



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

Evaluatie Nationaal Hitteplan

De relatie tussen temperatuur en sterfte

Evaluatie Nationaal Hitteplan – de relatie tussen temperatuur en sterfte

RIVM-rapport 2025-0059

Colofon

© RIVM 2025

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2025-0059

J. Klompmaker (auteur), RIVM
W. Hagens (auteur), RIVM

Contact:

J Klompmaker

Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid\Milieukwaliteit en Gezondheid
Jochem.klompmaker@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport in het kader van project Evaluatie Nationaal Hitteplan V200320.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Evaluatie Nationaal Hitteplan – de relatie tussen temperatuur en sterfte

Het Nationaal Hitteplan is een waarschuwingssysteem om vooral kwetsbare groepen, zoals jonge kinderen, zieken en ouderen, te beschermen tegen hitte. Zij kunnen door hitte sneller gezondheidsproblemen krijgen. Het hitteplan wordt geactiveerd als in Nederland meerdere dagen achter elkaar hoge temperaturen worden verwacht. Organisaties, (zorg)professionals en mantelzorgers kunnen daar dan rekening mee houden.

In 2010 is het Nationaal Hitteplan voor het eerst geactiveerd. Het RIVM onderzocht de relatie tussen hoge temperaturen en het aantal sterfgevallen in Nederland vóór (2000-2009) en na de eerste activatie (2010-2019). Daaruit blijkt dat de kans om door hitte te sterven na 2010 kleiner is geworden. Dit kan door het hitteplan komen, maar ook andere factoren kunnen invloed hebben gehad. Zo was er veel (media) aandacht voor de hittegolven in 2003 en 2006, die een van de langste en meest intense in Nederland waren. Het kan zijn dat mensen en organisaties zich sindsdien bewuster zijn van de gevaren van hitte. Dit maakt het lastig om de invloed van het Nationaal Hitteplan te bepalen.

De kans om te sterven door hitte nam vooral af onder ouderen, vrouwen en bewoners van buurten waar veel mensen met een lager inkomen wonen. Onder mensen boven de 90 jaar daalde de kans om te sterven door hitte, maar bleef het geschatte aantal doden onder hen in beide perioden hetzelfde. Dat komt omdat er door de vergrijzing meer mensen van deze leeftijd zijn.

Maatregelen om gezondheidsproblemen door hitte te verminderen blijven noodzakelijk, zeker omdat er door de vergrijzing steeds meer hele oude mensen zullen zijn. Ook verwacht het KNMI dat er in de toekomst meer hete dagen zullen zijn.

Kernwoorden: Nationaal Hitteplan, sterfte, temperatuur, hitte, ouderen, tijdserie analyse, epidemiologie

Synopsis

Evaluation National Heat Plan – the relationship between temperature and mortality

The National Heatwave Plan is a warning system that aims to protect vulnerable groups, such as young children, people who are ill and the elderly, against the effects of heat. These people have a higher risk of getting health problems as a result of the heat. The Heatwave Plan is activated when high temperatures are forecast for consecutive days in the Netherlands. This allows organisations, care and other professionals, and informal carers to take action.

The National Heatwave Plan was first activated in 2010. The National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has looked into the relationship between high temperatures and the number of deaths in the Netherlands before (2000–2009) and after the plan was first activated (2010–2019). This revealed that the risk of dying from heat has decreased after 2010. This might be due to the Heatwave Plan, but other factors may have played a role as well. For example, considerable attention was paid to the heatwaves in 2003 and 2006, including by the media. These were among the longest and most intense heatwaves recorded in the Netherlands. It is possible that this caused people and organisations to become more aware of the dangers posed by heat. This makes it difficult to assess the effect of the National Heatwave Plan.

The risk of dying from heat mainly decreased among the elderly, women and people living in low-income neighbourhoods. Among people over the age of 90 the risk of dying decreased, but the estimated number of deaths remained the same in both periods. This was due to the increase in the number of people in that age group, as a result of population ageing.

Measures to reduce health problems caused by heat remain necessary, especially since population ageing is causing a rise in the number of very old people. In addition, the Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) expects the number of hot days to increase in the years to come.

Keywords: National Heatwave Plan, mortality, temperature, heat, elderly people, time series analysis, epidemiology

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

1.1 Opzet — 11

2 Data — 13

2.1 Sterfte — 13

2.2 Temperatuur — 13

2.3 Andere indicatoren — 13

3 Statistische analyse — 15

4 Resultaten en Duiding — 17

4.1 Temperatuur en sterfte — 17

4.2 Temperatuur-sterfte risico's — 18

4.3 Sterfte gerelateerd aan hoge temperaturen — 22

5 Beschouwing en discussie — 25

5.1 Belangrijkste bevindingen — 25

5.2 Vergelijking met (inter)nationale literatuur — 25

5.3 Beperking van deze studie — 26

6 Conclusie — 29

Dankbetuiging — 31

Literatuur — 33

Afkortingenlijst — 37

Bijlage 1 Methode — 39

Bijlage 2 Onderzoek naar verschillen in sterftecijfers in perioden met hoge temperaturen — 42

Bijlage 3 Tabellen en Figuren — 44

Samenvatting

De extreme hittegolven in de zomer van 2003 en 2006 leidden tot de ontwikkeling van hitteplannen in Europa voor preventie van de impact van hitte op de volksgezondheid. In Nederland is in 2007 het Nationaal Hitteplan opgesteld in samenwerking tussen het ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) en een aantal andere organisaties. Het Nationaal Hitteplan is een waarschuwingssysteem en wordt geactiveerd als er een periode van aanhoudende hoge temperaturen wordt verwacht. In 2010 is het Nationaal Hitteplan voor het eerst geactiveerd. Het RIVM heeft het Nationaal Hitteplan geëvalueerd in opdracht van het ministerie van VWS. Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de impact van het Nationaal Hitteplan op de relatie tussen temperatuur en sterfte.

Het doel van deze studie is om te evalueren of het Nationaal Hitteplan effect had op de relatie tussen hoge temperaturen en sterfte in Nederland. Op basis van ervaringen en kennis uit wetenschappelijke literatuur is besloten om onderzoek te doen naar veranderingen in de blootstelling-responsrelatie tussen temperatuur en sterfte vóór (2000-2009) en na (2010-2019) de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan.

Data over de dagelijkse sterfte (alle oorzaken) in heel Nederland voor de periode 2000 tot en met 2019 zijn verkregen in de afgeschermdde omgeving van het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS). Data over de dagelijkse temperatuur zijn verkregen bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Zij hebben de dagelijkse maximale Centraal Nederland Temperatuur (CNT) berekend aan de hand van de temperatuur die is gemeten op 23 KNMI-stations in Nederland.

Om de blootstelling-responsrelatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte te onderzoeken, hebben we gebruikgemaakt van tijdserie-analyses (Poisson regressiemodellen). We hebben gebruikgemaakt van een methode om mogelijke niet-lineaire en vertraagde (de zogenoemde lag-effecten, de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur van een of meerdere dagen eerder) -verbanden mee te nemen. In de modellen is gecorrigeerd voor langetermijn- en seizoentrends en dag van de week. De analyses zijn apart uitgevoerd voor de periode 2000-2009 en 2010-2019. Ook zijn er schattingen gemaakt van de sterfte gerelateerd aan hoge temperaturen voor 2000-2009 en 2010-2019.

Uit de analyses blijkt dat er een verhoogd sterfterisico was bij hoge temperaturen. De sterfterisico's bij hoge temperaturen in 2010-2019 zijn lager dan in 2000-2009, met name bij ouderen, vrouwen en bewoners van buurten met een lage sociaaleconomische status. De totale omvang van de geschatte hitte-gerelateerde sterfte is ook lager in 2010-2019 dan in 2000-2009. Het geschatte aantal sterfgevallen gerelateerd aan potentiële hitteplandagen ligt rond de 4.200 in 2000-2009 en rond de 2.400 in 2010-2019. Onder de 90+-jarigen is, door de vergrijzing, de omvang van de geschatte hitte-gerelateerde sterfte

niet/beperkt veranderd. Uit analyses per 5-jaars periode blijkt dat de lagere sterfterisico's bij hoge temperaturen al zijn waargenomen in de periode 2007-2011; deels voor de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan.

De afname van de sterfterisico's bij hoge temperaturen in de tijd is door meerdere factoren te verklaren. De publicatie en eerste activatie van het hitteplan speelde mogelijk een rol in de afname van de sterfterisico's, maar ook andere factoren kunnen invloed hebben gehad. Het is lastig om het effect van het Nationaal Hitteplan van andere factoren te onderscheiden. Zo waren de hittegolven in 2003 en 2006 de langste en meest intense hittegolven in Nederland. Dat leidde tot veel (media) aandacht, waardoor mensen en instanties mogelijk bewuster werden van de risico's van hitte.

Ondanks de lagere sterfterisico's in 2010-2019 ten opzichte van 2000-2009, is er tijdens warme dagen nog steeds een verhoogd sterfterisico in Nederland. Daarnaast zullen de zomertemperaturen volgens de KNMI'23-klimaatsscenario's voorlopig verder stijgen. Daarom blijft aandacht voor maatregelen om de sterfte en ziektelast door hitte te verminderen noodzakelijk.

1 Inleiding

Hitte is volgens het Europees Milieuagentschap (EMA 2024) een van de meest ernstige en urgente klimaat-gerelateerde risicofactoren voor de menselijke gezondheid. Blootstelling aan hoge temperaturen kan leiden tot extra belasting op thermo-regulerende processen van het menselijk lichaam (RIVM 2023). Als de hittebelasting te hoog is, kan dat in ernstige gevallen leiden tot ziekenhuisopnames en sterfte (Åström, Bertil, and Joacim 2011). De extreme hittegolven in Europa in de zomer van 2003 en 2006 leidden tot de ontwikkeling van hitteplannen in Europa voor preventie van de impact van hitte op de volksgezondheid (Dwyer et al. 2022).

In Nederland is in 2007 het Nationaal Hitteplan opgesteld in samenwerking tussen het ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), het Nederlandse Rode Kruis, Gemeentelijke Gezondheidsdienst Geneeskundige Hulpverleningsorganisatie in de Regio (GGD GHOR) Nederland en enkele brancheorganisaties in de zorg. Het Nationaal Hitteplan is een waarschuwingssysteem dat het RIVM beheert (RIVM 2024). Het RIVM waarschuwt landelijke organisaties in de zorg op verschillende momenten tijdens warme periodes. Het Nationaal Hitteplan wordt geactiveerd als er een periode van aanhoudende hoge temperaturen (vier of meer aangesloten dagen met een dagelijkse maximale temperatuur van $\geq 27^{\circ}\text{C}$) wordt verwacht. Niet alleen de temperatuur overdag speelt een rol bij de activatie, ook de nachttemperatuur en de luchtvochtigheid worden meegenomen. Het Nationaal Hitteplan is voor de eerste keer in 2010 geactiveerd.

Het RIVM heeft in opdracht van het ministerie van VWS het Nationaal Hitteplan geëvalueerd. De evaluatie van het Nationaal Hitteplan bestaat uit de volgende onderdelen:

- Gedrag en perceptie
- Relatie tussen temperatuur en sterfte
- Communicatieboodschap
- Code rood-scenario

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de mogelijke impact van het Nationaal Hitteplan op de relatie tussen temperatuur en sterfte.

1.1 Opzet

Het doel van dit onderzoek is om te evalueren of het Nationaal Hitteplan effect had op de relatie tussen hoge temperaturen en sterfte in Nederland. Het Nationaal Hitteplan is in de periode 2010-2024 in totaal 17 keer geactiveerd. Dit betekent dat er voor een beperkt aantal dagen gekeken kan worden of het geobserveerde aantal sterfgevallen overeenkomt met het verwachte aantal sterfgevallen. Statistische analyses die zich richten op het verschil in sterfterisico op hitteplandagen hebben daarom een zeer beperkte statistische zeggingskracht (power). Op basis van ervaringen en kennis uit

wetenschappelijke literatuur is daarom besloten onderzoek te doen naar veranderingen in de blootstelling-responsrelatie tussen temperatuur en sterfte vóór (2000-2009) en na (2010-2019) de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan.

