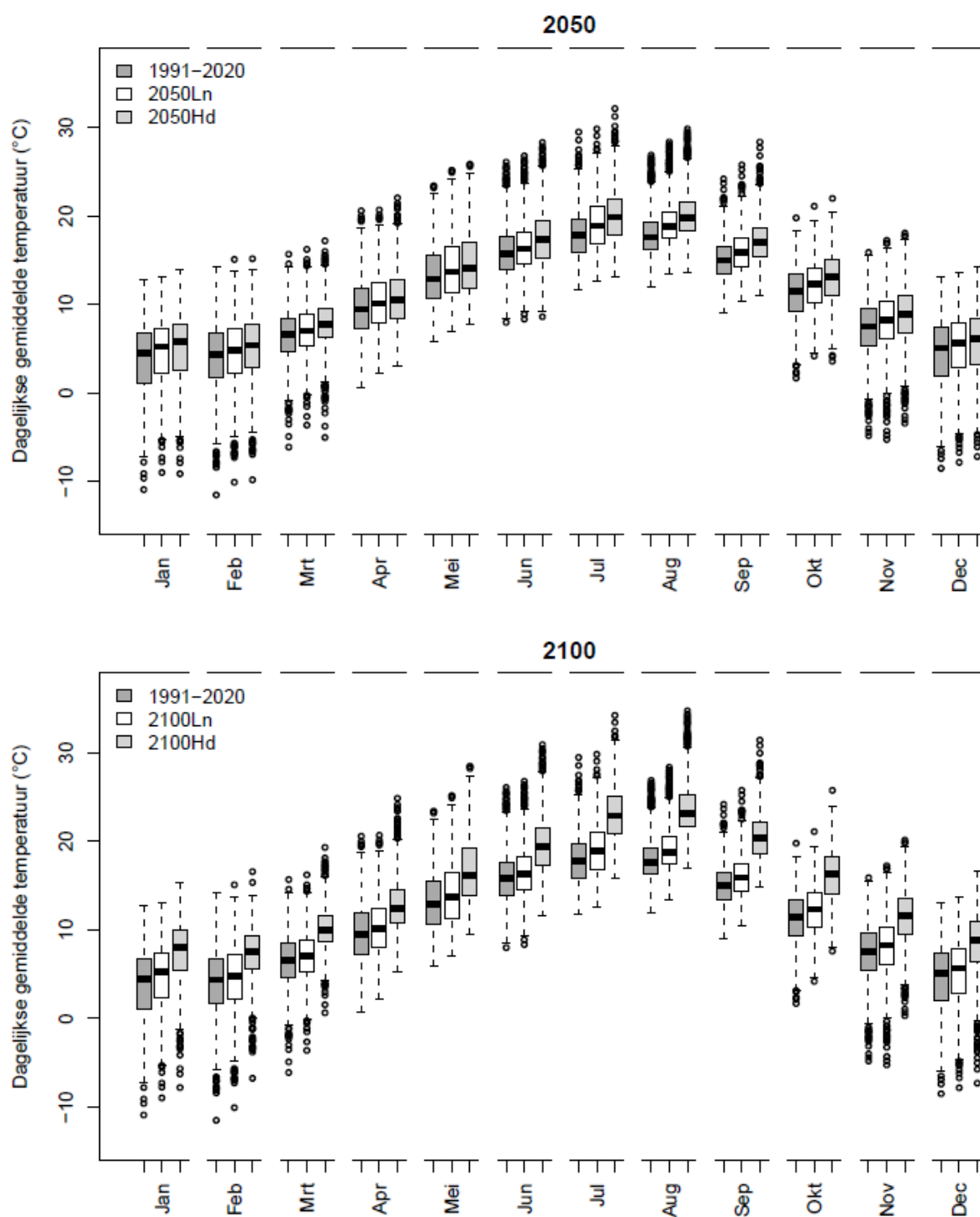
Voor het schatten van de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2050 en 2100 zijn de KNMI'23 klimaatscenario's, leeftijdsspecifieke prognoses en de leeftijdsspecifieke blootstelling-response curves meegenomen. Uit de populatie-prognose blijkt dat er een toename van 11% wordt verwacht onder het aantal inwoners in de leeftijdscategorie 0-74 jaar in 2050 ten opzichte van de populatie in 2024 (Figuur 3). Voor de leeftijdsgroep van 75+ jaar wordt er een toename van bijna 95% verwacht.

