

Maßzahlen zur Gesundheit von Bevölkerungen richtig interpretieren und kommunizieren

Das Konzept der umweltbedingten Krankheitslast - Chancen und Herausforderungen

VDI-Handlungsempfehlung
Mai 2023

Zusammenfassung

Wie lässt sich die gesundheitliche Belastung einer Bevölkerung durch Umweltrisiken beschreiben? Wie können die Auswirkungen unterschiedlicher Umweltrisiken auf das Krankheitsgeschehen miteinander verglichen werden? Können die Belastungssituationen und das Krankheitsgeschehen in verschiedenen Regionen miteinander verglichen werden?

Diese Fragen beschäftigen die gesundheitswissenschaftliche Forschung, die Gesundheitsversorgung und die Gesundheitspolitik bereits seit einigen Jahrzehnten. Aber auch die Öffentlichkeit und die Medien sind an diesen Themen interessiert. Denn ein nicht unerheblicher Teil an finanziellen staatlichen und nicht-staatlichen Anstrengungen und Aufwendungen zielt darauf ab, die Gesundheit einer Bevölkerung zu fördern, zu erhalten, (wieder)herzustellen und Krankheiten und ihre Folgen zu bewältigen. Dazu werden Programme aufgelegt und Strukturen und Prozesse für Ausbildung, Prävention, Gesundheitsförderung, Gesundheitsschutz, Krankenversorgung sowie Rehabilitation geschaffen.

Aber auf welcher Grundlage werden diese Entscheidungen gefällt? Welches Instrument kann zu einer gesicherten Empfehlung führen und als Entscheidungsgrundlage dienen?

Eine wichtige und weltweit angewendete Entscheidungshilfe bietet das **Konzept der umweltbedingten Krankheitslast**, dessen Grundlage – die Berechnung der Krankheitslast – bereits in den 1990er-Jahren von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Zusammenarbeit mit der „Harvard School of Public Health“ und der Weltbank entwickelt wurde. Mit den in diesem Konzept verwendeten Indikatoren und Maßzahlen kann die Krankheitslast in allen Ländern der Welt umfassend und vergleichbar dargestellt werden. Die Maßzahlen zeigen die Bedeutung der Zusammenhänge zwischen Umwelt und Gesundheit auf und es können Vergleiche unterschiedlicher umweltbedingter Risikofaktoren untereinander, aber auch mit anderen

Risikofaktoren und mit anderen Regionen, ermöglicht werden.

Aufgrund seines starken Aussagecharakters wird das Konzept als wertvolle Grundlage bei politischen Entscheidungsprozessen und bei der Gestaltung von Ordnungspolitik herangezogen wie bei der aktuellen europäischen Gesetzgebung zur Luftreinhaltung (siehe hierzu auch Abschnitt 4).

Häufig werden die Berechnungsergebnisse aus Krankheitslaststudien in den Medien sehr plakativ verwendet. Aussagen wie „400.000 Europäer sterben jedes Jahr wegen schmutziger Luft“ [1] sind zwar sehr ausdrucksstark, führen aber häufig zu Fehlinterpretationen und zu ungerechtfertigter Verunsicherung der Bevölkerung.

Die vorliegende VDI-Publikation hat zum Ziel,

- die **Prinzipien der Krankheitslastberechnung** verständlich zu beschreiben,
- die verwendeten **Maßzahlen** des Konzepts vorzustellen,
- den **Nutzen der Maßzahlen** herauszustellen,
- auf **Fallstricke bei der Interpretation** der Maßzahlen hinzuweisen,
- das Konzept anhand eines **Beispiels** zu erläutern und
- Hinweise für einen **richtigen Umgang mit Berechnungsergebnissen** zu geben.

Damit wird dem Fachpublikum, den Entscheidungstragenden in Politik, Verwaltung und Praxis und einer interessierten Fachöffentlichkeit eine verständliche und praktikable Hilfestellung gegeben, was die Maßzahlen aussagen und wie sie in der öffentlichen Kommunikation richtig eingeordnet und verwendet werden können.

Düsseldorf im Mai 2023

Inhalt

Zusammenfassung	1
1 Das Konzept der Krankheitslast	3
1.1 Was steckt hinter dem Begriff Krankheitslast?	3
1.2 Das Konzept der umweltbedingten Krankheitslast (engl. Environmental Burden of Disease; EBD)	4
1.3 Welche Maßzahlen werden am häufigsten verwendet und wie werden sie berechnet?	5
1.4 Eingangsdaten und Aussagekraft	7
1.5 Anwendungsperspektiven	8
2 Fallstricke der Interpretation - Probleme und Lösungsvorschläge	10
3 Fazit	13
4 Beispiel	14
Glossar	15
Mitglieder des Arbeitsgremiums	17
Schrifttum	18

1 Das Konzept der Krankheitslast

1.1 Was steckt hinter dem Begriff Krankheitslast?

Wie lässt sich die **Belastung einer Bevölkerung** durch Erkrankungen und den daraus resultierenden Todesfällen beschreiben? Wie können die Auswirkungen unterschiedlicher Risikofaktoren (Erklärung siehe blauer Kasten am Ende des Abschnitts) auf die Krankheitslast in einer Bevölkerung verglichen werden? Wie können aus solchen Vergleichen sinnvolle und evidenzbasierte Schlüsse für gesundheits- und umweltpolitische Maßnahmen gezogen werden?

Diese Fragen beschäftigen die gesundheitswissenschaftliche Forschung, die Gesundheitsversorgung und die Gesundheitspolitik bereits seit einigen Jahrzehnten. Es gibt verschiedene Gesundheitsindikatoren, mit denen das Krankheitsgeschehen in einer Bevölkerung abgebildet werden kann. Klassische epidemiologische Indikatoren, z. B. die Häufigkeit von bestehenden Erkrankungen (Prävalenz), die Anzahl der Sterbefälle als ein zentraler Indikator der Todesursachenstatistik, die Sterberate und die Anzahl an Neuerkrankungen pro Zeiteinheit (Inzidenz) bilden jeweils nur einzelne Dimensionen von Gesundheit und Krankheit ab. Ein direkter Vergleich von Erkrankungen mit unterschiedlichen Beschwerden, Verläufen, Schweregraden und Prognosen ist anhand dieser Indikatoren nur eingeschränkt möglich.

Aus diesem Grund wurde in den 1990er-Jahren das Konzept der **Krankheitslast** (engl. Burden of Disease; BoD) von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Zusammenarbeit mit der „Harvard School of Public Health“ und der Weltbank entwickelt [3]. Die in diesem Konzept verwendeten Indikatoren sollen dazu dienen, die Krankheitslast in allen Ländern der Welt umfassend und vergleichbar darzustellen. Darüber hinaus gibt es viele Krankheitslaststudien auf nationaler Ebene, die auf Basis einer verbesserten Datengrundlage Krankheitslastberechnungen für die betreffenden Länder sowie differenziert nach subnationalen Regionen durchgeführt haben (für Deutschland siehe [34; 35]).

All diese Berechnungen zur Krankheitslast quantifizieren den Verlust an gesunder Lebenszeit der Bevölkerung aufgrund des Lebens mit Erkrankungen und Verletzungen sowie des Versterbens (die sogenannte „Krankheitslast“). Das Konzept setzt bei der Berechnung der Krankheitslast ein normatives Ziel voraus: alle Menschen auf der Welt sollen die Möglichkeit haben, bis ins hohe Alter gesund zu leben. Jedwede Abweichung von diesem normativ gesetzten globalen Gesundheitsziel wird als Verlust an Gesundheit, gege-

benenfalls an Lebenszeit und somit als Krankheitslast angesehen.

Neben der Krankheitslast durch einzelne Erkrankungen kann in dem Konzept zudem **der Anteil der Krankheitslast bestimmt werden, der auf verschiedene Risikofaktoren zurückzuführen ist** [4]. Die „Global Burden of Disease (GBD)-Studie“ des „Institutes for Health Metrics and Evaluation“ (IHME), die maßgebend für die Weiterentwicklung der Krankheitslastmethode ist, berücksichtigt bei den Berechnungen alle Erkrankungen sowie alle Länder der Welt und führt Berechnungen für eine große Zahl an Risikofaktoren durch [9]. Bei dieser umfassenden und vergleichenden Schätzung der Krankheitslast können auch Lücken in der Datenbasis aufgedeckt werden. Diese werden mittels moderner statistischer Methoden gefüllt, sodass trotz einer mangelhaften Datenlage Aussagen über bestimmte Erkrankungen möglich sind. Dies ist vor allem für Länder mit einem niedrigeren und mittleren Einkommen (engl. low and middle income countries) und gering entwickelter Infrastruktur relevant. So ist beispielsweise in einigen Ländern die Todesursachenstatistik nicht vollständig oder fehlerhaft. Auch in Ländern mit hohem Einkommen (engl. high income countries) ist die Qualität der Todesursachenstatistik eingeschränkt [33]. Erst nach Korrektur können die wichtigsten Todesursachen in einem Land sinnvoll beschrieben und interpretiert werden [5; 6].

Bei der Berechnung der Krankheitslast werden verschiedene **Maßzahlen** verwendet, um das Krankheits- und Sterbe geschehen in einer Bevölkerung zu quantifizieren und die einzelnen Krankheiten und Risikofaktoren in ihrem Einfluss auf die Bevölkerungsgesundheit vergleichbar zu machen. Hierzu gehören unter anderem

- die Anzahl der Sterbefälle,
- die durch diese Sterbefälle verlorenen Lebensjahre (engl. Years of Life Lost, YLL),
- durch Krankheit eingeschränkte Jahre (engl. Years Lived with Disability, YLD) und
- die durch Krankheit und Sterbefälle verlorenen Lebensjahre insgesamt (engl. Disability-Adjusted Life Years, DALY; das heißt YLL + YLD).

