



Kennisnotitie

Verkennd onderzoek naar temperatuur-sterfte relaties voor de doorontwikkeling van het Nationaal Hitteplan

Samenvatting

Voor een mogelijke doorontwikkeling en verbetering van het bestaande Nationaal Hitteplan is er verkennd epidemiologisch onderzoek uitgevoerd naar temperatuur-sterfterisico's. Omdat uit eerder onderzoek bleek dat ouderen het kwetsbaarst zijn, is in deze studie alleen de temperatuur-sterfte relatie in de leeftijdsgroep van 75 jaar en ouder onderzocht (in 2007-2019 mei-september).

De resultaten tonen aan dat hoge nachttemperaturen leiden tot een verhoogd sterfterisico bovenop de risico's van hoge dagelijkse maximale temperaturen. Ook zijn de sterfterisico's bij hoge temperaturen groter aan het begin van het warme seizoen (mei-juni) dan aan het einde (augustus-september). Er zijn geen aanwijzingen gevonden voor verhoogde sterfterisico's bij abrupte temperatuurstijgingen. Ook blijkt dat verschillen in sterfterisico's tussen hitte-indicatoren en de (lucht)temperatuur beperkt zijn. De nachttemperatuur en variatie in risico's gedurende het seizoen kunnen mogelijk een belangrijke(re) rol krijgen bij overwegingen om het Nationaal Hitteplan te activeren.

Inleiding

Blootstelling aan hoge temperaturen kan in ernstige gevallen leiden tot ziekenhuisopnames en sterfte (1). Ter preventie van de impact van hitte op de volksgezondheid is in Nederland het Nationaal Hitteplan ontwikkeld. Het Nationaal Hitteplan wordt geactiveerd als er een periode van aanhoudende hoge temperaturen wordt verwacht. Naast de maximale temperatuur worden ook de nachttemperatuur en de luchtvochtigheid meegenomen in de beoordeling voor activatie. Het Nationaal Hitteplan is in opdracht van het Ministerie van VWS geëvalueerd in 2024-2025. Uit de evaluatie blijkt onder andere dat de sterfterisico's bij hoge temperaturen lager zijn in de periode 2010-2019 dan in de periode 2000-2009, met name bij ouderen (2).

Op basis van de resultaten van de evaluatie van het Nationaal Hitteplan is een verkennd epidemiologisch onderzoek uitgevoerd naar temperatuur-sterfterisico's voor een mogelijke doorontwikkeling en verbetering van het bestaande Nationaal Hitteplan. Dit onderzoek richt zich op verschillen in sterfterisico's op basis van verschillende hitte-indicatoren ((lucht)temperatuur, de Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)(3), de Excess Heat Factor (EHF)(4)), de relatie tussen hoge nachttemperaturen en sterfte, en de mogelijke invloed van acclimatisatie op temperatuur-sterfterisico's.

De WBGT is een hitte-indicator gebaseerd op de (lucht)temperatuur, luchtvochtigheid, zonnestraling en windsnelheid. Deze indicator wordt gebruikt om de hittekracht – een nieuwe index die het KNMI vanaf de zomer 2026 zal communiceren(5) – te bepalen. De EHF is een maat voor hittegolfintensiteit en vergelijkt de temperatuur met het langetermijngemiddelde en de voorgaande 30 dagen. De mogelijke invloed van acclimatisatie op temperatuur-sterfterisico's is onderzocht door te evalueren of temperatuur-sterfterisico's veranderen gedurende de zomer en

RIVM

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

T 088 689 89 89

Auteurs: Jochem Klompmaker,
Carolina Pereira Marghidan
(KNMI)
Werner Hagens

Centrum:
Duurzaamheid, Milieu en
Gezondheid

Contact:
Jochem Klompmaker
jochem.klompmaker@rivm.nl

Kenmerk:
KN-2025-0128

DOI:
10.21945/RIVM-KN-2025-
0128

Datum:
5 februari 2026

of temperatuur-sterfterisico's hoger zijn bij abrupte temperatuurstijgingen. Het onderzoek is onderverdeeld in vijf deelonderzoeken:

- onderzoek naar sterfterisico's op basis van de Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) en de (lucht)temperatuur
- onderzoek naar sterfterisico's op basis van de Excess Heat Factor (EHF) en de (lucht)temperatuur
- onderzoek naar de relatie tussen hoge nachttemperaturen en sterfterisico's
- onderzoek naar veranderingen in temperatuur-sterfterisico's gedurende de zomer
- onderzoek naar de relatie tussen abrupte temperatuurstijgingen en sterfterisico's

Het doel van dit onderzoek is om te evalueren of relaties met sterfte verschillen tussen verschillende hitte-indicatoren en of mogelijke acclimatisatie invloed heeft op temperatuur-sterfte relaties. Omdat uit de evaluatie van het Nationaal Hitteplan blijkt dat ouderen het kwetsbaarst zijn (2), is voor dit onderzoek alleen de temperatuur-sterfte relatie in de leeftijdsgroep van 75 jaar en ouder onderzocht in de warme maanden (mei-september) vanaf 2007 (implementatie Nationaal Hitteplan) tot en met 2019.