2 Data

2.1 Sterfte

Data over de dagelijkse sterfte (alle oorzaken) voor de periode 2000 tot en met 2019 is verkregen in de afgeschermdde omgeving van het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS). Dit zijn data over alle inwoners van Nederland.¹ Op basis van deze data hebben we de dagelijkse sterfte bepaald voor verschillende leeftijdsklassen, geslacht, (een indicator van de) sociaaleconomische status (SES) van de buurt en stedelijkheid. Er is besloten om geen data na 2019 mee te nemen in dit onderzoek in verband met de start van de COVID-19-pandemie in 2020 (de verhoogde sterftecijfers tijdens de COVID-19-pandemie kunnen een verstorend effect hebben in de analyses). Meer informatie over de data staat in de bijlage (Methode-Sterfte en populatie).

De gegevens over sterfte en over de demografische en sociaaleconomische factoren zijn geanonimiseerd voor het RIVM beschikbaar gesteld binnen een afgeschermdde omgeving van het CBS. De koppeling met de persoonsgegevens is zodanig uitgevoerd dat het RIVM personen niet kan herleiden.

2.2 Temperatuur

Data over de dagelijkse temperatuur is verkregen bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Zij hebben de dagelijkse maximale Centraal Nederland Temperatuur (CNT, (Van Ulden, van Oldenborgh, and Van der Schrier 2009)) berekend aan de hand van de op 23 KNMI-stations in Nederland gemeten temperatuur. De CNT is een temperatuur representatief voor een groot gebied in midden-Nederland. KNMI-stations aan de kust en in het uiterste noorden en zuiden van Nederland blijken minder representatief voor de temperatuur in het midden van het land. Daarom zijn deze buiten beschouwing gelaten. Meer informatie over de CNT staat elders.²

2.3 Andere indicatoren

Er zijn data verzameld over dagelijkse luchtvochtigheid, pollen en luchtverontreiniging om te corrigeren voor mogelijke versturende effecten van deze indicatoren. Data over dagelijkse luchtvochtigheid is gebaseerd op metingen op het KNMI-meetstation in De Bilt. Data over dagelijkse pollenconcentraties zijn gebaseerd op metingen in Leiden (Leiden Universitair Medisch Centrum) en Helmond (Elkerliek ziekenhuis). De Poaceae (grassen), Rumex (zuring) en Artemisia (bijvoet) concentraties zijn meegenomen, omdat hun bloeiperiode grotendeels overlapt met de zomerperiode. Voor deze pollen hebben we op basis van deze twee meetstations de gemiddelde dagelijkse concentraties berekend. Voor luchtverontreiniging hebben we de op achtergrondstations van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) in Nederland gemeten gemiddelde dagelijkse concentraties fijnstof (PM10),

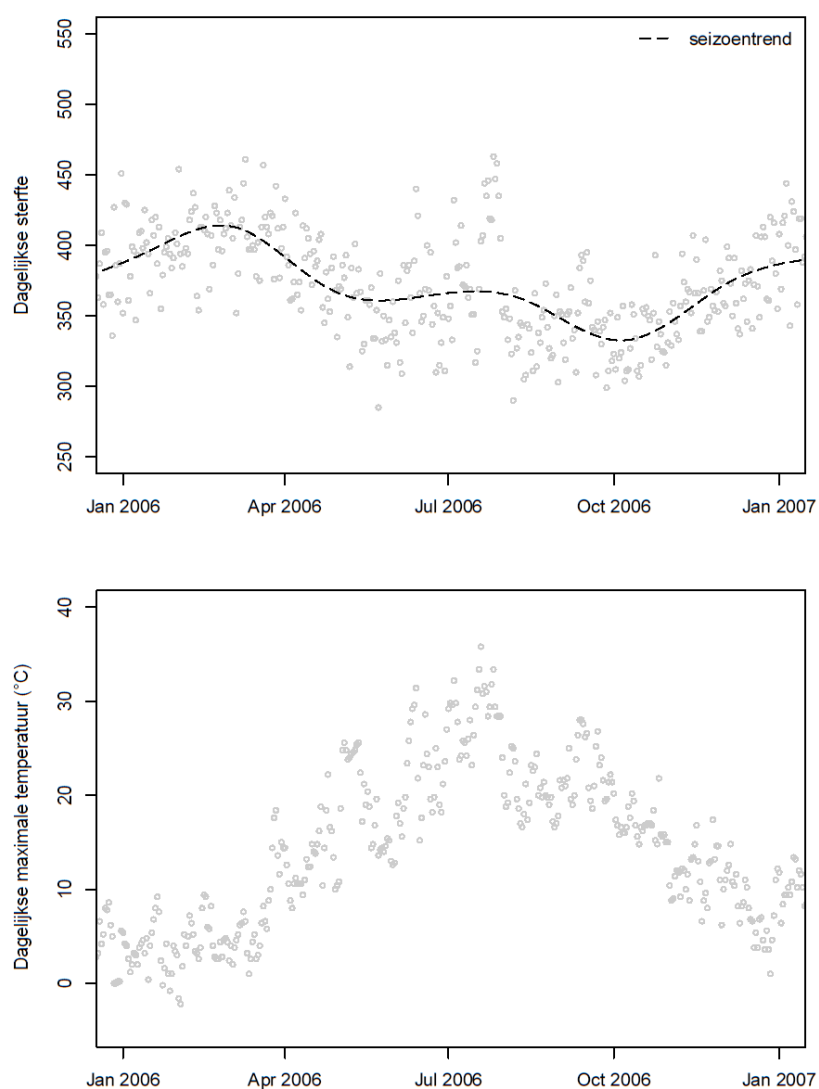
¹ Sterftedata voor 17 juli 2014 zijn niet meegenomen in de analyses i.v.m. het neerstorten van vlucht MH17 van Malaysia Airlines.

² <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/centraal-nederland-temperatuur-cnt>

stikstofdioxide (NO₂) en ozon (O₃) berekend. De data zijn voor het onderzoek in de afgeschermd CBS omgeving gebracht.

Data over dagelijkse sterfte, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, pollen en luchtverontreiniging zijn gelinkt en gebruikt voor het onderzoek. Figuur 1 geeft een visuele weergave van de dagelijkse sterfte en de dagelijkse maximale temperatuur in 2006.

Figuur 1 De dagelijkse sterfte (boven) en de dagelijkse maximale temperatuur (onder) in 2006. De stippellijn geeft de gemodelleerde seizoentrend weer. De dagelijkse sterfte wijkt duidelijk af van de seizoentrend tijdens de periode met hoge dagelijkse maximale temperaturen in juli 2006.



3 Statistische analyse

Om de blootstelling-responsrelatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte te onderzoeken, hebben we gebruikgemaakt van tijdserie-analyses (Poisson regressiemodellen). Deze techniek is veel gebruikt binnen het internationale Multi-Country multi-City- (MCC) Collaborative Research Network (Gasparrini, Vicedo-Cabrera, and Tobias 2024), waarbij ook het RIVM is aangesloten, en is in meerdere ge-peer-reviewede artikelen beschreven (Guo et al. 2017; Vicedo-Cabrera et al. 2021; Zhao et al. 2024). De analyses zijn apart uitgevoerd voor de periode 2000-2009 en 2010-2019 en alleen de maanden mei tot en met september zijn meegenomen. Naast de dagelijkse maximale temperatuur hebben we ook gekeken naar de relatie tussen een “potentiële hitteplandag” en sterfte. Een dag is hierbij gelabeld als een potentiële hitteplandag als de dag viel in een periode van vier of meer aaneengesloten dagen met op iedere dag een maximum temperatuur van 27°C of hoger. Ongeveer 75 procent van de dagen waarop het Nationaal Hitteplan in 2010-2019 was geactiveerd, waren daadwerkelijk gelabeld als potentiële hitteplandag. Dit verschil komt onder andere doordat het Nationaal Hitteplan actief wordt op basis van temperatuurverwachtingen, terwijl we in deze analyses gebruik hebben gemaakt van temperatuurmetingen.

Om de blootstelling-responsrelatie te schatten, hebben we gebruikgemaakt van een methode om mogelijke niet-lineaire en vertraagde (de zogenoemde lag-effecten, de sterfte op een dag gerelateerd aan de temperatuur een of meerdere dagen eerder) -verbanden mee te nemen. In de modellen is gecorrigeerd voor langetermijn- en seizoentrends en dag van de week. Analyses zijn separaat uitgevoerd voor sterfte per leeftijdsklasse, geslacht, buurt SES en stedelijkheid. Aan de hand van de modelresultaten zijn attributieve sterfterisico's berekend. Deze risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteit temperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen). Op basis van de blootstelling-responsrelaties is de sterfte gerelateerd aan hoge temperaturen (extra sterfte op dagen met een dagelijkse maximale temperatuur $\geq 28.9^{\circ}\text{C}$ (95 percentiel van de mei-september 2010-2019 temperatuurverdeling)) en sterfte gerelateerd aan potentiële hitteplandagen geschat voor 2000-2009 en 2010-2019. Ook is de sterfte gerelateerd aan hoge temperaturen geschat voor een hypothetisch- (counterfactual) scenario waarin wordt aangenomen dat de blootstelling-responsrelatie niet veranderd zou zijn tussen 2000-2009 en 2010-2019.

Om beter inzicht te krijgen in temporele verandering van de blootstelling-responsrelatie, is de relatie ook geschat voor de perioden 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014 en 2015-2019, en voor de periode 2002-2006 (vóór de publicatie van het Nationaal Hitteplan) en 2007-2011 (na de publicatie van het Nationaal Hitteplan). Er zijn verschillende sensitiviteit analyses uitgevoerd. Meer informatie over de analyses is te vinden in de bijlage (Methode-Statistische analyse).