Insgesamt betrachtet hat sich das globale Krankheitsgeschehen in den letzten Jahrzehnten so stark gewandelt, dass auch die Gesundheitsindikatoren entsprechend der beobachteten Trends angepasst werden mussten [2]. In vielen Ländern der Welt sind, zumin-

dest bis zum Beginn der Corona-Pandemie, Infektionskrankheiten, die häufig schnell zum Tod führen können, stark zurückgegangen. Chronische Erkrankungen wie Diabetes oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen, die mit einer langen Erkrankungsdauer einhergehen, sind hingegen deutlich angestiegen. Die DALY berücksichtigen als Summenmaß sowohl das Sterbengeschehen (Mortalität) in Form von verlorenen Lebensjahren als auch die Morbidität in Form von gesunder Lebenszeit, die durch das Leben mit gesundheitlichen Einschränkungen verloren geht [7]. Somit können die zwei zentralen Dimensionen der Gesundheit in diesem einen Summenmaß dargestellt werden.

Für die Planung und Durchführung von Präventions- und Interventionsmaßnahmen ist es wichtig, nicht nur die Krankheitslast, die durch Erkrankungen und Verletzungen entsteht, zu kennen, sondern auch den Anteil dieser Erkrankungen oder Verletzungen, der auf bestimmte Risikofaktoren zurückzuführen ist. Dieser kann im Rahmen von Krankheitslaststudien ebenfalls berechnet werden. So lässt sich im Rahmen der sogenannten „vergleichenden Risikobewertung“ (engl. Comparative Risk Assessment (CRA)) beispielsweise ermitteln, welche Risikofaktoren in Deutschland vorwiegend für Herzinfarkte verantwortlich sind und damit bei der Prävention besonders ins Auge gefasst werden sollten. Die auf einen bestimmten Risikofaktor zurückführbare Krankheitslast wird als „attributable Krankheitslast“ bezeichnet [8].

Ergebnisse zur (attributablen) Krankheitslast können Entscheidungsträgerinnen und -trägern daher wichtige zusätzliche Informationen zur Bedeutung verschiedener Erkrankungen für den Gesundheitszustand der Bevölkerung und zu den zugrunde liegenden Risikofaktoren liefern. Sie ermöglichen darüber hinaus das kontinuierliche und standardisierte Monitoring der Krankheitslast im Zeitverlauf und können dadurch aufzeigen, wie sich die Bedeutung von Krankheiten und Risikofaktoren entwickelt und wo gezielte Präventions- und Interventionsmaßnahmen zur Senkung der Krankheitslast etabliert werden sollten.

Des Weiteren können Ergebnisse zur Krankheitslast auch zur Einschätzung der Wirksamkeit von gesundheitspolitischen Maßnahmen eingesetzt werden. So zeigt die GBD-Studie z. B. deutlich die Wirkung von Impfungen auf die Krankheitslast durch Masern: Diese ist infolge ausreichender Durchimpfungsraten in vielen Ländern deutlich gesunken [9].

Durch Überführung der Krankheitslast in gemeinsame standardisierte Indikatoren wie die „durch Krankheit und Sterbefälle verlorenen Lebensjahre insgesamt“ (DALY) können Krankheitslasten in Regionen mit sehr unterschiedlichen Erkrankungsmustern verglichen werden. So geht z. B. die größte Krankheitslast in Westeuropa von bösartigen Neubildungen und

Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems aus, während die Krankheitslast in Subsahara-Afrika durch Erkrankungen von Müttern und Neugeborenen sowie von Infektionskrankheiten dominiert wird [10].

Bei der Betrachtung der standardisierten Ergebnisse zur Krankheitslast in unterschiedlichen Regionen oder Ländern können diese voneinander lernen. So könnten z. B. Maßnahmen, die in einem Land zu einer Reduktion der Krankheitslast geführt haben, auch handlungsleitend für gesundheits- und umweltpolitische Maßnahmen in anderen Ländern sein.

Neben der reinen Ermittlung der gesundheitlichen Auswirkungen können die Ergebnisse von Krankheitslaststudien auch als Grundlage für die monetäre Bewertung herangezogen werden. Solche Indikatoren werden bei knapper werdenden Ressourcen zunehmend bei politischen Entscheidungsprozessen eingefordert.

Die verschiedenen Maßzahlen der Krankheitslast werden in Abschnitt 2.3 erläutert und Beispiele für ihre Anwendung gegeben.

1.2 Das Konzept der umweltbedingten Krankheitslast (engl. Environmental Burden of Disease; EBD)

Die **umweltbedingte** Krankheitslast stellt eine Anwendung des Konzepts der Krankheitslast und im speziellen des „Comparative Risk Assessment-Konzepts“ in dem Feld der **Umweltrisikofaktoren** dar [11]; [12]. Umweltbedingte Risikofaktoren sind objektiv fassbare Einflüsse aus der Umwelt, die die Gesundheit schädigen können. Dies können unter anderem chemische Stoffe, wie Schwermetalle und Feinstaub inkl. seiner Inhaltsstoffe, physikalische Faktoren wie Lärm, Strahlung, Wetter und Klima oder mikrobiologische Faktoren sein [11]. Für solche und andere Risikofaktoren kann jeweils deren Anteil an der Krankheitslast in einer Bevölkerung berechnet werden. **Mit diesem Ansatz soll die Bedeutung der Zusammenhänge zwischen Umwelt und Gesundheit untersucht und ein Vergleich unterschiedlicher umweltbedingter und anderer Risikofaktoren ermöglicht werden.** Das Wissen über die Höhe der attributablen Krankheitslast infolge eines umweltbedingten Risikofaktors ist wichtig für die Priorisierung von (präventiven) umwelt- und gesundheitspolitischen Maßnahmen. So fließen unter anderem Krankheitslastberechnungen aufgrund von Luftverschmutzung mit Feinstaub und Stickstoffdioxid in die Überprüfung der europäischen Gesetze zur Luftreinhaltung oder in die Bewertung der Effektivität von Luftreinhalteplänen ein. Das Beispiel zur Anwendung des Konzepts der umweltbedingten Krankheitslast bei der Gesetzgebung zur Luftreinhaltung in der EU wird ausführlich im blauen Kasten am Ende des Abschnitts 4 erläutert.

1.3 Welche Maßzahlen werden am häufigsten verwendet und wie werden sie berechnet?

Sowohl bei den Analysen der Krankheitslast allgemein als auch bei der Berechnung der umweltbedingten Krankheitslast werden am häufigsten die Maßzahlen „Todesfälle“, „verlorene Lebensjahre durch Versterben“ (engl. Years of Life Lost, YLL) und „die in eingeschränkter Gesundheit gelebten Jahre“ (engl. Years Lived with Disability, YLD) sowie die Summe aus den beiden letztgenannten, die sogenannten „durch Krankheit und Sterbefälle verlorenen Lebensjahre insgesamt“ (engl. Disability-Adjusted Life Years, DALY) verwendet [24; 25]. Als ein weiterer Indikator kann zudem die „Reduktion der Lebenserwartung“ berechnet werden.

Dem Krankheitslast-Konzept liegt die Annahme zugrunde, dass alle Personen auf der Welt, je nach Alter, statistisch gesehen noch eine gewisse Anzahl an weiteren Jahren zu leben haben. Durch den Tod vor dem Erreichen der statistischen Lebenserwartung geht jedoch eine bestimmte Anzahl an Lebensjahren verloren. Darüber hinaus geht, durch das Leben mit einer Erkrankung, ebenfalls eine bestimmte Menge an gesunder Lebenszeit verloren. Auch diese Lebenszeiten werden bei der Berechnung der Krankheitslast einer Bevölkerung mitberücksichtigt, da sie erhebliche individuelle, familiäre und gesellschaftliche Folgen haben können.

Todesfälle und verlorene Lebensjahre durch Versterben (Years of Life Lost, YLL)

Die Todesursachenstatistik stellt auch heute noch eine wichtige Informationsquelle dar. In der Todesursachenstatistik werden alle Todesfälle und die dazugehörigen Todesursachen entsprechend internationaler Standards erfasst. Sterbefälle sind auch ein zentrales Maß in Untersuchungen zur Krankheitslast. Im üblichen Sprachgebrauch wird bei Analysen der Krankheitslast häufig der Begriff „vorzeitige Todesfälle“ oder premature deaths verwendet. Bei dieser Art des Indikators wird die Anzahl der Todesfälle gezählt, die sich vor dem Erreichen eines bestimmten Lebensalters (z. B. von 65 Jahren) oder der durchschnittlichen statistischen Lebenserwartung ereignen. Stirbt eine Person vor Erreichen dieser normativ gesetzten Grenze wird dieser Todesfall als „vorzeitig“ bezeichnet. Nur bei Verwendung eines festen Werts für die minimal erreichbare Länge des Lebens (z. B. 65 Jahre) ist der Begriff „vorzeitig“ korrekt anwendbar.

Die meisten aktuellen Krankheitslastanalysen verwenden jedoch keine feste Grenze, sondern nutzen die altersspezifische Restlebenserwartung zum Zeitpunkt des Todes, womit im Grunde jeder Tod „vorzeitig“ wäre, da statistisch gesehen bis ins sehr hohe Alter eine, wenn auch nur geringe, Restlebenserwartung verbleibt. **Der Zusatz „vorzeitig“ ist somit bei einer solchen Analyse überflüssig und man sollte z. B. bei den Berechnungen zum risikospezifischen Anteil korrekterweise von „attributablen Todesfällen“ sprechen.**

Years of Life Lost (YLL) bezeichnen im Anschluss daran die Anzahl an Lebensjahren, die durch Versterben vor Erreichen eines bestimmten Lebensalters verloren gehen. Im Gegensatz zu der Anzahl an Todesfällen wird bei den YLL also auch das Alter der Versterbenden berücksichtigt. Zur Ermittlung der YLL muss zunächst eine Lebenserwartung als Referenz festgelegt werden. Dies kann ein fester Wert sein (z. B. 65 Jahre), die durchschnittliche statistische Lebenserwartung der Bevölkerung eines Landes bei Geburt oder die statistische Restlebenserwartung der betreffenden Altersgruppe zum Zeitpunkt des Todes. In allen Fällen werden die YLL berechnet, indem die verlorenen Jahre für alle Verstorbenen aufaddiert werden. Wie bei den Todesfällen können die Ergebnisse aufgeteilt nach Krankheit präsentiert oder in einem weiteren Schritt der attributable Anteil je Risikofaktor bestimmt werden.