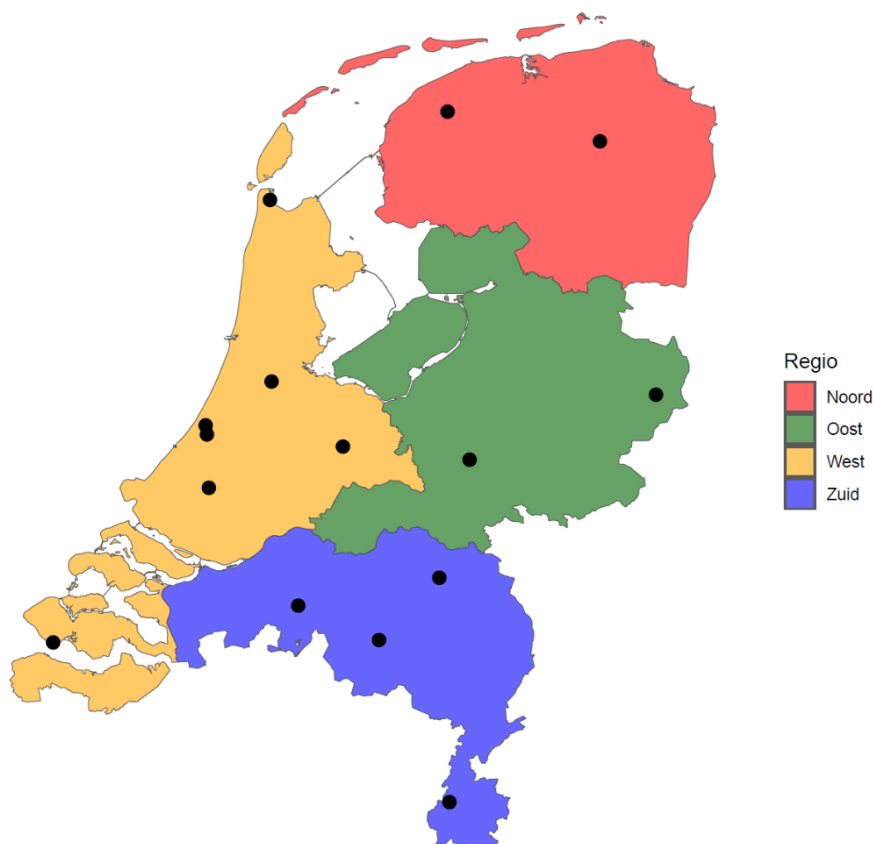
Methode

Voor alle deelonderzoeken is gebruik gemaakt van een tweefase opzet. In de eerste fase is per landsdeel de relatie tussen de temperatuurindicator en sterfte geschat. Nederland is onderverdeeld in vier landsdelen op basis van de *Nomenclature of territorial units for statistics* (NUTS) 1 (Figuur 1):

- Noord: Groningen, Friesland, Drenthe
- Oost: Overijssel, Gelderland, Flevoland
- West: Utrecht, Noord-Holland, Zuid-Holland, Zeeland
- Zuid: Noord-Brabant, Limburg

In de tweede fase zijn de landsdeel-specifieke temperatuur-sterfte relaties *gepooled* tot één relatie voor heel Nederland. Met behulp van dit design kunnen regionale verschillen in temperatuurblootstelling worden meegenomen in tegenstelling tot één fase opzet onderzoeken. Deze techniek is veel gebruikt binnen het internationale Multi-Country multi-City- (MCC) Collaborative Research Network (6), waarbij ook het RIVM is aangesloten, en is in meerdere wetenschappelijke artikelen beschreven (7-9).

Figuur 1. De vier landsdelen (Noord, Oost, Zuid, West) en de gebruikte KNMI stations.



Sterfte

Data over de dagelijkse sterfte (alle doodsoorzaken) voor de periode 2007 tot en met 2019 (mei-september) zijn verkregen in de afgeschermdde omgeving van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Dit zijn data over alle inwoners van Nederland. Op basis van deze data hebben we de dagelijkse sterfte (mei-september) bepaald voor de leeftijdsklasse 75+ jaar. Per landsdeel zijn er geaggregeerde tijdseries gemaakt voor de dagelijkse sterfte op basis van het woonadres van de persoon die overleden was. De gegevens over sterfte zijn gepseudonimiseerd voor het RIVM beschikbaar gesteld. De koppeling met de persoonsgegevens is zodanig uitgevoerd dat het RIVM personen niet kan herleiden. 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 sterftetijfers tijdens de COVID-19-pandemie kunnen mogelijk een verstoring effect hebben in de analyses.

Temperatuur

Data over de dagelijkse en uurlijkse temperatuur zijn verkregen bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). De dagelijkse maximale en gemiddelde temperatuur en de gemiddelde nachttemperatuur (de temperatuur tussen 22:00 en 06:00) zijn voor de volgende meetstations bepaald:

- Noord: Leeuwarden, Eelde
- Oost: Twente, Deelen

- West: De Kooy, Schiphol, Rotterdam, Valkenburg ZH (2007-2016), Voorschoten (2014-2019), De Bilt, Vlissingen
- Zuid: Gilze-Rijen, Volkel, Eindhoven, Maastricht

Alle KNMI-meetstations staan buiten de stad in een open veld om de impact van gebouwen en beplanting op temperatuurmetingen te minimaliseren. Per landsdeel is de gemiddelde temperatuur berekend op basis van de metingen van de betreffende meetstations. Naast de temperatuur is ook de dagelijkse maximale WBGT bepaald voor bovenstaande meetstations. Deze zijn per landsdeel gemiddeld om landsdeel-specifieke WBGT tijdseries te creëren. Ook is de EHF berekend op basis van de landsdeel-gemiddelde temperaturen. Meer informatie over de WBGT en EHF is te vinden in de bijlage.

Statistische analyse

Quasi-Poisson regressiemodellen zijn gebruikt om per landsdeel de relaties te schatten tussen hitte-indicatoren en sterfte. In de modellen is gecorrigeerd voor dag van de week, seizoentrends en langetermijntrends. De specificatie van de variabelen in de modellen is gelijk aan de modellen die zijn gebruikt voor de evaluatie van het Nationaal Hitteplan (2). Afhankelijk van de temperatuurindicator is de blootstelling-responsrelatie (relatieve risico's) geschat op basis van *distributed lag nonlinear models* (dlnm (10)) of binaire indicatoren. Het relatieve risico geschat op basis van dlnm's geeft het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteitstemperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen). De relatieve risico's geschat op basis van binaire indicatoren geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur-categorie in vergelijking met de referentie categorie (zie bijlage voor details per deelonderzoek). De landsdeel-specifieke temperatuur-sterfte relaties zijn *gepooled* tot één blootstelling-responscurve voor Nederland. Meer informatie over de statistische analyse per deelonderzoek is te vinden in de bijlage.

