



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL
Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA
Commissione federale per l'igiene dell'aria CFIAR
Cumissiun federala per l'igièna da l'aria CFIA

Luftqualität 2023

Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung



Impressum

Herausgeber

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL ist eine vom Bundesrat eingesetzte ausserparlamentarische Fachkommission von Expertinnen und Experten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung. Sie berät das Departement für Umwelt Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlichen und methodischen Fragen der Luftreinhaltung und der Beurteilung der Auswirkungen von Luftfremdstoffen auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Lebensgemeinschaften oder Lebensräume. Funktionell ist die EKL eine selbstständige und interdisziplinäre Verwaltungskommission, welche zur Behandlung von einzelnen Fragen auch weitere, der Kommission nicht angehörende Fachleute aus verschiedenen Bereichen zur Beratung beiziehen kann.

Autor

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Künzli Nino, Prof. Dr. med. et Ph.D., Präsident
Achermann Beat, Dipl. Biochem., Dipl. Pharm.
Ammann Christof, Dr. sc. nat.
Baltensperger Urs, Prof. Dr. phil II
Buchmann Brigitte, Dr. phil II
Colombo Luca, Dr. sc. nat. ETH
Emmenegger Lukas, Dr.
Flückiger Alexandre, Prof. Dr. iur.
Gygax Hans, Dr. sc. nat.
Kren Linda, MSc. ETH
Kunz Pierre, Dr. sc. nat.
Kutlar Joss Meltem, MSc. ETH, MPH
Rothen-Rutishauser Barbara, Prof. Dr. sc. nat. ETH
von Känel Andrea, Physiker ETH

Einstimmig verabschiedet an der EKL-Sitzung vom 10. Mai 2023

Danksagung

Die EKL verdankt die ausführlichen redaktionellen Beiträge und Kommentare von Dr. Christoph Hüglin, Empa und Ron Kappeler, LUDOK, Swiss TPH, die massgeblich zum Bericht beigetragen haben.

Zitierung

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) 2023: Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung
Bern. 120 S.

Sekretariat EKL

Brigitte Gälli Purghart und Lara Milena Lüthi, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Titelbild

© iStock / AscentXmedia

PDF-Download

www.ekl.admin.ch/de/dokumentation/publikationen/ (eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache erhältlich.

[Les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 et leur importance pour l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air](#)

[I nuovi valori indicativi 2021 dell'OMS sulla qualità dell'aria e il loro significato per l'ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico](#)

© EKL 2023

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Riassunto	11
Executive Summary	13
1 Einleitung	15
2 Ziele und Aufbau des Berichts	25
3 Grundlage der EKL Empfehlungen	26
4 Feinstaub PM10	27
5 Feinstaub PM2.5	32
6 Ozon O₃	36
7 Stickstoffdioxid NO₂	43
8 Schwefeldioxid SO₂	48
9 Kohlenmonoxid CO	51
10 Russ (Black Carbon oder Elemental Carbon)	53
11 Ultrafeine Partikel – Partikelanzahl	56
12 Sand- und Wüstenstaub-Ereignisse	59
13 Weitere Schadstoffe und Messgrössen	60
14 Empfehlungen für eine Anpassung der LRV	66
15 Diskussion	71
16 Schlussfolgerung	78

Anhang	79
Anhang A – WHO Luftqualitätsleitlinien 2021	79
Anhang B – Quellen der Luftschadstoffe	84
Anhang C – Ergänzungen zu PM10 und PM2.5	85
Anhang D – Grenzwerte zum Schutz der Vegetation in naturnahen Ökosystemen	91
Anhang E – Ergänzungen zu Ozon: Vergleichbarkeit der verschiedenen Beurteilungswerte der WHO und der Schweiz.....	94
Anhang F – Ergänzungen zu NO ₂	97
Anhang G – Ergänzungen zu SO ₂	100
Anhang H – Ergänzungen zu PAK.....	101
Anhang I – Grafische Darstellung der gesicherten Gesundheitsfolgen verschiedener Schadstoffe	103
Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	106
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	109
Literaturverzeichnis	113

Vorwort

Vor zehn Jahren hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) im Bericht «Feinstaub in der Schweiz 2013» einen zusätzlichen Feinstaub-Immissionsgrenzwert sowie weitere Schritte zur Verminderung der Feinstaub-Belastung empfohlen. Der Bundesrat hat 2018 die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) entsprechend angepasst, und die Behörden haben in Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und der Bevölkerung den seit Jahrzehnten eingeschlagenen Weg zur Verbesserung der Luftqualität fortgesetzt. Der Erfolg lässt sich sehen: Was vor dreissig Jahren als ferne Vision erschien, ist inzwischen an fast allen Messstandorten – auch in den Ballungsräumen – erfreuliche Realität geworden. Die in der LRV festgelegten Immissionsgrenzwerte werden, ausser im Falle des Ozons, weitgehend eingehalten, und die Trends sind weiterhin rückläufig. Dank den Erfolgen der Luftreinhaltepolitik lebt die Mehrheit der Schweizer Bevölkerung seit Jahren an Orten mit Schadstoffbelastungen, die deutlich tiefer liegen als die aktuell gültigen Schweizer Immissionsgrenzwerte.

Aber nicht nur die Luftreinhaltung hat grosse Fortschritte gemacht. Neu verfügbare Forschungsergebnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffbelastungen veranlassten die Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahre 2016 dazu, eine Neuüberprüfung der WHO-Luftqualitätsleitlinien von 2005 in Auftrag zu geben. Das internationale Autorenteam hatte die Aufgabe zu eruieren, bei welchen Schadstoffkonzentrationen gesundheitliche Schäden belegt sind. Dabei zeigte sich, dass diese Konzentrationen meist deutlich unter den Richtwerten von 2005 liegen. Deshalb wurden in den 2021 neu publizierten WHO-Luftqualitätsleitlinien die Richtwerte nach unten angepasst.

Im vorliegenden Bericht setzt sich die EKL mit dieser neuen Ausgangslage auseinander. Für wichtige Luftschadstoffe der LRV empfiehlt sie Anpassungen der Immissionsgrenzwerte an den neusten Stand der Wissenschaft. Dabei hält sich die EKL an die im Umweltschutzgesetz formulierten Vorgaben, nach welchen die Luftqualität die Ökosysteme und die Gesundheit der Bevölkerung – auch der Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere – nicht beeinträchtigen darf. Die derzeitigen Immissionsgrenzwerte erfüllen diese Vorgabe nicht mehr. Deshalb empfiehlt die EKL die weitgehende Übernahme der neuen WHO-Richtwerte in die LRV. Damit würden die Immissionsgrenzwerte der LRV wieder dem im Umweltschutzgesetz geforderten Schutz entsprechen.

Die Einhaltung der neu vorgeschlagenen Grenzwerte mag erneut als «ferne Vision» erscheinen. Die seit Jahren sichtbaren Trends mit abnehmenden Immissionen geben aber Anlass zu Optimismus. Der stete technologische Fortschritt zur Reduktion der Emissionen ist ungebrochen und die emissionsarme Mobilität soll weiterhin gefördert werden. Auf die Innovationskraft und die lange Schweizer Tradition des partnerschaftlichen und föderalistisch ausgerichteten Vollzugs von Luftreinhaltemassnahmen kann auch zukünftig gebaut werden; sie haben ebenfalls zu steten Verbesserungen der Luftqualität beigetragen. All diese Erfahrungen lassen eine weitere Verbesserung der Luftqualität erwarten und rücken das Erreichen der empfohlenen Gesundheitsziele in greifbare Nähe.

Abschliessend möchte ich an dieser Stelle allen Mitgliedern der EKL und den weiteren beteiligten Expertinnen und Experten, sowie auch dem internationalen Team, das die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 erarbeitete, für die umfassende und wertvolle Arbeit danken. Die EKL hat diesen Bericht am 10. Mai 2023 einstimmig verabschiedet.

Prof. Dr. Nino Künzli
Präsident der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene

Zusammenfassung

Die derzeit in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) festgelegten Immissionsgrenzwerte (IGW) entsprechen weitgehend den Richtwerten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aus dem Jahr 2005, welche auf dem damaligen Wissensstand beruhen. Die meisten dieser IGW werden heute in der Schweiz fast flächendeckend eingehalten. Die nationale und internationale Forschung der letzten 20 Jahre belegt nun gesundheitliche Beeinträchtigungen auch bei deutlich tieferen Konzentrationen von Luftschadstoffen. Deshalb hat die WHO nach umfassender Aufarbeitung des aktuellen Wissensstandes die Richtwerte 2021 in den neuen Luftqualitätsleitlinien «Global Air Quality Guidelines» (AQG) herabgesetzt.

Das Schweizer Umweltschutzgesetz fordert IGW und Luftreinhaltemassnahmen, welche dem Schutz der Umwelt und der Gesundheit der gesamten Bevölkerung – einschliesslich Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit – gerecht werden. Die EKL empfiehlt deshalb für sechs Schadstoffe (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – siehe Tabelle 1) die Anpassung der LRV unter Berücksichtigung der WHO-Richtwerte und damit eine Senkung bzw. Ergänzung der IGW. Zwei derzeit nicht mehr relevante IGW zu Kurzzeitbelastungsspitzen von SO₂ und NO₂ sollen gestrichen werden. Mit diesen Anpassungen werden die Schweizer IGW den Schutzanforderungen des Umweltschutzgesetzes nach heutigem Wissensstand entsprechen.

Dank Anwendung des Vorsorgeprinzips und bereits bestehender Massnahmen ist weiterhin eine Abnahme der Luftschadstoffbelastung zu erwarten. Die flächendeckende Einhaltung der verschärften IGW wird aber auch in Zukunft eine nachhaltige Reduktion der Emissionen erfordern. Nationale Massnahmen und die kantonalen Massnahmenpläne zur Emissionsminderung müssen angepasst und konsequent umgesetzt werden.

Ebenso muss die internationale Zusammenarbeit in der Luftreinhaltepolitik fortgesetzt und gestärkt werden, da Luftschadstoffe auch über Grenzen hinweg transportiert werden.

Tabelle 1: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV. Sie stützen sich weitgehend auf die Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) und die umfangreichen zugehörigen Publikationen und weichen nur in begründeten Ausnahmefällen davon ab.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG 2021	LRV IGW derzeit	Empfehlung EKL 2023
Schwefeldioxid (SO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 8)	Jahresmittelwert und neu Mittelwert über das Winterhalbjahr	–	30 ^a	20 ^b
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Stickstoffdioxid (NO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 7)	Jahresmittelwert	10	30	10
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Kohlenmonoxid (CO), mg/m³ (siehe Kapitel 9)	24-h-Mittelwert	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozon (O₃), µg/m³ (siehe Kapitel 6)	Sommersaison ^e	60	–	60
	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats	–	100	100
	8-h-Mittelwert	100 ^c	–	–
	1-h-Mittelwert	–	120 ^d	120 ^d
Schwebestaub / Feinstaub (PM10), µg/m³ (siehe Kapitel 4)	Jahresmittelwert	15	20	15
	24-h-Mittelwert	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Schwebestaub / Feinstaub (PM2.5), µg/m³ (siehe Kapitel 5)	Jahresmittelwert	5	10	5
	24-h-Mittelwert	15 ^c	–	15 ^c

^a Immissionsgrenzwert, welcher auch den Schutz von Tieren und Pflanzen, ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen nach USG Art. 1 Abs. 1 einschliesst und dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt des Erlasses der Luftreinhalte-Verordnung im Jahre 1985 entspricht.

^b Wert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2000 (WHO, 2000), welcher zum Schutz von Wäldern und weiteren naturnahen Ökosystemen festgelegt wurde. Er gilt als Jahresmittelwert sowie auch für das Winterhalbjahr. (Oktober–März).

^c 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^d Darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

^e Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozon-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt. Für die Schweiz entspricht dies April bis September.

Stichwörter: Luftreinhaltung, Luftreinhalte-Verordnung Schweiz, Immissionsgrenzwerte Schweiz, Immissionen, Kohlenmonoxid CO, Feinstaub PM10, Feinstaub PM2.5, Ozon O₃, Schwefeldioxid SO₂, Stickstoffdioxid NO₂, Russ, Ultrafeine Partikel UFP, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK, Metalle, oxidatives Potenzial von Feinstaub OP, WHO Air Quality Guidelines

Résumé

Les valeurs limites d'immissions (VLI) en vigueur dans l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair) correspondent dans une large mesure aux niveaux de qualité de l'air que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) avait recommandés en 2005 en se fondant sur les connaissances d'alors. La plupart de ces VLI sont actuellement respectées quasiment à l'échelle suisse. La recherche nationale et internationale des 20 dernières années a montré des atteintes à la santé, même pour des concentrations de polluants atmosphériques sensiblement plus faibles. Après un examen approfondi des connaissances actuelles, l'OMS a donc abaissé les niveaux de qualité de l'air en 2021 dans de nouvelles lignes directrices relatives à la qualité de l'air (*Global Air Quality Guidelines, AQG*).

La loi suisse sur la protection de l'environnement (LPE) exige des VLI et des mesures de protection de l'air qu'elles tiennent compte de la protection de l'environnement et de la santé de toute de la population, y compris les catégories de personnes particulièrement sensibles. La CFHA recommande donc de modifier les VLI pour six polluants (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM10, PM2.5 – voir tableau 1) en considérant les niveaux préconisés par l'OMS, ce qui revient à réduire ou à compléter ces VLI. Deux VLI qui ne sont plus pertinentes pour les pics d'exposition à court terme, concernant le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), devraient être abrogées. Ainsi modifiées, les VLI suisses répondront, selon l'état actuel des connaissances, aux exigences de protection de la LPE.

L'application du principe de précaution et les mesures existantes fixent le cadre pour une nouvelle réduction de la concentration des polluants atmosphériques. Toutefois, le respect de VLI plus strictes à l'échelle nationale nécessitera à l'avenir une diminution durable des émissions. Les mesures nationales et les plans de mesures cantonaux devront dès lors être modifiés en conséquence et mis en œuvre de façon cohérente.

Parallèlement, il faudra poursuivre et renforcer la coopération internationale dans la politique de protection de l'air, les polluants atmosphériques s'affranchissant des frontières géographiques.

Tableau 1 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI dans l'OPair. S'appuyant dans une large mesure sur les niveaux préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) et les nombreuses publications correspondantes, ces recommandations n'en dérogent que dans des cas exceptionnels dûment justifiés.

Polluant	Unité de temps	AQG OMS 2021	VLI en vigueur (OPair)	Recommandation CFHA 2023
Dioxyde de soufre (SO₂), µg/m³ (voir chap. 8)	Moyenne annuelle et, désormais, moyenne du semestre d'hiver	–	30 ^a	20 ^b
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Dioxyde d'azote (NO₂), µg/m³ (voir chap. 7)	Moyenne annuelle	10	30	10
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Monoxyde de carbone (CO), mg/m³ (voir chap. 9)	Moyenne par 24 h	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozone (O₃), µg/m³ (voir chap. 6)	Saison estivale ^e	60	–	60
	98 % des moyennes semi-horaires d'un mois	–	100	100
	Moyenne par 8 h	100 ^c	–	–
	Moyenne horaire	–	120 ^d	120 ^d
Poussières en suspension / poussières fines (PM₁₀), µg/m³ (voir chap. 4)	Moyenne annuelle	15	20	15
	Moyenne par 24 h	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Poussières en suspension / poussières fines (PM_{2.5}), µg/m³ (voir chap. 5)	Moyenne annuelle	5	10	5
	Moyenne par 24 h	15 ^c	–	15 ^c

^a VLI qui englobe également la protection des animaux et des plantes, de leurs biocénoses et de leurs biotopes selon l'art. 1, al. 1, LPE et qui correspond à l'état des connaissances au moment de l'édiction de l'OPair en 1985.

^b Valeur des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2000 (OMS, 2000) qui a été fixée pour protéger les forêts et d'autres écosystèmes proches de la nature. Elle s'applique en tant que moyenne annuelle et pour le semestre d'hiver (d'octobre à mars).

^c 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^d Ne peut être dépassée qu'une fois par an au maximum.

^e Moyenne calculée à partir des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée en moyenne semestrielle. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre.

Mots-clés : protection de l'air, ordonnance fédérale sur la protection de l'air suisse, immissions, monoxyde de carbone, CO, poussières fines, PM₁₀, PM_{2.5}, ozone, O₃, dioxyde de soufre, SO₂, dioxyde d'azote, NO₂, suie, particules ultrafines PUF, hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, métaux, potentiel oxydatif des poussières fines PO, lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache erhältlich.

[Les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 et leur importance pour l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air](#)

Riassunto

I valori limite d'immissione (VLI) attualmente sanciti dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA) corrispondono in ampia misura ai valori indicativi fissati dall'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) nel 2005, che si basano sulle conoscenze scientifiche di allora. Nella maggior parte dei casi, questi VLI sono oggi rispettati praticamente su tutto il territorio svizzero. La ricerca nazionale e internazionale degli ultimi 20 anni indica ora che anche concentrazioni nettamente inferiori di inquinanti possono provocare danni alla salute. Per tale motivo l'OMS, dopo essersi confrontata a fondo con lo stato attuale delle conoscenze, ha introdotto una riduzione dei valori indicativi nelle nuove linee guida sulla qualità dell'aria 2021 «Global Air Quality Guidelines» (AQG).

La legge federale sulla protezione dell'ambiente (LPAmb) impone VLI e provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico che tengano conto della protezione dell'ambiente e della salute di tutta la popolazione, comprese le categorie di persone particolarmente sensibili. La CFIAR raccomanda pertanto per sei inquinanti (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – cfr. tabella 1) l'adeguamento dell'OIA in considerazione dei valori indicativi dell'OMS e quindi una riduzione o integrazione dei VLI. Due VLI non più rilevanti per i picchi di inquinamento a breve termine di SO₂ e NO₂ dovrebbero essere abrogati. Con queste modifiche, i VLI svizzeri saranno resi conformi, secondo lo stato attuale delle conoscenze, ai requisiti di protezione della LPAmb.

Grazie all'applicazione del principio di precauzione e dei provvedimenti già esistenti, è prevedibile un'ulteriore riduzione dell'inquinamento atmosferico. Il rispetto dei VLI più severi su tutto il territorio nazionale richiederà però una riduzione continua delle emissioni anche in futuro. È necessario adeguare e attuare di conseguenza i provvedimenti nazionali e i piani cantonali per la riduzione delle emissioni.

La cooperazione internazionale nella politica contro l'inquinamento atmosferico deve inoltre essere portata avanti e rafforzata, in quanto gli inquinanti atmosferici vengono trasportati anche al di là dei confini.

Tabella 1: Raccomandazioni della CFIAR per l'adeguamento dei VLI nell'OIA. Si basano in larga misura sui valori indicativi delle linee guida sulla qualità dell'aria 2021 (AQG) dell'OMS e sulle numerose pubblicazioni in materia e se ne discostano solo in casi eccezionali motivati

Inquinante	Unità di tempo per il calcolo del valore medio	AQG 2021 OMS	VLI OIAt attuali	Raccomandazione CFIAR 2023
Diossido di zolfo (SO₂), µg/m³ (cfr. cap. 8)	Valore medio annuo e nuovo valore medio per il semestre invernale	–	30 ^a	20 ^b
	95 % dei valori medi su ½ h di un anno	–	100	abrogare
	Valore medio su 24 h	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Diossido di azoto (NO₂), µg/m³ (cfr. cap. 7)	Valore medio annuo	10	30	10
	95 % dei valori medi su ½ h di un anno	–	100	abrogare
	Valore medio su 24 h	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Monossido di carbonio (CO), mg/m³ (cfr. cap. 9)	Valore medio su 24 h	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozono (O₃), µg/m³ (cfr. cap. 6)	Stagione estiva ^e	60	–	60
	98 % dei valori medi su ½ h di un mese	–	100	100
	Valore medio su 8 h	100 ^c	–	–
	Valore medio su 1 h	–	120 ^d	120 ^d
Polveri in sospensione / polveri fini (PM10), µg/m³ (cfr. cap. 4)	Valore medio annuo	15	20	15
	Valore medio su 24 h	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Polveri in sospensione / polveri fini (PM2.5), µg/m³ (cfr. cap. 5)	Valore medio annuo	5	10	5
	Valore medio su 24 h	15 ^c	–	15 ^c

^a Valore limite d'immissione che comprende anche la protezione della flora e della fauna, delle loro biocenosi e dei loro biotopi secondo l'articolo 1 capoverso 1 LPAmb e corrisponde allo stato delle conoscenze al momento dell'emanazione dell'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico nel 1985.

^b Valore delle linee guida sulla qualità dell'aria 2000 dell'OMS (OMS, 2000), fissato per la protezione dei boschi e di altri ecosistemi prossimi allo stato naturale. Si applica come valore medio annuo e anche per il semestre invernale (ottobre–marzo).

^c 99° percentile (ossia tre superamenti all'anno consentiti).

^d Può essere superato al massimo una volta all'anno.

^e Media dei valori medi giornalieri massimi su 8 ore della concentrazione di ozono nei sei mesi consecutivi con la concentrazione di ozono più elevata sulla media semestrale. Per la Svizzera si tratta del periodo aprile–settembre.

Parole chiave: protezione dell'aria, ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico, valori limite d'immissione in Svizzera, immissioni, monossido di carbonio CO, polveri fini PM10, polveri fini PM2.5, ozono (O₃), diossido di azoto (NO₂), diossido di zolfo (SO₂), fuliggine, particelle ultrafini (UFP), idrocarburi policiclici aromatici (IPA), metalli, potenziale ossidativo delle polveri fini (PO), Air Quality Guidelines (AQG) dell'OMS

Diese Publikation ist auch in italienischer Sprache erhältlich.

[I nuovi valori indicativi 2021 dell'OMS sulla qualità dell'aria e il loro significato per l'ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico](#)

Executive Summary

The ambient air quality standards currently stipulated in the Air Pollution Control Ordinance (OAPC) largely correspond to the benchmarks set by the World Health Organization (WHO) in 2005, which were based on the knowledge available at the time. Switzerland currently complies with almost all of these ambient limit values. However, national and international research over the past 20 years has shown that air pollutants have adverse health effects even at significantly lower concentrations. The WHO has therefore lowered the guideline values for 2021 in its new Global Air Quality Guidelines (AQG) following a comprehensive review of currently available knowledge.

The Swiss Federal Environmental Protection Act calls for ambient air quality standards and measures against air pollution that appropriately protect the environment and the health of the entire population – including particularly sensitive groups. The Federal Commission for Air Hygiene (FCAH) therefore recommends the OAPC to be adjusted for six pollutants (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – see Table 1) to reflect the WHO guideline values, with ambient air quality standards being either reduced or supplemented. Two ambient air quality standards relating to short-term peaks of SO₂ and NO₂ are no longer relevant and will be removed. These modifications will bring Switzerland's ambient air quality standards into line with the protection requirements of the Environmental Protection Act based on current knowledge.

A further decrease in air pollution levels can be expected thanks to the application of the precautionary principle and existing measures. However, emissions will need to continue falling in the long term to ensure widespread compliance with these stricter ambient air quality standards. National measures and cantonal action plans to reduce emissions will need to be adjusted and consistently implemented.

And because air pollutants travel across borders, international cooperation on air pollution control policy will need to be maintained and reinforced.

Table 1: FCAH recommendations for changes to ambient limit values in the OAPC. These are largely based on the 2021 WHO AQGs and the wide range of related publications, deviating from them only with justification and in exceptional cases.

Pollutant	Averaging time	WHO AQG 2021	Current OAPC ambient limit value	FCAH recommendation 2023
Sulphur dioxide (SO₂), µg/m³ (see Chapter 8)	Annual average and new mean value over winter half-year	–	30 ^a	20 ^b
	95 % of ½ h mean value for a year	–	100	remove
	24h mean value	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Nitrogen dioxide (NO₂), µg/m³ (see Chapter 7)	Annual average	10	30	10
	95 % of ½ h mean value for a year	–	100	remove
	24h mean value	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Carbon monoxide (CO), mg/m³ (see Chapter 9)	24h mean value	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozone (O₃), µg/m³ (see Chapter 6)	Summer season ^e	60	–	60
	98 % of ½ h mean value for a month	–	100	100
	8h mean value	100 ^c	–	–
	1h mean value	–	120 ^d	120 ^d
Suspended particulates / particulate matter (PM₁₀), µg/m³ (see Chapter 4)	Annual average	15	20	15
	24h mean value	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Suspended particulates / particulate matter (PM_{2.5}), µg/m³ (see Chapter 5)	Annual average	5	10	5
	24h mean value	15 ^c	–	15 ^c

^a Ambient air quality standard, which also includes the protection of animals and plants, their biological communities and habitats according to Article 1 paragraph 1 EPA, and corresponds to the state of knowledge when the Air Pollution Control Ordinance was adopted in 1985.

^b Value stipulated in the 2000 WHO AQGs (WHO, 2000) for the protection of forests and other seminatural ecosystems. Valid as an annual average as well as for the winter half-year. (October–March).

^c 99th percentile (i.e. limit value may be exceeded three times per year).

^d May only be exceeded once per year.

^e Average of the maximum daily 8h mean value ozone concentrations in the six consecutive months with the highest six-month average for ozone concentration. For Switzerland, this corresponds to April to September.

Keywords: Air pollution control, Swiss Air Pollution Control Ordinance, Swiss ambient air quality standards, immissions, carbon monoxide CO, particulate matter PM₁₀, particulate matter PM_{2.5}, ozone O₃, sulphur dioxide SO₂, nitrogen dioxide NO₂, black carbon, ultrafine particles UFP, polycyclic aromatic hydrocarbons PAH, metals, oxidative potential of particulate matter OP, WHO Air Quality Guidelines

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die vom Bundesrat eingesetzte **Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)** berät als ausserparlamentarische Fachkommission das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) sowie das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlich-methodischen Fragen zur Luftreinhaltung und zu Auswirkungen der Luftfremdstoffe auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Lebensgemeinschaften oder Lebensräume. Das Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (Umweltschutzgesetz, USG; SR 814.01) bildet die Grundlage der Berichte, Empfehlungen, Stellungnahmen und Anträge, welche die EKL zuhanden des Bundesrates verfasst. Ein wichtiges im USG verankertes Instrument der Luftreinhaltung ist die Festlegung von Immissionsgrenzwerten (IGW). Gemäss Art. 13 und 14 USG müssen IGW auch die Wirkungen auf Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit (z. B. Kinder, Kranke etc.) berücksichtigen und so festgelegt werden, dass nach dem besten Stand der Wissenschaft Belastungen unterhalb der IGW Menschen, Tiere und Pflanzen, sowie ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährden. Das Regelwerk der IGW wird in der Schweiz in der Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV; SR 814.318.142.1, Stand am 1. Januar 2023) festgehalten.

Im Gegensatz zur Situation in vielen anderen Ländern wurde in den letzten 30 Jahren auf Grund dieser gesetzlichen Vorgaben im USG die wissenschaftliche Evidenz durch den Bundesrat immer berücksichtigt. Die EKL hat sich regelmässig zum Stand des Wissens über die Auswirkungen der Luftverschmutzung geäußert und dem Bundesrat Empfehlungen zur Festlegung oder Anpassung der IGW in der LRV gemacht, zuletzt im Jahr 2013 (EKL, 2013) (siehe Kapitel 1.2).

1.2 Vorarbeiten

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene hat 2013 ihren Bericht «Feinstaub in der Schweiz 2013» (EKL, 2013) veröffentlicht. Darin hat sie auf Basis der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Feinstaubbelastung auf die Gesundheit der Bevölkerung folgendes empfohlen:

1. die kurz- und langfristigen IGW der LRV für PM10 («Particulate Matter»: Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm oder kleiner) zu belassen¹;
2. die Feinstaubgrenzwerte mit den wirkungsorientierten, weltweit anwendbaren Richtwerten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Einklang zu bringen und neu einen Jahresmittelwert für PM2.5 im Anhang 7 der LRV zu ergänzen;
3. ein verbindliches 10-Jahres-Zwischenziel für die Reduktion von krebserregendem Russ auf 20 % der Werte von 2013 zu setzen.

Die ersten beiden Empfehlungen wurden per Juni 2018 in der LRV umgesetzt.

Im Bericht «Feinstaub in der Schweiz 2013» gab sich die EKL auch den Auftrag, nach ungefähr fünf Jahren in einer Neubeurteilung der Situation für die Schweiz folgende Fragen zu klären:

- I. In welchem Ausmass konnten die Feinstaub- und Russkonzentrationen, auch an belasteten Standorten, reduziert werden?
- II. Konnten die von der EKL 2013 vorgeschlagenen Anpassungen der IGW den Gesundheitsschutz angemessen verbessern?
- III. Braucht es IGW für Russ oder andere Feinstaub-Parameter?
- IV. Gibt es neue Erkenntnisse zu den Gesundheitsfolgen?

¹ Wobei für den Tagesgrenzwert neu drei statt einer Überschreitung zugelassen wurden.

Mit dem Entscheid der WHO, die Aktualisierung der Luftqualitätsleitlinien («Air Quality Guidelines» [AQG]) im Jahr 2016 zu beginnen und mit der Berufung des Präsidenten der EKL in die «WHO Guideline Development Group», welche mit der Erarbeitung der Luftqualitätsleitlinien beauftragt war, ergab sich für die EKL eine neue Ausgangslage. Die EKL beschloss, mit der Analyse der in ihrem Bericht von 2013 formulierten Fragen bis zur Publikation der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinien zu warten.

Die Erarbeitung und Veröffentlichung der neuen Luftqualitätsleitlinien hat sich aus verschiedenen Gründen stark verzögert. Einerseits waren die Verfahren der Methodik deutlich strenger, aufwändiger, aber auch transparenter geworden; andererseits hat die COVID-19-Pandemie zu weiteren Verzögerungen geführt. Somit wurde auch die Erarbeitung dieses Berichtes verschoben. Dies erlaubte der EKL, die spezifischen Fragen in einen grösseren Kontext zu stellen und im Falle von Anpassungen der WHO-Richtwerte gleichzeitig deren Bedeutung für die Schweizer Luftreinhaltung zu erörtern.

1.3 Die WHO-Luftqualitätsleitlinien

Herleitung der Richtwerte

Die von der WHO in ihren Luftqualitätsleitlinien festgehaltenen Richtwerte bilden ein international anerkanntes Referenzwerk für die Festlegung von IGW. Sie haben primär den Gesundheitsschutz zum Ziel, berücksichtigen aber in der Publikation im Jahr 2000 auch Auswirkungen auf Pflanzen und Lebensräume. Die Richtwerte der WHO waren für die Luftreinhaltung in der Schweiz immer von grosser Bedeutung. Die Erstausgabe der WHO-Luftqualitätsleitlinien geht auf das Jahr 1987 (WHO, 1987) zurück und wurde 2000 und 2005 an den Stand des Wissens angepasst (WHO, 2000, 2006). Die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 dienten dem Bundesrat letztmals im Juni 2018 als Grundlage für eine Anpassung der IGW. Auf Vorschlag der EKL (2013) wurde neu ein Jahresmittelwert für die feine Fraktion des Feinstaubes (PM_{2.5}: Particulate Matter: Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 Mikrometer (μm) oder kleiner) in die LRV aufgenommen. Der 2018 neu festgelegte Wert von 10 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entspricht dem damals gültigen WHO-Richtwert.

Im September 2021 hat die WHO ihre neuen Empfehlungen zur Luftqualität veröffentlicht, welche global anwendbar sind (Weltgesundheitsorganisation, 2021; WHO, 2021). Die WHO-Luftqualitätsleitlinien wurden im Rahmen eines strengen Verfahrens unter Beteiligung mehrerer Expertengruppen mit festgelegten Aufgaben und Zuständigkeiten formuliert (siehe Anhang A). Dem Primat des Gesundheitsschutzes und der wissenschaftlichen Evidenz folgend wurden die Richtwerte für Feinstaub, Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO_2) einer strikten Methodik folgend angepasst. Die WHO hat sich dabei auf wenige, wissenschaftlich klar belegte Gesundheitsfolgen beschränkt, da dies aus Sicht des Gesundheitsschutzes genügt. Sobald eine gesundheitliche Auswirkung als wissenschaftlich gesichert gilt, kann die Festsetzung eines Richtwertes diskutiert werden, da dieser vor jeglicher schädlichen Auswirkung schützen soll. Aus diesem Grund konnte sich die WHO auf sechs Übersichtsarbeiten beschränken, ohne alle anderen gesundheitlichen Wirkungen zu beurteilen.

In sechs Übersichtsarbeiten wurden die Folgen der langfristigen (Monate, Jahre) Luftschadstoffbelastung mit Feinstaub, NO_2 und Ozon, sowie der kurzfristigen (Stunden, Tage) Belastung mit Feinstaub, NO_2 , Ozon, SO_2 und CO auf die Sterblichkeit, akute Atemwegserkrankungen und Herzinfarkte untersucht, da zu diesen Gesundheitsfolgen umfassende globale wissenschaftliche Literatur verfügbar ist (Chen & Hoek, 2020; Huangfu & Atkinson, 2020; Lee et al., 2020; Orellano et al., 2021; Orellano et al., 2020; Zheng et al., 2021).

Das von der WHO beauftragte wissenschaftliche Team mit Expertinnen und Experten von allen Kontinenten beurteilte auf Basis der Ergebnisse dieser Übersichtsarbeiten die Evidenz der untersuchten

Zusammenhänge und leitete nach einem eigens entwickelten transparenten Verfahren für jeden der berücksichtigten Schadstoffe die Richtwerte her. Das Vorgehen zur Herleitung der Richtwerte ist im Anhang A dargelegt.

Die WHO Expertengruppe ging von der Prämisse aus, dass Richtwerte so festzulegen sind, dass schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit verhindert werden. Das alternative Konzept, nach welchem Richtwerte so festgelegt werden, dass sie ein höchstes akzeptiertes Risiko zulassen, wurde wie bisher abgelehnt. Somit musste zuerst der Frage nachgegangen werden, ob die Wissenschaft auf Schwellenwerte (oder Wirkungsschwellen) hinweist, unterhalb derer keine Folgen zu beobachten sind. Das Gremium kam zum Schluss, dass es für alle beurteilten Schadstoffe im untersuchten Konzentrationsbereich keine sicheren Schwellenwerte gibt. Anschliessend galt es, die tiefsten in den verfügbaren Studien vorkommenden Konzentrationen zu identifizieren, für welche schädigende Wirkungen verlässlich hergeleitet werden konnten. Die tiefsten in diesen neuesten Studien berücksichtigten Belastungen waren ausschlaggebend für die Herleitung der neuen Langzeitrichtwerte (empfohlene Jahresmittelwerte).

Im Gegensatz zu den Langzeitrichtwerten definieren kurzfristige Richtwerte (z. B. Tagesmittelwerte) nicht die tiefste Belastung mit belegbaren Auswirkungen, sondern eine Konzentration, welche jährlich höchstens eine bestimmte Anzahl mal überschritten werden sollte. Für die Festlegung der kurzfristigen Richtwerte wurde deshalb eine neue Methode gewählt. Diese zielt auf eine statistische Übereinstimmung zwischen der Häufigkeit der Überschreitungen des kurzfristigen Richtwertes und dem aus den Studien ermittelten Langzeitrichtwert. So wird sichergestellt, dass bei Einhaltung der maximal tolerierten Überschreitungshäufigkeit der Kurzzeitrichtwerte auch die Langzeitrichtwerte eingehalten werden – und umgekehrt.

Die Kriterien der WHO zur Herleitung der Luftqualitätsleitlinien sind damit im Bereich des Gesundheitsschutzes für die Bevölkerung deckungsgleich mit den Vorgaben des USG für die IGW.

Die WHO-Richtwerte und Handlungsempfehlungen

Die WHO (2021) empfiehlt auf Basis der vorliegenden Evidenz und der konsequenten Anwendung der Herleitungsmethode die in Tabelle 2 gezeigten Richtwerte für die «klassischen» Schadstoffe Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂) und Kohlenmonoxid (CO) für langfristige bzw. kurzfristige Belastungen. Zusätzlich werden von der WHO Zwischenziele vorgeschlagen. Ländern mit sehr schlechter Luftqualität erlaubt dies eine Luftreinhaltepolitik mit schrittweiser Annäherung an das eigentliche Luftqualitätsziel und das Ausweisen von Zwischenerfolgen.

Ausserdem formuliert die WHO für die Feinstaubbestandteile Russ (Black Carbon), ultrafeine Partikel und Wüstenstaub Handlungsempfehlungen, sogenannte «Best Practices», welche in den entsprechenden Kapiteln zusammengefasst werden.

Die neuen Luftqualitätsleitlinien und darin enthaltene «Best Practices» der WHO sowie die im Feinstaubbericht der EKL von 2013 formulierten offenen Fragen bilden den Rahmen für diesen Bericht der EKL und die darin formulierten Empfehlungen.

Tabelle 2: Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien (AQG) und Zwischenziele (Interim Targets), welche in den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 (WHO, 2006) und 2021 (WHO, 2021) empfohlen werden, sowie die derzeit gültigen Immissionsgrenzwerte der Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (SR 814.318.142.1, Stand am 1. Januar 2023).

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG 2005	Zwischenziele WHO 2021				WHO AQG 2021	LRV derzeit
			1	2	3	4		
PM2.5, µg/m ³	Jahr	10	35	25	15	10	5	10
	24 Stunden ^a	25	75	50	37,5	25	15	–
PM10, µg/m ³	Jahr	20	70	50	30	20	15	20
	24 Stunden ^a	50	150	100	75	50	45	50
Ozon, µg/m ³	Sommer-saison ^b	–	100	70	–	–	60	–
	8 Stunden ^a	100	160	120	–	–	100	–
	1 Stunde						–	120 ^c
	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats						–	100
NO ₂ , µg/m ³	Jahr	40	40	30	20	–	10	30
	24 Stunden	200 (1-h) ^a	120	50	–	–	25 ^a	80 ^c
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres						–	100
SO ₂ , µg/m ³	Jahr	20 ^d					–	30 ^e
	24 Stunden	20	125	50	–	–	40 ^a	100 ^c
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres						–	100
CO, mg/m ³	24 Stunden	–	7	–	–	–	4 ^a	8 ^c

^a 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^b Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozon-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt. Für die Schweiz entspricht dies April bis September.

^c Darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

^d Wert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2000 (WHO, 2000), welcher zum Schutz von Wäldern und weiteren naturnahen Ökosystemen festgelegt wurde. Er gilt als Jahresmittelwert sowie auch für das Winterhalbjahr (Oktober–März).

^e Immissionsgrenzwert, welcher auch den Schutz von Tieren und Pflanzen, ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen nach USG Art. 1 Abs. 1 und Art. 14 Buchstabe a einschliesst und dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt des Erlasses der Luftreinhalte-Verordnung im Jahre 1985 entspricht.

1.4 Gesundheitliche Auswirkungen der Luftverschmutzung

Die Forschung zu den gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung ist sehr umfassend, die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zu den Gesundheitsfolgen der Luftschadstoffe steigt kontinuierlich. Bedeutend für die Schweiz sind insbesondere neue Erkenntnisse zur Vielfalt der gesundheitlichen Auswirkungen, den Wirkungsmechanismen sowie zu den gesundheitlichen Folgen von heute in der Schweiz typischen Belastungen unterhalb der geltenden IGW.

Gesicherte gesundheitliche Effekte

In der Forschung werden neben Auswirkungen der Luftschadstoffe auf die Lunge auch weitere gesundheitliche Folgen untersucht, wie zum Beispiel die Wirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem, das ungeborene Kind, den Stoffwechsel oder neurokognitive Effekte im Kindes- und Erwachsenenalter. Dabei kann die Luftverschmutzung in allen Lebensabschnitten, also vom Ungeborenen über das Kind bis zum älteren Menschen, ganz unterschiedlich wirken. Aber nicht nur das Alter, sondern auch die gesundheitliche Verfassung können die Anfälligkeit auf Luftschadstoffe erhöhen. Kurze, für die Schweiz relevante Übersichten wurden 2014 und 2019 publiziert (Felber Dietrich, 2014; Kutlar Joss et al., 2019).

Die Lufthygienische Dokumentationsstelle LUDOK am Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut hat eine Übersicht zu den gesicherten Gesundheitsfolgen zusammenfassend dargestellt (Swiss TPH, 2022). Darin sind die durch Luftschadstoffe «ursächlichen» sowie «wahrscheinlich ursächlichen»² Folgen zusammengefasst. Dabei stützte sie sich auf die Einschätzungen von Expertengruppen, welche in den «Integrated Science Assessments» (ISA) der U.S. Umweltbehörde zusammengefasst sind (U.S. EPA, 2010, 2016, 2017, 2019, 2020). Im ISA wird das Ausmass der Evidenz eines Kausalzusammenhanges zwischen Schadstoffbelastungen und spezifischen gesundheitlichen Schäden in Kategorien abgestuft. Die Gesundheitsfolgen sind als interaktive Infografik zugänglich unter <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects/> (siehe auch Abbildung 1).

² Als «wahrscheinlich ursächlich» (likely causal) beurteilt die US EPA Zusammenhänge, die in qualitativ hochwertigen Studien nicht durch Zufallsergebnisse, Störfaktoren oder andere Verzerrungen erklärt werden können. Es bleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit in der Gesamtheit der Evidenz bestehen, zum Beispiel, wenn in Beobachtungsstudien ein Zusammenhang mit dem Schadstoff gefunden wird, aber der Einfluss anderer Schadstoffe nicht klar ausgeschlossen werden kann, oder Wirkungsmechanismen oder Ergebnisse aus experimentellen Human- und Tierstudien limitiert oder inkonsistent sind, oder wenn qualitativ hochstehende experimentelle Tierstudien gesundheitliche Effekte zeigen, aber Humandaten aus der experimentellen oder epidemiologischen Forschung fehlen oder limitiert sind (vgl. U.S. EPA. (2015). *Preamble to the Integrated Science Assessments*. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310244>). Für den Gesundheitsschutz wird – dem Vorsorgeprinzip folgend – Handlungsbedarf daher auch bei «wahrscheinlich ursächlichen» Zusammenhängen abgeleitet.