Verlorene Lebensjahre durch Gesundheitseinschränkungen (Years Lived with Disability, YLD)

Years Lived with Disability sind die Lebensjahre, die mit eingeschränkter Gesundheit verbracht werden. Zur Berechnung der YLD werden die Krankheitsfälle in der Bevölkerung (z. B. binnen eines Jahres) mit einem Gewichtungsfaktor für den Schweregrad dieser Erkrankung (engl. disability weight) multipliziert. Durch die Nutzung des disability weights werden die Lebensjahre je nach Erkrankungsschwere unterschiedlich gewichtet. So bekommt eine Erkrankung, die mit einer schweren Beeinträchtigung der Lebensqualität einhergeht (z. B. ein Zustand nach Schlaganfall mit Halbseitenlähmung) ein höheres Gewicht als ein gut eingestellter „Diabetes mellitus“ ohne Komplikationen. Ziel ist es, die Dauer und Schwere einer Erkrankung so zu quantifizieren, dass sie mit anderen Erkrankungen verglichen werden und mit den durch Versterben (Mortalität) verlorenen Lebensjahren kombiniert werden kann.

Der Gewichtungsfaktor disability weight gewichtet den Schweregrad von gesundheitlichen Beeinträchtigungen auf einer Skala von 0 bis 1. „0“ stellt einen

optimalen Gesundheitszustand ohne Beeinträchtigungen dar und „1“ steht für einen Zustand mit der höchstmöglichen gesundheitlichen Einschränkung, die dem Tod gleichgesetzt werden kann. Für die GBD-Studie wurden diese Gewichtungsfaktoren mithilfe von Bevölkerungsbefragungen in unterschiedlichen Regionen der Welt abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass diese disability weights keinesfalls auf jeden Einzelfall zutreffen, sondern einen Durchschnittswert der Einschätzungen von großen Bevölkerungsgruppen darstellen. Zusätzlich zu den disability weights für die Erkrankungsschwere werden Krankheitszustände (z. B. akute Infektionen), die häufig kurz verlaufen und bei denen eine schnelle vollständige Genesung folgt, anhand einer durchschnittlichen Dauer im Vergleich zu chronischen Erkrankungen in ihrem Gewichtungsfaktor abgestuft.

Durch Krankheit und Sterbefälle verlorene Lebensjahre (Disability-Adjusted Life Years, DALY)

Die Maßeinheit Disability-Adjusted Life Years zeigt auf, wie viele Lebensjahre in der gesamten Bevölkerung aufgrund von Erkrankungen und Risikofaktoren verloren gehen. Es handelt sich beim DALY also um ein sogenanntes health gap measure, ein Maß, das Gesundheitsverluste in Jahren angibt.

Das Maß DALY vereint die Maße YLL und YLD zur Krankheitslast insgesamt und ermöglicht somit die gemeinsame Betrachtung des Sterbegeschehens (Mortalität) und des Krankheitsgeschehens (Morbidität) in einem Indikator. Mithilfe von DALY kann die Krankheitslast infolge unterschiedlicher Erkrankungen und Risikofaktoren verglichen werden. Hervorzuheben ist, dass anders als bei den Todesfällen oder den dadurch verlorenen Lebensjahren, auch die Last durch Krankheiten, die nicht oder selten zum Tod führen, mitberücksichtigt wird. Dies ist besonders wichtig, wenn die Häufigkeit an chronischen Erkrankungen zunimmt und ein großer Teil der Bevölkerung davon betroffen ist. Bild 1 verdeutlicht die Berechnung der DALY.

Bei der Interpretation des englischen Begriffs disability ist zu berücksichtigen, dass dieser nicht gleichbedeutend mit dem deutschen Begriff der Behinderung ist. Unter dem Begriff disability wird die gesundheitliche Einschränkung verstanden, die aus verschiedenen Erkrankungszuständen (Schweregraden) durchschnittlich resultiert. Disability bezieht sich also auf jedwede Abweichung von einem optimalen Gesundheitszustand [12; 13].

DALY gelten immer nur für Bevölkerungen oder Bevölkerungsgruppen und dürfen nicht für die Ableitung individueller Lebenszeitverluste herangezogen werden.

Die Animationsfilme des Umweltbundesamts [31] sowie des Robert Koch-Instituts [24] veranschaulichen das Konzept der (umweltbedingten) Krankheitslast und die Berechnung der Maßzahlen.

Umweltbedingte Krankheitslast

Bei der Betrachtung von gesundheitlichen Risiken hat jeder einzelne Risikofaktor einen bestimmten Anteil an der Gesamtkrankheitslast. Zur Berechnung dieses attributablen Anteils eines bestimmten Risikofaktors wird im Rahmen des Konzepts zur vergleichenden Risikobewertung (engl. Comparative Risk Assessment) zum einen die Exposition (oder auch Belastung) der Bevölkerung gegenüber diesem Risikofaktor und zum anderen eine Expositions-Wirkungsfunktion benötigt. Mithilfe dieser Angaben lässt sich der prozentuale Anteil der Krankheitslast berechnen, der wegfallen würde, wenn es diese Exposition in der Vergangenheit nicht gegeben hätte [11]. Für die Berechnung dieses Anteils wird die sogenannte Population Attributable Fraction (PAF) genutzt [12].

Für die Berechnung der Krankheitslast muss zudem ein Vergleichsszenario definiert werden, dem die aktuelle Exposition gegenübergestellt werden soll. Dieses wird als das **untere Quantifizierungsniveau** (engl. counterfactual value) bezeichnet. Dieses „untere Quantifizierungsniveau“ ist die Konzentration eines Umweltfaktors (z. B. NO₂ oder PM_{2,5}), unter dem nach aktuellem Forschungsstand ein erhöhtes Risiko für gesundheitliche Wirkungen nicht mehr mit hinreichender Sicherheit nachweisbar ist. Bei manchen Umweltfaktoren kann das untere Quantifizierungsniveau auch bei 0 liegen. Die Höhe der Krankheitslast ist auf die Differenz zwischen den beobachteten (also gemessenen oder modellierten) kontinuierlichen Expositionswerten (z. B. jährliche NO₂- oder PM_{2,5}-Belastung am Wohnort) und dem unteren Quantifizierungsniveau zurückzuführen. Je niedriger das Quantifizierungsniveau gewählt wird, desto höher fällt die berechnete umweltbedingte Krankheitslast aus, da bei einem niedrigeren Quantifizierungsniveau ein höherer Anteil der Bevölkerung einem Gesundheitsrisiko durch den Umweltfaktor ausgesetzt ist.

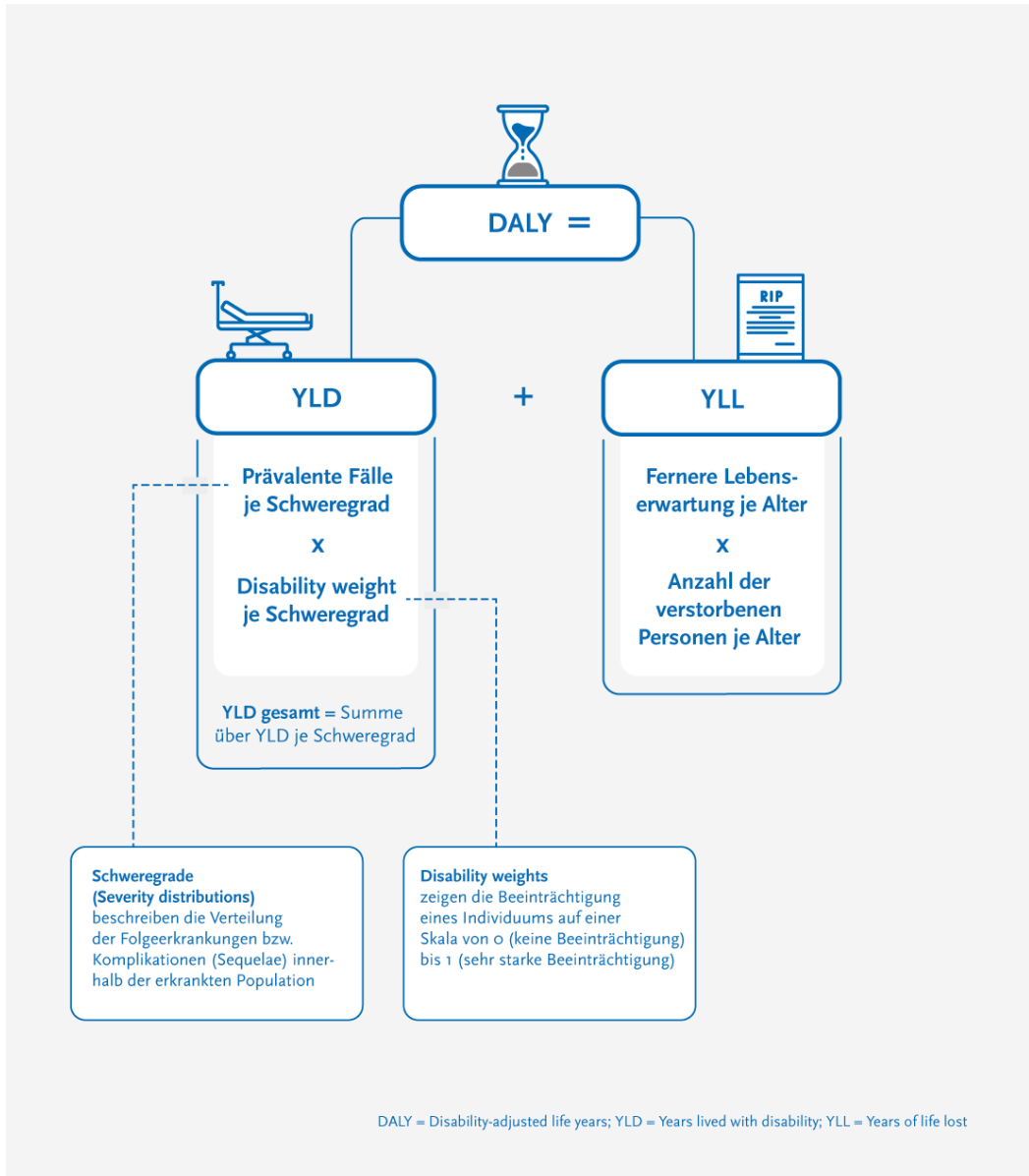


Bild 1. Methodik zur Berechnung der Krankheitslast in einem Berichtsjahr [25]