Resultaten en duiding

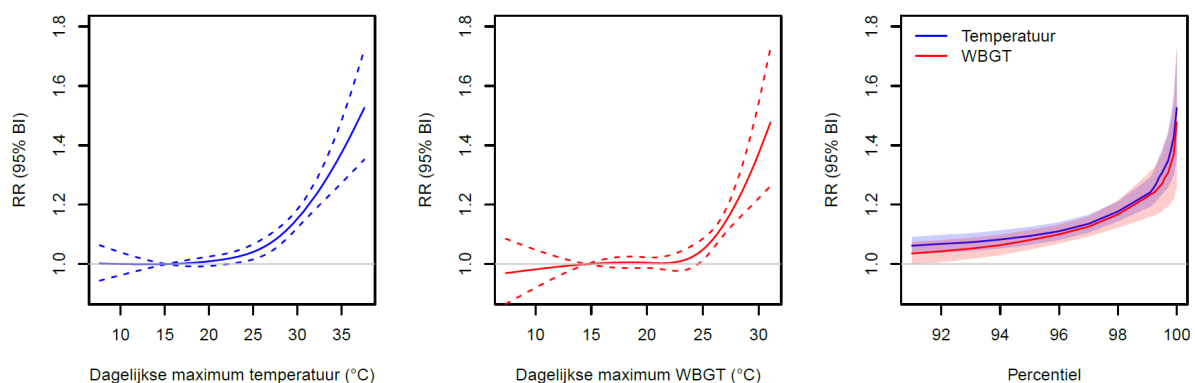
In de periode mei-september 2007-2019 waren er in Nederland in totaal 481.905 sterfgevallen in de 75+ populatie. De gemiddelde dagelijkse maximum temperatuur was het hoogst in het Zuiden en het laagst in het Noorden.

Sterfterisico's op basis van de WBGT en de luchttemperatuur

De WBGT (uitgedrukt in °C) is doorgaans iets lager dan de (lucht)temperatuur (ook uitgedrukt in °C). Bijvoorbeeld, het 99-percentiel in de periode mei-september 2007-2019 was 28.3°C voor de WBGT en 32.3°C voor de (lucht)temperatuur. De correlatie tussen de dagelijkse maximale (lucht)temperatuur en de WBGT is sterk positief (Pearson rho $\sim$ 0.95) in alle landsdelen. Deze sterk positieve correlatie komt deels doordat er een matig negatieve correlatie is tussen de maximale (lucht)temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid (Pearson rho = -0.38 op KNMI meetstation de Bilt). Op warmere dagen is de relatieve luchtvochtigheid doorgaans iets lager dan op minder warme dagen.

De blootstelling-responscurves tonen aan dat er verhoogde sterfterisico's zijn bij hoge dagelijkse maximale temperaturen en ook bij hoge dagelijkse maximale WBGT in de 75+ populatie (Figuur 2). De blootstelling-responscurves voor dagelijkse sterfte zijn redelijk vergelijkbaar voor temperatuur en WBGT; voor zowel de temperatuur als de WBGT geldt dat tussen de 10-20°C de curve vrijwel vlak is en rond de 25°C het sterfterisico sterk stijgt. De vergelijking tussen temperatuur en WBGT op basis van de percentielen laat zien dat de verschillen tussen sterfterisico's bij eenzelfde percentiel minimaal zijn en dat de 95%-betrouwbaarheidsintervallen overlappen. Er is dus geen directe aanwijzing dat sterfterisico's gebaseerd op de WBGT sterker zijn dan sterfterisico's gebaseerd op de temperatuur, of andersom.

Figuur 2. Blootstelling-responscurves voor dagelijkse maximum temperatuur (links), WBGT (midden) en sterfte bij personen van 75 jaar en ouder. In de rechter figuren zijn de temperatuur en WBGT blootstelling-responscurves geplot op basis van de percentielverdeling (vanaf het 90 percentiel (26.2°C temperatuur, 24.3°C WBGT)). Het relatief risico bij bijvoorbeeld het 99-percentiel van de temperatuur is vergeleken met het relatief risico bij het 99-percentiel van de WBGT.



De resultaten van dit onderzoek komen overeen met een internationaal onderzoek naar verschillende hitte-indicatoren en sterfte in 43 landen (11). In West-Europese landen werden geen duidelijke verschillen in sterfterisico's gevonden tussen de (lucht)temperatuur en andere hitte-indicatoren. Dit komt waarschijnlijk door de relatief lage luchtvochtigheid tijdens warme dagen. Daarnaast wordt er in de WBGT rekening gehouden met windsnelheid en zonnestraling. Omdat ouderen en andere kwetsbaren

waarschijnlijk een deel van hun tijd binnen doorbrengen tijdens warme perioden is de impact van met name windsnelheid en zonnestraling beperkt.

Sterfterisico's op basis van de Excess Heat Factor (EHF) en de (lucht)temperatuur

De EHF is een maat voor de hittegolfintensiteit (4). Het vergelijkt de dagelijkse gemiddelde temperatuur met het langetermijngemiddelde (30-jaarsperiode) om aan te geven hoe ongewoon de hitte is. Ook wordt de dagelijkse gemiddelde temperatuur vergeleken met de voorgaande 30 dagen om mogelijke acclimatisatie mee te nemen. De EHF is bepaald op basis van de 3-daags daggemiddelde temperatuur. Er wordt gebruik gemaakt van een *forward lag*, wat betekent dat de temperatuur op een dag en de twee dagen later zijn gebruikt om de EHF te bepalen. Als de dagelijkse gemiddelde temperatuur hoger is dan het 95-percentiel van de dagelijkse gemiddelde temperatuur in de periode 1981-2010, wordt de EHF berekend. Dit betekent dat op een groot aantal dagen de EHF gelijk is aan 0 omdat de temperatuur lager is dan het 95-percentiel. Het is daarom niet mogelijk om blootstelling-responsrelaties te schatten met behulp van een *distributed lag nonlinear model*, zoals gebruikt voor de WBGT. Om temperatuur-sterfterisico's op basis van de EHF en de temperatuur te vergelijken is besloten om binaire indicatoren voor de EHF en de temperatuur te gebruiken. Voor de EHF zijn de dagen gelijk aan of boven het 97.5-percentiel van de EHF in de periode mei-september 2007-2019 gelabeld als een hitte-dag. Hetzelfde is gedaan voor de 3-daags daggemiddelde temperatuur om zo een goede vergelijking te kunnen maken met de EHF. Meer informatie over de EHF is elders te vinden (4).