4 Resultaten en Duiding

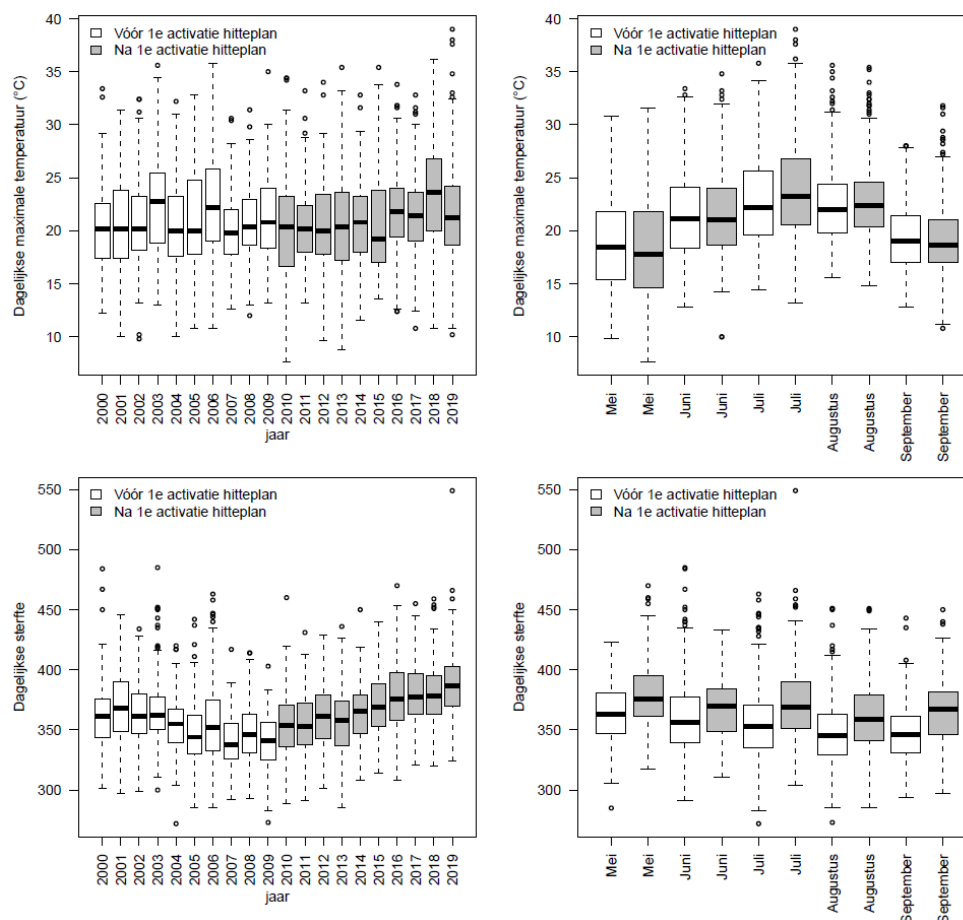
4.1 Temperatuur en sterfte

De gemiddelde dagelijkse sterfte was hoger in de periode mei-september van 2010-2019 dan in 2000-2009 (Tabel 1). Met name onder de 85-89 en 90+-jarigen nam de sterfte toe. De gemiddelde dagelijkse maximale temperatuur in mei-september is vergelijkbaar in beide periodes en de hoogste temperaturen werden gemeten in juli (Figuur 2). Het aantal dagen waarop de dagelijkse maximale temperatuur voor vier of meer aangesloten dagen boven de 27°C kwam, was iets hoger in 2010-2019 dan in 2000-2009. De dagelijkse maximale temperatuur was positief gecorreleerd met luchtverontreiniging en pollen, en zwak negatief gecorreleerd met relatieve luchtvochtigheid in beide perioden (Figuur B1). De concentratie fijnstof, stikstofdioxide, ozon, relatieve luchtvochtigheid en dagen met hoge pollenconcentraties was lager in 2010-2019 dan in 2000-2009 (Tabel B1).

Tabel 1 Beschrijvende statistiek van de temperatuur en sterfte in Nederland in de periode (mei-september) 2000-2009 en 2010-2019. De gemiddelde en standaard deviatie (gem (sd)) of het aantal en percentage (n(%)) zijn weergegeven.

	2000-2009 gem (sd)/n(%)	2010-2019 gem (sd)/n(%)
Dagelijkse maximale temperatuur (°C), gem (sd)	21.0 (4.3)	21.2 (4.7)
Aantal potentiële hitteplan dagen, n(%)	56 (3.7)	65 (4.2)
Dagelijkse sterfte, gem (sd)	354.9 (28.9)	368.8 (28.8)
Dagelijkse sterfte per leeftijdscategorie, gem (sd)		
0-64 jaar	70.6 (9.3)	61.8 (9.4)
65-74 jaar	64.4 (9.6)	67.2 (9.6)
75-79 jaar	51.9 (8.5)	46.7 (7.3)
80-84 jaar	62.1 (9.1)	61.1 (8.5)
85-89 jaar	57.3 (8.9)	66.0 (9.5)
90+ jaar	48.6 (8.0)	65.9 (11.1)
Dagelijkse sterfte per geslacht, gem (sd)		
mannen	172.2 (16.5)	179.3 (17.2)
vrouwen	182.7 (18.2)	189.5 (17.5)
Dagelijkse sterfte per buurt SES, gem (sd)		
Lage SES	100.6 (22.7)	109.7 (13.9)
Gemiddelde SES	131.1 (18.2)	130.7 (18.8)
Hoge SES	123.3 (13.0)	128.5 (14.0)
Dagelijkse sterfte per stedelijkheids categorie, gem (sd)		
niet stedelijk	63.5 (9.3)	57.4 (8.1)
weinig stedelijk	67.4 (9.3)	65.4 (9.0)
matig stedelijk	64.6 (9.0)	70.3 (9.0)
sterk stedelijk	88.1 (10.4)	100.4 (11.9)
zeer sterk stedelijk	71.3 (9.9)	75.2 (11.7)

Figuur 2 Boxplots van de dagelijkse maximale temperatuur en de dagelijkse sterfte in Nederland in de periode 2000-2019 voor de maanden mei t/m september. De ondergrens van de box geeft het 25e percentiel aan. De bovengrens van de box geeft het 75e percentiel aan. De horizontale lijn in de box geeft de mediaan aan. De stippellijnen boven en onder de box (whiskers) zijn maximaal 1.5 keer de interkwartielafstand (75e percentiel–25e percentiel), eventuele uitschieters worden weergegeven met de cirkels.



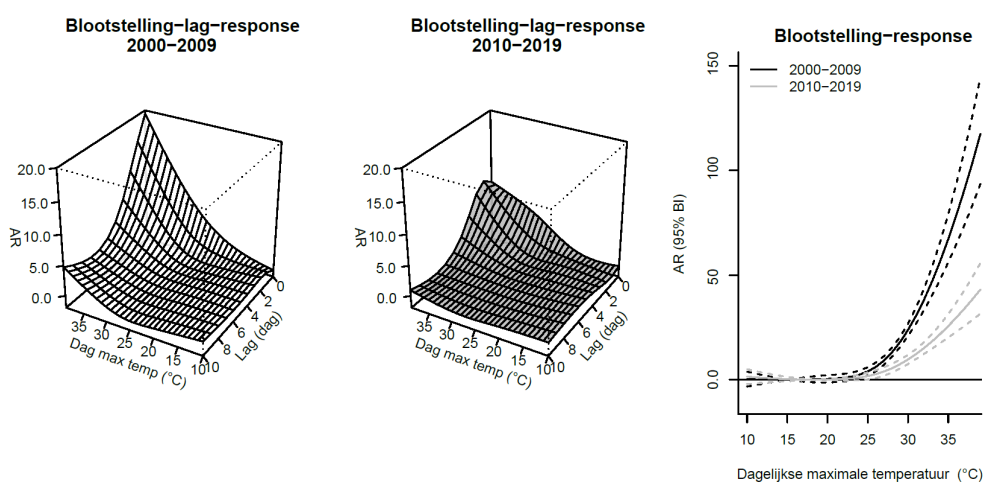
De dag met de meeste sterfgevallen (26 juli 2019) was tijdens de hittegolf van juli 2019; de dagelijkse maximale temperatuur (op basis van 23 KNMI-stations) was op die dag (38.0°C) en de twee dagen daarvoor extreem hoog (37.6°C, 39.0°C). Op 25 juli 2019 werd het nationale hittesterecord verbroken en werden er op meerdere locaties in Nederland temperaturen boven de 40°C gemeten (<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/temperatuur-door-historische-grens-van-40-c>).

4.2 Temperatuur-sterfte risico's

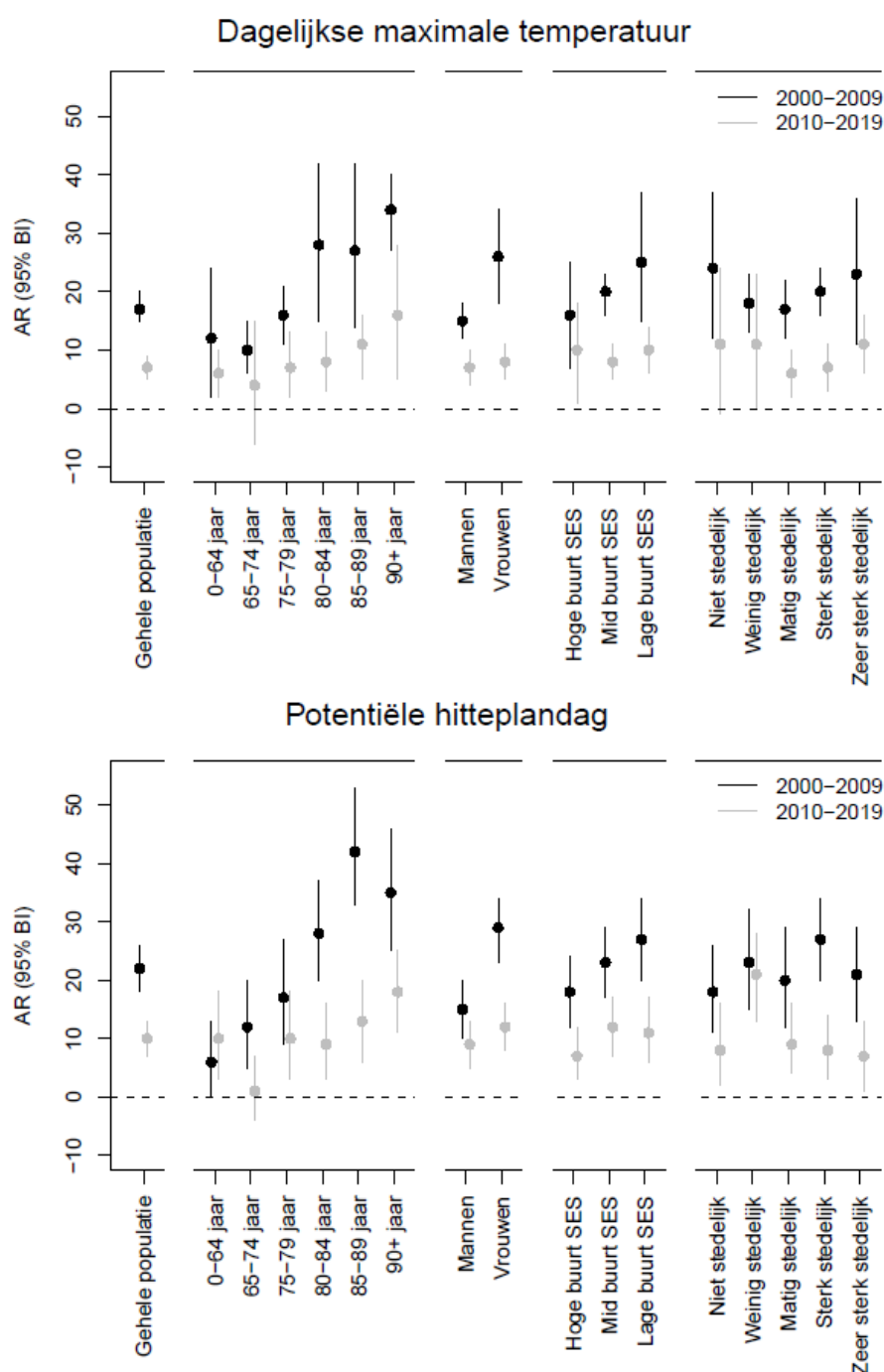
In de periode 2000-2009 en 2010-2019 was er een verhoogd sterfterisico bij hoge temperaturen (Figuur 3). Er is een duidelijk niet-lineair verband. Bij dagelijkse maximale temperaturen <20°C is er geen of een zwakke relatie met sterfte, maar bij hogere temperaturen neemt het sterfterisico toe. Het grootste risico wordt waargenomen bij de hoogste temperaturen op de dag zelf (lag 0) en de dag erna (lag 1). Bij

een maximale dagelijkse temperatuur van 28.9°C (95e percentiel van de dagelijkse maximale temperatuurverdeling in mei-september 2010-2019) is in de gehele populatie het attributieve sterfterisico 17 procent in de periode 2000-2009 en 7 procent in de periode 2010-2019 (ten opzichte van de periode-specifieke minimale mortaliteit temperatuur). Bij hoge dagelijkse maximale temperaturen zijn de sterfterisico's in 2010-2019 lager dan in 2000-2009 in de gehele populatie en in alle subpopulaties die we hebben onderzocht (Figuur 4 en Figuur B2). De sterkste afname in sterfterisico's bij hoge temperaturen zien we onder ouderen, vrouwen en in buurten met een lage SES. Ouderen en inwoners van buurten met een lage SES hebben mogelijk een slechtere gezondheid en kunnen daardoor kwetsbaarder zijn voor hitte, maar ook gevoeliger voor aanpassingen/veranderingen. Opvallend is de sterkere afname van het risico bij vrouwen. We hebben dit niet verder onderzocht. In alle stedelijkheid categorieën nam het sterfterisico af, maar er is geen duidelijk patroon van sterkere/zwakkere afnames bij een toenemende stedelijkheid. De relatie tussen een potentiële hitteplandag en sterfterisico's laat grotendeels hetzelfde beeld zien als tussen de dagelijkse maximale temperatuur en sterfterisico. De relatie is zwakker in 2010-2019 dan in 2000-2009 en de sterkste afname in sterfterisico zien we met name onder ouderen en vrouwen en in buurten met een lage SES. Onder jongeren (0-64-jarigen), waar het sterfterisico al laag was, wordt geen afname van het risico waargenomen.