Figuur 3. Het aantal inwoners van de gemeente Amsterdam in 2024 (huidig) en prognoses voor 2050 voor de gemeente Amsterdam. Let op, de Y-as verschilt tussen de leeftijdsgroepen.



De KNMI'23 klimaatscenario's laten een duidelijk beeld zien dat de dagelijkse gemiddelde temperatuur zal toenemen (Figuur 4). Het aantal dagen per 30 jaar met een dagelijkse gemiddelde temperatuur boven de 25°C in de periode 1991-2020 was 31 en zal toenemen naar 83 in het 2050 Ln-klimaatscenario en naar 178 in het 2050 Hd-klimaatscenario.

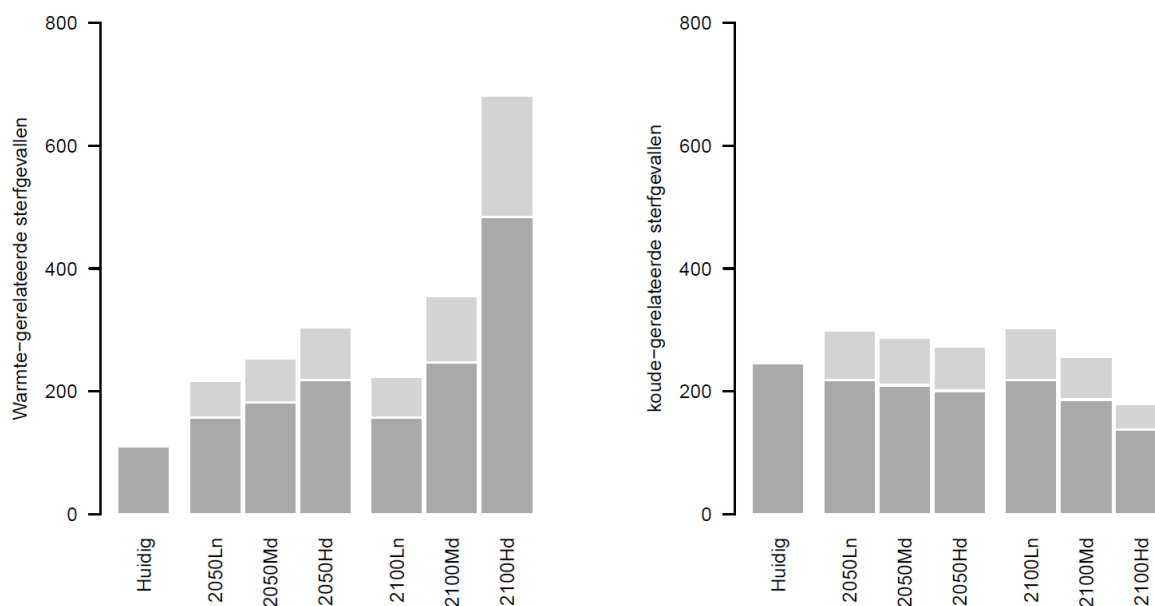
Figuur 4. De dagelijkse gemiddelde temperatuur in de periode 1991-2020 en in KNMI klimaatscenario's Ln (lage uitstoot, vernattend) en Hd (hoge uitstoot, verdrogend) 2050 en 2100 op KNMI meetstation Lijnden, NH.