Afhankelijk van het landsdeel is op 42 – 47 dagen de 3-daags daggemiddelde temperatuur gelijk aan of groter dan het 97.5 percentiel en is ook de EHF gelijk aan of groter dan het 97.5 percentiel. Op 6 - 11 dagen is de EHF gelijk aan of boven het 97.5 percentiel, maar de temperatuur niet; dit zijn voornamelijk dagen aan het begin van het warme seizoen (mei en juni). De dagen dat de temperatuur gelijk aan of boven het 97.5 percentiel is maar de EHF niet, zijn voornamelijk dagen in juli en augustus. Uit de analyses blijkt dat het sterfterisico (relatief risico, RR) op basis van de EHF (RR: 1.04, 95%BI: 1.01, 1.07) gelijk is aan het sterfterisico op basis van de temperatuur (RR: 1.04, 95%BI: 1.01, 1.06). Er is dus geen duidelijk verschil in sterfterisico tussen beide indicatoren. Dit komt mogelijk door het beperkt aantal dagen waarop de EHF is gelabeld als hittedag maar de 3-daags gemiddelde dagtemperatuur niet, of andersom. Hierdoor is de statistische zeggingskracht om mogelijke verschillen tussen de temperatuur en de EHF te onderzoeken, beperkt.

Onderzoek naar de relatie tussen hoge nachttemperaturen en sterfterisico's

De meeste temperatuur-gezondheidsonderzoeken gebruiken de dagelijkse maximale of gemiddelde temperatuur om gezondheidsrisico's te schatten (12). Er is daardoor weinig bekend over de relatie tussen de nachttemperatuur en gezondheid. Als het gedurende de nacht niet afkoelt kan dat leiden tot extra druk op het thermoregulerende systeem door langdurige blootstelling aan hitte. Ook kan het een negatieve invloed hebben op de nachtrust waardoor men mogelijk kwetsbaarder wordt voor hitte (12).

In 2007-2019 waren er afhankelijk van het landsdeel in totaal 100-147 dagen waarop de gemiddelde nachttemperatuur hoger was dan 18°C en 20-46 dagen waarop de gemiddelde nachttemperatuur hoger lag dan 20°C. In het Zuiden en Oosten van Nederland komen hoge nachttemperaturen vaker voor dan in het Westen en Noorden. Uit analyses blijkt dat een nachttemperatuur hoger dan 18°C (RR: 1.02, 95% BI: 1.01, 1.04) en hoger dan 20°C (RR: 1.04, 95% BI: 1.01, 1.06) zijn gerelateerd aan hogere sterfterisico's, onafhankelijk van de dagelijkse maximale temperatuur. Deze resultaten

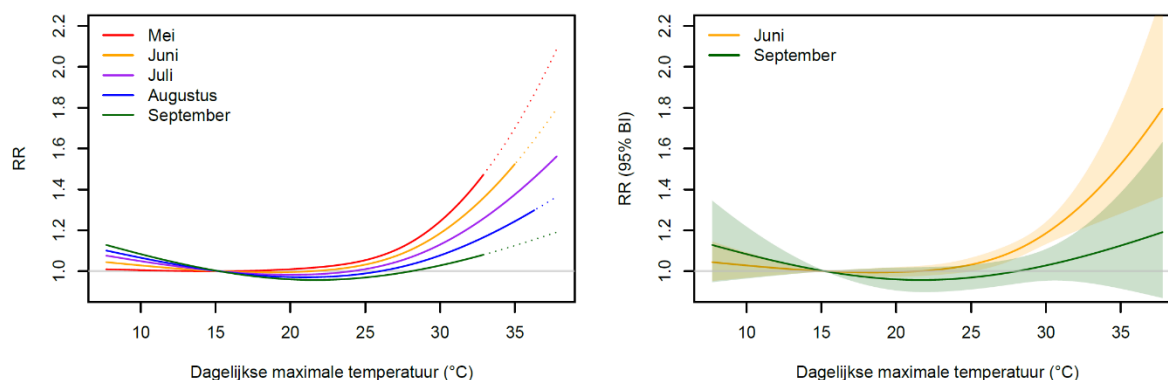
komen overeen met een wereldwijde studie naar hoge nachttemperaturen en sterfte (12). Er is geen vertraagd (*lag*) effect meegenomen voor de nachttemperatuur in verband met complexe relaties met de vertraagde effecten van de dagelijkse maximale temperatuur. Mogelijk zijn de sterfterisico's voor dagen met hoge nachttemperaturen dus een onderschatting van het werkelijke effect. Daarnaast zijn alle temperaturen gemeten op KNMI-metstations gelegen in niet-stedelijke gebieden. Daardoor zijn er geen effecten van stedelijke hitte-eilanden meegenomen. Stedelijke hitte-eilanden zorgen met name 's nachts voor hogere temperaturen.