Figuur 3 De attributieve risico's (AR) tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte in de gehele populatie in de periode 2000-2009 en 2010-2019. De linker en middelste figuur geven de blootstelling-lag-responscurves weer. De relatie tussen de dagelijkse maximale temperatuur op een dag en de sterfte op die dag of enkele dagen (maximaal 10) later. De rechter figuur geeft de cumulatieve blootstelling-responsecurve (de som van de lag-specifieke attributieve risico's) voor beide periodes weer.



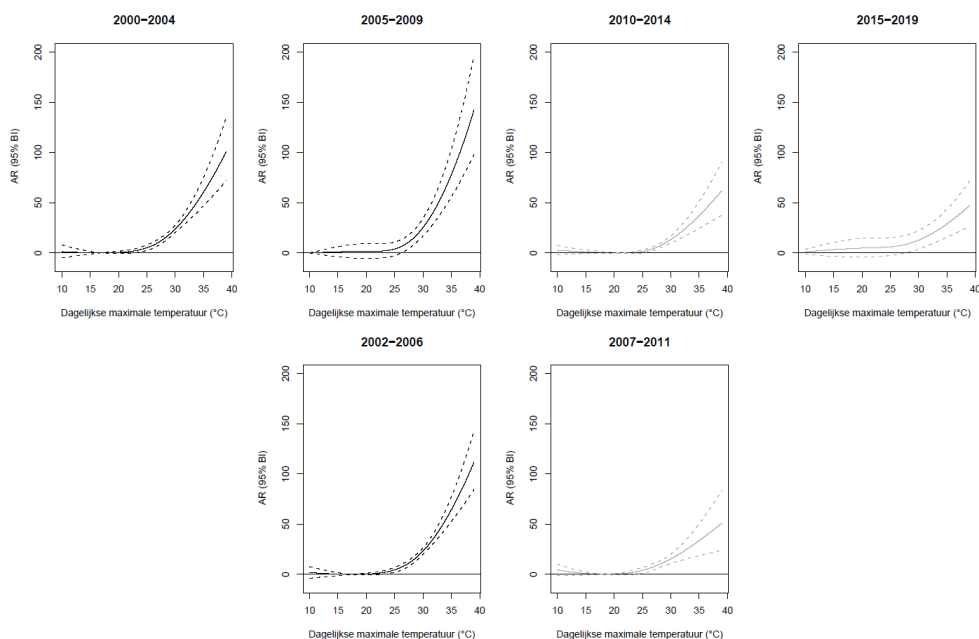
Figuur 4 De attributieve risico's (AR) tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte en tussen een potentiële hitteplandag en dagelijkse sterfte in de periode 2000-2009 en 2010-2019. De risico's tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte zijn weergegeven bij 28.9°C (95 percentiel van de dagelijkse maximale temperatuurverdeling in mei-september 2010-2019) in vergelijking met de corresponderende periode- en populatie-specifieke minimale mortaliteit temperatuur. Een potentiële hitteplandag is een dag die viel in een periode van vier of meer aaneengesloten dagen, met op iedere dag een maximum temperatuur van 27°C of hoger. De risico's tussen een potentiële hitteplandag en dagelijkse sterfte geven het risico weer ten opzichte van een niet-potentiële hitteplandag en dagelijkse sterfte.



De blootstelling-responsrelatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte in 5-jaar periodes laat een duidelijke afname van de sterfterisico's zien tussen de periode 2005-2009 en 2010-2014, maar niet tussen de periodes 2000-2004 en 2005-2009 en tussen 2010-2014 en 2015-2019 (Figuur 5). Dit impliceert dat veranderingen tijdens de periode van de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan in 2010 een rol hebben gespeeld. Echter blijkt ook dat lagere sterfterisico's worden geobserveerd als de periode 2007-2011 (na de publicatie van het Nationaal Hitteplan) wordt vergeleken met de periode 2002-2006 (Figuur 5). Het Nationaal Hitteplan is waarschijnlijk pas bekend geworden bij een groot deel van de Nederlandse bevolking en instanties bij de eerste activatie in 2010 en niet na de publicatie in 2007. De lagere sterfterisico's in de periode 2007-2011 worden mogelijk dus veroorzaakt door andere factoren. De hittegolven in 2003 en 2006 waren een van de langste en meest intense hittegolven die Nederland heeft meegemaakt en leidde tot verhoogde sterfte (CBS 2006, 2003) en veel media-aandacht. Dit heeft mensen zelf mogelijk al bewuster gemaakt voor de risico's van hitte en kan daardoor hebben geleid tot gedragsveranderingen tijdens warme dagen, een toename van airconditioningbezit en andere hitte-werende maatregelen, het herkennen van hitte-gerelateerde gezondheidseffecten en het voorkomen en verhelpen daarvan en verbeteringen in de gezondheidszorg. We merken hierbij wel op dat de periodes verschillen in mate van (extreem) hoge temperaturen. Dat heeft mogelijk impact op het schatten van de sterfterisico's. Het is daarom lastig om het effect van het Nationaal Hitteplan te onderscheiden van andere factoren die mogelijk een rol hebben gespeeld.

De relaties tussen de dagelijkse maximale temperatuur en sterfte worden niet beïnvloed door extra correctie voor andere indicatoren, zoals luchtverontreiniging, pollen en relatieve luchtvochtigheid, of andere parametrisering van indicatoren (Tabel B2 en B3). Extra correctie voor luchtverontreiniging verzwakte wel de relatie tussen een potentiële hitteplandag en sterfterisico's in beide periodes.

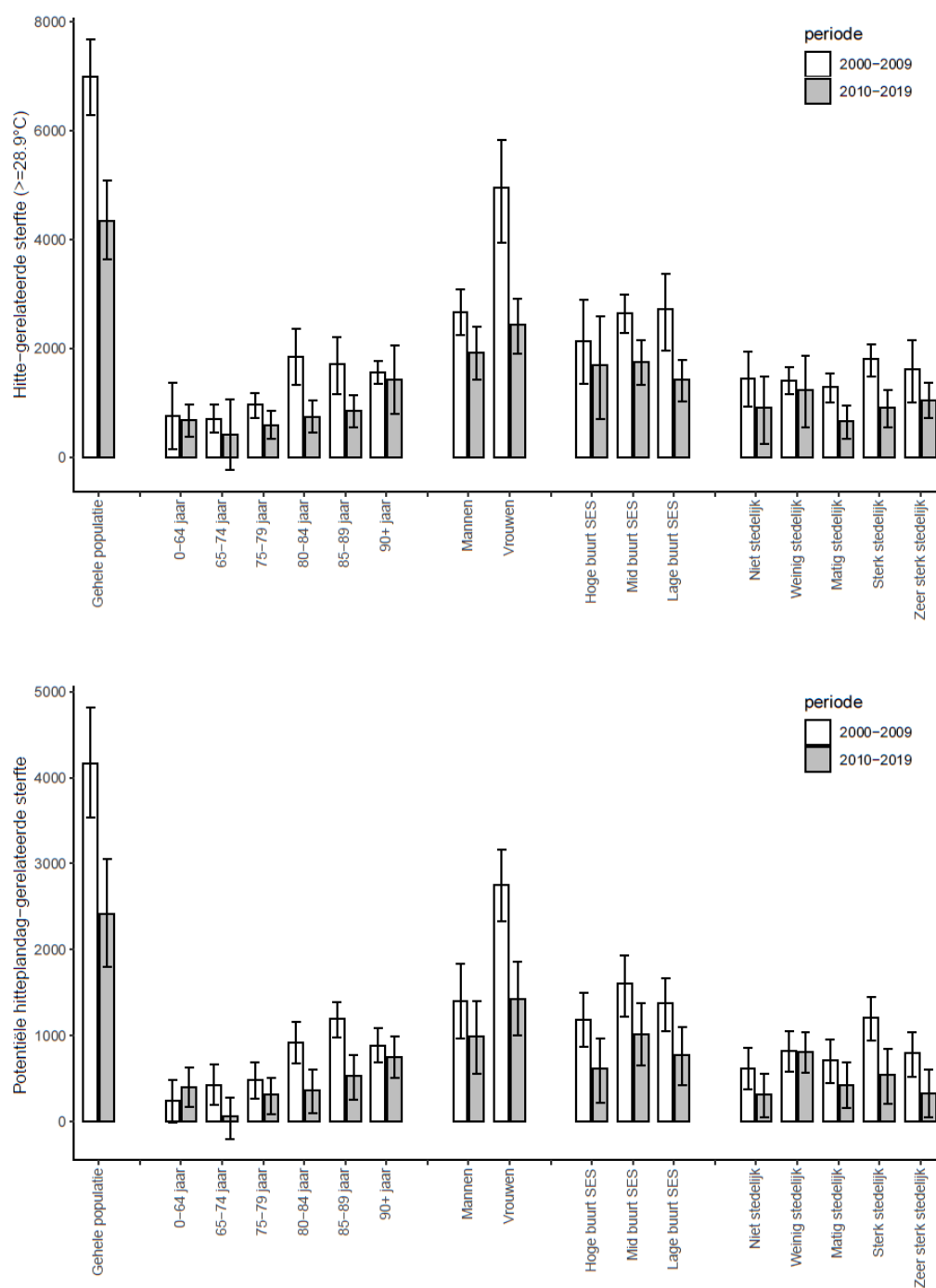
Figuur 5 Blootstelling-responscurves voor de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte in de periode 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014 en 2015-2019 (boven) en in de periode 2002-2006 en 2007-2011 (onder). De stippellijnen geven de 95%-betrouwbaarheidsintervallen weer.



4.3 Sterfte gerelateerd aan hoge temperaturen

Het geschatte aantal hitte-gerelateerde sterfgevallen per 10-jaarsperiode ligt rond de 7.000 in de periode 2000-2009 en rond de 4.300 in de periode 2010-2019 (Figuur 6, extra sterfte op dagen met een dagelijkse maximale temperatuur $\geq 28.9^\circ$). Het geschatte aantal sterfgevallen gerelateerd aan potentiële hitteplandagen ligt rond de 4.200 in 2000-2009 en rond de 2.400 in 2010-2019. De afname in geschatte hitte-gerelateerde sterfgevallen wordt waargenomen in bijna alle subpopulaties. Voor de 90+-groep is het sterfterisico bij hoge temperaturen sterk afgenomen, maar is het aantal hitte-gerelateerde sterfgevallen in 2010-2019 beperkt veranderd ten opzichte van 2000-2009. Dit komt doordat de 90+-populatie (en sterfte) is toegenomen in 2010-2019. Als de hitte-gerelateerde sterfte wordt uitgedrukt in percentage ten opzichte van de gehele sterfte in de 90+-populatie blijkt dat deze daalde van 2.0 procent in 2000-2009 naar 1.3 procent in 2010-2019. De geschatte hitte-gerelateerde sterfte in de 90+-populatie in 2010-2019 is ook lager dan in het hypothetische scenario in 2010-2019 waarin de blootstelling-responsrelatie niet zou zijn veranderd in de tijd (Figuur B3). Onder de 0-64-jarigen wordt geen afname in sterfte waargenomen, doordat de relatie tussen temperatuur en sterfte niet/beperkt veranderde.