Kurzzeiteffekte



Atemwege

Atemwegssymptome, z.B. pfeifende Atmung		●	●		
Verschlechterung der Erkrankung, mehr Symptome oder Medikation bei Patienten mit Asthma	●	●	●	●	
Lungenfunktion verringert bei Patienten mit Asthma			●	●	
Verschlechterung der Erkrankung oder mehr Symptome bei Patienten mit COPD	●				
Lungenfunktion verringert	●	●		●	
Entzündung der Atemwege, entzündliche Reaktion	●	●			

Herz-/Kreislaufsystem

Bluthochdruck	●				
Herzrhythmusvariabilität	●				

Stoffwechsel/Immunsystem

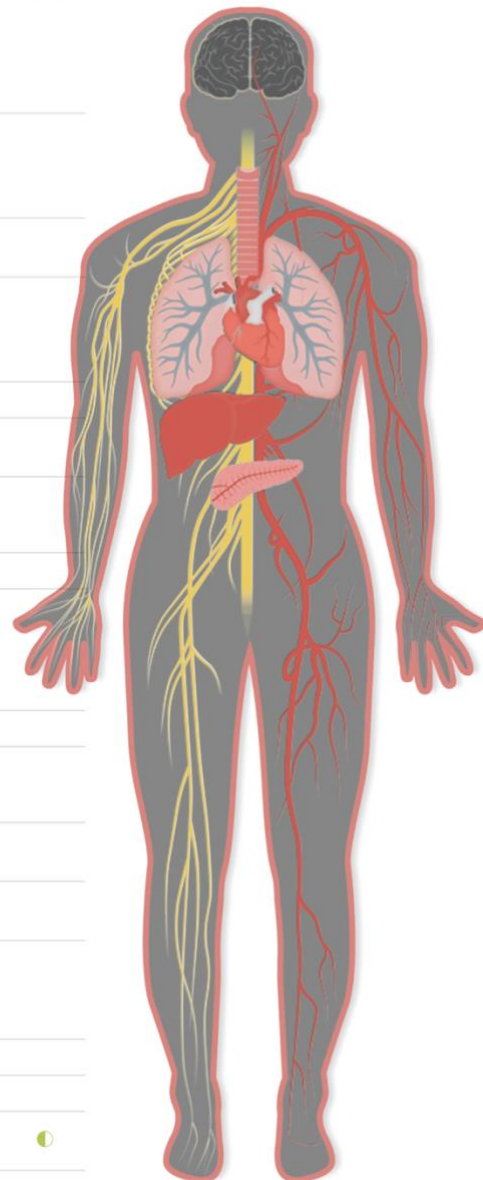
Zucker- und Fettstoffwechselstörungen/-erkrankungen (z.B. Diabetes)		●			
Verringerte Immunabwehr	●				

Sterblichkeit

Krankheitsbedingte Sterblichkeit	●				
Sterblichkeit wegen Herz-/Kreislaufkrankheiten	●				
Sterblichkeit wegen Atemwegserkrankungen	●		●	●	

Notfälle

Notfälle wegen Atemwegserkrankungen	●	●			
Notfälle wegen Asthma		●	●	●	
Notfälle wegen COPD	●	●			
Notfälle wegen Herz-/Kreislaufkrankheiten	●				●



Kausalität: ● ursächlich ● wahrscheinlich ursächlich

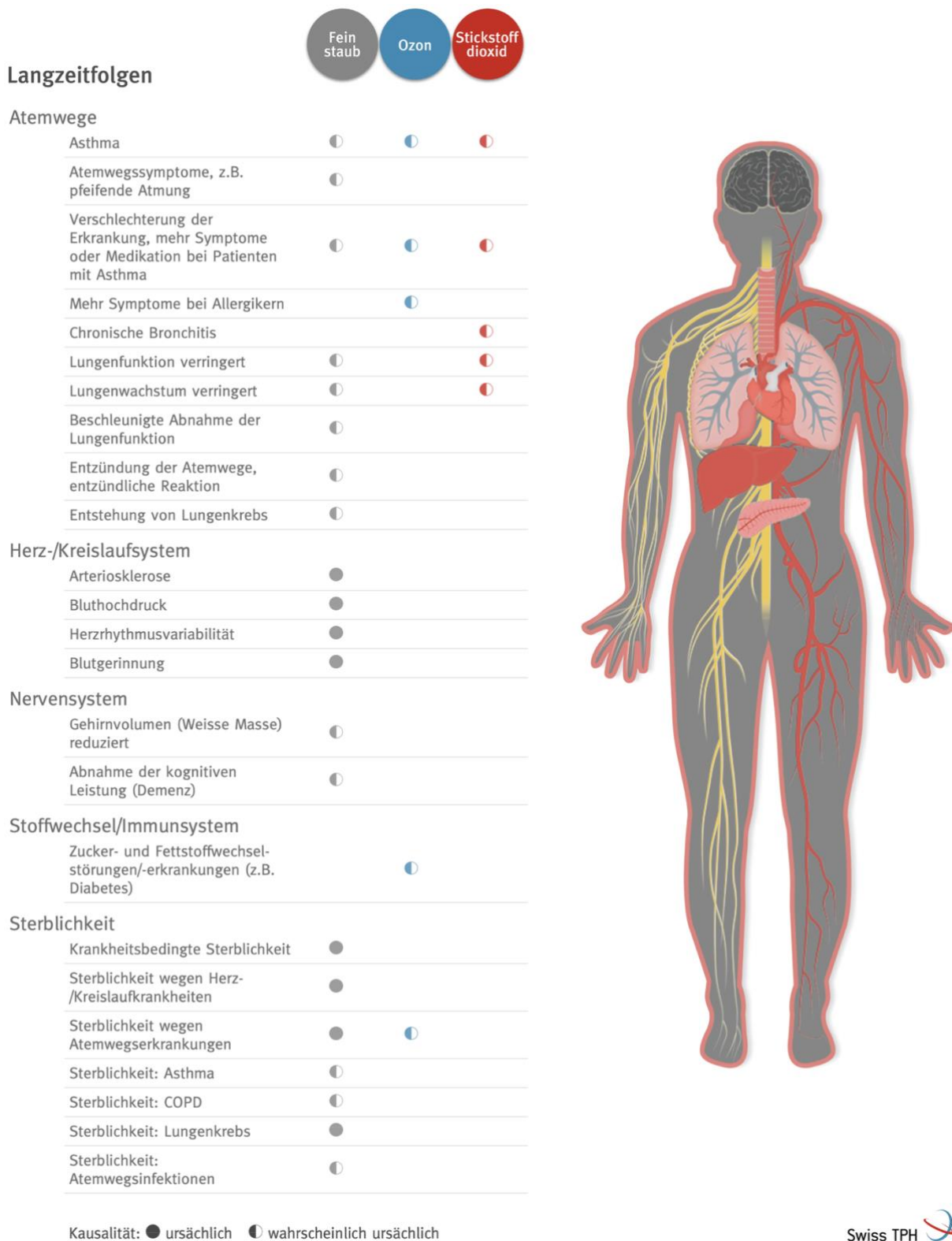


Abbildung 1: Ursächliche und wahrscheinlich ursächliche Gesundheitseffekte, welche mit der kurz- bzw. langfristigen Einwirkung von Luftschadstoffen zusammenhängen (Swiss TPH, 2022).

Wirkungsmechanismen

Wichtig sind die vertieften neuen Erkenntnisse über die biologischen und biochemischen Wirkungsmechanismen von Luftschadstoffen, welche die beobachteten gesundheitlichen Zusammenhänge erklären. In einer Übersichtsarbeit wurden die wichtigsten Wirkungsmechanismen auf zellulärer Ebene beschrieben (Peters et al., 2021).

So sind insbesondere oxidativer Stress und veränderte Mitochondrien-Funktion in den Zellen, genetische und epigenetische Veränderungen sowie systemische entzündliche Reaktionen und die Wirkungen auf das Nervensystem für die beobachteten Effekte verantwortlich, wobei deren Bedeutung und Zusammenspiel je nach Schadstoff oder Schadstoffgemisch, zeitlichem Kontext (kurzfristige oder langfristige Einwirkung) und individuellen Gegebenheiten unterschiedlich sind (Abbildung 2).

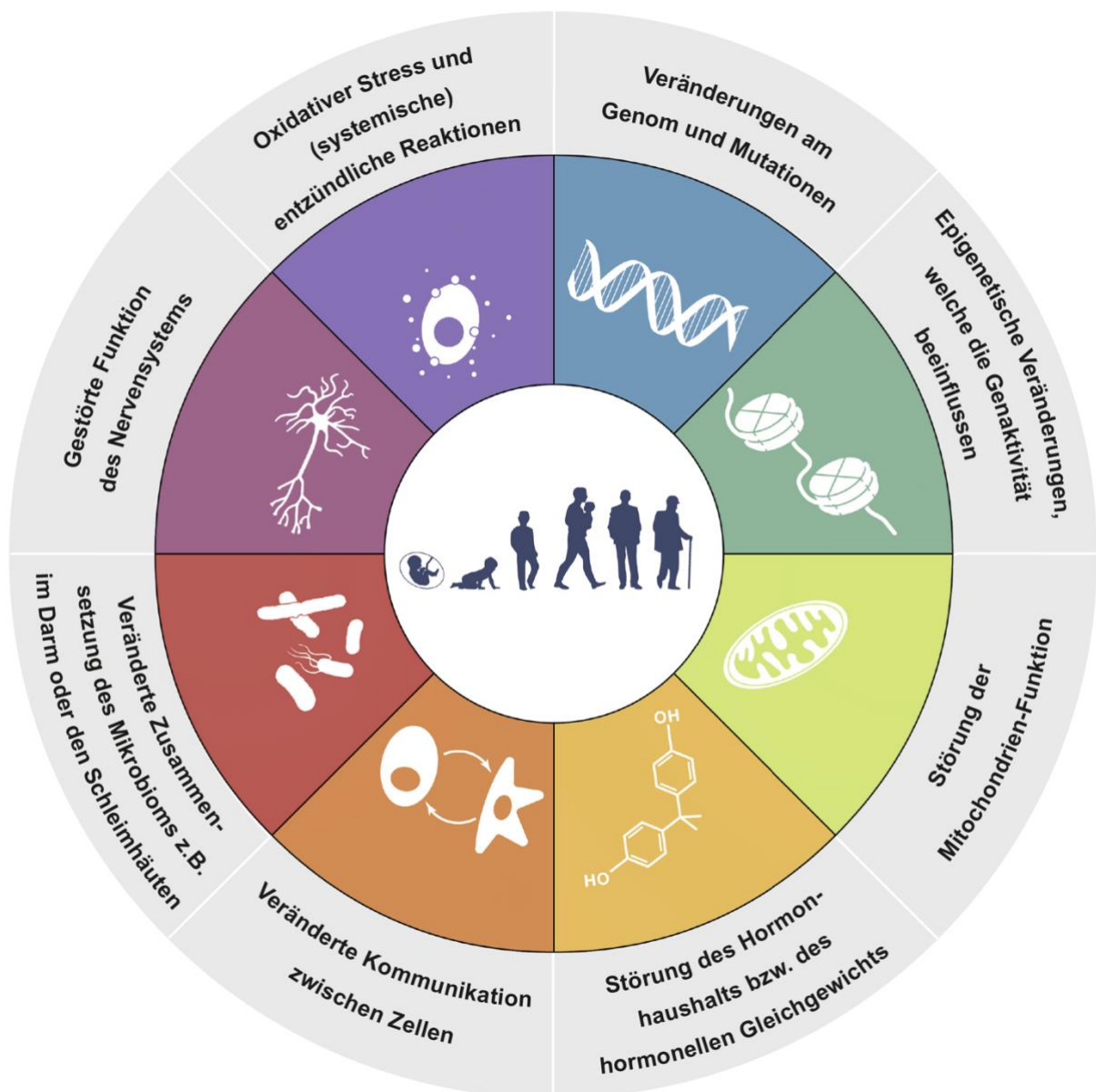


Abbildung 2: Übersicht zu bekannten Wirkungsmechanismen, welche durch Umweltbelastungen ausgelöst werden können (Peters et al., 2021).

Wirkungsschwellen

Angesichts der deutlichen Abnahme der Belastung durch Luftschadstoffe in der Schweiz kommt der Frage von Wirkungsschwellen bei der Festlegung von Grenzwerten eine wichtige Bedeutung zu. Zwar gab es bereits bei der Herleitung der bisherigen WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 respektive der IGW in der LRV keine klaren Hinweise auf nicht schädliche Schwellenkonzentrationen. Allerdings fehlten in den damals zur Verfügung stehenden Studien Daten im tiefsten Konzentrationsbereich. Wie in allen damaligen Studien lag zu Beginn der wichtigsten Schweizer Forschungsprojekte SCARPOL bei Kindern und der noch immer bestehenden Erwachsenenkohorte SAPALDIA das Ausmass selbst in den am wenigsten belasteten Studienregionen über den Grenzwerten. Dies hat sich seither stark verändert. Die für die Beurteilung der Evidenz zentralen Langzeitstudien (d. h. Kohortenstudien) haben nicht nur zahlenmässig stark zugenommen. Sie greifen zudem dank globaler Zusammenarbeit zwischen grossen Studienkonsortien – auch mit Schweizer Beteiligung – auf die Daten riesiger Studienpopulationen von mehreren hunderttausend Personen zu. Ferner leben grosse Anteile dieser Studienbevölkerung in nur schwach belasteten Regionen. Dies ermöglicht der Forschung, den Wirkungszusammenhang in sehr tiefen Belastungssituationen zu quantifizieren.

Wie oben erwähnt, hat die WHO für die Festlegung der Richtwerte zuerst beurteilt, ob sich aus der wissenschaftlichen Literatur Wirkungsschwellen herleiten lassen. Obwohl in den neusten verfügbaren Studien auch sehr tiefe Belastungsbereiche untersucht wurden, lassen sich keine Wirkungsschwellen erkennen. Abbildung 3 veranschaulicht diese Situation am Beispiel des Zusammenhangs zwischen der Langzeitbelastung mit PM_{2.5} und dem Sterberisiko in der amerikanischen Medicare-Kohorte (Di et al., 2017). Die annähernd lineare Belastungs-Wirkungsbeziehung im tiefen Konzentrationsbereich gibt keine Hinweise auf eine Wirkungsschwelle. Das heisst, es lässt sich keine Konzentration erkennen, unterhalb welcher keine Schäden auftreten. Die WHO hat deshalb in den verfügbaren Studien am unteren Ende des Belastungsbereichs jene Konzentration als neuen Richtwert identifiziert, für welche Gesundheitseffekte erkennbar sind (5. Perzentil der Belastung). Basierend auf diesem Konzept wurde der WHO-Richtwert für den Jahresmittelwert von Feinstaub PM_{2.5} folglich von 10 µg/m³ auf 5 µg/m³ reduziert (vgl. A.1). Die europäische ELAPSE Studie wurde erst nach der WHO-Luftqualitätsleitlinie publiziert. Sie bestätigt mit über 28 Millionen Teilnehmern aus europäischen Kohorten, welche auch die «Swiss National Cohort» einschloss, Effekte unterhalb des derzeitigen Schweizer Grenzwertes von 10 µg/m³ (Stafoggia et al., 2022). Über die gesundheitlichen Auswirkungen von Konzentrationen unterhalb dieses neuen Richtwertes lassen sich mit den derzeit verfügbaren Studien keine Aussagen machen.

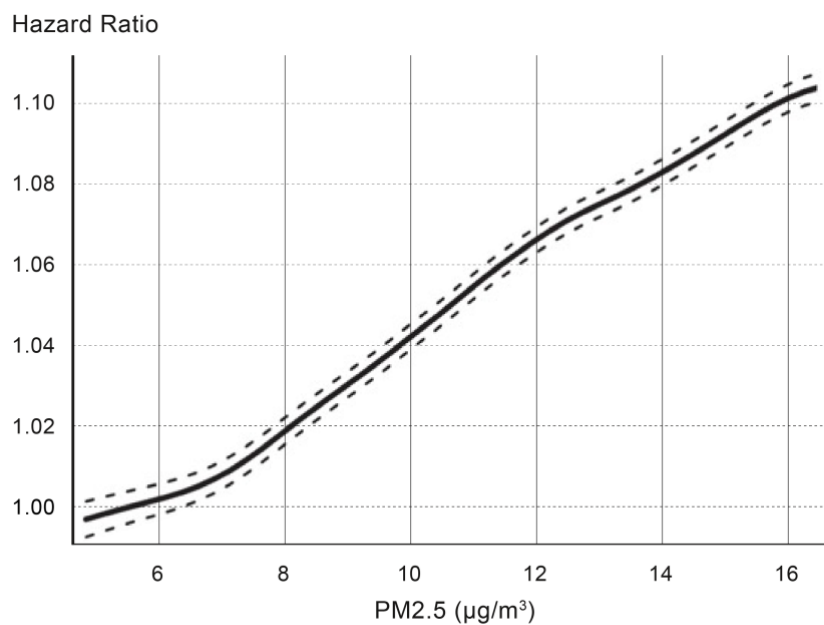


Abbildung 3: Belastungs-Wirkungsbeziehung (durchgezogene Linie mit dem oberen und unteren Vertrauensintervall als gestrichelte Linien) des Sterberisikoverhältnisses (Hazard Ratio HR) mit der langfristigen PM2.5-Belastung in der amerikanischen Medicare Kohortenstudie (Di et al., 2017). Auch bei Jahresmittelwerten unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ besteht ein zusätzliches PM-bedingtes Sterberisiko. Je höher die Belastung desto höher das Sterberisiko.

2 Ziele und Aufbau des Berichts

Dieser Bericht verfolgt drei übergeordnete Ziele. Erstens soll beurteilt werden, ob der aktuelle Stand des Wissens über die gesundheitlichen Auswirkungen und die darauf beruhenden neuen Richtwerte der WHO eine Anpassung der Schweizer IGW nötig machen. Zweitens werden die im EKL-Bericht «Feinstaub in der Schweiz 2013» aufgeworfenen Fragen beantwortet – insbesondere bezüglich der Notwendigkeit von IGW für weitere Schadstoffe – und drittens werden entsprechende Empfehlungen an den Bundesrat hergeleitet.

Die nachfolgenden Kapitel (4–13) geben für die behandelten Schadstoffe einen Überblick zu den Empfehlungen der EKL, den Quellen der Emissionen, den Gesundheitsfolgen und dem Stand der Immissionsituation in der Schweiz. Die Reihenfolge der Schadstoffe orientiert sich an der Reihenfolge der WHO-Luftqualitätsleitlinien. Dabei wird die Einhaltung der derzeitigen IGW (LRV) sowie der neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 anhand der Messwerte des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) diskutiert. Das Konzept der Standorttypen, wie im NABEL angewendet, erlaubt eine repräsentative Beurteilung der Belastung in der Schweiz, deckt aber lokale Hotspots nicht ab. In einzelnen Fällen werden zusätzlich kantonale Messwerte herangezogen. Zudem wird ausgeführt, ob es für die behandelten Schadstoffe international anerkannte Referenzmessverfahren gibt, da dies für IGW eine zwingende Voraussetzung ist.

Neben den Schadstoffen, für welche die WHO Richtwerte festgelegt hat, werden auch Handlungsanweisungen der WHO, sogenannte «Best Practices», für ultrafeine Stäube, Russ und Wüstenstaub-Ereignisse im Schweizer Kontext diskutiert. Den aufgeworfenen Fragen des letzten Feinstaubberichts folgend werden ausserdem die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), die Metalle und das oxidative Potenzial (OP) von Feinstaub beleuchtet. Im Kapitel 14 gibt die EKL einen Ausblick, welcher alle Empfehlungen der EKL nochmals zusammenfasst.

Im Anhang B werden in einer Übersichtstabelle (Tabelle 15) die Beiträge der verschiedenen Quellen der Schadstoffemissionen gezeigt. Ausserdem sind ergänzende Informationen zur Herleitung der WHO-Richtwerte und umfassende weitere Informationen und Darstellungen zu den besprochenen Schadstoffen enthalten. In allen Übersichtstabellen werden die Schadstoffe zwecks Vergleichbarkeit in der Reihenfolge der LRV aufgelistet.

3 Grundlage der EKL Empfehlungen

Für ihre Empfehlungen orientiert sich die EKL am eingangs erwähnten gesetzlichen Auftrag des Umweltschutzgesetzes (USG). Gemäss USG legt der Bundesrat zum Schutz von Mensch und Umwelt IGW für Luftschadstoffe nach dem Stand des Wissens fest. Die IGW müssen so festgelegt werden, dass bei Immissionen unterhalb dieser Werte Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährdet sind.

Die WHO hat bei der Herleitung der Luftqualitätsleitlinien 2021 den aktuellen Stand des Wissens eingehend analysiert, zusammengefasst und als Basis für ihre Empfehlungen verwendet. Die Kriterien der WHO zur Festlegung der Richtwerte sind im Bereich des Gesundheitsschutzes deckungsgleich mit den Vorgaben von Artikel 14 des Umweltschutzgesetzes für die Festlegung der IGW. Daher übernimmt die EKL in ihren Empfehlungen nach eingehender Analyse der von der WHO zur Verfügung gestellten wissenschaftlichen Unterlagen in den meisten Fällen die von der WHO vorgeschlagenen Richtwerte. Zusätzlich wird der Schutz von Ökosystemen in die Beurteilung der EKL einbezogen.

4 Feinstaub PM10

4.1 Empfehlungen der EKL für PM10

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für Feinstaub PM10 für den Jahresmittelwert neu auf $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für den Tagesmittelwert auf $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu senken. Damit wird dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Tabelle 3: Langzeit- und Kurzzeitrichtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für PM10 im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
PM10, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Jahr	15	20	15
	24 Stunden ^a	45	50	45

^a 99. Perzentil (d.h. 3 Überschreitungstage pro Jahr sind zulässig).

4.2 Quellen von PM10

Feinstaub ist ein komplexes Gemisch verschiedenster chemischer Inhaltsstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften und Wirkungen. Er kommt durch eine Vielzahl von Quellen und Prozessen zustande. Quellen von PM10 sind insbesondere Industrie und Gewerbe, Verkehr und Holzfeuerungen. Feinstaub setzt sich aus einer primären, direkt als Partikel emittierten Fraktion, sowie aus sogenanntem sekundärem Feinstaub, der sich erst in der Luft durch chemische Reaktionen von Vorläufergasen bildet, zusammen. Dieser sekundär gebildete Feinstaub macht etwa die Hälfte des gesamten Feinstaubs PM10 aus und ist aufgrund der Ausbreitung der Vorläufergase und der für die Bildung benötigten Zeit räumlich deutlich homogener verteilt. An quellennahen Standorten findet man erhöhte Konzentrationen von primärem Feinstaub. An stark befahrenen Strassen sind dies aufgewirbelter Mineralstaub, Brems-, Strassen- und Reifenabrieb sowie Russ. In Regionen mit vielen Holzfeuerungen werden hohe Konzentrationen von organischem Verbrennungsaerosol und Russ gemessen (EKL, 2007, 2013). Weitere Informationen zur Zusammensetzung und den Quellen von Feinstaub PM10 sind im Anhang C zu finden. In der Masse der Feinstaubfraktion von PM10 sind auch die kleineren Feinstäube – PM2.5 – enthalten. Diese werden im nächsten Kapitel diskutiert.

4.3 Gesundheitsfolgen von Feinstaub

Qualitativ sind die Auswirkungen von PM10 und PM2.5 weitgehend gleich. Deshalb werden hier die Folgen beider Feinstaubfraktionen (PM10 und PM2.5) beschrieben (vgl. auch (EKL, 2013), Abbildung 1, Anhang C und Abbildung 41 im Anhang I.1).

Bei kurzfristig erhöhter Feinstaubbelastung nimmt die Zahl der Todesfälle, Notfallkonsultationen und Spitaleintritte wegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Atemwegserkrankungen zu. Die langfristig erhöhte Belastung mit Feinstaub trägt zu nicht-übertragbaren Krankheiten wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder neurodegenerativen Krankheiten (Demenz) bei. Es gibt Hinweise, dass die Belastung mit der gröberen Fraktion des Feinstaubs, also Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen 2,5 und $10 \mu\text{m}$, unabhängig von PM2.5, mit akuten Folgen für die Gesundheit verbunden ist, vor allem mit Atemwegserkrankungen, mit Notfallkonsultationen wegen Asthma und mit der Sterblichkeit (vgl. EKL, 2013, S. 26 f, Anhang A.2-1; Liu et al., 2022).

Die Folgen der langfristigen Feinstaubbelastung werden gemäss WHO-Übersicht auch bei tiefen Belastungen beobachtet. Wie beispielhaft in Abbildung 3 (Kapitel 1.4) gezeigt wird, nimmt das Risiko mit steigender Belastung kontinuierlich zu. Da neuste Studien in Regionen mit tiefer Belastung oft nur PM_{2.5} untersuchen, sind die Gesundheitsfolgen für tiefe Konzentrationen von PM₁₀ seltener beschrieben. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit gesicherten kurz- und langfristigen Auswirkungen der Feinstäube. Die Abbildung kann auf der LUDOK Internetseite interaktiv erkundet werden (vgl. auch [interaktive Grafik auf LUDOK](#) und Abbildung 41 im Anhang I.1).

4.4 Entwicklung der PM₁₀-Belastung in der Schweiz

Wie in Abbildung 4 dargestellt, nimmt die PM₁₀-Belastung seit Jahrzehnten stetig ab. Eine hohe Korrelation besteht auch zwischen Kurzzeit- und Langzeitwerten. Wird die maximal zulässige Zahl der Überschreitungen des Kurzzeitwertes eingehalten, kann auch von der Einhaltung des Jahresmittelwerts ausgegangen werden und umgekehrt (vgl. Anhang C.2).

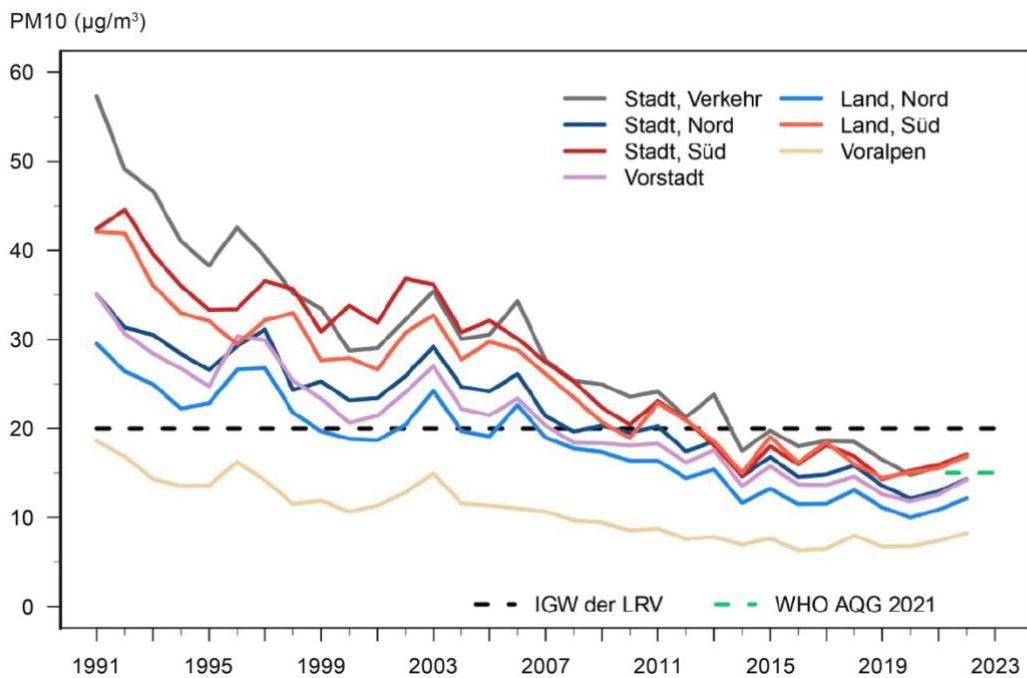


Abbildung 4: Feinstaub PM₁₀ Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.

4.5 Stand der Einhaltung der IGW und der neuen WHO-Richtwerte für PM10

Werden die derzeitigen IGW eingehalten?

Der Immissionsgrenzwert für den Jahresmittelwert von PM10 von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird seit mehreren Jahren an allen Standorten des NABEL-Messnetzes eingehalten (vgl. Abbildung 4). Der Immissionsgrenzwert für den Tagesmittelwert wird nur noch vereinzelt überschritten, hauptsächlich auf der Alpensüdseite und in Jahren mit häufigen, intensiven Saharastaub-Ereignissen (Abbildung 5). Zu beachten ist, dass gemäss LRV bis zu 3 Tage mit Immissionen über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zulässig sind.

Anzahl Tage mit PM10-Mittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

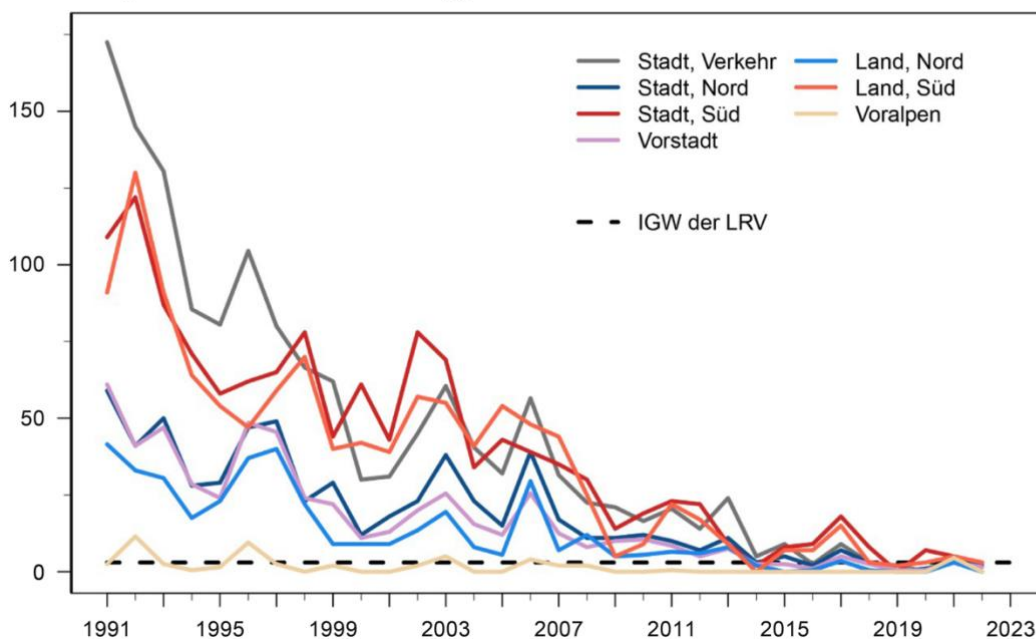


Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM10 über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1991–2022.

Die gestrichelte Linie entspricht dem IGW der LRV, der 3 Überschreitungen pro Jahr zulässt.

Werden die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz bereits eingehalten?

Die WHO empfiehlt als Richtwert für den Jahresmittelwert $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für den Tagesmittelwert $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Unter Einbezug der kantonalen und städtischen Messdaten lässt sich die in Abbildung 6 gezeigte Immissionsbelastungskarte für den Jahresmittelwert 2021 abschätzen. Blau und grün gefärbte Gebiete halten den neuen Jahresmittel-Richtwert ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ein. Abbildung 7 zeigt die Anzahl der Überschreitungen des neuen Tagesmittel-Richtwertes ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dieser wurde im Jahr 2021 im Gegensatz zu den Vorjahren an den meisten Messstandorten mehr als die zulässigen dreimal pro Jahr überschritten, da das Jahr durch häufige und starke Saharastaub-Ereignisse geprägt war.

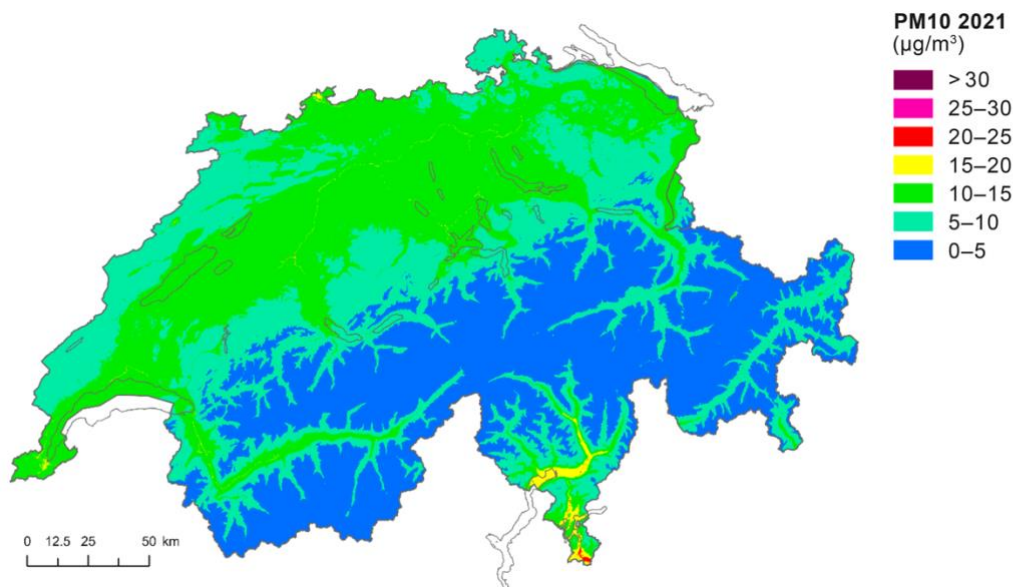


Abbildung 6: Immissionskarte für den Jahresmittelwert von Feinstaub PM10 für das Jahr 2021.

Die Farbkodierung dieser räumlichen Modellierung unter Einbezug der Immissionsmessungen zeigt in Blau- und Grüntönen Gegenden, an denen der neue WHO-Richtwert ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bereits eingehalten wird; Gegenden in Gelbtönen liegen über dem WHO-Richtwert, halten aber den derzeitigen LRV IGW (Jahresmittel) ein. Rottöne beschreiben Gegenden mit Überschreitungen des IGW.

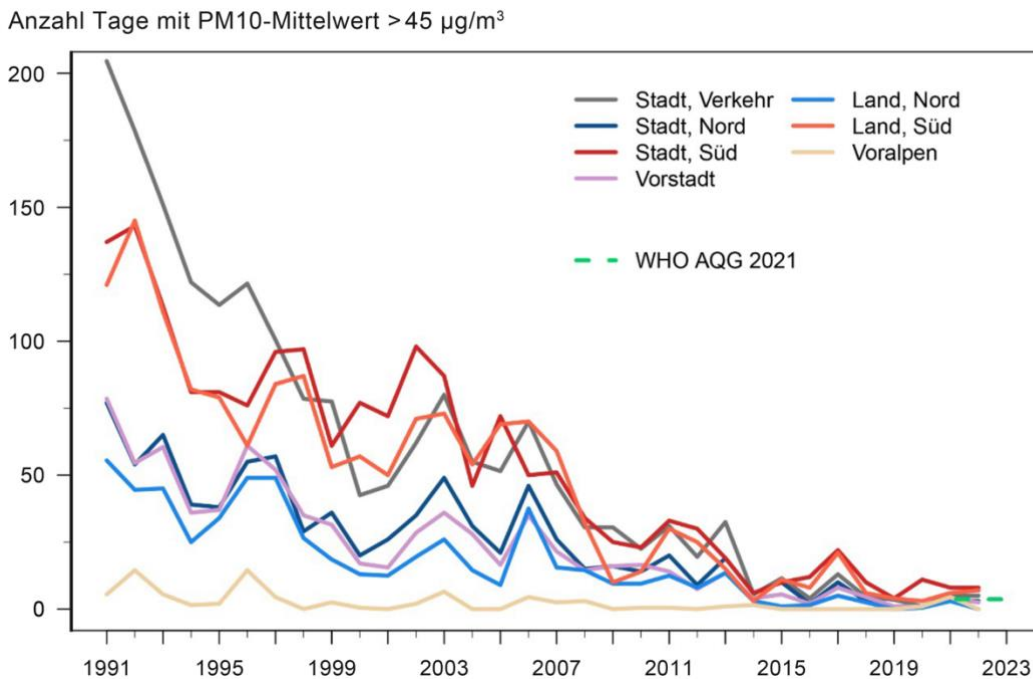


Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM10 über $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1991–2022.

Die grün gestrichelte Linie entspricht dem WHO-Richtwert, der 3 Überschreitungen pro Jahr zulässt.

Wo liegen die Immissionen über den neuen WHO-Richtwerten? Welche Quellen oder Einflüsse zeichnen diese Standorte aus?

Wie Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen, werden die neuen Richtwerte noch nicht an allen Standorten eingehalten. Städtische Gebiete weisen aufgrund ihrer Verdichtung von Bebauung, Landnutzung und Bevölkerung höhere Emissionen aus Verkehr und Industrie und damit auch höhere Schadstoffbelastungen auf. Die Bildung der sekundären Feinstaubanteile aus den Vorläufergasen Stickoxide (Verkehr), Ammoniak (landwirtschaftliche Tierhaltung) und flüchtige organische Verbindungen (Industrie, Holzheizungen, Gewerbe und Lösungsmittel) erfolgt räumlich gleichmässiger und zeigt kaum lokale Unterschiede. Generell ist ihre Konzentration an höhergelegenen Standorten geringer, mit Ausnahme von Orten mit einer grossen Zahl von Holzheizungen. Wüstenstaub-Ereignisse können an höher gelegenen Standorten zu Überschreitungen des Tagesgrenzwertes führen.

Ein eingeschränkter Luftaustausch, welcher die Verdünnung der Schadstoffe unter bestimmten meteorologischen Bedingungen erschwert (wie z.B. Inversionswetterlagen oder morgendliche Inversionen in Alpentälern), führt kurzfristig zu höheren Feinstaubimmissionen. Orte mit hohem Verkehrsaufkommen oder mit vielen Holzheizungen bei gleichzeitig ungünstiger Topografie sind davon am meisten betroffen. Folglich sind Überschreitungen der PM10-Richtwerte insbesondere auf der Alpensüdseite sowie an städtischen, verkehrsbelasteten Standorten zu erwarten.

Mit Verschärfungen der Abgasvorschriften und der angestrebten Elektrifizierung der Fahrzeugflotte werden die abgasbedingten Emissionen weiter abnehmen. Die Belastung durch Feinstaub aus Abrieb von Reifen, Schienen, Brems- und Strassenbelägen oder durch aufgewirbelten Strassenstaub bleibt jedoch bestehen. Diese nicht-abgasbedingten Emissionen machen bereits heute über 50% der primären Feinstaubemissionen des Verkehrs aus. Sie enthalten unter anderem Metalle wie Kupfer und Eisen (siehe Kapitel 13.2). Für die Reduktion nicht-abgasbedingter Emissionen bedarf es weitergehender Massnahmen organisatorischer und technischer Natur.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 12341:2014 und SN EN 16450:2017 (SN EN, 2014, 2017a).

5 Feinstaub PM2.5

5.1 Empfehlungen der EKL für PM2.5

Die EKL empfiehlt, den Immissionsgrenzwert für Feinstaub PM2.5 für den Jahresmittelwert auf 5 µg/m³ zu senken und neu einen Immissionsgrenzwert von 15 µg/m³ für den Tagesmittelwert einzuführen. Damit wird dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Tabelle 4: Langzeit- und Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für PM2.5 im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
PM2.5, µg/m ³	Jahr	5	10	5
	24 Stunden ^a	15	–	15

^a 99. Perzentil (d.h. 3 Überschreitungstage pro Jahr sind zulässig).

Bereits heute werden zur Ermittlung des Jahresmittelwerts von Feinstaub PM2.5 zeitlich hochaufgelöste Messungen durchgeführt. Da PM2.5 räumlich recht homogen verteilt ist, ist davon auszugehen, dass wenige Messstandorte zur Überwachung der entsprechenden Immissionen ausreichen und somit die Einführung dieses neuen Immissionsgrenzwerts messtechnisch kaum zu Mehraufwand führen wird. Weitere Informationen finden sich im Anhang C.4.

5.2 Quellen von PM2.5

Feinstaub PM2.5 ist wie die gröbere Fraktion PM10 ein Gemisch verschiedenster chemischer Inhaltsstoffe. Die Quellen von PM2.5 sind grundsätzlich die gleichen wie diejenigen von PM10, die Hauptquellen sind Industrie und Gewerbe, Holzfeuerungen und Verkehr. Die absoluten und prozentualen Beiträge der Quellen zu PM2.5 können sich jedoch je nach Standort merklich von PM10 unterscheiden. Beispielsweise sind die Anteile von primärem Feinstaub aus Abrieb und Aufwirbelung im PM2.5 deutlich geringer als in PM10. Russ und sekundärer Feinstaub sind dagegen praktisch vollständig in der PM2.5-Fraktion enthalten. Sekundär gebildeter Feinstaub spielt im PM2.5 eine noch wichtigere Rolle als im PM10 und macht mehr als die Hälfte der PM2.5-Belastung aus (EKL, 2007, 2013). Weitere Informationen zur Zusammensetzung und den Quellen von Feinstaub PM2.5 sind im Anhang C.1 zu finden.

5.3 Gesundheitsfolgen von PM2.5

Siehe Kapitel 4.3.

5.4 Entwicklung der PM2.5-Belastung in der Schweiz

Die nachfolgende Abbildung 8 bestätigt für die Jahresmittelwerte seit Messbeginn eine stete Abnahme der Belastung. Eine hohe Korrelation besteht auch zwischen Kurzzeit- und Langzeitmittelwerten. Wird die maximal zulässige Zahl der Überschreitungen des Kurzzeitwertes eingehalten, kann auch von der Einhaltung des Jahresmittelgrenzwerts ausgegangen werden und umgekehrt (vgl. Anhang C.3).

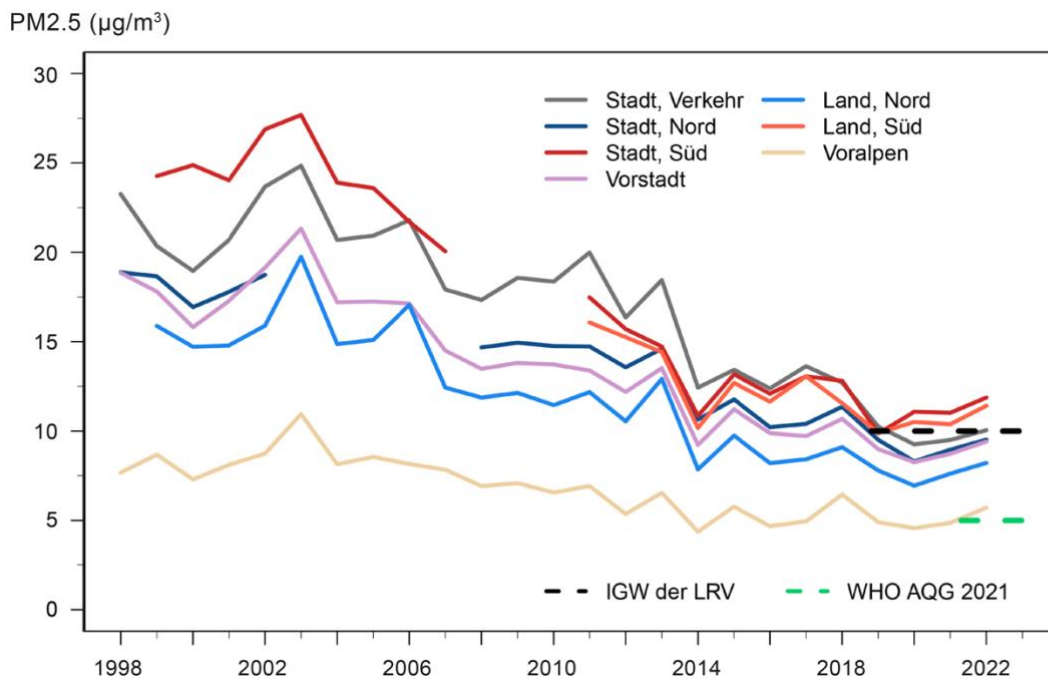


Abbildung 8: Feinstaub PM2.5 Jahresmittelwerte 1998–2022 nach Standorttypen.