Verandering in temperatuur-sterfterisico's gedurende de zomer

De meeste epidemiologische studies naar de relatie tussen hoge temperaturen en sterfte schatten één blootstelling-responsrelatie voor de warme maanden. Blootstelling aan hoge temperaturen kan echter leiden tot acclimatisatie, bijvoorbeeld door verhoogde zweetproductie of cardiovasculaire veranderingen gedurende de zomer (13). Doorgaans is een periode van ongeveer 2 weken met hoge temperaturen nodig voor acclimatisatie en neemt dit weer af na ongeveer 3 weken zonder hoge temperaturen (14, 15). Hierdoor kan de gevoeligheid voor hoge temperaturen veranderen gedurende het warme seizoen.

In de maanden mei-september worden de hoogste dagelijkse maximale temperaturen gemeten in de maand juli en de laagste dagelijkse maximale temperaturen in de maanden mei en september. Uit de analyses blijkt dat er temporele verschillen zijn in de temperatuur-sterfterisico's. Bij hoge temperaturen is het sterfterisico het sterkst in mei en het zwakst in september (Figuur 3, Tabel 1). De gevoeligheid voor hitte (uitgedrukt in sterfterisico) lijkt dus groter aan het begin van de zomer dan aan het einde van de zomer. Deze verschillen in temperatuur-sterfterisico's gedurende de zomer zijn ook in andere landen waargenomen (16). Door de lagere temperaturen in het voorjaar is men waarschijnlijk dus gevoeliger voor hitte aan het begin van de zomer. En omdat men gedurende de zomer wordt blootgesteld aan hoge temperaturen vindt er mogelijk acclimatisatie plaats en wordt men minder gevoelig voor hitte aan het einde van de zomer. Verschillen in sterfterisico's bij hoge temperaturen gedurende het warme seizoen kunnen ook komen doordat een aantal mensen dat kwetsbaar is voor hitte sterft tijdens de eerste blootstelling aan hitte in een seizoen. Hierdoor wordt het aantal mensen dat kwetsbaar is voor hitte kleiner gedurende de zomer (aangenomen dat het aantal kwetsbare mensen minder snel toeneemt), waardoor de temperatuur-sterfterisico's lager zijn later in het seizoen.

Figuur 3. Blootstelling-responsrelaties tussen temperatuur en sterfte in mei, juni, juli, augustus en september in de 75+ populatie (links) en in juni en september inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval (BI) (rechts).^a



^a De maand-specifieke blootstelling-responsrelaties zijn geëxtrapoleerd naar de hoogst gemeten dagelijkse maximale temperatuur in alle landsdelen in de gehele studie periode (gestippelde lijn in linker figuur).

Tabel 1. Maand-specifieke temperaturen horend bij een relatief risico van 1.20 en maand-specifieke relatief risico's horend bij een temperatuur van 32.0°C op basis van de blootstelling-response relaties in Figuur 3.^a

Maand	Temperaturen bij Relatief risico = 1.20	Relatieve risico's bij temperatuur = 32.0 °C
Mei	29.3°C	1.39
Juni	30.3°C	1.30
Juli	31.8°C	1.21
Augustus	33.9°C	1.14
September	>37.8°C	1.06

^a De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteitstemperatuur (de temperatuur waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen). De minimum mortaliteitstemperatuur is gebaseerd op regressiemodellen zonder interactieterm voor dag van het seizoen.

Abrupte temperatuurstijgingen en sterfterisico's

Naast acclimatisatie gedurende het warme seizoen, kunnen abrupte temperatuurstijgingen mogelijk ook van invloed zijn op sterfterisico's. Grote verschillen in temperatuur tussen opeenvolgende dagen kunnen mogelijk leiden tot een extra belasting op het thermo-regulerende systeem (17).

Er zijn 15-40 dagen met abrupte temperatuurstijgingen (hier gedefinieerd als een stijging van 4°C of meer in de dagelijkse gemiddelde temperatuur) ten opzichte van *lag* 1 (gisteren) en 70-129 dagen met abrupte temperatuurstijgingen ten opzicht van *lag* 1-5 (afgelopen 5 dagen). Uit de analyses komt geen duidelijke aanwijzing voor verhoogde sterfterisico's bij abrupte temperatuurstijgingen. Relatief risico's bij abrupte temperatuurstijgingen ten opzichte van *lag* 1 (RR = 0.99, 95%BI: 0.96, 1.02) en *lag* 1-5 (RR = 0.98, 95%BI: 0.95, 1.01) zijn niet statistisch significant, met geen duidelijk patroon of indicatie voor een mogelijke relatie. Een verklaring voor de afwezigheid van hogere sterfterisico's bij abrupte temperatuurstijgingen is dat de sterfte doorgaans hoger is bij aanhoudend warme periodes en dat er een vertraagd (*lag*) effect aanwezig is in de temperatuur-sterfterisico's. Door het vertraagde effect is het lastig om effecten van abrupte temperatuurstijgingen te kwantificeren, zeker bij aanhoudend hoge temperaturen. Ook is er in de modellen gecorrigeerd voor de dagelijkse gemiddelde

temperatuur met een *distributed lag nonlinear model*. Onze bevindingen komen overeen met ander onderzoek waarbij geen duidelijke aanwijzingen zijn gevonden voor hogere risico's bij abrupte temperatuurstijgingen (18).

Beschouwing en discussie

Belangrijkste bevindingen

Voor de doorontwikkeling van het Nationaal Hitteplan is verkennend epidemiologisch onderzoek uitgevoerd naar sterfterisico's van verschillende hitte-indicatoren en naar de invloed van mogelijke acclimatisatie op temperatuur-sterfte relaties in de 75+ populatie. Uit de resultaten blijkt dat hoge nachttemperaturen zorgen voor een verhoogd sterfterisico bovenop de risico's van hoge dagelijkse maximale temperaturen. Ook zijn er duidelijke temporele verschillen gevonden in temperatuur-sterfterelaties; de sterfterisico's bij hoge temperaturen zijn groter aan het begin van het warme seizoen dan aan het einde. Er zijn geen aanwijzingen gevonden voor verhoogde sterfterisico's bij abrupte temperatuurstijgingen. Ook blijkt dat verschillen in sterfterisico's tussen de (lucht)temperatuur en de WBGT, en tussen de (lucht)temperatuur en de EHF beperkt zijn.