Figuur 6 De geschatte hitte-gerelateerde sterfte en potentiële hitteplandag-gerelateerde sterfte in de periode 2000-2009 en 2010-2019. De hitte-gerelateerde sterfte is geschat voor hete dagen. Dit zijn alle dagen met een dagelijkse maximale temperatuur $\geq 28.9^{\circ}\text{C}$ (95 percentiel van de mei-september 2010-2019 temperatuurverdeling). De hoogte van de staven geeft het aantal hitte-gerelateerde of potentiële hitteplandag-gerelateerde sterfgevallen weer. De lijn door de bovenkant van de staven geeft het 95%-betrouwbaarheidsinterval weer.



5 Beschouwing en discussie

5.1 Belangrijkste bevindingen

Het sterfterisico door blootstelling aan hoge temperaturen is lager in 2010-2019 dan in 2000-2009, met name bij ouderen, vrouwen en bewoners van buurten met een lage sociaaleconomische status (SES). Ook is de geschatte hitte-gerelateerde sterfte lager in 2010-2019 dan in 2000-2009. In 2010-2019 ligt het geschatte aantal sterfgevallen gerelateerd aan potentiële hitteplandagen rond de 2.400 en in 2000-2009 ligt dat rond de 4.200. Uit analyses per 5-jaars periode blijkt dat de lagere sterfterisico's bij hoge temperaturen al worden waargenomen in de periode 2007-2011.

De afname van de sterfterisico's bij hoge temperaturen in de tijd is door meerdere factoren te verklaren. De publicatie en eerste activatie van het Nationaal Hitteplan heeft mogelijk een rol gespeeld in de afname van de sterfterisico's. Echter blijkt dat de afname van de sterfterisico's al wordt geobserveerd in de periode deels voor de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan. De hittegolven in 2003 en 2006 waren één van de langste en meest intense hittegolven die Nederland heeft meegemaakt en heeft mensen zelf mogelijk al bewuster gemaakt voor de risico's van hitte. Het is daarom lastig om het effect van het Nationaal Hitteplan in kaart te brengen. Ondanks de lagere sterfterisico's in 2010-2019 ten opzichte van 2000-2009, is er tijdens warme dagen nog steeds een verhoogd sterfterisico in Nederland.

5.2 Vergelijking met (inter)nationale literatuur

Internationale onderzoeken tonen aan dat in het algemeen de relaties tussen dagelijkse temperatuur en sterfterisico's zwakker zijn geworden in de tijd (Sheridan and Allen 2018; Wu et al. 2024). Relaties in hittegevoeligheid verschillen echter tussen landen (Vicedo-Cabrera et al. 2018). En er is ook een aantal studies in Europa dat laat zien dat de relatie tussen temperatuur en sterfte in de meest recente jaren gelijk is gebleven of zelfs sterker is geworden (Urban et al. 2022; Pascal et al. 2021; Rai et al. 2023). In Duitsland is bijvoorbeeld de relatie tussen hoge temperaturen en algehele sterfte gelijk gebleven in de periode 1993-2004 en 2005-2016 (Rai et al. 2023). Voor cardiovasculaire en respiratoire sterfte lijkt de gevoeligheid zelfs iets te zijn toegenomen (Rai et al. 2023). Een eerdere studie in Nederland toonde aan dat de hitte-gevoeligheid (op basis van veranderingen in de minimum mortaliteitstemperatuur) afneemt in de tijd (Folkerts et al. 2020). Uit analyses in de Volksgezondheid Toekomst Verkenning 2024 blijkt ook dat de geschatte hitte (warmte)-gerelateerde sterfte is afgenomen in de periode 2010-2019 ten opzicht van de periode 1995-2009 (Staatsen et al. 2024). Belangrijk is om te vermelden dat in eerdere onderzoeken (Folkerts et al. 2022; Staatsen et al. 2024) is gekeken naar zowel lage als hoge temperaturen en dat hitte-gerelateerde sterfte is gebaseerd op alle temperaturen boven de minimale mortaliteitstemperatuur. Omdat in dit onderzoek de focus ligt op hoge temperaturen, vanwege de evaluatie van het Nationale Hitteplan, is alleen gekeken naar de warmste maanden en is de hitte-gerelateerde sterfte geschat voor de dagen met

hoge temperaturen (dagelijkse maximale temperatuur $\geq 28.9^\circ$). De resultaten van dit onderzoek komen overeen met een andere studie in Nederland, die rapporteerde dat de relatie tussen hoge temperaturen en sterfte was afgenomen in de tijd, met name onder mensen met een lage SES (De Visser, Kunst, and Fleischmann 2022).

Er is een aantal internationale studies dat specifiek naar de relatie tussen temperatuur en sterfte heeft gekeken vóór en na de invoering van een hitteplan. In het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten werd geen bewijs gevonden voor lagere sterfterisico's na de invoering van het hitteplan (Williams et al. 2019; Weinberger et al. 2018). Studies uit Italië, Spanje, Zwitserland en Australië rapporteerden wel lagere sterfterisico's bij hoge temperaturen in de jaren na de invoering van het hitteplan (De'Donato et al. 2018; Morabito et al. 2012; Osborne et al. 2024; Martínez-Solanas and Basagaña 2019; Ragettli et al. 2024). Uiteraard zijn er verschillen in de hitteplannen tussen landen/regio's die mogelijk verschillende impact hebben op de hittegevoeligheid. Daarnaast zijn er verschillen in studie-opzet, beschikbaarheid van data en statistische methode, die mogelijk tot verschillende resultaten hebben geleid.

5.3 Beperking van deze studie

Deze studie heeft een aantal beperkingen. De temperatuur en sterftedata zijn geaggregeerd voor heel Nederland en ruimtelijke variaties in dagelijkse temperatuur en sterfte zijn niet meegenomen in de analyses. Ook is niet gekeken naar andere (gevoels)temperatuursindicatoren, de nachttemperatuur en mogelijke interactie-effecten tussen temperatuur en luchtvochtigheid. We keken in dit onderzoek alleen naar de relatie met algehele sterfte en niet naar oorzaak-specifieke sterfte of andere gezondheidspunten, zoals ziekenhuisopnames en huisartsbezoeken. Het Nationaal Hitteplan wordt geactiveerd op basis van temperatuurverwachtingen, maar in deze studie zijn temperatuurmetingen en geen verwachtingen gebruikt. We benadrukken dat veranderingen in de temperatuur-sterfterisico's door verschillende factoren zijn te verklaren. En dat het onduidelijk is of en hoe groot de impact van de publicatie en activatie van het Nationaal Hitteplan hierin is. Naast het Nationaal Hitteplan zijn er sinds enkele jaren ook in steeds meer gemeenten lokale hitteplannen geïmplementeerd die mogelijk een rol hebben gespeeld.

Er is gebruikgemaakt van tijdserie-analyses om de relatie tussen hitte en sterfte te schatten. De modellen includeerden indicatoren voor dag van de week, seizoen en langetermijntrends om te corrigeren voor mogelijke verstoringende effecten. We kunnen niet verifiëren of het meenemen van (en de specificatie van) deze indicatoren voldoende is om mogelijke verstoringende effecten uit te sluiten. Dit kan mogelijk hebben geleid tot een onder- of overschatting van de temperatuur-sterfte-relatie. Het is lastig om periodes met elkaar te vergelijken in mate van (extreem) hoge temperaturen. Met name voor analyses per 5-jaarsperiode kan het aantal dagen met hoge temperaturen verschillen. Hierdoor is het schatten van sterfterisico's bij hoge temperaturen moeilijker. Ook zijn voor sommige periodes de blootstelling-lag-

responscurves geëxtrapoleerd naar temperaturen boven de dagelijkse maximale temperatuur.

In het uitgevoerde onderzoek is vooral gekeken naar hitte dagen ($\geq 28.9^\circ$) en potentiële hitteplandagen. Er is niet onderzocht wat het effect is van een activatie van het Nationaal Hitteplan. Door het beperkte aantal dagen dat het Nationale Hitteplan is geactiveerd, is de zeggingskracht (power) te beperkt om te onderzoeken of het geobserveerde aantal sterfgevallen overeenkomt met het verwachte aantal sterfgevallen. Er is wel een onderzoek uitgevoerd naar verschillen in mortaliteit in perioden met hoge temperaturen in opeenvolgende jaren, zoals beschreven in de bijlage (Onderzoek naar verschillen in sterftcijfers in perioden met hoge temperaturen). Ook uit dit onderzoek bleek dat de statistische zeggingskracht beperkt was. Het bleek daardoor niet mogelijk om het effect van het Nationaal Hitteplan geïsoleerd in beeld te brengen.

6 Conclusie

Het sterfterisico door blootstelling aan hoge temperaturen is lager in de periode na de eerste activatie van het hitteplan (2010-2019) dan in de periode voor de eerste activatie van het hitteplan (2000-2009), met name bij ouderen, vrouwen en bewoners van buurten met een lage sociaaleconomische status. Ook is de geschatte hitte-gerelateerde sterfte lager in 2010-2019 dan in 2000-2009. Onder 90+-jarigen is de afname van hitte-gerelateerde sterfte beperkt. Dit komt mede door de toename van het aantal 90+-jarigen. Lagere sterfterisico's bij hoge temperaturen worden al waargenomen in de periode 2007-2011; deels voor de eerste activatie van het Nationaal Hitteplan. De hittegolven in 2003 en 2006 en de media-aandacht die deze hebben gekregen, hebben mensen en instanties zelf mogelijk bewuster gemaakt voor de risico's van hitte. De publicatie en eerste activatie van het Nationale Hitteplan heeft hierin mogelijk ook een rol gespeeld. Ondanks de lagere sterfterisico's in 2010-2019 ten opzichte van 2000-2009, laten de onderzoeksresultaten zien dat er tijdens warme dagen nog steeds een verhoogd sterfterisico is in Nederland. Daarnaast zullen de zomertemperaturen voorlopig verder stijgen volgens de KNMI'23-klimaatscenario's. Daarom is blijvende aandacht voor maatregelen om de sterfte en ziektelast door hitte te verminderen noodzakelijk.

Dankbetuiging

Wij willen bij deze Gerard van der Schrier (KNMI) bedanken voor het delen van de CNT-data, en Letty de Weger (LUMC) en Mieke Koenders (Elkerliek ziekenhuis) bedanken voor het delen van de pollen-data.

Literatuur

- Åström, Daniel Oudin, Forsberg Bertil, and Rocklöv Joacim. 2011. 'Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies', *Maturitas*, 69: 99-105.
- CBS. 2003. 'Ruim duizend doden extra door warme zomer'.
<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2003/37/ruim-duizend-doden-extra-door-warme-zomer>.
- CBS. 2006. 'Door hitte in juli duizend extra doden'.
<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2006/35/door-hitte-in-juli-duizend-extra-doden>.
- De'Donato, F., M. Scortichini, M. de Sario, A. de Martino, and P. Michelozzi. 2018. 'Temporal variation in the effect of heat and the role of the Italian heat prevention plan', *Public health*, 161: 154-62.
- De Visser, Mara, Anton E. Kunst, and Maria Fleischmann. 2022. 'Geographic and socioeconomic differences in heat-related mortality among the Dutch population: a time series analysis', *BMJ open*, 12: e058185.
- Dwyer, Ian J., Sarah J.E. Barry, Itamar Megiddo, and Christopher J. White. 2022. 'Evaluations of heat action plans for reducing the health impacts of extreme heat: methodological developments (2012–2021) and remaining challenges', *International journal of biometeorology*, 66: 1915-27.
- EMA. 2024. "European Climate Risk Assessment Report." In *EEA Report*
- Folkerts, Mireille A., Peter Bröde, W.J. Wouter Botzen, Mike L. Martinus, Nicola Gerrett, Carel N. Harmsen, and Hein A.M. Daanen. 2020. 'Long term adaptation to heat stress: Shifts in the minimum mortality temperature in the Netherlands', *Frontiers in Physiology*, 11: 225.
- Folkerts, Mireille A., Peter Bröde, WJ Wouter Botzen, Mike L. Martinus, Nicola Gerrett, Carel N. Harmsen, and Hein AM Daanen 2022. 'Sex differences in temperature-related all-cause mortality in the Netherlands', *International archives of occupational and environmental health*, 95: 249-58.
- Gasparrini, Antonio. 2011. 'Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm', *Journal of statistical software*, 43: 1.
- Gasparrini, Antonio, and Michela Leone. 2014. 'Attributable risk from distributed lag models', *BMC medical research methodology*, 14: 1-8.
- Gasparrini, Antonio, Ana Maria Vicedo-Cabrera, and Aurelio Tobias. 2024. 'The Multi-Country Multi-City Collaborative Research Network: An international research consortium investigating environment, climate, and health', *Environmental Epidemiology*, 8: e339.
- Guo, Yuming, Antonio Gasparrini, Ben G. Armstrong, Benjawan Tawatsupa, Aurelio Tobias, Eric Lavigne, Micheline de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, Xiaochuan Pan, Ho Kim, and Masahiro Hashizume. 2017. 'Heat wave and mortality: a multicountry, multicomunity study', *Environmental health perspectives*, 125: 087006.