Lebenserwartung

Ein weiterer, häufig einfacher zu verstehender Indikator ist die durchschnittliche Lebenserwartung und deren Verkürzung durch Risikofaktoren. Der methodische Ansatz zur Berechnung dieser Verkürzung der Lebenserwartung ist dabei anders als bei den oben genannten Indikatoren: Die Reduktion der Lebenserwartung kann mit dem sogenannten „Sterbetafelansatz“ [14] quantifiziert werden. Man vergleicht bei diesem Ansatz die generelle durchschnittliche statistische Lebenserwartung mit der Lebenserwartung, die theoretisch erreicht werden könnte, wenn ein ausgewählter Risikofaktor in der Bevölkerung eliminiert oder reduziert werden könnte. Die Differenz stellt dann den Gewinn an Lebenserwartung dar, der erreichbar wäre, wenn der Risikofaktor beseitigt oder reduziert werden würde.

1.4 Eingangsdaten und Aussagekraft

Die Grundlage für alle Maße, die im Rahmen von Krankheitslastberechnungen ermittelt werden, sind bereits vorhandene Sekundärdaten zur Gesundheit oder zur Belastung der Bevölkerungen mit bestimmten Risikofaktoren.

Bei der Interpretation der Ergebnisse zu umweltbedingten Krankheitslasten ist darauf zu achten, dass diese immer nur so gut sein können wie es die Eingangsdaten, die in die Berechnungen einfließen, erlauben. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Annahmen, die für die Berechnungen getroffen werden (z. B. die normative Lebenserwartung zur Berechnung der YLL, das relative Risiko als Maß für den Zusammenhang zwischen Exposition und gesundheitlicher Wirkung, disability weights u. a.), mit statistischen Unsicherheiten behaftet sein können.

Bei der Präsentation und Interpretation der Ergebnisse ist es daher wichtig, die Qualität der Eingangsdaten zu berücksichtigen und statistische Unsicherheiten durch Angabe von Konfidenz- oder Unsicherheitsintervallen transparent zu machen [12].

Ergebnisse zur umweltbedingten Krankheitslast sind nicht als alleinstehende absolute Werte, sondern ausschließlich als Größenordnung im Vergleich mit anderen Risikofaktoren oder im Verlauf der Zeit zu interpretieren. So zeigen unter anderem die jährlichen Berechnungen der Europäischen Umweltagentur sehr gut, wie die Krankheitslast durch Feinstaub in den letzten 15 Jahren abgenommen hat [15].

1.5 Anwendungsperspektiven

Die Berechnungen der Krankheitslast können sehr unterschiedlichen Zwecken dienen, wobei drei Perspektiven handlungsleitend sind:

- globale Perspektive
- europäische oder regionale Perspektive (gemeint sind hier Weltregionen)
- nationale Perspektive

Das Beispiel des umweltbezogenen Risikofaktors Feinstaub bietet sich hier gut an, um die unterschiedlichen Anforderungen an Krankheitslastanalysen, die daraus abgeleiteten Ziele und die entsprechenden Datengrundlagen unter die Lupe zu nehmen.

Bei der globalen Perspektive stellt sich die Herausforderung, möglichst für alle Länder der Welt eine vergleichbare Datengrundlage für die Berechnungen einzusetzen. Dies bezieht sich sowohl auf die Verteilung des zu untersuchenden Risikofaktors (die „Exposition“) als auch auf die Gesundheitsdaten. Beim Feinstaub wird zur Erfassung der Exposition die modellierte flächenhafte Konzentration von Feinstaub verwendet. Für die globalen Berechnungen muss ein Modell herangezogen werden, das alle Länder der Welt mit vergleichbarer Genauigkeit abdeckt. Dies kann, z. B. in der GBD-Studie, zu Lasten der räumlichen Auflösung gehen, die dort aktuell bei etwa $11 \text{ km} \times 11 \text{ km}$ liegt [16]. Ebenso werden für die globale Anwendung vergleichbar erhobene Gesundheitsdaten benötigt. Auch hier liegen nicht immer für alle Teile der Welt Daten mit dem gleichen Detailgrad vor, sodass auch bei den Gesundheitsdaten zum Teil Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden müssen.

Für europäische und nationale Berechnungen der umweltbedingten Krankheitslast können für die Belastung mit Feinstaub mittlerweile deutlich feiner aufgelöste Modelle genutzt werden. So nutzt die Europäische Umweltagentur (EEA) eine Auflösung von $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ [17] und das Umweltbundesamt (UBA) eine Auflösung von $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$. In Kombination mit einer vergleichsweise hohen Dichte an Messstationen in Europa können somit deutlich bessere flächenhafte Konzentrationsdaten ermittelt werden. Auch die Informationen über das Morbiditäts- und Mortalitätsgeschehen liegen bei einer regional begrenzten Anwendung, vor allem in hoch entwickelten Ländern, oft in einem höheren Detaillierungsgrad vor. Das heißt, es können zum Teil genaue Angaben zur Häufigkeit von bestimmten Erkrankungen für spezifische Altersgruppen und Regionen genutzt werden.

Bereits diese Perspektiven können dazu führen, dass sich die abgeleiteten Ergebnisse zur Krankheitslast für ein und dasselbe Land in unterschiedlichen Analysen stark voneinander unterscheiden [18].

Die aus solchen Annahmen resultierenden Unterschiede in den Ergebnissen können dazu führen, dass bei deren Nutzung Fragen oder Zweifel bezüglich der Verlässlichkeit der Ergebnisse entstehen. Ein direkter Vergleich von Zahlen, die auf Basis unterschiedlicher Eingangsdaten oder Methoden berechnet wurden, kann nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Unterschiede durchgeführt werden. Falls es diesbezüglich große Abweichungen gibt, sollte auf einen Vergleich gänzlich verzichtet werden. Im Grunde gilt, dass direkte Vergleiche von Krankheitslasten nur auf Basis der gleichen Daten und Methoden sinnvoll sind.

Erläuterungsbox 1

Was bedeutet der Begriff Risikofaktor?

Ein Risikofaktor ist ein Faktor, der die **Wahrscheinlichkeit** für das Eintreten einer bestimmten Erkrankung erhöht. Risikofaktoren können endogen (z. B. ein bestimmter Genotyp oder das biologische Geschlecht) oder exogen (z. B. Umwelteinflüsse) sein. In manchen Fällen sind Risikofaktoren durch individuelle oder politische Maßnahmen beeinflussbar oder modifizierbar. Zu den **individuell modifizierbaren Risikofaktoren** gehören z. B. verschiedene Lebensstilfaktoren, wie die Ernährung, das Rauchen oder der Grad der körperlichen Bewegung. Umweltrisikofaktoren sind in der Regel individuell kaum modifizierbare Stressoren wie die Exposition gegenüber Feinstaub, Umweltlärm, Hitze oder ionisierender Strahlung. Diese Risikofaktoren sind jedoch durch **politische Maßnahmen modifizierbar**.

Ein entscheidender Aspekt bei der Betrachtung von Risikofaktoren ist die Tatsache, dass hiermit keine sichere Aussage über das tatsächliche Eintreten der Erkrankung gemacht werden kann. So kann ein Mensch ein starker Raucher sein, womit sein Risiko z. B. für Lungenkrebs im Vergleich zu einem Nichtraucher stark erhöht ist. Tatsächlich kann dieser Mensch jedoch 90 Jahre oder länger leben, ohne an Lungenkrebs zu erkranken. Das heißt: Obwohl der Mensch mit einem hohen Risiko lebte, hat sich dieses Risiko nicht in einer Erkrankung realisiert. Auf der anderen Seite kann ein Nichtraucher durchaus an Lungenkrebs erkranken und dadurch beispielsweise 20 Jahre Lebenszeit verlieren.

Risikofaktoren tauchen in der Todesursachenstatistik nicht auf, weil ein Mensch in der Regel nicht an einem (einzelnen) Risikofaktor verstirbt, sondern an einer Krankheit, die häufig im Zusammenspiel mehrerer Risikofaktoren entstanden ist. So finden sich auf Totenscheinen als Todesursachen z. B. Herzinfarkt und Schlaganfall, aber nicht die Risikofaktoren, die zu diesen Ereignissen geführt haben, wie Rauchen, Übergewicht oder Bewegungsmangel. Insofern ist auf Totenscheinen auch kein Umweltfaktor wie Luftverschmutzung oder Lärm als Todesursache aufgeführt. Das heißt aber nicht, dass diese Umweltfaktoren nicht kausal mit dem Versterben der Person in Zusammenhang stehen können.

Erläuterungsbox 2

Wann ist ein Zusammenhang zwischen Risikofaktor und Erkrankung ursächlich (kausal)?