5.5 Stand der Einhaltung des IGW und der neuen WHO-Richtwerte für PM2.5

Wird der derzeitige IGW (Jahresmittel) eingehalten?

Der Immissionsgrenzwert für den Jahresmittelwert von Feinstaub PM2.5 (10 µg/m³) wird heute auf der Alpennordseite weitgehend eingehalten. In der Südschweiz kommt es noch zu Überschreitungen (Abbildung 8 und Abbildung 9). Die Schweiz hat bisher für PM2.5 keinen IGW für den Tagesmittelwert festgelegt.

Werden die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz bereits eingehalten?

Die neuen PM2.5 WHO-Richtwerte werden heute an städtischen und auch ländlichen Standorten überschritten und nur in erhöht gelegenen Gebieten eingehalten, wo es aber durch intensive Saharastaub-Ereignisse ebenfalls kurzfristig zu Überschreitungen kommen kann (Abbildung 9 und Abbildung 10). Eine hohe Korrelation besteht zwischen Kurzzeit- und Langzeitwerten (vgl. Anhang C.3).

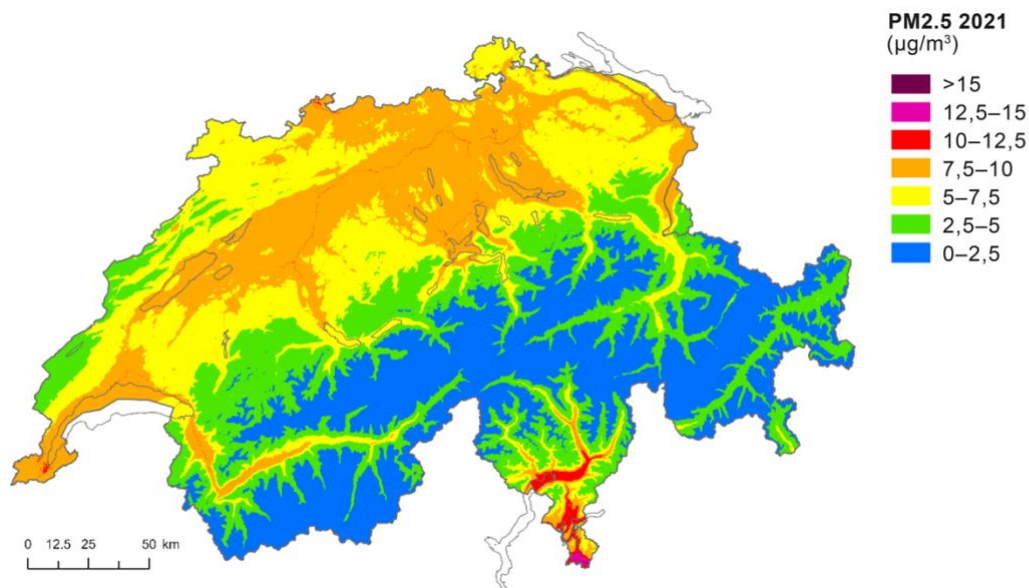


Abbildung 9: Immissionskarte für den Jahresmittelwert von PM2.5 für das Jahr 2021.

Die Farbkodierung dieser räumlichen Modellierung unter Einbezug der Immissionsmessungen zeigt in Blau- und Grüntönen Gebiete, in denen der neue WHO-Richtwert ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bereits eingehalten wird; Gebiete in Gelb- und Orangetönen liegen über dem WHO-Richtwert, halten aber den derzeitigen IGW (Jahresmittel) der LRV ein. Rot- und Lilatöne beschreiben Gegenden mit Überschreitungen des IGW.

Anzahl Tage mit PM2.5-Mittelwert $> 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

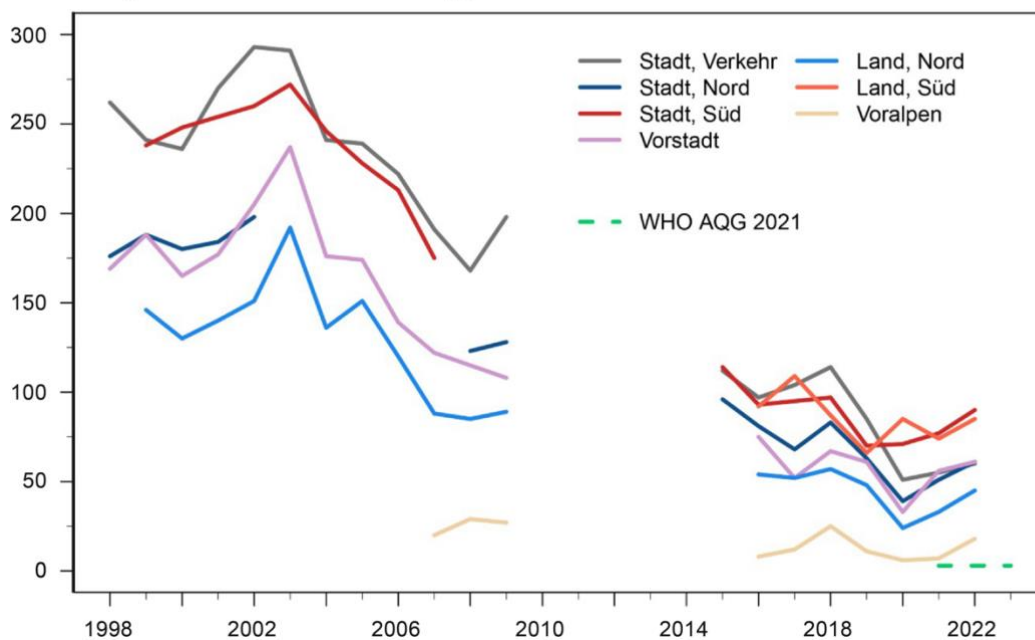


Abbildung 10: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM2.5 über $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1991–2022.

Die gestrichelte Linie entspricht dem WHO-Richtwert, der 3 Überschreitungen pro Jahr zulässt. Da 2010 bis 2015 nur alle vier Tage gemessen wurde, stehen für diese Periode keine Angaben über Anzahl Überschreitungen zur Verfügung.

Wo liegen die Immissionen über den neuen WHO-Richtwerten? Welche Quellen oder Einflüsse zeichnen diese Standorte aus?

Der neue WHO-Richtwert für den Jahresmittelwert von Feinstaub PM_{2.5} (5 µg/m³) wird im NABEL-Messnetz nur an höher gelegenen ländlichen Standorten eingehalten (Abbildung 8). Die Immissionen an den übrigen Standorten liegen erheblich über dem neuen WHO-Richtwert, wobei PM_{2.5} nur an 12 der 16 Standorte des NABEL Messnetzes gemessen wird. Auch der WHO-Richtwert für den Tagesmittelwert (15 µg/m³) wird in der Schweiz fast in allen bewohnten Regionen deutlich mehr als dreimal pro Jahr überschritten (Abbildung 10).

Man muss somit davon ausgehen, dass die neuen WHO-Richtwerte sowohl im Tages- als auch im Jahresmittelwert derzeit nur an ländlichen Standorten über 1000 m ü.M. eingehalten werden. Wie im Überblickkapitel zu PM₁₀ diskutiert, ist auch für PM_{2.5} absehbar, dass dank Verschärfungen der Abgasvorschriften sowie der angestrebten Elektrifizierung der Fahrzeugflotte die abgasbedingten Emissionen weiter abnehmen dürften. Für die Reduktion nicht-abgasbedingter Emissionen bedarf es weitergehender Massnahmen organisatorischer und technischer Natur.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 12341:2014 und SN EN 16450:2017 (SN EN, 2014, 2017a).

6 Ozon O₃

6.1 Empfehlungen der EKL für Ozon

Die EKL empfiehlt für Ozon die Einführung des WHO-Richtwertes für die Sommersaison (April bis September) von 60 µg/m³ als Langzeitwert. Der 1-Stundenmittelwert (1-h-Mittel) der LRV, der höchstens einmal pro Jahr überschritten werden darf, wird beibehalten. Da dieser Wert statistisch äquivalent ist mit dem WHO-Richtwert für den 8-h-Mittelwert und somit denselben Gesundheitsschutz gewährleistet, soll auf die Einführung eines 8-h-Grenzwertes verzichtet werden. Für die Bewertung von Langzeittrends soll der Wert des 98. Perzentils der Halbstundenmittelwerte eines Monats beibehalten werden.

Tabelle 5: Langzeit- und Kurzzeitrichtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für Ozon im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
Ozon, µg/m ³	Sommersaison ^a	60	–	60
	98 % der ½-h Mittelwerte eines Monats	–	100	100
	8 Stunden Maximum ^b	100	–	–
	Stundenmittelwert ^c	–	120	120

^a Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozonkonzentration im Sechsmontatsdurchschnitt. Für die Schweiz entspricht dies April bis September.

^b 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^c Stundenmittelwert darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

Der Langzeitwert von 60 µg/m³ für die Sommersaison (April bis September) beruht auf neuer Evidenz zur gesundheitlichen Relevanz der Langzeitbelastung. Dieser Wert stützt auch die Einhaltung der vegetationspezifischen kritischen Belastungswerte (Critical Levels; vgl. Anhang D.1). Diese wurden im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung zum Schutz der Vegetation vor Ozonschäden festgelegt.

Weitere Informationen zur Vergleichbarkeit der beiden Werte (1-h- bzw. 8-h-Mittelwert) finden sich im Anhang E. Eine Anpassung an den 8-h-Mittelwert der WHO würde erheblichen administrativen Aufwand erfordern. Ausserdem basieren die kantonalen Informationskonzepte und Massnahmenpläne auf dem Stundenmittelwert und müssten bei einer Angleichung an die WHO (8-h-Mittelwerte) angepasst werden.

Da alle Grenzwerte aus denselben Messreihen hergeleitet werden können, erfordert die empfohlene Ergänzung bzw. Beibehaltung dieser Immissionsgrenzwerte keinen zusätzlichen Messaufwand.

6.2 Quellen von Ozon

Das anthropogene Ozon in der Grundsicht der Atmosphäre ist kein primärer Schadstoff, das heisst, er wird nicht direkt emittiert. Ozon wird in der Atmosphäre unter Einwirkung von Sonnenlicht durch photochemische Reaktionen von Vorläuferstoffen – im Wesentlichen Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen organi-

schen Verbindungen (Nicht-Methan-VOC, NMVOC) – gebildet. Die hohen Konzentrationen von bodennahem Ozon werden somit vor allem durch die anthropogenen Emissionen dieser Vorläuferschadstoffe verursacht. Industrie, Gewerbe und Haushalte – insbesondere Lösungsmittelanwendungen – sind die Hauptverursacher von anthropogenen NMVOC, während Stickoxide zu etwa zwei Dritteln aus Motoren (Strassenverkehr, Off-Road-Verkehr, Maschinen und Geräte) stammen. Die Ozonbildung findet unter Sonneneinstrahlung und bei sommerlichen Temperaturen in der Atmosphäre grossflächig statt. Ozon kann weiträumig, über die Grenzen hinweg, transportiert werden.

Neben den NMVOC tragen auch die langsam reagierenden Gase Methan CH_4 und Kohlenmonoxid CO zur Ozon-Hintergrundbelastung bei. Die EKL hat bereits in ihrem Bericht über Ozon in der Schweiz 1989 (EKL, 1989) darauf hingewiesen, dass zur Lösung des Ozonproblems auch internationale Anstrengungen zur Verminderung der Methan- und Kohlenmonoxidemissionen erforderlich sind. Für die Hintergrundbelastung mit Ozon haben Emissionen auf der ganzen Nordhemisphäre einen Einfluss. In der Schweiz ist die Landwirtschaft mit über 80% der Hauptemittent von Methan, während Kohlenmonoxid aus unvollständigen Verbrennungsprozessen stammt (vgl. Kapitel 9.2).

6.3 Gesundheitsfolgen von Ozon

Ozon ist ein Reizgas. Bei kurzfristig erhöhter Ozonbelastung nehmen Atemwegssymptome und Notfallkonsultationen wegen Atemwegserkrankungen bei Patienten mit Asthma und chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) zu. Eine langfristig erhöhte Ozonbelastung erhöht das Risiko für Entwicklung von Asthma, die Verschlechterung von bestehendem Asthma sowie das Auftreten von mehr Symptomen bei Allergikern. Die WHO geht ausserdem von einer langfristig erhöhten Sterblichkeit wegen Atemwegserkrankungen durch erhöhte Ozonbelastung aus. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit gesicherten kurz- und langfristigen Auswirkungen der Ozon-Belastung (siehe auch [interaktive Grafik auf LUDOK](#) und Abbildung 42 in Anhang I.2).

6.4 Entwicklung der Ozon-Belastung in der Schweiz

Abbildung 11 dokumentiert die Langzeittrends des 98. Perzentils der Halbstundenmittelwerte eines Monats. Während die Messstationen in der am stärksten belasteten Südschweiz eine stete Abnahme zeigen, lässt sich in der übrigen Schweiz nur ein schwacher Trend erkennen. Die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen ist auf hohem Niveau leicht rückläufig (Abbildung 12).

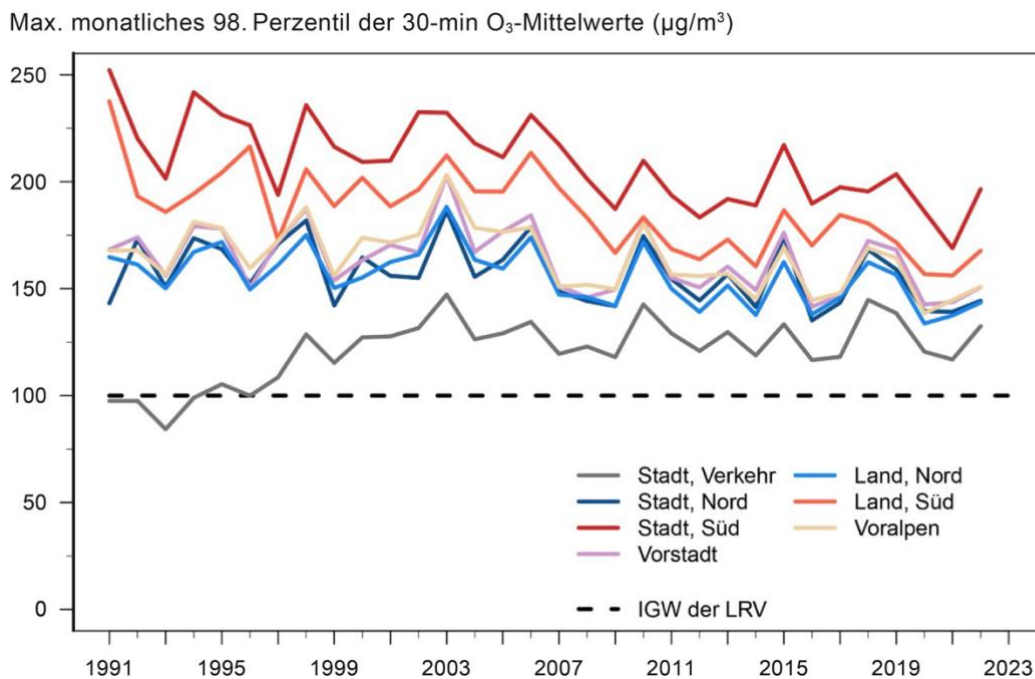


Abbildung 11: Entwicklung des 98. Perzentils der Halbstundenwerte eines Monats von Ozon 1991–2022. Dies ist ein Mass für den Langzeittrend von Spitzenbelastungen mit Ozon.

6.5 Stand der Einhaltung der IGW und der neuen WHO-Richtwerte für Ozon

Werden die derzeitigen IGW eingehalten?

Die IGW werden bisher an keiner NABEL-Messstation eingehalten (Abbildung 11 und Abbildung 12).

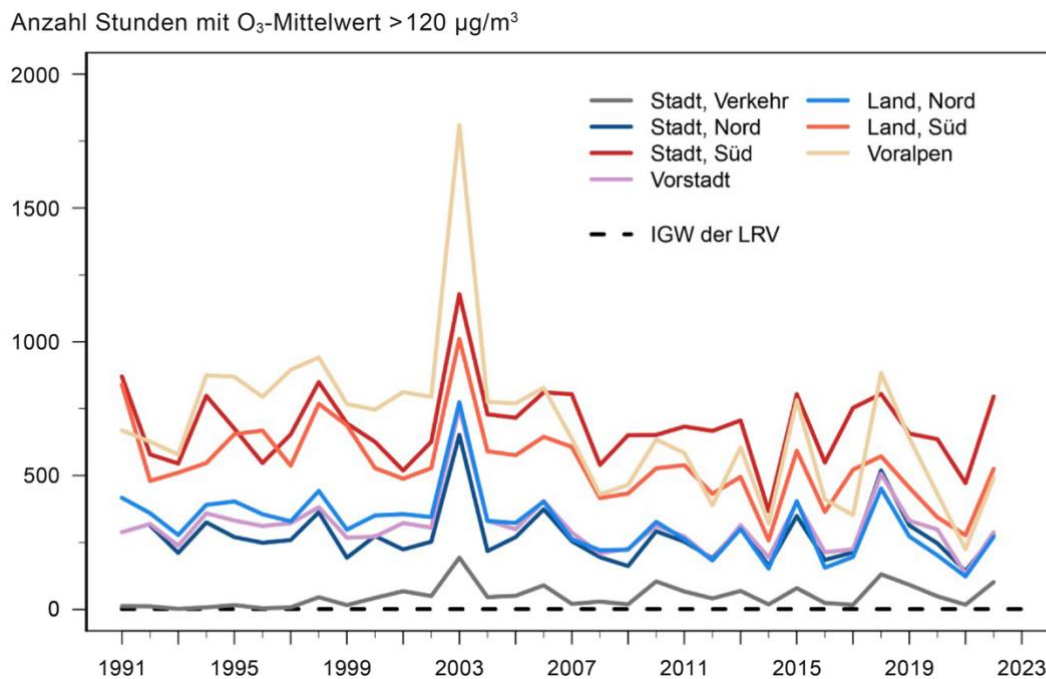


Abbildung 12: Entwicklung der Anzahl Stundenmittelwerte von Ozon über 120 µg/m³ 1991–2022.

Die gestrichelte Linie entspricht dem IGW der LRV, der 1 Überschreitung pro Jahr zulässt.

Werden die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz bereits eingehalten?

Die WHO hat den bereits früher empfohlenen Richtwert für das tägliche 8-h-Mittel von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Überarbeitung nicht geändert. Zulässig sind drei Überschreitungen pro Jahr. Der schweizerische Ozon-Immissionsgrenzwert für das 1-h-Mittel von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der LRV, der nur während einer Stunde pro Jahr überschritten werden darf, ist gleichwertig (siehe Anhang E zur Vergleichbarkeit der Werte). Beide Werte werden nicht eingehalten (Abbildung 12 und Abbildung 13).

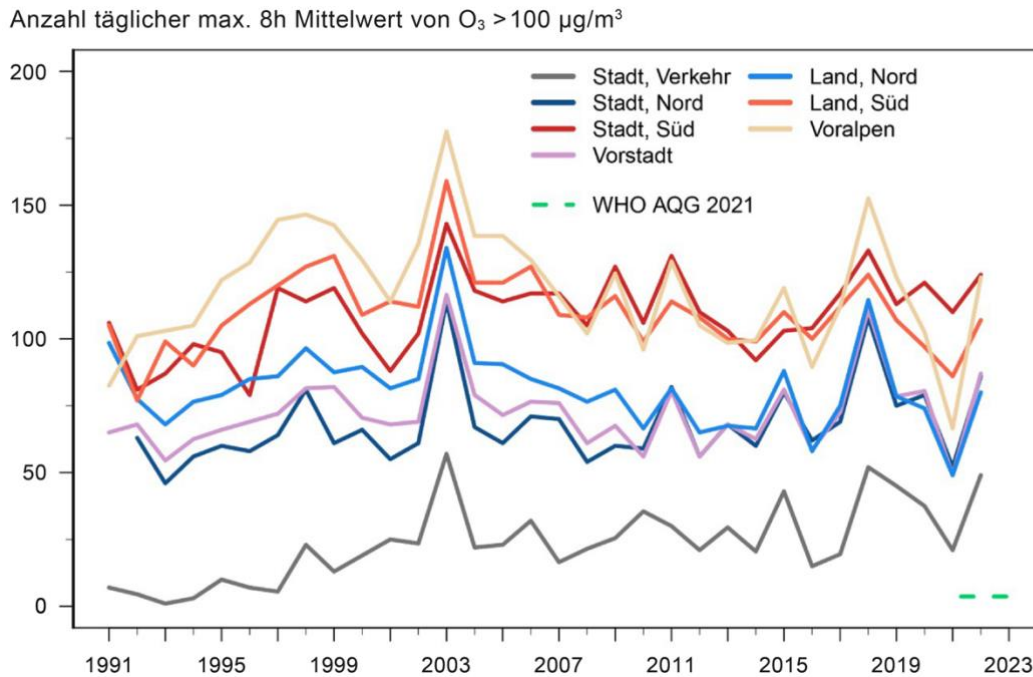


Abbildung 13: Entwicklung der Anzahl Überschreitungen des höchsten täglichen 8-h-Mittels von Ozon über $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1991–2022.

Die gestrichelte Linie entspricht dem WHO-Richtwert, der 3 Überschreitungen pro Jahr zulässt.

Der neu vorgeschlagene WHO-Richtwert für die Langzeitbelastung mit Ozon, den die EKL zur Übernahme in die LRV empfiehlt, sollte im Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Sommersaison nicht höher sein als $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser Wert wird in der Schweiz an keiner NABEL-Messtation eingehalten (Abbildung 14).

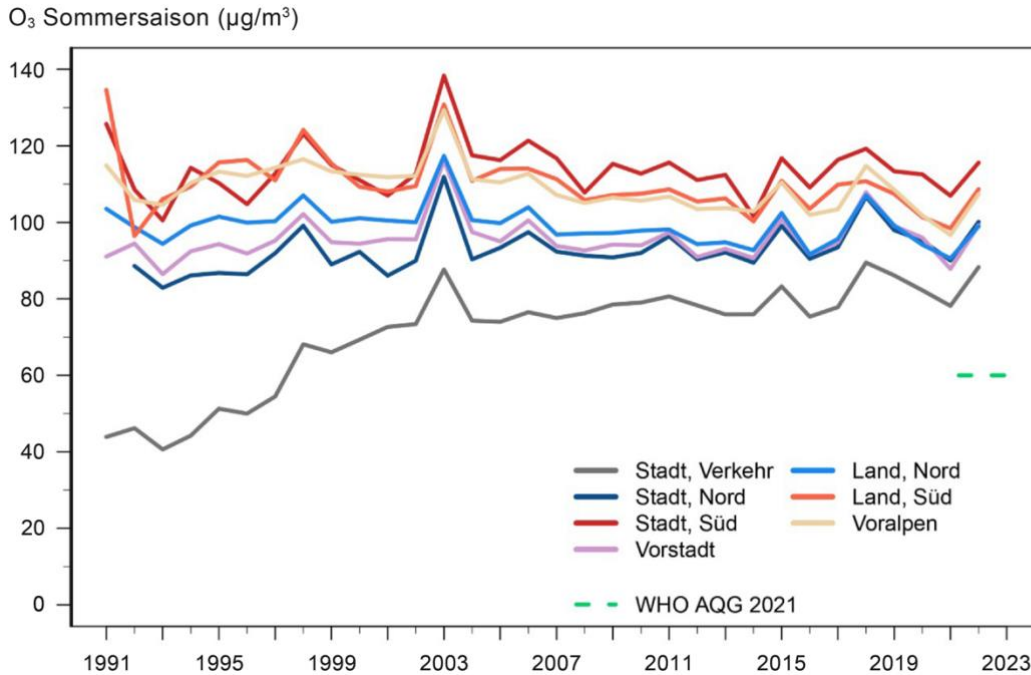


Abbildung 14: Entwicklung des Langzeitwertes von Ozon 1991–2022 als Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozon-Konzentration. Für die Schweiz entspricht dies April bis September. Der WHO-Richtwert liegt bei $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Wo liegen die Immissionen über den neuen WHO-Richtwerten? Welche Quellen oder Einflüsse zeichnen diese Standorte aus?

Alle bisherigen und neu vorgeschlagenen Richtwerte werden an allen Standorten überschritten. Die Ozonbelastung ist auf der Alpensüdseite höher als auf der Alpennordseite. Dabei spielt neben klimatischen Einflüssen auch der Transport aus der stark belasteten Poebene eine Rolle. Die Belastung liegt während Sommersmoglagen in der ganzen Schweiz flächendeckend und zum Teil erheblich über den Kurzzeitgrenzwerten. Der Langzeitgrenzwert über die Sommermonate liegt in der Schweiz aktuell zwischen etwa $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stadt, Verkehr) und $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf der Alpensüdseite und somit flächendeckend über dem neuen WHO-Richtwert (Abbildung 14).

Auch der Schutz von Vegetationszonen ist beim Ozon von Bedeutung. Der Sechsmonatsdurchschnitt soll die Einhaltung der im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung zum Schutz der Vegetation festgelegten kritischen Belastungswerte (Critical Levels)

für Ozon (AOT40-Wert³ und der biologisch als noch relevanter eingestuftem POD_Y-Wert⁴) unterstützen (vgl. Anhang D.1).

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 14625:2012 (SN EN, 2012c)

³ AOT40: **A**ccumulated exposure **O**ver a **T**hreshold of **40** ppb = Über die Vegetationsperiode akkumulierte konzentrationsbasierte Ozonexposition über dem Schwellenwert von 40 ppb. Der AOT-Wert ist ein Mass für die chronischen Langzeitbelastungen der Pflanzen durch Ozon.

⁴ POD_Y: Phytotoxic Ozone Dose = über die Vegetationsperiode akkumulierte Ozondosis, die von der Pflanze über die Spaltöffnungen aufgenommen wird (Ozonfluss) unter Berücksichtigung eines vegetationspezifischen Schwellenwerts Y zur Berücksichtigung der pflanzenspezifischen Detoxifikationskapazität.

7 Stickstoffdioxid NO₂

7.1 Empfehlungen der EKL für NO₂

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für NO₂ neu auf 10 µg/m³ für den Jahresmittelwert und 25 µg/m³ für den Tagesmittelwert festzulegen. Mit dieser Senkung wird den Schutzziele des USG bezüglich Gesundheit der Menschen und der Ökosysteme und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen. Das 95. Perzentil der Halbstundenmittelwerte eines Jahres soll gestrichen werden.

Tabelle 6: Langzeit- und Kurzzeitrictwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für NO₂ im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
NO ₂ , µg/m ³	Jahr	10	30	10
	24 Stunden	25 ^a	80 ^b	25 ^a
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen

^a 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^b 24-Stundenmittelwert darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

Mit den neu empfohlenen tieferen Grenzwerten für den Jahres- und Tagesmittelwert wird der IGW für das 95. Perzentil der Halbstundenmittelwerte eines Jahres für die lufthygienische Beurteilung in der Schweiz als nicht mehr relevant angesehen. Er wird seit über 20 Jahren an allen NABEL-Standorten eingehalten (vgl. Anhang F.1). Die EKL empfiehlt, diesen Immissionsgrenzwert zu streichen, aber zwecks Vergleichbarkeit mit vergangenen Jahren und Beurteilung von Trends noch weitere fünf Jahre regelmässig zu berichten.

7.2 Quellen von Stickoxiden

In der Schweiz werden rund 65% der Stickoxide (NO₂ und NO) von Fahrzeugen und Maschinen emittiert, insbesondere von solchen mit Dieselmotoren. Der Strassenverkehr trägt rund 45% zu den Emissionen bei, der Flugverkehr 7%, wobei bei letzterem noch ein Rückgang als Folge der Coronapandemie feststellbar ist (Territorialdaten 2021 aus EMIS [BAFU, 2023]). Feuerungen in Industrie, Gewerbe und von Haushalten (inkl. Holzheizungen) tragen etwa 20% zu den Emissionen bei (vgl. Anhang B).

7.3 Gesundheitsfolgen und weitere Auswirkungen von NO₂

NO₂ ist ein Reizgas. Bei kurzfristig erhöhter NO₂-Belastung kann die Lunge gereizt werden und die Zahl der Todesfälle, Notfallkonsultationen und Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen nimmt zu. Eine langfristig erhöhte NO₂-Belastung geht mit einer erhöhten Anzahl Asthmabetroffener einher und die Widerstandskraft gegen Atemwegsinfektionen ist verringert. Es werden mehr Fälle chronischer Bronchitis sowie verringertes Lungenwachstum und verringerte Lungenfunktion bei Kindern beobachtet. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit gesicherten kurz- und langfristigen Auswirkungen von NO₂ (siehe auch [interaktive Grafik auf LUDOK](#) und Abbildung 43 in Anhang I.3).

Neben der direkten Wirkung von NO₂ sind Stickoxide auch von Bedeutung bei der Ozonbildung, beim Stickstoffeintrag in Ökosysteme und bei der Bildung von sekundärem Feinstaub.

7.4 Entwicklung der NO₂-Belastung in der Schweiz

Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden die Stickoxidemissionen bereits um über 60% reduziert, unter anderem dank strenger Abgasvorschriften (Verkehr, Feuerungen, Industrie) und Senkung des Stickstoffgehalts in Heizöl. Abbildung 15 visualisiert diese eindrückliche Entwicklung in Bezug auf die Jahresmittelwerte der NO₂-Belastung. Eine hohe Korrelation besteht auch zwischen Kurzzeit- und Langzeitwerten gemäss WHO. Wird die maximal zulässige Zahl der Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwertes eingehalten, kann auch von der Einhaltung des Jahresmittelgrenzwerts ausgegangen werden und umgekehrt (vgl. Anhang F.2).

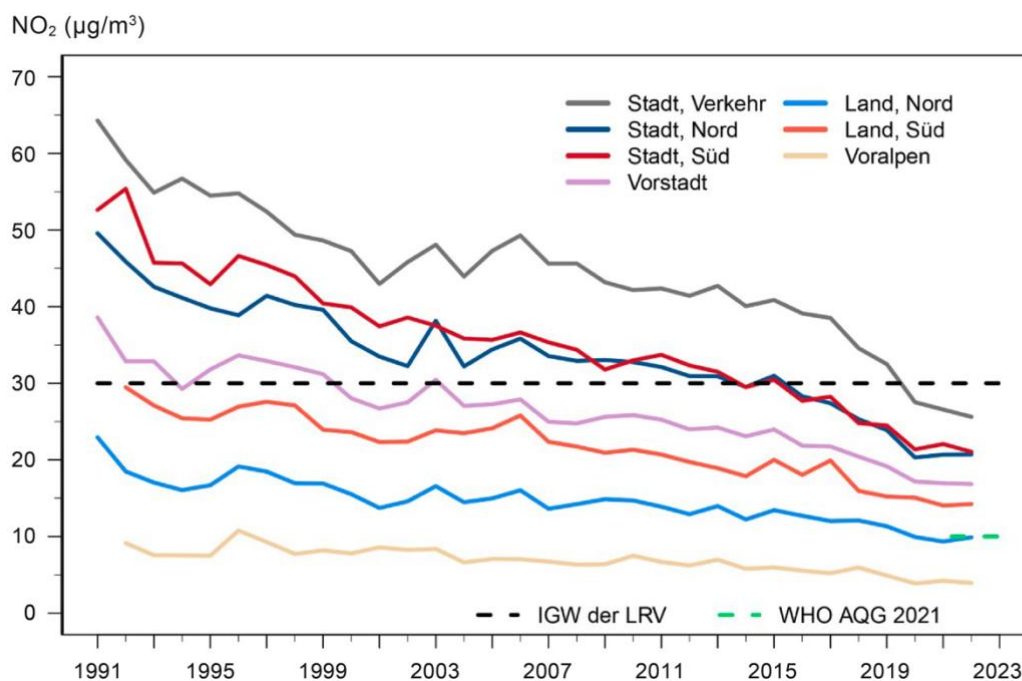


Abbildung 15: NO₂ Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.

7.5 Stand der Einhaltung der IGW und der neuen WHO-Richtwerte für NO₂

Werden die derzeitigen IGW eingehalten?

Die derzeitigen NO₂-Immissionsgrenzwerte werden grossräumig eingehalten. Der Jahresmittelwert von 30 µg/m³ (Abbildung 15) liegt auch gemäss räumlichen Modellrechnungen (Abbildung 17) nur noch an wenigen Standorten entlang von Hauptverkehrsachsen über dem IGW der LRV.

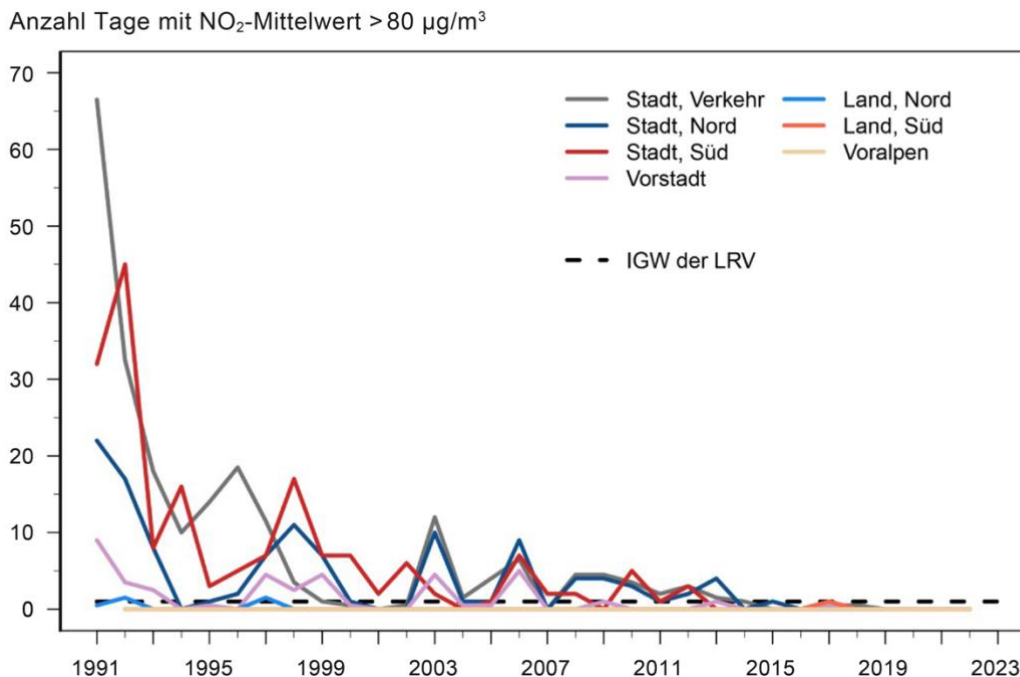


Abbildung 16: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von NO₂ über 80 µg/m³ 1991–2022 nach Standorttypen.

Die gestrichelte Linie entspricht dem IGW der LRV, der eine Überschreitung pro Jahr zulässt.

Abbildung 16 zeigt, dass auch der Tagesmittel-IGW für NO₂ von 80 µg/m³ nirgends mehr überschritten wird (zulässig ist eine Überschreitung pro Jahr). Abbildung 35 im Anhang F.1 zeigt, dass auch kurzfristige Spitzenbelastungen keine Überschreitungen mehr verursachen und der IGW für das 95. Perzentil der Halbstundenmittelwerte eines Jahres seit längerem eingehalten wird.

Werden die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz bereits eingehalten?

Der neue WHO-Richtwert von 10 µg/m³ für den Jahresmittelwert von NO₂ wird in der Schweiz gemäss räumlichen Modellrechnungen (Abbildung 17) an ländlichen und höhergelegenen Standorten abseits von Verkehrsachsen bereits eingehalten (blaue und grüne Gebiete).

Wo liegen die Immissionen über den neuen WHO-Richtwerten? Welche Quellen oder Einflüsse zeichnen diese Standorte aus?

An allen übrigen Standorten wird er überschritten. Dies widerspiegelt klar den Einfluss der Strassenverkehrsemissionen. Der Richtwert für den Tagesmittelwert von $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird nur an höhergelegenen Standorten eingehalten (Abbildung 18).

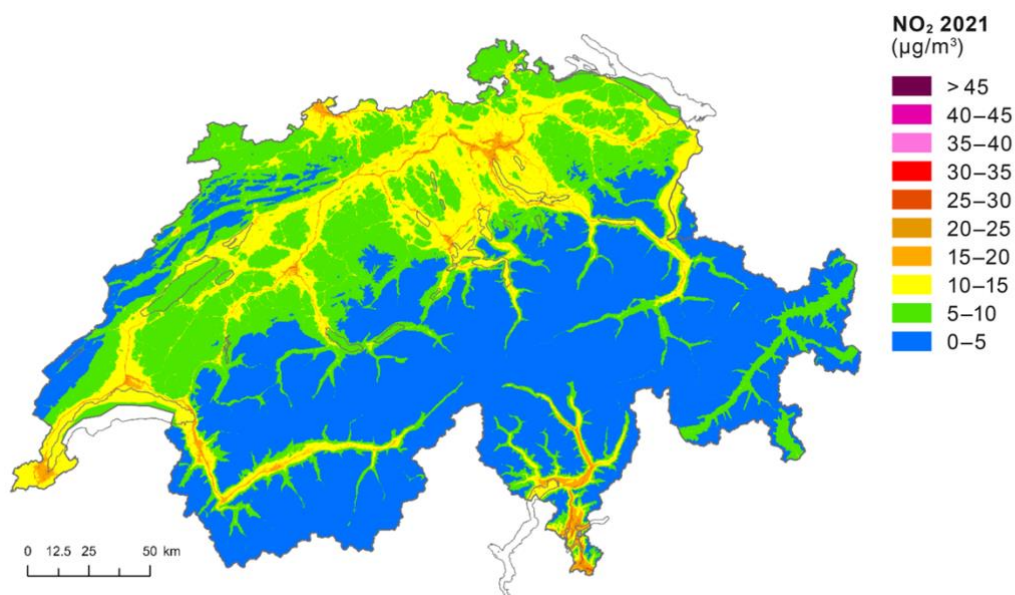


Abbildung 17: Immissionskarte für den NO₂-Jahresmittelwert für das Jahr 2021.

Die Farbkodierung dieser räumlichen Modellierung unter Einbezug der Immissionsmessungen zeigt in Blau- und Grüntönen Gebiete, in denen der neue WHO-Richtwert ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bereits eingehalten wird; Gegenden in Gelb- und Orangetönen liegen über dem WHO-Richtwert, halten aber den derzeitigen IGW der LRV (Jahresmittel) ein.

Rot- und Lilatöne beschreiben Gegenden mit Überschreitungen des IGW. Letztere sind meist stark besiedelte Ballungszentren.

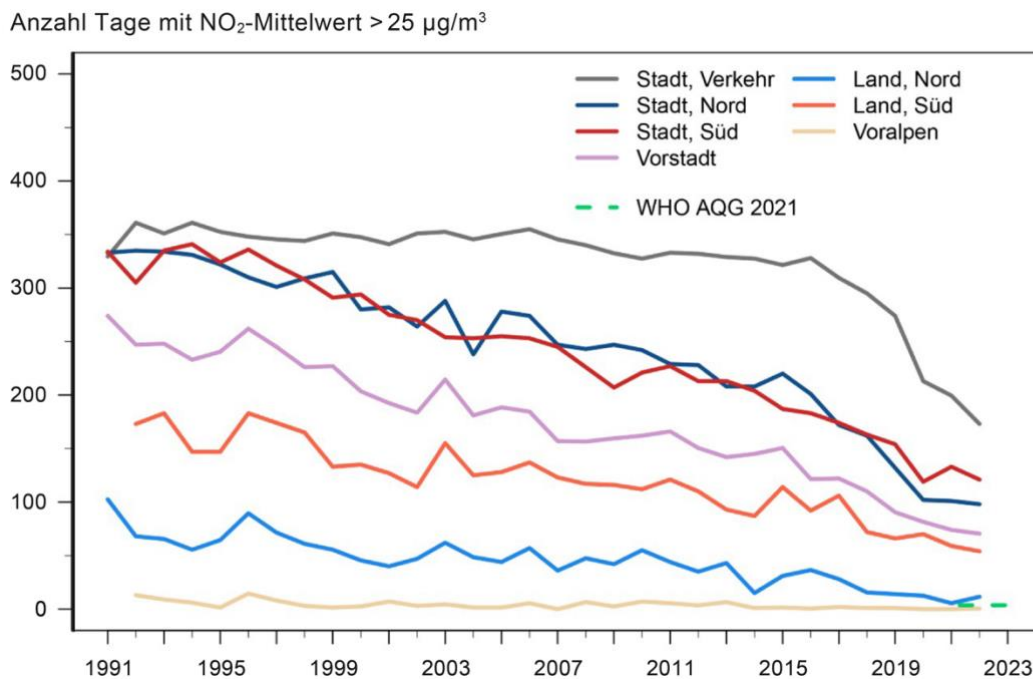


Abbildung 18: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von NO₂ über 25 µg/m³ 1991–2022.

Die gestrichelte Linie entspricht dem WHO-Richtwert, der 3 Überschreitungen pro Jahr zulässt.

Mit der angestrebten Elektrifizierung der Fahrzeugflotte in der Schweiz werden die Stickoxidemissionen weiter abnehmen.

Die von der EKL empfohlenen tieferen Immissionsgrenzwerte für NO₂ tragen auch zum Schutz empfindlicher naturnaher Ökosysteme bei, welche durch erhöhte atmosphärische Stickstoffeinträge (Stickoxide, Ammoniak und deren Reaktionsprodukte) und durch direkte NO_x-Einwirkungen gefährdet sind. Mit dem vorgeschlagenen NO₂-Jahresmittelwert von 10 µg/m³ kann davon ausgegangen werden, dass bei dessen Einhaltung auch die Vegetation vor direkten Einwirkungen von Stickoxiden geschützt sein wird und die zum Schutz der Vegetation im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung und der WHO festgelegten Critical Levels für NO_x nicht mehr überschritten werden (UNECE, 2017; WHO, 2000).

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 14211:2012 (SN EN, 2012a)

8 Schwefeldioxid SO₂

8.1 Empfehlungen der EKL für SO₂

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für SO₂ auf 20 µg/m³ für den Jahresmittelwert sowie für das Winterhalbjahr und auf 40 µg/m³ für den Tagesmittelwert zu senken. Mit diesen Empfehlungen wird gleichzeitig dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO und der UNECE Rechnung getragen. Der 95. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Jahres soll gestrichen werden.