- Martínez-Solanas, Èrica, and Xavier Basagaña. 2019. 'Temporal changes in temperature-related mortality in Spain and effect of the implementation of a Heat Health Prevention Plan', *Environmental research*, 169: 102-13.
- Morabito, Marco, Francesco Profili, Alfonso Crisci, Paolo Francesconi, Gian Franco Gensini, and Simone Orlandini. 2012. 'Heat-related mortality in the Florentine area (Italy) before and after the exceptional 2003 heat wave in Europe: an improved public health response?', *International journal of biometeorology*, 56: 801-10.
- Osborne, Nicholas J., Patrick Amoatey, Linda Selvey, and Dung Phung. 2024. 'Temporal changes in temperature-related mortality in relation to the establishment of the heat-health alert system in Victoria, Australia', *International journal of biometeorology*: 1-11.
- Pascal, Mathilde, Robin Lagarrigue, Anouk Tabai, Isabelle Bonmarin, Sacha Camail, Karine Laaidi, Alain Le Tertre, and Sébastien Denys. 2021. 'Evolving heat waves characteristics challenge heat warning systems and prevention plans', *International journal of biometeorology*, 65: 1683-94.
- Ragettli, Martina S, Benjamin Flückiger, Danielle Vienneau, Silvia Domingo-Irigoyen, Markus Koschenz, and Martin Rösli. 2024. 'Vulnerability to heat-related mortality and the effect of prevention measures: a time-stratified case-crossover study in Switzerland', *Swiss Medical Weekly*, 154: 3410-10.
- Rai, Masna, Susanne Breitner, Veronika Huber, Siqi Zhang, Annette Peters, and Alexandra Schneider. 2023. 'Temporal variation in the association between temperature and cause-specific mortality in 15 German cities', *Environmental research*, 229: 115668.
- RIVM. 2023. Achtergronddocument Thermoregulatie van de GGD richtlijn medische milieukunde: hitte en gezondheid, Accessed 19-05-2025. <https://www.rivm.nl/documenten/achtergronddocument-thermoregulatie-van-ggd-richtlijn-mmk-hitte-en-gezondheid>
- RIVM. 2024. 'How does the National Heatwave Plan work?', Accessed 24-07-2024. <https://www.rivm.nl/en/heat/national-heatwave-plan/how-does-it-work>.
- Sheridan, Scott C., and Michael J. Allen. 2018. 'Temporal trends in human vulnerability to excessive heat', *Environmental research letters*, 13: 043001.
- Staatsen, B., E. Hall, M. Strak, C. Betgen, J. Limaheluw, Y. Mulder, M. van Bakel, N. Kupper, C. Deuning, and C. Couwenbergh. 2024. 'Naar een gezonde leefomgeving in een veranderend klimaat. Themaverkenning bij de Volksgezondheid Toekomst Verkenning 2024'.
- Urban, Aleš, Osvaldo Fonseca-Rodríguez, Claudia Di Napoli, and Eva Plavcová. 2022. 'Temporal changes of heat-attributable mortality in Prague, Czech Republic, over 1982–2019', *Urban Climate*, 44: 101197.
- Van Ulden, Aad, Geert Jan van Oldenborgh, and Gerard van der Schrier. 2009. *The construction of a central Netherlands temperature* (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut).

- Vicedo-Cabrera, Ana M., Francesco Sera, Yuming Guo, Yeonseung Chung, Katherine Arbuthnott, Shilu Tong, Aurelio Tobias, Eric Lavigne, Micheline de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, and Paulo Hilario Nascimento Saldiva. 2018. 'A multi-country analysis on potential adaptive mechanisms to cold and heat in a changing climate', *Environment international*, 111: 239-46.
- Vicedo-Cabrera, Ana Maria, N. Scovronick, Francesco Sera, Dominic Royé, Rochelle Schneider, Aurelio Tobias, Christofer Astrom, Y. Guo, Y. Honda, and D.M. Hondula. 2021. 'The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change', *Nature climate change*, 11: 492-500.
- Weinberger, Kate R., Antonella Zanobetti, Joel Schwartz, and Gregory A. Wellenius. 2018. 'Effectiveness of National Weather Service heat alerts in preventing mortality in 20 US cities', *Environment international*, 116: 30-38.
- Williams, Lorraine, Bob Erens, Stefanie Ettelt, Shakoob Hajat, Tommaso Manacorda, and Nicholas Mays. 2019. 'Evaluation of the heatwave plan for England'.
- Wu, Yao, Bo Wen, Antonio Gasparrini, Ben Armstrong, Francesco Sera, Eric Lavigne, Shanshan Li, Yuming Guo, Ala Overcenco, and Aleš Urban. 2024. 'Temperature frequency and mortality: Assessing adaptation to local temperature', *Environment international*, 187: 108691.
- Zhao, Qi, Shanshan Li, Tingting Ye, Yao Wu, Antonio Gasparrini, Shilu Tong, Aleš Urban, Ana Maria Vicedo-Cabrera, Aurelio Tobias, and Ben Armstrong. 2024. 'Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: A three-stage modelling study', *PLoS medicine*, 21: e1004364.

Afkortingenlijst

AR = attributief risico
BI = betrouwbaarheidsinterval
CNT = centraal Nederland temperatuur
Gem = gemiddelde
NO₂ = stikstofdioxide
O₃ = ozon
PM₁₀ = fijnstof kleiner dan 10 micrometer
Sd = standaard deviatie
SES = sociaal economische status

Bijlage 1 Methode

Sterfte en populatie

Data over de dagelijkse sterfte (alle oorzaken) voor de periode 2000 tot en met 2019 is verkregen in de afgeschermdde omgeving van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Dit zijn data over alle inwoners van Nederland.³ Op basis van deze data hebben we de dagelijkse sterfte bepaald voor verschillende leeftijdsklassen (0-64, 65-74, 75-79, 80-84, 85-89, 90+ jaar), geslacht (man, vrouw), sociaaleconomische status (SES) van de buurt (tertielen van het percentage van de populatie met een inkomen onder de 40 procent inkomensniveau van de totale Nederlandse populatie) en stedelijkheid (≥ 2.500 adressen per km² (zeer sterk stedelijk), 2.499 – 1.500 adressen per km² (sterk stedelijk), 1.499-1.000 adressen per km² (matig stedelijk), 999-500 adressen per km² (weinig stedelijk), <500 adressen per km² (niet stedelijk)). Voor buurt SES en stedelijkheid zijn data gebruikt van 1999 (gelinkt aan 2000-2004), 2005 (gelinkt aan 2005-2009), 2010 (gelinkt aan 2010-2014) en 2015 (gelinkt aan 2015-2019). Als buurt SES niet bekend was, is wijk SES gebruikt. Als die niet bekend was, is gemeente SES gebruikt. In verband met de start van de COVID-19-pandemie in 2020 is besloten om geen data na 2019 mee te nemen in dit onderzoek.

De gegevens over sterfte en over de demografische en sociaaleconomische factoren zijn geanonimiseerd voor het RIVM beschikbaar gesteld binnen een afgeschermdde omgeving van het CBS. De koppeling met de persoonsgegevens is zodanig uitgevoerd dat het RIVM geen personen kan herleiden.

Statistische analyse

Om de blootstelling-responsrelatie tussen dagelijkse temperatuur en sterfte te onderzoeken, hebben we gebruikgemaakt van tijdserie-analyses (Poisson regressiemodellen). Deze techniek is veelgebruikt binnen het internationale Multi-Country multi-City (MCC) Collaborative Research Network, (Gasparrini, Vicedo-Cabrera, and Tobias 2024) waar ook het RIVM bij aangesloten is, en is in meerdere ge-peer-reviewede artikelen beschreven (Guo et al. 2017; Vicedo-Cabrera et al. 2021; Zhao et al. 2024). De analyses zijn apart uitgevoerd voor de periode 2000-2009 en 2010-2019 en alleen de maanden mei tot en met september zijn meegenomen. Naast de dagelijkse maximale temperatuur hebben we ook gekeken naar de relatie tussen een "potentiële hitteplandag" en sterfte. Een dag is hierbij gelabeld als een potentiële hitteplandag als de dag viel in een periode van vier of meer aaneengesloten dagen met op iedere dag een maximum temperatuur van 27°C of hoger. Ongeveer 75 procent van de dagen waarop het Nationaal Hitteplan was geactiveerd in 2010-2019 waren daadwerkelijk gelabeld als potentiële hitteplandag. Dit verschil komt onder andere doordat het Nationaal Hitteplan wordt geactiveerd op basis van temperatuurverwachtingen, terwijl we in deze analyses gebruik hebben gemaakt van gemeten temperaturen.

³ Sterftedata voor 17 juli 2014 zijn niet meegenomen in de analyses i.v.m. het neerstorten van vlucht MH17 van Malaysia Airlines.

De specificatie van de variabelen in de modellen hebben we zoveel mogelijk laten overeenkomen met andere (MCC) studies. (Guo et al. 2017; Vicedo-Cabrera et al. 2021; Zhao et al. 2024) Om de blootstelling-responsrelatie tussen dagelijkse maximale temperatuur en sterfte te schatten, maken we gebruik van distributed lag nonlinear-models (dlnm) (Gasparrini 2011) om mogelijke niet-lineaire en vertraagde (lag effecten, de temperatuur op een dag gerelateerd aan de sterfte een of meerdere dagen later) verbanden mee te nemen. Om mogelijke niet-lineaire verbanden te evalueren voor de dagelijkse maximale temperatuur hebben we gebruikgemaakt van een natural cubic spline met 2 knopen (knots) geplaatste op het 50^e en 90^e percentiel van de periode-specifieke temperatuursverdeling. Voor de mogelijke vertraagde relatie hebben we een natural cubic spline met 4 vrijheidsgraden (2 interne knopen op de log-schaal en een intercept) gebruikt om een verband te vinden over maximaal 10 dagen. Om te corrigeren voor langetermijntrends hebben we een lineaire indicator voor de datum gebruikt. Om te corrigeren voor seizoentrends hebben we een interactieterm gespecificeerd tussen kalender jaar en dag van het seizoen met 4 vrijheidsgraden per jaar. Deze interactieterm is gespecificeerd om geen constante (lineaire) seizoenstrend te gebruiken. Om te corrigeren voor dag van de week hebben we categorische indicator voor dag van de week gebruikt. Analyses zijn separaat uitgevoerd voor de sterfte bij leeftijdsklasse, geslacht, buurt SES en stedelijkheid. Attributieve sterfterisico's geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteitstemperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen).