Ein Risikofaktor wird im Allgemeinen als kausal bezeichnet, wenn in der Zusammenschau von mechanistischen Daten (Ergebnisse aus toxikologischen und experimentellen Studien) eine klare Evidenz (Gewissheit) für einen Wirkungsmechanismus des entsprechenden Faktors vorliegt und in epidemiologischen Studien mit unterschiedlichen Methoden in unterschiedlichen Bevölkerungen klare Zusammenhänge zwischen dem zu untersuchenden Risikofaktor und den jeweiligen Zielerkrankungen festgestellt wurden [26]. Die Ableitung der Kausalität von umweltbezogenen Faktoren wird üblicherweise von großen Institutionen wie der WHO, der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) oder der amerikanischen Umweltbehörde EPA durchgeführt und besteht aus einer umfangreichen Recherche und Analyse der gesamten bestehenden Evidenz. Eine einzelne epidemiologische oder toxikologische Studie ist keine ausreichende Grundlage für die Einstufung eines umweltbezogenen Faktors als kausal.

2 Fallstricke der Interpretation - Probleme und Lösungsvorschläge

Schätzung des attributablen Anteils und Kausalität

Die der Schätzung des attributablen Anteils eines Risikofaktors zugrunde liegende Formel darf streng genommen nur dann verwendet werden, wenn zwischen dem Risikofaktor und der Erkrankung ein **kausaler** Zusammenhang nachgewiesen wurde (siehe Erläuterungsbox 2 am Ende von Abschnitt 1). Häufig werden Krankheitslastschätzungen jedoch nur basierend auf Assoziationen ohne Nachweis der Kausalität durchgeführt.

Krankheitslastschätzungen ohne Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen Risikofaktor und Erkrankung sind somit nur als epidemiologische Zusammenhänge zu verstehen, worauf in den Limitationen der Berechnungen explizit einzugehen ist.

Unterschiedliche Annahmen führen zu unterschiedlichen Krankheitslastschätzungen

Die von den unterschiedlichen Institutionen und Organisationen (z. B. EEA, IHME, WHO) berichteten bevölkerungsbezogenen Gesundheitsmaßzahlen zur umweltbezogenen Krankheitslast (z. B. feinstaubbedingte Krankheitslast) unterscheiden sich häufig. Ursachen für solche Unterschiede können z. B. sein:

- Verwendung von unterschiedlichen Lebenserwartungen
- Verwendung von unterschiedlichen Expositions-Wirkungsfunktionen zum Zusammenhang zwischen dem Risikofaktor und der Erkrankung/den Erkrankungen
- unterschiedliche Datengrundlage für die Expositionsdaten (gemessen versus modelliert)
- unterschiedliche räumliche Auflösung von modellierten Expositionsdaten
- unterschiedliche untere Quantifizierungsniveaus (siehe Abschnitt 1.3, engl. counterfactual value)

- unterschiedliche Basiskrankheitslasten, z. B. durch die Verwendung von Gesamtmortalität im Vergleich zu ursachenspezifischen Todesursachen, oder durch den unterschiedlichen Umgang mit nicht informativen Todesursachen (engl. ill-defined causes of death¹)
- geschätzte Maßzahl oder Fokus auf beispielsweise nur Mortalität oder Morbidität
- unterschiedliche Bezugsjahre der Eingangsdaten [8]

Ziel sollte sein, die Annahmen der Berechnung transparent darzustellen, damit Unterschiede klar ersichtlich werden und beim Verständnis der Maßzahlen und ihrer Interpretation entsprechend berücksichtigt werden können. Dabei ist anzumerken, dass keine Herangehensweise im Hinblick auf die verwendeten Daten per se richtig oder falsch ist, sondern je nach Ziel der Untersuchung gewählt und begründet werden muss.

Begrifflichkeiten bei der Bezeichnung der Todesfälle

Häufig werden die Maßzahlen der Krankheitslastschätzung in „vorzeitige Todesfälle“ (engl. premature deaths) übersetzt (siehe z. B. jährliche Berichte der EEA), siehe Abschnitt 1. Dies ist vermutlich der Verständlichkeit geschuldet, weil Maßzahlen wie DALY oder YLL für die meisten Verwendungen sowie für Leserinnen und Leser dieser Berichte eher ungewohnt und schwerer eingängig sein könnten. **Es handelt sich hierbei aber nicht um zusätzliche Todesfälle, sondern um den Anteil der beobachteten Todesfälle, der in einem (kausalen) Zusammenhang zur Umweltexposition steht und (statistisch) auf diesen Risikofaktor zurückgeführt werden kann.**

Die GBD-Studie und auch teilweise die WHO bezeichnen sie darum mittlerweile richtiger als „zuschreibbare“ oder „attributable“ Todesfälle (engl. attributable deaths).

Eine Umrechnung der YLL oder DALY in attributable Todesfälle ist nicht zulässig.

¹ Mehr zum Thema Umkodierung nicht informativer/unspezifischer Todesursachen ist z. B. in [19] zu finden.

Verlust an Lebensjahren vs. Lebenszeitverkürzung

Der bei der Krankheitslast geschätzte Verlust an Lebensjahren kann nicht einfach auf einzelne Personen übertragen werden, da die Lebenszeitverkürzung durch einen Risikofaktor nicht alle im gleichen Maße betrifft. So kann z. B. der Verlust an Lebensjahren durch Stickstoffdioxid(NO₂)-Exposition, der für Deutschland für das Jahr 2014 auf 49.726 YLL geschätzt wurde [20], nicht auf einen individuellen Verlust von sieben Minuten Lebenszeit für jeden Einzelnen umgerechnet werden. Die Ableitung der durchschnittlichen Lebenszeitverkürzung durch eine Umweltexposition ist auf dieser Basis methodisch nicht korrekt, da der Risikofaktor bereits in der Ableitung der allgemeinen Lebenserwartung berücksichtigt wird.

Für die Berechnung einer durchschnittlichen Lebenszeitverkürzung auf individueller Ebene und Bevölkerungsebene muss eine andere Methode, nämlich der sogenannte „Sterbetafel-Ansatz“ [14], verwendet werden.

Bevölkerungsebene vs. Individuen und kleine Gruppen

Die bei der umweltbedingten Krankheitslast geschätzten Summenmaße stellen Kennzahlen für die Gesundheit von **Bevölkerungen** dar.

Die Ergebnisse von Studien zur umweltbedingten Krankheitslast sind ausschließlich für die Ableitung von Aussagen auf Bevölkerungsebene zu verwenden. Informationen zum Gesundheitszustand einzelner Individuen und kleiner Gruppen können aus diesen Studien **nicht** abgeleitet werden.

So sagt das zur Berechnung des attributablen Anteils verwendete relative Risiko nichts über die Anzahl der Personen mit verlorenen Lebensjahren aus, z. B. geht die Information verloren, ob es sich um drei Personen handelt, die jeweils ein Jahr früher sterben oder um eine Person, die drei Jahre früher verstirbt.

Die Interpretation der Summenmaße sollte möglichst nur **im Vergleich** zu anderen Risikofaktoren oder zu **Änderungen in den Risikofaktoren** (z. B. Zeitvergleich oder Vergleich von Prognosen/Modellen) erfolgen.

Berücksichtigung von Störgrößen

Häufig wird als Kritikpunkt an den Schätzungen zur Krankheitslast angeführt, dass potenzielle Störgrößen (engl. confounder) nicht explizit berücksichtigt werden. Als Beispiel sei hier das Rauchverhalten aufgeführt.

Dieser Punkt ist in den meisten Fällen allerdings nicht zutreffend, da die verwendeten Expositions-Wirkungsfunktionen (EWF) in der Regel aus epidemiologischen Studien stammen, die ihrerseits bereits die relevanten Störgrößen in die Assoziations-Analysen mit einbezogen haben.

Krankheitslastschätzungen für verschiedene Umweltrisikofaktoren

Die einzelnen Schätzungen zur Krankheitslast für verschiedene Umweltrisikofaktoren dürfen **nicht** einfach addiert werden, da diese meist nicht unabhängig voneinander sind, sondern eine positive oder negative Korrelation aufweisen können.

Zum Beispiel würde eine Addition der Krankheitslasten bedingt durch feine Partikel (PM_{2,5}) und Stickstoffdioxid (NO₂) zu einer Überschätzung des Effekts führen (laut [21] um bis zu 30 %). Ziel ist es deswegen entweder, in den Limitationen der Berechnungen auf diesen Punkt explizit einzugehen oder aber als Basis für die Berechnungen Expositions-Wirkungsfunktionen aus Publikationen mit Mehrschadstoffmodellen zu verwenden.

Wahl des unteren Quantifizierungsniveaus

Die Berechnung des Anteils einer Krankheitslast, der auf eine Exposition zurückzuführen ist, steht im direkten Zusammenhang mit einem Vermeidungspotenzial, das die vollständige Reduktion der Exposition voraussetzt. Dies entspricht einem unteren Quantifizierungsniveau (siehe Abschnitt 1.3) von 0. Eine Reduktion der Exposition um 100 % ist aber häufig unrealistisch. Zum Beispiel ist es unrealistisch anzunehmen, dass die NO₂-Exposition in Deutschland auf 0 µg/m³ reduziert werden kann, da sogar im ländlichen Bereich, fern der typischen NO₂-Quellen, eine gewisse Hintergrundbelastung vorliegt [20].

Dieser Einwand kann aber berücksichtigt werden, indem zusätzlich der Anteil der Krankheitslast berechnet wird, der durch eine weniger als 100%ige Reduktion des Schadstoffs vermieden werden kann.

So kann das untere Quantifizierungsniveau (engl. counterfactual value) so gewählt werden, dass es z. B. der Hintergrundbelastung der untersuchten Exposition oder dem Gültigkeitsbereich vorhandener Expositions-Wirkungsfunktionen entspricht, also z. B. dem NO₂-Konzentrationsbereich, auf dem die Expositions-Wirkungsfunktionen geschätzt wurden.