In de periode 2007-2019 ligt het geschatte aantal warmte-gerelateerde sterfgevallen per jaar rond de 110 (Figuur 5). Ongeveer 25% van de warmte-gerelateerde sterfte vindt plaats op de 1% warmste dagen (dagen met een dagelijkse gemiddelde temperatuur $>23^{\circ}\text{C}$) van de periode 2007-2019. In het 2050 Ln scenario zal het geschatte aantal warmte-gerelateerde sterfgevallen per jaar stijgen naar ongeveer 215; in het 2050 Md scenario zal het stijgen naar ongeveer 250 sterfgevallen per jaar en in 2050 Hd naar 300 sterfgevallen per jaar. In het 2100 Ln scenario zal het geschatte aantal warmte-gerelateerde sterfgevallen ongeveer gelijk blijven met de 2050 Ln scenario omdat de temperatuur niet verder zal stijgen in dit scenario. In het 2100 Md scenario stijgt het naar 354 sterfgevallen per jaar en in 2100 Hd naar meer dan 680 sterfgevallen per jaar. Van de warmte-gerelateerde sterfte in toekomstige scenario's wordt 22-28% veroorzaakt door demografische veranderingen, bij de koude-gerelateerde sterfte in toekomstige scenario's is dat 27-32%.

In de periode 2007-2019 ligt het geschatte aantal koude-gerelateerde sterfgevallen per jaar rond de 245 (Figuur 5). Ondanks de afname in koude dagen, zal in alle toekomstige scenario's voor 2050 het geschatte aantal koude-gerelateerde sterfgevallen stijgen door demografische veranderingen (toename populatie, vergrijzing). In het 2100 Ln scenario is het geschatte aantal koude-gerelateerde sterfgevallen per jaar ongeveer 300 en in 2100 Hd scenario is het 180.

Figuur 5. Geschatte jaarlijkse warmte- en koude-gerelateerde sterfte in Amsterdam in de huidige periode (2007-2019) en in verschillende KNMI'23 klimaatscenario's in 2050 en 2100. De lichtgrijze balken geven de toename in warmte- en koude-gerelateerde sterfte weer door demografische veranderingen (bevolkingsgroei, vergrijzing etc.).



Beschouwing en conclusie

In de periode 2007-2019 was er een verhoogd sterfterisico bij hoge en lage temperaturen in de gehele populatie van de gemeente Amsterdam. De sterfterisico's bij hoge temperaturen waren groter onder ouderen, bewoners van buurten met een laag-normale buurt SES en bewoners van buurten met laag-normaal buurt publiek groen, maar niet onder bewoners van buurten met laag-normaal buurt boomkronen. Er zijn geen duidelijke verschillen in sterfterisico's bij lage temperaturen tussen de verschillende populaties.

De KNMI'23 klimaatscenario's laten duidelijk zien dat de dagelijkse gemiddelde temperatuur zal toenemen in de komende jaren. Ook blijkt uit prognoses dat het aantal 75+ jarigen - een groep die extra kwetsbaar is voor hoge temperaturen - bijna zal verdubbelen in aantal in Amsterdam in 2050. Op basis van de KNMI'23 klimaatscenario's en de populatie- en sterfteprognoses wordt geschat dat de jaarlijkse warmte-gerelateerde sterfte zal toenemen van 110 in 2007-2019 naar 215 - 300 in 2050 en naar 215 - 680 in 2100, afhankelijk van het klimaatscenario. De geschatte koude-gerelateerde sterfte zal ondanks de warmere temperaturen mogelijk iets toenemen in 2050 en alleen in het Hoge uitstoot scenario van 2100 afnemen. We benadrukken dat voor het schatten van de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2050 en 2100 geen rekening is gehouden met mogelijke adaptatie/acclimatisatie effecten. Door het nemen van adaptatiemaatregelen tegen de hitte kunnen de sterfterisico's bij hoge temperaturen mogelijk worden verminderd waardoor de warmte-gerelateerde sterfte kan afnemen.

