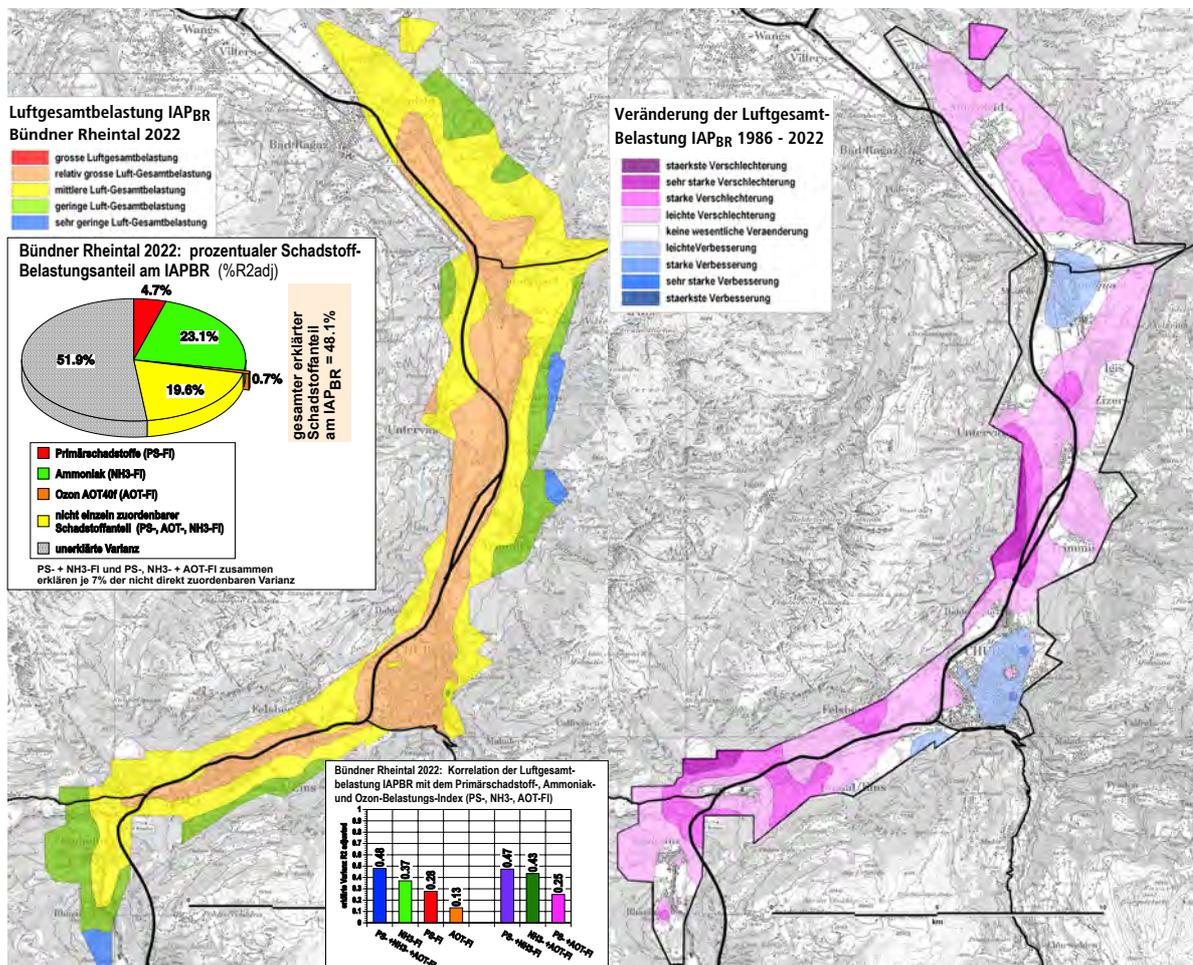




Wiederholung der Flechtenkartierungen im Bündner Rheintal und Misox von 2022 und 2023 mit einer Trendanalyse der Luftqualitätsveränderungen seit 1986 und 1990



Kurzfassung

9. Juli 2024

AGB

Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation
Umweltbeobachtung und ökologische
Planung

Impressum

Projekt-Bearbeitung

Dr. Rolf Herzig
AGB, Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation,
Umweltbeobachtung und ökologische Planung
Pfrundstrasse 18
3176 Neuenegg
Tel. 031 332 66 29, Mobil 079 218 40 71
E-mail: rolf.herzig.agb@bluewin.ch

in Zusammenarbeit mit:
PD Dr. Christian Schindler
Swiss TPH, Basel
und
Hanni Britt-Bart, Winterthur

Silvia Luginbühl, Lektorat (Finaler Bericht)

Begleitung

Hanspeter Lötscher und Viola Huschauer
Amt für Natur und Umwelt (ANU)
Ringstrasse 10
7000 Chur

Bildlegende Titelblatt

Bild links: Luftgesamtbelastung IAPBR 2022

Bild rechts: Veränderung Luftgesamtbelastung seit 1986

Kartengrundlagen: LK 100 Grau, Blatt 33, 34, 38, 39 Kt. Graubünden

Zusammenfassung

Fazit aus den Belastungsvergleichen der verschiedenartigen Luftqualitätskarten mit Flechten im Bündner Rheintal und Misox mit Schlussfolgerungen

Mit den wiederholten und vierten Flechtenkartierungen im Bündner Rheintal und Misox von 2022 und 2023 wurde nebst dem aktuellen Istzustand der Luftqualität auch eine Trendanalyse zur zeitlichen Luftqualitätsveränderung in der ganzen Zeitspanne seit den Erstuntersuchungen von 1986 und 1990 vorgenommen. Die Flechtenuntersuchungen wurden im Bündner Rheintal in den Jahren 1986, 1995, 2010/11 und 2022 und im Misox in den Jahren 1990, 1999, 2012 und 2023 durchgeführt.

Bestandteil dieser umfassenden Trendanalyse sind erstmals auch Belastungs- und Differenzkarten der drei neuen schadstoffspezifischen Primärschadstoff-, Ozon- und Ammoniakbelastung in beiden Gebieten, zurück bis zu den Erstuntersuchungen.

Die bioindikativen Luftbelastungserhebungen mit Flechten ergänzen die exakten kantonalen Luftschadstoffmessungen von NO₂, PM10, Ozon, Ammoniak und der Partikelzahl auf sinnvolle Weise und ermöglichen die gleichzeitige Umsetzung der Ergebnisse der punktuellen chemisch-physikalischen Messungen in grossflächige Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon- und Ammoniakbelastung, zusammen mit der bisher bekannten Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mit Flechten. Die aktuellen Ergebnisse aus dem Bündner Rheintal und Misox lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

Starke Reduktion der Primärschadstoffbelastung

Im gesamten Bündner Rheintal von 2022 zeigt sich gegenüber 1995 eine besonders starke Abnahme der bioindikativen Primärschadstoffbelastung (PS-FI) mit NO₂, SO₂ und PM10 mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den einst stark belasteten Rottönen auf die heute geringer belasteten Grün- und Gelbtöne (Abb.7a-c).

Im 27-jährigen Zeitabstand zu 1995 zeigt sich mit der Differenzkarte eine sehr starke Belastungsreduktion besonders deutlich im ganzen Bündner Rheintal (Abb.7d).

Im 11-jährigen Zeitabstand zu 2011 zeigen sich hingegen nur noch geringfügige Veränderungen (Abb.7e). Allerdings fällt auf, dass sich besonders im Grossraum Chur die mässige gelbe Belastung zugunsten der relativ geringen hellgrünen Primärschadstoffbelastungszone verbessert hat.

Im Misox von 2023 zeigt sich ebenfalls eine sehr deutlich Verringerung der Primärschadstoffbelastung gegenüber den früheren Untersuchungen.

Die früher noch roten Zonen mit starker bis stärkster Primärschadstoffbelastung haben sich ebenfalls zugunsten von grünen Zonen mit geringer Belastung verbessert (Abb.9a,10a,d).

Im 33-jährigen Zeitvergleich von 1990 zu 2023 zeigt sich auch im unteren Misox für 2023 mit der Differenzkarte mit ausschliesslich Blautönen eine meist starke bis sogar sehr starke Verbesserung und somit eine Abnahme der Primärschadstoffbelastung (Abb.9d).

Im 11-jährigen Zeitvergleich von 2012 zu 2023 zeigen sich im Misox für 2023 hingegen nur noch geringe Verbesserungen wie auch Verschlechterungen und in 72% der Gebiete eine weitgehend konstante Primärschadstoffbelastung. Eine geringe Verbesserung zeigt sich im oberen Roveredo seit der Eröffnung des A13-Entlastungstunnels San Fedele von 2016 sowie den erfolgten Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen. Dagegen zeigen die hellvioletten Gebiete von Grono bis Castaneda eine geringe sowie die dunkler violetten Gebiete eine starke Zunahme der Primärschadstoffbelastung (Abb.9g).

Deutliche Reduktion der Sommerdosis der Ozonbelastung

Im ganzen Bündner Rheintal hat sich auch die Sommerdosis von Ozon AOT40f (AOT40f-FI) mit Flechten gegenüber 1995 deutlich verringert, mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den stark belasteten Rot- und Orangetönen zu den heute geringer belasteten Gelb- und Grüntönen.

Daher zeigt auch die Ozon-Differenzkarte in den letzten 27 Jahren zwischen 1995 und 2022 mit hell- und dunklerblauen Farbtönen eine leichte bis starke Belastungsreduktion und nur in drei kleinen Gebieten indifferente Verhältnisse (Abb.11g).

In den letzten elf Jahren zeigt sich hingegen in mehreren Gebieten eher wieder eine Zunahme der sommerlichen Ozondosis (Abb.12g).

Auch im Misox von 2023 ist die früher ausserordentlich hohe Ozon AOT40f-Belastung mit generell orangen und roten Zonen vollständig aus dem Gebiet von Roveredo und San Vittore verschwunden (Abb.14c). Eine kleine hellrote Zone mit hoher Belastung findet sich aktuell nur noch in Leggia, und eine orange Zone mit erhöhter Ozon AOT40f-Belastung zeigt sich in Santa Maria und den Monti sowie im Gebiet von Leggia bis Cama. Eine sehr deutliche Belastungsabnahme gegenüber 1990 zeigt sich in Roveredo, wo aktuell eine hellblaue Zone mit sehr geringer Ozon AOT40f-Belastung nachgewiesen wurde. Dies hat ganz wesentlich mit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 und dem damit erzielten Belastungsrückgang von NO₂, PM10 und VOC (Präkursoren der Ozonproduktion) in Roveredo und im Gebietsstreifen von der Moesa bis hinauf nach Ai Rogg zu tun.

Weiterhin erhöhte Ammoniakbelastung mit Zu- und Abnahmen

Im Bündner Rheintal zeigt hingegen die Ammoniakbelastung (NH₃-FI) mit Flechten in den letzten 27 Jahren nur wenig Veränderung (Abb. 11d). Diese verblieb auch für 2022 mit den Farben hellrot, orange und gelb im Talboden des Bündner Rheintals zwischen 1995 und 2022 weiterhin relativ hoch. Dies besonders im nördlichen Chur, zwischen Trimmis und Untervaz sowie im Talboden und den Landwirtschaftsgebieten von Zizers, Landquart und Malans.

Mit der Ammoniak-Differenzkarte zeigen sich im 27-jährigen Zeitabstand zwischen 1995 und 2022 nebst deutlichen Belastungsabnahmen im nördlichen und südlichen Rheintal und indifferenten Verhältnissen auch grössere Gebiete mit einer geringen bis sogar sehr starken Belastungszunahme, so im Grossraum von Chur sowie in Teilen von Trimmis, Untervaz, in Landquart und Malans sowie in den Höhegebieten von

Zizers und Trimmis sowie auch im südlichen Domat/Ems und dem neuen Kreisel vor Felsberg und in einem kleinen Gebiet der Ems Chemie (Abb.11h).

Auffallend sind der Grossraum Chur und besonders die entlang der Ringstrasse gelegenen Wohn- und Industrie-/Gewerbegebiete, welche sogar eine dunkler rote Zone mit einer starken Verschlechterung zeigen. Im Gebiet der Kreuzung der Ringstrasse mit der Rheinstrasse ergibt sich sogar eine kleine Fläche mit einer sehr starken Verschlechterung. Insgesamt handelt es sich in Chur oft auch um Wohn- und Industrie-/Gewerbegebiete mit einer starken Verkehrsbelastung, einzig in den nördlichen Randzonen sind Intensivlandwirtschaft und die A13 vorherrschend. Als zusätzliche Ursache dieser Belastungszunahme wird die sogenannte "on-road-ammonium-emission" in den besonders verkehrsbelasteten Gebieten vermutet.

Eine deutlich verminderte Ammoniakbelastung zeigt sich dagegen in Teilen der Reblagen zwischen Maienfeld bis Malans und bis ins östliche Landquart, ebenso in Felsberg und Teilen von Domat/Ems. Daneben finden sich aber auch grössere Gebiete mit einer indifferenten oder geringen Belastung.

In den letzten elf Jahren zeigen sich im Vergleich zur 27-jährigen Differenzkarte besonders im Grossraum Chur, Felsberg und Domat/Ems weiterhin erhöhte Belastungsverhältnisse (Abb.12h). Einzig im Raum Chur sind die stärkeren Ammoniakbelastungen etwas zurückgegangen.

Im Misox haben sich zwischen 1990 und 2012 die orangen und roten Zonen mit hoher bis sehr hoher Ammoniakbelastung im Gegensatz zum Bündner Rheintal stärker vermindert (Abb.13d,h). Für 2012 zeigt sich teilweise auch im Talboden zwischen Monticello und Soazza bereits die gelbe Zone mit mässiger und zwischen Norantola und Lostalio sogar die beiden grünen Zonen mit geringer bis sehr geringer Ammoniakbelastung. Allerdings verschwinden die hochbelasteten orangen Zonen erst 2023 vollständig aus dem früheren Gebiet von Roveredo und San Vittore (Abb.14d). Einzig zwischen Grono und Leggia finden sich entlang der A13 und in der Landwirtschaftszone noch eine orange und rote Zone mit einer erhöhten bis starken und sehr starken Ammoniakbelastung.

Mit der Differenzkarte zeigt sich im 33-jährigen Langzeitvergleich von 1990 zu 2023 im ganzen unteren Teil des Misox mit ausschliesslich Blautönen eine deutliche Abnahme der Ammoniakbelastung (Abb.14h).

Auch im 11-jährigen Zeitvergleich zu 2012 zeigen sich für 2023 im Gebiet von Roveredo und Monticello sowie von Grono bis Castaneda eine leichte bis sogar sehr starke Abnahme in der Ammoniakbelastung (Abb.14m).

Am stärksten ist diese Verbesserung in den höher gelegenen Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo, welche seit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels 2016 zusammen mit ganz Roveredo sehr wirksam von der A13 und deren Emissionen befreit wurden.

Eine sehr deutliche Belastungszunahme von Ammoniak zeigt sich hingegen im Gebiet des nördlichen San Fedele Tunnels entlang der A13 bis hinauf nach Grono, was ebenfalls mit der verkehrsbedingten "on-road-ammonium-emission" erklärt wird.

Luftgesamtbelastung zeigt differenzierte Veränderungen mit Belastungszunahmen wie auch -abnahmen

Im Bündner Rheintal von 2022 zeigt die Luftgesamtbelastung IAP_{BR} gegenüber 1986 eine je um 10% und gegenüber 2010/11 um 4% vergrösserte orange und gelbe Zone mit relativ grosser und mittlerer Luftgesamtbelastung entlang der A13 und Kantonsstrasse von Maienfeld bis Tamins mit dem Grossraum Chur und Landquart (Abb. 4a-c).

Dagegen zeigt sich in Rhäzüns Runcaglia eine blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung, dies erstmals wieder seit 1986. Und in Chur konnte im Gebiet der Quaderschule sogar schon eine kleine grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung festgestellt werden, welche mit der deutlichen Schadstoffentlastung dank Verkehrsverflüssigung des seither gebauten Quaderkreisels erklärt werden kann.

Die noch 1986 und auch 1996 festgestellte rote Zone mit starker Luftgesamtbelastung in Chur und in Landquart konnte auch 2022 wie bereits 2010/11 nicht mehr nachgewiesen werden.

Im 36-jährigen Langzeitvergleich der Differenzkarte von 1986 zu 2022 zeigen 63% der Gebiete im Bündner Rheintal mit Purpurtönen eine stärkere Luftgesamtbelastung, während 35% der nicht eingefärbten Gebiete eine weitgehend konstante und 7% eine geringere Luftgesamtbelastung aufweisen (Abb.4d).

Die Gebiete mit sehr starker Verschlechterung bzw. Zunahme der Luftgesamtbelastung befinden sich zwischen Trimmis und Untervaz und in der nördlichen Talflanke zwischen Domat/Ems und Tamins.

Dagegen zeigen auch 7% der Gebiete eine geringe bis stärkere Verbesserung bzw. Abnahme der Luftgesamtbelastung, dies im Grossraum von Chur und in Landquart. In Landquart waren die mehrfachen lufthygienischen Sanierungen mit der Substitution von der ehemals sehr stark belastenden Schweröl- bis zur Erdgasfeuerung und letztlich zum Produktionsstopp der Grossziegelei und die Umfahrung der Prättigauerstrasse der Hauptgrund dieser Verbesserung.

Im 11-jährigen Zeitvergleich zeigt sich für 2022 in 61% der grauen Gebiete eine weitgehend konstante Gesamtbelastung (Abb. 4e).

In 30% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich hingegen eine geringe Verschlechterung der Luftgesamtbelastung, dies in Teilen der Rebbaugebiete der Bündner Herrschaft, im südlichen Landquart und zwischen Untervaz und Haldenstein sowie zwischen Felsberg, Domat/Ems und Tamins und im östlichen und strassennahen Gebiet zwischen Tamins und Bonaduz. In 2% der satter purpurfarbenen Gebiete zeigt sich eine starke Belastungszunahme. Diese Gebiete mit starker Verschlechterung befinden sich auf der Liechtensteiner "Bergstrecke" in St. Luziensteig und strassennah im obersten Maienfeld, in Teilen von Felsberg sowie in nördlicher Hanglage in Tamins.

Nebst der zeitlichen Zunahme in der Luftgesamtbelastung konnten aber auch Gebiete mit einer geringen Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese Gebiete mit einer Abnahme der Luftgesamtbelastung finden sich im südlichen und nördlichen Chur und weiter bis ins südliche Trimmis, in Obersays und im obersten Zizers sowie in höheren und heute schon teilweise bereits biologisch bewirtschafteten Reblagen von Malans und ebenso in Teilen von Bonaduz und in Rhäzüns Runcaglia.

Im Misox von 2023 hat sich die Luftgesamtbelastung gegenüber früheren Untersuchungen auch soweit verbessert, dass die rote Zone mit grosser Luftgesamtbelastung vollständig aus dem früheren Gebiet von Roveredo, Grono und San Vittore verschwunden ist (Abb5a-e). Die orange Zone mit relativ starker Belastung und geringem Flechtenbewuchs findet sich entlang der A13 aber immer noch in 78% der Gebiete.

Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung und mittlerem Flechtenbewuchs findet sich erstmals wieder in 14% der höheren Lagen von Roveredo im Gebiet Ai Rogg und San Fedee, in Santa Maria und in nördlicher Hanglage von Cama. Im oberen Teil von Santa Maria und den Monti findet sich mit einem Flächenanteil von 8% die grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung und viel Flechtenbewuchs. Die noch 1990 nachgewiesene blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung und sehr viel Flechtenbewuchs kann auch 2023 nicht mehr festgestellt werden.

Im 33-jährigen Langzeitvergleich zu 1990 haben sich die orangen Zonen mit starker Luftgesamtbelastung um fast 20% vergrössert, während sich die gelben Zonen mit mittlerer Belastung um etwa diesen Betrag verkleinert hat.

Leicht vergrössert hat sich die grünen Zonen mit geringer Gesamtbelastung, dies sogar bei einer deutlichen Verkehrszunahme auf der Misoxer A13 von 39 - 58% seit 1990. Die noch 1990 in den Monti von Santa Maria festgestellte blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung konnte 1999, 2012 und auch 2023 nicht mehr nachgewiesen werden.

Im 33-jährigen Langzeitvergleich zeigt sich mit der Differenzkarte im unteren Teil des Misox für 2023 in 42% der transparentfarbenen Gebieten eine weitgehend konstante Luftgesamtbelastung (Abb.5e). In 45% der hell purpurfarbenen Gebieten zeigt sich hingegen im westlichen und nördlichen Untersuchungsgebiet eine leichte, in den dunkler purpurfarbenen Gebieten eine starke und im kleinen, satter purpurfarbenen Gebiet sogar eine sehr starke Verschlechterung bzw. Zunahme der Luftgesamtbelastung.