Unsicherheiten bei epidemiologischen Maßzahlen

Bei epidemiologischen Maßzahlen und Effektschätzern sollten, wenn möglich und sinnvoll, stets **Konfidenzintervalle** angegeben werden, die ein Maß für die Präzision der Schätzung darstellen.

Ein Problem bei der Interpretation von Konfidenzintervallen scheint allerdings darin zu liegen, dass sie als Ausdruck von Inkompetenz der Expertinnen und Experten fehlinterpretiert werden, oder die oberste Intervallgrenze als der glaubwürdigste Schätzwert angesehen wird [22].

Hier ist es wichtig zu verdeutlichen, dass Konfidenzintervalle Ausdruck und Ergebnis eines **seriösen wissenschaftlichen Arbeitens** sind und das die

daraus resultierende Unschärfe sich in der Breite des Konfidenzintervalls widerspiegelt.

Dessen ungeachtet ist zu berücksichtigen, dass Konfidenzintervalle niemals alle Unsicherheiten einer Modellierung abdecken können. Es ist daher ebenso wichtig, dass Limitationen von Daten und Methoden benannt und bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Berechnung des attributablen Anteils

Die Berechnung des attributablen Anteils einer Krankheitslast weist mehrere methodische Probleme auf, derer man sich bewusst sein sollte. Eine Übersicht über Probleme sowie genauere Erläuterungen dazu sind in [23] aufgeführt.

Beispielsweise bestehen Probleme bei der Berechnung der attributablen Fraktion darin, dass die Standardinterpretation als Anteil der Krankheitslast, der auf die Exposition zurückgeht, nicht immer zutrifft und die Höhe der attributablen Fraktion auch von der Reihenfolge abhängt, in der die Expositionen betrachtet oder eliminiert werden.

3 Fazit

Bevölkerungsbezogene Maßzahlen sind hilfreich, um die Krankheitslast in Bevölkerungen, die durch den Einfluss von Risikofaktoren auf die menschliche Gesundheit entsteht, darzustellen. Die Maßzahlen können bei (umwelt)politischen Entscheidungsprozessen als zusätzliche Indikatoren wertvolle Informationen liefern. Anders als Indikatoren zum individuellen Gesundheitszustand können bevölkerungsbezogene Maße die Auswirkungen von Risikofaktoren – aber auch, in einem zweiten Schritt, von Präventions- oder Interventionsmaßnahmen – für die gesamte Bevölkerung vergleichend quantifizieren. Sie können somit zur Priorisierung von Maßnahmen verwendet werden. So können beispielsweise die positiven gesundheitlichen Effekte von Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität dargestellt und auf dieser Basis deren Aufwand und Nutzen gegeneinander abgewogen werden.

Die wichtigsten Aussagen auf einen Blick

Die folgenden Aussagen fassen die wichtigsten Erkenntnisse aus Krankheitslastberechnungen sowie zu den Fallstricken der Ergebnisinterpretation kurz zusammen. Damit werden wichtige Hinweise zur richtigen Einordnung und zum richtigen Umgang mit den Ergebnissen aus Krankheitslastberechnungen gegeben.

Aussage 1:

Das Konzept der umweltbedingten Krankheitslast ist ein statistisches Werkzeug und die Ergebnisse von Krankheitslastberechnungen sind Modellergebnisse. Die Ergebnisse sollten immer mit einem Unsicherheitsbereich dargestellt werden.

Aussage 2:

Die Maßzahlen zu Krankheitslastberechnungen sind Indikatoren der Bevölkerungsgesundheit. Für einzelne Individuen sind sie als Information zur Bewertung des Gesundheitszustands nicht aussagefähig und geeignet.

Aussage 3:

Attributable oder zuschreibbare Todesfälle sind keine zusätzlichen Todesfälle. Sie sind der Anteil der Todesfälle, der in einem (kausalen) Zusammenhang zu einer Exposition steht und (statistisch) auf diesen Risikofaktor zurückgeführt werden kann.

Aussage 4:

Für einige Risikofaktoren sind viele Daten in guter Qualität verfügbar. Für diese liegen oft auch eine hohe Anzahl an Analysen zur Krankheitslast vor (z. B. für Feinstaub). Für andere Risikofaktoren (z. B. für Umweltlärm) sind Datenqualität und -quantität uneinheitlicher. Das liegt häufig an der Komplexität der Expositionserfassung. Entsprechend ist die Zahl der Krankheitslaststudien geringer.

Aussage 5:

Ein direkter Vergleich von Krankheitslastberechnungen ist nur dann sinnvoll, wenn vergleichbare Eingangsdaten und Berechnungsmethoden verwendet wurden. Liegen unterschiedliche Daten oder Berechnungsmethoden vor, kann ein Vergleich nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Unterschiede durchgeführt werden. Falls es diesbezüglich große Abweichungen gibt, sollte auf einen Vergleich gänzlich verzichtet werden.

Aussage 6:

Krankheitslastberechnungen für unterschiedliche Umweltrisikofaktoren dürfen häufig nicht addiert werden, da die gesundheitliche Wirkung von Umweltrisikofaktoren in bestimmten Fällen nicht unabhängig voneinander ist, sondern eine positive oder negative Korrelation aufweist.

Aussage 7:

Häufiger Kritikpunkt an Schätzungen zur Krankheitslast ist, dass potenzielle Störgrößen (z. B. das Rauchverhalten in einer Bevölkerung) nicht explizit berücksichtigt werden. Das ist nicht richtig. In den meisten Fällen sind die relevanten Störgrößen berücksichtigt.

Aussage 8:

Statistische Unsicherheiten können durch Konfidenz- oder Unsicherheitsintervalle angegeben werden. Konfidenzintervalle sind Ausdruck und Ergebnis eines seriösen wissenschaftlichen Arbeitens.

Aussage 9:

Für die Ergebnisinterpretation von Maßzahlen sind die Annahmen zu den Eingangsdaten und Berechnungen von großer Bedeutung. Dabei gibt es meist keine eindeutig richtigen Annahmen. Annahmen werden je nach verwendeten Daten und Ziel der Untersuchung getroffen und müssen begründet und transparent dargestellt werden.

4 Beispiel

Anwendung des Konzepts der Umweltbedingten Krankheitslast bei der Gesetzgebung zur Luftreinhaltung in der EU

Im Rahmen der Revision der europäischen „Gesetzgebung zur Luftreinhaltung“ (engl. Ambient Air Quality Directive) stellt die Krankheitslastberechnung, als integraler Bestandteil der Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Maßnahmenpakete zur Luftreinhaltung, einen zentralen Aspekt dar. Zum ersten Mal wird damit bei der europäischen Luftqualitätsgesetzgebung die Krankheitslast berechnet und in die Evaluation verschiedener Szenarien mit einbezogen. Dabei werden vor allem attributable Todesfälle für PM_{2,5} und NO₂ betrachtet.

Mehrere Schritte werden bei der Analyse durchgeführt:

- 1 Zunächst werden die kausalen Expositions-Endpunkt-Beziehungen, die in die Analyse eingehen sollen, festgelegt. Hierfür wurden die Expositions-Endpunkt-Beziehungen, die in den WHO-Luftqualitäts-Leitlinien von 2021 aufgeführt werden, gewählt [27]. Hierzu gehören die Zusammenhänge von langfristiger PM_{2,5}- und NO₂-Belastung mit der Gesamtmortalität sowie Kurzzeitwirkungen von NO₂, Ozon und CO auf ausgewählte krankheitsspezifische Endpunkte.

Diese Expositions-Endpunkt-Paare sind wichtig, stellen allerdings das durch Luftverschmutzung verursachte Krankheitsgeschehen nur sehr unvollständig dar. Eine umfassendere Darstellung findet sich z. B. in [28] oder in [29].

- 2 In einem zweiten Schritt werden die Expositions-Wirkungsfunktionen quantifiziert. Das heißt, es muss festgestellt werden, wie stark das Risiko für Todesfälle oder bestimmte Erkrankungen pro Einheit des Luftschadstoffes ansteigt. Die Ableitung der Expositions-Wirkungsfunktionen wird üblicherweise im Rahmen von großen, systematischen Übersichtsarbeiten durchgeführt, die die Evidenz aus allen Einzelstudien in Metaanalysen zusammenfassen. Auch hierfür hat die Europäische Kommission die Arbeiten der WHO-Leitlinien 2021 genutzt und wendet die dort erhaltenen „Schätzer“ für das relative Risiko an. Die WHO-Leitlinien sind allerdings für den globalen Gebrauch erstellt worden und geben nicht die aktuelle und relevanteste Information für die Länder der EU wieder [27]. In der Tat ist die Stärke des Effekts in aktuellen europäischen Studien zum Teil mehr als doppelt so hoch [30; 32]. Als untere Quantifizierungsgrenzen werden die WHO-Richtwerte angesetzt. Durch die Nutzung der globalen „Effektschätzer“ wird die attributable Krankheitslast durch Luftverschmutzung in der EU unterschätzt.
- 3 Mithilfe von flächenhaften Modellierungen werden für das gesamte Gebiet der EU die zu erwartenden Schadstoffkonzentrationen unter Anwendung bereits erlassener Luftreinhaltegesetze vorhergesagt.

Mit der oben skizzierten Methodik werden die erwarteten Krankheitslasten in den zukünftigen Jahren ermittelt. In die anschließende Kosten-Nutzen-Analyse gehen schließlich die Kosten für weitere technische Maßnahmen zur Luftreinhaltung ein und werden mit der verbundenen Krankheitslast verglichen.