Tabelle 7: Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für SO₂ im Vergleich zu Langzeit- und Kurzzeitimmissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
SO ₂ , µg/m ³	Jahr und (neu) Winterhalbjahr	–	30 ^a	20 ^b
	24 Stunden	40 ^c	100 ^d	40 ^c
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen

^a Immissionsgrenzwert, welcher auch den Schutz von Tieren und Pflanzen, ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen nach USG Art. 1 Abs. 1 und Art. 14 Buchstabe a einschliesst und dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt des Erlasses der Luftreinhalte-Verordnung im Jahre 1985 entspricht.

^b Wert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2000 (WHO, 2000), welcher zum Schutz von Wäldern und weiteren naturnahen Ökosystemen festgelegt wurde. Er gilt als Jahresmittelwert sowie auch für das Winterhalbjahr (Oktober–März).

^c 99. Perzentil (d.h. 3 Überschreitungstage pro Jahr sind zulässig).

^d Darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

Die SO₂-Belastung liegt dank erfolgreicher Luftreinhaltemassnahmen wie der Entschwefelung von Heizöl und Treibstoffen bereits weit unter dem von der WHO vorgeschlagenen Kurzzeitwert. Für den Schutz der Vegetation in naturnahen Ökosystemen empfiehlt die EKL, die im Rahmen der UNECE Konvention (2017) über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung festgelegte kritische Konzentration (Critical Level) von 20 µg/m³ als Jahresmittelwert und als Mittelwert über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) zu übernehmen (siehe Anhang D.3). Dieser Wert entspricht auch den Empfehlungen der WHO für Europa aus dem Jahr 2000 zum Schutz von Wald- und Naturökosystemen (WHO, 2000).

Mit den neu empfohlenen tieferen Grenzwerten für die Jahres-, Winterhalbjahres- und Tagesmittelwerte wird der IGW für das 95. Perzentil der Halbstundenwerte eines Jahres für die lufthygienische Beurteilung in der Schweiz nicht mehr als relevant angesehen. Er wird seit über 20 Jahren an allen NABEL-Standorten eingehalten (vgl. Abbildung 38 im Anhang G). Die EKL empfiehlt, diesen Immissionsgrenzwert zu streichen, aber zwecks Vergleichbarkeit mit vergangenen Jahren und Beurteilung von Trends noch weitere fünf Jahre regelmässig zu berichten.

8.2 Quellen von SO₂

SO₂ entsteht vor allem im Sektor Industrie, unter anderem bei der Zementproduktion und der Graphitherstellung, und in geringem Mass bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe durch Hausfeuerungen und Verkehr.

8.3 Gesundheitsfolgen von SO₂

SO₂ ist ein Reizgas. Bei kurzfristig erhöhter Schwefeldioxidbelastung können die Atemwege gereizt und entzündet werden und die Zahl der Todesfälle, Notfallkonsultationen und Spitaleintritte wegen Atemwegs-krankheiten nimmt zu. Es werden keine Folgen langfristiger SO₂-Belastung beschrieben. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit gesicherten Auswirkungen der SO₂-Belastung (siehe auch [interaktive Grafik auf LUDOK](#) und Abbildung 44 in Anhang I.4).

8.4 Entwicklung der SO₂-Belastung in der Schweiz

Die SO₂-Belastung liegt seit den frühen 90er-Jahren weit unter dem Jahresmittel- und Tagesmittel-Grenzwert der LRV (Abbildung 19 und Abbildung 20).

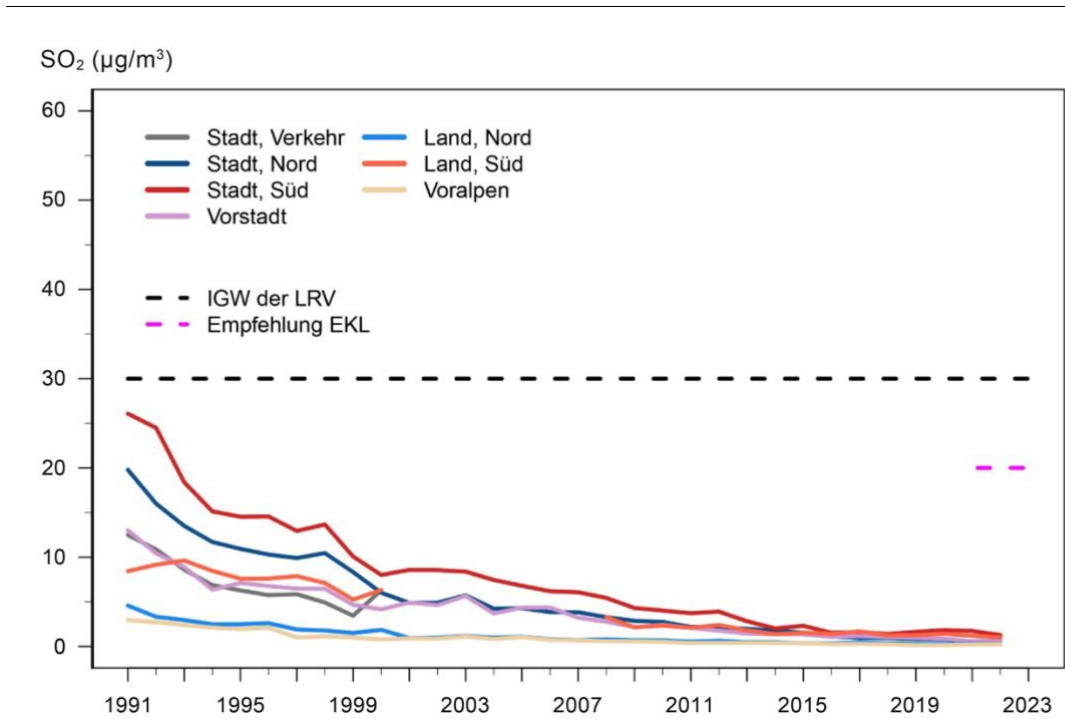


Abbildung 19: SO₂ Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.

8.5 Stand der Einhaltung der IGW und der neuen WHO-Richtwerte für SO₂

Werden die derzeitigen IGW respektive die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz eingehalten?

Dank Reduktion des Kohleeinsatzes und strengen Vorgaben über den Schwefelgehalt von Brenn- und Treibstoffen gingen die Emissionen und damit auch die Immissionen massiv zurück. Sowohl der IGW der LRV für den Jahresmittelwert (30 µg/m³), für den Tagesmittelwert und für Spitzenbelastungen (95. Perzentilwert aller ½-h-Mittelwerte eines Jahres; beide 100 µg/m³) als auch der WHO-Richtwert und die neu empfohlenen Jahres-, Halbjahres- und Tagesmittelwerte werden schweizweit flächendeckend eingehalten (Abbildung 19, Abbildung 20 sowie Abbildung 38 im Anhang G).

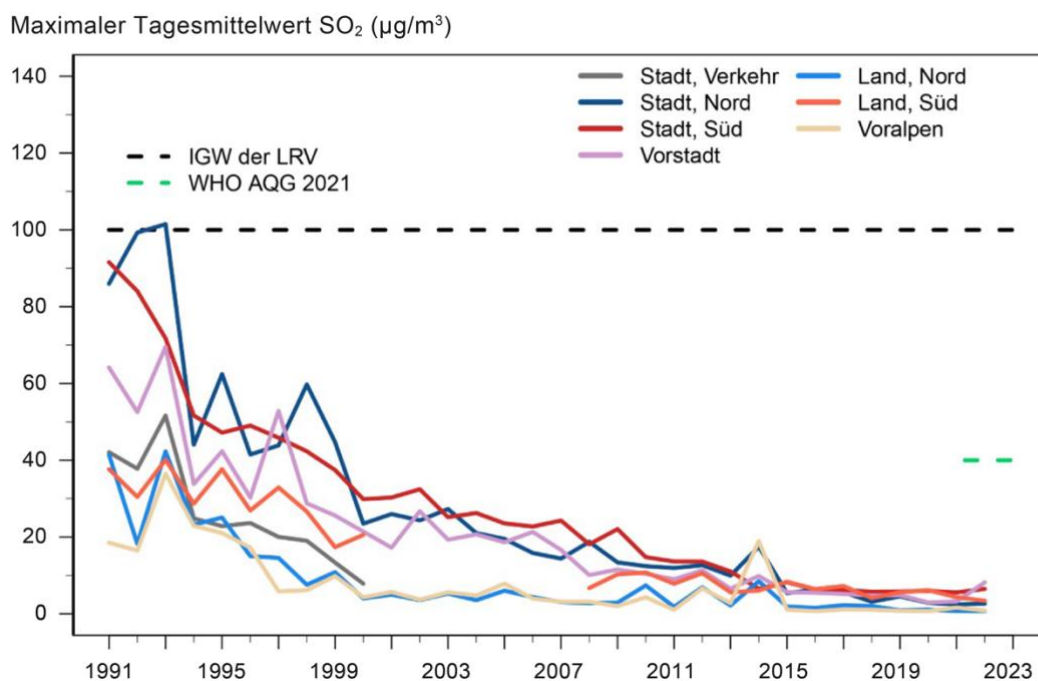


Abbildung 20: Entwicklung der maximalen Tagesmittelwerte von SO₂ 1991–2022 nach Standorttypen.

Der Immissionsgrenzwert der LRV darf einmal pro Jahr, der Richtwert der WHO dreimal pro Jahr überschritten werden.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 14212:2012 (SN EN, 2012b)

9 Kohlenmonoxid CO

9.1 Empfehlungen der EKL für CO

Die EKL empfiehlt, den Immissionsgrenzwert für CO auf 4 mg/m³ für den Tagesmittelwert zu senken. Damit wird gleichzeitig dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Tabelle 8: Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für CO im Vergleich zum Immissionsgrenzwert (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG	LRV IGW	Empfehlung EKL
CO, mg/m ³	24 Stunden	4 ^a	8 ^b	4 ^a

^a 99. Perzentil (d.h. 3 Überschreitungstage pro Jahr sind zulässig).

^b 24-Stundenmittelwert darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

9.2 Quellen von CO

CO entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Treib- und Brennstoffen unter sauerstoffarmen Bedingungen. Hauptemittent ist mit ca. 40% Anteil der Strassenverkehr.

9.3 Gesundheitsfolgen von CO

Das Gas CO beeinträchtigt die Sauerstoffversorgung beim Menschen, indem es an das für den Sauerstofftransport in roten Blutzellen wichtige Hämoglobin bindet. Bei erhöhten Konzentrationen nimmt die Zahl der Notfallkonsultationen und Sterbefälle wegen Herzinfarkten zu. Es werden keine Folgen langfristiger CO-Belastung beschrieben. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit gesicherten Auswirkungen von CO (siehe auch [interaktive Grafik auf LUDOK](#) und Abbildung 45 in Anhang I.5).

9.4 Entwicklung der CO-Belastung in der Schweiz

Die maximalen Tagesmittel-Konzentrationen von CO haben an allen Messstandorten stetig abgenommen (Abbildung 21). Die Abnahme ist an einst stärker belasteten Standorten besonders deutlich. Die CO-Emissionen erreichten Mitte der 1970er-Jahre Maximalwerte. Seither wurden die Emissionen auf weniger als einen Fünftel reduziert.

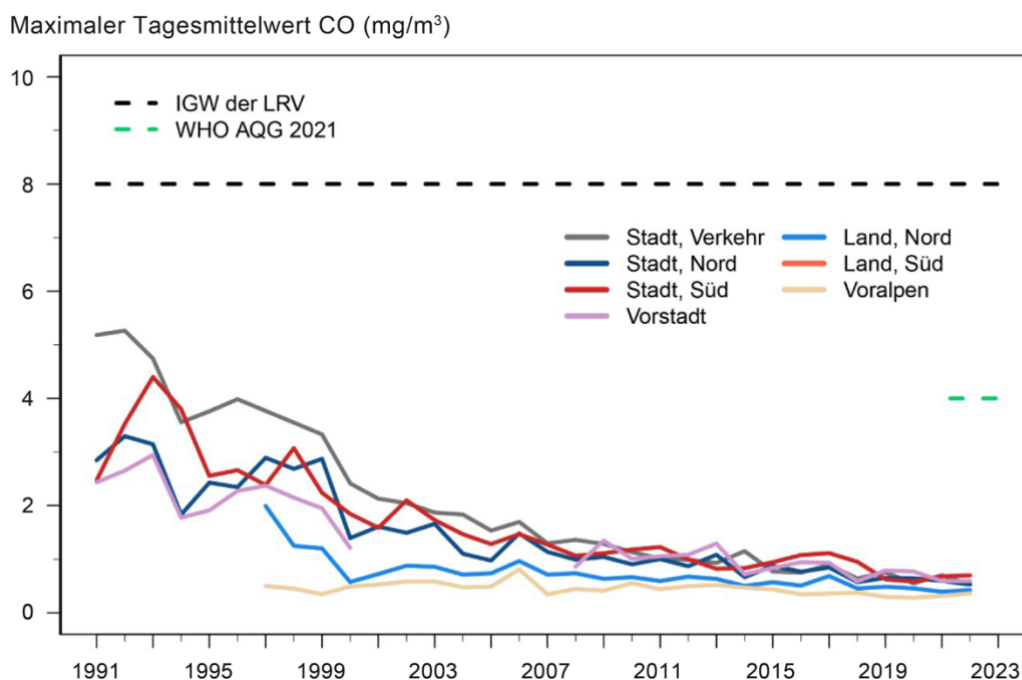


Abbildung 21: Maximale Kohlenmonoxid-Tagesmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.

9.5 Stand der Einhaltung der IGW und der neuen WHO-Richtwerte für CO

Werden die derzeitigen IGW respektive die neuen WHO-Richtwerte in der Schweiz eingehalten?

Der IGW der LRV für den Tagesmittelwert von 8 mg/m³ wird seit Jahrzehnten überall eingehalten. Auch der neue WHO-Richtwert von 4 mg/m³ wird in der Schweiz seit über 20 Jahren an keinem Standort überschritten (Abbildung 21).

Welche Quellen oder Einflüsse zeichnen Standorte mit höherer Belastung aus?

Die CO-Belastung stellt in der Schweiz kein gesundheitliches Problem mehr dar. Der Grenzwert der LRV und der Richtwert der WHO werden auch in innerstädtischen Strassenschluchten eingehalten. Dort sind die CO-Immissionen wegen hohen, oft stockenden Verkehrsaufkommens und schlechter Durchlüftung am höchsten. Die maximalen Tagesmittelwerte in der Schweiz liegen unterhalb von 1 mg/m³.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 14626:2012 (SN EN, 2012d)

10 Russ (Black Carbon oder Elemental Carbon)

10.1 Empfehlungen der EKL zu Russ

In Einklang mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien schlägt die EKL derzeit keinen Immissionsgrenzwert für Russ vor. Die Russ-Immissionen sollen weiterhin überwacht und die Emissionen dem Minimierungsgebot folgend reduziert werden. Die EKL empfiehlt die Weiterführung der bisherigen Russ-Strategie (Reduktion der Russ-Immissionen auf 20% der Werte von 2013) (EKL, 2013). Die Schweizer Strategie ist im Einklang mit den Empfehlungen der WHO.

10.2 Quellen von Russ

Russ ist ein Bestandteil von Feinstaub PM10 und PM2.5, welche in der Schweiz gemessen und in der LRV reglementiert sind (vgl. Kapitel 4 und 5). Russ ist keine chemisch eindeutig definierte Grösse und es gibt kein direktes Messverfahren für Russ. Häufig wird die Russbelastung als Konzentration von elementarem Kohlenstoff (Elemental Carbon, EC) oder von Licht absorbierendem Kohlenstoff (Black Carbon, BC) angegeben. BC wird durch Umrechnung eines optischen Absorptionskoeffizienten in eine Massenkonzentration ermittelt und deshalb als «equivalent Black Carbon», eBC bezeichnet. Da der für die Umrechnung verwendete Absorptionsquerschnitt von den Aerosoleigenschaften abhängig und damit variabel ist, lassen sich Konzentrationswerte von EC und eBC nicht direkt vergleichen. Die Konsistenz von eBC- und EC-Werten lässt sich aber durch parallele Messungen von eBC und EC überprüfen (Petzold et al., 2013).

Russ wird etwa zu 60% von Holzfeuerungen und zu einem Drittel von Fahrzeugen und Maschinen emittiert. Entlang von stark befahrenen Strassen ist die Russbelastung grösser als im städtischen oder vorstädtischen Hintergrund. Dort bildet der Russ auch einen etwas grösseren Anteil (rund 6%) an der Massenkonzentration von PM2.5 als an den anderen Standorten, wo der Anteil rund 5% beträgt. In Gegenden mit vielen Holzheizungen, wie in manchen Bergtälern, werden besonders bei Inversionswetterlagen hohe Werte von Feinstaub- bzw. Russ sowie von krebserregenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff (PAK) -Verbindungen gemessen (EKL, 2007, 2013; Hüglin & Grange, 2021).

10.3 Gesundheitsfolgen von Russ

Die epidemiologische Studienlage für Gesundheitseffekte durch EC/BC ist insbesondere für Herz-Kreislaufkrankheiten und Atemwegserkrankungen (zum Beispiel Lungenkrebs) sowie der Sterblichkeit evident. Dies wird zusätzlich durch experimentelle Tierstudien untermauert (ANSES, 2019). Studien, welche Zusammenhänge auch in sogenannten Mehrschadstoffmodellen mit Feinstaub untersuchen, zeigen von Feinstaub unabhängige erhöhte Risiken, die sich der Russfraktion zuordnen lassen.

Die entsprechenden Gesundheitsfolgen sind deshalb auf verbrennungsbedingte Emissionen, insbesondere Holzverbrennung und Dieselmotoren, zurückzuführen (WHO, 2021, Kapitel 4.2 Einleitung Black Carbon).

10.4 Entwicklung der Russbelastung in der Schweiz

Dank strenger Massnahmen zur Emissionsminderung zeigen sich auch für Russ klar abnehmende Immissionskonzentrationen (Abbildung 22). Die Abnahmen sind an verkehrsbelasteten Standorten am ausgeprägtesten.

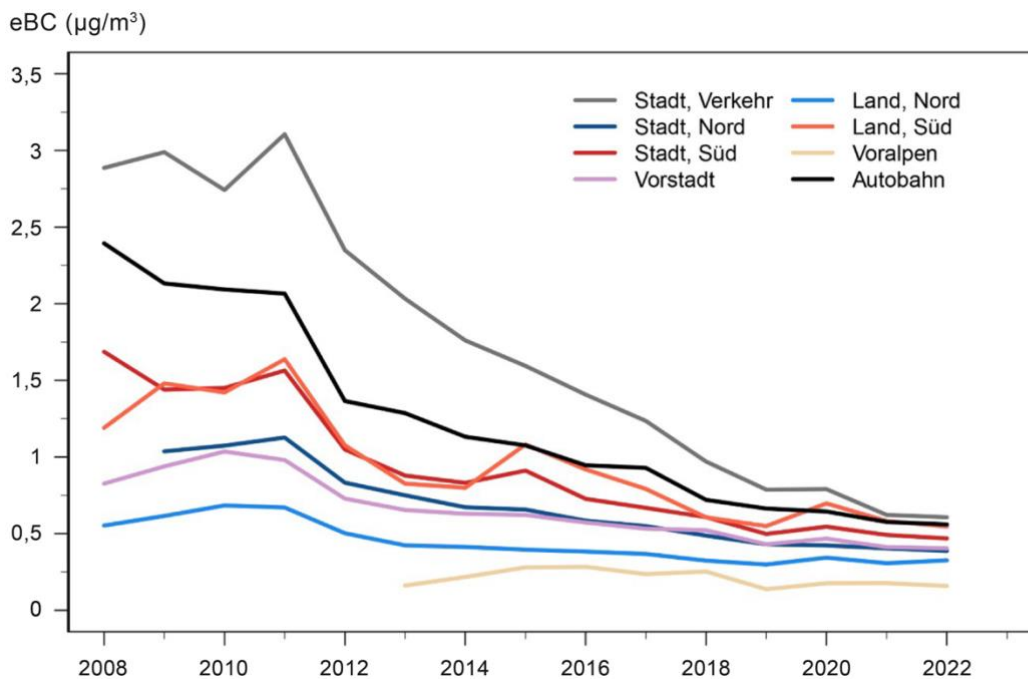


Abbildung 22: Russ (eBC=equivalent black carbon in PM_{2.5} µg/m³) Jahresmittelwerte 2008–2022 nach Standorttypen.

10.5 Einschätzung für die Schweiz

WHO-Empfehlungen

Die WHO legt keinen Richtwert für Russ fest, sondern beschreibt Handlungsempfehlungen, sogenannte «Best Practices». Sie empfiehlt, einen Parameter für Russ zu messen, und weist u.a. auf den europäischen Messstandard hin (CEN, 2017). Als zweites empfiehlt die WHO, Emissionsinventare zu erstellen, Belastungsabschätzungen für die Bevölkerung vorzunehmen und die Quellen von Russ zu bestimmen. Schliesslich empfiehlt sie, Massnahmen zur Reduktion der Belastung einzuleiten und, wo möglich und nötig, auch Ziel- oder Grenzwerte für Immissionskonzentrationen festzulegen.

Erfüllt die Schweiz die WHO-Empfehlungen?

Die Empfehlungen der WHO werden in der Schweiz seit längerem umgesetzt. Bereits im Aktionsplan Feinstaub von 2006 sind zahlreiche Massnahmen enthalten, welche zur Reduktion der Russemissionen beitragen. Im NABEL-Messnetz hat die Schweiz 2008 mit der Messung von eBC und EC in PM_{2.5} begonnen. Heute wird eBC und EC an 9 Standorten gemessen (eBC mit optischen Methoden, EC gemäss CEN-Referenzverfahren). Es bestehen Emissionsinventare, welche regelmässig an die UNECE

Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung übermittelt werden und in der EMEP-Datenbank abrufbar sind (<https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata>).

Weitergehende Empfehlungen für die Schweiz

Die mittleren jährlichen Immissionskonzentrationen liegen in der Schweiz heute zwischen $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abbildung 23). Die EKL forderte im Feinstaubbericht 2013 die Reduktion der Russbelastung auf 20% der damaligen Werte innerhalb von 10 Jahren. Die Emissionen haben seit 2013 zwar weiterhin deutlich abgenommen, das Ziel einer Reduktion auf 20% ist jedoch noch nicht erreicht.

Die Schweiz kennt für krebserregende Stoffe keine Grenzwerte, sondern es gilt das Minimierungsgebot. Einem Rechtsgutachten betreffend Grundlagen zur Emissionsbegrenzung bei kanzerogenen Luftschadstoffen folgend gilt das im USG geforderte Schutzziel als gewährleistet, wenn das Risiko aufgrund anthropogener Einwirkungen kaum nachweisbar sei. Ein Krebsrisiko sei bei einem Fall pro 1 Million belasteter Personen praktisch vernachlässigbar klein (Brunner, 2000). Um das Krebsrisiko auf einen Fall pro 1 Million Belasteter zu begrenzen, sollte die Russkonzentration an verkehrsbelasteten Standorten nicht mehr als $0,2\text{--}0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betragen (EKL, 2013).

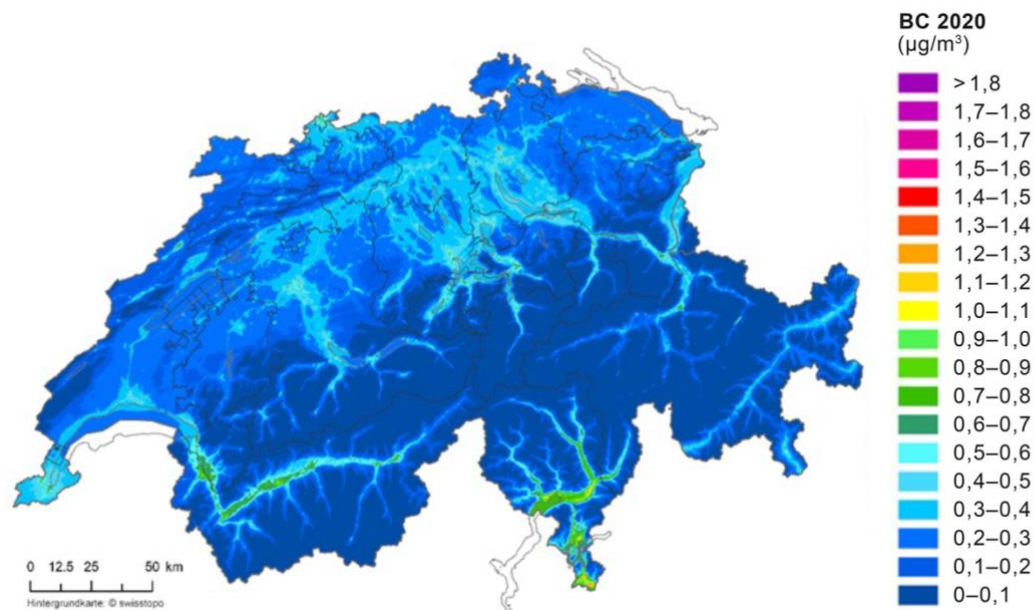


Abbildung 23: Russimmissionen für das Jahr 2020 (ohne Berücksichtigung der Effekte von Massnahmen im Zusammenhang mit Covid-19) (INFRAS, 2021).

Die Farbkodierung dieser räumlichen Modellschätzungen zeigt in Dunkelblautönen Gebiete, an denen die Werte gemäss Modellrechnungen unter $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen.

Bei gleichbleibendem Trend geht die EKL davon aus, dass das angestrebte Reduktionsziel in einigen Jahren flächendeckend erreicht wird.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 16909:2017 (SN EN, 2017b)

11 Ultrafeine Partikel – Partikelanzahl

11.1 Empfehlungen der EKL für ultrafeine Partikel

In Einklang mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien schlägt die EKL derzeit keinen Immissionsgrenzwert für ultrafeine Partikel (UFP) vor. Mangels eines internationalen Referenzmessverfahrens fehlt eine zentrale Bedingung für die Einführung eines Immissionsgrenzwerts. Die EKL unterstützt jedoch vollumfänglich die von der WHO vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen oder «Best Practices», welche von den Schweizer Behörden bereits seit einigen Jahren verfolgt werden.

11.2 Quellen von UFP

UFP sind Partikel, welche einen Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (nm) haben. UFP tragen nur einen verschwindend kleinen Teil zur Massenkonzentration von Feinstaub bei, weshalb sie nicht durch PM₁₀ und PM_{2.5} repräsentiert werden. Die UFP-Belastung wird daher meistens durch die Anzahlkonzentration beschrieben. UFP können nach der Art ihrer Entstehung in primäre und sekundäre Partikel unterteilt werden. Primäre Partikel entstehen in der Aussenluft bei der unvollständigen Verbrennung in Motoren, Heizungen, Kraftwerken, in der Landwirtschaft oder bei Waldbränden. In städtischen und vorstädtischen Gebieten ist der Strassenverkehr die wichtigste Quelle von UFP. Auch Flugzeuge emittieren UFP in grosser Anzahl, weshalb die UFP-Konzentrationen in der Umgebung von grösseren Flughäfen stark erhöht sein können (OSTLUFT, 2021; Sintermann et al., 2021). Sekundäre Partikel entstehen erst durch Oxidation von gasförmigen Vorläuferstoffen in der Atmosphäre und sind meist wasserlöslich. Durch Koagulation der Partikel (Kollision und Zusammenballung mit anderen Teilchen) nimmt die Anzahlkonzentration von UFP ab, weshalb sie mit zunehmender Entfernung von Quellen schnell sinkt.

11.3 Gesundheitsfolgen von UFP

Während eine Vielzahl von Effekten und Wirkungsmechanismen von UFP durch Tier- und Zellstudien untermauert werden, sind die epidemiologischen Zusammenhänge noch nicht abschliessend beurteilbar. Es werden vor allem direkte Effekte von UFP im Lungengewebe beschrieben, aber auch indirekte Effekte ausgelöst durch Entzündungsmediatoren, die von der Lunge in den Blutkreislauf gelangen und Effekte in anderen Organen auslösen können. UFP können, falls sie in der Lungenflüssigkeit nicht löslich sind, aufgrund ihrer geringen Grösse in die kleinsten Lungenbläschen vordringen, von Lungenzellen aufgenommen werden und die Luft-Blutsschranke, wenn auch nur in geringer Anzahl, überwinden, womit sie in den Blutkreislauf gelangen (Health Effects Institute (HEI), 2013).

Die epidemiologische Abschätzung der Gesundheitsfolgen von UFP beruht auf relativ wenigen heterogenen Studien, da Belastungsmessungen und -modellierungen im Gegensatz zu Feinstaub oder Stickoxiden nur in wenigen Studien zur Verfügung stehen. Aufgrund mangelnder standardisierter Messungen von UFP, vielen verschiedenen Messgrössen, einer schwierigen Abgrenzung der UFP-Effekte von den PM_{2.5} und anderen Schadstoffen zugeordneten gesundheitlichen Auswirkungen sowie der geringen Menge an qualitativ hochwertigen epidemiologischen Studien – insbesondere für Langzeiteffekte – ist die Evidenz insgesamt noch nicht ausreichend für die epidemiologische Bewertung der kausalen Zusammenhänge (Ohlwein et al., 2019).

11.4 Entwicklung der Belastung mit UFP in der Schweiz

Wie in Abbildung 24 dargestellt, dokumentieren die Messreihen an allen Standorttypen seit 2005 eine abnehmende Partikelanzahlkonzentration.

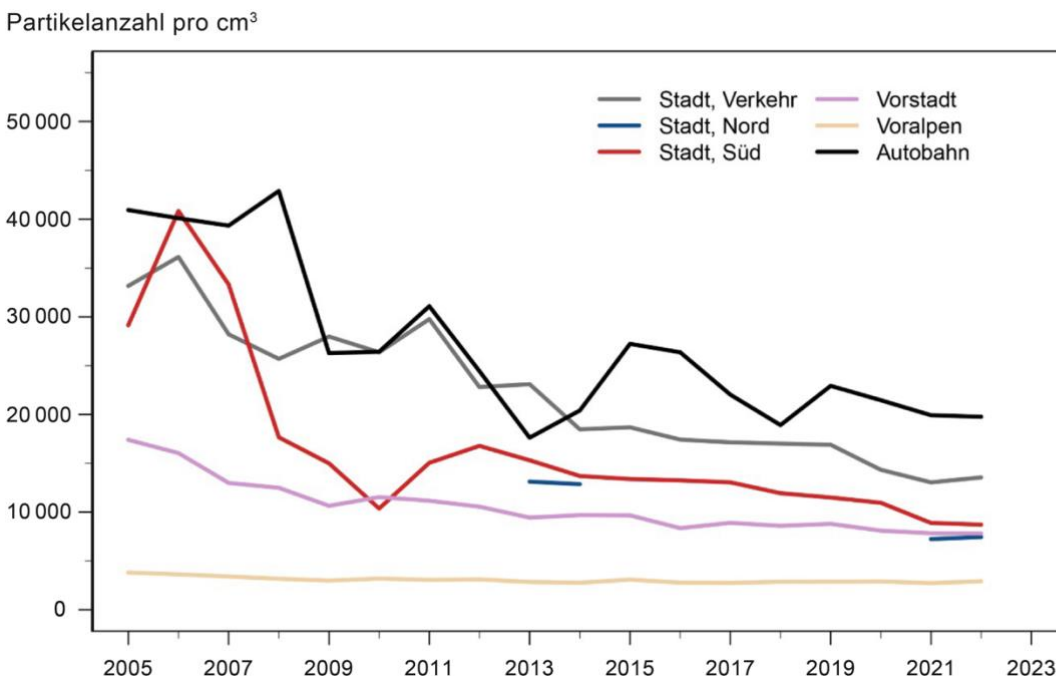


Abbildung 24: Ultrafeine Partikel, gemessen als Partikelanzahl (Grössenbereich von 4 nm bis 3 µm), Jahresmittelwerte 2005–2022 nach Standorttypen.

11.5 Einschätzung für die Schweiz

WHO-Empfehlungen

Die WHO legt keinen Richtwert für UFP fest, sondern beschreibt Handlungsempfehlungen, sogenannte «Best Practices». Sie empfiehlt, zusätzlich zur Messung der klassischen Luftschadstoffe (siehe Kapitel 4–9), Messungen von UFP – als Partikelanzahl für Partikel im Grössenbereich von kleiner oder gleich 10 Nanometer bis zu ca. 1 Mikrometer – durchzuführen. Die Standorte der Messungen sollten in solche mit tiefer Belastung (Jahresmittelwert < 1000 Partikel/cm³) und solche mit hoher bzw. städtischer Belastung (Jahresmittelwert > 10 000 Partikel/cm³) eingeteilt werden. Massnahmen im Bereich der Immissionskontrolle sollten sich auf Standorte mit hoher Belastung – inklusive stark befahrene Strassen und Flughäfen – konzentrieren. Schliesslich empfiehlt die WHO bestehende Messstandorte mit einer kontinuierlichen Messung von UFP zu ergänzen, um eine Erfolgskontrolle von Massnahmen zu ermöglichen und die lufthygienische Forschung mit Messdaten zu unterstützen. Letztere sollten in Modelle für die menschliche Belastungsabschätzung fließen.

Erfüllt die Schweiz die WHO-Empfehlungen?

Im NABEL-Messnetz wurde 2003 mit Messungen der Partikelanzahl begonnen. Heute wird die Belastung an 6 NABEL-Stationen erhoben. Die Messreihen weisen auf «hohe» Belastung im städtischen und

verkehrsnahen Umfeld (Autobahn, Flughafen) hin und zeigen eine Halbierung der Belastung seit Beginn der Messungen. Wichtigste Massnahme zur Reduktion der Belastung ist die Regulierung der Emissionen bei allen Quellen (Motorfahrzeuge inklusive Maschinen in der Bau- und Landwirtschaft, Holzheizungen, Schiffe und Flugzeuge).

Weitergehende Empfehlungen für die Schweiz

Für die gezieltere Beurteilung der Gesundheitsrelevanz und der lufthygienischen Massnahmen wäre die messtechnische Unterscheidung von primären und sekundären UFP von Vorteil. Durch weitere Massnahmen zur Emissionsminderung an der Quelle sollte die in den letzten Jahren beobachtete Abnahme der Belastung fortgesetzt werden. Im Falle einer Trendwende müssten die Ursachen erörtert und Gegenmassnahmen eingeleitet werden.

Angesichts der offenen Fragen zu den zweifellos gesundheitlich relevanten UFP wird sich die EKL in den kommenden Jahren erneut mit der Regulierung der UFP auseinandersetzen.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Nein, es gibt jedoch für die Messung der Anzahlkonzentration von UFP etablierte Messmethoden (Kondensationskernzähler), aber kein international etabliertes Referenzverfahren. Wie Kondensationskernzähler eingesetzt werden sollten, ist in einer technischen Spezifikation des Europäischen Komitees für Normung (CEN) beschrieben: CEN/TS 16976:2016 (CEN, 2016).

12 Sand- und Wüstenstaub-Ereignisse

12.1 Empfehlungen der EKL zu Sand- und Wüstenstaub

Die EKL empfiehlt keinen Immissionsgrenzwert für Wüstenstaub und auch keine zusätzlichen Massnahmen für die Schweiz. Mit dem Immissionsgrenzwert für den Tagesmittelwert der PM10- und PM2.5-Belastung wird auch Sand- und Wüstenstaub bereits berücksichtigt. Die Belastungen spielen für die Schweiz eine untergeordnete Rolle. Die für stark betroffene Regionen formulierten Empfehlungen der WHO sind für die Schweiz nicht relevant.

12.2 Gesundheitsfolgen von Sand- und Wüstenstaub-Ereignissen

Auch wüstenstaubbedingte PM10- bzw. PM2.5-Belastungen erhöhen die Sterblichkeit durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie der Häufigkeit von Atemwegsproblemen (Tobias et al., 2019). Solche Ereignisse sind in der Schweiz aber selten und von kurzer Dauer; die akuten gesundheitlichen Auswirkungen sind entsprechend gering.

12.3 Überblick zum Stand der Immissionen von Wüstenstaub in der Schweiz

Seit 2001 werden durch das Paul Scherrer Institut Saharastaub-Ereignisse auf dem hochalpinen Jungfraujoch durch Messung der optischen Eigenschaften des Feinstaubes erfasst und aufgezeichnet. Pro Jahr werden dort 10–34 Saharastaub-Tage beobachtet. Dabei kann es zu geringfügigen Überschreitungen des Tagesgrenzwertes für PM10 kommen. Der Beitrag zum PM10-Jahresmittelwert beträgt nur $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Collaud Coen et al., 2004). In tiefer gelegenen Gebieten spielen Saharastaub-Ereignisse eine noch geringere Rolle als in hochalpinen Regionen. Auch die mittlere jährliche PM2.5-Belastung wird durch den Wüstenstaub kaum beeinflusst.

12.4 Einschätzung für die Schweiz

WHO-Empfehlungen und Einordnung für die Schweiz

Die Empfehlungen der WHO richten sich an Länder, die von Sand- und Wüstenstaub-Ereignissen stark betroffen sind. Für die Luftqualität der Schweiz ist der Wüstenstaub unbedeutend und die bisherige Mess- und Informationspraxis ausreichend. Interessierte können sich auf den Seiten von MeteoSchweiz ([Saharastaub-Ereignisse – MeteoSchweiz \[admin.ch\]](#)) informieren. Die Kantone stellen einen Überblick zur aktuellen Luftbelastung auf verschiedenen Plattformen und auch als App (airCheck) zur Verfügung. Zudem wird in den Nachrichten regelmässig über Wüstenstaub-Ereignisse berichtet.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Nein, es gibt kein Referenzmessverfahren für Mineralstaub oder Wüstenstaub. Die Europäische Umweltagentur EEA (2012) empfiehlt Wüstenstaub durch eine Kombination der chemischen Charakterisierung von Feinstaubproben und meteorologischen Informationen zu identifizieren und zu quantifizieren. Für betroffene Regionen wäre die Etablierung eines Referenzverfahrens von Vorteil.

13 Weitere Schadstoffe und Messgrössen

Die WHO selber äussert sich im Bericht der neuen Luftqualitätsleitlinien nicht zu Metallen, PAK oder dem oxidativen Potenzial (OP) von Feinstaub. Die EKL hat in ihrem Feinstaubbericht von 2013 weitere Messgrössen für Feinstaub oder seine Bestandteile aufgeführt (EKL, 2013, S. 40) und eine Neubeurteilung gefordert, da die wissenschaftlichen Grundlagen zur Beurteilung dieser weiteren Grössen spärlich waren, besonders in Bezug auf die interessierenden Langzeitfolgen. Fehlende Referenzmessverfahren waren ebenfalls Teil der Argumentation.

Nachfolgend soll ein Überblick zu den weiteren in der LRV regulierten Schadstoffen oder im EKL-Bericht beleuchteten Messgrössen PAK, Metalle und OP von Feinstaub gegeben werden.

13.1 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe PAK

Empfehlungen der EKL zu PAK

Die EKL empfiehlt keinen Immissionsgrenzwert für PAK. Die PAK-Immissionen sollen weiterhin überwacht und die Emissionen dem Minimierungsgebot folgend reduziert werden.

Quellen von PAK

PAK entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Materialien wie Kohle, Benzin, Tabak, Heiz- und Dieselöl, Holz oder anderen Produkten pflanzlichen Ursprungs. In der Schweiz wird Benzo[a]pyren, ein Leitschadstoff für PAK, zu zwei Dritteln von Holzheizungen verursacht. PAK bestehen aus zwei oder mehr verbundenen Benzolringen und liegen je nach Grösse und Umgebungsbedingungen als Gas oder partikelgebunden vor.

Gesundheitsfolgen von PAK

PAK können eingeatmet, sowie mit der Nahrung oder über die Haut aufgenommen werden. Sie lagern sich dann im Fettgewebe ab. Viele der PAK, so auch deren bekanntester Vertreter Benzo[a]pyren, sind krebserregend. PAK führen im Körper zur Bildung schädlicher Stoffwechselprodukte (Metaboliten), welche letztlich für die gesundheitlichen Auswirkungen verantwortlich sind.

Es gibt in den letzten Jahrzehnten nur wenige epidemiologische Untersuchungen zu den schädlichen Auswirkungen von PAK in der Aussenluft auf die Gesundheit. Es liegen kaum Studien vor, welche PAK in einer ausreichenden zeitlichen und räumlichen Auflösung untersucht haben. Dennoch gibt es einige Hinweise auf die Entwicklung von Krebs durch PAK. Mechanistische Studien unterstützen zudem die beobachteten akuten Effekte auf das Herz-Kreislaufsystem und die Atemwege, welche auf partikelgebundene PAK zurückgeführt werden. Insgesamt ist die Datenlage noch zu wenig umfangreich (WHO Europe, 2021).

Entwicklung der PAK-Belastung in der Schweiz

Im NABEL-Messnetz und an kantonalen Messstationen hat die Konzentration von Benzo[a]pyren, dem Leitschadstoff für PAK, seit Messbeginn im Jahr 2006 abgenommen (Abbildung 25 und für weitere PAK Abbildung 39 und Abbildung 40 Anhang H [Fischer & Hüglin, 2023]). Aufgrund der Emissionen durch Holzheizungen sind die Belastungen in ländlichen Regionen mit vielen Holzheizungen höher. Lokale Emissionen spielen insbesondere für die höheren B[a]P-Konzentrationen in ländlichen Regionen (siehe Abbildung 25, Standorttyp Land Süd und Anhang H) eine wichtige Rolle. Das bevölkerungsgewichtete Mittel der B[a]P-Belastung betrug im Jahr 2020 $0,3 \text{ ng/m}^3$ (Castro et al., 2020).

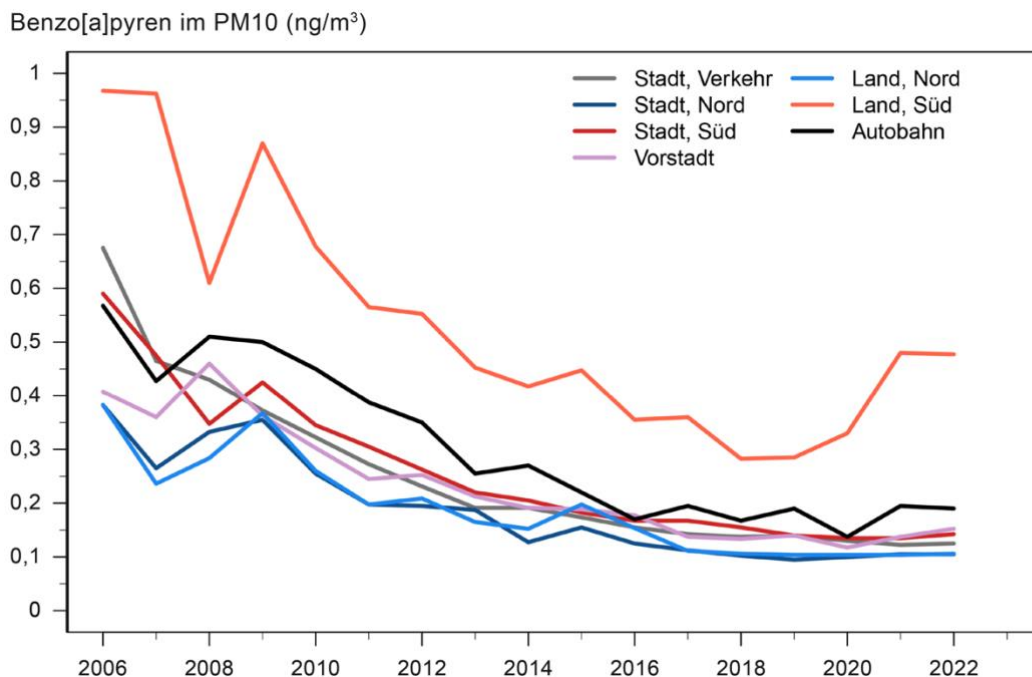


Abbildung 25: Benzo[a]pyren Jahresmittelwerte 2006–2022 nach Standorttyp (NABEL-Messstationen).