Temperatuur-gerelateerde sterfte kan worden veroorzaakt door directe en indirecte effecten van blootstelling aan hoge en lage temperaturen. Directe effecten worden veroorzaakt door directe blootstelling aan hoge of lage temperaturen. Blootstelling aan extreem hoge temperaturen kan bijvoorbeeld leiden tot extra belasting op thermo-regulerende processen van het menselijk lichaam (3); en in ernstige gevallen kan dat leiden tot vervroegde sterfte (4). Indirecte effecten worden niet veroorzaakt door directe blootstelling aan hoge of lage temperaturen, maar onder andere door veranderingen in ons gedrag op warme en koude dagen. Bijvoorbeeld doordat mensen op koude dagen meer tijd binnen (in slecht geventileerde ruimtes) spenderen, wat kan leiden tot verhoogde circulatie van pathogenen en griep. Of dit zal afnemen met warmer wordende winters is lastig te bepalen omdat het afhankelijk is van ontwikkelingen van ons gedrag en van pathogenen en infecties (14).

Beperkingen van deze studie

Deze studie heeft een aantal beperkingen. De dagelijkse gemiddelde temperatuur gemeten op KNMI meetstation Lijnden-NH is gebruikt voor alle analyses en verschillen in temperatuur tussen buurten zijn niet meegenomen. Het was niet mogelijk om populaties in meerdere groepen onder te verdelen vanwege beperkingen in statistische kracht van de analyses. Verschillen in sterfterisico's tussen buurten die verschillen op basis van een indicator, kan impliceren dat deze indicator een effect heeft op de hitte-gevoeligheid van de bewoners van die buurt. We kunnen echter niet uitsluiten dat er mogelijk andere factoren zijn die sterfterisico's tussen buurten beïnvloeden. De modellen includeren indicatoren voor seizoen en lange-termijn trends en dag-van-de-week om te corrigeren voor temporele effecten die de relatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte mogelijk kunnen verstoren. Of het

meenemen van (en de specificatie van) deze indicatoren voldoende is om versturende effecten uit te sluiten hebben we niet kunnen verifiëren. Dit kan mogelijk hebben geleid tot een onder- of overschatting van de temperatuur-sterfte relatie. We hebben de relatie met algehele sterfte (alle oorzaken) onderzocht, er is geen onderscheid gemaakt naar oorzaak-specifieke sterfte of andere gezondheidspunten, zoals spoedeisend hulp opnames of huisarts bezoeken. Bevolkingsprognoses voor het jaar 2055 zijn gebruikt in de analyses voor het schatten van de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2100; prognoses voor jaren later dan 2055 waren niet beschikbaar. Dit leidt tot mogelijk een onder- of overschatting van de temperatuur-gerelateerde sterfte in de scenario's voor 2100.

Referenties

1. Bessembinder J, Bintanja R, Van Dorland R, Homan C, Overbeek B, Selten F, et al. KNMI'23 klimaat scenario's voor Nederland. De Bilt: KNMI; 2023.
2. EMA. European Climate Risk Assessment Report. 2024.
3. GGD. Achtergrondinformatie "Thermoregulatie" behorend bij GGD richtlijn Medische Milieukunde: Hitte en Gezondheid. 2023.
4. Åström DO, Bertil F, Joacim R. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. *Maturitas*. 2011;69(2):99–105.
5. Klompmaker J, Hagens W. Evaluatie Nationaal Hitteplan. De relatie tussen temperatuur en sterfte. 2025.
6. Folkerts MA, Bröde P, Botzen WW, Martinius ML, Gerrett N, Harmsen CN, et al. Sex differences in temperature-related all-cause mortality in the Netherlands. *International archives of occupational and environmental health*. 2022;95(1):249–58.
7. Staatsen B, Hall E, Strak M, Betgen C, Limaheluw J, Mulder Y, et al. Naar een gezonde leefomgeving in een veranderend klimaat. Themaverkenning bij de Volksgezondheid Toekomst Verkenning 2024. 2024.
8. Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm. *Journal of statistical software*. 2011;43(8):1.
9. Millyard A, Layden JD, Pyne DB, Edwards AM, Bloxham SR. Impairments to thermoregulation in the elderly during heat exposure events. *Gerontology and Geriatric Medicine*. 2020;6:2333721420932432.
10. VZinfo.nl. Sociaaleconomische gezondheidsverschillen 2025 [Available from: <https://www.vzinfo.nl/sociaaleconomische-gezondheidsverschillen/overzicht-per-onderwerp/ziekten-aandoeningen>].
11. Pascal M, Gorla S, Wagner V, Sabastia M, Guillet A, Cordeau E, et al. Greening is a promising but likely insufficient adaptation strategy to limit the health impacts of extreme heat. *Environment international*. 2021;151:106441.
12. Murage P, Kovats S, Sarran C, Taylor J, McInnes R, Hajat S. What individual and neighbourhood-level factors increase the risk of heat-related mortality? A case-crossover study of over 185,000 deaths in London using high-resolution climate datasets. *Environment international*. 2020;134:105292.