Glossar

Assoziation

statistisch nachweisbare Verknüpfung zweier Variablen. Kausalitäten können nicht mit Assoziationen nachgewiesen werden

attributabel

Zuschreiben von Krankheits- oder Sterbefällen zu einem bestimmten Risikofaktor

DALY

durch Krankheit und Sterbefälle verlorene gesunde Lebensjahre (engl. Disability-Adjusted Life Years)

deskriptiv

beschreibend

endogen

Körperprozesse, die aus dem Körper selbst heraus entstehen, nicht durch äußere Einflüsse

Entität

hier: Gruppe von Krankheiten, definiert durch gemeinsame Merkmale

Epidemiologie

Wissenschaft des Auftretens – Inzidenz, Prävalenz und Determinanten – von Gesundheitsstörungen und Krankheiten in Bevölkerungsgruppen

Evidenz

wissenschaftlich nachweisbare Erkenntnisse (Unterscheidung zu Behauptungen, Theorien, Hypothesen)

evidenzbasiert

auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhend; auf empirischen Daten aufbauend; auf Grundlage empirisch nachgewiesener Wirksamkeit in der Medizin: medizinische Maßnahme, die auf Basis empirisch zusammengetragener und bewerteter wissenschaftlicher Erkenntnisse erfolgt

Expositions-Wirkungsfunktion (EWF)

Expositions-Wirkungsfunktionen geben den mathematischen Zusammenhang zwischen der Höhe der Exposition gegenüber einem Risikofaktor und der Wahrscheinlichkeit zu erkranken oder zu versterben wieder. Expositions-Wirkungsfunktionen werden im Rahmen von Studien zur Krankheitslast genutzt, um die Daten zur Exposition mit Daten zum Krankheits- und Versterbegeschehen in einer Bevölkerung zu verbinden.

Exposition

Ausgesetztsein gegenüber potenziell gefährdenden Bedingungen, die je nach Art, Intensität und Dauer der Einwirkung eine Reaktion im Organismus aus-

lösen und damit (Teil-)Ursache von Beeinträchtigungen des Wohlbefindens, von Gesundheitsstörungen und von Krankheiten sein können.

exogen

aufgrund von äußeren Ursachen entstehend

Genotyp

genetische Konstitution eines Organismus

Intervention

hier: gezieltes therapeutisches oder präventives Eingreifen

Indikator

quantitative oder qualitative Variable zur Bewertung eines Geschehens oder einer Exposition

ionisierende Strahlung

Strahlung, die genügend Energie hat, um Atome oder Moleküle zu ionisieren (und damit u. a. die Gesundheit zu schädigen)

Inzidenz

Anzahl neuer Fälle einer Krankheit oder einer gesundheitlichen Störung innerhalb einer Bevölkerungsgruppe über einen angegebenen Zeitraum.

Kausalität

eindeutiger Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zweier Variablen

Konfidenzintervall

statistischer Unsicherheitsbereich für eine geschätzte Größe, innerhalb dessen der Wert der Größe mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Modellierung

Darstellung eines komplexen Systems als vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit, häufig mithilfe von Rechenmodellen

Morbidität

Überbegriff für Prävalenz und Inzidenz von Erkrankungen

Mortalität

Anzahl der Todesfälle (im Allgemeinen oder aufgrund einer spezifischen Ursache) in einer Population, bezogen auf die Größe dieser Population in einem bestimmten Zeitraum (üblicherweise ausgedrückt als Todesfälle je Einwohnergruppe (z.B. 100.000) je Jahr)

normativ

Angaben oder Aussagen die als Maßstab dienen und vorgeben, wie etwas sein soll

Population Attributable Fraction (PAF)

prozentuale Verringerung des Krankheits- oder Sterblichkeitsgeschehens in der Bevölkerung, die eintreten

würde, wenn die Exposition gegenüber einem Risikofaktor auf ein alternatives Expositionsszenario reduziert würde

PM_{2,5}

Fraktion luftgetragener Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser unter 2,5 Mikrometer

Prävalenz

Häufigkeit vorhandener Fälle einer Krankheit oder gesundheitlichen Störung innerhalb einer Bevölkerungsgruppe zu einem bestimmten Zeitpunkt oder innerhalb eines bestimmten Zeitraums

Prävention

Maßnahmen zur Vermeidung von gesundheitlichen Schädigungen oder zur Senkung des Risikos, eine Erkrankung zu bekommen

quantifizieren

Die Anzahl oder Menge in einem bestimmten Maß oder Häufigkeit angeben

Referenzpopulation

hier: Vergleichspopulation, die als Standard dient

relatives Risiko

beschreibt die statistische Wahrscheinlichkeit, um wie viel Mal häufiger eine Gruppe, die einem Risikofaktor ausgesetzt ist, an einer Krankheit erkrankt im Vergleich zu einer Gruppe, die diesem Risikofaktor nicht oder in z. B. geringerer Konzentration ausgesetzt ist

reversibel

Prozess oder Vorgang, der rückgängig gemacht werden kann

Sekundärdaten

Daten (hier z. B. Krankenkassendaten), die später in einem Forschungsprojekt genutzt werden

YLD

durch Krankheit eingeschränkte Lebensjahre (engl. Years Lived with Disability)

YLL

durch Sterbefälle verlorene Lebensjahre (engl. Years of Life Lost)

Mitglieder des Arbeitsgremiums

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Publikation mitgewirkt haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt:

Dr. Susanne Breitner-Busch, Ludwig-Maximilians-Universität München und Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Prof. Dr. Isabelle Franzen-Reuter, Fachhochschule Münster

Prof. Dr. Caroline Herr, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, München

Prof. Dr. Barbara Hoffmann MPH, Universitätsklinikum Düsseldorf

Dr. Severine Koch, Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin

PD Dr. Dr. Bernd Kowall, Universitätsklinikum Essen

Dr. Martin Kraft, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Essen

PD Dr. Christine Müller-Graf, Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin

Dr. Dietrich Pläß, Umweltbundesamt, Berlin

PD Dr. Claudia Röhl, Landesamt für soziale Dienste Schleswig-Holstein, Neumünster

Dr. Alexander Rommel, Robert Koch-Institut, Berlin

Dr. Irene Scheler, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW, Düsseldorf

Dr. Alexandra Schneider, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Dr. Ulrich Sydlik, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW, Düsseldorf

Dr. Myriam Tobollik, Umweltbundesamt, Berlin

Dr. Sandra Walser-Reichenbach, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, München

Dipl.-Met. Dirk Wintermeyer, Umweltbundesamt, Berlin

Prof. Dr. Hajo Zeeb, Leibniz-Institut für Präventionsforschung und Epidemiologie - BIPS GmbH, Bremen

Schrifttum

- [1] Frankfurter Allgemeine Zeitung (2020): 400.000 Europäer sterben jedes Jahr wegen schmutziger Luft. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/400-000-europaeer-sterben-jedes-jahr-an-luftverschmutzung-16943044.html>
- [2] GBD 2013 DALYs and HALE Collaborators (2015): Global, regional, and national disability-adjusted life years (DALYs) for 306 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 188 countries, 1990–2013: quantifying the epidemiological transition, *The Lancet* 386(10009): 2145-219
- [3] Murray, C. J. L. and A. D. Lopez (1996): *The Global Burden of Disease: A comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Cambridge, Harvard School of Public Health on behalf of the World Health Organization and the World Bank.
- [4] Murray, C., M. Ezzati, A. Lopez, A. Rodgers and S. Vander Hoorn (2003): Comparative quantification of health risks: Conceptual framework and methodological issues. *Population Health Metrics* 1(1): 1.
- [5] Johnson, S. C., M. Cunningham, I. N. Dippenaar, F. Sharara, E. E. Wool, K. M. Agesa, C. Han, M. K. Miller-Petrie, S. Wilson, J. E. Fuller, S. Balassyano, G. J. Bertolacci, N. Davis Weaver, J. Arabloo, A. Badawi, A. S. Bhagavathula, K. Burkart, L. A. Cámara, F. Carvalho, C. A. Castañeda-Orjuela, J.-Y. J. Choi, D.-T. Chu, X. Dai, M. Dianatinasab, S. Emmons-Bell, E. Fernandes, F. Fischer, A. Ghashghae, M. Golechha, S. I. Hay, K. Hayat, N. J. Henry, R. Holla, M. Househ, S. E. Ibitoye, M. Keramati, E. A. Khan, Y. J. Kim, A. Kisa, H. Komaki, A. Koyanagi, S. L. Larson, K. E. LeGrand, X. Liu, A. Majeed, R. Malekzadeh, B. Mohajer, A. Mohammadian-Hafshejani, R. Mohammadpourhodki, S. Mohammed, F. Mohebi, A. H. Mokdad, M. Molokhia, L. Monasta, M. A. Moni, M. Naveed, H. L. T. Nguyen, A. T. Olagunju, S. M. Ostroff, F. P. Kan, D. M. Pereira, H. Q. Pham, S. Rawaf, D. L. Rawaf, A. M. N. Renzaho, L. Ronfani, A. M. Samy, S. Senthilkumaran, S. G. Sepanlou, M. A. Shaikh, D. H. Shaw, K. Shibuya, J. A. Singh, V. Y. Skryabin, A. A. Skryabina, E. E. Spurlock, E. G. Tadesse, M.-H. Temsah, M. R. Tovani-Palone, B. X. Tran, G. W. Tsegaye, P. R. Valdez, P. M. Vishwanath, G. T. Vu, Y. Waheed, N. Yonemoto, R. Lozano, A. D. Lopez, C. J. L. Murray, M. Naghavi and GBD Cause of Death Collaborators (2021): Public health utility of cause of death data: applying empirical algorithms to improve data quality. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 21(1): 175.
- [6] Monasta, L., G. Alicandro, M. Pasovic, M. Cunningham, B. Armocida, L. Ronfani, M. Naghavi and GBD Italy Causes of Death Collaborators (2022): Redistribution of garbage codes to underlying causes of death: a systematic analysis on Italy and a comparison with most populous Western European countries based on the Global Burden of Disease Study 2019. *European Journal of Public Health*.
- [7] Murray, C. J. L. (1994): Quantifying the burden of disease: the technical basis for disability-adjusted life years. *Bulletin of the World Health Organization* 72(3): 429-445.
- [8] Tobollik, M., Plaß, D., Steckling, N. et al. (2018): Umweltbedingte Krankheitslasten in Deutschland. *Bundesgesundheitsbl* 61, 747–756 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00103-018-2734-y>
- [9] GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators (2020): Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* 396(10258): 1204-1222.
- [10] Institute for Health Metrics and Evaluation (2022). "GBD Compare." <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>: letzter Zugriff 31/05/2022.
- [11] Prüss-Üstün, A., C. D. Mathers, C. F. Corvalán, A. Woodward and World Health Organization. Dept. of Protection of the Human Environment. (2003). *Assessing the environmental burden of disease at national and local levels: introduction and methods*. Geneva
- [12] UBA (2019) FAQ umweltbedingte Krankheitslasten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/umweltbedingte-krankheitslasten/faq-umweltbedingte-krankheitslasten> (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [13] Plass, D., T. Vos, C. Hornberg, C. Scheidt-Nave, H. Zeeb and A. Krämer (2014): Entwicklung der Krankheitslast in Deutschland. *Dtsch Arztebl International* 111(38): 629-638.
- [14] Lelieveld, J., A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Haines and T. Münzel (2020): Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research* 116(11): 1910-1917.
- [15] European Environment Agency (2019). *Air quality in Europe - 2019 report*. Luxemburg, European Environment Agency.
- [16] GBD Risk Factors Collaborators (2020): Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* 396(10258): 1223-1249.