Einschätzung für die Schweiz

Empfehlungen der EU

Aufgrund seiner Toxizität wird Benzo[a]pyren (kurz B[a]P) oft als Leitschadstoff für PAK verwendet. Die Europäische Union hat in ihrer Richtlinie 2004/107/EC (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2004) einen Zielwert (Jahresmittelwert) für B[a]P im Feinstaub (PM10) von 1 ng/m³ festgelegt und fordert die Bestimmung von sieben zusätzlichen PAK. In der Schweiz werden die Immissionen dieser und weiterer PAK seit 2006 erfasst (Abbildung 39 und Abbildung 40 im Anhang H). Für die wichtigsten PAK bestehen auch Emissionsinventare.

Wie sind die Immissionen zu beurteilen?

Die Schweiz kennt für krebserregende Stoffe keine Grenzwerte, sondern es gilt das Minimierungsgebot. Um das Krebsrisiko auf einen Fall pro 1 Million Menschen zu begrenzen, sollte die mittlere Exposition der Bevölkerung gegenüber B[a]P unter 0,12 ng/m³ liegen (Brunner, 2000; Guerreiro et al., 2016). Dieser Zielwert ist noch nicht erreicht. Da PAK ein bedeutender Bestandteil von EC sind, sind diese von dem formulierten Minimierungsziel für EC der EKL aus dem Jahr 2013 indirekt ebenfalls betroffen. Die höchsten Konzentrationen von PAK treten im Winterhalbjahr in Alpentälern auf, in denen verbreitet Holzheizungen genutzt werden und in denen häufig Inversionswetterlagen vorherrschen.

Gibt es international anerkannte Referenzmessverfahren?

Ja: SN EN 15549:2008 (SN EN, 2008)

13.2 Staubniederschlag und Metalle im Staubniederschlag und Feinstaub

Die Schweizer LRV kennt Immissionsgrenzwerte für Staubniederschlag insgesamt, für die Metalle Blei, Cadmium, Zink und Thallium im Staubniederschlag sowie für die Metalle Blei und Cadmium im Feinstaub PM10. Zusätzlich werden im NABEL-Messprogramm Kupfer, Arsen und Nickel im PM10 sowie im Staubniederschlag bestimmt.

Empfehlungen der EKL für Staubniederschlag und Metalle im Feinstaub

Die EKL empfiehlt, die aktuellen LRV-Immissionsgrenzwerte für Metalle im Feinstaub PM10 und im Staubniederschlag sowie für Staubniederschlag insgesamt beizubehalten. Diese Werte sind mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 (WHO, 2006) kompatibel; die WHO hat keine Anpassung vorgenommen. Für weitere gesundheitsrelevante Metalle lassen sich derzeit keine Immissionsgrenzwerte herleiten. Es gilt das Vorsorgeprinzip, weshalb periodische Messungen der Metalle im PM10 wie bisher angezeigt sind.

Tabelle 9: Staubniederschlag insgesamt und Metalle, für welche in der LRV IGW festgelegt sind. Die LRV verwendet noch den Begriff «Schwebestaub»; heute «Feinstaub».

Schadstoff	Mittelungszeit	LRV IGW
Blei im Feinstaub PM10, ng/m ³	Jahr	500
Cadmium im Feinstaub PM10, ng/m ³	Jahr	1,5
Staubniederschlag insgesamt, mg / (m ² * d)	Jahr	200
Blei im Staubniederschlag, µg / (m ² * d)	Jahr	100
Cadmium im Staubniederschlag, µg / (m ² * d)	Jahr	2
Zink im Staubniederschlag, µg / (m ² * d)	Jahr	400
Thallium im Staubniederschlag, µg / (m ² * d)	Jahr	2

Quellen von metallischem Feinstaub

Die LRV reguliert die Immissionen von vier Metallen (Blei Pb, Cadmium Cd, Thallium Tl, Zink Zn). Haushalte, Industrieferuerungen und -prozesse sowie der Verkehr sind deren grösste Quellen. Weitere Metalle wie zum Beispiel Quecksilber werden in der LRV über Emissionsvorschriften geregelt. Mit knapp 80% sind Industrie und Gewerbe inkl. der Abfallverbrennung die wichtigste Quelle von Quecksilber. Thallium stammt insbesondere aus der Zementherstellung. Zink entstammt der Abfallverbrennung, Stahlwerken und dem Reifenabrieb im motorisierten Strassenverkehr.

In epidemiologischen Studien werden weitere Metalle im Feinstaub (PM10 oder PM2.5) als Indikatoren für bestimmte Quellen herangezogen. So weisen zum Beispiel Kupfer und Eisen auf verkehrsbedingte Luftbelastung hin. Kupfer stammt aus dem Abrieb von Bremsbelägen und Eisen aus der mechanischen Abnutzung von Motoren, Bremsen und Schienen (Piscitello et al., 2021).

Gesundheitsfolgen von metallischem Feinstaub

Die in der LRV regulierten Metalle im Feinstaub (Pb, Cd) sind erwiesenermassen neurotoxisch. In einem Übersichtsbericht der französischen Behörde ANSES (2019) wurde die Evidenz von Gesundheitsfolgen basierend auf epidemiologischen Studien und Tierstudien unter anderem für metallische Bestandteile des Feinstaubes beurteilt. Die Evidenz von Gesundheitsfolgen für die Atemwege durch Nickel und für das Herz-Kreislaufsystem durch Eisen bzw. Vanadium wurde als hoch eingestuft. Moderat wurde die Evidenz

für Wirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem durch Zink beurteilt. Die Evidenz für eine erhöhte Sterblichkeit wurde als moderat für Eisen und tief für Kupfer bewertet.

Entwicklung der Metall-Immissionen in der Schweiz

Die Entwicklung der Konzentrationen der in der LRV regulierten Metalle ist in den jährlichen Messberichten des NABEL dokumentiert. Die Konzentrationen der regulierten Metalle (Pb, Cd) im Feinstaub (PM10) und im Staubbiederschlag (Pb, Cd, Tl, Zn) haben in den letzten drei Jahrzehnten stark abgenommen und die IGW werden klar eingehalten (BAFU 2023b; BAFU & Empa, 2022). Ebenfalls stark abgenommen haben die Konzentrationen von Kupfer (vgl. Abbildung 26), Nickel und Arsen in PM10, welche an den NABEL-Stationen seit 2006 gemessen werden (BAFU & Empa, 2022b). Die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen von weiteren nicht-regulierten Metallen im PM10 ist weniger gut bekannt, da nur Daten aus periodischen projektbasierten Untersuchungen von wenigen Messstationen vorliegen.

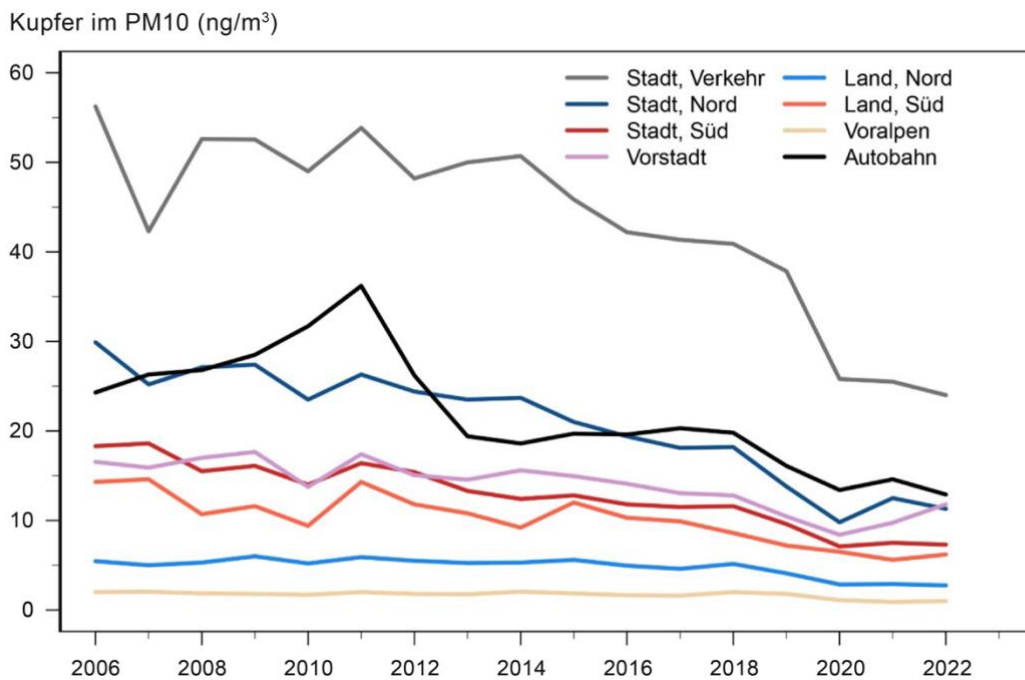


Abbildung 26: Jahresmittel der Kupferbelastung im PM10 2006–2022 nach Standorttypen als Beispiel für den zeitlichen Verlauf von Metallen in PM10.

Einschätzung für die Schweiz

Die Konzentrationen von Metallen im Feinstaub PM10 sind in städtischen Gebieten deutlich höher als in ländlichen Gegenden (Grange et al., 2021). Eine wichtige Quelle für z. B. Antimon Sb, Barium Ba, Kupfer Cu, Eisen Fe, Zink Zn sind sogenannte nicht-abgasbedingte Emissionen des Strassenverkehrs, d.h. Feinstaub aus Abrieb von Bremsen, Reifen und Strassen. Da Nicht-Auspuffemissionen gegenwärtig nicht reguliert sind, wird deren relativer Beitrag voraussichtlich in Zukunft zunehmen, da die Auspuffemissionen bei zunehmender E-Mobilität weiter abnehmen werden. Die Erkenntnisse über die Gesundheitseffekte nehmen zwar zu, die Messung und Belastungsabschätzung bleibt in epidemiologischen Studien jedoch spärlich. Die Grundlagen für die Herleitung eines Grenzwertes fehlen. Massnahmen zur Reduktion an der Quelle sollten geprüft werden und lufthygienisch relevante Metalle im Feinstaub sollten

periodisch gemessen werden. Die Forderung nach einer vorsorglichen Minderung der Emissionen von Metallen stützt sich auf das USG.

13.3 Oxidatives Potenzial (OP) des Feinstaubs

Feinstaubpartikel können zu oxidativem Stress führen, indem direkt partikelgebundene Oxidantien in die Atemwege gelangen oder indem Inhaltsstoffe des Feinstaubes im menschlichen Körper katalytisch reaktive Sauerstoffverbindungen (auf Englisch: reactive oxygen species [ROS]) bilden. Aus verschiedenen Studien ist bekannt, dass bestimmte organische Verbindungen und Metalle wie Eisen, Mangan, Kupfer oder Nickel in biologischen Systemen ROS bilden können. Die im Feinstaub enthaltenen oder katalytisch gebildeten ROS können Antioxidantien abbauen und werden als OP gemessen. Zur Bestimmung des OP von Feinstaub werden verschiedene Labortests angewendet (Bates et al., 2019). Diese reagieren auf die Inhaltsstoffe des Feinstaubes unterschiedlich. Zudem werden die gleichen OP-Tests in verschiedenen Labors teilweise mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt, da aktuell internationale Standards für OP-Messverfahren fehlen. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der OP-Messungen.

Empfehlungen der EKL für das OP von Feinstaub

Für das OP von Feinstaub, einer wissenschaftlich interessanten Charakterisierung einer Eigenschaft von Feinstaub, welcher von Gesundheitsrelevanz sein könnte, lässt sich derzeit kein Immissionsgrenzwert herleiten und es besteht keine Referenzmessmethode. Die EKL empfiehlt die periodische Überwachung und den Einbezug von OP-Messungen in epidemiologische Studien, um in Zukunft Fragen zu Messmethoden beantworten und die lufthygienische Relevanz des OP besser beurteilen zu können.

Quellen von erhöhtem OP in Feinstaub

Die verwendeten OP-Tests reagieren grundsätzlich auf Metalle wie Eisen, Kupfer und Mangan, sowie auf stark oxidierte organische Verbindungen. Entsprechend bestimmen die Quellen dieser Verbindungen das OP des Feinstaubes. Studien zum Zusammenhang von Emissionsquellen und OP von Feinstaub zeigen, dass organische Verbindungen aus Holzfeuerungen, sowie die Übergangsmetalle in den Abriebsmissionen des Verkehrs ein hohes OP aufweisen. Holzfeuerungen und sekundärer organischer Feinstaub tragen massgeblich zum OP beider Fraktionen (PM_{2.5} und PM₁₀) bei. Verbrennungsunabhängige Partikel des Verkehrs (Aufwirbelung, Abrieb etc.) sind aufgrund der Grösse dieser Partikel hauptsächlich für das OP von PM₁₀ verantwortlich (Daellenbach et al., 2020).

Gesundheitsfolgen von Feinstaub mit erhöhtem OP

Die verschiedenen Inhaltsstoffe des Feinstaubes können reaktive Sauerstoff- (reactive oxygen species, ROS) oder Stickstoffspezies (reactive nitrogen species, RNS) produzieren und damit oxidativen Stress auslösen, was einen wichtigen Wirkungsmechanismus von Umweltbelastungen auf die Gesundheit darstellt (Peters et al., 2021). Die Folgen von erhöhtem oxidativem Stress in Lungenzellen, also einem Ungleichgewicht von oxidativen und antioxidativen Prozessen, sind Stoffwechselstörungen und oxidative Schädigungen an Lipiden, Proteinen und der Erbsubstanz. Dies kann zu chronischen Entzündungsreaktionen und somit zu Atemwegs- wie auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Krebs führen. Möglicherweise stellt das OP von Feinstaub eine für diesen Wirkungsmechanismus spezifischere Messgrösse dar als die Massen- oder Partikelanzahlkonzentration der Feinstaubbelastung.

Die wenigen epidemiologischen Studien zeigen ein gemischtes Bild bezüglich der beobachteten Gesundheitseffekte, was auf unterschiedliche Messmethoden und Belastungsabschätzungen zurückgeführt werden könnte (vgl. Atkinson et al., 2016; Weichenthal et al., 2016; Weichenthal et al., 2021). In einer niederländischen Kohortenstudie wies eine gemeinsame Analyse in Mehrschadstoffmodellen von PM_{2.5}, PM₁₀, Russ (Lichtabsorption des PM_{2.5}), NO₂ und OP (gemessen mit Dithiothreitol [DTT]) darauf hin,

dass sich der grösste Anteil des erhöhten Sterberisikos der PM_{2.5}-Massenkonzentration des Feinstaubes zuordnen liess (Traini et al., 2022). Die Hypothese, dass das OP des Feinstaubes eine gesundheitsrelevantere Messgrösse darstellt als die herkömmliche Bestimmung der Feinstaubmasse oder der Partikelanzahl, liess sich bisher nicht belegen.

Entwicklung der OP-Belastung in der Schweiz

Das OP von Feinstaub wird in der Schweiz noch nicht routinemässig gemessen. Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten liegen OP-Messungen von verschiedenen Standorttypen in der Schweiz aus den Jahren 2013–2014 (Daellenbach et al., 2020) sowie von 2018–2019 (Grange et al., 2022) vor. In diesen Analysen war das OP im PM₁₀ wesentlich höher als im PM_{2.5} und verkehrsexponierte Standorte zeigten eine stärkere Belastung als andere Standorte. Die Messwerte am städtischen und verkehrsbelasteten Standort Bern-Bollwerk deuten auf ein abnehmendes OP in PM_{2.5} und in PM₁₀ hin.

Einschätzung für die Schweiz

Es fehlt bisher eine Standardisierung der Messmethode zur Quantifizierung des OP. Für die Messung von OP werden verschiedene Methoden eingesetzt. Auch reagieren die verfügbaren OP Methoden unterschiedlich auf Inhaltsstoffe des Feinstaubes. Es ist ausserdem unklar, ob sich die gesundheitlich relevanten oxidativen Eigenschaften auf Partikeln charakterisieren lassen, welche auf Filter gesammelt wurden, oder ob viel aufwändigere Methoden, in welchen die Partikel direkt in eine Lösung abgesondert werden, notwendig sind. So bleibt derzeit unklar, wie die Resultate der OP-Tests interpretiert werden müssen und wie die oxidativen Eigenschaften der Partikel zu gewichten sind. Erschwerend kommt dazu, dass auch andere Bestandteile der verunreinigten Luft – insbesondere Ozon und Stickoxide – starke oxidative Wirkungen haben.

Ob und mit welcher Methodik das OP in Zukunft ein von der Massenkonzentration oder der Partikelanzahl unabhängiger lufthygienischer Indikator sein könnte, kann nur durch weitere Forschung geklärt werden. Forschungsbedarf besteht sowohl zur Frage der Bedeutung der Messgrösse OP als Indikator für die Toxizität von Feinstaub als auch zur Messmethodik (Bates et al., 2019).

14 Empfehlungen für eine Anpassung der LRV

Die EKL empfiehlt dem Bundesrat, die Immissionsgrenzwerte (IGW) im Anhang 7 der LRV gemäss Tabelle 10 anzupassen, damit die IGW auch in Zukunft den Anforderungen des Umweltschutzgesetzes entsprechen. Die empfohlenen Werte stehen weitgehend im Einklang mit den wissenschaftlich abgestützten Luftqualitäts-Richtwerten der WHO. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Empfehlungen der EKL und den neuen WHO-Richtwerten sind in den vorangehenden Kapiteln dargelegt und begründet.

Die übrigen IGW sollen unverändert beibehalten werden. Die EKL verzichtet im Moment darauf, IGW für weitere, bisher nicht geregelte Luftschadstoffe zu empfehlen. Sie unterstützt aber die in den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 formulierten Handlungsempfehlungen oder «Best Practices» der Minimierung für Russ als auch für UFP. Die in den vorausgehenden Kapiteln formulierten Begründungen für die Empfehlungen werden untenstehend zur Vereinfachung der Lesbarkeit nochmals wiederholt. Im nachfolgenden Kapitel werden die Empfehlungen aus verschiedenen Blickwinkeln diskutiert.

Tabelle 10: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV (identisch mit Tabelle 1). Sie stützen sich weitgehend auf die Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) und die umfangreichen zugehörigen Publikationen ab und weichen nur in begründeten Ausnahmefällen davon ab. Die LRV verwendet noch den Begriff «Schwebestaub»; heute wird die Bezeichnung «Feinstaub» bevorzugt.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG 2021	LRV IGW derzeit	Empfehlung EKL 2023
Schwefeldioxid (SO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 8)	Jahresmittelwert und neu Mittelwert über das Winterhalbjahr	–	30 ^a	20 ^b
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Stickstoffdioxid (NO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 7)	Jahresmittelwert	10	30	10
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Kohlenmonoxid (CO), mg/m³ (siehe Kapitel 9)	24-h-Mittelwert	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozon (O₃), µg/m³ (siehe Kapitel 6)	Sommersaison ^e	60	–	60
	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats	–	100	100
	8-h-Mittelwert	100 ^c	–	–
	1-h-Mittelwert	–	120 ^d	120 ^d
Schwebestaub / Feinstaub (PM10), µg/m³ (siehe Kapitel 4)	Jahresmittelwert	15	20	15
	24-h-Mittelwert	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Schwebestaub / Feinstaub (PM2.5), µg/m³ (siehe Kapitel 5)	Jahresmittelwert	5	10	5
	24-h-Mittelwert	15 ^c	–	15 ^c

^a Immissionsgrenzwert, welcher auch den Schutz von Tieren und Pflanzen, ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen nach USG Art. 1 Abs. 1 einschliesst und dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt des Erlasses der Luftreinhalte-Verordnung im Jahre 1985 entspricht.

^b Wert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2000 (WHO, 2000), welcher zum Schutz von Wäldern und weiteren naturnahen Ökosystemen festgelegt wurde. Er gilt als Jahresmittelwert sowie auch für das Winterhalbjahr. (Oktober–März).

^c 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^d Darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

^e Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozon-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt. Für die Schweiz entspricht dies April bis September.

Feinstaub PM10

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für Feinstaub PM10 für den Jahresmittelwert neu auf $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für den Tagesmittelwert auf $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu senken. Damit wird dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Feinstaub PM2.5

Die EKL empfiehlt, den Immissionsgrenzwert für Feinstaub PM2.5 für den Jahresmittelwert auf $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu senken und neu einen Immissionsgrenzwert von $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Tagesmittelwert einzuführen. Damit wird dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Bereits heute werden zur Ermittlung des Jahresmittelwerts von Feinstaub PM2.5 zeitlich hochaufgelöste Messungen durchgeführt. Da PM2.5 räumlich recht homogen verteilt ist, ist davon auszugehen, dass wenige Messstandorte zur Überwachung der entsprechenden Immissionen ausreichen und somit die Einführung dieses neuen Immissionsgrenzwerts messtechnisch kaum zu Mehraufwand führen wird.

Ozon

Die EKL empfiehlt für Ozon die Einführung des WHO-Richtwertes für die Sommersaison (April bis September) von $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Langzeitwert. Der 1-Stundenmittelwert (1-h-Mittel) der LRV, der höchstens einmal pro Jahr überschritten werden darf, wird beibehalten. Da dieser Wert statistisch äquivalent ist mit dem WHO-Richtwert für den 8-h-Mittelwert und somit denselben Gesundheitsschutz gewährleistet, soll auf die Einführung eines 8-h-Grenzwertes verzichtet werden. Für die Bewertung von Langzeittrends soll der Wert des 98. Perzentils der Halbstundenmittelwerte eines Monats beibehalten werden.

Der Langzeitwert von $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Sommersaison beruht auf neuer Evidenz zur gesundheitlichen Relevanz der Langzeitbelastung. Dieser Wert stützt auch die Einhaltung der vegetationspezifischen kritischen Belastungswerte (Critical Levels; vgl. Anhang D.1). Diese wurden im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung zum Schutz der Vegetation vor Ozonschäden festgelegt.

Weitere Informationen zur Vergleichbarkeit der beiden Werte (1-h- bzw. 8-h-Mittelwert) finden sich im Anhang E. Eine Anpassung an den 8-h-Mittelwert der WHO würde erheblichen administrativen Aufwand erfordern. Ausserdem basieren die kantonalen Informationskonzepte und Massnahmenpläne auf dem Stundenmittelwert, welche bei einer Angleichung an die WHO (8-h-Mittelwerte) angepasst werden müssten.

Da alle Grenzwerte aus denselben Messreihen hergeleitet werden können, erfordert die empfohlene Ergänzung bzw. Beibehaltung dieser Immissionsgrenzwerte keinen zusätzlichen Messaufwand.

Stickstoffdioxid NO₂

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für NO₂ neu auf $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Jahresmittelwert und $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Tagesmittelwert festzulegen. Mit dieser Senkung wird den Schutzzielen des USG bezüglich Gesundheit der Menschen und der Ökosysteme sowie den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen. Der 95. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Jahres soll gestrichen werden.

Mit den neu empfohlenen tieferen Grenzwerten für den Jahres- und Tagesmittelwert wird der 95. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Jahres für die lufthygienische Beurteilung als nicht mehr relevant angesehen. Er wird seit über 20 Jahren an allen NABEL-Standorten eingehalten (vgl. Abbildung 35 im Anhang F). Die EKL empfiehlt, diesen Immissionsgrenzwert zu streichen, aber zwecks Vergleichbarkeit mit vergangenen Jahren und Beurteilung von Trends noch weitere fünf Jahre regelmässig zu berichten.

Schwefeldioxid SO₂

Die EKL empfiehlt, die Immissionsgrenzwerte für SO₂ auf 20 µg/m³ für den Jahresmittelwert sowie für das Winterhalbjahr und auf 40 µg/m³ für den Tagesmittelwert zu senken. Mit diesen Empfehlungen wird gleichzeitig dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO und der UNECE Rechnung getragen. Der 95. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Jahres soll gestrichen werden.

Die SO₂-Belastung liegt dank erfolgreicher Luftreinhaltemassnahmen wie der Entschwefelung von Heizöl und Treibstoffen bereits weit unter dem von der WHO vorgeschlagenen Kurzzeitwert. Für den Schutz der Vegetation in naturnahen Ökosystemen empfiehlt die EKL, die im Rahmen der UNECE Konvention (2017) über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung festgelegte kritische Konzentration (Critical Level) von 20 µg/m³ als Jahresmittelwert und als Mittelwert über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) zu übernehmen (siehe Anhang D.3). Dieser Wert entspricht auch den Empfehlungen der WHO für Europa aus dem Jahr 2000 zum Schutz von Wald- und Naturökosystemen (WHO, 2000).

Mit den neu empfohlenen tieferen Grenzwerten für die Jahres-, Winterhalbjahres- und Tagesmittelwerte wird der 95. Perzentilwert für die lufthygienische Beurteilung in der Schweiz nicht mehr als relevant angesehen. Er wird seit über 20 Jahren an allen NABEL-Standorten eingehalten (vgl. Abbildung 38, Anhang G). Die EKL empfiehlt, diesen Immissionsgrenzwert zu streichen, aber zwecks Vergleichbarkeit mit vergangenen Jahren und der Beurteilung von Trends noch weitere fünf Jahre regelmässig zu berichten.

Kohlenmonoxid CO

Die EKL empfiehlt, den Immissionsgrenzwert für Kohlenmonoxid auf 4 mg/m³ für den Tagesmittelwert zu senken. Damit wird gleichzeitig dem Schutzziel des USG und den Empfehlungen der WHO Rechnung getragen.

Russ

In Einklang mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien schlägt die EKL derzeit keinen Immissionsgrenzwert für Russ vor. Die Russ-Immissionen sollen weiterhin überwacht und die Emissionen dem Minimierungsgebot folgend reduziert werden. Die EKL empfiehlt die Weiterführung der bisherigen Russ-Strategie (Reduktion der Russ-Immissionen auf 20% der Werte von 2013) (EKL, 2013). Die Schweizer Strategie ist im Einklang mit den Empfehlungen der WHO.

Ultrafeine Partikel UFP

In Einklang mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien schlägt die EKL derzeit keinen Immissionsgrenzwert für ultrafeine Partikel (UFP) vor. Mangels eines internationalen Referenzmessverfahrens fehlt eine zentrale Bedingung für die Einführung eines Immissionsgrenzwerts. Die EKL unterstützt jedoch vollumfänglich die von der WHO vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen oder «Best Practices», welche von den Schweizer Behörden bereits seit einigen Jahren verfolgt werden.

Sand- und Wüstenstaub

Die EKL empfiehlt keinen Immissionsgrenzwert für Wüstenstaub und auch keine zusätzlichen Massnahmen für die Schweiz. Mit dem Immissionsgrenzwert für die Tagesmittelwerte von PM₁₀ und PM_{2.5} werden Sand- und Wüstenstaub bereits berücksichtigt. Die Belastungen spielen für die Schweiz eine untergeordnete Rolle. Die für stark betroffene Regionen formulierten Empfehlungen der WHO sind für die Schweiz nicht relevant.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK

Die EKL empfiehlt keinen Immissionsgrenzwert für PAK. Die PAK-Immissionen sollen weiterhin überwacht und die Emissionen dem Minimierungsgebot folgend reduziert werden.

Staubniederschlag und Metalle in Staubniederschlag und Feinstaub

Die EKL empfiehlt, die aktuellen Immissionsgrenzwerte für Metalle im Feinstaub (PM10) und im Staubniederschlag sowie für Staubniederschlag insgesamt beizubehalten. Diese Werte sind mit den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 kompatibel; die WHO hat keine Anpassung vorgenommen. Für weitere gesundheitsrelevante Metalle lassen sich derzeit keine Immissionsgrenzwerte herleiten. Es gilt das Vorsorgeprinzip, weshalb periodische Messungen der Metalle im Feinstaub PM10 wie bisher angezeigt sind.

Oxidatives Potenzial OP

Für das OP von Feinstaub, einer wissenschaftlich interessanten Eigenschaft von Feinstaub, welche von Gesundheitsrelevanz sein könnte, lässt sich derzeit kein Immissionsgrenzwert herleiten und es besteht keine Referenzmessmethode. Die EKL empfiehlt die periodische Überwachung und den Einbezug von OP-Messungen in epidemiologische Studien, um in Zukunft Fragen zu Messmethoden beantworten und die lufthygienische Relevanz des OP besser beurteilen zu können.

15 Diskussion

15.1 Das Umweltschutzgesetz verpflichtet zum Gesundheitsschutz

Das Umweltschutzgesetz bildet die gesetzliche Grundlage für die Luftreinhalte-Verordnung LRV. Es verlangt unter anderem, dass der Bundesrat Immissionsgrenzwerte (IGW) für Luftverunreinigungen festlegt, welche den Schutz der Gesundheit und der Umwelt gewährleisten. Die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 legen in überzeugender Weise dar, dass die Luftverschmutzung auch bei Belastungen unterhalb der bisherigen Richtwerte von 2005 (WHO, 2006) Krankheiten und vorzeitige Todesfälle verursacht. Die aktuelle wissenschaftliche Evidenz erforderte demzufolge eine Senkung der bisherigen WHO-Richtwerte auf Konzentrationswerte, unterhalb welcher Auswirkungen der Schadstoffbelastung bisher nicht nachgewiesen werden konnten.

Die Luftqualitätsleitlinien der WHO, welche regelmässig dem aktuellen Stand der Forschung angepasst werden, gelten in der Schweiz seit Jahrzehnten als ein wissenschaftlicher Referenzpunkt für die dem USG verpflichtete Luftreinhaltepolitik. Die EKL vertritt die Auffassung, dass der Stand der Wissenschaft, wie er in den Luftqualitätsleitlinien und den zugehörigen Publikationen der WHO dokumentiert ist, eine Anpassung der in der LRV festgelegten IGW nötig macht, damit auch in Zukunft die Vorgaben des USG erfüllt sind. Die Anpassung der derzeitigen IGW auf der Basis der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 ist somit unumgänglich. Die Einführung strengerer IGW in der Schweizer LRV führt jedoch zu neuen Fragen und Herausforderungen. Diese werden in der Folge aus lokaler, nationaler und internationaler Sicht erörtert. Anschliessend werden die Folgen diskutiert, die sich aus den teils neuen Methoden zur Herleitung der WHO-Richtwerte ergeben. Zusammenfassend folgt danach die Begründung für die Abweichungen zwischen den vorgeschlagenen IGW der EKL und den neuen WHO-Richtwerten (WHO AQG 2021). Vor den Schlussfolgerungen weist die EKL auf aktuelle Wissenslücken hin.

15.2 Luftreinhaltung – eine lokale, nationale und internationale Herausforderung

Notwendigkeit weiterer Massnahmen

Die Schweiz hat ihre Luftreinhaltepolitik in den letzten 40 Jahren mit grossem Erfolg auf wirkungsorientierte, auf dem USG basierte IGW ausgerichtet. Diese werden inzwischen an fast allen Standorten für fast alle Schadstoffe grossräumig eingehalten. Mit der vorgeschlagenen Anpassung der IGW wird die Luftqualität insbesondere in den dichter bewohnten Ballungszentren rechtlich jedoch als übermässig beurteilt werden. Um mittelfristig auch die von der EKL neu vorgeschlagenen IGW einzuhalten, müssen die Emissionen von Luftschadstoffen noch weiter gesenkt werden. Dies erfordert eine transparente und klare Vermittlung der Gründe, welche die Absenkungen der IGW notwendig machen, um die Unterstützung durch lokale und nationale Akteure und die Bevölkerung weiterhin zu sichern. Die wichtigsten sind nachfolgend nochmals zusammengefasst:

- Bei der Festlegung der derzeitigen IGW und der bisherigen WHO-Luftqualitätsleitlinien (WHO, 2006) gab es zu den Auswirkungen von niedrigen Schadstoffbelastungen noch keine soliden Daten; die Bevölkerungsgruppen, welche an den für diese Forschung zentralen nationalen und internationalen Grossstudien teilnahmen, waren Schadstoffbelastungen ausgesetzt, welche grossmehrheitlich über den alten WHO-Richtwerten respektive über den derzeit gültigen IGW der LRV lagen.
- Die Luftverschmutzung wurde nicht «gefährlicher», aber dank den grossen Erfolgen der Luftreinhaltung und intensiverer Forschung in Europa und Nordamerika wurde es möglich, auch die Auswirkungen vergleichsweise niedriger Belastung zu belegen. Die Erkenntnis, dass auch niedrigere Schadstoffkonzentrationen die Gesundheit schädigen können, erfordert gemäss Umweltschutzgesetz die Herabsetzung der IGW in der LRV.

- Die Wissenschaft bestätigt, dass sich jede Senkung der Luftbelastung positiv auf die Gesundheit der Bevölkerung auswirkt.

Aktualisierung der Massnahmenpläne

Die Einhaltung der neuen strengeren Grenzwerte erfordert eine Aktualisierung der Luftreinhalte-massnahmen. Kantonale und nationale Behörden werden sich weiterhin mit Nachdruck dem vorsorglichen Vollzug und den lufthygienischen Massnahmenplänen zu widmen haben. Angesichts der neuen lufthygienischen Herausforderungen drängt sich eine baldige Neuauflage des Luftreinhaltekonzeptes des Bundesrates auf.

Die bereits in Kraft stehenden Luftreinhalte-massnahmen haben zu deutlich abnehmenden Trends bei der Luftbelastung geführt. Sie dürften sich durch konsequente Anpassung der Emissionsvorschriften an den fortschreitenden Stand der Technik fortsetzen. Zur Erreichung der Ziele sind aber die Ergänzung und zügige Umsetzung von Massnahmenplänen bei allen Quellen erforderlich. Andernfalls sind die Ziele der neu vorgeschlagenen IGW wohl kaum – oder erst sehr viel später – erreichbar.

Angesichts der Notwendigkeit, relativ tiefe Belastungen noch weiter zu reduzieren, nimmt die Bedeutung der gezielten, quellenorientierten Regulierung zu, um kosteneffiziente Massnahmen zu priorisieren. Dies kann regional oder kantonale unterschiedliche Gewichtungen der Massnahmen erfordern, da die Emissionen von Landwirtschaft, Bauwesen, Verkehr, Flughafen, Industrie und Heizungen regional unterschiedlich sind. Beispiele von regional stark unterschiedlichen Herausforderungen finden sich in der Landwirtschaft, bei Heizungen (insbesondere auch Holzheizungen) oder bei lokalen Industrien (z. B. Zement oder Graphit). Zudem gilt es, auch mit neuen Herausforderungen wie zum Beispiel dem Energiekrisenmanagement den lufthygienischen Vorgaben des Umweltschutzgesetzes und somit dem Gesundheitsschutz verpflichtet zu bleiben.

Die bisherige Luftreinhaltepolitik der Schweiz hat sich insofern bewährt, als dass die meisten Schadstoffe – sowohl regulierte als auch nicht regulierte – abgenommen haben. So haben sich Massnahmen zur Senkung der NO_x-Emissionen positiv auf mehrere Bereiche ausgewirkt. Sie tragen einerseits zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte für NO₂ und einer Reduktion der Ozonspitzenwerte bei. Andererseits bewirken sie über die Reduktion der sekundär gebildeten Nitrate auch eine Verminderung der Feinstaubbelastung durch PM₁₀ und PM_{2.5}. Darüber hinaus senken sie den Eintrag von reaktivem Stickstoff in naturnahe Ökosysteme (vgl. Berichte EKL, 2005; EKL, 2014, 2020). Letztere müssen gemäss USG ebenfalls vor negativen Folgen geschützt werden. Auch der Fokus der Massnahmen auf die Reduktion der Feinstaubmasse hat sich sehr bewährt, obwohl dieser Indikator der Luftqualität die toxikologische Komplexität der Feinstaubkomponenten nur teilweise abbildet. So nahmen parallel auch die zurzeit noch nicht regulierten ultrafeinen Fraktionen der Partikel ab.

Sorgenkind Ozon

National als auch in Europa hat die Ozonbelastung trotz umfassender Luftreinhaltepolitik zur Minderung der Vorläuferschadstoffe Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) noch bei weitem nicht im erforderlichen Mass abgenommen. Es gelang jedoch, die Ozon-Spitzenbelastungen zu brechen. So blieben diese im Sommer 2020 und 2022 trotz extremer Hitzewellen deutlich unter denen des Hitzesommers 2003. Anstrengungen zur Reduktion der Vorläufersubstanzen Stickoxide, flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan, NMVOC), sowie Methan und Kohlenmonoxid sind auf allen Ebenen, national und international zu intensivieren. Die Massnahmen sollten auch mit der Klimapolitik abgeglichen werden. So ist eine Abnahme der Methankonzentrationen und des Ozons auch für den Klimaschutz sehr wirksam und wichtig.

Internationale Perspektive ist bedeutend

Die Schweiz setzt sich seit Jahren auch international für die Lufthygiene ein. So wurden alle acht Protokolle zur Reduktion von Luftschadstoffen, welche im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) verabschiedet wurden, ratifiziert. Das Bundesamt für Umwelt beteiligt sich aktiv in verschiedenen CLRTAP-Gremien. Die DEZA unterstützt in Partnerländern innovative Massnahmenpakete zur Verbesserung der Luftqualität. Mit den neu empfohlenen IGW wird die internationale Zusammenarbeit in der Luftreinhaltung noch weiter an Bedeutung gewinnen, da der relative Anteil der grossräumigen «Hintergrundbelastungen» bei den tiefen Belastungen wichtiger wird. Insbesondere grenznahe Gebiete hängen auch von der Luftreinhaltungspolitik der umliegenden Länder ab (z. B. durch Luftverfrachtungen oder den Beitrag der Fahrzeugflotte der Grenzgänger).

Auch in den Nachbarländern hat sich die Luftqualität stetig verbessert. Im Vergleich zur Schweiz verläuft die Abnahme der Luftverschmutzung in den Ballungszentren der umliegenden Länder jedoch verzögert. Dies ist auch dadurch bedingt, dass sich die EU-Richtlinie 2008/50EG (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2008) im Gegensatz zur Schweizer LRV insbesondere im Bereich des Feinstaubes nicht direkt an den in den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005 hergeleiteten Gesundheitsschutzzielen orientiert. So sind die Feinstaubgrenzwerte in der EU zwei bis dreimal höher angesetzt als die Richtwerte der WHO 2005 respektive die IGW der Schweiz.

Die EKL hat am 26. Oktober 2022 mit Interesse die von der EU Kommission vorgeschlagene Senkung der Grenzwerte zur Kenntnis genommen (Europäische Kommission, 2022; European Parliament, 2022). Zu begrüßen ist der Vorschlag der EU Kommission, dass Europa im EU Green Deal bis 2050 schadstofffrei werden soll (Europäische Kommission, 2019; European Commission, 2021). Ausserdem legt die NEC-Richtlinie (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2016) erhebliche Reduktionsverpflichtungen für die Mitgliedstaaten bis 2030 und darüber hinaus fest. Die Schadstoffbelastung in den Nachbarstaaten und damit auch der grenzüberschreitende Schadstofftransport in die Schweiz dürfte somit mittel- und langfristig merklich abnehmen. Dies wird insbesondere auch das Tessin und andere grenznahe Regionen wie Genf und Basel entlasten.

Falls der derzeit vorliegende Vorschlag der EU-Kommission für die neue Luftqualitätsrichtlinie angenommen wird, wird die EU jedoch lediglich die WHO-Richtwerte von 2005 als neue Grenzwerte übernehmen. Somit würde das Regelwerk der EU auch in Zukunft den Forderungen des Gesundheitsschutzes nicht die genügende Priorität zukommen lassen. Die Schweizer Luftreinhaltungspolitik würde mit den von der EKL vorgeschlagenen neuen Grenzwerten folglich – wie in der Vergangenheit – weiterhin von den regulatorischen Vorgaben der EU abweichen. Um die langsamere Gangart der europäischen Luftreinhaltungspolitik einzuordnen, sei auf einen wichtigen regulatorischen Unterschied zwischen der EU und der Schweiz hingewiesen. Im Gegensatz zur Schweiz legt die EU nicht nur Grenzwerte fest, sondern definiert Fristen, innert derer diese Ziele erreicht werden müssen; andernfalls drohen den Mitgliedsstaaten Sanktionen. Zudem liegen die Belastungen in einigen Ländern der EU noch immer deutlich höher als in der Schweiz. Diese Umstände tragen dazu bei, dass Grenzwerte nicht nur gesundheitswissenschaftlich abgestützt, sondern von politischen Kompromissen beim Gesundheitsschutz und der Formulierung weniger ambitionierter «Zwischenziele» bestimmt werden.

Die Schweizer Luftreinhaltung kennt bezüglich der Einhaltung von Immissionsgrenzwerten keine rechtlich verbindlichen Zeitlimiten mit monetären Sanktionen wie die EU. Dies könnte mit ein Grund sein für die Tatsache, dass der Einführung von wissenschaftlich hergeleiteten Grenzwerten, welche den Schutzzielen des USG entsprechen, bisher nie mehrheitsfähige Hindernisse erwachsen. Zudem hat sich das bisher von der Schweiz eingeschlagene Vorgehen als sehr erfolgreich erwiesen. Der EKL-Vorschlag

verpflichtet sich dem USG und den darin festgelegten Prinzipien und Schutzziele der erfolgreichen Schweizer Umweltpolitik.

Die LRV regelt nicht die Innenraumbelastung

Angesichts der Verbesserung der Luftqualität tritt vermehrt die Frage der Rolle der Innenraumbelastung in den Vordergrund, da sich die Bevölkerung durchschnittlich ca. 90% der Zeit in Innenräumen aufhält. Die von der WHO hergeleiteten Richtwerte basieren auf der wissenschaftlichen Literatur zu den Folgen der Schadstoffbelastung der Aussenluft. Eine umfassende Literatur bestätigt jedoch auch eine hohe Korrelation zwischen der Schadstoffkonzentration, die im Innenraum aus der Aussenluft stammt, und den in den Studien verwendeten Konzentrationen in der Aussenluft. Zusätzliche Belastungen aus wichtigen Innenraumquellen wie zum Beispiel dem Tabakrauch oder Gasherden werden in den Studien zu den Auswirkungen der Aussenluft berücksichtigt. Die Erkenntnisse zu den Wirkungen der Aussenluft werden somit kaum durch Innenraumschadstoffe verfälscht. Die von der WHO definierten Richtwerte für die Aussenluftqualität könnten für diese Schadstoffe im Prinzip auch für die Raumluft geltend gemacht werden.