Demgegenüber zeigt sich in den höher gelegenen Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo und entlang der Kantonsstrasse in Grono aber auch ein hellblaues Gebiet mit einer geringen Abnahme der Luftgesamtbelastung.

Im 11-jährigen Zeitvergleich zeigt die Differenzkarte für 2023 in 62% der Gebiete eine weitgehend konstante Luftgesamtbelastung (Abb. 5g). Dagegen zeigt sich in 36% der hellblauen Gebiete auch bereits eine geringe Verbesserung der Luftgesamtbelastung, dies im ganzen Siedlungsgebiet von Roveredo, in Teilen von Grono bis Castaneda und Santa Maria. In den Quartieren Ai Rogg und San Fedee im oberen Roveredo zeigt sich sogar ein kleineres Gebiet mit mind. 1% mit starker bis sehr starker Verbesserung der Luftgesamtbelastung.

Diese Verbesserung steht im direkten Zusammenhang mit der Eröffnung des A13-Entlastungstunnels San Fedele von 2016 (fein gestrichelter A13-Verlauf gegenüber dickem alten Verlauf quer durch Roveredo) sowie den bereits erfolgreichen Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen in diesen Gebieten (Abb. 5g). Diese Verbesserung steht im direkten Zusammenhang mit der Eröffnung des A13-Entlastungstunnels San Fedele von 2016 (fein gestrichelter A13-Verlauf gegenüber dickem alten Verlauf quer durch Roveredo) sowie den bereits erfolgreichen Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen in diesen Gebieten (Abb. 5g).

Belastungsanteile der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung an der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} im Bündner Rheintal und Misox von 1990 - 2023

Mit regressionsanalytischen Methoden wurden die Belastungsanteile der mit den Flechten-Schadstoffmodellen ermittelten Scores der Primärschadstoffe (PS-FI), Ozon AOT40f (AOT-FI) und Ammoniak (NH₃-FI) an der Luftgesamtbelastung (IAP_{BR}) im Bündner Rheintal und Misox berechnet. Die durch die drei Schadstoffscores erklärten Teile der Varianz von IAP_{BR} wurden anhand verschiedener Regressionsmodelle berechnet. Dabei wurde unterschieden zwischen Varianzanteilen, die eindeutig einem der drei Schadstoffscores zugeordnet werden können und Anteilen, die nicht eindeutig einem der drei Schadstoffscores zugeordnet werden können. In den Kuchen- und Säulendiagrammen sind fünf Varianzanteile dargestellt: die drei Varianzanteile, welche eindeutig einem Schadstoffscore zugeordnet werden können, der Anteil der durch die drei Schadstoffscores gemeinsam erklärten Varianz und der durch die Schadstoffscores unerklärte Anteil der Varianz. Da sich die verschiedenen Modelle in der Anzahl der jeweils betrachteten Schadstoffvariablen unterscheiden und die Stichprobenumfänge zwischen den verschiedenen Perioden variieren, wurde zum Vergleich der Modelle das adjustierte R-Quadrat R^2_{adj} herangezogen. Die so erzielten Belastungsanteile der Primärschadstoffe, von Ozon AOT40f und Ammoniak an der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} wurden mit Kuchen- und Säulendiagrammen graphisch veranschaulicht und nachträglich in die Übersichtsdarstellungen von Abbildung 4 und 5 der Kurzfassung sowie von Abb.15 und 21 des Gesamtberichts integriert. Im Anhang 8.3 des Gesamtberichts finden sich dazu noch vertiefte Informationen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Wie bereits aus der synoptischen Analyse der schadstoffspezifischen Belastungskarten gut ersichtlich ist, spielte die Primärschadstoffbelastung zusammen mit Ozon AOT40f zwischen 1990 und 2012 eine für den IAP_{BR} prägende Bedeutung. Dank der mit vielfältigen Luftreinhalte-massnahmen erzielten starken Entlastung mit Primärschadstoffen (NO₂, SO₂, PM10) und indirekt auch von Ozon hat allerdings heute die kaum veränderte hohe Ammoniakbelastung (NH₃) stark an Einfluss gewonnen. Dies belegen nun auch die Ergebnisse der oben beschriebenen Regressionsanalysen zu den veränderten Belastungsanteilen am IAP_{BR} anhand der Kuchen- und Säulendiagramme zwischen 1990 und 2023 mit Übersichtsdarstellungen von Abb. 4 und 5 der Kurzfassung sowie Abb. 15 und 21 im Gesamtbericht. Im Anhang 8.3 des Gesamtberichts finden sich für's Bündner Rheintal und Misox zusätzlich die vergrösserten und damit besser lesbaren Abbildungen 4 - 6 und 7 - 9.

Zeitliche Veränderung der Belastungsanteile im Bündner Rheintal

Der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffbelastung PS-FI (rot) am IAP_{BR} beträgt für 1995 24% und für Ozon AOT-FI 2% sowie 53% für PS- und AOT-FI zusammen, was den Hauptteil der gelben, nicht einzeln zuweisbaren Varianz von 53.9% ausmacht (Abb. 4c).

Für 2010/11 und 15 Jahre später beträgt der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffbelastung PS-FI (rot) am IAP_{BR} 39.5% und für Ozon AOT-FI 4.3% (orange). Von der nicht einzeln zuweisbaren Varianz (gelb) von insgesamt 11.2% tragen weitere 2% der gemeinsamen Primärschadstoff- PS-FI und Ozon AOT-FI-Belastung zur Erklärung des IAP_{BR} bei (Abb. 4b).

Für 2022 und 36 Jahre später beträgt der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffen PS-FI (rot) am IAP_{BR} dank vielfältigen lufthygienischen Sanierungserfolgen noch 4.7% und für Ozon AOT-FI nur noch 0.7%. Von der nicht einzelnen Schadstoffen zuweisbaren Varianz (gelb) von 19.6%, tragen die gemeinsame Belastung mit Primärschadstoffen und NH₃-FI und aller drei Schadstoffkomponenten (PS-, AOT- und NH₃-FI) je noch 7% zur Erklärung des IAP_{BR} bei (Abb. 4a).

Dagegen ist der Belastungsanteil für Ammoniak NH₃-FI (grün) am IAP_{BR} für 1995 varianzstatistisch noch gar nicht nachweisbar. Bereits 2010/11 trägt allerdings Ammoniak NH₃-FI mit 4.3% und mit PS- und NH₃-FI zusammen mit weiteren 2% zur Erklärung des IAP_{BR} bei.

Aktuell hat der Belastungsanteil von Ammoniak NH₃-FI am IAP_{BR} für 2022 auf 23.4% zugenommen, und je weitere 7% tragen die gemeinsame Belastung von PS- und NH₃-FI sowie aller drei Schadstoffkomponenten zusammen (PS-, AOT- und NH₃-FI) zum IAP_{BR} bei.

Diese zeitlichen Veränderungen in der Prägung der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mit den drei Schadstoffkomponenten und deren Kombinationen zeigt sich auch in den Säulendiagrammen in den Übersichtsdarstellungen von Abb. 4 und 5, bzw. 15 und 21.

Somit sinkt im Bündner Rheintal der Belastungsanteil der Primärschadstoffe und Ozon AOT_{40f} und der gemeinsame Anteil beider Schadstoffkomponenten an der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von insgesamt 79% für 1995 auf nur noch ca. 12% für 2022.

Demgegenüber steht die stetige Belastungszunahme von Ammoniak NH₃-FI und der nicht weiter trennbaren Belastungsanteile am IAP_{BR} vom noch nicht nachweisbaren Anteil von 1995 auf insgesamt 30% für 2022.

Zeitliche Veränderung der Belastungsanteile im Misox

Im Misox von 1990 ist der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffbelastung PS-FI (rot) varianzstatistisch nicht nachweisbar, allerdings trägt der gemeinsame Anteil Primärschadstoff- und Ozonbelastung 34% von insgesamt 45.4% (gelb) zum IAP_{BR} bei (Abb. 5d).

Für 2012 und 22 Jahre später beträgt der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffbelastung PS-FI (rot) am IAP_{BR} 22.6% und für Ozon AOT_{40f}-FI 1.9% (orange) sowie 2% für PS- und AOT-FI zusammen. Von der der nicht einzeln zuweisbaren Varianz (gelb) von insgesamt 40.3% tragen weitere 2% von PS- und AOT-FI zum IAP_{BR} bei (Abb. 5c).

Für 2023 und 33 Jahre später beträgt der direkte Belastungsanteil der Primärschadstoffe PS-FI (rot) am IAP_{BR} dank vielfältigen lufthygienischen Sanierungserfolgen noch 9.2% und für Ozon AOT_{40f}-FI nur noch 5.6%. Die nicht einzelnen Schadstoffen zuweisbare Varianz (gelb) beträgt dagegen hohe 61.1%. Davon trägt die gemeinsame Belastung mit PS- und AOT-FI nur gerade 6% zum IAP_{BR} bei (Abb. 5a).

Demgegenüber beträgt der Belastungsanteil für Ammoniak NH₃-FI (grün) am IAP_{BR} für 1995 erst 4.8% und jener der drei Schadstoffkomponenten zusammen (PS-, AOT- und NH₃-FI) weitere 6%. Für 2012 beträgt der Belastungsanteil für Ammoniak am IAP_{BR} 6.8%.

Für 2023 steigt der aktuelle Belastungsanteil von Ammoniak NH₃-FI am IAP_{BR} auf 14.6%. Weitere 55% tragen die gemeinsame Belastung von PS- und NH₃-FI bei, was den grössten Anteil der nicht direkt zuweisbaren Schadstoffbelastung von 61.1% ausmacht.

Somit sinken auch im Misox die Belastungsanteile der Primärschadstoffe und von Ozon AOT40f und der gemeinsame Anteil beider Schadstoffkomponenten an der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von insgesamt ca. 40% für 1995 auf nur noch 20% für 2023.

Demgegenüber steht aber, wie im Bündner Rheintal, die stetige Belastungszunahme von Ammoniak NH₃-FI und der nicht weiter trennbare Belastungsanteil (PS- und NH₃-FI) am IAP_{BR} von ca. 11% für 1995 auf insgesamt ca. 65% für 2023.

In den entsprechenden Säulendiagrammen in Abb. 4 -6 und Abb. 7 -9 zeigt sich diese zeitliche Veränderung in der Prägung der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mit den drei Schadstoffkomponenten sowohl im Bündner Rheintal wie auch im Misox je sehr deutlich.

Diese Ergebnisse stimmen auch gut überein mit den entsprechenden Belastungskarten in der Kurzfassung und im Gesamtbericht und mit den bisher erreichten lufthygienischen Sanierungserfolgen zur Belastungsreduktion von Primärschadstoffen, und indirekt auch zur Brechung der früher sehr hohen Ozonspitzenwerte. Ebenso widerspiegeln die Ergebnisse mit dem NH₃-FI auch die in den letzten Jahren anhand von Passivsammlermessungen im Bündner Rheintal, vorderen Prättigau und Misox beobachtete leichte Erhöhung der Belastungszunahme von Ammoniak.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die aktuelle Luftgesamtbelastung hat sich im Bündner Rheintal und Misox von 2022 und 2023 in der 33- bis 36-jährigen Beobachtungsperiode soweit verbessert, dass die früheren roten Zonen mit grosser Luftgesamtbelastung und wahrscheinlichen Grenzwert-Überschreitungen von NO₂ und SO₂ vollständig aus den Siedlungszentren von Chur, Landquart, Roveredo und Grono verschwunden sind und auch die blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung in Rhäzüns Runcaglia, in Obersays und Zizers wie bei der Erstuntersuchung von 1986 auch für 2022 wieder nachgewiesen werden konnte.

Allerdings haben sich die stärker belasteten orangen und gelben Zonen mit relativ grosser und mittlerer Luftgesamtbelastung auf Kosten der grünen Zone mit geringer Belastung um je 4-10% vergrössert, womit es auch zu einer gewissen Nivellierung der Luftgesamtbelastung zu den stärker belasteten Zonen gekommen ist. Diese leichte Belastungszunahme in der orangen Zone deckt sich recht gut mit den eher stagnierenden PM₁₀, Ozon und Ammoniak-Konzentrationen in den letzten zehn Jahren, wenn man mitberücksichtigt, dass Baumflechten wirkungsbezogen und sehr komplex und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung auf alle vorhandenen Schadstoffe reagieren.

Die Belastungsmuster der Primärschadstoffbelastung und teilweise auch der Ammoniak- und Ozonbelastung mit Flechten im Bündner Rheintal und Misox von 1990/95, 2011/12 und 2022/23 zeigen unterschiedlich starke Ähnlichkeiten mit denjenigen der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 1986, 1990, 1995, 1999, 2011/12 und 2022/23, was auf die grosse Bedeutung der Primärschadstoffe NO₂, SO₂ und PM₁₀ sowie auch von Ammoniak und Ozon zur guten Erklärung der Luftgesamtbelastung hinweist. Diese Ähnlichkeiten in den Belastungsmustern zeigen sich im Bündner Rheintal und Misox sowohl im Talboden in den Siedlungsräumen und entlang der A13 und der Kantonsstrasse zwischen Maienfeld und Chur in den orangen und z.T. roten Zonen als auch in den Höhegebieten beider Luftqualitätskarten mit grünen und blauen, niedrig belasteten Zonen.

Teilweise Diskrepanz zwischen der Luftgesamtbelastung und den schadstoffspezifischen Ergebnissen

Im direkten Vergleich der Belastungskarten der Luftgesamtbelastung mit den Karten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung fällt allerdings auch auf, dass es besonders im Bündner Rheintal trotz der deutlich nachgewiesenen Belastungsabnahme von Primärschadstoffen, Ozon AOT40f sowie teilweise auch von Ammoniak zu einer leichten Zunahme der orangen Zonen mit einer relativ grossen Luftgesamtbelastung gekommen ist, welche sich allerdings von 10% während 36 Jahren auf noch 4% in den letzten elf Jahren reduziert hat. Im umfassenden visuellen Kartenvergleich der aktuellen, früheren und differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der integralen Luftgesamtbelastung und den Veränderungen des IAP_{BR} mit Flechten und den tatsächlich gemessenen Luftschadstoffdaten von Stickstoffdioxid NO₂, Schwefeldioxid SO₂, Feinstaub PM10, Ozon und Ammoniak zeigt sich nämlich die bekannte Tatsache, dass alle vier Einzelschadstoffe zur guten Erklärung der aktuellen und differentiellen Karten der Luftgesamtbelastung in unterschiedlichem Ausmass beitragen und gleichzeitig notwendig sind.

Weil aber die Luftgesamtbelastung, gemessen mit dem Luftgesamtbelastungs-Index IAP_{BR}, alle phytotoxischen Luftschadstoffe mit ihren komplexen, synergistischen und antagonistischen Wechselwirkungen als Wirkungsantwort gemeinsam wiedergibt, darf auch keine einfache additive Belastungssumme der fünf Einzelschadstoffe NO₂, SO₂, PM10, Ozon AOT40f und Ammoniak NH₃ erwartet werden, was sich im direkten Kartenvergleich sehr deutlich gezeigt hat. Hinzu kommt die Tatsache, dass diese fünf Luftschadstoffe nur die wichtigsten Repräsentanten aus einem sehr grossen Kollektiv von wirkungsrelevanten Luftschadstoffen darstellen.

Eine wirkungsrelevante Kategorie der Pestizide (Pflanzenwirkstoffe) fehlt in diesen Vergleichen vollkommen. Insbesondere Fungizide, welche sowohl im Reb- wie auch im Obst-, Beeren- und Ackerbau flächendeckend und intermittierend eingesetzt werden, entfalten ihre Schadwirkung auch auf den Pilzpartnern der symbiotisch lebenden Flechten. Neueste Pestiziduntersuchungen im Münstertal und Bündner Rheintal belegen die Relevanz dieser Schadstoffklasse, welche vom Einsatzgebiet mit der Windverfrachtung (Abdrift) über mehrere hundert Meter verfrachtet werden können und so in Gebiete gelangen können, wo diese nichts zu suchen hat.

Im Vergleich der Belastungsmuster und der zeitlichen Belastungsänderung der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit Flechten mit den chemisch-physikalischen Punktmessungen von NO₂, PM10 und Ammoniak des ANU im Bündner Rheintal und Misoix hat sich ebenfalls eine recht gute Übereinstimmung und Gleichläufigkeit in der Belastungsreduktion und somit auch der Plausibilität der schadstoffspezifischen Karten gezeigt. Dies belegen übrigens auch die erst nachträglich durchgeführten Analysen zu den Belastungsanteilen der Primärschadstoffe, von Ozon-AOT40f und Ammoniak an der Luftgesamtbelastung IAP_{BR}.

Die teilweise beträchtlichen Belastungsreduktionen der Primärschadstoffe, also von NO₂, SO₂ und PM10, aber auch von Ozon zeigen sich trotz der eingetretenen starken Mfz-Verkehrszunahme in den letzten 36 Jahren, welche sich auf der A13, der Prättigauer- und Tamiserstrasse um einen Faktor 1.3 bis 2.5 z.T. mehr als verdoppelt hat.

Trotz der teilweise festgestellten starken Entlastung mit Primärschadstoffen NO₂, SO₂, PM₁₀ und Ozon sowie gebietsweise von Ammoniak zeigt sich mit der Flechtenwirkung und den noch vorhandenen orangen Zonen der Luftgesamtbelastung, dass die aktuellen chronischen Belastungen von Ozon und Ammoniak und gebietsweise auch von NO₂ und PM₁₀ im Bündner Rheintal und Misox immer noch deutlich zu hoch sind und zu beträchtlichen Schäden bei den empfindlichen Flechtenarten führen.

Zum Schutz von empfindlichen Ökosystemen wie z.B. Nadelwäldern wurde für die Sommerdosis von Ozon AOT40f der sogenannte Critical Level von 5ppm*h definiert. Für Flechten und Moose liegt dieser noch tiefer, während die aktuellen Belastungswerte noch deutlich höher sind. Dasselbe gilt auch für Ammoniak, welches für empfindliche Pflanzen eine hohe Phytotoxizität aufweist. Hier gilt ein Critical Level für Flechten und Moose von 1-2µg/m³.

Auch dieser Wert wird aktuell in vielen Teilen des Bündner Rheintals und im Misox noch deutlich überschritten. Eine weitere Belastungsreduktion auch von PM₁₀, NO₂, Ammoniak und Ozon als Sekundärschadstoff wird sich mit Sicherheit positiv auf die Gesundheit und das Wachstum der Flechten auswirken.

Die festgestellten Belastungsreduktionen sind das heute gut sicht- und messbare Ergebnis der langjährigen und stringenten Luftreinhaltepolitik von Bund und im Kanton Graubünden und gründen auf sehr vielfältigen und erfolgreichen Emissionsminderungen in Industrie-, Gewerbe-, Dienstleistungsbetrieben und von Haushalten sowie auf stark verbesserter Abgasteknik von Motorfahrzeugen mit Katalysatoren und Partikelfiltern, Gebäudesanierungen, vermehrtem Einsatz von Wärmepumpen, PV-Anlagen sowie der Fernwärmeversorgung in Teilen der Stadt Chur.

Für eine signifikante Entlastung von NO₂, PM₁₀, VOCs und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen sowie der Partikelzahl im Verkehrsbereich werden auch die zunehmende e-Mobilität und die vor der Einführung stehende strengere Euro7-Norm sorgen. Die kommende Euro7-Norm wird neu auch den wichtigen Reifen- und Bremsabrieb, die Begrenzung der Partikelzahl und das on-board Monitoring zur permanenten Abgasmessung erstmals verbindlich regeln und begrenzen. Auch die in der Schweiz bevorstehende Verschärfung des PM₁₀-Grenzwertes nach den Vorschlägen der WHO und EKL wird zusätzlich grosse Wirkung zeigen.

Umfassende Grundlagen für nächste lufthygienische Erfolgskontrolle mit den Flechten sind geschaffen

Mit einer erneuten Flechtenuntersuchung in etwa zehn Jahren kann der Erfolg auch der künftigen Luftreinhaltemassnahmen und der zu erwartende weitere Rückgang der Luftbelastungen ganzheitlich mit der Luftgesamtbelastung und schadstoffspezifisch mit der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung erneut sehr differenziert und flächendeckend im ganzen Bündner Rheintal, Hinter rheintal und Misox erfasst und mit früheren Untersuchungen verglichen werden und so wertvolle Grundlagen zur lufthygienischen Erfolgskontrolle und für weiter notwendige Sanierungsmassnahmen zur Luftreinhaltung liefern.