Beperkingen van deze studie

Er is onderzoek gedaan naar sterfterisico's in de 75+ populatie, omdat dit voor hitte de kwetsbaarste groep is. Er is geen onderscheid gemaakt in oorzaak-specifieke sterfte (cardiovasculair, respiratoir etc.) of andere gezondheidspunten (ziekenhuisopnames, huisartsbezoeken etc.). De bevindingen van deze studie kunnen niet zomaar worden overgenomen voor andere gezondheidspunten. Naast de 75+ populatie zijn er ook nog andere groepen die kwetsbaar zijn voor hitte, zoals mensen met chronische aandoeningen, kleine kinderen en zwangere vrouwen. Deze zijn niet meegenomen in deze studie en ook hier geldt dat de bevindingen voor de 75+ populatie niet zomaar kunnen worden overgenomen voor andere populaties. Vervolgonderzoek is nodig om te evalueren of deze verschillen ook worden waargenomen bij andere gezondheidspunten en andere kwetsbare groepen.

In deze studie is gekeken naar verschillen in sterfterisico's tussen luchttemperatuur en de WBGT en de EHF. Er zijn verschillende andere hitte-indicatoren (UTCI, Heat index, Humidex, etc.) die niet zijn meegenomen in deze studie. Er is een minimaal verschil in sterfterisico tussen de (lucht)temperatuur en de WBGT. Dit komt waarschijnlijk doordat de meest kwetsbare mensen weinig tijd buiten (in de zon) spenderen op hele warme dagen. Hierdoor verwachten wij ook voor andere hitte-indicatoren geen grote verschillen in sterfterisico's in deze populatie ten opzichte van de sterfterisico's gebaseerd op de (lucht)temperatuur. Voor buitenactiviteiten kan de WBGT mogelijk wel een betere indicator zijn voor de impact van hitte op het menselijk lichaam. De EHF is een indicator ontwikkeld om de hittegolfintensiteit aan te geven. Mogelijke acclimatisatie en vertraagde effecten zijn meegenomen in de EHF-indicator en kunnen daarom niet apart in epidemiologische analyses worden geanalyseerd. De EHF gebruikt een *forward lag* wat leidt tot temporele problemen; de blootstelling vindt deels plaats na de sterfte. Hierdoor is het lastig om de risico's te interpreteren. Voor de EHF was het niet mogelijk om een blootstelling-responscurve te schatten met behulp van een *distributed lag nonlinear model*, omdat de EHF op een groot aantal dagen gelijk is aan 0. Er is gebruikt gemaakt van een binaire indicator op basis van het 97.5-percentiel; er zijn geen analyses gedaan op basis van andere percentielen. Door het gebruik van binaire indicatoren is er informatie verloren gegaan over de intensiteit van de hittegolf.

Voor deze studie zijn de gemeten temperaturen op KNMI-meetstations gebruikt. Alle KNMI-meetstations staan buiten de stad in een open veld om de impact van gebouwen en beplanting op temperatuurmetingen te minimaliseren. De meeste mensen wonen echter in stedelijk gebied en het is bekend dat het in de stad warmer kan zijn dan daarbuiten, met name gedurende de nacht. Dit verschil in temperatuur tussen de meetstations en stedelijk gebied kan mogelijk leiden tot een onderschatting van de sterfterisico's. Vervolgonderzoek gebaseerd op temperatuurmetingen in stedelijk gebied is nodig om de relaties tussen hoge nachttemperaturen en gezondheid beter in kaart te brengen.

Beschouwing

Het huidige Nationaal Hitteplan is gebaseerd op meteorologische data en wordt geactiveerd als er een periode van aanhoudende hoge temperaturen wordt verwacht. Voor een verdere doorontwikkeling zou het Nationaal Hitteplan gebaseerd kunnen worden op gezondheidsrisico's bij hoge temperaturen, zoals in andere landen is gedaan (19). De gezondheidsrisico's zouden ook kunnen helpen bij het bepalen van drempelwaardes passend bij de codes geel en oranje. Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan de nachttemperatuur mogelijk een belangrijkere rol krijgen bij overwegingen om het plan te activeren. Gezien de duidelijke verschillen in sterfterisico's aan het begin en aan het einde van het warme seizoen is het ook van belang deze kennis mee te nemen in overwegingen wanneer het Nationaal Hitteplan te activeren. De mogelijkheden voor maand/periode-specifieke drempelwaarde voor het activeren van het Nationaal Hitteplan moeten verder worden onderzocht. Hierbij merken we op dat in dit onderzoek alleen is gekeken naar sterfte in de 75+ populatie en dat deze resultaten niet zomaar overgenomen kunnen worden voor andere gezondheidspunten of andere kwetsbare groepen. Verdere epidemiologische onderbouwing van de gezondheidsrisico's bij hoge temperaturen is daarvoor noodzakelijk. Ook kan worden gedacht aan een evaluatie-cyclus van de gezondheidsrisico's om zo veranderingen in de tijd in hitte-kwetsbaarheid door bijvoorbeeld vergrijzing, verstedelijking en een toename van het aantal mensen met obesitas, mee te nemen en het Nationaal Hitteplan tijdig aan te passen.