In gevoeligheids- (sensitiviteit) analyses hebben we gecorrigeerd voor luchtverontreiniging (fijnstof, stikstofdioxide en ozon), voor relatieve luchtvochtigheid en voor pollen (Poaceae, Rumex en Artemisia). Voor fijnstof, stikstofdioxide, ozon, Poaceae, Rumex en Artemisia hebben we het gemiddelde van de dag en de dag ervoor (lag 0-1) gebruikt. Vanwege mogelijk niet-lineaire verbanden voor relatieve luchtvochtigheid hebben we een natural cubic spline met 3 vrijheidsgraden gebruikt. Vanwege de scheve verdeling en mogelijke niet-lineaire relaties hebben we Poaceae, Rumex en Artemisia in drie categorieën (0-75 percentiel, 75-95 percentiel, 95-100 percentiel van de 2000-2019-verdeling) meegenomen in de analyses. Pollen en luchtverontreiniging zijn mogelijke mediators in de relatie tussen temperatuur en sterfte en zijn daarom alleen in gevoeligheidsanalyses meegenomen. Verder hebben we gecorrigeerd voor maand-jaar-combinaties, in plaats van correctie voor langetermijn- en seizoenstrends. Voor de evaluatie van het niet-lineaire verband voor de dagelijkse maximale temperatuur, hebben we ook gebruikgemaakt van B-splines met 2 knots geplaatste op het 50 en 90 percentiel van de periode-specifieke temperatuursverdeling. De analyses voor de dagelijkse maximale temperatuur zijn ook uitgevoerd voor de periodes 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014, 2015-2019, 2002-2006 en 2007-2011.

Om de temperatuur-gerelateerde sterfte te schatten, hebben we gebruikgemaakt van een methode die is ontwikkeld binnen het MCC-netwerk en elders in detail is beschreven. (Gasparrini and Leone 2014)

De temperatuur-gerelateerde sterfte-aantallen zijn berekend voor dagen waarop de temperatuur 28.9°C of hoger was (95e percentiel van de mei-september 2010-2019 temperatuursverdeling) en voor potentiële hitteplandagen. De 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor de temperatuur-gerelateerde sterftefracties zijn berekend met Monte Carlo-simulaties (1000 simulaties).

Vanwege verschillen in de populatie (sterfte) en dagelijkse temperatuur/potentiële hitteplandagen tussen 2000-2009 en 2010-2019, hebben we ook de temperatuur-gerelateerde sterfte voor 2010-2019 berekend voor een hypothetisch (counterfactual) scenario. In dit scenario wordt aangenomen dat de blootstelling-responsrelatie niet veranderd zou zijn tussen 2000-2009 en 2010-2019. Met andere woorden, de temperatuur-gerelateerde sterfte in 2010-2019 wordt geschat op basis van de populatie (sterfte) en dagelijkse maximale temperatuur in 2010-2019 en de blootstelling-responsrelatie van 2000-2009.

Bijlage 2 Onderzoek naar verschillen in sterftcijfers in perioden met hoge temperaturen

Het Nationaal Hitteplan is in totaal 17 keer geactiveerd in de periode 2010-2024. Daardoor kan er maar voor een beperkt aantal dagen gekeken worden of het geobserveerde aantal sterfgevallen tijdens de activatie van het Nationaal Hitteplan overeenkomt met het verwachte aantal sterfgevallen. Analyses die zich richten op het aantal sterfgevallen tijdens de activatie van het Nationaal Hitteplan hebben daarom dus een beperkte zeggingskracht (power). Op basis van kennis en ervaringen is besloten om onderzoek te doen naar verschillen in sterfgevallen in perioden met hoge temperaturen vóór of na de publicatie en eerste activatie van het Nationaal Hitteplan.

Voor dit onderzoek zijn er tijdreeksen van 3 of 4 dagen met hoge dagelijkse maximale temperaturen geïdentificeerd in de periode 2005-2019. Deze tijdreeksen zijn gematcht op basis van gelijkenis tussen dagelijkse maximum en minimum temperaturen, dag van de week, lengte van de tijdreeks en de gemiddelde luchtvochtigheid. Perioden vóór de interventie (publicatie of eerste activatie van het Nationale Hitteplan) zijn gematcht met perioden na de interventie. In gematchte tijdreeksen kunnen dagelijkse sterftcijfers (het aantal sterfgevallen per dag gedeeld door de populatie per dag) worden vergeleken. De methode is hieronder in detail (in het Engels) beschreven.⁴

Uit het onderzoek bleek dat de statistische zeggingskracht beperkt was. Het was daardoor lastig om verschillen in sterftcijfers te vergelijken en het effect van het Nationaal Hitteplan geïsoleerd in beeld te brengen.

Methode (in het Engels)

We try to identify pairs of similar 'events' consisting of two homologous sequences of so many days of the week with maximum temperatures above a given level, one of the sequences from the period before the intervention (implementation or first activation of the national heatwave plan) and the other from the period after. The similarity of two events is measured in the first place by the similarity between their lowest and highest maximum temperatures, but it may also take into account average humidity or other quantities. The sequences should be three or four days long at least, but there are not that many events characterized by high temperatures and durations of more than three days.

Given a pair of events, we compare the mortality rates before and after the intervention in a given age group. We do this by carrying out a test and computing an interval of approximate confidence 95% for the relative mortality rate ρ , to be defined shortly. In essence, the assumption involved in this statistical procedure is that the numbers of deaths during the two events are independent Poisson variables; classical probability theory postulates that this assumption holds very

⁴ De methode is ontwikkeld en uitgevoerd door José Ferreira (SIM, RIVM).

closely. The means of these variables can be assumed to be $n_0\mu_0$ and $n_1\mu_1$, where μ_0 represents the mortality rate before the intervention under the event in question, μ_1 the mortality rate after the intervention, and n_0 and n_1 stand for 'factors of exposure' such as the numbers of people alive just before the events had taken place. If there are no data on n_0 and n_1 , then one may simply take $n_0 = n_1$ to be unspecified (because the two factors cancel out in our procedure) provided the population numbers remained practically constant before and after the intervention.

The method we use to compute confidence intervals for the relative rate $\rho = \mu_1/\mu_0$ is well-known: If S_0 and S_1 are independent Poisson random variables with parameters $n_0\mu_0$ and $n_1\mu_1$, where n_0 and n_1 are known constants and μ_0 and μ_1 are unknown parameters, then conditionally on $S_0 + S_1$ the random variable S_0 has a binomial distribution with size parameter $S_0 + S_1$ and probability parameter $\pi = n_0\mu_0/(n_0\mu_0 + n_1\mu_1)$. If we find a confidence interval for π , say L_-, L_+ , then, since

$$L_- \leq \frac{n_0\mu_0}{n_0\mu_0 + n_1\mu_1} \leq L_+ \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{L_+} \leq \frac{n_0\mu_0 + n_1\mu_1}{n_0\mu_0} \leq \frac{1}{L_-} \quad \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{L_+} \leq 1 + \frac{n_1\mu_1}{n_0\mu_0} \leq \frac{1}{L_-} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{L_+} - 1 \leq \frac{n_1\mu_1}{n_0\mu_0} \leq \frac{1}{L_-} - 1 \quad \Leftrightarrow$$

$$\frac{1-L_+}{L_+} \leq \frac{n_1\mu_1}{n_0\mu_0} \leq \frac{1-L_-}{L_-} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{n_0}{n_1} \frac{1-L_+}{L_+} \leq \frac{\mu_1}{\mu_0} \leq \frac{n_0}{n_1} \frac{1-L_-}{L_-} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\mu_1}{\mu_0} \in \left[\frac{n_0}{n_1} \frac{1-L_+}{L_+}, \frac{n_0}{n_1} \frac{1-L_-}{L_-} \right],$$

we also find a confidence interval for the ratio of rates ρ .

The interval of nominal 95% level we use for π is the so-called Wilson interval, whose endpoints are

$$L_{\pm} = \frac{S_0 + \kappa^2/2}{S_0 + S_1 + \kappa^2} \pm \frac{\kappa\sqrt{S_0 + S_1}}{S_0 + S_1 + \kappa^2} \sqrt{\hat{\pi}(1 - \hat{\pi}) + \frac{\kappa^2}{4(S_0 + S_1)}}$$

where $\kappa = 1.96$ and $\hat{\pi} = S_1/(S_1 + S_2)$. Since S_0 and S_1 are both large in our application, we might as well use the more common interval' $\hat{\pi} \pm 1.96\sqrt{\hat{\pi}(1 - \hat{\pi})}$ for π , which provides a more convenient, and in our case a sufficiently reliable, p-value of the test of the null hypothesis that $\pi = n_0/(n_0 + n_1)$, or $\mu_0 = \mu_1$.

If data on n_0 and n_1 are available then one can even assume a bit less, namely that S_0 and S_1 are independent binomial variables with probabilities of success μ_0 and μ_1 and size parameters n_0 and n_1 , and accordingly find an approximate confidence interval for μ_1/μ_0 (or for $\mu_1 - \mu_0$) and test the hypothesis that $\mu_0 = \mu_1$. This procedure, however, should give practically the same results as those based on the Poisson assumption.

The correctness of the methods may be confirmed by checking the approximate uniformity of those p-values that are 'not too small'.

Bijlage 3 Tabellen en Figuren

Tabel B1 Beschrijvende statistiek van de gemiddelde dagelijkse relatieve luchtvochtigheid, luchtverontreiniging en pollen in Nederland in de periode (mei-september) 2000-2009 en 2010-2019. De gemiddelde en standaard deviatie (gem (sd)) of het aantal en percentage (n(%)) zijn weergegeven.

Variabelen ^a	2000-2009 gemiddelde (standaard deviatie) / n(%)	2010-2019 gemiddelde (standaard deviatie) / n(%)
Relatieve luchtvochtigheid (%), gem (sd)	78.2 (9.3)	76.3 (9.1)
NO ₂ (µg/m ³), gem (sd)	19.1 (6.2)	15.7 (5)
O ₃ (µg/m ³), gem (sd)	79.9 (23.1)	77.7 (20.4)
PM ₁₀ (µg/m ³), gem (sd)	24.7 (8.8)	17.3 (5.5)
Dagen met Poaceae pollen, n(%)		
Laag (<75 pctl)	1095 (71.6)	1153 (75.4)
Mid (75-95 pctl)	321 (21)	330 (21.6)
Hoog (95+ pctl)	114 (7.5)	47 (3.1)
Dagen met Artemisia pollen, n(%)		
Laag (<75 pctl)	1078 (70.5)	1150 (75.2)
Mid (75-95 pctl)	344 (22.5)	325 (21.2)
Hoog (95+ pctl)	108 (7.1)	55 (3.6)
Dagen met Rumex pollen, n(%)		
Laag (<75 pctl)	989 (64.6)	1162 (75.9)
Mid (75-95 pctl)	433 (28.3)	320 (20.9)
Hoog (95+ pctl)	108 (7.1)	48 (3.1)

^a NO₂, O₃ en PM₁₀-concentraties zijn bepaald op basis van pollenconcentraties op de dag zelf en de dag ervoor (lag 0-1). Poaceae, Artemisia and Rumex-categorieën zijn bepaald op basis van de pollenconcentraties van de dag zelf en de dag ervoor (lag 0-1).

Tabel B2 De attributieve risico's (AR) tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte in sensitiviteitsanalyses in de periode 2000-2009 en 2010-2019.^a De risico's tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte zijn weergegeven bij 28.9°C (95e percentiel van de dagelijkse maximale temperatuurverdeling in mei-september 2010-2019) in vergelijking met de corresponderende periode-specifieke minimale mortaliteitstemperatuur.