Wiederholung der Flechtenkartierungen im Bündner Rheintal und Misox von 2022 und 2023 mit einer Trendanalyse der Luftqualitätsveränderungen seit 1986 und 1990

Ausgangslage der vierten Flechtenkartierungen im Bündner Rheintal und Misox von 2022 und 2023

Im Bündner Rheintal und im unteren Misox wurden 2022 und 2023 zum vierten Mal Luftqualitätsuntersuchungen mit der Bündner Rheintaler Flechtenindikationsmethode durchgeführt, mit einer Trendanalyse zur Luftqualitätsveränderung, zurück bis zu den Erstuntersuchungen vor 33-36 Jahren von 1986 und 1990.

Die beiden Flechtenkartierungen erfolgten nach dem erfolgreichen Abschluss der umfangreichen Rekalibration der beiden heute 30-jährigen Flechtenindikationsmethoden mit aktuellen und früheren modellierten Luftmessdaten des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Diese Rekalibration hat sowohl zu einer deutlichen Bestätigung der Flechtenbioindikation als sehr geeignetes Instrument zur grossflächigen Überwachung der Luftqualität als auch zu einer markanten Erweiterung der Aussagemöglichkeiten der Methodik geführt. Mit drei schadstoffspezifischen Flechten-Indikatoren können heute mit denselben Erfassungsdaten der Flechtenvegetation gleichzeitig auch präzise Aussagen zur Belastung mit primären Luftschadstoffen (NO₂, PM₁₀ und SO₂), Ammoniak und Ozon gemacht werden.

Dies ermöglicht eine wesentlich umfassendere Zustands-Diagnose der aktuellen Luftqualität und deren zeitlichen Entwicklung. Mit den rekalibrierten Flechtenschadstoff-Modellen mit den schadstoffspezifischen Luftqualitäts-Indizes haben sich statistisch hochwertige und hochsignifikante Korrelationsbeziehungen mit Bestimmtheitsmassen von R²adi von 0.75 - 0.94 ergeben, welche gesicherte Rückschlüsse auf die vorherrschende Luftschadstoffbelastung zulassen. Die Ergebnisse der modellierten Schadstoffkarten von NO₂, PM₁₀ und Ozon wurden mit den im Gebiet vorhandenen Immissionsmessungen verifiziert. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den modellierten Ergebnissen, was die Plausibilität der Schadstoffkarten weiter unterstützt. Diese neuen schadstoffspezifischen und regionalisierten Flechtenschadstoff-Modelle und der IAP_{BR}² und IAP₁₈ der Luftgesamtbelastung gelten sowohl für Graubünden und das Fürstentum Liechtenstein, die Zentralschweiz, das tiefe Mittelland als auch für die ganze Schweiz¹.

- Mit der wiederholten Flechtenkartierung im Bündner Rheintal von 2022 wurde diese erweiterte Untersuchungsmethodik zum ersten Mal auch mit Differenzkarten zur Belastungsveränderung der Primärschadstoff-, Ozon- und Ammoniakbelastung zurück bis 1995 angewendet, nachdem diese bereits im Domleschg, Val Schons und Hinterrheintalgebiet³ mit erstmaligen Felddaten von 2017 und noch ohne Differenzkarten erfolgreich eingesetzt wurde.

¹ Herzig R, Schindler Ch, Urech M, Rihm B, Lötscher HP, Thomann G. (2020) Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09001-x>

² IAP_{BR}: Luftgütwert Bündner Rheintal "Index of Atmospheric Purity", IAP₁₈: Schweizer Mittelland

Bioindikation mit Flechten

Die Bioindikation mit Flechten ist eine standardisierte Methode, welche die biologischen Auswirkungen der Luftbelastung erfasst. Der mittels der Flechtenartenvielfalt und Frequenz gemessene Luftgütwert IAP_{BR} ist aufgrund der Eichung mit technisch gemessenen Luftschadstoffen ein zuverlässiger Indikator für die Gesamtbelastung der Luft und ermöglicht eine flächendeckende und räumlich präzise Charakterisierung der Luftqualität.

Die Bündner Flechtenindikationsmethode unterscheidet fünf verschiedenfarbige Zonen der Gesamtbelastung der Luft, welche bezüglich der Flechtenwirkung als stark, relativ stark, mittel, gering und sehr gering bezeichnet werden. Die Rekalibration der Flechtenindikationsmethoden von 2014-18 mit aktuellen und früheren modellierten Luftmessdaten hat nicht nur zu einer deutlichen Bestätigung der Flechtenbioindikation als sehr geeignetes Instrument zur grossflächigen Überwachung der Luftqualität geführt, sondern erlaubt neu auch Aussagen zur Einzelstoffbelastung mit primären Luftschadstoffen (NO₂, PM10 und SO₂), der Sommerdosis von Ozon AOT40f und mit Ammoniak.

Flechten reagieren auf kleinste Beeinträchtigungen der Luftqualität mit sicht- und messbaren Veränderungen. Mit zunehmender Luftbelastung verschwinden Flechten von den Baumstämmen, kehren jedoch bei Verringerung der Schadstoffbelastung ebenso rasch wieder zurück. Diese Eigenschaft wird für die Erfolgskontrolle von Luftreinhalte-massnahmen genutzt. Dabei werden die Ergebnisse einer Wiederholungskartierung mit denjenigen der Ersterhebung verglichen.

Abb. 1 Trägerbäume mit Frequenzgitter zur Messung des Luftgütwertes IAP_{BR}.

Links Baum im Stadtgebiet von Landquart, mit sehr wenig Flechtenbewuchs in der flechtenarmen orangen Zone mit relativ grosser Luftgesamtbelastung.

Rechts Baum im Rheintaler Berggebiet von Obersays mit üppigem Flechtenbewuchs der blauen Normalzone, welche eine sehr geringe Luftgesamtbelastung anzeigt.

Abb. 2 hoch sensible Flechtenarten gegenüber Luftschadstoffen, welche fast nur in der blauen Luftgütezone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung vorkommen.

Links *Parmelia glabra*
Diese Art repräsentiert die blaue Luftgütezone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung.

Rechts *Physconia distorta*
Diese Art repräsentiert die grüne Luftgütezone mit geringer Luftgesamtbelastung.



Aktuelle Luftbelastung im Bündner Rheintal und Misox mit Flechtenkartierungen von 2022 und 2023 und einer Trendanalyse zur Luftqualitätsveränderung

Im Bündner Rheintal erfolgte 2022 zum vierten Mal eine Luftqualitätsuntersuchung mit der Bündner Rheintaler Flechtenindikationsmethode mit einer Trendanalyse zur Luftqualitätsveränderung, zurück bis zu den Erstuntersuchungen von 1986, vor 36 Jahren. Auch im unteren Misox wurde 2023 die Flechtenkartierung zum vierten Mal wiederholt und auch diese erreicht für die Trendanalyse eine Zeitspanne von 33 Jahren. Die umfangreichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Aktuelle Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal von 2022

In der Luftgesamtbelastung (IAP_{BR}) der Luftgütekarte von 2022 zeigt sich gegenüber 2010/11 eine etwas vergrösserte orange und gelbe Zone mit relativ grosser und mittlerer Luftgesamtbelastung entlang der A13 und Kantonsstrasse. Die aktuellen Ergebnisse der Luftgesamtbelastung der bisher vier Flechtenkartierungen von 2022, 2012⁴, 1995⁵ und 1986⁶ sind in der Gesamtübersicht von Abbildung 4 vergleichend dargestellt und ausführlich interpretiert.

Wie bereits zur Erstuntersuchung von 1986 zeigt sich aktuell in Rhäzüns Runcaglia für 2022 erstmals wieder eine blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung (Abb.4a,c). Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung hat sich gegenüber 2011 etwas vergrössert.

Die noch 1986 und auch 1995 festgestellte rote Zone mit starker Luftgesamtbelastung in Chur und z.T. in Landquart konnte dagegen auch 2022 wie schon 2011 nicht mehr nachgewiesen werden.

Gegenüber 2011 deutlich verringert hat sich allerdings die grüne Zone mit geringer Gesamtbelastung, dies besonders zwischen Felsberg und Tamins sowie in Maienfeld und in St. Luziensteig. Im Grossraum Chur zeigt sich in einem eng begrenzten Gebiet des Quaderplatzes sogar schon eine kleine grüne Insel mit geringer Gesamtbelastung, die wohl auch der Verkehrsverflüssigung des neuen Quaderkreises zu verdanken ist. Im 36-jährigen Langzeitvergleich zu 1986 (Abb.4c) haben sich die orange und gelbe Zone mit mittlerer und mässiger Luftgesamtbelastung je um ca. 10% vergrössert, dies allerdings bei einer Verdoppelung der Verkehrsmenge auf der A13. Dagegen hat sich die grüne Zone mit geringer Gesamtbelastung halbiert.



Abb. 3 Blick auf Chur ins nördliche Rheintal hinein.

³ Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Gebiet Domleschg, Val Schons und Rheinwald von 2017. Ergebnisbericht 7. Juli 2020. Dr. Rolf Herzig, AGB, Bern.

⁴ Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Kanton Graubünden - Zweite Erfolgskontrolle. Dritte Erhebung im Bündner Rheintal von 2011. Schlussbericht 28. Oktober 2013, Dr. Rolf Herzig, AGB, Bern.

Ganz verschwunden ist hingegen die rote Zone mit grosser Gesamtbelastung. Insgesamt ist es somit in dieser 36-jährigen Zeitspanne zu einer Nivellierung der Luftgesamtbelastung zu den stärker belasteten Zonen orange und gelb gekommen, wie aus Tabelle 1 zu erkennen ist.

Bündner Rheintal			Flächenanteil %				Differenzfläche %	
Luftgesamtbelastung IAP _{BR} (Gesamtimmission)	Flechten- bewuchs	Zonen- Farbe	1986	1996	2011	2022	1986/2022	2011/2022
			%	%	%	%	36 Jahre	11 Jahre
grosse Gesamtbelastung	sehr wenig	rot	2.1	1.3	0.0	0.0	-1.9	0.0
relativ grosse Gesamtbelastung	wenig	orange	24.2	20.5	30.5	34.0	10.1	3.9
mittlere Gesamtbelastung	mittel	gelb	39.0	53.1	45.5	48.9	10.4	3.8
geringe Gesamtbelastung	viel	grün	30.2	24.6	22.6	15.3	-12.9	-6.3
sehr geringe Gesamtbelastung	normal	blau	4.4	0.5	1.5	2.0	-2.2	0.4

Tab. 1 Prozenzuale Flächenanteile Zonen der der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} der Flechtenuntersuchungen im Bündner Rheintal von 1986 bis 2022 mit Angabe der prozentualen 36- und 11-jährigen Veränderung zwischen 1986 - 2022 sowie 2011 - 2022.

Veränderung der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal der letzten 36 bzw. 11 Jahre mit Differenzkarten sichtbar gemacht

Im 36-jährigen Langzeitvergleich zu 1986 (Abb.4d) zeigt sich für 2022 in 35% der nicht eingefärbten Gebiete eine weitgehend konstante Gesamtbelastung, ohne wesentliche Veränderung. Allerdings zeigt sich in 42% der hell purpurfarbenen Gebiete in weiten Teilen des Bündner Rheintals eine geringe Verschlechterung der Luftgesamtbelastung. Zusätzlich zeigen 14% der purpurfarbenen Gebiete eine starke Belastungsver schlechterung und in 2% der Gebietsfläche (satter purpur) zeigt sich sogar eine sehr starke Verschlechterung. Diese Gebiete mit sehr starker Verschlechterung befinden sich zwischen Trimmis und Untervaz und in der nördlichen Talflanke zwischen Domat/Ems und Tamins.

Nebst der zeitlichen Verschlechterung in der Luftgesamtbelastung konnten aber auch Gebiete mit einer geringen (7%) und stärkeren Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese finden sich im Grossraum von Chur und in Landquart. In Landquart waren die mehrfachen lufthygienischen Sanierungen bis zum Produktionsstopp der Grossziegelei sowie die Umfahrung Prättigauerstrasse der Hauptgrund dieser Verbesserung. Für die festgestellten Verbesserungen im Raum Chur sind eine Vielzahl von Massnahmen ebenso verantwortlich wie die Verkehrsverflüssigung, Verbesserungen in Motorfahrzeugemissionen, energetische Gebäudesanierungen und optimierte Filtertechniken sowie der Fernwärmeanschluss in Teilen der Stadt Chur.

Im 11-jährigen Langzeitvergleich zu 2011 (Abb.4e) zeigt sich für 2022 in 61% der grauen Gebiete eine weitgehend konstante Luftgesamtbelastung. In 30% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich hingegen eine geringe Verschlechterung der Luftgesamtbelastung, dies in Teilen der Rebbaugebiete der Bündner Herrschaft, im südlichen Landquart und zwischen Untervaz und Haldenstein sowie zwischen Felsberg, Domat/Ems und Tamins und im östlichen und strassennahen Gebiet zwischen Tamins und Bonaduz. In 2% der satter purpurfarbenen Gebiete zeigt sich sogar eine starke Belastungsver schlechterung. Diese Gebiete mit starker Verschlechterung befinden sich auf der liechtensteiner "Bergstrecke" in St. Luziensteig und strassennah im obersten Maienfeld sowie in Teilen von Felsberg sowie in nördlicher Hanglage in Tamins.

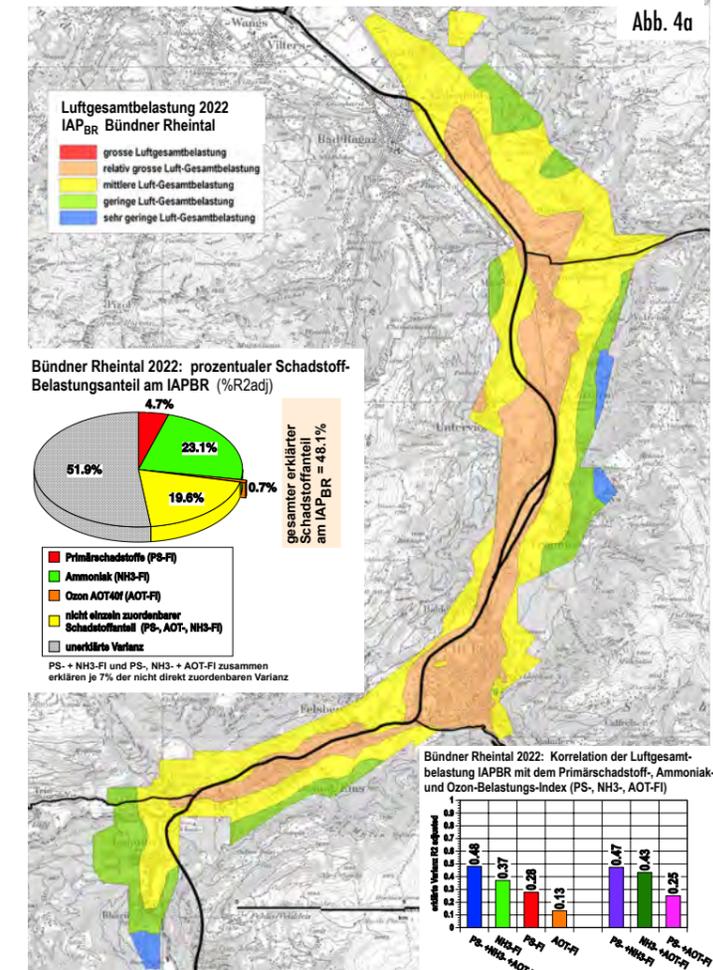
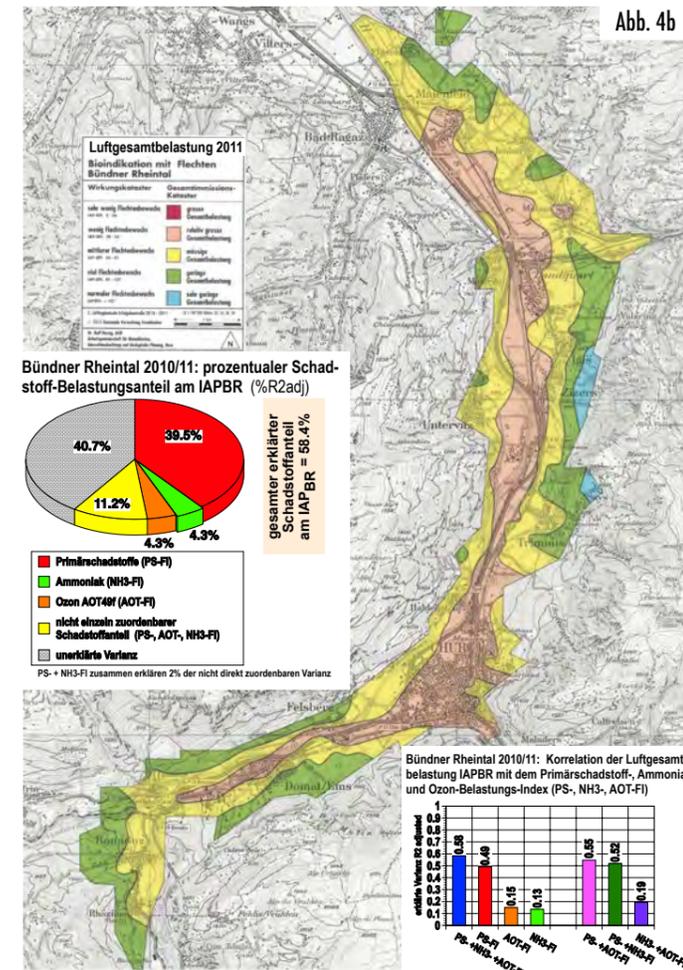
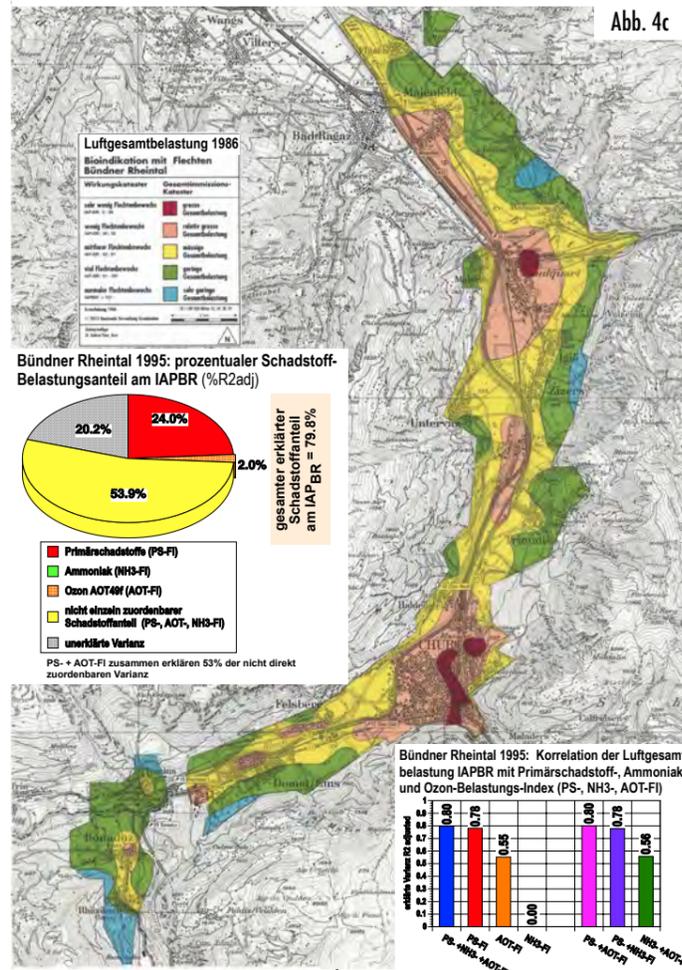
Abb. 4 Karten der aktuellen und früheren Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mit Flechten im Bündner Rheintal von 2022, 2010 und 1986 und Vergleich mit der 11- und 36-jährigen Belastungsänderung.

--- siehe Seite 5

⁵ Massnahmenorientierte Erhebung der Luftgüte mittels Flechten im Bündner Rheintal. Zweiterhebung 1996. Dr. K. Peter, puls Bern.

⁶ Flechtenkartierung als Grundlage für die Charakterisierung der Luftbelastung (Bündner Rheintal). Schlussbericht 1988. Dr. K. Peter, Bern.