- [17] ETC/ATNI (2020): Health risk assessment of air pollution in Europe. Methodology description and 2017 results, Eionet Report ETC/ATNI 13/2019, European Topic Centre on Air Pollution, Transport, Noise and Industrial Pollution.
- [18] Tobollik M, Plaß D, Steckling N, Mertes H, Myck T, Ziese T, Wintermeyer D, Hornberg C (2018): Umweltbedingte Krankheitslasten in Deutschland [Environmental burden of disease in Germany]. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. 2018 Jun;61(6):747-756. German. doi: 10.1007/s00103-018-2734-y. PMID: 29700552.
- [19] Wengler A, Rommel A, Plaß D, Gruhl H, Leddin J, Porst M, Anton A, von der Lippe E (2019): ICD-Codierung von Todesursachen: Herausforderungen bei der Berechnung der Krankheitslast in Deutschland. Bundesgesundheitsblatt 2019, Ausgabe 62, Seite 1485-1482.
- [20] Schneider A, Cyrus J, Breitner S, Kraus U, Peters A, Diegmann V, Neunhäuserer L im Auftrag des Umweltbundesamtes. Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Forschungskennzahl 3715 61 201 0 UBA-FB 002600. Abschlussbericht. UMWELT & GESUNDHEIT 01/2018
- [21] WHO, 2013b, Health risks of air pollution in Europe — HRAPIE project: New emerging risks to health from air pollution — Results from the survey of experts, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen.
- [22] Johnson BB, Slovic P. (1995): Presenting uncertainty in health risk assessment: initial studies of its effects on risk perception and trust. Risk Analysis. 1995; 15(4):485–94. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00341.x> PMID: 7480948
- [23] Kowall B, Stang A. (2018): Stolpersteine bei der Interpretation des populationsattributablen Risikos. Gesundheitswesen 2018; 80: 149-153.
- [24] Robert Koch-Institut (2021): BURDEN 2020 - Die Studie zur Krankheitslast in Deutschland und seinen Regionen. Erklärfilm zum Konzept der Umweltbedingten Krankheitslast. <https://www.youtube.com/watch?v=kyQNwPER24U> (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [25] Robert Koch-Institut (2021): BURDEN 2020 - Die Studie zur Krankheitslast in Deutschland und seinen Regionen. <https://www.daly.rki.de/> (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [26] Jonathan M Samet, Weihsueh A Chiu, Vincent Cogliano, Jennifer Jinot, David Kriebel, Ruth M Lunn, Frederick A Beland, Lisa Bero, Patience Browne, Lin Fritschi, Jun Kanno, Dirk W Lachenmeier, Qing Lan, Gérard Lasfargues, Frank Le Curieux, Susan Peters, Pamela Shubat, Hideko Sone, Mary C White, Jon Williamson, Marianna Yakubovskaya, Jack Siemiatycki, Paul A White, Kathryn Z Guyton, Mary K Schubauer-Berigan, Amy L Hall, Yann Grosse, Véronique Bouvard, Lamia Benbrahim-Tallaa, Fatiha El Ghissassi, Béatrice Lauby-Secretan, Bruce Armstrong, Rodolfo Saracci, Jiri Zavadil, Kurt Straif, Christopher P Wild (2020): The IARC Monographs: Updated Procedures for Modern and Transparent Evidence Synthesis in Cancer Hazard Identification, JNCI: Journal of the National Cancer Institute, Volume 112, Issue 1, January 2020, Pages 30–37, <https://doi.org/10.1093/jnci/djz169> (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [27] World Health Organization. (2021): WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- [28] United States Environmental Protection Agency (2022): Supplement to the 2019 Integrated Science Assessment for Particulate Matter. EPA/600/R-22/028, May 2022, www.epa.gov/isa (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [29] United States Environmental Protection Agency (2016): Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen – Health Criteria. EPA/600/R-15/068, January 2016, www.epa.gov/ncea/isa (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [30] Bert Brunekreef, Maciej Strak, Jie Chen, Zorana J. Andersen, Richard Atkinson, Mariska Bauwelinck, Tom Bellander, Marie-Christine Boutron, Jørgen Brandt, Iain Carey, Giulia Cesaroni, Francesco Forastiere, Daniela Fecht, John Gulliver, Ole Hertel, Barbara Hoffmann, Kees de Hoogh, Danny Houthuijs, Ulla Hvidtfeldt, Nicole Janssen, Jeanette Jørgensen, Klea Katsouyanni, Matthias Ketzel, Jochem Klompmaker, Norun Hjertager Krog, Shuo Liu, Petter Ljungman, Amar Mehta, Gabriele Nagel, Bente Oftedal, Göran Pershagen, Annette Peters, Ole Raaschou-Nielsen, Matteo Renzi, Sophia Rodopoulou, Evi Samoli, Per Schwarze, Torben Sigsgaard, Massimo Stafoggia, Danielle Vienneau, Gudrun Weinmayr, Kathrin Wolf, and Gerard Hoek (2021): Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM2.5, BC, NO2, and O3: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. Research Report 208. Boston, MA: Health Effects Institute. https://cris.vub.be/ws/portalfiles/portal/75097058/brunekreef_rr_208.pdf (letzter Aufruf: 05.04.2023)

- [31] Umweltbundesamt (2017): Umweltbedingte Krankheitslasten – wie stark gefährden Risikofaktoren die Gesundheit der Bevölkerung? Erklärfilm zum Konzept der Umweltbedingten Krankheitslast. <https://www.youtube.com/watch?v=vEe5jCGYrpI> (letzter Aufruf: 05.04.2023)
- [32] Hoffmann, Barbara; Brunekreef, Bert; Andersen, Zorana; Forastiere, Francesco; Boogaard, Hanna (2022): Benefits of future clean air policies in Europe. Proposed analyses of the mortality impacts of PM_{2.5} and NO₂. Environmental Epidemiology. 6. e221. Doi: 10.1097/ee9.0000000000000221
- [33] Mikkelsen L, Iburg KM, Adair T, Fürst T, Hegnauer M, von der Lippe E, Moran L, Nomura S, Sakamoto H, Shibuya K, Wengler A, Willbond S, Wood P, Lopez AD (2020): Assessing the quality of cause of death data in six high-income countries: Australia, Canada, Denmark, Germany, Japan and Switzerland. Int J Public Health. 2020 Jan;65(1):17-28. doi: 10.1007/s00038-019-01325-x. Epub 2020 Jan 14. PMID: 31932856.
- [34] Wengler A, Rommel A, Plaß D, Gruhl H, Leddin J, Ziese T, von der Lippe E für die BURDEN 2020 Study Group: Verlorene Lebensjahre durch Tod - Eine umfassende Analyse des Sterbegeschehens in Deutschland, durchgeführt im Rahmen des Projekts BURDEN 2020. Dtsch Arztebl Int 2021; 118: 137-44; DOI: 10.3238/arztebl.m2021.0148
- [35] Porst M, von der Lippe E, Leddin J et al. (2022): Die Krankheitslast in Deutschland und seinen Regionen - Ergebnisse zu den disability-adjusted life years (DALY) aus der Studie BURDEN 2020. Dtsch Arztebl Int 2022; 119 (zur Veröffentlichung angenommen)

Der VDI

Gestalter der Zukunft

Seit mehr als 165 Jahren gibt der VDI wichtige Impulse für den technischen Fortschritt. Mit seiner einzigartigen Community und seiner enormen Vielfalt ist er Gestalter, Wissensmultiplikator, drittgrößter technischer Regelsetzer und Vermittler zwischen Technik und Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Er motiviert Menschen, die Grenzen des Möglichen zu verschieben, setzt Standards für nachhaltige Innovationen und leistet einen wichtigen Beitrag, um Fortschritt und Wohlstand in Deutschland zu sichern. Der VDI gestaltet die Welt von morgen – als Schnittstelle zwischen Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. In seinem einzigartigen multidisziplinären Netzwerk mit etwa 135.000 Mitgliedern bündelt er das Wissen und die Kompetenzen, die nötig sind, um den Weg in die Zukunft zu gestalten.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft
(KRdL) - Normenausschuss
Dr. Anke Niebaum
Tel. +49 211 6214-469
krdl@vdi.de
www.vdi.de

ISBN 978-3-949971-49-5
E-ISBN 978-3-949971-50-1