13. Pascal M, Gorla S, Forceville G, Stempfelet M, Host S, Hough I, et al. Analyzing effect modifiers of the temperature-mortality relationship in the Paris region to identify social and environmental levers for more effective adaptation to heat. *Health & Place*. 2024;89:103325.
14. Arbuthnott K, Hajat S, Heaviside C, Vardoulakis S. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments. *Environment international*. 2018;121:119–29.
15. Gasparrini A, Vicedo-Cabrera AM, Tobias A. The Multi-Country Multi-City Collaborative Research Network: An international research consortium investigating environment, climate, and health. *Environmental Epidemiology*. 2024;8(5):e339.
16. Guo Y, Gasparrini A, Armstrong BG, Tawatsupa B, Tobias A, Lavigne E, et al. Heat wave and mortality: a multicountry, multicomunity study. *Environmental health perspectives*. 2017;125(8):087006.
17. Vicedo-Cabrera AM, Scovronick N, Sera F, Royé D, Schneider R, Tobias A, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature climate change*. 2021;11(6):492–500.
18. Zhao Q, Li S, Ye T, Wu Y, Gasparrini A, Tong S, et al. Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: A three-stage modelling study. *PLoS medicine*. 2024;21(5):e1004364.
19. Vicedo-Cabrera AM, Sera F, Gasparrini A. Hands-on tutorial on a modeling framework for projections of climate change impacts on health. *Epidemiology*. 2019;30(3):321–9.

Bijlage

Statistische analyse

Uit eerdere analyses is gebleken dat de relatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte in Nederland is veranderd na 2006 (5). Daarom is besloten analyses uit te voeren voor de periode 2007-2019. Om de temperatuur-sterfte relatie te evalueren hebben we gebruikt gemaakt van tijdserie analyses (quasi-Poisson regressie modellen). Deze modellen worden veelgebruikt binnen het internationale Multi-Country multi-City (MCC) netwerk (15), waar ook het RIVM bij aangesloten is, en is in meerdere gepeerreviewede artikelen beschreven (16-18). De specificatie van de variabelen in de modellen hebben we zoveel mogelijk overeen laten komen met andere (MCC) studies. Voor het evalueren van de temperatuur-sterfte relatie hebben we gebruik gemaakt van *distributed lag nonlinear models* (dlnm) om mogelijke niet-lineaire en vertraagde (de zogenaamde *lag* effecten, de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur een of meerdere dagen eerder) verbanden mee te nemen (8). Om mogelijke niet-lineaire verbanden te evalueren voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur hebben we gebruikt gemaakt van een *natural cubic spline* met 3 knopen (*knots*) geplaatste op het 10, 75 en 90 percentiel van de periode-specifieke dagelijkse gemiddelde temperatuur verdeling. Voor de mogelijke vertraagde relatie tussen de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte hebben we een *natural cubic spline* met 3 interne knopen op de log schaal en een intercept gebruikt om een verband te schatten over maximaal 21 dagen. Blootstelling-lag-response curves (3D plot met de temperatuur, het vertraagde effect en het sterfterisico) zijn geschat en vervolgens gecumuleerd om blootstelling-response curves (2D plot met de temperatuur en de som van de lag-specifieke sterfterisico's) te plotten. Om te corrigeren

voor seizoen en lange-termijn trends hebben we een indicator voor de datum gebruikt met 8 vrijheidsgraden per jaar. Om te corrigeren voor dag van de week hebben we categorische indicator voor de dag van de week gebruikt.