Allerdings resultiert die Qualität der Raumluft nicht nur aus den Einträgen aus der Aussenluft, sondern auch aus wichtigen und teilweise grösseren Beiträgen derselben (und anderer) Schadstoffe aus Raumluftquellen. Rauchen, Kochen, Braten, Holzfeuerungen und Kerzenbrand sind wichtige Quellen, welche die Qualität der Raumluft stark beeinflussen. Der Anwendungsbereich des USG und folglich auch der Grenzwerte der LRV beschränkt sich auf die Aussenluft. Zwar gibt es gesetzliche Vorgaben zur Raumluft an Arbeitsplätzen und Grenzwerte für die Emission von Schadstoffen aus Baumaterialien im Innenraum (z. B. Formaldehyd). Zudem darf in öffentlichen Innenräumen nicht mehr geraucht werden. Wie auch in einem früheren EKL-Bericht erwähnt (EKL, 2010), ist das Bundesamt für Gesundheit gemäss Artikel 29 des Bundesgesetzes über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikaliengesetz, ChemG, Stand am 1. Januar 2017, SR 813.1) beauftragt, die Bevölkerung über Schadstoffe im Innenraum zu informieren. Insgesamt sind in der Schweiz Vorschriften zu Luftschadstoffemissionen im privaten Innenraum lückenhaft und auf verschiedene Erlasse des Bundes oder der Kantone verteilt.

Die Erfahrungen mit der Corona-Pandemie haben die Diskussion zur rechtlichen Erfassung der Raumluftqualität neu belebt. So würde eine pandemietaugliche Innenraumbelüftung nicht nur die Virenlast, sondern – je nach gewählter Technologie – auch die Belastung mit den in der LRV regulierten Schadstoffen aus Innen- und Aussenluftquellen reduzieren können. Die Suche nach mach- und wünschbaren sowie gesundheitlich wirksamen Lösungen erfordert einerseits umfassende multidisziplinäre Forschungsanstrengungen, andererseits müssten die Optionen für rechtliche Bestimmungen zur Raumluft umfassend analysiert und beurteilt werden.

15.3 Folgen der neuen WHO-Methode zur Herleitung von Richtwerten

Unterschiedliche Anpassungen

Die revidierten WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 und die darauf beruhenden Empfehlungen der EKL lassen unterschiedlich starke Anpassungen der Richtwerte erkennen. So wurde beispielsweise der Richtwert für PM_{2.5} halbiert; jener für NO₂ liegt viermal tiefer als in den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2005, bzw. dreimal tiefer als der bisherige IGW in der LRV. Diese Unterschiede lassen sich nicht mit Unterschieden in den gesundheitlichen Folgen oder deren Gewichtung erklären. Sie sind einzig das Resultat der aktualisierten Methodik zur Herleitung von Richtwerten. So wurden in den letzten Jahren sehr grosse Langzeitstudien publiziert, deren Teilnehmer und Teilnehmerinnen zu Hause an der Wohnadresse tiefen NO₂-Belastungen ausgesetzt waren. Da – wie beim Feinstaub – bereits ab den tiefsten beobachteten Konzentrationen eine stete Zunahme der gesundheitlichen Folgen sichtbar wurde – ohne Hinweise

auf unschädliche Schwellenwerte – wurden die Richtwerte entsprechend tief angesetzt. Demgegenüber sind die PM_{2.5}-Belastungsunterschiede zwischen älteren und neueren Studien geringer, weshalb der neue Richtwert nur halbiert wurde.

Die Kausalität der direkten Auswirkungen einzelner Schadstoffe gilt nicht für alle bisher untersuchten gesundheitlichen Folgen in gleichem Mass als nachgewiesen. Aus Sicht des für die Herleitung von WHO-Richtwerten respektive LRV-IGW zentralen Anliegens des Gesundheitsschutzes genügt es jedoch gemäss USG, wenn ein Kausalzusammenhang für mindestens eine Auswirkung nachgewiesen ist. So gilt beispielsweise als nachgewiesen, dass Stickstoffdioxid eine Zunahme der Asthmasymptome und Notfallkonsultationen verursacht.

Bedeutung der statistischen Herleitung der Kurzzeitgrenzwerte

In den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 ist die WHO bei der Festlegung der Kurzzeit-Richtwerte neue methodische Wege gegangen. Zuerst wurden die Langzeitwerte gesundheitswissenschaftlich hergeleitet. Die Kurzzeitwerte für PM₁₀, PM_{2.5} und NO₂ wurden im zweiten Schritt nach statistischen Grundprinzipien aus den Langzeitwerten berechnet. Tagesrichtwerte sind statistisch definierte Werte, die höchstens wenige Male pro Jahr überschritten werden dürfen. Die neue WHO-Luftqualitätsleitlinien-Methodik strebt an, dass bei Einhaltung der Tageswert-Regeln – d.h. beispielsweise höchstens drei Überschreitungen des Tageswertes pro Jahr – auch die Vorgaben für den Jahresmittelwert erfüllt werden (und umgekehrt).

Regulatorische Inkonsistenz zwischen Tages- und Jahresmittelwerten kann unerwünschte Auswirkungen auf die Luftreinhaltepolitik haben. Problematisch wären insbesondere Langzeitwerte, die weniger streng sind als die Tageswerte, womit die Überschreitung letzterer gehäuft vorkommen könnte trotz Einhaltung der Jahres-IGW. Dies könnte dazu führen, Massnahmen zu fördern, welche auf Überschreitungen von Tagesspitzen ausgerichtet sind. Aus Sicht des Gesundheitsschutzes sollte die Luftreinhaltepolitik jedoch prioritär auf die langfristige Reduktion der Belastung und Einhaltung der Langzeitgrenzwerte – und somit der Jahresmittelwerte – ausgerichtet sein. «Notfallmassnahmen» zur Limitierung einiger Überschreitungen von sogenannten «Spitzenwerten» können zwar Politik und Bevölkerung für die Problematik der Luftverschmutzung sensibilisieren. Ihr gesundheitlicher Nutzen ist jedoch im Vergleich zu jenem von Massnahmen mit Langzeitwirkung gering. Da Tagesmittelwerte sehr stark von Wetterbedingungen abhängen, ist der Einfluss von Kurzzeitmassnahmen auf die Belastungen zudem unsicher und meist marginal. Die neuen WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 wollen solche Fehlanreize mittels statistischen Abgleichs zwischen Langzeit- und Kurzzeitrichtwerten vermeiden.

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die statistische Herleitung der Tagesmittelwerte nur den durchschnittlichen Zusammenhang zwischen Jahres- und Tagesmittelwerten abbilden kann. Zwar beruht der statistische Zusammenhang auf sehr grossen internationalen Datensätzen. De facto bestehen aber regionale und lokale Unterschiede im statistischen Zusammenhang zwischen Jahresmittelwert und der Anzahl Überschreitungen der Tagesmittelwerte. Eine detaillierte Analyse der NABEL-Daten zeigt, dass auch in der Schweiz an allen Standorttypen eine hohe Korrelation besteht zwischen der Einhaltung der IGW für das Tages- und das Jahresmittel. Wie in den Anhängen C.2, C.3 und F.2 gezeigt, gilt dies insbesondere auch für die neu vorgeschlagenen IGW. Somit kann man davon ausgehen, dass bei Einhaltung des Tages-IGW auch der Jahresmittelwert eingehalten wird und umgekehrt. Tendenziell scheint für Schweizer Verhältnisse der Tages-IGW allenfalls geringfügig strenger zu sein, so dass trotz Einhaltung des Jahres-IGW an geringfügig mehr als 3 Tagen die Konzentration über dem Kurzzeit-IGW liegen könnte. Diese potenziellen Abweichungen sind weder für den Vollzug noch den Gesundheitsschutz relevant.

15.4 Von der WHO abweichende Vorschläge und Streichung von Grenzwerten

Bei den Ozon- und SO₂-Grenzwerten weicht die EKL mit ihren Empfehlungen von den WHO-Empfehlungen ab und für SO₂ und NO₂ schlägt sie die Streichung von bestehenden Grenzwerten vor. Die Gründe sollen hier nochmals kurz erläutert werden.

Ozon

Bisher reguliert die LRV die Kurzzeitbelastungen mit einem Stundenmittelwert sowie dem auf die Spitzenbelastungen ausgerichteten 98. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Monats. Die EKL sieht keinen Anlass, von den jetzigen Immissionsgrenzwerten der LRV abzuweichen. Die verschiedenen Kurzzeitparameter sind statistisch in hohem Masse korreliert und die von der WHO vorgeschlagenen respektive in der LRV festgelegten Werte sind gleichwertig (siehe Anhang E). Es ist somit davon auszugehen, dass mit Einhaltung der LRV-Grenzwerte auch die Richtwerte der WHO eingehalten werden. Die Beibehaltung des LRV-Regelwerkes bringt für die Schweizer Behörden den grossen Vorteil, dass die Daten auch weiterhin vergleichbar bleiben, somit auch Trends verlässlich verfolgt werden können und darauf basierende Massnahmenpläne nicht angepasst werden müssen.

Die WHO-Luftqualitätsleitlinien spezifizieren beim neuen Richtwert für die Sommersaison keinen fixen Zeitraum, sondern legen lediglich einen Richtwert für die stärkst belasteten 6 Monate fest, was den wärmeren Sommermonaten entspricht, da besonders hohe und lang andauernde Ozonbelastungen typischerweise im Sommer auftreten. An gewissen hochgelegenen Standorten der Schweiz kann der Ozonwert für März bis August höher sein als in den Sommermonaten April bis September. Im Interesse der Einheitlichkeit und Einfachheit hat sich die EKL dafür entschieden, für die Schweiz einen auf April bis September fokussierten Grenzwert vorzuschlagen. Dies wird weder die Luftreinhaltepolitik noch die gesundheitlichen Folgen beeinflussen.

NO₂

Mit Einführung des deutlich strengeren Tagesmittelwertes wird der bisherige Kurzzeitgrenzwert zur Kontrolle von Spitzenbelastungen (95. Perzentilwert der ½-h-Mittelwerte eines Jahres) überflüssig. Bei Einhaltung der neu empfohlenen IGW wird auch dieser Spitzenbelastungswert eingehalten.

SO₂

Während die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 keinen Jahresmittel-Richtwert nennen, ist in der Schweiz bisher ein Jahresmittel-IGW von 30 µg/m³ festgelegt. Die EKL schlägt für die Schweiz einen Jahres- und Halbjahresmittelwert von 20 µg/m³ vor. Dies entspricht den im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung festgelegten kritischen Belastungswerten (Critical Levels) zum Schutz naturnaher Ökosysteme (UNECE, 2017). Im Gegensatz zu den WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 müssen die Schweizer IGW gemäss USG auch die Natur vor schädigenden Einflüssen schützen. Mit den neu empfohlenen tieferen Grenzwerten erübrigt sich der 95. Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte eines Jahres. Dieser wird seit über 20 Jahren an allen NABEL-Standorten eingehalten.

15.5 Wissenslücken

Die wissenschaftliche Basis für die vorgeschlagene Anpassung der IGW ist sehr umfassend und konsistent. Die Diskussionen in der EKL haben aber auch Forschungsbedarf für die kommenden Jahre identifiziert. Die wichtigsten Punkte werden hier kurz zusammengefasst:

- Der Stand des Wissens zu Kombinationswirkungen von mehreren Schadstoffen sollte in einigen Jahren neu beurteilt werden. Zwar ist kaum zu erwarten, dass dies Anpassungen von IGW erforderlich machen würde. Kombinationswirkungen könnten jedoch die

Prioritäten bei den Luftreinhaltemassnahmen beeinflussen. Beispielsweise gibt es Anzeichen, wonach die Wirkungen von Feinstaub durch hohe Ozonbelastung verstärkt werden. Die Reduktion der Ozonbelastungen wäre dann auch bezüglich der gesundheitlichen Folgen von Feinstaub bedeutsam.

- Die Etablierung internationaler Standards für die Messung von UFP respektive der Partikelanzahl sollte auch durch die Schweizer Behörden gefördert werden, da dies eine Bedingung für die allfällige Einführung von IGW ist. UFP schädigen die Gesundheit und könnten somit aufgrund des USG reguliert werden. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf. Die EKL wird sich in den kommenden Jahren erneut mit der Regulierung der UFP auseinandersetzen.
- Die Frage der gesundheitlichen Relevanz spezifischer Charakteristika oder Quellen der Schadstoffe sollten wissenschaftlich weiter geklärt werden. Beispiele dafür sind das oxidative Potenzial von Feinstäuben oder Feinstäube aus dem Bremsabrieb. Dabei sollten sowohl die gesundheitlichen Wirkungen als auch die Zielführung allfälliger Massnahmen beurteilt werden.
- Die weitere Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Bestimmung des Beitrags spezifischer Emissionsquellen zur Feinstaubbelastung ist nötig angesichts der grossen Herausforderung, diese weiter zu senken. Solche Untersuchungen sind anspruchsvoll und sollen gezielt durchgeführt werden, um die Behörden bei der Förderung und Priorisierung von wirksamen und kosteneffizienten Massnahmen zu unterstützen.
- Forschung zu den Kosten und dem lufthygienischen und gesundheitlichen Nutzen von Luftreinhaltemassnahmen ist zu unterstützen. Sie soll dazu beitragen, die neu vorgeschlagenen IGW möglichst wirtschaftlich und nachhaltig zu erreichen.

16 Schlussfolgerung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aufgrund der Vorgaben des Umweltschutzgesetzes die derzeitigen LRV-Immissionsgrenzwerte an die neuen Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 anzupassen sind, um auch weiterhin dem Gesundheitsschutz nach neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen Rechnung zu tragen. Die Einhaltung der neu vorgeschlagenen IGW erfordert eine weitere Abnahme der Emissionen und somit die konsequente, rasche Umsetzung von Luftreinhaltemassnahmen. Die überaus erfolgreiche Tradition der Schweizer Luftreinhaltepolitik, welche sich durch konstruktive und zielorientierte Zusammenarbeit von lokalen, kantonalen und nationalen Behörden mit Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft auszeichnet, stimmt uns zuversichtlich, dass die vorgeschlagenen neuen Immissionsgrenzwerte mittelfristig eingehalten werden können. Der Vollzug soll weiterhin die lokalen und regionalen Besonderheiten beachten und insbesondere auch bisher verzögerten Massnahmenbereichen (z. B. der Landwirtschaft) und an Bedeutung zunehmenden Quellen (z. B. Holzfeuerungen) die nötige Priorität geben und die Synergien zwischen Luftreinhaltung und Klimapolitik vollumfänglich ausschöpfen. Der engen internationalen Zusammenarbeit – insbesondere auch mit den Nachbarländern – kommt weiterhin grosse Bedeutung zu.

Anhang

Anhang A – WHO Luftqualitätsleitlinien 2021

A.1 Methodik zur Herleitung der neuen Luftqualitätsleitlinien und untersuchte Gesundheitseffekte

Die Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 wurden in folgenden Schritten erarbeitet:

- Bestimmung des Geltungsbereichs der Leitlinien und Formulierung der Fragen für die systematischen Übersichtsarbeiten
- Systematische Übersichten zur Evidenz und Meta-Analysen quantitativer Effektschätzer als Grundlage für die Aktualisierung der Luftqualitätsrichtwerte
- Bewertung der Qualität der Evidenz, die sich aus den systematischen Übersichtsarbeiten für die Schadstoffe ergibt
- Ermittlung der Richtwerte, d.h. der niedrigsten Belastung, die nachweislich mit negativen gesundheitlichen Auswirkungen einhergeht

Zentral waren das Festlegen der zu beurteilenden Luftschadstoffe und Gesundheitsfolgen für die in Auftrag gegebenen systematischen Übersichtsarbeiten. Diese sollten Auskunft geben über die Grösse des Effekts und die Art der Belastungs-Wirkungsbeziehungen, und damit über mögliche Schwellenwerte und Art der Risikozunahme bei steigender Belastung (z. B. linear). In einem weiteren Schritt musste auch die wissenschaftliche Güte der zur Verfügung stehenden Studien beurteilt werden. Dabei konnten sich die Forscherinnen und Forscher nicht nur auf verbesserte Methoden zur Belastungsmessung und -abschätzung abstützen, sondern auch auf eine wachsende Zahl an Studien zurückgreifen, welche die Gesundheitsfolgen bei mittlerweile tiefen Belastungen in Europa und Nordamerika untersuchten.

Das wissenschaftliche Expertenpanel der Guideline Development Group beurteilte auf Basis der Ergebnisse der Übersichtsarbeiten die Evidenz der untersuchten Zusammenhänge und leitete nach einem eigens entwickelten, transparenten Verfahren die Richtwerte her. Ausschlaggebend für Langzeitwerte (empfohlene Jahresmittelwerte) war bei ausreichender Evidenzlage die tiefste Belastung in Studien, bei denen schädliche Gesundheitsfolgen beobachtet wurden. Für die Festlegung von Kurzzeit-Richtwerten (z. B. Tagesmittel) wurde bei Hinweisen auf fehlende Schwellenwerte eine statistische Grösse in einem bestimmten Verhältnis zum Langzeitwert gewählt oder Werte, welche Höchstbelastungen in Kurzzeitstudien entsprachen, die insgesamt nur drei bis vier Mal im Jahr überschritten werden sollten.

Tabelle 11 zeigt Tiefbelastungsstudien, welche für die Festlegung des PM_{2.5}-Langzeitgrenzwertes herangezogen wurden. Es wurde der Durchschnitt der fünf tiefsten 5. Perzentilwerte aus Studien, welche Auswirkungen auf die Sterblichkeit bei tiefen Belastungen zeigten, errechnet. Die fünften Perzentile der Belastung aus den Studien von Pinault et al. (2016), Cakmak et al. (2018), Pinault et al. (2017), Di et al. (2017) und Hart et al. (2015) ergaben einen Wert von 4,9 µg/m³. Dieser Wert wurde auf 5 µg/m³ gerundet und als Richtwert gesetzt. Da die Studien von Weichenthal et al. (2014) kein und jene von Parker et al. (2018) kein signifikant erhöhtes Sterberisiko zeigten, sowie die Studie von Villeneuve et al. (2015) unterhalb von 8 µg/m³ kein erhöhtes Risiko zeigte, wurden sie nicht in die Berechnung einbezogen (vgl. WHO, 2021, Seite 76 Step 2).

Tabelle 11: Tiefbelastungsstudien, welche Eingang in die WHO-Metaanalyse von Chen and Hoek (2020) zur Sterblichkeit in Zusammenhang mit der Langzeitbelastung mit PM2.5 gefunden haben (WHO, 2021). Geordnet nach der medianen Belastung.

HR= Hazard Risk, Effektschätzer, 95 %-CI= 95 %-Vertrauensintervall.

Studie	Durchschnitt / Median [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Standardabweichung	5. Perzentil	25. Perzentil	HR (95 %-CI) pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pinault et al. (2016)	5,9	–	3,0	4,2	1,26 (1,19–1,34)
Cakmak et al. (2018)	6,5	2,0	3,2	–	1,16 (1,08–1,25)
Pinault et al. (2017)	7,1	–	3,5	5,4	1,18 (1,15–1,21)
Weichenthal et al. (2014)	9,5	1,7	6,7	–	0,95 (0,76–1,19)
Villeneuve et al. (2015)	9,5	3,5	4,8	–	1,12 (1,05–1,20)
Di et al. (2017)	11,5	2,9	7,1	9,5	1,08 (1,08–1,09)
Parker et al. (2018)	11,8	–	–	10,1	1,03 (0,99–1,08)
Bowe et al. (2018)	11,8	–	7,9	10,2	1,08 (1,03–1,13)
Hart et al. (2015)	12,0	2,8	7,8	10,2	1,13 (1,05–1,22)

A.2 WHO-Übersichten zu Gesundheitseffekten

Die WHO hat sich entschieden, die «klassischen» Schadstoffe Feinstaub PM10 und PM2.5, Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon, Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlenmonoxid zu untersuchen und sich auf gewichtige gesundheitliche Zielgrössen zu beschränken. Für Langzeiteffekte wurden Zusammenhänge mit der Sterblichkeit untersucht. Für Folgen kurzfristig erhöhter Belastungen wurden zusätzlich zur Sterblichkeit auch das Herzinfarktrisiko in Zusammenhang mit Kohlenmonoxid und Notfallkonsultationen wegen Asthma mit NO_2 , SO_2 und Ozon analysiert.

Neue epidemiologische Studien zeigen Gesundheitswirkungen in einem grösseren Spektrum der Belastung. Studien aus Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen haben Belege für negative gesundheitliche Auswirkungen bei sehr hoher Luftbelastung geliefert, während Studien in Ländern mit hohem Einkommen und mittlerweile verbesserter Luftqualität auch bei vergleichsweise geringer Belastung noch negative Auswirkungen erkennen liessen.

Die Ergebnisse für die Langzeitbelastung mit Feinstaub PM2.5 und PM10 (Chen & Hoek, 2020), NO_2 und Ozon (Huangfu & Atkinson, 2020) während der Sommermonate (peak season) sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Evidenz für den Zusammenhang verschiedener Sterbeursachen mit der PM2.5-Belastung wird als durchwegs hoch bewertet, ausser für die Sterblichkeit an Atemwegserkrankungen, für welche jedoch die Evidenz für einen Zusammenhang mit PM10 als hoch bewertet wird. Eine Belastungszunahme von 10 μg PM2.5/ m^3 ist gemäss Metaanalysen mit einem erhöhten Sterberisiko von 8–16% (je nach Krankheit bzw. Sterbeursache) verbunden.

Für den Zusammenhang von NO_2 mit der Gesamtsterblichkeit und der Sterblichkeit an (verschiedenen) Atemwegserkrankungen werden Risikoerhöhungen von 2–6% pro langfristigem Belastungsunterschied von 10 μg NO_2 / m^3 berechnet. Die Evidenz wird als moderat bezeichnet. Diese Einschätzung wird auf die stark variierenden Effektschätzer (Risiken) in den einzelnen Studien zurückgeführt, welche zu einer

Herabsetzung der Evidenzgüte geführt haben. Als Ursache für die unterschiedlichen Effektschätzer werden Unterschiede in der Belastungsabschätzung diskutiert. So verwenden einige Studien z. B. ungenauere Monitormessungen, während andere über viel präzisere Belastungsabschätzungen an der Wohnadresse verfügen.

Erstmals wurde ein Zusammenhang für Sterblichkeit mit der langfristig erhöhten Ozonbelastung in den Sommermonaten beschrieben bei moderater Evidenz, da unter anderem erst wenige Studien vorliegen.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Sterberisiken bei langfristig erhöhter Luftbelastung mit Belastungsunterschied 10 µg/m³ von PM10, PM2.5 (Chen & Hoek, 2020), NO₂ und Belastung mit Ozon in den Sommermonaten (Huangfu & Atkinson, 2020).

Sterblichkeit Zunahme in %	PM2.5 [pro 10 µg/m³]	PM10 [pro 10 µg/m³]	NO₂ [pro 10 µg/m³]	Ozon^a (peak season) [pro 10 µg/m³]
Krankheitsbedingte Sterblichkeit	8 (6 bis 9) % 25 Studien	4 (3 bis 6) % 17 Studien	2 (1 bis 4) % 24 ^b Studien	1 (0 bis 2) % 7 Studien
Sterblichkeit an Herz-Kreislauf-Erkrankungen	11 (9 bis 14) % 21 Studien	4 (-1 bis 10) % 15 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Sterblichkeit an ischämischen Herzkrankheiten (z. B. Herzinfarkt)	16 (10 bis 21) % 22 Studien	6 (1 bis 10) % 13 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Sterblichkeit an Hirnschlag	11 (4 bis 18) % 16 Studien	1 (-17 bis 21) % 9 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Sterblichkeit an Atemwegserkrankungen	10 (3 bis 18) % 17 Studien	12 (6 bis 19) % 13 Studien	3 (1 bis 5) % 15 Studien	2 (-1 bis 5) % 4 Studien
Sterblichkeit an COPD	11 (5 bis 17) % 11 Studien	19 (-5 bis 49) % 5 Studien	3 (1 bis 4) % 9 Studien	Nicht untersucht
Sterblichkeit an Entzündungen der unteren Atemwege (z. B. Lungenentzündung)	16 (1 bis 34) % 4 Studien	Nicht untersucht	6 (2 bis 10) % 5 Studien	Nicht untersucht
Sterblichkeit an Lungenkrebs	12 (7 bis 16) % 15 Studien	8 (4 bis 13) % 13 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht

Risikoschätzer (95 %-Konfidenzintervall), Anzahl Studien, welche in die Bewertung eingeflossen sind und Evidenzniveau (**fett**=hoch, normal=moderat, *kursiv*=tief, rot=statistisch nicht signifikant erhöhte Effektschätzer).

^a Nicht dargestellt: zusätzlich wurde der Zusammenhang mit dem Jahresmittelwert der Ozonbelastung für die Gesamtsterblichkeit und die Sterblichkeit an Atemwegserkrankungen untersucht. Es wurde kein Zusammenhang gefunden (Relatives Risiko RR 0,97 mit 95 %-Vertrauensintervall 0,93 bis 1,02, (9 Studien) und RR 0,99 mit 95 %-Vertrauensintervall 0,89 bis 1,11, (4 Studien). Die Evidenz eines Kausalzusammenhanges wird als «tief» beurteilt.

^b Es sind dies 23 Publikationen, wobei eine Studie die Effektschätzer für 2 verschiedene Kohorten angab.

Lesebeispiel: Krankheitsbedingte Sterblichkeit PM2.5: Eine langfristige Belastungserhöhung von 10 µg/m³ war mit einem erhöhten Sterberisiko von 8 % (Vertrauensintervall 6–9 %, d.h. der tatsächliche Schätzer könnte zwischen 6 und 9% liegen) verbunden. In die Analyse flossen 25 Studien ein und die Qualität der Studien und somit die Evidenz für den Zusammenhang wurde als hoch eingeschätzt.

COPD-Sterblichkeit mit PM10: Eine langfristige Belastungserhöhung von 10 µg/m³ war mit einem (nicht signifikant) erhöhten Sterberisiko an COPD von 19 % (Vertrauensintervall minus 5 bis plus 49 %) verbunden. In die Analyse flossen 5 Studien ein und die Qualität der Studien und somit die Evidenz für den Zusammenhang wurde als moderat eingeschätzt.

Tabelle 13 und Tabelle 14 fassen die Ergebnisse der Übersichtsarbeiten zu den Folgen kurzfristig erhöhter Luftschadstoffbelastungen zusammen (Orellano et al., 2021; Orellano et al., 2020; Zheng et al., 2021)

Tabelle 13: Zusammenfassung der summierten Effektschätzer für Sterberisiken bei kurzfristig (Tage, Wochen) erhöhter Luftbelastung mit Belastungsunterschied 10 µg/m³ der PM10, PM2.5, NO₂ und Belastung mit Ozon in den Sommermonaten und SO₂.

Sterblichkeit	PM2.5 24-h	PM10 24-h	NO₂^a 24 h	Ozon 8 / 24 h	SO₂^b 24-h
Krankheitsbedingt bzw. alle Ursachen	0,65 (0,44 bis 0,86) % 29 Studien	0,41 (0,34 bis 0,49) % 66 Studien	0,72 (0,59 bis 0,85) % 54 Studien	0,43 (0,34 bis 0,52) % 48 Studien	0,59 (0,46 bis 0,71) % 36 Studien
Herz-Kreislauf- Erkrankungen	0,92 (0,61 bis 1,23) % 28 Studien	0,60 (0,44 bis 0,77) % 44 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Hirnschlag	0,72 (0,12 bis 1,32) % 7 Studien	0,44 (0,22 bis 0,66) % 20 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Atemwegs- erkrankungen	0,73 (0,29 bis 1,16) % 20 Studien	0,91 (0,63 bis 1,19) % 41 Studien	Nicht untersucht	Nicht untersucht	0,67 (0,25 bis 1,09) % 23 Studien

Risikoschätzer (95 %-Konfidenzintervall), Anzahl Studien, welche in die Bewertung eingeflossen sind und Evidenzniveau (fett=hoch, normal=moderat).

^a Orellano et al. (2020), alle Zusammenhänge wurden mit hoher Evidenz beurteilt; nicht dargestellt: zusätzlich wurde der Zusammenhang der sehr kurzfristigen Belastungen von NO₂ 1-h max (höchster 1-Stundenwert eines Tages) für Gesamtsterblichkeit mit moderater Evidenz beurteilt: 10 Studien, 0,24 (–0,05 bis 0,53).

^b nicht dargestellt: Zusammenhang der kurzfristigen Belastung von SO₂-1h-Maximum mit der Gesamtsterblichkeit: niedrige Evidenz, 4 Studien, 0,16 (–0,7 bis 1,02) % pro 10 µg/m³ Zunahme 1-h-Maximum SO₂, und mit der Atemwegssterblichkeit: hohe Evidenz, 3 Studien, 0,52 (0,13 bis 0,91) % pro 10 µg/m³ Zunahme 1-h-Maximum SO₂ (Orellano et al., 2021).

Tabelle 14: Zusammenfassung der summierten Effektschätzer für erhöhte Morbidität in Abhängigkeit kurzfristig erhöhter Luftbelastung mit Belastungsunterschied $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der NO_2 -, Ozon- und SO_2 -Belastung (Zheng et al., 2021), sowie der CO-Belastung pro $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Lee et al., 2020).

Gesundheitsfolge	PM 10 / PM2.5	NO_2 (24-h)	Ozon (8 / 24-h) ^a	SO_2 (24-h)*	CO [mg/m^3]
Spitaleintritte und Notfallkonsultationen Asthma	Nicht untersucht	1,4 (0,8 bis 1,2) % 22 Studien	0,8 (0,5 bis 1,1) % 27 Studien	1,0 (0,1 bis 2,0) % 23 Studien	Nicht untersucht
Herzinfarkt (alle)	Nicht untersucht	Nicht untersucht	Nicht untersucht	Nicht untersucht	5,2 (1,7 bis 8,9) % 26 Studien

Risikoschätzer (95 %-Konfidenzintervall), Anzahl Studien, welche in die Bewertung eingeflossen sind und Evidenzniveau (fett=hoch, normal=moderat).

^a Nicht dargestellt: Zusammenhang mit der kurzfristige erhöhte Belastung mit dem 1-h-Maximum der Ozonbelastung RR 1,7 % (–2,7 bis 6,3 %, 3 Studien) pro $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dem 1-h-Maximum der NO_2 -Belastung –0,01 % (–4,3 bis 3,3 %, 5 Studien), und dem 1-h-Maximum der SO_2 -Belastung 0,3 % (–0,8 bis 1,4 %; 4 Studien).

Anhang B – Quellen der Luftschadstoffe

Basierend auf Emissionsdaten des BAFU für das Jahr 2021 tragen Haushalte, Verkehr, Industrie, sowie Land- und Forstwirtschaft unterschiedlich zu den Emissionen bei. Bei gewissen Prozessen mit hohen Emissionen sind verschiedene Verursacherkategorien beteiligt, beispielsweise erfolgt die Holzverbrennung sowohl in Haushalten als auch in Industrie und Gewerbe sowie in der Landwirtschaft (BAFU, 2023).

Tabelle 15: Anteil der Emissionen aus den verschiedenen Quellen 2021 gemäss BAFU-Emissionsdatenbank EMIS, Territorial-Aggregation (fett: Hauptverursacherkategorien).

Schadstoff	Verkehr	Haushalte	Industrie und Gewerbe	Land- und Forstwirtschaft	Hauptquellen / -prozesse
Primärer Feinstaub PM10	31 %	16 %	37 %	16 %	Baustellen, Verkehrsabrieb
Primärer Feinstaub PM2.5	24 %	31 %	37 %	8 %	Holzverbrennung
Stickoxide NO_x^{a,b}	56 %	9 %	24 %	10 %	Dieselmotoren
Schwefeldioxid SO₂^b	9 %	15 %	75 %	–	Industrie der Steine und Erden
Kohlenmonoxid CO	43 %	23 %	24 %	10 %	Fahrzeugmotoren
Ammoniak NH₃^b	2 %	2 %	2 %	94 %	Nutztierhaltung
Russ (BC)	23 %	51 %	15 %	11 %	Holzverbrennung, Dieselmotoren
Benzo[a]pyren BaP	12 %	62 %	16 %	10 %	Holzverbrennung
Blei Pb	23 %	55 %	22 %	–	
Cadmium Cd	17 %	39 %	42 %	2 %	Abfallbehandlung
Quecksilber Hg	5 %	20 %	75 %	1 %	Abfallbehandlung

^a trägt als Vorläufergas zur Ozonbildung bei.

^b trägt als Vorläufergas wesentlich zum sekundären Feinstaub PM10 und PM2.5 bei.

Anhang C – Ergänzungen zu PM10 und PM2.5

C.1 Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub PM10 und PM2.5 in der Schweiz

Feinstaub ist ein komplexes Gemisch verschiedenster chemischer Stoffe. Er wird entweder direkt von Quellen emittiert (primärer Feinstaub) oder erst in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufern gebildet (sekundärer Feinstaub). Dementsprechend kann primärer Feinstaub räumlich stark variabel sein, während sekundäre Feinstaubkomponenten räumlich eher homogen verteilt sind.

PM10

PM10 besteht in der Schweiz je ungefähr zur Hälfte aus primärem und sekundärem Feinstaub, deren Anteile variieren etwas je nach Standorttyp. Den grössten Anteil am PM10 haben organische Verbindungen. Sie stammen aus einer Vielzahl von Quellen und sind etwa je zur Hälfte primär und sekundär. Die Konzentration organischer Verbindungen hat in den letzten 20 Jahren abgenommen. Ihr Anteil an der Feinstaubmasse beträgt heute ca. 35–40%.

Wichtige primäre Quellen von organischen Verbindungen sind Holzfeuerungen, Pneubetrieb und Verbrennungsemissionen des Verkehrs (BAFU, 2023). Auch Kochemissionen und pflanzliche Bestandteile werden im PM10 gefunden. Beim sekundären organischen Feinstaub sind die Anteile aus biogenen und anthropogenen Vorläufern etwa gleich gross. Erstere sind vor allem Terpen- und Isopren-Emissionen von Pflanzen, und letztere sind vorwiegend gasförmige Emissionen der Holzfeuerungen und des Verkehrs. Die anorganischen Komponenten Nitrat und Sulfat werden fast ausschliesslich sekundär durch die Oxidation von NO_x bzw. SO_2 gebildet. Durch Reaktion mit Ammoniak entstehen aus diesen verschiedene Salze mit den Hauptbestandteilen Nitrat, Sulfat und Ammonium. Die Summe der anorganischen Stoffe in der Atmosphäre hat in den letzten 20 Jahren abgenommen. Ihr Anteil am PM10 beträgt heute etwa 30%. Geringere Beiträge zum PM10 stammen zum Beispiel von Mineralstaub, Spurenelementen, Russ und Wasser (vgl. Hüglin & Grange, 2021).

Der Verkehr ist nach wie vor eine wichtige Quelle von PM10, wobei motorische Emissionen durch die Verbrennung mittlerweile eine kleinere Rolle spielen als Abrieb und Aufwirbelung. An Orten mit vielen Holzfeuerungen dominieren deren Emissionen im Winter die PM10-Belastung.

PM2.5

Die wichtigsten Quellen für primären Feinstaub PM2.5 in der Schweiz sind der Verkehr und Holzheizungen, die je rund ein Viertel beitragen. Die sekundär gebildeten Feinstaubanteile aus den Vorläufergasen spielen eine noch wichtigere Rolle als beim PM10 und machen mehr als die Hälfte des PM2.5 aus.

Der sekundäre Feinstaub und Russ bestehen überwiegend aus feinen Partikeln und sind daher fast vollständig im PM2.5 enthalten. Den grössten Anteil am PM2.5 haben organische Verbindungen mit ca. 30–50%. Anorganische Verbindungen (Nitrat, Sulfat und Ammonium) tragen ebenfalls etwa ein Drittel zum PM2.5 bei. Mineralstaub und Abriebpartikel aus dem Verkehr und dem Bausektor spielen im PM2.5 eine deutlich kleinere Rolle als im PM10. Geringere Beiträge stammen zum Beispiel von Mineralstaub, Spurenelementen, Russ und Wasser (Daellenbach et al., 2020; Grange et al., 2021).

C.2 PM10: Zusammenhang zwischen der Anzahl Tagesmittelwerte > 45 µg/m³ und den Jahresmittelwerten

Abbildung 27 und Abbildung 28 basieren auf NABEL-Daten und repräsentieren verschiedene Standort-situationen in der Schweiz. Bei mehreren NABEL-Stationen mit gleichem Stationstyp wurden die Mess-werte gemittelt (*Stadt, Verkehr*: Bern-Bollwerk und Lausanne-César-Roux; *Vorstadt*: Basel-Binningen und Dübendorf-Empa, *Land, Nord*: Payerne und Tänikon, *Voralpen*: Chaumont und Rigi-Seebodenalp).

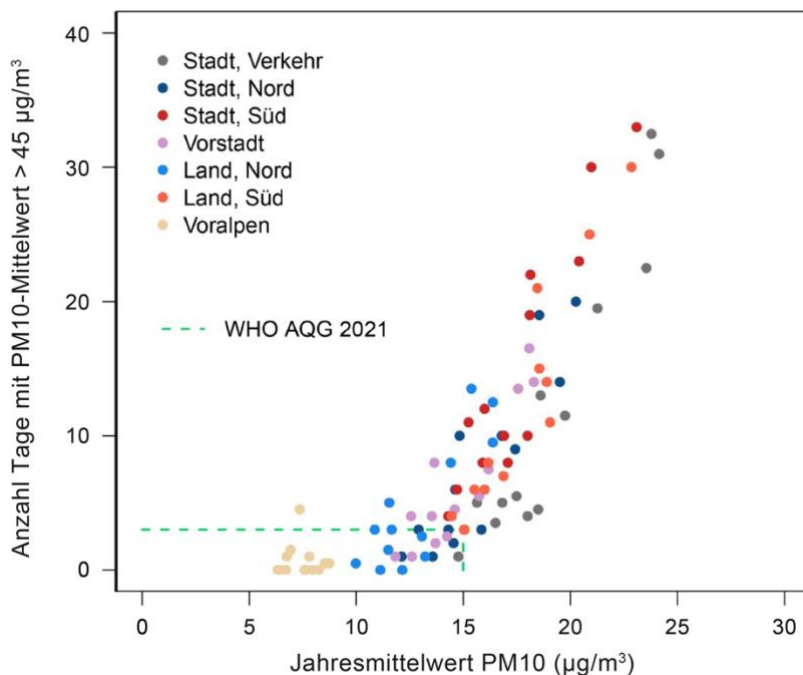


Abbildung 27: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von PM10 und der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden-WHO-Richtwerts von 45 µg/m³ 2010–2022 nach Standorttypen.

Die grün gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des Tagesmittelwerts von 45 µg/m³ und der Jahresmittelwert von 15 µg/m³.

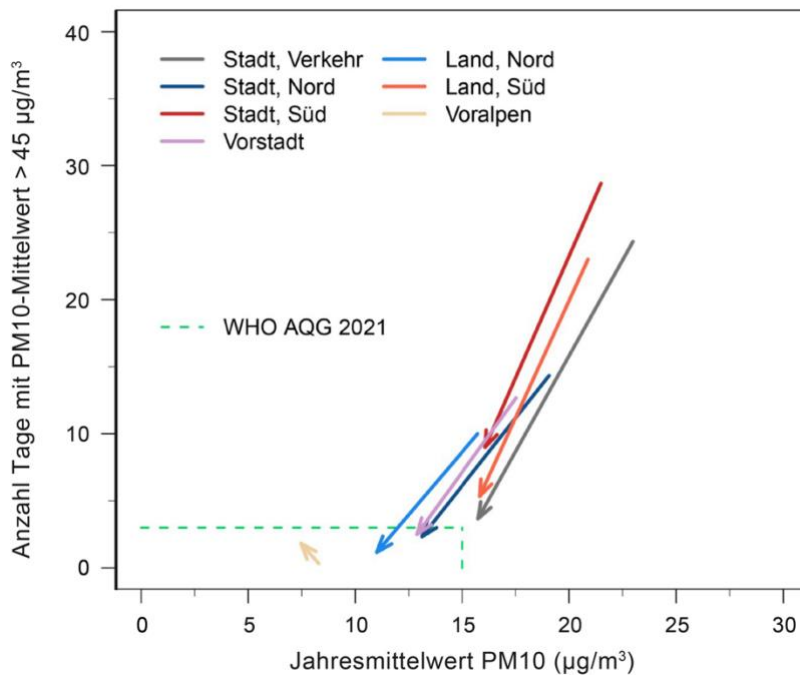


Abbildung 28: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von PM10 und der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden-WHO-Richtwerts von $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2010–2022 nach Standorttypen.

Die Pfeile starten beim Mittelwert 2010–2012 und enden beim Mittelwert 2020–2022. Die grün gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des Tagesmittelwerts von $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Jahresmittelwert von $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Die Punkte in Abbildung 27 sind stark korreliert und die Pfeile in Abbildung 28 zeigen in den Bereich der oberen rechten Ecke der grün gestrichelten Linien. Dies bedeutet, dass bei einer Schadstoffbelastung unterhalb des Jahresmittelrichtwerts meist auch die maximal erlaubte Anzahl an Überschreitungen des Tagesmittelrichtwertes eingehalten wird. Die Einhaltung des Tagesmittelrichtwerts ist etwas schwieriger zu erreichen. Für PM10 ist das Ziel für die Standorttypen Voralpen, Land und Stadt Nord und Vorstadt bereits erreicht. An städtischen und verkehrsbelasteten Standorten sowie auf der Alpensüdseite werden die Richtwerte gemäss WHO noch überschritten. Bei den Überschreitungen des Tagesmittelrichtwerts für PM10 können auch Saharastaub-Ereignisse eine Rolle spielen. Diese lassen sich nicht beeinflussen.

C.3 PM2.5: Zusammenhang zwischen der Anzahl Tagesmittelwerte > 15 µg/m³ und den Jahresmittelwerten

Abbildung 29 und Abbildung 30 basieren auf NABEL-Daten und repräsentieren verschiedene Standort-situationen in der Schweiz. Bei mehreren NABEL-Stationen mit gleichem Stationstyp wurden die Messwerte gemittelt (*Stadt, Verkehr*: Bern-Bollwerk und Lausanne-César-Roux; *Vorstadt*: Basel-Binningen und Dübendorf-Empa, *Land, Nord*: Payerne und Tänikon, *Voralpen*: Chaumont und Rigi-Seebodenalp).