Abb. 4 Luftgesamtbelastung IAP_{BR} im Bündner Rheintal von 1986, 2012 und 2022 und deren zeitliche Veränderung über 11 und 33 Jahre



In der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 2022 (Abb. 4a) zeigt sich gegenüber 2011 (Abb. 4b) eine etwas vergrösserte orange und gelbe Zone mit rel. grosser und mittlerer Gesamtbelastung entlang der A13. In Rhäzüns Runcaglia zeigt sich erstmals seit 1986, wie bei der Erstuntersuchung wieder eine blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung. Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung hat sich gegenüber 2011 etwas vergrössert. Die 1986 und 1995 noch festgestellte rote Zone mit starker Luftgesamtbelastung in Chur und z.T. in Landquart konnte auch 2022 wie schon 2011 nicht mehr nachgewiesen werden. 2022 deutlich verringert gegenüber 2011 hat sich allerdings die grüne Zone mit geringer Gesamtbelastung, dies besonders zwischen Felsberg und Tamins sowie in Maienfeld und in St. Luziensteig.

Im Grossraum Chur zeigt sich in einem eng begrenzten Gebiet des Quaderplatzes sogar schon eine kleine grüne Insel mit geringer Gesamtbelastung, die wohl auch der Verkehrsverflüssigung des neuen Quaderkreises zu verdanken ist.

Im 36-jährigen Langzeitvergleich zu 1986 (Abb. 4c) haben sich die orange und gelbe Zone mit mittlerer und mässiger Gesamtbelastung je um ca. 10% vergrössert, dies allerdings bei einer Verdoppelung der Verkehrsmenge auf der A13, während sich die grüne Zone mit geringer Gesamtbelastung halbiert hat. Ganz verschwunden ist hingegen die rote Zone mit starker Gesamtbelastung.

Insgesamt ist es somit in dieser Zeitspanne auch zu einer Nivellierung der Luftgesamtbelastung zu den stärker belasteten Zonen orange und gelb gekommen.

Veränderung der Luftgesamtbelastung über 36 Jahre mit Differenzkarten des IAP_{BR} sichtbar gemacht

Im 36-jährigen Langzeitvergleich zu 1986 (Abb. 4d) zeigt sich für 2022 in 35% der nicht eingefärbten Gebiete eine weitgehend konstante (keine wesentliche Veränderung) Gesamtbelastung. In 42% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich in weiten Teilen des Bündner Rheintals eine geringe Verschlechterung der Luftgesamtbelastung.

Zusätzlich zeigen 14% der purpurfarbenen Gebiete eine starke Belastungverschlechterung und in 2% der Gebietsfläche (satter purpur) zeigt sich sogar eine sehr starke Verschlechterung. Diese Gebiete mit sehr starker Verschlechterung befinden sich zwischen Trimmis und Untervaz und in der nördlichen Talflanke zwischen Domat Ems und Tamins.

Nebst der zeitlichen Verschlechterung in der Luftgesamtbelastung konnten aber auch Gebiete mit einer geringen (7%) und stärkeren Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese finden sich im Grossraum von Chur und in Landquart. In Landquart waren die mehrfachen lufthygienischen Sanierungen bis zum Produktionsstopp der Grossegelei sowie die Umfahrung Prättigauerstrasse der Hauptgrund dieser Verbesserung.

Im Raum Chur sind eine Vielzahl von Massnahmen wie die Verkerverflüssigung, Verbesserungen in Motorfahrzeugemission, energetische Gebäudesanierungen und optimierte Filtertechnik sowie der Fernwärmeanschluss der in Teilen Stadt für die festgestellten Verbesserungen ebenso verantwortl.

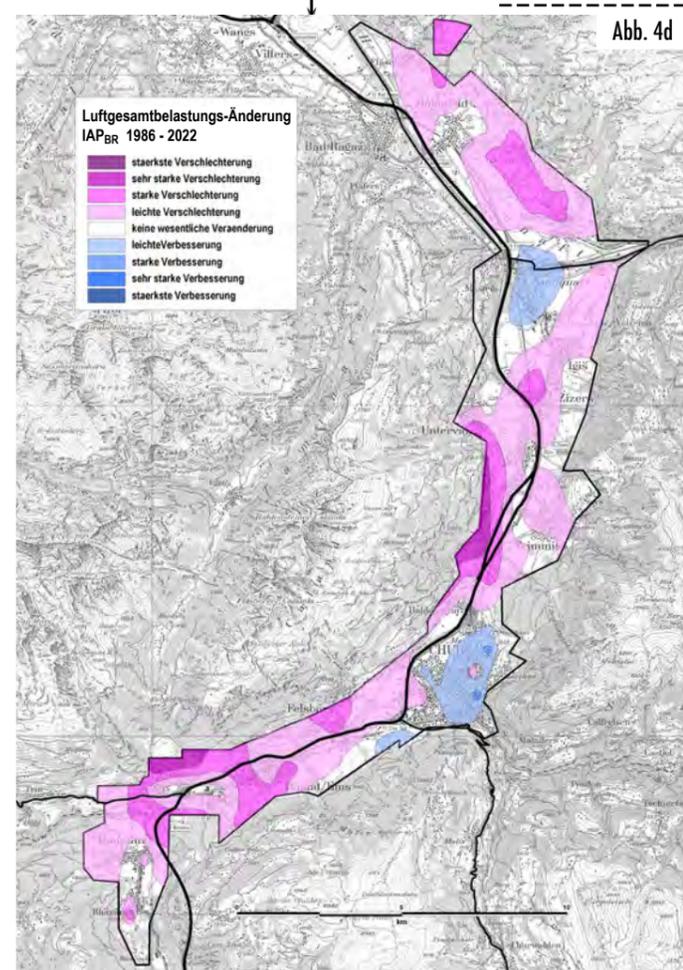


Abb. 4d

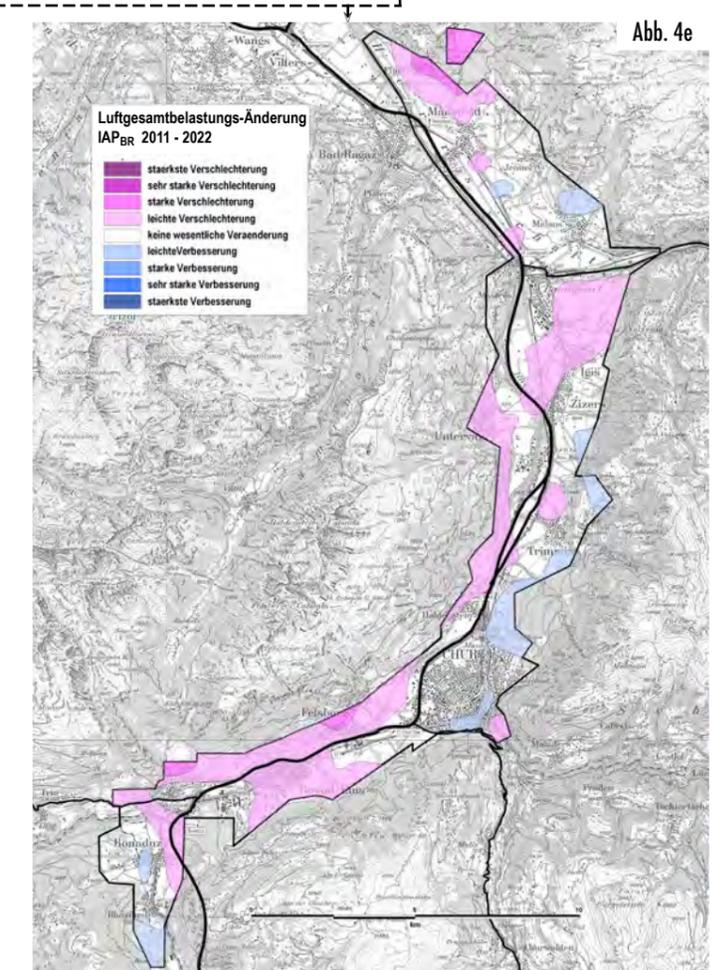


Abb. 4e

Veränderung der Luftgesamtbelastung der letzten zwölf Jahre mit Differenzkarten des IAP_{BR} sichtbar gemacht

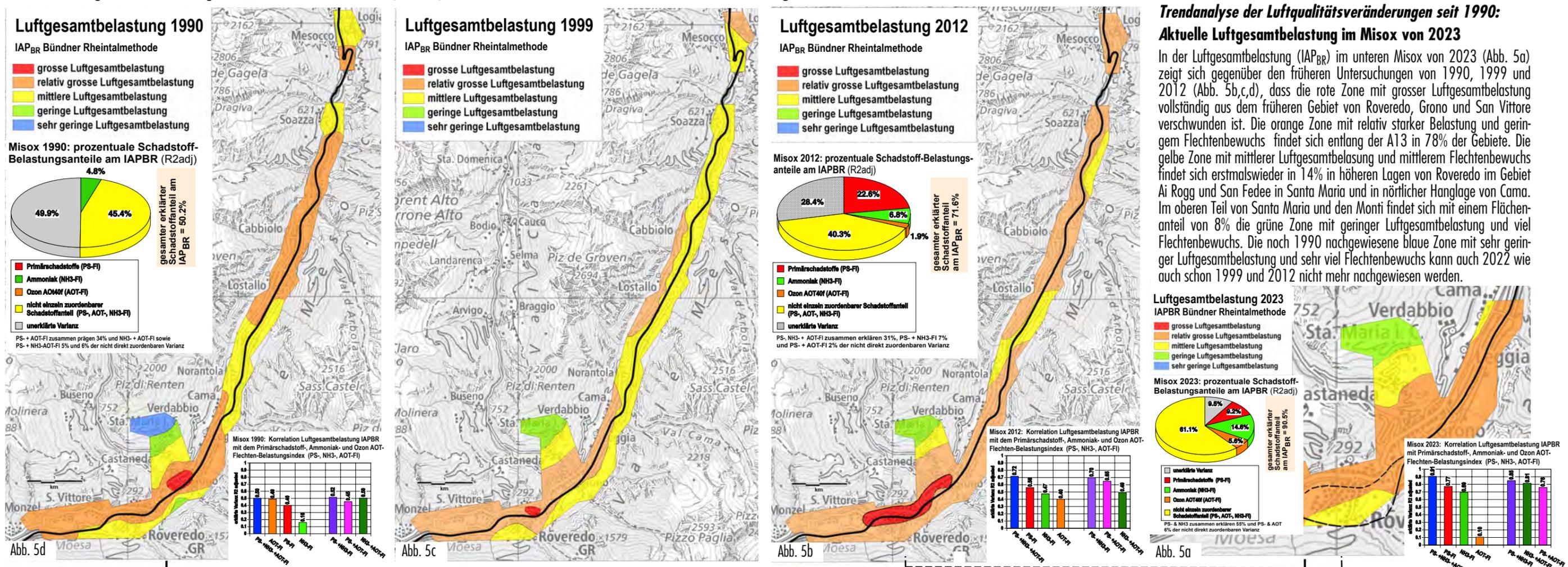
Im 11-jährigen Langzeitvergleich zu 2011 (Abb. 4e) zeigt sich für 2022 in 61% der grauen Gebiete eine weitgehend konstante (keine wesentliche Veränderung) Luftgesamtbelastung.

In 30% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich hingegen eine geringe Verschlechterung der Luftgesamtbelastung, dies in Teilen der Rebgebiete der Bündner Herrschaft, im südlichen Landquart und zwischen Untervaz und Haldenstein sowie zwischen Felsberg, Domat Ems und Tamins und im östlichen und strassennahen Gebiet zwischen Tamins und Bonaduz.

In 2% der satter purpurfarbenen Gebiete zeigt sich sogar eine starke Belastungverschlechterung. Diese Gebiete mit starker Verschlechterung befinden sich auf der Liechtensteiner "Bergstrecke" in St. Luziensteig und strassennah im obersten Maienfeld sowie in Teilen von Felsberg, in nördlicher Hanglage in Tamins.

Nebst der zeitlichen Verschlechterungen in der Luftgesamtbelastung konnten aber auch Gebiete mit einer geringen (7%) Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese finden sich erneut im südlichen und nördlichen Chur und bis ins südliche Trimmis, in Obersays und im obersten Zizers sowie in höheren und heute schon weitgehend biologisch bewirtschafteten Reblagen von Malans und ebenso in Teilen von Bonaduz und in Rhäzüns Runcaglia.

Abb. 5 Luftgesamtbelastung IAP_{BR} im Misox von 1990, 1999, 2012 und 2023 und deren zeitliche Veränderung über 33 und 11 Jahre



Trendanalyse der Luftqualitätsveränderungen seit 1990: Aktuelle Luftgesamtbelastung im Misox von 2023

In der Luftgesamtbelastung (IAP_{BR}) im unteren Misox von 2023 (Abb. 5a) zeigt sich gegenüber den früheren Untersuchungen von 1990, 1999 und 2012 (Abb. 5b,c,d), dass die rote Zone mit grosser Luftgesamtbelastung vollständig aus dem früheren Gebiet von Roveredo, Grono und San Vittore verschwunden ist. Die orange Zone mit relativ starker Belastung und geringem Flechtenbewuchs findet sich entlang der A13 in 78% der Gebiete. Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung und mittlerem Flechtenbewuchs findet sich erstmals wieder in 14% in höheren Lagen von Roveredo im Gebiet Ai Rogg und San Fedee in Santa Maria und in nördlicher Hanglage von Cama. Im oberen Teil von Santa Maria und den Monti findet sich mit einem Flächenanteil von 8% die grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung und viel Flechtenbewuchs. Die noch 1990 nachgewiesene blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung und sehr viel Flechtenbewuchs kann auch 2022 wie auch schon 1999 und 2012 nicht mehr nachgewiesen werden.

Veränderung der Luftgesamtbelastung im Misox über 33 Jahre mit Differenzkarten des IAP_{BR} sichtbar gemacht

Im 33-jährigen Langzeitvergleich von 2023 zu 1990 zeigt sich im unteren Teil des Misox für 2023 in 42% der transparentfarbenen Gebiete eine weitgehend konstante (keine wesentliche Veränderung) der Luftgesamtbelastung (Abb. 5e). In 45% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich in weiten Teilen des unteren Misox eine leichte und in den dunkler purpurfarbenen Gebieten eine starke Belastungverschlechterung 7% und in 1% der Gebietsfläche (satter purpur) sogar eine sehr starke Verschlechterung. Diese Gebiete mit geringer, starker und sehr starker Verschlechterung befinden sich im Gebietsstreifen zwischen dem heutigen nördlichen San Fedele Tunnel-Eingang der A13 und Grono bis hinauf nach Castaneda.

33-jährige Differenz der Luftgesamtbelastung von 1990 - 2023

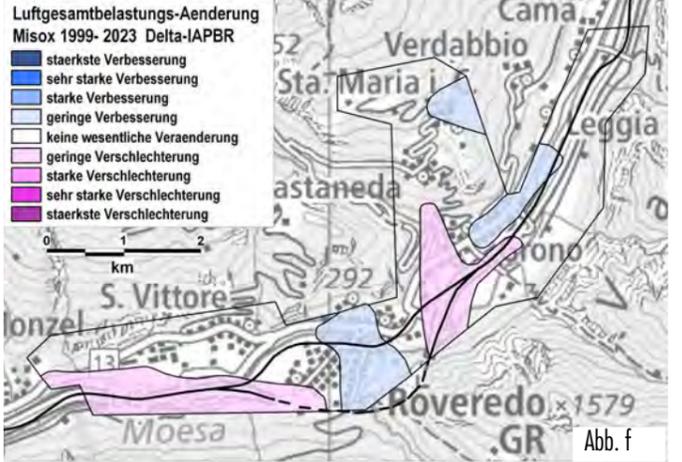


Nebst der zeitlichen Verschlechterung in der Luftgesamtbelastung konnten aber auch 7% der Gebiete mit einer geringen Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese finden sich in den höher gelegenen Teilen von Roveredo und entlang der Kantonsstrasse in Grono. Im oberen Roveredo und Grono wurde die lufthygienischen Sanierungen von alten stark emittierenden Holzfeuerungen gefördert und auch die Entlastung des Verkehrs durch den San Fedele Tunnel der A13 ab 2016 der Hauptgrund dieser Verbesserung.

Veränderung der Luftgesamtbelastung seit 1999 mit Differenzkarten des IAP_{BR} sichtbar gemacht

Im 24-jährigen Langzeitvergleich von 2023 zu 1999 zeigt sich im unteren Teil des Misox in 69% der transparentfarbenen Gebiete eine weitgehend konstante (keine wesentliche Veränderung) Luftgesamtbelastung (Abb. 5f).

24-jährige Differenz der Luftgesamtbelastung von 1999 - 2023



In 19% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich für 1999 in weiten Teilen des unteren Misox eine leichte Verschlechterung der Luftgesamtbelastungssituation. Diese Gebiete befinden sich im Gebietsstreifen zwischen dem nördlichen und südlichen San Fedele Tunnel-Eingang der A13 und Grono sowie südlich entlang der A13.

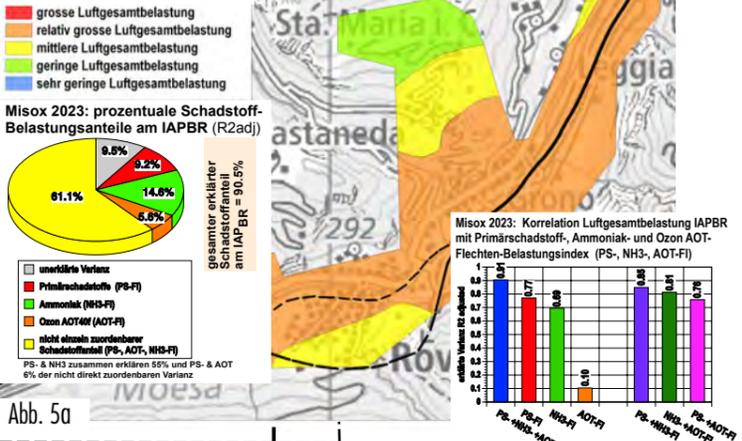
Veränderung der Luftgesamtbelastung im Misox seit 2012 mit Differenzkarten des IAP_{BR} sichtbar gemacht

Im 11-jährigen Langzeitvergleich zu 2012 zeigt sich für 2023 in 62% der Gebiete eine weitgehend konstante (keine wesentliche Veränderung) der Gesamtbelastung (Abb. 5g). In 36% der hellblauen Gebiete zeigt sich eine geringe Verbesserung der Luftgesamtbelastung, dies im ganzen Siedlungsgebiet von Roveredo, in Teilen von Grono bis Castaneda und Santa Maria.

11-jährige Differenz der Luftgesamtbelastung von 2012 - 2023



Luftgesamtbelastung 2023 IAP_{BR} Bündner Rheintalmethode



Im 33-jährigen Langzeitvergleich zu 1990 haben sich die orange Zone starker Gesamtbelastung um fast 20% vergrössert während sich die gelbe Zone mittlerer Belastung um etwa diesen Betrag verkleinert hat. Leicht vergrössert hat sich die grüne Zone geringer Gesamtbelastung, dies allerdings bei einer deutlichen Verkehrszunahme auf der Misoxer A13 von 39 - 58% seit 1990. Die noch 1990 in den Monti von Santa Maria nachgewiesene blaue Zone mit sehr geringer Gesamtbelastung konnte 1999 und 2012 und auch für 2023 nicht mehr nachgewiesen werden. Ganz verschwunden ist hingegen die rote Zone mit starker Luftgesamtbelastung, welche 1990 in Teilen von Grono, 1999 in Roveredo und 2012 in Roveredo und Teilen von Grono in A12 nahen Gebieten noch festgestellt wurde. Insgesamt ist es somit auch im Misox wie im Bündner Rheintal in dieser Zeitspanne zu einer Nivellierung der Luftgesamtbelastung zu den stärker belasteten Zonen orange und gelb gekommen. Diese mit der Bündnermethode dargestellten Misoxer Karten lassen sich direkt mit denjenigen aus dem Bündner Rheintal vergleichen.

In den Quartieren Ai Rogg und San Fedee im oberen Roveredo zeigt sich sogar ein kleineres Gebiet mit starker bis sehr starker Verbesserung der Luftgesamtbelastung (mind. 1%).

Diese Verbesserung steht im direkten Zusammenhang mit der Eröffnung des A13-Entlastungstunnels San Fedele von 2016 (fein getrickeltem A13-Verlauf, gegenüber dickem alten Verlauf quer durch Roveredo) sowie den geförderten Sanierungen von alten stark emittierenden Holzfeuerungen in diesen Gebieten.