Analyses zijn uitgevoerd voor de gehele populatie en separaat voor de verschillende leeftijdsgroepen, buurt SES, buurt boomkronen en buurt publiek groen. Aan de hand van de modelresultaten zijn relatieve risico's berekend, deze risico's geven het mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteit temperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen). Voor de analyses per leeftijdsgroep, buurt SES, buurt boomkronen en buurt publiek groen is de minimum mortaliteit temperatuur gelijkgesteld aan de minimum mortaliteit temperatuur van de gehele populatie.

Om de jaarlijkse temperatuur-gerelateerde sterfte te schatten in huidige en toekomstige klimaatscenario's hebben we gebruikt gemaakt van een methode die is ontwikkeld binnen het MCC netwerk en elders in detail is beschreven (19). De temperatuur-gerelateerde sterfte aantallen zijn uitgesplitst in warmte- en koude-gerelateerde sterfte. Warmte-gerelateerde sterfte zijn de temperatuur-gerelateerde sterfgevallen op dagen met een temperatuur boven de minimum mortaliteit temperatuur; koude-gerelateerde sterfte zijn de temperatuur-gerelateerde sterfgevallen op dagen met een temperatuur onder de minimum mortaliteit temperatuur. De leeftijdsspecifieke blootstelling-response relaties tussen de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte zijn gebruikt voor het schatten van de temperatuur-gerelateerde sterfte in de KNMI'23 klimaatscenario's. Ook zijn de demografische prognoses over de sterfte in de verschillende leeftijdsgroepen (0-74, 75+ jaar) in de gemeente Amsterdam gebruikt. In deze analyses is geen rekening gehouden met mogelijke adaptatie/acclimatisatie effecten, zoals gewenning aan hitte en een toename van hitte werende maatregelen.

Temporele veranderingen in temperatuur-sterfte relaties

In de periode 2007-2019 zijn zowel hogere als lagere dagelijkse gemiddelde temperaturen gemeten dan in de periode 2000-2006; gedurende 2007-2019 was de hoogste dagelijkse gemiddelde temperatuur 29.5°C en de laagste dagelijkse gemiddelde temperatuur -11.5°C, terwijl dit voor de periode 2000-2006 respectievelijk 26.7°C en -6.1°C was. Het is daarom lastig om de blootstelling-response curves te vergelijken bij extreem hoge en lage temperaturen. Op basis van de extrapolatie van de blootstelling-response curve van 2000-2006 naar de hogere temperaturen gemeten in 2007-2019 lijken de risico's hoger te zijn in 2007-2019 dan in 2000-2006 (Figuur B1). De extrapolatie naar hogere temperaturen is echter onzeker en afhankelijk van statistische methodes en aannames. Een *natural cubic spline* - die is gebruikt voor het modelleren van de blootstelling-respons curves - forceert een lineaire relatie aan het begin en het einde van de periode-specifieke temperatuur verdeling; de extrapolatie van de blootstelling-respons curve naar temperaturen hoger en lager dan de gemeten temperaturen in de periode is daardoor ook lineair. Daarnaast is de statistische power beperkt in de periode 2000-2006 door de kortere studieperiode en kleinere studiepopulatie. Met andere woorden, het is lastig om tussen beide periodes de sterfterisico's bij hoge temperaturen te vergelijken door de verschillen in

gemeten temperaturen, beperkte statistische power en onzekerheden in extrapolaties van de blootstelling-response curves.

Figuur B1. De (cumulatieve) blootstelling-response curves voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur en sterfte in de gehele populatie van de gemeente Amsterdam in de periode 2007-2019 (links) en de periode 2000-2006 (rechts). Omdat er zowel hogere als lagere temperaturen zijn gemeten in de periode 2007-2019, is de blootstelling-response curve voor deze temperaturen in de periode 2000-2006 geëxtrapoleerd (gestippelde rode lijn).