Literatuur

1. 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.
2. Klompmaker J, Hagens W. Evaluatie Nationaal Hitteplan. De relatie tussen temperatuur en sterfte. RIVM-rapport 2025-0059. 2025.
3. Budd GM. Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport*. 2008;11(1):20–32.
4. Nairn JR, Fawcett RJ. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. *International journal of environmental research and public health*. 2015;12(1):227–53.
5. KNMI. Hittekracht 2025 [Available from: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/hittekracht>].
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
10. Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm. *Journal of statistical software*. 2011;43(8):1.
11. Lo YE, Mitchell DM, Buzan JR, Zscheischler J, Schneider R, Mistry MN, et al. Optimal heat stress metric for modelling heat-related mortality varies from country to country. *International journal of climatology*. 2023;43(12):5553–68.
12. Royé D, Sera F, Tobias A, Hashizume M, Honda Y, Kim H, et al. Short-term association between hot nights and mortality: a multicountry analysis in 178 locations considering hourly ambient temperature. *Environment international*. 2025:109719.
13. Taylor NA. Human heat adaptation. *Comprehensive Physiology*. 2014;4(1):325–65.
14. Cheung SS, McLellan TM, Tenaglia S. The thermophysiology of uncompensable heat stress: physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Medicine*. 2000;29(5):329–59.
15. Garrett AT, Rehrer NJ, Patterson MJ. Induction and decay of short-term heat acclimation in moderately and highly trained athletes. *Sports medicine*. 2011;41(9):757–71.
16. Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Tobias A, Zanobetti A, et al. Changes in susceptibility to heat during the summer: a multicountry analysis. *American journal of epidemiology*. 2016;183(11):1027–36.
17. Martinez-Nicolas A, Meyer M, Hunkler S, Madrid JA, Rol MA, Meyer AH, et al. Daytime variation in ambient temperature affects skin temperatures and blood pressure: ambulatory winter/summer comparison in healthy young women. *Physiology & behavior*. 2015;149:203–11.
18. Vicedo-Cabrera AM, Forsberg B, Tobias A, Zanobetti A, Schwartz J, Armstrong B, et al. Associations of inter-and intraday temperature change with mortality. *American journal of epidemiology*. 2016;183(4):286–93.
19. Marghidan CP, Mokkenstorm L. Hittewaarschuwingen: Doorontwikkeling Nationaal Hitteplan RIVM en verdere integratie met waarschuwingssystematiek KNMI. KNMI; 2026.
20. Liljegren JC, Carhart RA, Lawday P, Tschopp S, Sharp R. Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements. *Journal of occupational and environmental hygiene*. 2008;5(10):645–55.
21. Sera F, Armstrong B, Blangiardo M, Gasparrini A. An extended mixed-effects framework for meta-analysis. *Statistics in Medicine*. 2019;38(29):5429–44.
22. Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of statistical software*. 2010;36:1–48.

Bijlage

Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)

De WBGT is berekend met de Liljegren-methode,(20) waarin uurlijkse meteorologische variabelen worden gebruikt (luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, straling en windsnelheid). Voor alle KNMI-meetstations die zijn meegenomen in dit onderzoek zijn uurlijkse WBGT-tijdseries opgesteld van 2007 tot en met 2019. Daarna is per dag de dagelijkse maximale WBGT bepaald voor elk meetstation. Vervolgens zijn deze per landsdeel gemiddeld om landsdeel-specifieke WBGT-tijdseries te creëren.

Excess Heat Factor (EHF)

De EHF is berekend volgens de methode beschreven door Nairn en Fawcett (4). Deze methode kwantificeert de intensiteit van hittegolven door twee aspecten te combineren:

- hoe uitzonderlijk warm een driedaagse periode is ten opzichte van het langjarig klimaat
- de afwijking in temperatuur ten opzichte van de recente temperatuurgeschiedenis (de voorafgaande 30 dagen).

Voor de berekening is gebruikgemaakt van de landsdeel-gemiddelde dagelijkse temperatuur, gebaseerd op de KNMI meetstations zoals weergegeven in Figuur 1. Het 95e percentiel van de dagelijkse gemiddelde temperatuur is vastgesteld op basis van het klimaatnormaal 1981–2010, waarbij alle dagen van het jaar zijn meegenomen. De resulterende drempelwaarden bedragen 18,9°C voor Noord-Nederland, 20,0°C voor Oost-Nederland, 19,4°C voor West-Nederland en 20,4°C voor Zuid-Nederland.

De eerste component van de EHF, de significance index (EHIsig), vergelijkt de gemiddelde temperatuur over drie opeenvolgende dagen met de landsdeel-specifieke 95-percentieldrempel. Een positieve waarde duidt op omstandigheden die voor dat gebied uitzonderlijk warm zijn. De tweede component, de acclimatisation index (EHiaccl), vergelijkt dezelfde driedaagse gemiddelde temperatuur met het gemiddelde van de voorafgaande dertig dagen. Hiermee wordt vastgelegd of de hitte plotseling optreedt ten opzichte van recente temperaturen; een hogere waarde wijst op beperkte acclimatisatie van zowel mensen als systemen.

Significance index (EHIsig):

$$EHF_{sig} = \left(\frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \right) - T_{95}$$

Acclimatisation index (EHiaccl):

$$EHF_{accl} = \left(\frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \right) - \left(\frac{T_{-1} + T_{-2} + \dots + T_{-30}}{30} \right)$$

De uiteindelijke EHF wordt berekend als het product van beide componenten, waarbij alleen positieve waarden van de significance index bijdragen. Het acclimatisatie-effect wordt daarbij uitsluitend meegewogen wanneer er al sprake is van uitzonderlijke hitte ten opzichte van het langjarig klimaat ($EHIsig > 0$). Hierdoor worden alleen perioden die volgens het langetermijnklimaat als hittegolf kunnen worden beschouwd meegenomen, maar de intensiteit van de hittegolf wordt versterkt wanneer die hitte abrupt optreedt ten opzichte van de recente dertig dagen.

EHF:

$$EHF = \max(0, EHF_{sig}) \times \max(1, EHF_{accl})$$

Statistische analyse

Quasi-Poisson regressiemodellen zijn gebruikt om per landsdeel relaties te schatten tussen de temperatuur en sterfte. In de modellen is gecorrigeerd voor dag van de week, seizoentrends en langetermijntrends. De specificatie van de modellen is gelijk aan de modellen die zijn gebruikt voor de evaluatie van het Nationaal Hitteplan (2).