Mit den schadstoff-spezifischen Belastungsindikatoren für Primärschadstoffe, Ozon und Ammoniak lassen sich weitere wertvolle Erkenntnisse zu den hauptverantwortlichen Schadstoffquellen gewinnen, welche Wesentliches zur Erklärung der Veränderungen der Luftgesamtbelastung des IAP_{BR} beitragen.

Abb. 6 Blick auf Roveredo während einer winterlichen Inversionslage mit sichtbarer Schadstoffanreicherung.

Bildquelle ANU



Aktuelle Luftgesamtbelastung im Misox von 2023

In der Luftgesamtbelastung im unteren Misox von 2023 (Abb. 5a) zeigt sich gegenüber den früheren Untersuchungen von 1990⁷, 1999⁸ und 2012⁹ (Abb.5 b,c,d), dass die rote Zone mit grosser Luftgesamtbelastung vollständig aus dem früheren Gebiet von Roveredo, Grono und San Vittore verschwunden ist.

Die orange Zone mit relativ starker Belastung und geringem Flechtenbewuchs findet sich entlang der A13 in 78% der Gebiete. Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung und mittlerem Flechtenbewuchs findet sich seit 1999 erstmals wieder in 14% in höheren Lagen von Roveredo im Gebiet Ai Rogg und San Fedee, in Santa Maria sowie in nördlicher Hanglage von Cama.

Im oberen Teil von Santa Maria und den Monti findet sich mit einem Flächenanteil von 8% die grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung und viel Flechtenbewuchs. Die noch 1990 und 1999 nachgewiesene blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung und sehr viel Flechtenbewuchs kann wie auch 2023 nicht mehr nachgewiesen werden.

Veränderung der Luftgesamtbelastung im Misox in den letzten 33 bzw. 11 Jahre mit Differenzkarten sichtbar gemacht

Im 33-jährigen Langzeitvergleich zu 1990 hat sich die orange Zone mit starker Luftgesamtbelastung um fast 20% vergrössert, während sich die gelbe Zone mit mittlerer Belastung um etwa diesen Betrag verkleinert hat (Abb. 5e).

Leicht vergrössert hat sich die grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung, dies allerdings bei einer deutlichen Verkehrszunahme auf der Misoxer A13 von 39 - 58% seit 1990.

Die noch 1990 in den Monti von Santa Maria nachgewiesene blaue Zone mit sehr geringer Luftgesamtbelastung konnte 1999 noch knapp und seit 2012 und auch für 2023 nicht mehr nachgewiesen werden.

Ganz verschwunden ist hingegen die rote Zone mit starker Luftgesamtbelastung, welche 1990 in Teilen von Grono, 1999 in Roveredo und 2012 in Roveredo und Teilen von Grono in A13-nahen Gebieten noch festgestellt wurde. Die Ergebnisse der Differenzkarten (Abb.5e,f,g) sind in der Gesamtübersicht direkt ersichtlich.

Insgesamt ist es sowohl im Misox als auch im Bündner Rheintal in dieser Zeitspanne zu einer Nivellierung der Luftgesamtbelastung zu den stärker belasteten Zonen orange und gelb gekommen. Diese mit der Bündner Rheintal-methode dargestellten Misoxer Karten lassen sich direkt mit denjenigen aus dem Bündner Rheintal vergleichen.

Abb. 5 Karten der aktuellen und früheren Luftgesamtbelastung IAPBR mit Flechten im Misox von 2023, 2012, 1999 und 1990 und Vergleich mit der 11- und 33-jährigen Belastungsänderung.

--- siehe Seite 6

⁷ Bioindikation mit Flechten im Misox 1991 - Projektbericht z.h. ANU, puls, ehemals AGB Bern

⁸ Massnahmenorientierte Erhebung der Luftgüte mittels Flechten im Misox, Zweiterhebung 1999. Projektbericht z.h. ANU, puls, Bern

⁹ Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Kanton Graubünden - Zweite Erfolgskontrolle. Dritte Erhebung im Misox von 2012. Schlussbericht 13. Januar 2014, Dr. Rolf Herzig, AGB, Bern.

Aktuelle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal von 2022 und deren Veränderung seit 1995

Die drei schadstoffspezifischen Flechten-Indizes der Primärschadstoff-, Ozon- und Ammoniakbelastung erlauben zusammen mit dem Luft-gesamtbelastungsindikator IAP_{BR} eine wesentlich umfassendere Belastungseinschätzung, welche auch Aussagen bezüglich der Schadstoffquellen sowie über den vorherrschenden Immissionstypus erlauben. Mit anschaulichen synoptischen Übersichtsdarstellungen werden diese schadstoffspezifischen Belastungskarten visualisiert, miteinander verglichen und interpretiert.

Die wichtigsten Ergebnisse finden sich somit auch in diesen Übersichtsdarstellungen. Die Autobahn A13 ist in den Karten mit einer dicken, die wichtigsten Kantonsstrassen mit einer dünnen schwarzen Linie gekennzeichnet. Im Misox wird in Roveredo der Verlauf der alten A13 vor der Eröffnung des San Fedele Tunnels von 2016 mit einer Strichlinie gekennzeichnet.

Aktuelle Primärschadstoffbelastung im Bündner Rheintal von 2022

In der Übersichtsdarstellung 7 werden die Ergebnisse der aktuellen, früheren und differentiellen Primärschadstoffbelastung im Bündner Rheintal von 2022 dargestellt und mit deren Veränderung seit 1995 verglichen.

In der Primärschadstoffbelastung (PS-FI) der integralen Luftbelastung mit NO₂, SO₂ und PM10 von 2022 zeigt sich in der Übersichtskarte von Abb.7 gegenüber 1995 eine besonders starke Verringerung im gesamten Bündner Rheintal, mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den stark belasteten Rottönen zu den geringer belasteten Grün- und Gelbtöne (Abb.7a,c).

Mit einer sehr hohen Primärschadstoffbelastung zeigten sich noch 1995 grosse Teile von Chur, das Industriegebiet von Trimmis/Untervaz sowie der Verkehrsknoten Maienfeld/Bad Ragaz, während weite Teile des Bündner Rheintals eine hohe bis erhöhte Primärschadstoffbelastung aufwiesen. Eine mässige Belastung zeigte sich nur in den beiden gelben höher gelegenen Gebieten von Obersays und St. Luziensteig.

Mit der aktuellsten Flechtenuntersuchung von 2022 zeigt sich 27 Jahre später eine erfreuliche Reduktion der Primärschadstoffbelastung im ganzen Bündner Rheintal (Abb.7a). Im Direktvergleich der beiden Belastungskarten von 2010/11 und 2022 zeigen sich im 12-jährigen Zeitintervall hingegen nur noch geringfügige Veränderungen. Allerdings fällt auf, dass sich besonders im Grossraum Chur die mässige gelbe Belastung zugunsten der relativ geringen hellgrünen Primärschadstoffbelastungsstufe verbessert hat.

Veränderung der Primärschadstoffbelastung seit 1995

Im 27-jährigen Langzeitvergleich zwischen 1995 und 2022 zeigt sich in 68% der marinblauen Gebiete eine sehr starke Verringerung der Primärschadstoffbelastung (Abb.7d). In 20% der dunkelblauen Gebiete zeigt sich sogar die stärkste und in weiteren 12% der hellblauen Gebiete eine leichte Verringerung der Primärschadstoffbelastung. Im ganzen Bündner Rheintal zeigen sich im 27-jährigen Langzeitvergleich somit weder eine Verschlechterung der Primärschadstoffbelastung noch indifferente Verhältnisse.

Besonders auffällig ist die sehr starke Abnahme der Primärschadstoffbelastung im Grossraum Chur. Für die festgestellten Verbesserungen sind eine Vielzahl von Massnahmen wie Reduktion der Motorfahrzeugemissionen, die Verkehrsverflüssigung, energetische Gebäudesanierungen und optimierte Filtertechnik sowie der Fernwärmeanschluss der Stadt gleichermaßen verantwortlich.

Abb. 7 Synoptische Darstellung der Primärschadstoffbelastung (PS-FI) im Bündner Rheintal von 1995, 2011 und 2022 und Vergleich mit der Belastungsreduktion in den letzten 27 und 11 Jahren zwischen 1995 und 2010 zu 2022.

- 7a aktuelle Primärschadstoffbelastung 2022
- 7b Primärschadstoffbelastung 2011
- 7c Primärschadstoffbelastung 1995
- 7d Veränderung der Primärschadstoffbelastung 1995 - 2022
- 7e Veränderung der Primärschadstoffbelastungs 2011 - 2022

--- siehe Seite 9

Trendanalyse der Luftqualitätsveränderungen seit 1995

Wiederholung der Flechtenkartierung im Bündner Rheintal von 2022 und Veränderung der Primärschadstoffbelastung

In der Primärschadstoffbelastung (PS-FI) der integralen Luftbelastung mit NO_2 , SO_2 und PM_{10} von 2022 (Abb.7a) zeigt sich gegenüber 1995 (Abb.7c) eine besonders starke Verringerung im gesamten Bündner Rheintal, mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den stark belasteten Rottönen auf die geringer belasteten Grün- und Gelbtöne.

Mit einer sehr hohen Primärschadstoffbelastung zeigten sich noch 1995 grosse Teile von Chur, das Industriegebiet von Trimmis-Untervaz sowie der Verkehrsknoten Maienfeld/Bad Ragaz, während weite Teile des Bündner Rheintals eine hohe bis erhöhte Primärschadstoffbelastung aufwiesen. Eine mässige Belastung zeigte sich nur in den beiden gelben höher gelegenen Gebieten von Obersays und St. Luziensteig.

Mit der aktuellsten Flechtenuntersuchung von 2022 zeigt sich 27 Jahre später eine erfreuliche Reduktion der Primärschadstoffbelastung im ganzen Bündner Rheintal (Abb.7d). Im Direktvergleich der beiden Belastungskarten von 2011 und 2022 zeigen sich im 11-jährigen Zeitintervall hingegen nur noch geringfügige Veränderungen (Abb.7e).

Im Grossraum Chur fällt besonders auf, dass sich die mässig-belastete gelbe Zone in Teilgebieten zugunsten der relativ geringen hellgrünen Primärschadstoffbelastungsstufe verbessert hat.

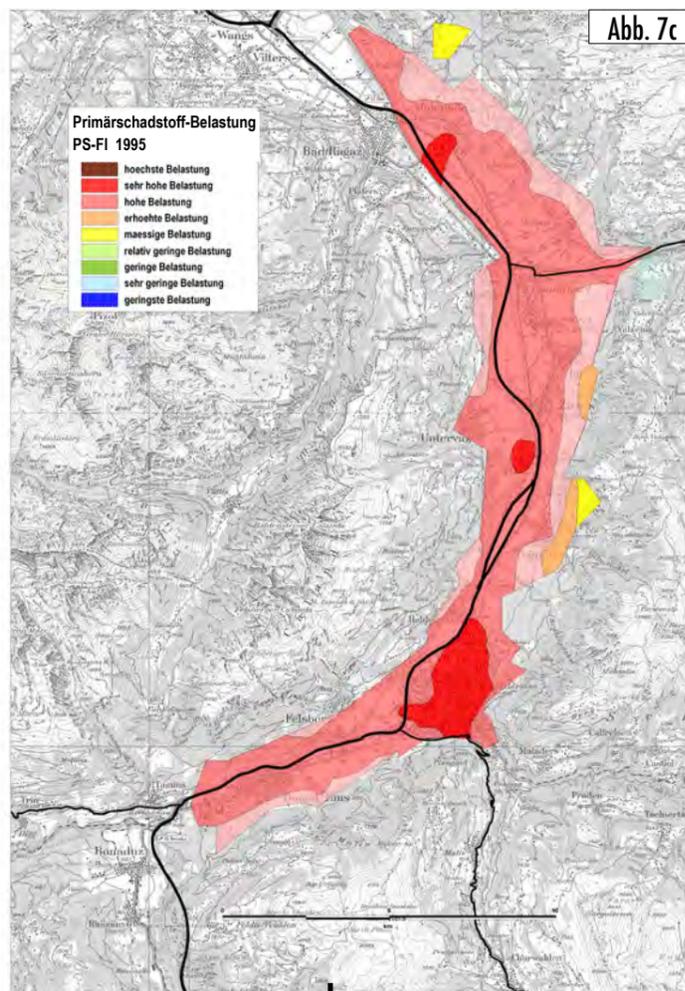


Abb. 7c

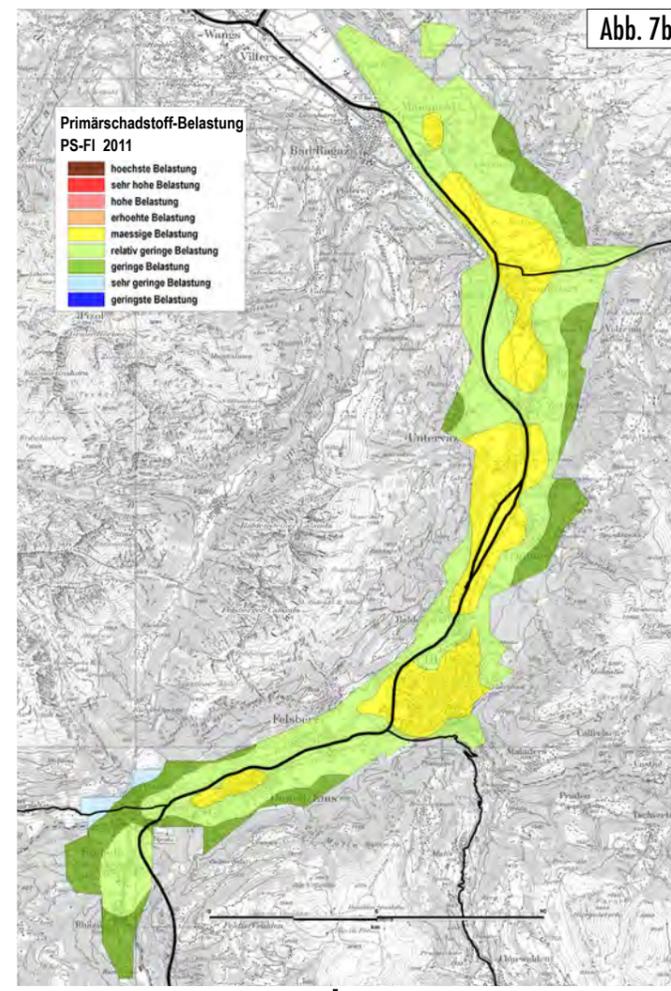


Abb. 7b

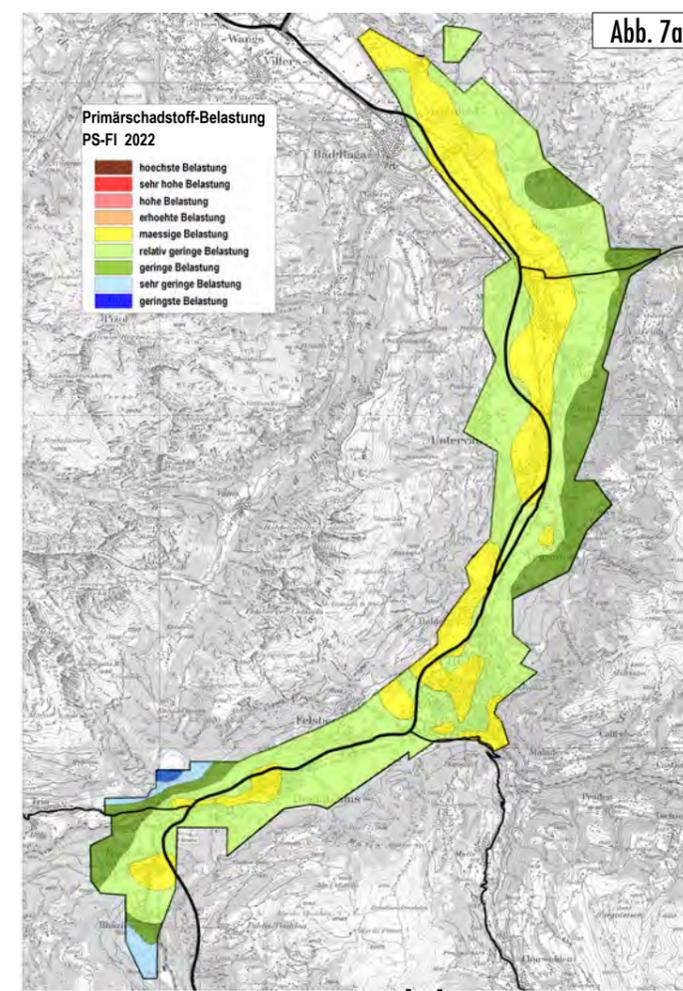


Abb. 7a

Veränderung der Primärschadstoffbelastung über 27 Jahre mit Differenzkarten des Primärschadstoff-Indexes mit Flechten PS-FI sichtbar gemacht

Im 27-jährigen Langzeitvergleich zwischen 1995 und 2022 zeigt sich in 68% der marinblauen Gebiete eine sehr starke Verringerung der Primärschadstoffbelastung (Abb.7d). In 20% der dunkelblauen Gebiete zeigt sich sogar die stärkste und in weiteren 12% der hellblauen Gebiete eine starke Verringerung der Primärschadstoffbelastung.

Im ganzen Bündner Rheintal zeigen sich im 27-jährigen Langzeitvergleich somit weder eine Verschlechterung der Primärschadstoffbelastung noch indifferente Verhältnisse.

Besonders auffällig ist die sehr starke Abnahme der Primärschadstoffbelastung im Grossraum Chur. Für die festgestellten Verbesserungen sind eine Vielzahl von Massnahmen wie Reduktion der Motorfahrzeugemissionen, die Verkehrsverflüssigung, energetische Gebäudesanierungen und optimierte Filtertechnik sowie der Fernwärmeanschluss in Teilen der Stadt gleichermaßen verantwortlich.

Diese neuartigen, mit Baumflechten erzielten Ergebnisse zur Veränderung der Primärschadstoffbelastung im Bündner Rheintal werden auch gestützt durch die Langzeitreihen der kantonalen Schadstoffmessungen für NO_2 , SO_2 und PM_{10} .

So hat etwa die tatsächlich gemessene NO_2 -Belastung im selben Zeitraum am Messstandort Rhätische Bahn um 53% und für PM_{10} um 35% abgenommen. Letzteres für den etwas kürzeren Zeitraum von 2004 - 2022. Am 10m nahen A13 Messstandort Chur A13 S1 zeigt sich eine NO_2 -Abnahme von 33% und von 18% für PM_{10} , letzteres für 2001 - 2022.