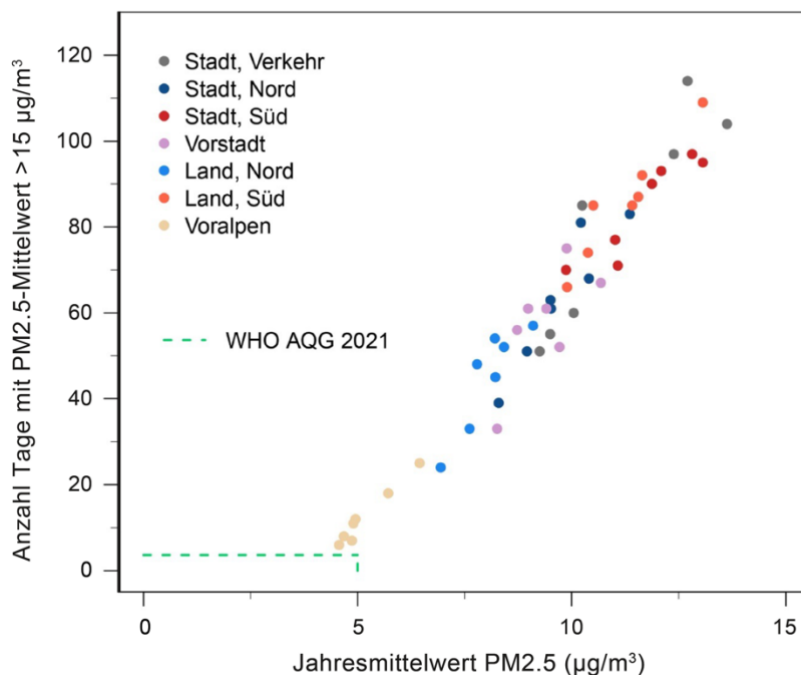


Abbildung 29: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von PM2.5 und der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts von 15 µg/m³ 2016–2022 nach Standorttypen.

Die grün gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des Tagesmittelwerts von 15 µg/m³ und der Jahresmittelwert von 5 µg/m³.

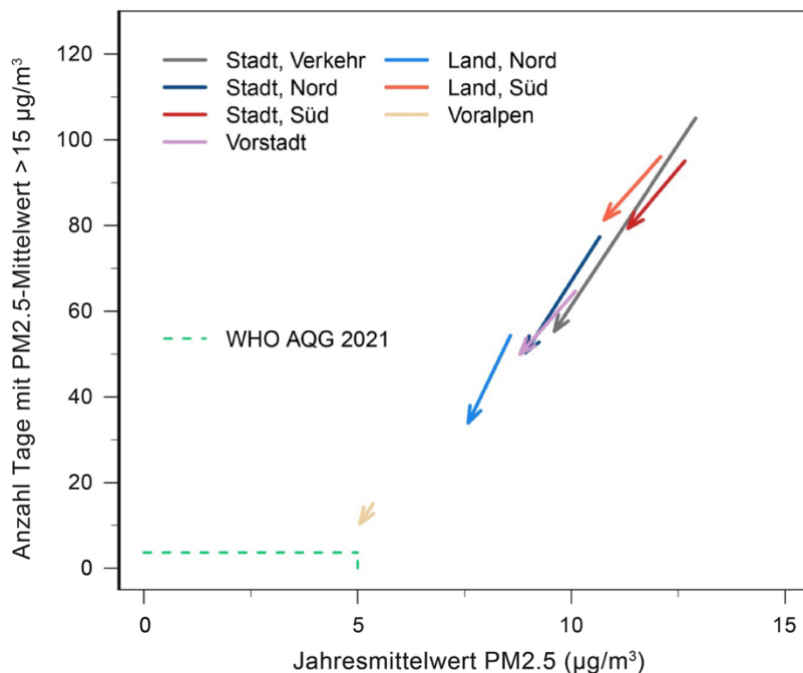


Abbildung 30: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von PM2.5 mit der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts von 15 µg/m³ 2016–2022 nach Standorttypen. Die Pfeile starten beim Mittelwert 2016–2019 und enden beim Mittelwert 2020–2022.

Die grün gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des Tagesmittelwerts von 15 µg/m³ und der Jahresmittelwert von 5 µg/m³.

Die Punkte in Abbildung 29 sind hoch korreliert und die Pfeile in Abbildung 30 zeigen auf die obere rechte Ecke der grün gestrichelten Linien. Dies bedeutet, dass die beiden Kriterien weitgehend gleichwertig sind. Tendenziell scheint der WHO-Richtwert für den Tagesmittelwert, wie beim PM10, etwas strenger als der Richtwert für den Jahresmittelwert. Für PM2.5 werden die Richtwerte der WHO noch deutlich überschritten.

C.4 Messung von PM2.5

Die PM2.5-Messung von Tagesmittelwerten wird vielerorts in Kantonen parallel zu den PM10-Messungen bereits durchgeführt und ausgewertet. Der Mehraufwand ist vertretbar und stellt keine wesentliche messtechnische oder finanzielle Hürde dar. Die Einführung eines PM2.5 Tagesmittelgrenzwerts kann von den Kantonen demnach im Vollzug bei heutigen Belastungsniveaus bereits umgesetzt werden. Bei weiterhin abnehmenden Konzentrationen muss der Qualitätssicherung besondere Beachtung geschenkt werden. Da PM2.5 räumlich recht homogen verteilt ist, sind neben dem NABEL nur wenige zusätzliche PM2.5-Messungen nötig, um die grossräumige Belastung zu beurteilen.

Anhang D – Grenzwerte zum Schutz der Vegetation in naturnahen Ökosystemen

D.1 Ozon (O₃)

Im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung sind zum Schutz der Vegetation vor schädlichen Ozonwirkungen kritische Belastungswerte (Critical Levels) in Form von konzentrationsbasierten AOT40-Werten (Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb) und von ozonflussbasierten POD_Y-Werten (Phytotoxic Ozone Dose) festgelegt worden (UNECE, 2017).

Aus wissenschaftlicher Sicht werden die POD_Y-Werte als biologisch relevanter beurteilt, weil die schädlichen Ozonwirkungen mit dem Ozonfluss in Beziehung gebracht werden, der über die Spaltöffnungen (Stomata) der Pflanzen eindringt und die phytotoxische Ozondosis bestimmt. Dabei wird mit einem vegetationspezifischen Schwellenwert Y auch jene Ozonbelastung berücksichtigt, die bei der Pflanze aufgrund ihrer Detoxifikationskapazität keine schädlichen Wirkungen verursacht. Zur Berechnung der Ozonflüsse müssen pflanzenspezifische Faktoren und verschiedene Umweltfaktoren berücksichtigt werden (Phänologie, Licht, Dampfdruckdefizit, Temperatur, Bodentrockenheit). Diese komplexen Erhebungen sind im Rahmen von Projekten, nicht aber kontinuierlich in den bestehenden Luftqualitätsmessnetzen möglich.

Im Gegensatz dazu wird bei den AOT40-Werten die in der Umgebungsluft vorkommende Ozonkonzentration über einem Schwellenwert von 40 ppb über die Vegetationsperiode akkumuliert und mit den beobachteten Ozonwirkungen bei Pflanzen in Beziehung gebracht.

Sowohl die kritischen Belastungswerte (Critical Levels) in Form von AOT40-Werten als auch jene in Form von POD_Y-Werten sind nicht geeignet, als Immissionsgrenzwerte in die schweizerische Luftreinhalte-Verordnung aufgenommen zu werden. Vielmehr werden die erwähnten Critical Levels in erster Linie im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung als wirkungsorientierte Zielgrössen zur europaweiten Modellierung der erforderlichen Minderung der Ozonvorläuferschadstoffe NO_x (Stickoxide) und VOC (flüchtige organische Verbindungen) eingesetzt (Integrated Assessment Modelling). Die Umlegung des gesamteuropäischen Minderungsbedarfs bei den Vorläuferschadstoffen auf nationale Vorgaben zur Emissionsminderung zum Erreichen der Critical Levels ist dann schliesslich Gegenstand von Verhandlungen im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung. Als langfristiges Ziel ist der AOT40-Wert zum Schutz der Vegetation auch in der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa festgehalten (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2008).

Die Überschreitungen von Critical Levels für Ozon (AOT40, POD_Y) werden im Sinne einer grösser-räumigen Risikobeurteilung vom European Monitoring and Evaluation Programme EMEP europaweit modelliert und für die Mitgliedstaaten der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung in Jahresberichten dokumentiert (EMEP, 2022).

Zur Evaluation der quantitativen Beziehung von Überschreitungen der neu von der WHO vorgeschlagenen Richtwerte 2021 für Ozon (saisonaler Mittelwert der täglichen maximalen Ozon-Achtstundemittelwerte von 60 µg/m³) zu den Überschreitungen der vegetationspezifischen Critical Levels für Ozon der UNECE (AOT40, POD_Y) wären insbesondere im Falle von POD_Y aufwändige Analysen erforderlich. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit Emissionsminderungen, die zur Einhaltung des von der WHO vorgeschlagenen saisonalen Sommer-Mittelwerts «peak season» von 60 µg/m³ führen

könnten, auch das Ziel der Einhaltung der vegetationspezifischen AOT40- oder POD_Y -Werte näher rückt. Abbildung 31 zeigt, dass der AOT40-Wert für Waldökosysteme mit Einhalten des WHO-Richtwerts für die Ozonbelastung in den Sommermonaten von $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht mehr überschritten wird.

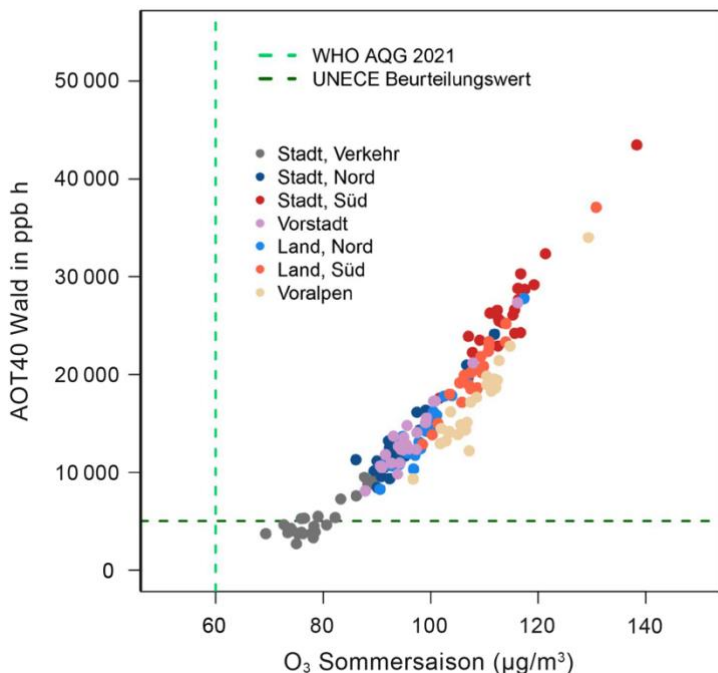


Abbildung 31: Vergleich der Sommersaison-Ozonwerte (nach WHO) für den Zeitraum 2000–2022 mit dem AOT40-Wert (Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb) für den Wald nach Standorttypen.

Der dunkelgrün gestrichelte Bereich kennzeichnet den Bereich für das Einhalten des vegetationsbasierten Wertes AOT40 und der hellgrün gestrichelte Bereich jenen für den Langzeitozonwert während der Sommersaison von $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

D.2 Stickstoffdioxid (NO_2)

Die von der EKL empfohlenen tieferen Immissionsgrenzwerte für NO_2 tragen auch zum Schutz empfindlicher naturnaher Ökosysteme bei, welche durch erhöhte atmosphärische Stickstoffeinträge (Stickoxide, Ammoniak und deren Reaktionsprodukte) und durch direkte NO_x -Einwirkungen gefährdet sind. Mit dem vorgeschlagenen NO_2 -Jahresmittelwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kann davon ausgegangen werden, dass bei dessen Einhaltung auch die Vegetation vor direkten Einwirkungen von Stickoxiden geschützt sein wird und die zum Schutz der Vegetation im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung und der WHO festgelegten Critical Levels für NO_x nicht mehr überschritten werden (UNECE, 2017; WHO, 2000).

D.3 Schwefeldioxid (SO_2)

SO_2 -Konzentrationswerte, oberhalb derer schädliche Auswirkungen auf die Vegetation in verschiedenen Ökosystemen auftreten, sind im Rahmen der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung von Expertengruppen auf der Grundlage von Feldstudien und

experimentellen Untersuchungen evaluiert und bereits 1993 als sogenannte Critical Levels (kritische Konzentrationen) festgelegt worden. Sie sind in der nachstehenden Tabelle 16 zusammenfassend dargestellt (UNECE, 2017). Für bedeutende Ökosysteme wie Wälder und weitere naturnahe Ökosysteme, die auch Lebensraum für Flechten sind, beträgt der Critical Level für SO₂ 20 µg/m³ als Jahresmittelwert und als Mittelwert über das Winterhalbjahr.

Tabelle 16: Critical Levels für die SO₂-Belastung nach Vegetationstyp

Vegetationstyp	Critical Level SO ₂ [µg/m ³]	Zeitperiode
Landwirtschaftliche Kulturpflanzen	30	Jahresmittelwert und Mittelwert für das Winterhalbjahr von Oktober bis März
Waldökosysteme	20	Jahresmittelwert und Mittelwert für das Winterhalbjahr von Oktober bis März
Naturnahe Ökosysteme (z. B. Hochmoore, Flachmoore)	20	Jahresmittelwert und Mittelwert für das Winterhalbjahr von Oktober bis März
Flechten	10	Jahresmittelwert

Vor dem Hintergrund, dass der Schutz der Umwelt auch für die Gesundheit des Menschen von Bedeutung ist, hat das WHO Regionalbüro für Europa die kritischen Konzentrationen (Critical Levels) für SO₂ im Jahr 2000 auch in die WHO-Luftqualitätsleitlinien für Europa aufgenommen und verabschiedet (WHO, 2000). Zudem ist der Critical Level für SO₂ von 20 µg/m³ (Jahresmittelwert und Mittelwert für das Winterhalbjahr von Oktober bis März) im Jahr 1999 als Grenzwert für den Schutz von Ökosystemen in die Richtlinie 1999/30/EG des Rates der Europäischen Union vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft aufgenommen worden (Rat der Europäischen Union, 1999). In der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa wurde der erwähnte Grenzwert für SO₂ zum Schutz der Vegetation unverändert beibehalten (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2008). Die in Abbildung 19 gezeigten Jahresmittelwerte liegen deutlich unter 10 µg/m³, was darauf schliessen lässt, dass auch im Winterhalbjahr die Werte nicht über 20 µg/m³ liegen.

Anhang E – Ergänzungen zu Ozon: Vergleichbarkeit der verschiedenen Beurteilungswerte der WHO und der Schweiz

Die Diagramme basieren auf NABEL-Daten und repräsentieren verschiedene Standortsituationen in der Schweiz. Bei mehreren NABEL-Stationen mit gleichem Stationstyp wurden die Messwerte gemittelt (Stadt, Verkehr: Bern-Bollwerk und Lausanne-César-Roux; Vorstadt: Basel-Binningen und Dübendorf-Empa, Land, Nord: Payerne und Tänikon, Voralpen: Chaumont und Rigi-Seebodenalp).

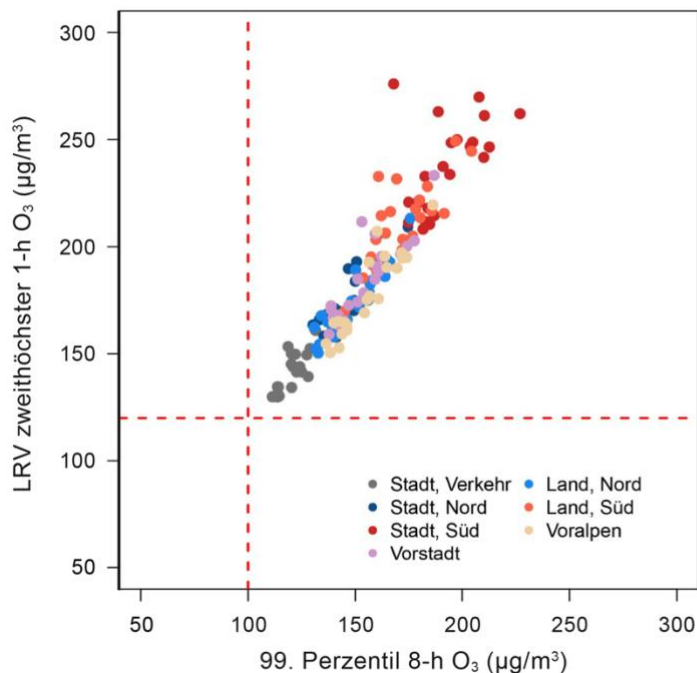


Abbildung 32: 99. Perzentil des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes (WHO-Richtwert) gegen den zweithöchsten 1-h-Mittelwert von Ozon pro Jahr (IGW der LRV) 2000–2022 nach Standorttypen.

Die rot gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den 8-h-Mittelwert gemäss WHO und der 1-h-IGW der LRV eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des 8-h-Mittelwertes von 100 µg/m³ und der zweithöchste 1-h-Mittelwert, der 120 µg/m³ nicht überschreiten darf.

Nach LRV darf der 1-h-Mittelwert von Ozon ein Mal pro Jahr über 120 µg/m³ liegen, d.h. der zweithöchste 1-h-Mittelwert muss kleiner oder gleich 120 µg/m³ sein.

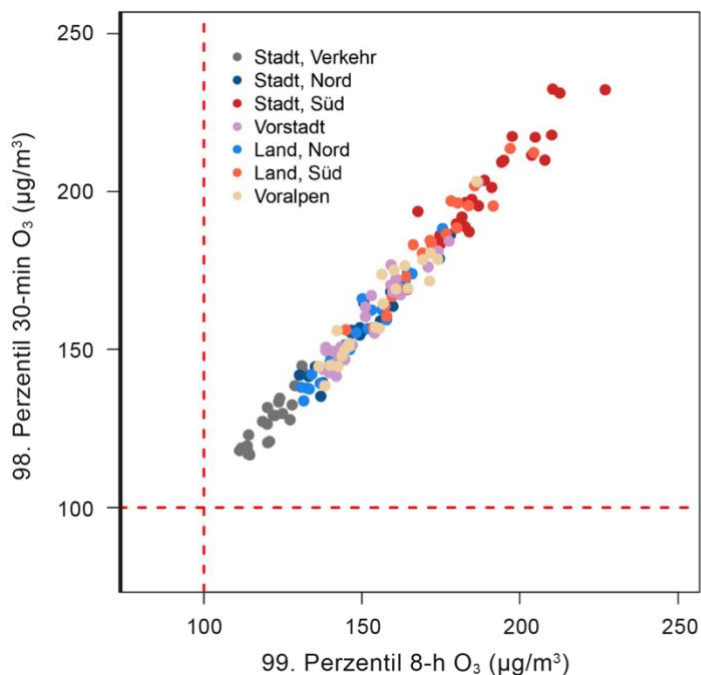


Abbildung 33: 99. Perzentil des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes von Ozon (WHO-Richtwert) gegen das 98. Perzentil der monatlichen 30-min-Mittelwerte (O_3 LRV, d.h. IGW gemäss LRV) 2000–2022 nach Standorttypen.

Die rot gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Richtwerte für den 8-h-Mittelwert gemäss WHO und das 98. Perzentil der Halbstundenmittelwerte eines Monats (IGW der LRV) eingehalten werden. Es sind dies die maximal zulässigen Überschreitungen (99. Perzentil von 365 Tagen) des 8-h-Mittelwertes von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und das 98. Perzentil der Halbstundenmittelwerte eines Monats, das $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschreiten darf.

99. Perzentil 8-h O₃ (µg/m³)

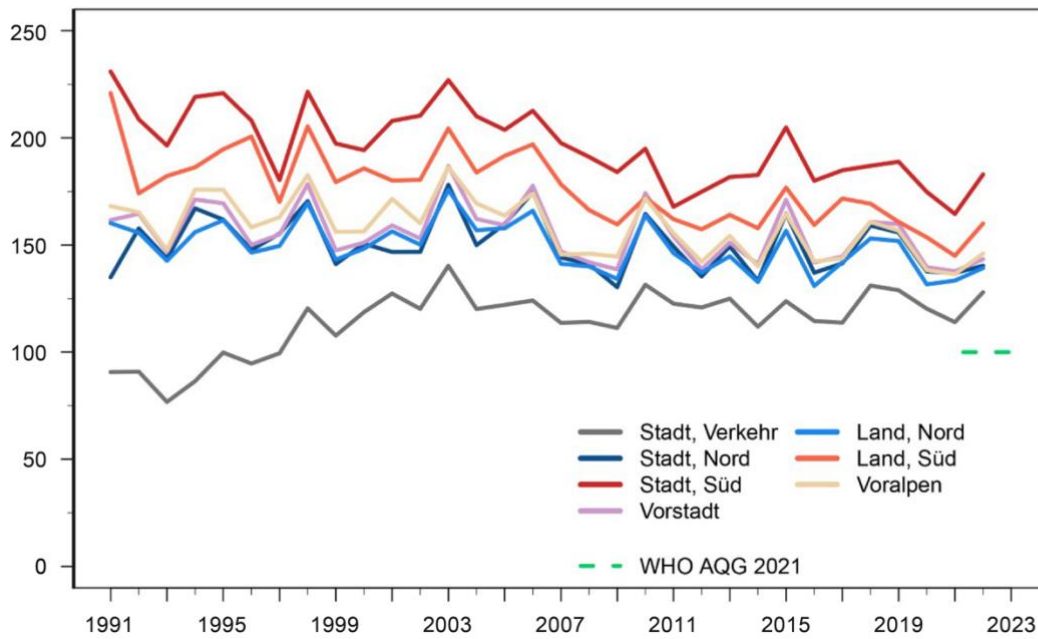


Abbildung 34: Entwicklung des 99. Perzentils des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes von Ozon (WHO-Richtwert) 1991–2022 nach Standorttypen.

Anhang F – Ergänzungen zu NO₂

F.1 95. Perzentil der Halbstundenmittelwerte

Die Diagramme basieren auf NABEL-Daten und repräsentieren verschiedene Standortsituationen in der Schweiz. Bei mehreren NABEL-Stationen mit gleichem Stationstyp wurden die Messwerte gemittelt (Stadt, Verkehr: Bern-Bollwerk und Lausanne-César-Roux; Vorstadt: Basel-Binningen und Dübendorf-Empa, Land, Nord: Payerne und Tänikon, Voralpen: Chaumont und Rigi-Seebodenalp).

95. Perzentil der 30-min NO₂-Mittelwerte (µg/m³)

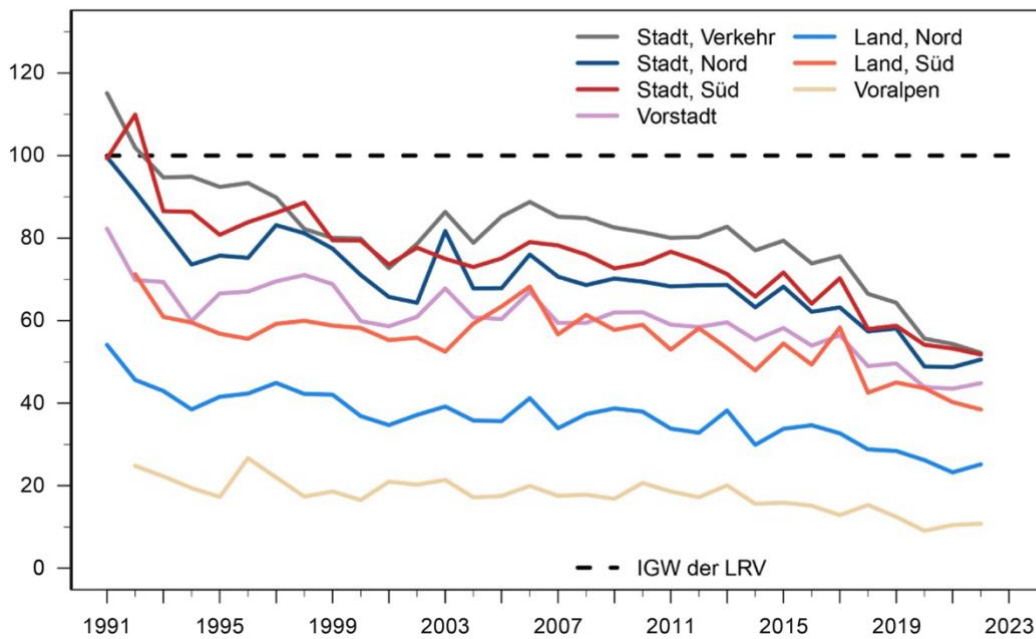


Abbildung 35: Entwicklung des 95. Perzentils der 30-Minuten NO₂ Mittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.

Die gestrichelte Linie zeigt den IGW der LRV.

F.2 Zusammenhang Kurzzeitwerte und Langzeitwerte

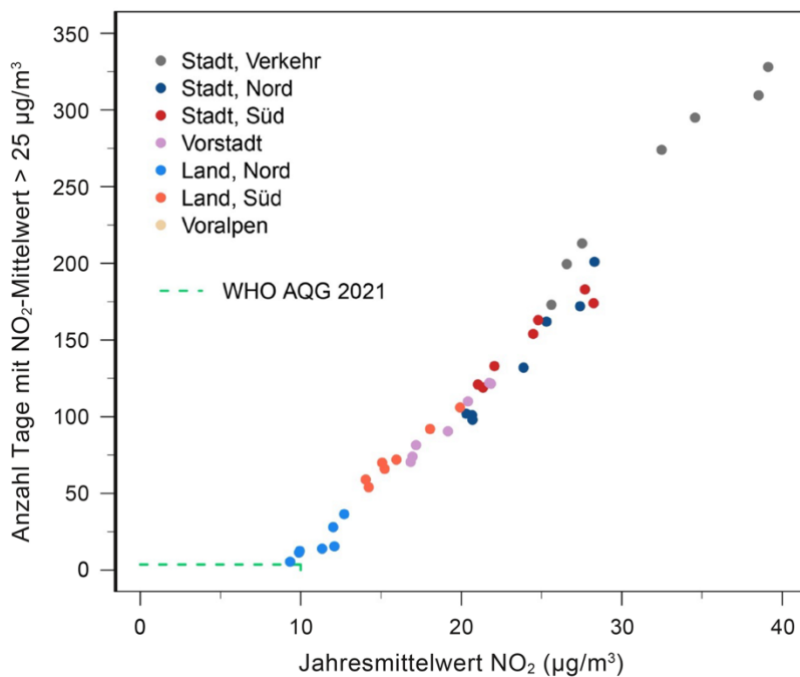


Abbildung 36: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von NO₂ und der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts (WHO AQG 2021) von 25 µg/m³ 2016–2021 nach Standorttypen.

Der grün gestrichelte Bereich (3 Überschreitungen des Tageswerts von 25 µg/m³ und Jahresmittelwert von 10 µg/m³) zeigt den Bereich an, bei dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden.

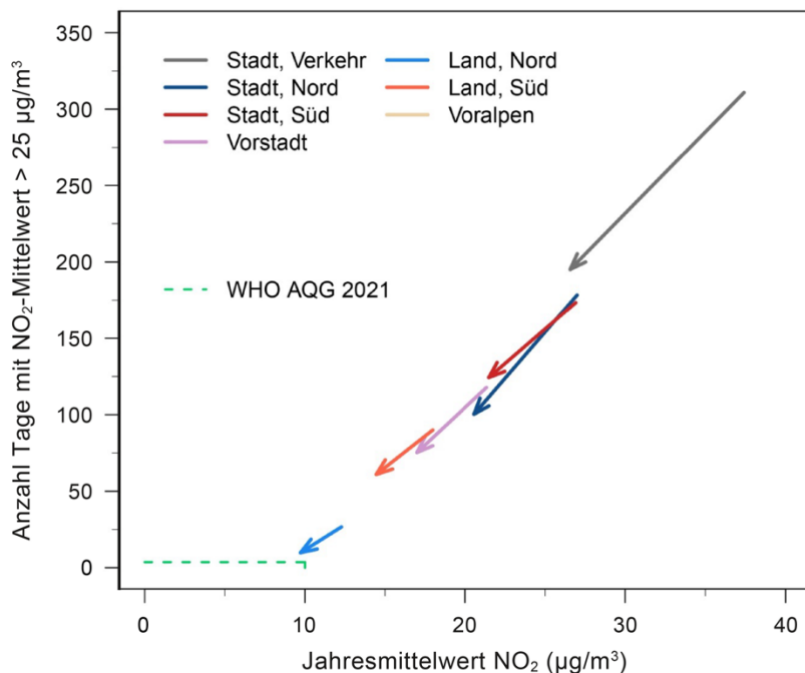


Abbildung 37: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von NO₂ mit der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden WHO-Richtwerts (WHO AQG 2021) von 25 µg/m³ 2016–2021 (Pfeile starten bei Mittelwert 2016–2018 und enden bei Mittelwert 2019–2021) nach Standorttypen.

Der grün gestrichelte Bereich (3 Überschreitungen des Tageswerts von 25 µg/m³ und Jahresmittelwert von 10 µg/m³) kennzeichnet den Zielbereich, bei dem die Richtwerte für den Tagesmittel- und den Jahresmittelwert gemäss WHO eingehalten werden.

Die Punkte in Abbildung 36 sind hoch korreliert und die Pfeile in Abbildung 37 zeigen auf die obere rechte Ecke der grünen gestrichelten Linien. Dies bedeutet, dass die beiden Kriterien weitgehend gleichwertig sind. Tendenziell scheint der WHO-Richtwert für den Tagesmittelwert beim NO₂ etwas strenger als der Richtwert für den Jahresmittelwert, insbesondere für ländliche Standorte (orangener Pfeil). Für NO₂ werden die Richtwerte der WHO abgesehen von ländlichen Standorten auf der Alpennordseite und in den Voralpen noch deutlich überschritten.

Anhang G – Ergänzungen zu SO₂

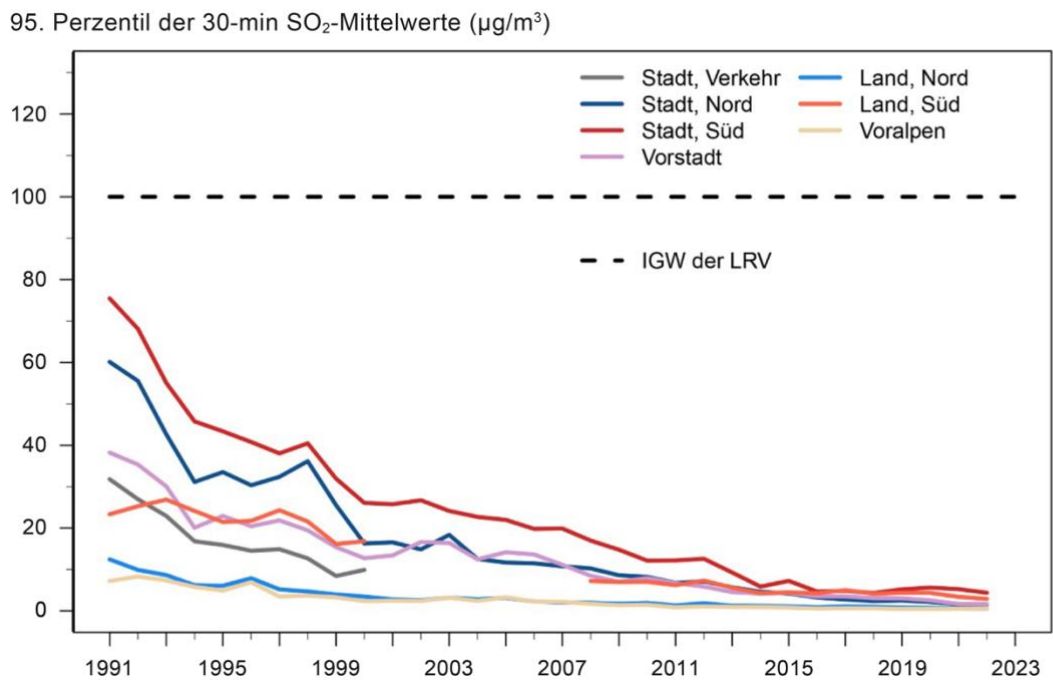


Abbildung 38: Entwicklung des 95. Perzentils der 30-min SO₂-Mittelwerte eines Jahres 1991–2022 nach Standorttypen.

Abbildung 38 zeigt, dass der Kurzzeitwert des 95. Perzentils der ½-h-Mittelwerte eines Jahres seit 30 Jahren eingehalten wird und somit die übrigen IGW zur lufthygienischen Beurteilung der Immissionen in der Schweiz ausreichend sind.

Anhang H – Ergänzungen zu PAK

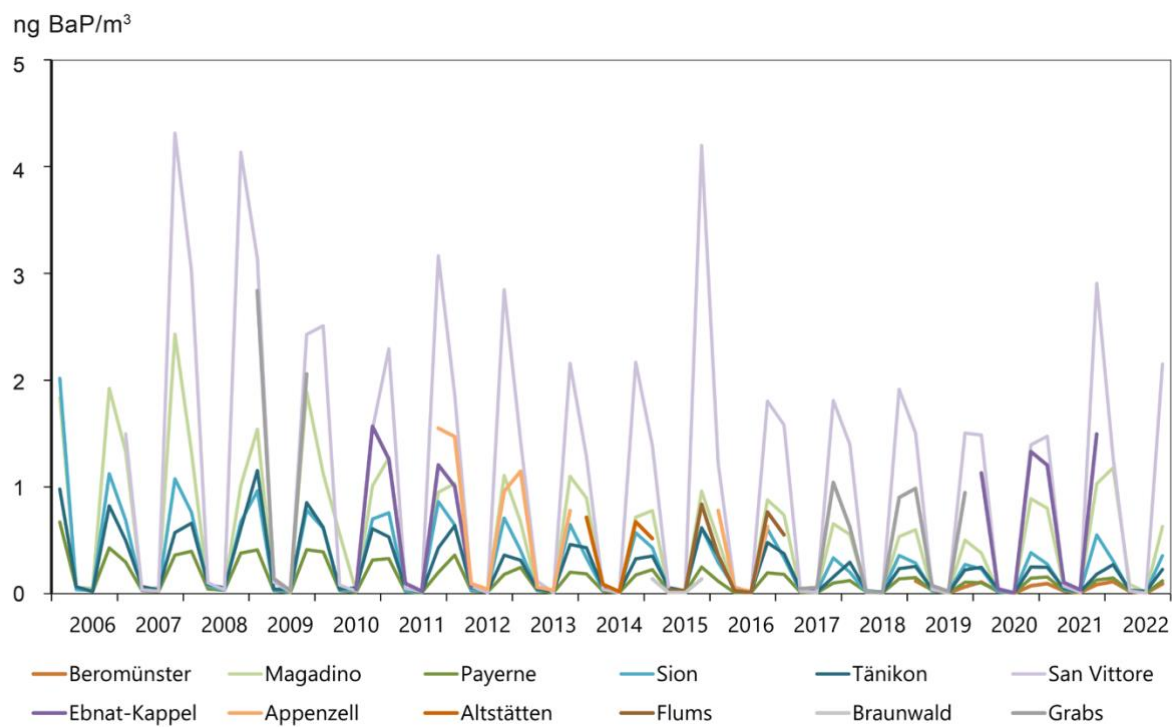
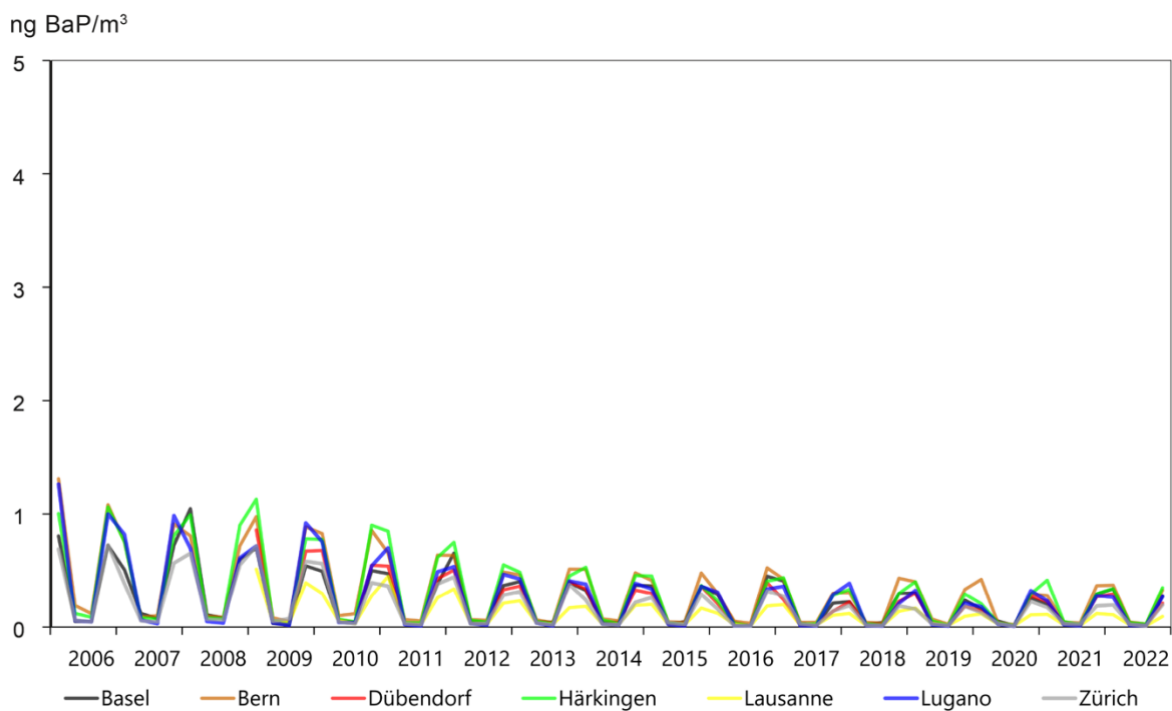


Abbildung 39: Quartalswerte der Konzentrationen von Benzo[a]pyren im PM10 2006–2022. Oben städtische und vorstädtische Stationen sowie Verkehrsstandorte, unten ländliche Standorte (Fischer & Hüglin, 2023).

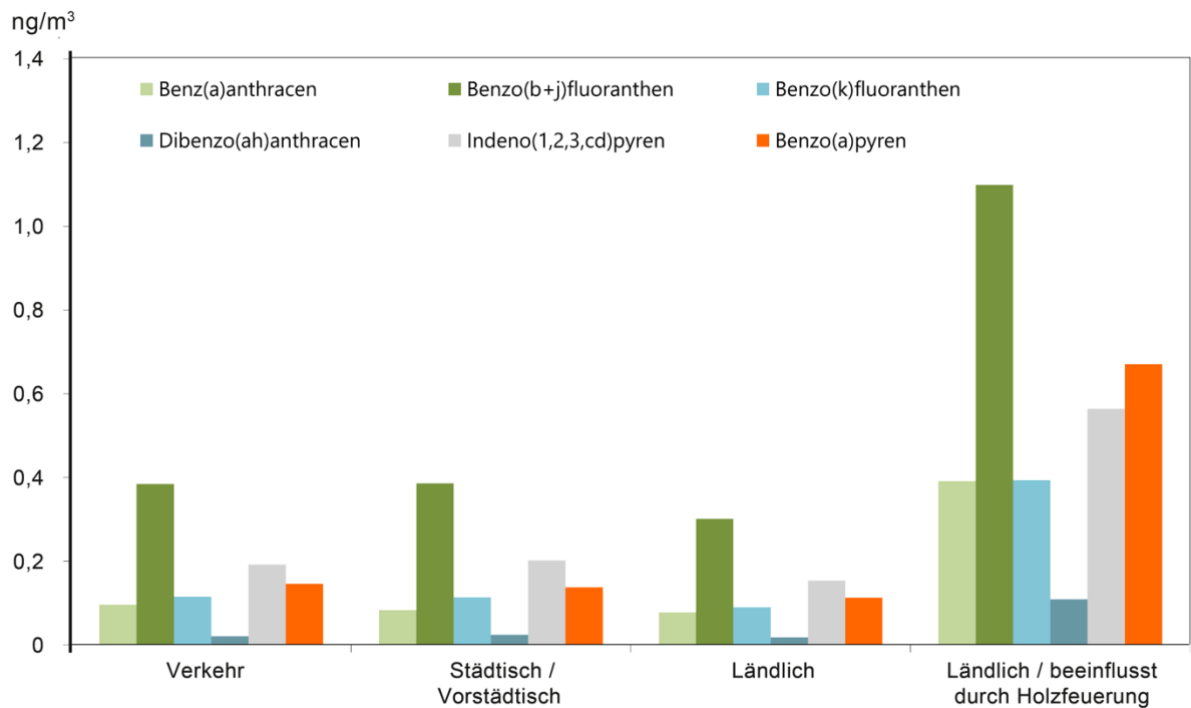


Abbildung 40: Jahresmittelwerte der Konzentrationen von toxikologisch relevanten PAK im PM10 2022 nach Standorttypen (Fischer & Hüglin, 2023).