Periode	AR (95%BI) 2000-2009	AR (95%BI) 2010-2019
Model	17 (15, 20)	7 (5, 9)
Model + correctie voor pollen	17 (14, 19)	8 (5, 10)
Model + correctie relatieve luchtvochtigheid	18 (16, 21)	8 (6, 10)
Model + correctie voor luchtverontreiniging	15 (12, 18)	7 (5, 10)
Model jaar*maand	17 (15, 19)	6 (4, 8)
Model B-spline	17 (15, 20)	7 (5, 9)

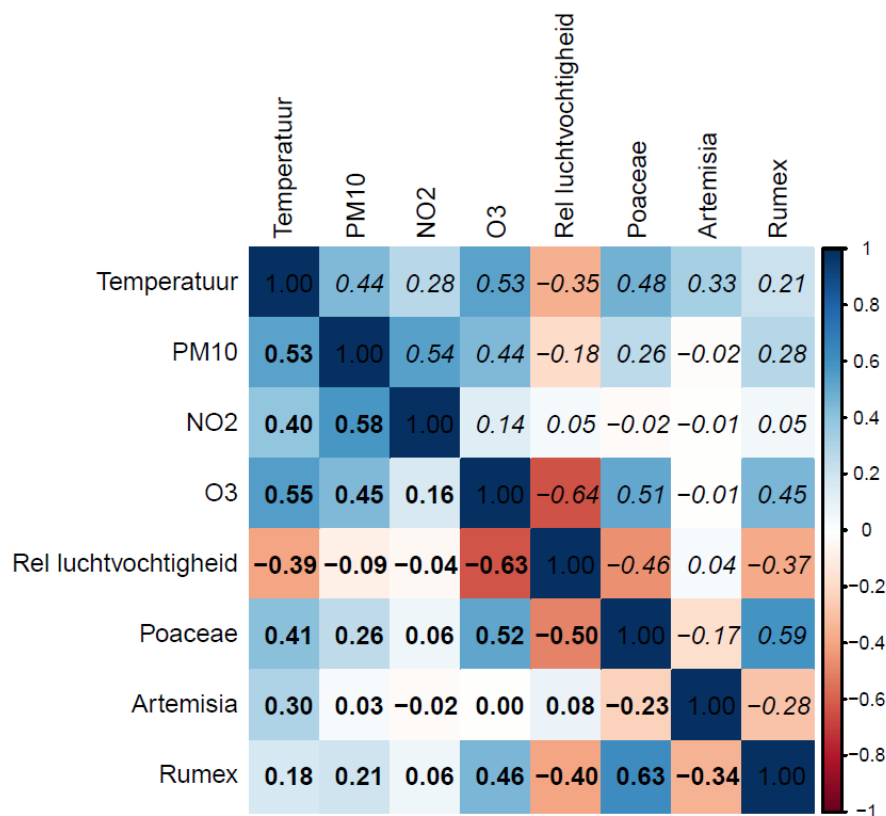
^a Model + correctie voor pollen is het model met extra correctie voor Poaceae, Rumex en Artemisia; Model + correctie voor relatieve luchtvochtigheid is het model met extra correctie voor relatieve luchtvochtigheid; Model + correctie voor luchtverontreiniging is het model met extra correctie voor PM10, NO2 en O3; Model jaar*maand is een model met een interactie term tussen maand en jaar in plaats van correctie voor langetermijn- en seizoentrends; Model B-spline is een model met een B-spline voor de temperatuursindicator met 2 knots geplaatste op het 50 en 90 percentiel van de periode-specifieke temperatuurverdeling.

Tabel B3 De attributieve risico's (AR) tussen een potentiële hitteplandag en dagelijkse sterfte in sensitiviteit analyses in de periode 2000-2009 en 2010-2019.^a De risico's tussen een potentiële hitteplandag en dagelijkse sterfte geven het risico weer ten opzichte van een niet-potentiële hitteplan dag en dagelijkse sterfte.

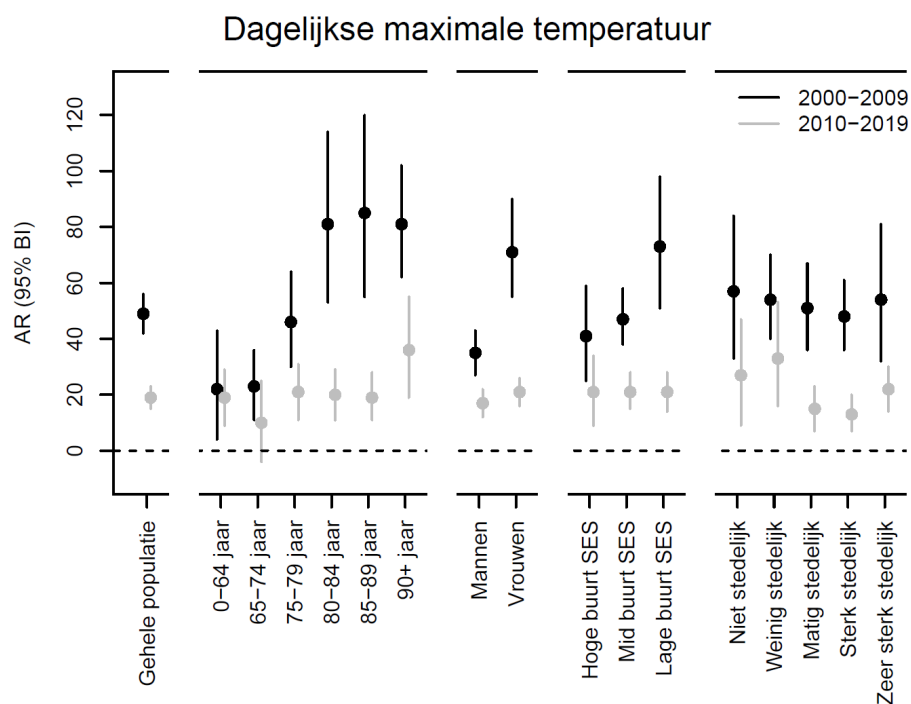
Periode	AR (95%BI) 2000-2009	AR (95%BI) 2010-2019
Model	22 (18, 26)	10 (7, 13)
Model + correctie voor pollen	22 (18, 26)	10 (7, 13)
Model + correctie relatieve luchtvochtigheid	22 (18, 26)	10 (7, 13)
Model + correctie voor luchtverontreiniging	13 (9, 16)	5 (2, 8)
Model jaar*maand	21 (17, 26)	10 (7, 13)

^a Model + correctie voor pollen is het model met extra correctie voor Poaceae, Rumex en Artemisia; Model + correctie voor relatieve luchtvochtigheid is het model met extra correctie voor relatieve luchtvochtigheid; Model + correctie voor luchtverontreiniging is het model met extra correctie voor PM10, NO2 en O3; Model jaar*maand is een model met een interactieterm tussen maand en jaar in plaats van correctie voor langetermijn- en seizoentrends.

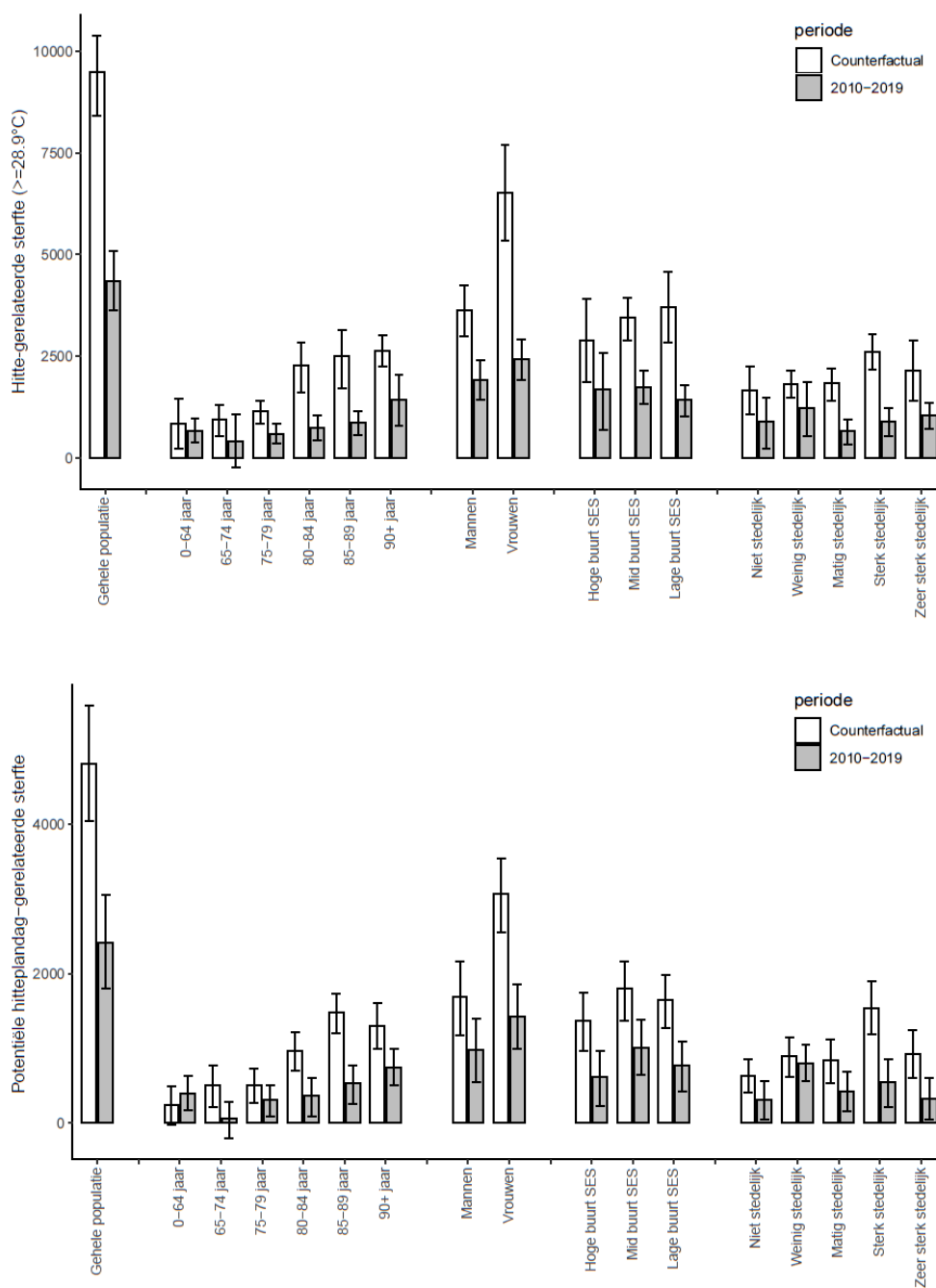
Figuur B1 Spearman correlaties tussen dagelijkse temperatuur, luchtverontreiniging, relatieve luchtvochtigheid en pollen. Correlaties aan de linkerkant onder de diagonaal (dikgedrukt) zijn in de periode 2000-2009 en aan de rechterkant boven de diagonaal (schuingedrukt) zijn in de periode 2010-2019.



Figuur B2 De attributieve risico's (AR) tussen de dagelijkse maximale temperatuur (99e percentiel) en dagelijkse sterfte in de periode 2000-2009 en 2010-2019. De risico's tussen de dagelijkse maximale temperatuur en dagelijkse sterfte zijn weergegeven bij 33.2°C (99e percentiel van de dagelijkse maximale temperatuurverdeling 2010-2019) in vergelijking met de corresponderende periode- en populatie-specifieke minimale mortaliteitstemperatuur.



Figuur B3 De hitte-gerelateerde sterfte (95-100e percentiel) en potentiële hitteplandag-gerelateerde sterfte in het counterfactual (hypothetische) scenario en in de periode 2010-2019. De hitte-gerelateerde sterfte is geschat voor hete dagen. Dit zijn alle dagen met een dagelijkse maximale temperatuur $\geq 28.9^{\circ}\text{C}$ (95e percentiel van de mei-september 2010-2019 temperatuursverdeling). De hoogte van de staven geeft het aantal hitte-gerelateerde of hitteplandag-gerelateerde sterfgevallen weer. De lijn door de bovenkant van de staven geeft het 95%- betrouwbaarheidsinterval weer.



Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

mei 2025

De zorg voor morgen
begint vandaag