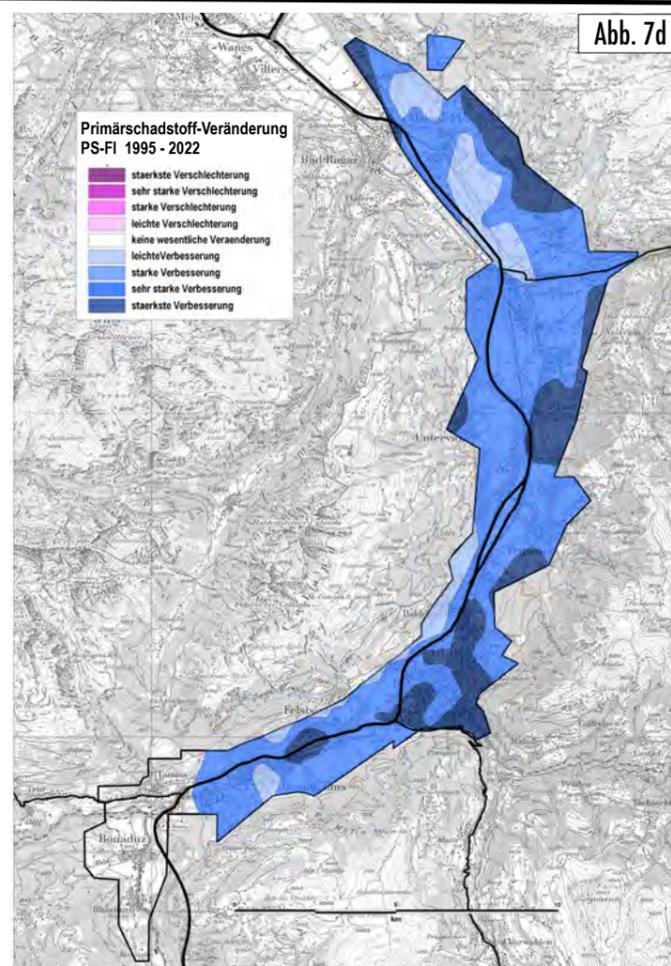


Abb. 7d

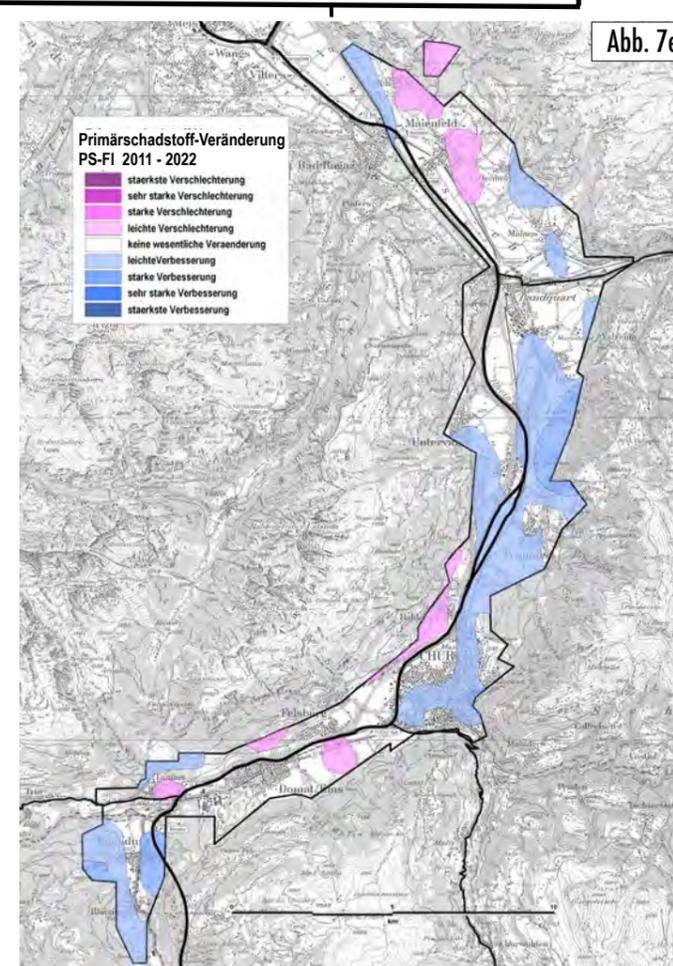


Abb. 7e

Veränderung der Primärschadstoffbelastung der letzten elf Jahre mit Differenzkarten des PS-FI sichtbar gemacht

Im 11-jährigen Langzeitvergleich zu 2011 (Abb.7e) zeigt sich für 2022 in 60% der nicht eingefärbten Gebiete eine weitgehend konstante Primärschadstoffbelastung (keine wesentliche Veränderung). Eine leichte bis starke Verbesserung der Primärschadstoffbelastung zeigt sich in 27% der hellblauen und in 5% der dunkler blauen Gebiete, dies besonders im Grossraum von Chur bis Zizers, wo vielfältige Sanierungsmassnahmen erfolgten.

Demgegenüber zeigt sich in 8% der hell-lachsroten Gebiete eine leichte Verschlechterung der Primärschadstoffbelastung, dies besonders im Gebiet von Fläsch, Maienfeld und St. Luziensteig sowie im Industriegebiet und Verkehrsknoten von Felsberg und ebenso in Tamins.

Diese mit Baumflechten erzielten Ergebnisse zur Veränderung der Primärschadstoffbelastung im Bündner Rheintal werden ebenso gestützt durch die Langzeitreihen der kantonalen Schadstoffmessungen für NO_2 , SO_2 und PM_{10} . So hat etwa die tatsächlich gemessene NO_2 -Belastung im selben Zeitraum am Messstandort Rhätische Bahn um 43% und für PM_{10} um 20% abgenommen, letzteres für den etwas kürzeren Zeitraum von 2012 - 2022. Am A13 10m nahen Messstandort Chur A13 S1 zeigen sich im selben Zeitraum eine NO_2 -Abnahme von 22% und von 11% für PM_{10} , letztere für den Zeitraum 2011-2022. Am nächsten A13-Standort Q1 von 5m zeigt sich in derselben Zeitspanne sogar eine leichte Zunahme von NO_2 von 3%.

Insgesamt zeigen die Belastungsmuster der Primärschadstoff- und Ammoniakbelastung von 1995, 2011 und 2022 eine gewisse Ähnlichkeit mit denjenigen der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} , was auf die grosse Bedeutung der Primärschadstoffbelastung (NO_2 , SO_2 , PM_{10}) sowie von Ammoniak für die Luftgesamtbelastung hinweist.

Diese Ähnlichkeiten zeigen sich besonders deutlich im Talboden in den Siedlungsräumen und entlang der A13 und der Kantonsstrasse zwischen Maienfeld und Chur.

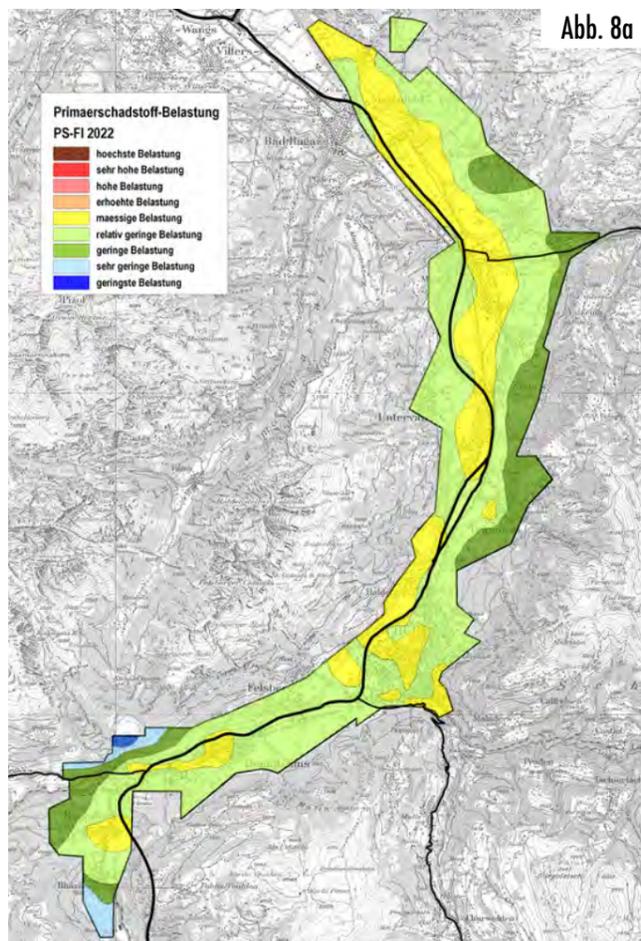


Abb. 8a

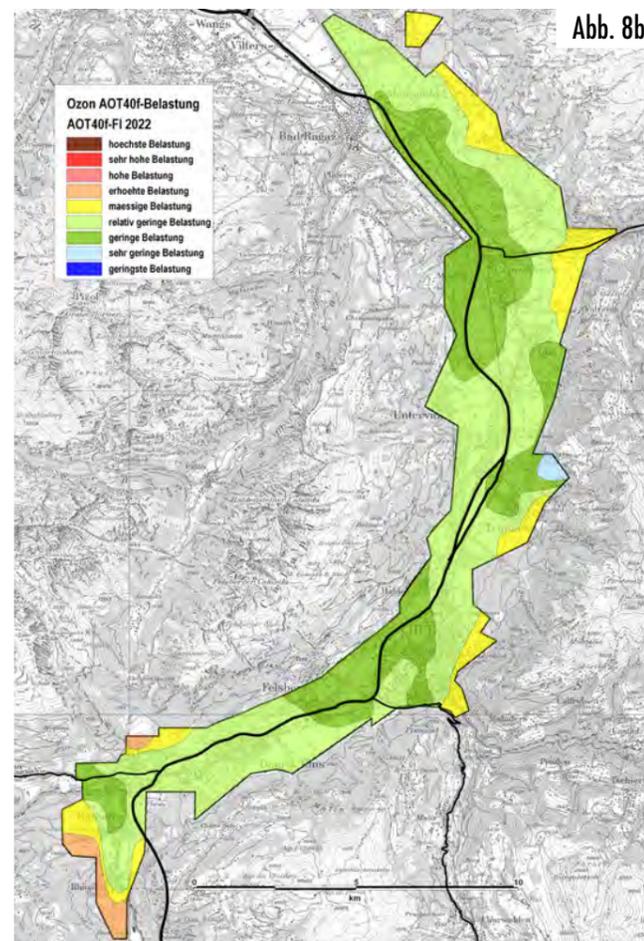


Abb. 8b

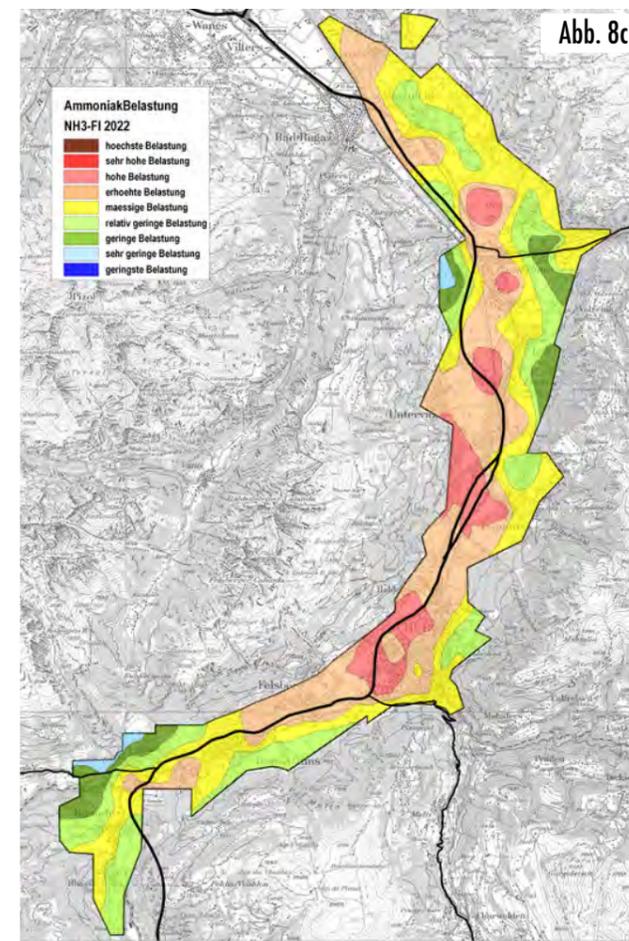


Abb. 8c

Trendanalyse der Luftqualitätsveränderungen seit 1995: Wiederholung der Flechtenkartierung im Bündner Rheintal von 2022.

Primärschadstoff-, Ozon- und Ammoniakbelastung von 2022 mit der Belastungsänderung in den letzten 27 Jahren seit 1995.

In der Primärschadstoffbelastung (PS-FI) der integralen Luftbelastung mit NO_2 , SO_2 und PM_{10} von 2022 (Abb. 8a) zeigt sich gegenüber 1995 eine besonders starke Verringerung im gesamten Bündner Rheintal, mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den stark belasteten Rottönen auf die heute geringer belasteten Grün- und Gelbtöne.

Mit der aktuellsten Flechtenuntersuchung von 2022 zeigt sich mit der Differenzkarte 27 Jahre später eine erfreuliche Reduktion der Primärschadstoffbelastung im ganzen Bündner Rheintal. Im Direktvergleich der beiden Belastungskarten von 2011 und 2022 zeigen sich im 11-jährigen Zeitintervall hingegen nur noch geringfügige Veränderungen.

Allerdings fällt auf, dass sich besonders im Grossraum Chur die mässige gelbe Belastung zugunsten der relativ geringen hellgrünen Primärschadstoffbelastungsstufe verbessert hat (Abb.8d).

Auch die Sommerdosis von Ozon AOT40f hat sich gegenüber 1995 im gesamten Bündner Rheintal sehr deutlich verringert, mit einem Wechsel der Belastungsfarben von den stark belasteten Rot- und Orangetönen auf die heute geringer belasteten Gelb- und Grüntöne (Abb.4b).

Die Ozon-Differenzkarte zeigt zwischen 1995 und 2022 eine deutliche Belastungsreduktion und nur in einem einzigen kleinen Gebiet indifferente Verhältnisse (Abb.8e). In den letzten elf Jahren zeigt sich hingegen in mehreren Gebieten eher wieder eine Zunahme der sommerlichen Ozondosis (Abb.8e).

Die Ammoniakbelastung NH_3 -FI zeigt in den letzten 27 Jahren nur wenig Veränderung (Abb.8c). Diese verbleibt auch für 2022 mit den Farben hellrot, orange und gelb in vielen Gebieten des Bündner Rheintals zwischen 1995 und 2022 weiterhin relativ hoch. Dies besonders im nördlichen Chur, zwischen Trimmis und Untervaz sowie im Talboden und Landwirtschaftsgebiet von Zizers, Landquart und Malans.

Mit der Ammoniak-Differenzkarte zeigt sich zwischen 2022 und 1995 nebst indifferenten Verhältnissen eine etwas stärkere Belastung in weiten Teilen von Chur, Trimmis, Untervaz, Landquart und Malans (Abb.8f). Ebenso in den Höhengebieten von Mastrils, Zizers und Trimmis sowie auch im südlichen Domat/Ems und dem Kreis vor Felsberg sowie in einem kleinen Gebiet der Ems Chemie. Eine deutlich verminderte Ammoniakbelastung zeigt sich hingegen in Teilen der Reblagen zwischen Maienfeld und von Malans und bis ins östliche Landquart, ebenso in Felsberg und Domat/Ems. Daneben finden sich aber auch grössere Gebiete mit einer indifferenten oder geringen Belastung. Eine deutlich verminderte Ammoniakbelastung zeigt sich etwa im höher gelegenen Gebietsstreifen der Bündner Herrschaft und bis ins östliche Landquart.

In den letzten elf Jahren zeigen sich im Vergleich zur 27-jährigen Differenzkarte besonders im Grossraum Chur, Felsberg und Domat/Ems weiterhin erhöhte Belastungsverhältnisse. Einzig im Raum Chur sind die stärkeren Ammoniak-Belastungen etwas zurückgegangen.

Abb. 8 a-c Aktuelle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung von 2022 mittels Flechtenbioindikation

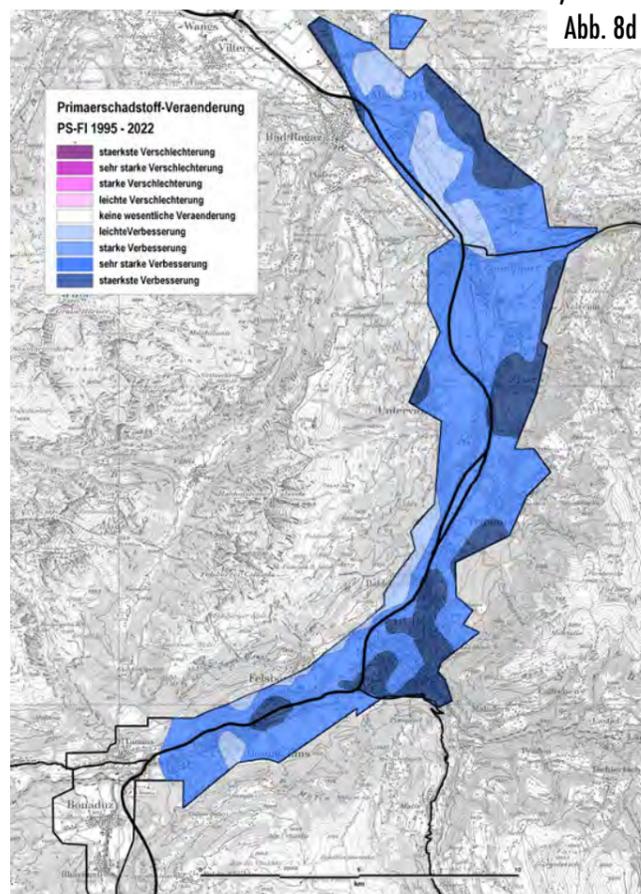


Abb. 8d

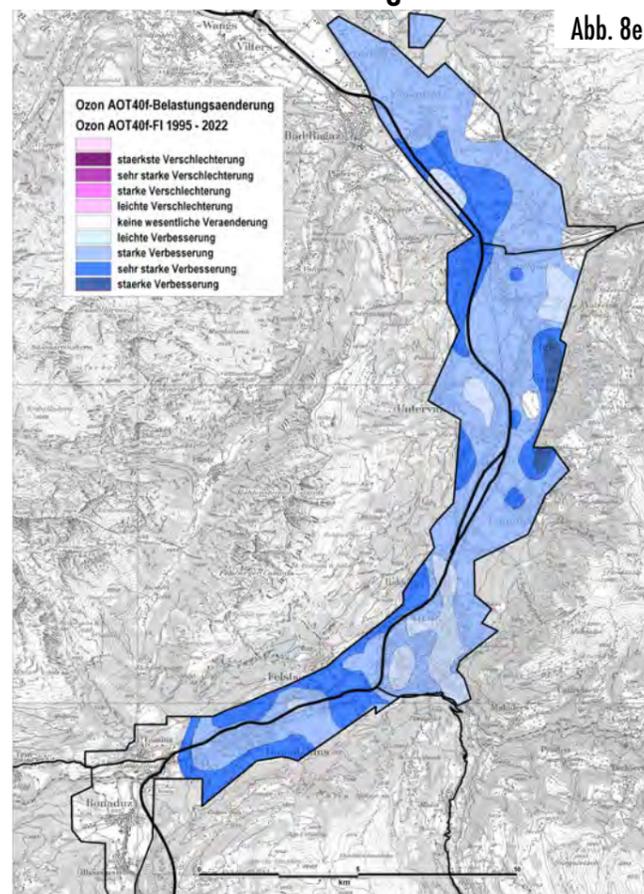


Abb. 8e

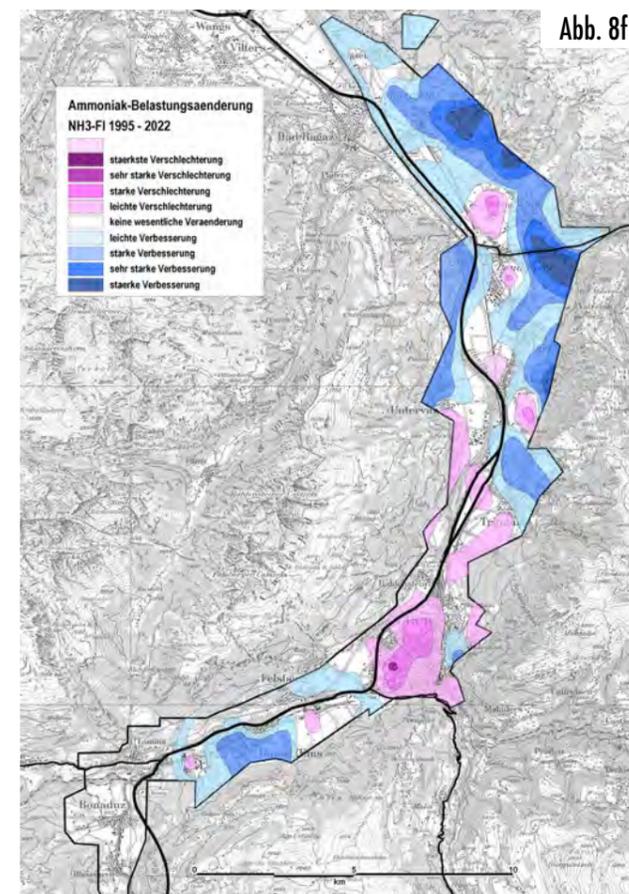


Abb. 8f

Abb. 8 d-f Differentielle Belastung mit Primärschadstoffen, Ozon AOT40f und Ammoniak von 1995 - 2022 mittels Flechtenbioindikation

Diese neuartigen, mit Baumflechten erzielten Ergebnisse zur Veränderung der Primärschadstoffbelastung im Bündner Rheintal werden auch gestützt durch die Langzeitreihen der kantonalen Schadstoffmessungen für NO₂, SO₂ und PM₁₀. So hat etwa die tatsächlich gemessene NO₂-Belastung im selben Zeitraum am Messstandort Rhätische Bahn um 53% und für PM₁₀ um 35% abgenommen. Letztere Abnahme bezieht sich auf den etwas kürzeren Zeitraum von 2004 - 2022. Am 10m nahen A13-Messstandort Chur A13 S1 zeigt sich eine NO₂-Abnahme von 33% und von 18% für PM₁₀, letztere für 2001 - 2022.