Anhang I – Grafische Darstellung der gesicherten Gesundheitsfolgen verschiedener Schadstoffe

(vgl. <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects>)

I.1 Feinstaub

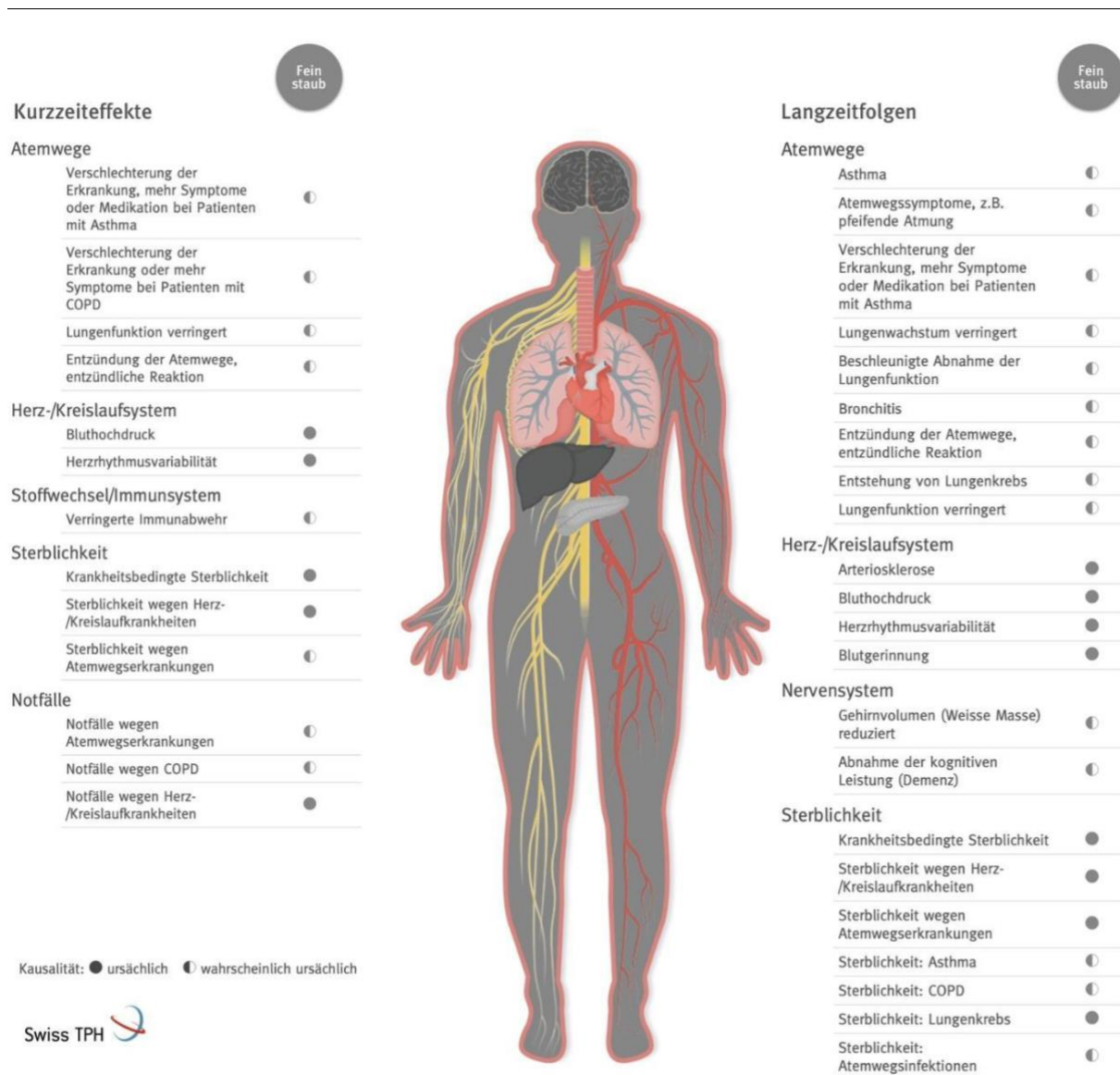


Abbildung 41: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter Feinstaubbelastung (Swiss TPH, 2022).

I.2 Ozon

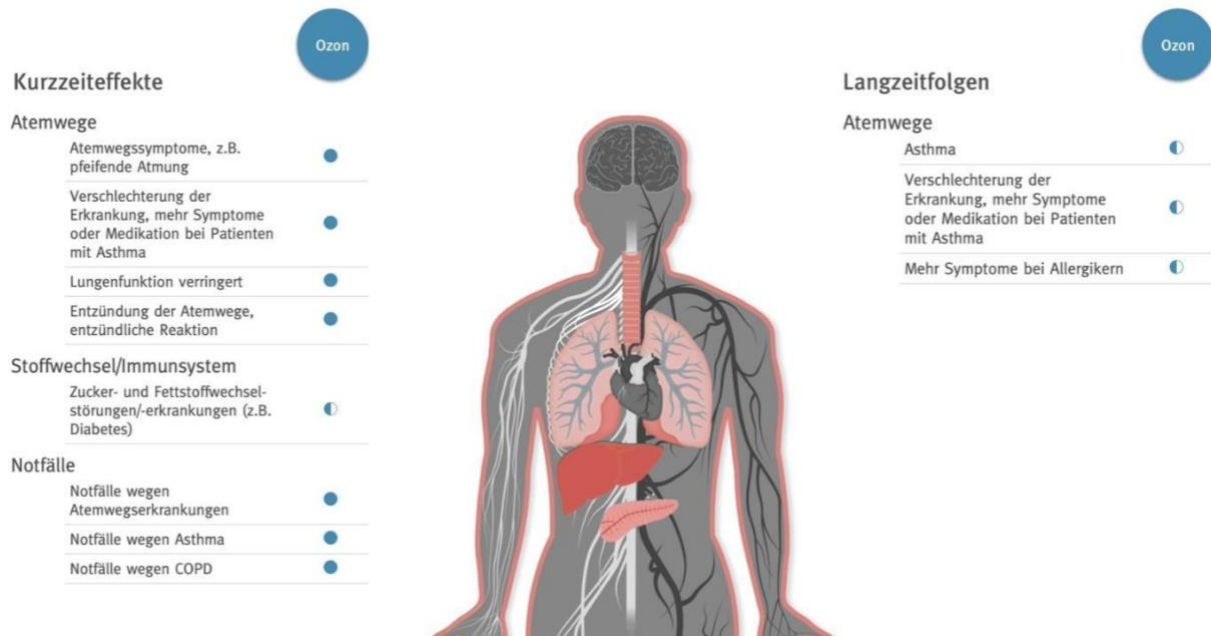


Abbildung 42: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter Ozon-Belastung (Swiss TPH, 2022).

I.3 NO₂

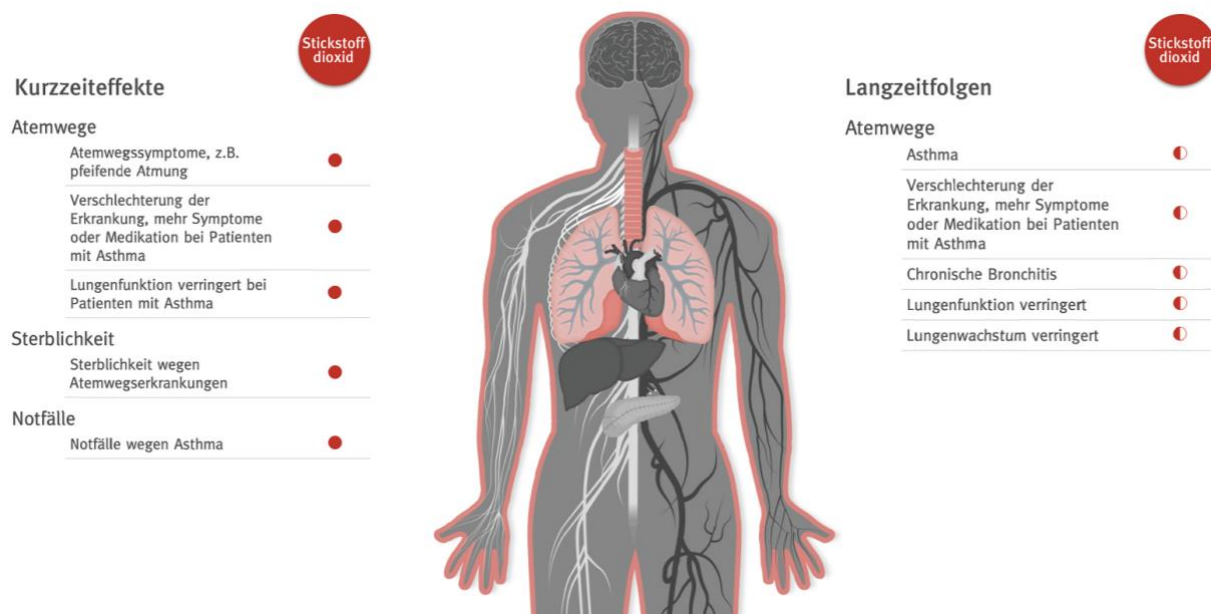


Abbildung 43: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter NO₂-Belastung (Swiss TPH, 2022).

I.4 SO₂

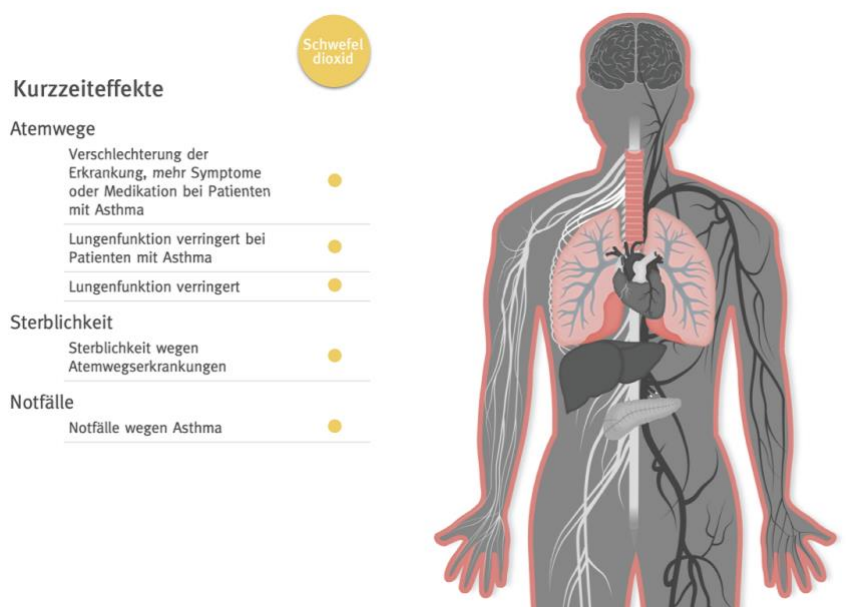


Abbildung 44: Kurzzeiteffekte erhöhter SO₂-Belastung (Swiss TPH, 2022).

I.5 CO

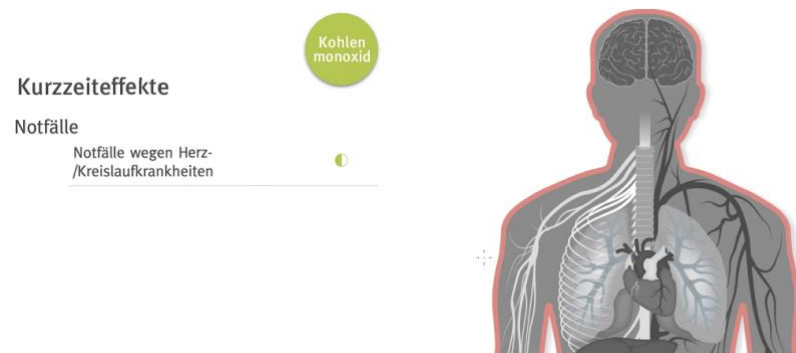


Abbildung 45: Kurzzeiteffekt erhöhter CO-Belastung (Swiss TPH, 2022).

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Aerodynamischer Durchmesser	Der aerodynamische Durchmesser ist definiert als der Durchmesser eines kugelförmigen Partikels mit der Dichte 1 g/cm^3 , das dieselbe Sinkgeschwindigkeit aufweist wie das zu betrachtende Partikel.
Aerosol	Gemisch aus festen oder/und flüssigen Schwebeteilchen und Luft
ANSES	Französische Agentur für Lebensmittel-, Umwelt- und Arbeitssicherheit
AOT40	Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb: Ozondosis über dem Schwellenwert von 40 ppb. Der AOT-Wert ist ein Mass für die chronische Langzeitbelastung der Pflanzen durch Ozon und wird für die Vegetationsperiode berechnet.
AQG	Air Quality Guidelines: Luftqualitätsleitlinien der WHO, diese Abkürzung wird in Tabellen und Grafiken für die Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien verwendet.
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
B[a]P	Benzo[a]pyren (ein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BC	Black Carbon – schwarzer Kohlenstoff, ein Mass für Russ
CEN	Comité européen de normalisation, Europäisches Komitee für Normung
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution – UNECE Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung
CO	Kohlenmonoxid
COPD	Chronic obstructive pulmonary disease – Chronisch obstruktive Lungenerkrankungen
DEZA	Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit im Eidgenössischen Departement für auswärtige Angelegenheiten (EDA)
DTT	Dithiothreitol
eBC	Equivalent black carbon: ein Mass für Russ, ermittelt durch Umrechnung eines optischen Absorptionskoeffizienten in eine Massenkonzentration; der für die Umrechnung verwendete Absorptionsquerschnitt ist anzugeben
EC	Elemental carbon, elementarer Kohlenstoff: Bestandteil von Kohlenstoff im Feinstaub, welcher im thermisch-optischen Verfahren nach Erhitzung in einer inerten Atmosphäre (Helium) übrig bleibt; ein Mass für Russ.
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
ELAPSE	Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe – Epidemiologische Studie mit harmonisierter Belastungsabschätzung unter Einbezug von Daten aus Kohortenstudien aus verschiedenen europäischen Ländern
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EMIS	Emissionsinformationssystem der Schweiz
EUSAAR	European Supersites for Atmospheric Aerosol Research (EU-Projekt 2006–2011, https://www.eusaar.net)
h	Stunde

HR	Hazard Ratio: Sterberisikoverhältnis, ist ein Quotient aus den Hazards von zwei Gruppen und gibt an, um wie viel die Sterberate in der einen Gruppe höher ist im Vergleich zu der Sterberate der anderen Gruppe.
IARC	Internationale Agentur für Krebsforschung (Einrichtung der WHO)
IGW	Immissionsgrenzwert der Luftreinhalte-Verordnung (LRV Anhang 7)
ISA	Integrated Science Assessment; umfassende Gesundheitsbewertung
LRV	Luftreinhalte-Verordnung SR 814.318.142.1 – Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV) (admin.ch), aktueller Stand 1. Januar 2023 https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/de
LUDOK	Lufthygienische Dokumentationsstelle zu Gesundheitsfolgen der Luftbelastung am Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut im Auftrag des BAFU
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mikrogramm pro Kubikmeter Luft (1 μg = 0,001 mg)
mg/m^3	Milligramm pro Kubikmeter Luft (1 mg = 0,001 Gramm)
NABEL	NAtionales BEobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
ng/m^3	Nanogramm pro Kubikmeter Luft (1 ng = 0,001 μg)
NMVOG	Non Methane Volatile Organic Compounds: Flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide, Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
O ₃	Ozon
OC	Organic Carbon, organischer Kohlenstoff: Bestandteil von Kohlenstoff im Feinstaub, welcher im thermisch-optischen Verfahren bei Erhitzung in einer inerten Atmosphäre (Helium) in die Gasphase übergeht oder pyrolysiert wird.
OEHHA	Office of Environmental Health Hazard Assessment, kalifornische Behörde für Gesundheitsfolgenabschätzung durch Umweltstressoren
OP	Oxidatives Potenzial von Feinstaub
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Perzentil	Das Perzentil ist der Prozentsatz der Werte einer Verteilung, der kleiner oder gleich einem bestimmten Wert ist. Das 98. Perzentil bedeutet, dass 98 % der Werte unterhalb dieses 98. Perzentils liegen. Der Grenzwert ist dann eingehalten, wenn das 98. Perzentil unterhalb des Grenzwerts liegt. Für den Immissionsgrenzwert von Ozon bedeutet das 98. Perzentil der 30 min Mittelwerte pro Monat, dass 98 % der Halbstundenmittelwerte eines jeden Monats kleiner oder gleich 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sein müssen.
PM	Particulate Matter: Feinstaub, Schwebestaub
PM10	Particulate Matter: Feinstaub / Schwebestaub mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 μm oder kleiner
PM2.5	Particulate Matter: Feinstaub / Schwebestaub mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 μm oder kleiner

POD _Y	Phytotoxic Ozone Dose: über die Vegetationsperiode akkumulierte Ozondosis, die von der Pflanze über die Spaltöffnungen aufgenommen wird (Ozonfluss) unter Berücksichtigung eines vegetationspezifischen Schwellenwerts Y zur Berücksichtigung der pflanzenspezifischen Detoxifikationskapazität.
ppb	Parts per billion (10 ⁻⁹), Teile pro Milliarde
ppm	Parts per million (10 ⁻⁶), Teile pro Million
ROS	Reactive oxygen species, reaktive Sauerstoffspezies, wie das Hyperoxid O ₂ ⁻ oder das hochreaktive Hydroxyl-Radikal HO [·]
Russ	Entsteht durch unvollständige Verbrennung oder Pyrolyse von Kohlenwasserstoffen. Beinhaltet deshalb neben elementarem Kohlenstoff auch Anteile von organischem Kohlenstoff. Wird oft vereinfachend mit elementarem Kohlenstoff EC gleichgesetzt (auch in diesem Bericht).
SAPALDIA	Schweizer Kohortenstudie zur Untersuchung der Auswirkungen der langfristigen Luftbelastung auf die Gesundheit der Erwachsenen in der Schweiz
SCARPOL	Schweizer Kinderstudie zur Untersuchung der Auswirkungen der Luftbelastung auf die Gesundheit bei Kindern
SO ₂	Schwefeldioxid
UFP	Ultrafeine Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 100 Nanometer oder kleiner (oft werden auch Partikel bis zu einer Grösse von 1 µm darunter subsummiert)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe – Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
US EPA	U.S. Environmental Protection Agency, amerikanische Umweltbehörde
USG	Umweltschutzgesetz; SR 814.01 – Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) (admin.ch) https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/de
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VOC	Volatile Organic Compounds: Flüchtige organische Verbindungen
WHO	World Health Organization, Weltgesundheitsorganisation

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Ursächliche und wahrscheinlich ursächliche Gesundheitseffekte, welche mit der kurz- bzw. langfristigen Einwirkung von Luftschadstoffen zusammenhängen (Swiss TPH, 2022)	21
Abbildung 2: Übersicht zu bekannten Wirkungsmechanismen, welche durch Umweltbelastungen ausgelöst werden können (Peters et al., 2021)	22
Abbildung 3: Belastungs-Wirkungsbeziehung des Sterberisikoverhältnisses (Hazard Ratio HR) mit der langfristigen PM2.5-Belastung in der amerikanischen Medicare Kohortenstudie (Di et al., 2017).....	24
Abbildung 4: Feinstaub PM10 Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.....	28
Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM10 über 50 µg/m ³ 1991–2022	29
Abbildung 6: Immissionskarte für den Jahresmittelwert von Feinstaub PM10 für das Jahr 2021	30
Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM10 über 45 µg/m ³ 1991–2022	30
Abbildung 8: Feinstaub PM2.5 Jahresmittelwerte 1998–2022 nach Standorttypen.....	33
Abbildung 9: Immissionskarte für den Jahresmittelwert von PM2.5 für das Jahr 2021	34
Abbildung 10: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von PM2.5 über 15 µg/m ³ 1991–2022	34
Abbildung 11: Entwicklung des 98. Perzentils der Halbstundenwerte eines Monats von Ozon 1991–2022.....	38
Abbildung 12: Entwicklung der Anzahl Stundenmittelwerte von Ozon über 120 µg/m ³ 1991–2022	39
Abbildung 13: Entwicklung der Anzahl Überschreitungen des höchsten täglichen 8-h-Mittels von Ozon über 100 µg/m ³ 1991–2022	40
Abbildung 14: Entwicklung des Langzeitwertes von Ozon 1991–2022.....	41
Abbildung 15: NO ₂ Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen	44
Abbildung 16: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von NO ₂ über 80 µg/m ³ 1991–2022 nach Standorttypen	45
Abbildung 17: Immissionskarte für den NO ₂ -Jahresmittelwert für das Jahr 2021	46
Abbildung 18: Entwicklung der Anzahl Tagesmittelwerte von NO ₂ über 25 µg/m ³ 1991–2022	47
Abbildung 19: SO ₂ Jahresmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen.....	49

Abbildung 20: Entwicklung der maximalen Tagesmittelwerte von SO ₂ 1991–2022 nach Standorttypen	50
Abbildung 21: Maximale Kohlenmonoxid-Tagesmittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen	52
Abbildung 22: Russ (eBC=equivalent black carbon in PM _{2.5} µg/m ³) Jahresmittelwerte 2008–2022 nach Standorttypen	54
Abbildung 23: Russimmissionen für das Jahr 2020 (INFRAS, 2021).....	55
Abbildung 24: Partikelanzahl UFP, Jahresmittelwerte 2005–2022 nach Standorttypen	57
Abbildung 25: Benzo[a]pyren Jahresmittelwerte 2006–2021 nach Standorttyp.....	61
Abbildung 26: Jahresmittel der Kupferbelastung im PM ₁₀ 2006–2022 nach Standorttypen	63
Abbildung 27: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von PM ₁₀ und der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden-WHO-Richtwerts von 45 µg/m ³ 2010–2022 nach Standorttypen	86
Abbildung 28: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von PM ₁₀ und der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden-WHO-Richtwerts von 45 µg/m ³ 2010–2022 nach Standorttypen	87
Abbildung 29: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von PM _{2.5} und der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts von 15 µg/m ³ 2016–2022 nach Standorttypen	88
Abbildung 30: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von PM _{2.5} mit der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts von 15 µg/m ³ 2016–2022 nach Standorttypen	89
Abbildung 31: Vergleich der Sommersaison-Ozonwerte (nach WHO) für den Zeitraum 2000–2022 mit dem AOT40-Wert (Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb) für den Wald nach Standorttypen	92
Abbildung 32: 99. Perzentil des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes (WHO-Richtwert) gegen den zweithöchsten 1-h-Mittelwert von Ozon pro Jahr (IGW der LRV) 2000–2022 nach Standorttypen	94
Abbildung 33: 99. Perzentil des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes von Ozon (WHO-Richtwert) gegen das 98. Perzentil der monatlichen 30-min-Mittelwerte (O ₃ LRV, d. h. IGW gemäss LRV) 2000–2022 nach Standorttypen.....	95
Abbildung 34: Entwicklung des 99. Perzentils des täglichen maximalen 8-h-Mittelwertes von Ozon (WHO-Richtwert) 1991–2022 nach Standorttypen.....	96
Abbildung 35: Entwicklung des 95. Perzentils der 30-Minuten NO ₂ Mittelwerte 1991–2022 nach Standorttypen	97
Abbildung 36: Streudiagramm der Jahresmittelwerte von NO ₂ und der Anzahl Überschreitungen des 24-h-WHO-Richtwerts (WHO AQG 2021) von 25 µg/m ³ 2016–2021 nach Standorttypen	98
Abbildung 37: Zusammenhang der Jahresmittelwerte von NO ₂ mit der Anzahl Überschreitungen des 24-Stunden WHO-Richtwerts (WHO AQG 2021) von 25 µg/m ³ 2016–2021 nach Standorttypen	99

Abbildung 38: Entwicklung des 95. Perzentils der 30-min SO ₂ -Mittelwerte eines Jahres 1991–2022 nach Standorttypen	100
Abbildung 39: Quartalswerte der Konzentrationen von Benzo[a]pyren im PM ₁₀ 2006–2022 (Fischer & Hüglin, 2023).	101
Abbildung 40: Jahresmittelwerte der Konzentrationen von toxikologisch relevanten PAK im PM ₁₀ 2022 nach Standorttypen (Fischer & Hüglin, 2023)	102
Abbildung 41: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter Feinstaubbelastung (Swiss TPH, 2022)	103
Abbildung 42: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter Ozon-Belastung (Swiss TPH, 2022).	104
Abbildung 43: Kurzzeit- und Langzeiteffekte erhöhter NO ₂ -Belastung (Swiss TPH, 2022).	104
Abbildung 44: Kurzzeiteffekte erhöhter SO ₂ -Belastung (Swiss TPH, 2022).	105
Abbildung 45: Kurzzeiteffekt erhöhter CO-Belastung (Swiss TPH, 2022).....	105

Tabelle 1: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV.	8
Tableau 1 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI dans l'OPair (S. 10)	
Tabella 1: Raccomandazioni della CFIAR per l'adeguamento dei VLI nell'OIAAt (S. 12)	
Table 1: FCAH recommendations for changes to ambient limit values in the OAPC (S. 14)	
Tabelle 2: Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien (AQG) und Zwischenziele (Interim Targets), sowie die derzeit gültigen Immissionsgrenzwerte der Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (SR 814.318.142.1, Stand am 1. Januar 2023).....	18
Tabelle 3: Langzeit- und Kurzzeitrichtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für PM ₁₀ im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.	27
Tabelle 4: Langzeit- und Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für PM _{2.5} im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.	32
Tabelle 5: Langzeit- und Kurzzeitrichtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für Ozon im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.	36
Tabelle 6: Langzeit- und Kurzzeitrichtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für NO ₂ im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.	43
Tabelle 7: Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für SO ₂ im Vergleich zu Langzeit- und Kurzzeitimmissionsgrenzwerten (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL.	48

Tabelle 8: Kurzzeitrichtwert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) für CO im Vergleich zum Immissionsgrenzwert (IGW) der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und Empfehlungen der EKL	51
Tabelle 9: Staubniederschlag insgesamt und Metalle, für welche in der LRV IGW festgelegt sind.	62
Tabelle 10: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV	67
Tabelle 11: Tiefbelastungsstudien, welche Eingang in die WHO-Metaanalyse von Chen and Hoek (2020) zur Sterblichkeit in Zusammenhang mit der Langzeitbelastung mit PM2.5 gefunden haben (WHO, 2021). Geordnet nach der medianen Belastung	80
Tabelle 12: Zusammenfassung der Sterberisiken bei langfristig erhöhter Luftbelastung	81
Tabelle 13: Zusammenfassung der summierten Effektschätzer für Sterberisiken bei kurzfristig erhöhter Luftbelastung.....	82
Tabelle 14: Zusammenfassung der summierten Effektschätzer für erhöhte Morbidität in Abhängigkeit kurzfristig erhöhter Luftbelastung.....	83
Tabelle 15: Anteil der Emissionen aus den verschiedenen Quellen 2021 gemäss BAFU-Emissionsdatenbank EMIS.	84
Tabelle 16: Critical Levels für die SO ₂ -Belastung nach Vegetationstyp	93

Literaturverzeichnis

ANSES (2019). Particulate matter in ambient air: Health effects according to components, sources and particle size and impact on air pollution of the technologies and composition of the motor vehicle fleet operating in France. <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2014SA0156RaEN.pdf>

Atkinson, R. W., Samoli, E., Analitis, A., Fuller, G. W., Green, D. C., Anderson, H. R., Purdie, E., Dunster, C., Aitlhadj, L., Kelly, F. J., & Mudway, I. S. (2016, Aug). Short-term associations between particle oxidative potential and daily mortality and hospital admissions in London. *Int J Hyg Environ Health*, 219(6), 566-572. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.06.004>

BAFU. (2023). Quellenbeiträge auf Basis des Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionsinventars 2021 der Schweiz berechnet.

BAFU. (2023b). Grafiken Jahreswerte NABEL. Bundesamt für Umwelt. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/grafiken_jahreswertenabel.pdf.download.pdf/grafiken_jahreswertenabel.pdf

BAFU, & Empa. (2022). Luftqualität 2021 – Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe Bundesamt für Umwelt. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/uz-umwelt-zustand/luftqualitaet-2021.pdf.download.pdf/UZ-2227-D_NABEL2021.pdf

BAFU, & Empa. (2022b). Messergebnisse des NABEL 2021. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/detaillierte-messergebnisse-nabel-2021.pdf.download.pdf/nabel_JB_2021_d.pdf

Bates, J. T., Fang, T., Verma, V., Zeng, L. H., Weber, R. J., Tolbert, P. E., Abrams, J. Y., Samat, S. E., Klein, M., Mulholland, J. A., & Russell, A. G. (2019, Apr 16). Review of Acellular Assays of Ambient Particulate Matter Oxidative Potential: Methods and Relationships with Composition, Sources, and Health Effects. *Environmental Science & Technology*, 53(8), 4003-4019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03430>

Bowe, B., Xie, Y., Li, T., Yan, Y., Xian, H., & Al-Aly, Z. (2018, Jul). The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM(2.5) air pollution. *Lancet Planet Health*, 2(7), e301-e312. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(18\)30140-2](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(18)30140-2)

Brunner, U. (2000). Rechtsgutachten betreffend Grundlagen für die Anordnung verschärfter Emissionsbegrenzungen bei kanzerogenen Luftschadstoffen. EKL. https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/Rechtsgutachten_Kanzerogene_Luftschadstoffe_U._Brunner_Stand_September_2000.pdf

Cakmak, S., Hebborn, C., Pinault, L., Lavigne, E., Vanos, J., Crouse, D. L., & Tjepkema, M. (2018, Feb). Associations between long-term PM(2.5) and ozone exposure and mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CANHEC), by spatial synoptic classification zone. *Environ Int*, 111, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.030>

Castro, A., Gotschi, T., Achermann, B., Baltensperger, U., Buchmann, B., Felber Dietrich, D., Fluckiger, A., Geiser, M., Galli Purghart, B., Gygas, H., Kutlar Joss, M., Luthi, L. M., Probst-Hensch, N., Strahl, P., & Kunzli, N. (2020, Mar). Comparing the lung cancer burden of ambient particulate matter using scenarios of air quality standards versus acceptable risk levels. *International Journal of Public Health*, 65(2), 139-148. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01324-y>

CEN. (2016). CEN/TS 16976:2016: Aussenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols.

CEN. (2017). Ambient air – measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) collected on filters. EN 16909:2017.

Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 143, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>

Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schwikowski, M., & Baltensperger, U. (2004). Saharan dust events at the Jungfraujoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 4(11/12), 2465-2480. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2465-2004>

Daellenbach, K. R., Uzu, G., Jiang, J., Cassagnes, L. E., Leni, Z., Vlachou, A., Stefenelli, G., Canonaco, F., Weber, S., Segers, A., Kuenen, J. J. P., Schaap, M., Favez, O., Albinet, A., Aksoyoglu, S., Dommen, J., Baltensperger, U., Geiser, M., El Haddad, I., Jaffrezo, J. L., & Prévôt, A. S. H. (2020, Nov). Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature*, 587(7834), 414-419. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017, Jun 29). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *N Engl J Med*, 376(26), 2513-2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>

EEA. (2012). Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009. <https://www.eea.europa.eu/publications/particulate-matter-from-natural-sources>

EKL. (1989). Ozon in der Schweiz. Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 101, 270.

EKL. (2005). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 384. <https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/stickstoffhaltigeluftschadstoffeinderschweiz.pdf>

EKL. (2007). Feinstaub in der Schweiz. Status-Bericht der eidgenössischen Kommission für Lufthygiene. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). <https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/d-bericht-feinstaub-2008.pdf>

EKL. (2010). 25 Jahre Luftreinhaltung auf der Basis des Umweltschutzgesetzes. Thesen und Empfehlungen. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/EKL_D_Internet_2010-10-12.pdf

EKL. (2013). Feinstaub in der Schweiz 2013. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Feinstaub_in_der_Schweiz_2013.pdf

EKL. (2014). Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Ammoniak-Immissionen_und_Stickstoffeintraege.pdf

EKL. (2020). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz: Situation mit Bezug zur Landwirtschaft im Zeitraum 2000–2018. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/EKL-Stickstoffhaltige-Luftschadstoffe-in-der-Schweiz-200826-2_de.pdf

EMEP. (2022). Transboundary air pollution by sulphur, nitrogen, ozone and particulate matter in 2020. Country Report Switzerland. (11.5.2023), Data Note 1/2022.
https://www.emep.int/publ/emep2022_publications.html

Europäische Kommission. (2019). Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final(11.12.2019).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&qid=1683811543435>

Europäische Kommission. (2022). Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa (Neufassung). 2022/0347(COD)(26.10.2022).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0542&qid=1683813000857>

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2004). Richtlinie 2004/107/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 über Arsen, Kadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Union, L23/3 (26.1.2005).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32004L0107&from=EN>

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2008). Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union, L 152/1 (21. Mai 2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1675349020477&from=EN>

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2016). Richtlinie 2016/2284 des europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L344/1 (17.12.2016).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32016L2284>

European Commission. (2021). European green deal: delivering on our targets. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2775/373022>

European Parliament. (2022). Revision of the EU Ambient Air Quality Directives – Implementation Appraisal.
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/734679/EPRS_BRI\(2022\)734679_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/734679/EPRS_BRI(2022)734679_EN.pdf)

Felber Dietrich, D. (2014). Luftverschmutzung und Gesundheit. Übersicht zu den Auswirkungen.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftverschmutzung-und-gesundheit.html>

Fischer, A., & Hüglin, C. (2023). Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone. Messbericht 2022.

<https://www.empa.ch/web/s503/weitere-dokumente>

Grange, S. K., Fischer, A., Zellweger, C., Alastuey, A., Querol, X., Jaffrezo, J. L., Weber, S., Uzu, G., & Hueglin, C. (2021, Dec). Switzerland's PM10 and PM2.5 environmental increments show the importance of non-exhaust emissions. *Atmospheric Environment-X*, 12.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100145>

Grange, S. K., Uzu, G., Weber, S., Jaffrezo, J. L., & Hueglin, C. (2022). Linking Switzerland's PM10 and PM2.5 oxidative potential (OP) with emission sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 22(10), 7029-7050.

<https://doi.org/10.5194/acp-22-7029-2022>

Guerreiro, C. B. B., Horálek, J., de Leeuw, F., & Couvidat, F. (2016, Jul). Benzo(a)pyrene in Europe: Ambient air concentrations, population exposure and health effects. *Environ Pollut*, 214, 657-667.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.081>

Hart, J. E., Liao, X., Hong, B., Puett, R. C., Yanosky, J. D., Suh, H., Kioumourtzoglou, M. A., Spiegelman, D., & Laden, F. (2015, May 1). The association of long-term exposure to PM2.5 on all-cause mortality in the Nurses' Health Study and the impact of measurement-error correction. *Environ Health*, 14, 38.

<https://doi.org/10.1186/s12940-015-0027-6>

Health Effects Institute (HEI). (2013). Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles.

<https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles>

Huangfu, P., & Atkinson, R. (2020). Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 144, 105998.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>

Hüglin, C., & Grange, S. K. (2021). Chemical characterisation and source identification of PM10 and PM2.5 in Switzerland.

<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/chemical-characterisation-and-source-identification-of-pm-in-switzerland.pdf.download.pdf/Characterisation-source-identification-PM.pdf>

INFRAS. (2021). Black Carbon-Immissionen Schweiz und Liechtenstein. Resultate 2015, 2020 und 2030.

<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/black-carbon-immissionen-schweiz-und-liechtenstein.pdf.download.pdf/BC-Immissionen-CH-FL.pdf>

Kutlar Joss, M., Kappeler, R., Probst-Hensch, N., & Künzli, N. (2019, 27.3.2019). Luft und Gesundheit in der Schweiz und anderswo. *Swiss Medical Forum*, 19(1314), 213-218.

<https://doi.org/>

<https://doi.org/10.4414/smf.2019.08079>

Lee, K. K., Spath, N., Miller, M. R., Mills, N. L., & Shah, A. S. V. (2020). Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 143, 105901.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105901>

Liu, C., Cai, J., Chen, R., Sera, F., Guo, Y., Tong, S., Li, S., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Orru, H., Maasikmets, M., Jaakkola, J. J. K., Rytö, N., Breitner, S., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Hashizume, M., Honda, Y., Ng, C. F. S., Diaz, M. H., la Cruz Valencia, C., Rao, S., Palomares, A. D., Pereira da Silva, S., Madureira, J., Holobâc, I. H., Fratianne, S., Scovronick, N., Garland, R. M., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, C., Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Guo, Y. L., Pan, S. C., Milojevic, A., Bell, M. L., Zanobetti, A., Schwartz, J., Gasparini, A., & Kan, H. (2022, Oct 15). Coarse Particulate Air Pollution and Daily Mortality: A Global Study in 205 Cities. *Am J Respir Crit Care Med*, 206(8), 999-1007. <https://doi.org/10.1164/rccm.202111-2657OC>

Ohlwein, S., Kappeler, R., Kutlar Joss, M., Künzli, N., & Hoffmann, B. (2019, May). Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence. *International Journal of Public Health*, 64(4), 547-559. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01202-7>

Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2021). Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 150, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>

OSTLUFT. (2021). OSTLUFT-Jahresbericht 2020. OSTLUFT. <https://jahresbericht.ostluft.ch/2020/>

Parker, J. D., Kravets, N., & Vaidyanathan, A. (2018, Apr 17). Particulate Matter Air Pollution Exposure and Heart Disease Mortality Risks by Race and Ethnicity in the United States: 1997 to 2009 National Health Interview Survey With Mortality Follow-Up Through 2011. *Circulation*, 137(16), 1688-1697. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.117.029376>

Peters, A., Nawrot, T. S., & Baccarelli, A. A. (2021, Mar 18). Hallmarks of environmental insults. *Cell*, 184(6), 1455-1468. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.043>

Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., & Zhang, X. Y. (2013). Recommendations for reporting “black carbon” measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 8365-8379. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013>

Pinault, L., Tjepkema, M., Crouse, D. L., Weichenthal, S., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Chen, H., & Burnett, R. T. (2016, Feb 11). Risk estimates of mortality attributed to low concentrations of ambient fine particulate matter in the Canadian community health survey cohort. *Environ Health*, 15, 18. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0111-6>

Pinault, L. L., Weichenthal, S., Crouse, D. L., Brauer, M., Erickson, A., Donkelaar, A. V., Martin, R. V., Hystad, P., Chen, H., Fines, P., Brook, J. R., Tjepkema, M., & Burnett, R. T. (2017, Nov). Associations between fine particulate matter and mortality in the 2001 Canadian Census Health and Environment Cohort. *Environ Res*, 159, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.037>

Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., & Sethi, R. (2021, Apr 20). Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Sci Total Environ*, 766, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>

Rat der Europäischen Union. (1999). Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, L164/41.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1676046184453&uri=CELEX:31999L0030>

Sintermann, J., Schaufelberger, U., Eugster, R., & Götsch, M. (2021). Ultrafeine Partikel in Kloten 2019 & 2020. Belastungssituation und Einfluss des Flugverkehrs. OSTLUFT.

https://www.ostluft.ch/fileadmin/intern/LZ_Information/Publikationen/Fachberichte/BE_UltrafeinePartikel_Kloten2019-2020_GeK_20210526.pdf

SN EN. (2008). SN EN 15549:2008: Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Benzo[a]pyren in Luft – Luftbeschaffenheit.

SN EN. (2012a). SN EN 14211:2012: Aussenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz.

SN EN. (2012b). SN EN 14212:2012, Aussenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Schwefeldioxid mit Ultraviolett-Fluoreszenz.

SN EN. (2012c). SN EN 14625:2012: Aussenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie.

SN EN. (2012d). SN EN 14626:2012: Aussenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Kohlenmonoxid mit nicht-dispersiver Infrarot-Photometrie.

SN EN. (2014). SN EN 12341:2014: Aussenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10- oder PM2.5-Massenkonzentration des Schwebstaubes.

SN EN. (2017a). SN EN 16450:2017: Aussenluft – Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM10; PM2.5).

SN EN. (2017b). SN EN 16909:2017: Aussenluft-Messung von auf Filtern gesammeltem elementarem Kohlenstoff (EC) und organisch gebundenem Kohlenstoff (OC).

Stafoggia, M., Oftedal, B., Chen, J., Rodopoulou, S., Renzi, M., Atkinson, R. W., Bauwelinck, M., Klompmaker, J. O., Mehta, A., Vienneau, D., Andersen, Z. J., Bellander, T., Brandt, J., Cesaroni, G., de Hoogh, K., Fecht, D., Gulliver, J., Hertel, O., Hoffmann, B., Hvidtfeldt, U. A., Jöckel, K.-H., Jørgensen, J. T., Katsouyanni, K., Ketzel, M., Kristoffersen, D. T., Lager, A., Leander, K., Liu, S., Ljungman, P. L. S., Nagel, G., Pershagen, G., Peters, A., Raaschou-Nielsen, O., Rizzuto, D., Schramm, S., Schwarze, P. E., Severi, G., Sigsgaard, T., Strak, M., van der Schouw, Y. T., Verschuren, M., Weinmayr, G., Wolf, K., Zitt, E., Samoli, E., Forastiere, F., Brunekreef, B., Hoek, G., & Janssen, N. A. H. (2022). Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project. *The Lancet Planetary Health*, 6(1), e9-e18.

[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00277-1)

Swiss TPH. (2022). LUDOK – Interaktive Grafik zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit [Interaktive Infografik]. <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects/>

Tobias, A., Karanasiou, A., Amato, F., Roqué, M., & Querol, X. (2019). Health effects of desert dust and sand storms: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Epidemiology*, 3, 396.

<https://doi.org/10.1097/01.Ee9.0000610424.75648.58>

Traini, E., Huss, A., Portengen, L., Rookus, M., Verschuren, W. M. M., Vermeulen, R. C. H., & Bellavia, A. (2022, Jul). A Multipollutant Approach to Estimating Causal Effects of Air Pollution Mixtures on Overall Mortality in a Large, Prospective Cohort. *Epidemiology*, 33(4), 514-522.

<https://doi.org/10.1097/Ede.0000000000001492>

U.S. EPA. (2010). Integrated Science Assessment (ISA) for Carbon Monoxide.

U.S. EPA. (2015). Preamble to the Integrated Science Assessments.

<https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310244>

U.S. EPA. (2016). Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria.

U.S. EPA. (2017). Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides – Health Criteria.

U.S. EPA. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter.

U.S. EPA. (2020). Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants.

UNECE. (2017). Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter III on Mapping Critical Levels for Vegetation (version 2017).

<https://www.umweltbundesamt.de/en/manual-for-modelling-mapping-critical-loads-levels?parent=68093>

Villeneuve, P. J., Weichenthal, S. A., Crouse, D., Miller, A. B., To, T., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Wall, C., & Burnett, R. T. (2015, Jul). Long-term Exposure to Fine Particulate Matter Air Pollution and Mortality Among Canadian Women. *Epidemiology*, 26(4), 536-545.

<https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000294>

Weichenthal, S., Lavigne, E., Evans, G., Pollitt, K., & Burnett, R. T. (2016, Mar 24). Ambient PM_{2.5} and risk of emergency room visits for myocardial infarction: impact of regional PM_{2.5} oxidative potential: a case-crossover study. *Environ Health*, 15, 46. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0129-9>

Weichenthal, S., Lavigne, E., Traub, A., Umbrio, D., You, H., Pollitt, K., Shin, T., Kulka, R., Stieb, D. M., Korsiak, J., Jessiman, B., Brook, J. R., Hatzopoulou, M., Evans, G., & Burnett, R. T. (2021, Oct). Association of Sulfur, Transition Metals, and the Oxidative Potential of Outdoor PM_{2.5} with Acute Cardiovascular Events: A Case-Crossover Study of Canadian Adults. *Environ Health Perspect*, 129(10), 107005. <https://doi.org/10.1289/ehp9449>

Weichenthal, S., Villeneuve, P. J., Burnett, R. T., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Jones, R. R., DellaValle, C. T., Sandler, D. P., Ward, M. H., & Hoppin, J. A. (2014, Jun). Long-term exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort. *Environ Health Perspect*, 122(6), 609-615. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307277>

Weltgesundheitsorganisation. (2021). Globale Luftgüteleitlinien der WHO: Feinstaubpartikel (PM_{2.5} und PM₁₀), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Zusammenfassung.

Weltgesundheitsorganisation. Regionalbüro für Europa. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/346506>

WHO. (1987). Air quality guidelines for Europe. WHO Regional office for Europe.

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107364/9789289011143-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

WHO. (2000). Air quality guidelines for Europe. (2nd Edition ed.). WHO Regional Office for Europe.

http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf?ua=1

WHO. (2006). Air quality guidelines. Global update 2005. WHO Regional office for Europe.

http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1

WHO. (2021). WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. WHO. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

WHO Europe. (2021). Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution.

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/350636/9789289056533-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zheng, X. Y., Orellano, P., Lin, H. L., Jiang, M., & Guan, W. J. (2021). Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 150, 106435.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435>