Om de blootstelling-responsrelatie tussen continue temperatuurindicatoren en sterfte te schatten, maken we gebruik van *distributed lag nonlinear-models (dlnm)*(10) 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 hebben we gebruikgemaakt van een *natural cubic spline* met 2 knopen (knots) geplaatst op het 50^e en 90^e percentiel van de temperatuurverdeling. 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. De relatieve 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).

Analyse per deelonderzoek

Voor het evalueren van de sterfterisico's op basis van de dagelijkse maximale (lucht)temperatuur en de dagelijkse maximale WBGT zijn quasi-poisson regressiemodellen gebruikt met een *dlnm*. Er zijn aparte analyses gedaan voor de (lucht)temperatuur en de WBGT. Voor beide indicatoren zijn de landsdeel-specifieke blootstelling-responscurves *gepooled* met een *Extended Mixed-Effects Framework for Meta-Analysis*(21) tot één blootstelling-responscurve voor Nederland. In de meta-regressie modellen zijn de landsdeel-specifieke gemiddelde en range van de betreffende indicator meegenomen als verklarende variabelen. Voor het vergelijken van de temperatuur en WBGT blootstelling-responscurves zijn de temperatuur- en WBGT-curves samen in één figuur geplot op basis van de percentielverdeling. De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur/WBGT in vergelijking met de minimum mortaliteitstemperatuur/WBGT (de temperatuur/WBGT waarbij het laagste sterfterisico wordt waargenomen).

Voor het evalueren van de sterfterisico's op basis van de EHF was het niet mogelijk om relaties te evalueren met behulp van *dlnm*'s, omdat de EHF geen continue indicator is. Daarom is gebruik gemaakt van een binaire indicator. Om risico's tussen de EHF en de temperatuur te kunnen vergelijken is ook een binaire indicator op basis van de 3-daags daggemiddelde luchttemperatuur gebruikt. Voor beide indicatoren zijn de dagen gelijk aan of boven het indicator-specifieke 97.5-percentiel gelabeld als een hitte dag. Voor beide indicatoren zijn separate analyses gerund en de landsdeel-specifieke sterfterisico's zijn *gepooled* met een *random-effects meta-analysis* (22). De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer op een hitte dag in vergelijking met een niet-hitte dag.

Voor het evalueren van de relatie tussen hoge nachttemperaturen en sterfterisico's is gebruikt gemaakt van uurlijkse temperatuurmetingen op de KNMI meetstations. Op basis van de nachttemperaturen (tussen 22:00-6:00) zijn dagen gelabeld met een nachttemperatuur boven de 18°C en boven de 20°C (binair indicatoren). Deze indicatoren zijn separaat toegevoegd aan een quasi-Poisson regressiemodel met een *dlnm* voor de maximale temperatuur. Vervolgens zijn de landsdeel-specifieke sterfterisico's van de nachttemperatuur *gepooled* met een *random-effects meta-analysis* (22). Het sterfterisico van de nachttemperatuur is dus gecorrigeerd voor de dagelijkse maximale temperatuur. De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer op een dag met een hoge nachttemperatuur (18°C of 20°C+) in vergelijking met een dag zonder hoge nachttemperatuur.

Voor het evalueren van veranderingen in temperatuur-sterfterisico's gedurende de zomer is gebruikt gemaakt van de dagelijkse maximale temperatuur. Er zijn quasi-poisson regressie modellen gebruikt met een *dlnm*, zoals hierboven beschreven. Aan de quasi-Poisson regressiemodellen is een interactieterm toegevoegd om de blootstelling-responscurve te kunnen schatten voor half mei, juni, juli, augustus en september. De

interactieterm is gespecificeerd tussen de *dlnm* en een indicator voor de dag van het seizoen. De landsdeel- en maand-specifieke curves zijn vervolgens *gepooled* tot land- en maand-specifieke curves in meta-regressie modellen (*Extended Mixed-Effects Framework for Meta-Analysis* (21)). De maand-specifieke blootstelling-responsrelaties zijn geëxtrapoleerd naar de hoogst gemeten dagelijkse maximale temperatuur in alle landsdelen in de gehele studie periode. De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer bij een bepaalde temperatuur in vergelijking met de minimum mortaliteitstemperatuur. De minimum mortaliteitstemperatuur is gebaseerd op regressiemodellen zonder interactieterm voor dag van het seizoen.

Voor het evalueren van de relatie tussen abrupte temperatuurstijgingen en sterfterisico's is gebruik gemaakt van de dagelijkse gemiddelde temperatuur. Er zijn twee verschillende abrupte temperatuurstijgingsindicatoren gebruikt: temperatuurverschil tussen *lag* 0 en *lag* 1 (tussen vandaag en gisteren) en het temperatuurverschil tussen *lag* 0 en *lag* 1-5 (tussen vandaag en het gemiddelde van de afgelopen 5 dagen). Om alleen op abrupte temperatuurverschillen te focussen zijn binaire indicatoren gemaakt. Een dag is gelabeld als dag met een abrupte temperatuurstijging als de dagelijkse gemiddelde temperatuur boven de 15°C was, en het temperatuurverschil met de dag(en) daarvoor meer dan 4°C was. Deze indicatoren zijn separaat toegevoegd aan een quasi-Poisson regressiemodel met een *dlnm* voor de dagelijkse gemiddelde temperatuur. Vervolgens zijn de landsdeel-specifieke sterfterisico's van de abrupte temperatuurstijging *gepooled* met een *random-effects meta-analyse* (22). Het sterfterisico van de abrupte temperatuurstijging is dus gecorrigeerd voor de gemiddelde dagtemperatuur. De relatieve risico's geven het extra mortaliteitsrisico weer op een dag met een abrupte temperatuurstijging (4°C+ t.o.v. de dag(en) daarvoor) in vergelijking met een dag zonder abrupte temperatuurstijging.