Veränderung der Primärschadstoffbelastung seit 2011

Im 11-jährigen Langzeitvergleich zu 2011 (Abb.7e) zeigt sich für 2022 in 60% der nicht eingefärbten Gebiete eine weitgehend konstante Primärschadstoffbelastung (keine wesentliche Veränderung). Eine leichte bis starke Verbesserung der Primärschadstoffbelastung zeigt sich in 27% der hellblauen und in 5% der dunkler blauen Gebiete, dies besonders im Grossraum von Chur bis Zizers, wo vielfältige Sanierungsmassnahmen erfolgten. Demgegenüber zeigt sich in 8% der hell-lachsroten Gebiete eine leichte Verschlechterung der Primärschadstoffbelastung, dies besonders im Gebiet von Fläsch, Maienfeld und St. Luziensteig sowie im Industriegebiet und Verkehrsknoten von Felsberg und ebenso in Tamins.

Direktvergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal von 2022 mit der Belastungsveränderung seit 1995

Die Übersichtsdarstellung 8 auf Seite 10 visualisiert die aktuelle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal von 2022 und vergleicht diese mit der 33-jährigen Belastungsveränderung seit 1995.

Abb. 8 Gesamtübersicht mit der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal von 2022 und Vergleich mit den Differenzkarten der 33-jährigen Belastungsänderung seit 1995.

8a aktuelle Primärschadstoffbelastung von 2022

8b aktuelle Ozon AOT40f-belastung von 2022

8c aktuelle Ammoniakbelastung von 2022

8d Veränderung der Primärschadstoffbelastung von 1995 - 2022

8e Veränderung der Ozon AOT40f-Belastung von 1995 - 2022

8f Veränderung der Ammoniakbelastung von 1995 - 2022

--- siehe Seite 10

Aktuelle Ozon AOT40f-Belastung von 2022

Die aktuelle und frühere Belastung mit dem Sekundärschadstoff Ozon AOT40f (Abb. 8b) zeigen im Vergleich zur Primärschadstoff- und Ammoniakbelastung ein völlig neues räumliches Belastungsmuster mit meist erhöhten bis hohen Belastungen in den Hang- und Höhenzonen und fernab von direkten Emissionsquellen im Talboden. Demgegenüber werden im Talboden und besonders nahe an den Emissionsquellen des Motorfahrzeugverkehrs meist die tiefsten Belastungswerte festgestellt. Der flächenmassig grösste Anteil der aktuellen AOT40f-Belastung von 2022 wurde in der hell- und dunkelgrünen Zone (53% und 33%) mit einer relativ geringen bis geringen Belastung festgestellt, während die stärker belasteten Zonen gelb und orange mit 11% und 2% je geringere Flächenanteile aufwiesen, ebenso auch die hellblaue Zone mit sehr geringer Belastung (1%). Insgesamt hat die Ozon AOT40f-Belastung bereits von 1995 auf 2010 sehr deutlich abgenommen. In diesem Zeitabschnitt konnten dank technischer Massnahmen (VOC-Abgabe) die Ozonbelastung reduziert und die Ozonspitzen deutlich gebrochen werden.

In der aktuellen AOT40f-Belastungskarte von 2022 finden sich orange Zonen mit erhöhten Belastungswerten in Höhenlagen von Rhäzüns und Tamins, gefolgt von gelben Gebieten mit einer mässigen Ozon-Belastung, je in erhöhten Lagen in Rhäzüns, Tamins, in der Hangzone von Chur und Trimmis, ebenso zwischen Igis und Landquart und der Hangzone von Maienfeld mit St. Luziensteig. Die dominanten hell- und dunkelgrünen Gebiete mit relativ geringer und geringer AOT40f-Belastung finden sich im ganzen Talboden bis in die unterste Hangzone hinein. Auffallend ist ein grösseres Gebiet in Chur mit einer bereits geringen AOT40f-Belastung, welches sich bis nach Felsberg erstreckt.

Veränderung der Ozon AOT40f-Belastung seit 1995

Die zeitliche Veränderung der Ozonbelastung mit dem bioindikativen AOT40f-Flechtenindex (AOT4f-FI) für Ozon zwischen 1995 und 2022 wird mit der Differenzkarte von Abbildung 8e visualisiert. Diese zeigt insgesamt in 97% aller untersuchten Gebiete eine mehrheitlich starke Belastungsabnahme (Abb.8e).

Es zeigt sich in 26% der Gebiete eine starke und in weiteren 23% sogar eine sehr starke Belastungsabnahme, während sich die Gebiete mit stärkster Belastungsabnahme auf 1.4% der Gebietsfläche konzentrieren. Einzig drei kleinere und periphere Gebiete in Maienfeld Rofels, Landquart und Zizers Tschalär mit 4% Flächenanteil zeigen indifferente Verhältnisse.

Die Gebiete mit einer sehr starken bis sogar stärksten verminderten Ozon AOT40f-Belastung finden sich im nördlichen Rheintal in der westlichen Hangzone und teilweise bis hinab in den Talboden zwischen Maienfeld und Mastrils und zwischen Igis und Zizers und auch zwischen Matrils und Untervaz.

Im südlichen Bündner Rheintal zeigt sich eine sehr starke Belastungsabnahme ebenfalls in meist peripheren und etwas erhöhten Gebieten von Haldenstein, Felsberg und Domat/Ems, während die tieferen Lagen, so auch in der Stadt Chur, meist eine starke Belastungsabnahme zeigen. In Chur weisen ein grösseres Gebiet zwischen St. Luzi und Chur Nord sowie Teile des Industrie/Gewerbegebietes entlang der Ringstrasse dagegen nur eine leichte Verbesserung der Ozonbelastung auf.

Aktuelle Ammoniakbelastung von 2022

Die aktuelle Ammoniakbelastung mit dem bioindikativen NH₃-Flechtenindex (NH₃-FI) ist in Abb. 8c dargestellt. Diese verbleibt auch für 2022 mit den Farben hellrot, orange und gelb in vielen Gebieten des Bündner Rheintals zwischen 1995 und 2022 weiterhin relativ hoch, Dies besonders im nördlichen Chur, zwischen Trimmis und Untervaz sowie im Talboden und Landwirtschaftsgebiet von Zizers, Landquart und Malans. Auch in den letzten 27 Jahren zeigt die Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal nur wenig Veränderung.

Veränderung der Ammoniakbelastung seit 1995

Die zeitliche Veränderung der Ammoniakbelastung zwischen 1995 und 2022 mit der Differenzkarte (Abb. 8f) zeigt mit gemischt blauen und auch roten Zonen, dass es in der letzten 27 Jahren sowohl zu Verbesserungen wie auch Verschlechterungen in der Ammoniakbelastung gekommen ist.

Die Gebiete mit einer verminderten Ammoniakbelastung finden sich im nördlichen Bündner Rheintal zwischen Fläsch und Zizers und Untervaz sowohl im Talboden wie auch in erhöhten Lagen. Diese Höhengebiete weisen meist eine eine starke und sehr starke Verbesserung auf. So im obersten Maienfeld, Malans und Zizers mit Flächenanteilen von 3 - 5%. Insgesamt beträgt der Flächenanteil der Gebiete mit einer verminderten Ammoniakbelastung hohe 50% gegenüber 31% der Gebiete ohne wesentliche Belastungsänderung und 17% der Gebiete mit einer erhöhten Belastung.

Mit einer Belastungszunahme von Ammoniak auffallend sind der Grossraum Chur und dabei besonders die entlang der Ringstrasse gelegenen Wohn- und Industrie-/Gewerbegebiete, welche sogar eine dunkler rote Zone mit einer starken Verschlechterung zeigen. Im Gebiet der Kreuzung der Ringtrasse mit der Rheinstrasse ergibt sich sogar eine kleine Fläche mit einer sehr starken Verschlechterung.

Insgesamt handelt es sich in Chur oft auch um Wohn- und Industrie/ Gewerbegebiete mit einer starken Verkehrsbelastung. Einzig in den nördlichen Randzonen sind Intensiv-Landwirtschaft und die A13 vorherrschend.

Diese Feststellung nährt den Verdacht, dass nebst der allgemein bekannten Quelle der Intensiv-Landwirtschaft auch ein "on-road ammonia emissions" des MfZ-Verkehrs wirkungsrelevant sein muss, wie dies auch bereits in der Erfolgskontrolle Studie Uri 2021 entlang der A2 Gotthardautobahn nachgewiesen wurde und später auch noch mit Bündner Ergebnissen gestützt wird. Mittels Remote Sensing Methoden haben Burgard et al. ab 2006¹⁰ in Californien Studien von "on-road ammonia emissions" vorgelegt, welche darauf hindeuten, dass Ammoniak-Emissionen aus benzin- und dieselbetriebenen Motorfahrzeugen bisher unterschätzt wurden.

Aktuelle, frühere und differentielle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Misox von 2023 und deren Veränderung seit 1990

Die Übersichtskarten der Abbildungen 9 und 10 illustrieren die aktuellen, früheren und differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastungen im Misox seit 1990, wobei die Abb. 10 die früheren Karten von 1990 und 2012 zeigen.

Aktuelle Primärschadstoffbelastung von 2023

Für die Primärschadstoffbelastung (PS-FI) im unteren Misox von 2023 (Abb.9a) zeigt sich gegenüber den früheren Untersuchungen von 1990, 1999 und 2012, dass die roten Zonen mit starker, sehr starker und stärkster Primärschadstoffbelastung vollständig aus dem ganzen Misoxer Untersuchungsgebiet verschwunden sind.

Für 2023 zeigt sich in 44% der gelben Gebiete eine mässige Primärschadstoffbelastung, dies besonders im Talboden entlang der A13 zwischen San Vittore und Cama, gefolgt von 40% der hellgrünen Zone mit einer relativ geringen Primärschadstoffbelastung, welche mehr in peripheren Lagen und in den Hangzonen von Roveredo bis Leggia und von San Vittore zu finden sind. Erst in unteren Lagen von Santa Maria findet sich mit 2% der Fläche die dunkelgrüne Zone mit geringer und in Santa Maria und den Monti mit 8% Flächenanteil die hellblaue Zone mit einer sehr geringen Primärschadstoffbelastung.

Aktuelle Ozon AOT40f-Belastung von 2023

Die früheren orangen und roten Zonen mit erhöhter bis hoher Ozonbelastung sind 2023 vollständig aus dem Gebiet von Roveredo und San Vittore verschwunden (Abb.9b). Roveredo zeigt aktuell eine sehr geringe Ozonbelastung auf, während Castaneda, Santa Maria, Grono und Leggia eine erhöhte Ozon AOT40f-Belastung aufweisen.

Einzig zwischen Grono und Leggia zeigt sich entlang der A13 ein hellrotes Gebiet mit deutlich erhöhter Ozonbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung gegenüber 1990 zeigt sich in Roveredo, wo aktuell eine hellblaue Zone mit sehr geringer Ozon AOT40f-Belastung nachgewiesen wurde. Dies hat auch mit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 und dem erzielten Belastungsrückgang

¹⁰ Burgard, Bishop G, Stedman D 2006. Remote Sensing of Ammonia and Sulfur Dioxide from On-Road Light Duty Vehicles. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 7018-7022.

von NO₂, PM₁₀, VOC in Roveredo zu tun. Eine deutliche Belastungszunahme zeigt sich im Gebiet nördlich von Grono bis Leggia bis unterhalb von Castaneda (Abb.9h).

Eine deutliche Belastungszunahme zeigt sich im Gebiet nördlich von Grono bis Leggia und Cama mit dem Höhen transekt bis hinauf nach Santa Maria.

Aktuelle Ammoniakbelastung im Misox von 2023

Generell zeigt sich eine geringere Ammoniakbelastung in Roveredo und erhöhte Belastung in Grono und Leggia. Seit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 hat sich die Ammoniakbelastung in Roveredo deutlich verringert (Abb.9c). Während früher im unteren Misox meist nur gelbe, orange und rote Zonen mit mässiger bis sehr hoher Belastung nachgewiesen wurden, zeigen sich 2023 auch wieder grüne und sogar blaue Zonen mit einer geringen bis geringsten Ammoniakbelastung, so in Ai Rogg und San Fedee von Roveredo und westlich von San Vittore. Einzig zwischen Grono und Leggia findet sich entlang der A13 und in der Landwirtschaftszone noch eine orange bis rote Zone mit einer erhöhten bis sehr starken Ammoniakbelastung.

Belastungsveränderungen im Misox der letzten 33 Jahren von 1990 - 2023

Eine starke bis sogar stärkste Belastungsabnahme zeigt sich im 33-jährigen Beobachtungszeitraum von 1990 - 2023 für alle drei Schadstoffkomponenten (Abb.9 und 10).

Die **Belastungsminderung der Primärschadstoffbelastung** zeigt den stärksten Belastungsrückgang in weiten Teilen des Talbodens und besonders in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo sowie zwischen Grono und Cama (Abb.9d).

Die **Belastungsminderung der Ozon AOT40f-Belastung** zeigt dagegen die stärkste Verbesserung im Höhen transekt zwischen den nördlichen Gebieten von Roveredo und Castaneda und Santa Maria (Abb.9e). Allerdings zeigt sich im Gebiet von Leggia und Cama auch eine leichte bis geringe Verschlechterung bzw. eine Zunahme der Ozon AOT40f-Belastung.

Die **Belastungsminderung der Ammoniakbelastung** zeigt im Gebietsstreifen vom westlichen Roveredo bis San Vittore sowie in Santa Maria und vom nördlichen Leggia bis Cama (Abb.9f) eine besonders starke Belastungsverminderung. Im Zentrum von San Vittore und im östlichen Roveredo bis Grono zeigt sich eine nur geringe Verringerung der Ammoniakbelastung.

Belastungsveränderungen der letzten 11 Jahre von 2012-2023

Belastungsveränderung der Primärschadstoffbelastung. Diese zeigt eine leichte Belastungsabnahme in Roveredo und eine Belastungszunahme in Grono und dem Höhen transekt, bei sonst indifferenten Verhältnissen in weiten Teilen des Talbodens (Abb.9g).

Belastungsveränderung der Ozon AOT40f-Belastung. Diese zeigt eine Belastungsminderung in Roveredo, im westlichen San Vittore sowie im Gebietsstreifen von Grono und der Hangzone bis unterhalb von Castaneda (Abb.9h). Eine deutliche Belastungszunahme zeigt sich im Gebiet nördlich von Grono bis Leggia und Cama mit dem Höhen transekt bis hinauf nach Santa Maria. Westlich exponierte Gebiete im Höhen transekt zeigen indifferente Verhältnisse, so auch die Gebiete zwischen einer Verbesserung und Verschlechterung der Ozonbelastung.

Abb. 9 Gesamtübersicht mit der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Misox von 2023 und Vergleich mit den Differenzkarten der 33- und 11-jährigen Belastungsänderung seit 1990 und 2012.

9a aktuelle Primärschadstoffbelastung von 2023

9b aktuelle Ozon AOT40f-belastung von 2023

9c aktuelle Ammoniakbelastung von 2023

9d Veränderung der Primärschadstoffbelastung von 1990 - 2023

9e Veränderung der Ozon AOT40f-Belastung von 1990 - 2023

9f Veränderung der Ammoniakbelastung von 1990 - 2023

9g Veränderung der Primärschadstoffbelastung von 2012 - 2023

9h Veränderung der Ozon AOT40f-Belastung von 2012 - 2023

9i Veränderung der Ammoniakbelastung von 2012 - 2023

--- siehe Seite 15

Direktvergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Misox von 2023 und deren Belastungsveränderungen über 11 und 33 Jahre seit 1990 mittels der Flechtenbioindikation

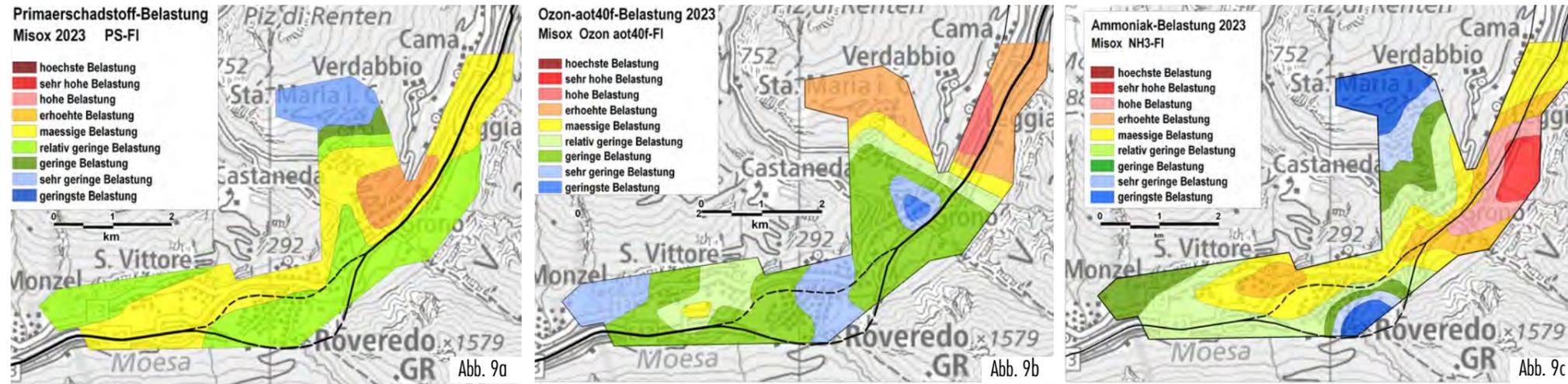


Abb. 9 a-c Misox 2023: Aktuelle Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung

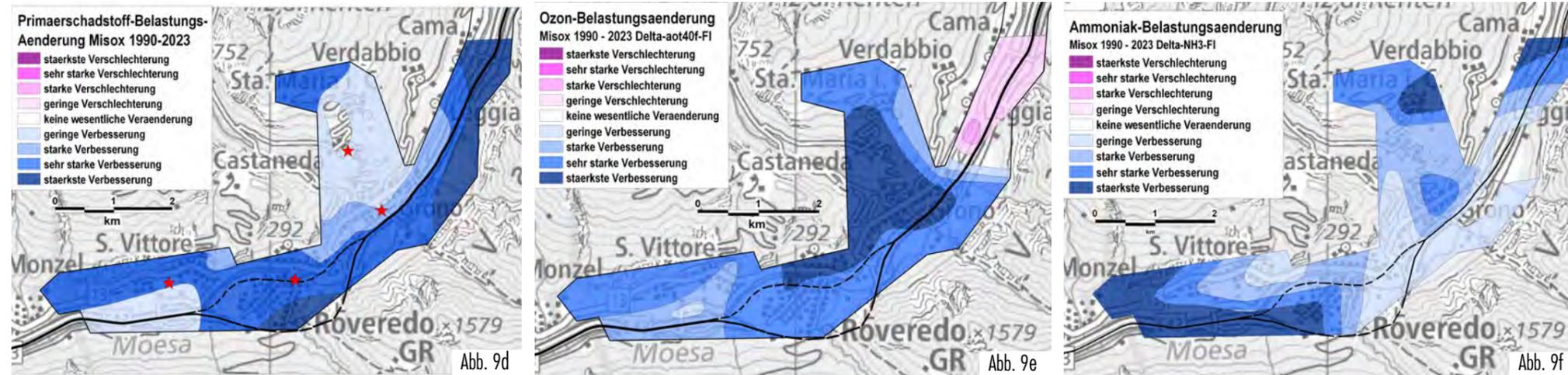


Abb. 9 d-f Misox 1990 - 2023: Differenzkarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung über 33 Jahre

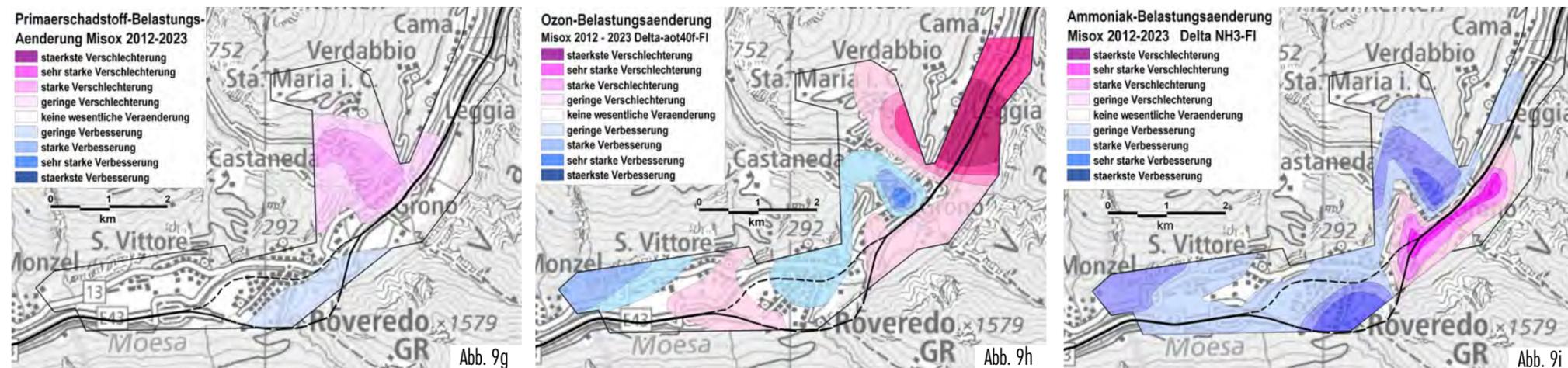


Abb. 9 g-i Misox 2012 - 2023: Differenzkarten der Primärschadstoff-, der Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung der letzten 11 Jahre

Aktuelle Belastungsvergleiche von 2023

Mässige - relativ geringe Primärschadstoffbelastung. Bis auf die orange Zone mit erhöhter Primärschadstoffbelastung in Grono sind die früheren roten Zonen mit starker bis stärkster Primärschadstoffbelastung vollständig aus dem Misoxer Untersuchungsgebiet verschwunden (Abb.9a). In 44% der gelben und 40% der hellgrünen Gebiete zeigt sich aktuell eine mässige bis relativ geringe Belastung, dies im Talboden und in peripheren Lagen zwischen von Roveredo bis Leggia und San Vittore.

Roveredo mit sehr geringer und Castaneda, Santa Maria, Grono und Leggia mit erhöhter Ozon AOT40f-Belastung. Die früheren orangen und roten Zonen mit erhöhter bis hoher Ozonbelastung sind vollständig aus dem Gebiet von Roveredo und San Vittore verschwunden (Abb.9b). Einzig zwischen Grono und Leggia zeigt sich entlang der A13 ein rotes Gebiet mit deutlich erhöhter Ozonbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung gegenüber 1990 zeigt sich in Roveredo, wo aktuell eine hellblaue Zone mit sehr geringer Ozon AOT40f-Belastung nachgewiesen wurde. Dies hat auch mit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 und dem erzielten Belastungsrückgang von NO₂, PM10, VOC in Roveredo zu tun.

Geringere Ammoniakbelastung in Roveredo und erhöhte Belastung in Grono und Leggia. Seit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 hat sich die Ammoniakbelastung in Roveredo deutlich verringert (Abb.9c). Während früher im unteren Misox meist nur gelbe, orange und rote Zonen mit mässiger bis sehr hoher Belastung nachgewiesen wurden, zeigen sich 2023 auch wieder grüne und sogar blaue Zonen mit einer geringen bis geringsten Ammoniakbelastung, so in Ai Rogg und San Fedee von Roveredo und westlich von San Vittore. Einzig zwischen Grono und Leggia findet sich entlang der A13 und in der Landwirtschaftszone noch eine orange bis rote Zone mit einer erhöhten bis sehr starken Ammoniakbelastung.

Belastungsveränderungen von 1990-2023 während 33 Jahren

Eine starke bis sogar stärkste Belastungsabnahme zeigt sich im 33-jährigen Beobachtungszeitraum von 1990 - 2023 für alle drei Schadstoffkomponenten.

Während die **Primärschadstoffbelastung** den stärksten Belastungsrückgang in weiten Teilen des Talbodens und besonders in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo sowie zwischen Grono und Cama aufweist (Abb.9d), zeigt sich für die **Ozon AOT40f-Belastung** die stärkste Verbesserung im Höhenstransekt zwischen den nördlichen Gebieten von Roveredo und Castaneda und Santa Maria (Abb.9e). Allerdings zeigt sich im Gebiet von Leggia und Cama auch eine leichte bis geringe Verschlechterung bzw. eine Zunahme der Ozon AOT40f-Belastung.

Eine besonders starke Belastungsverminderung zeigt die **Ammoniakbelastung** im Gebietsstreifen vom westlichen Roveredo bis San Vittore sowie in Santa Maria und vom nördlichen Leggia bis Cama (Abb. 9f). Im Zentrum von San Vittore und im östlichen Roveredo bis Grono zeigt sich eine nur geringe Verringerung der Ammoniakbelastung.

Belastungsveränderungen der letzten 11 Jahre von 2012-2023

Primärschadstoffbelastung. Diese zeigt ein leichte Belastungsabnahme in Roveredo und eine Belastungszunahme in Grono und dem Höhenstransekt, bei sonst indifferenten Verhältnissen in weiten Teilen des Talboden (Abb.9g).

Ozon AOT40f-Belastung. Diese zeigt eine Belastungsminderung in Roveredo, im westlichen San Vittore sowie im Gebietsstreifen von Grono und der Hangzone bis unterhalb von Castaneda (Abb. 9h). Eine deutliche Belastungszunahme zeigt sich im Gebiet nördlich von Grono bis Leggia und Cama mit dem Höhenstransekt bis hinauf nach Santa Maria. Westlich exponierte Gebiete im Höhenstransekt zeigen indifferente Verhältnisse, so auch die Gebiete zwischen einer Verbesserung und Verschlechterung der Ozonbelastung.

Ammoniakbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung zeigt sich in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo, im westlichen San Vittore sowie in Teilen von Grono und im Höhenstransekt bis Santa Maria, während die Monti und das Zentrum von San Vittore indifferente Verhältnisse zeigen (Abb.9i). Eine deutliche Belastungszunahme von Ammoniak zeigt sich im Gebiet des nördlichen San Fedele Tunnelportals und Zubringers sowie entlang der A13 bis nach Grono und ist wohl auf eine "on-road" Ammoniakbelastung zurückzuführen.

Direktvergleich der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Misox von 1990 und 2012

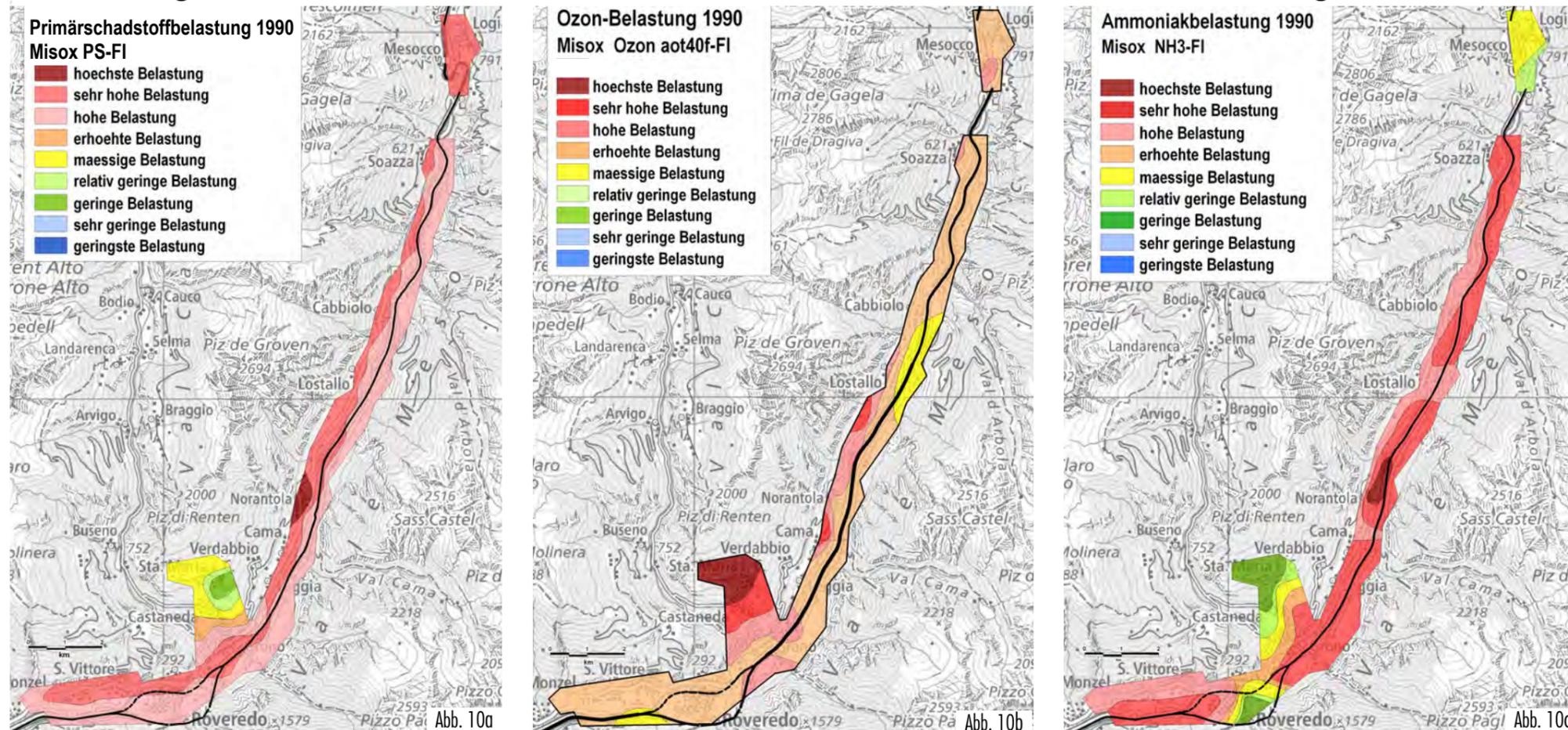


Abb. 10 a-c Misox 1990: Historische Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung von 1990

Belastungsvergleiche der Erstuntersuchung von 1990

Hohe bis sehr hohe Primärschadstoffbelastung von 1990

Eine hohe, sehr hohe und höchste Primärschadstoffbelastung mit vorwiegend Rottönen zeigte sich 1990 im ganzen Talboden des Misox (Abb.10a). Einzig im Höhen transekt von Castaneda und Santa Maria zeigten sich mit gelber und grüner Farbe Zonen mit einer mässigen, relativ geringen und geringen Primärschadstoffbelastung. In weiten Teilen des Talbodens entlang der A13 dominierte 1990 mit 51% die hellrote Zone mit einer hohen Primärschadstoffbelastung, gefolgt von der dunkler roten Zone mit einer sehr hohen Belastung mit 36% Flächenanteil, und dies meist in den westlich gelegenen unteren Hangzonen.

Hohe bis höchste Ozon AOT40f-Belastung von 1990

Mit Orange- und Rottönen im ganzen Misox dominierte zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung eine hohe Belastung mit der Sommerdosis von Ozon AOT40f mit den Belastungszonen erhöhte, hohe, sehr hohe und sogar höchste Ozonbelastung (Abb.10b). Mit dem grössten Flächenanteil von 65% zeigte sich die orange Zone mit erhöhter Belastung im ganzen Misox von Mesocco bis hinunter nach San Vittore. Weitere 15.8% der Gebiete wurden von der hellroten Zone mit starker Belastung bedeckt, gefolgt von der dunkler und dunkelroten Zone mit sehr starker und stärkster Belastung mit 6-7% Flächenanteil, dies besonders im Höhen transekt Castaneda und Santa Maria sowie in Teilgebieten von Roveredo, Cama und Lostallo.

Hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung von 1990

Ebenfalls mit vorwiegend Rottönen im ganzen Talboden des Misox zeigte sich zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung eine weitgehend hohe, sehr hohe und höchste Ammoniakbelastung (Abb.10c). Einzig in Roveredo und im Höhen transekt von Castaneda und Santa Maria zeigten sich mit gelber und grüner Farbe Zonen mit einer mässigen, relativ geringen und geringen Ammoniakbelastung.

Belastungsvergleiche der zweiten Erfolgskontrolle von 2012

Mässige bis geringe Primärschadstoffbelastung von 2012

Eine sehr deutliche Entlastung zeigte die Primärschadstoffbelastung zu Gunsten der hellgrünen Zone mit einer relativ geringen Belastung und einem Flächenanteil von 46%, gefolgt von der dunkelgrünen Zone mit einer geringen Primärschadstoffbelastung in 34% der Gebiete, dies besonders in den höher gelegenen Gebieten von Lostallo bis Mesocco sowie in Castaneda (Abb.10d). Die Zone mit einer sehr geringen Primärschadstoffbelastung und einer Gebietsfläche von 4% konnte 2012 nur in Santa Maria und den Monti nachgewiesen werden. Im Talboden von San Vittore und Grono zeigte sich hingegen mit einem Flächenanteil von 16% die gelbe Zone mit einer mässigen Primärschadstoffbelastung.

Relativ geringe Ozon AOT40f-Belastung von 2012

Mit der zweiten Erfolgskontrolluntersuchung von 2012 zeigte sich eine gut sichtbare Entlastung der Ozon AOT40f-Belastung zu Gunsten der grünen und teilweise sogar der blauen Belastungszonen (Abb.10e). Mit dem grössten Flächenanteil von 75% zeigte sich die dunkelgrüne Zone mit geringer Belastung im ganzen Misox von Mesocco bis hinunter nach San Vittore. Die hellgrüne Zone mit relativ geringer Ozonbelastung zeigte sich im westlich gelegenen Teil von San Vittore, im Gebietsstreifen von Cama bis vor Lostallo sowie im unteren Höhen transekt. Mit mässiger Ozonbelastung zeigte sich Santa Maria mit den Monti.

Hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung von 2012

Eine gut sichtbare Entlastung zu Gunsten der orangen, gelben und teilweise hellgrünen Zone mit einer mässigen bis erhöhten Ammoniakbelastung mit 40.8 und 30% Flächenanteil zeigte sich für 2012 (Abb.10f). Nur in Leggia, Soazza und Lostallo zeigte sich mit kleiner Fläche noch eine rote Zone mit hoher Ammoniakbelastung. Im Höhen transekt von Santa Maria zeigte sich mit einer hell- und dunkelblauen Zone sogar eine Verringerung in der Ammoniakbelastung. Die hellgrüne Zone mit einer relativ geringen Belastung zeigte sich auch in Castaneda und im Gebiet zwischen Norantola und Lostallo auf einer Fläche von 13%.

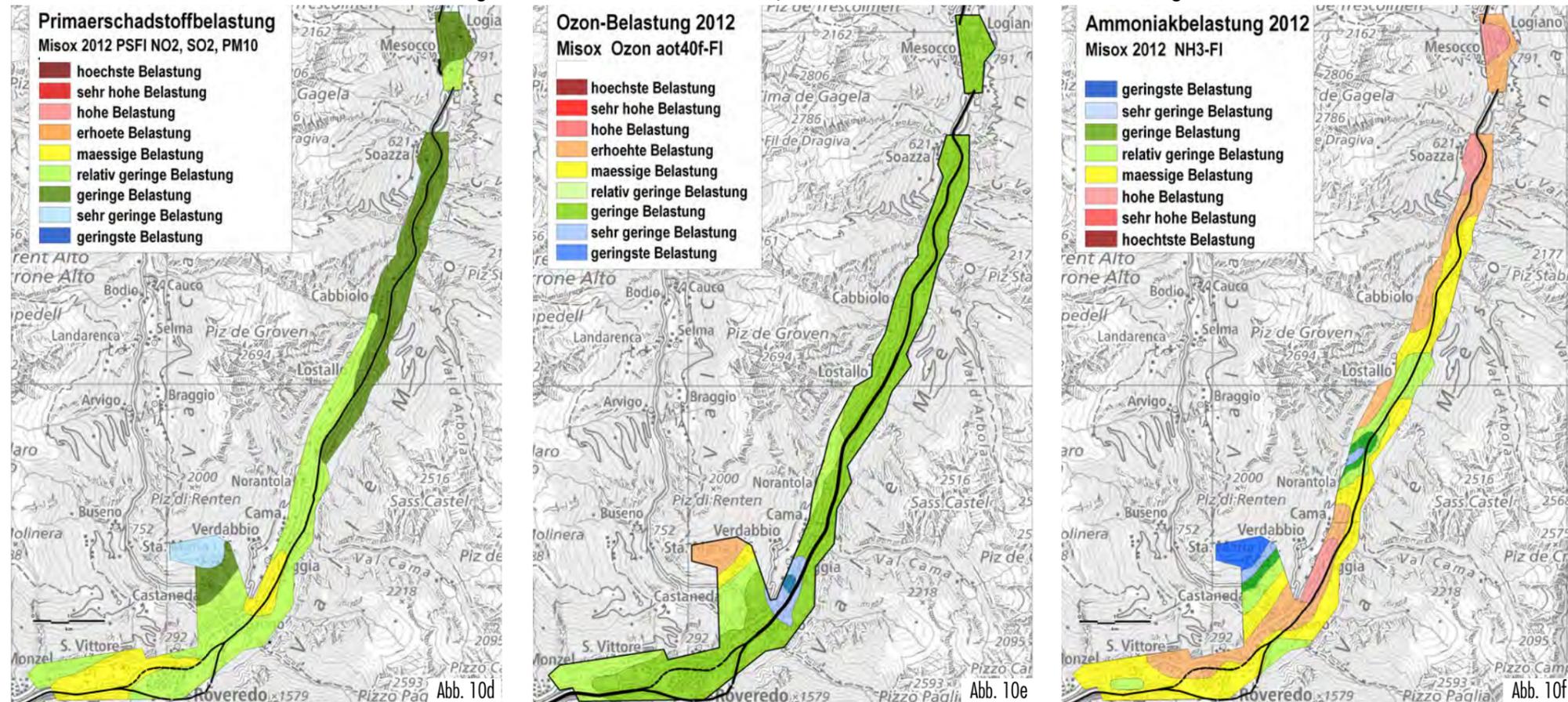


Abb. 10 d-f Misox 2012: Historische Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung von 2012

Belastungsveränderung der Ammoniakbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung zeigt sich in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo, im westlichen San Vittore sowie in Teilen von Grono und im Höhentransekt bis Santa Maria, während die Monti und das Zentrum von San Vittore indifferente Verhältnisse zeigen (Abb.9i). Eine deutliche Belastungszunahme von Ammoniak zeigt sich im Gebiet des nördlichen San Fedele Tunnelportals und Zubringers sowie entlang der A13 bis nach Grono.

Frühere Belastungsvergleiche im Misox von 1990 und 2012

Hohe bis sehr hohe Primärschadstoffbelastung von 1990

Eine hohe, sehr hohe und höchste Primärschadstoffbelastung mit vorwiegend Rottönen zeigte sich 1990 im ganzen Talboden des Misox (Abb.10a). Einzig im Höhentransekt von Castaneda und Santa Maria zeigten sich mit gelber und grüner Farbe Zonen mit einer mässigen, relativ geringen und geringen Primärschadstoffbelastung. In weiten Teilen des Talbodens entlang der A13 dominierte 1990 mit 51% die hellrote Zone mit einer hohen Primärschadstoffbelastung, gefolgt von der dunkler roten Zone mit einer sehr hohen Belastung mit 36% Flächenanteil, und dies meist in den westlich gelegenen unteren Hangzonen.

Hohe bis höchste Ozon AOT40f-Belastung von 1990

Mit Orange- und Rottönen im ganzen Misox dominierte zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung eine hohe Belastung mit der Sommerdosis von Ozon AOT40f mit den Belastungszonen erhöhte, hohe, sehr hohe und sogar höchste Ozonbelastung (Abb.10b). Mit dem grössten Flächenanteil von 65% zeigte sich die orange Zone mit erhöhter Belastung im ganzen Misox von Mesocco bis hinunter nach San Vittore. Weitere 16% der Gebiete wurden von der hellroten Zone mit starker Belastung bedeckt, gefolgt von der dunkler und dunkelroten Zone mit sehr starker und stärkster Belastung mit 6-7% Flächenanteil, dies besonders im Höhentransekt Castaneda und Santa Maria sowie in Teilgebieten von Roveredo, Cama und Lostalio.

Hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung von 1990

Ebenfalls mit vorwiegend Rottönen im ganzen Talboden des Misox zeigte sich zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung eine weitgehend hohe, sehr hohe und höchste Ammoniakbelastung (Abb.10 c). Einzig in Roveredo und im Höhentransekt von Castaneda und Santa Maria zeigten sich mit gelber und grüner Farbe Zonen mit einer mässigen, relativ geringen und geringen Ammoniakbelastung.

Frühere Belastungsvergleiche von 2012

Mässige bis geringe Primärschadstoffbelastung von 2012

Eine sehr deutliche Entlastung zeigte die Primärschadstoffbelastung zu Gunsten der hellgrünen Zone mit einer relativ geringen Belastung und einem Flächenanteil von 46%, gefolgt von der dunkelgrünen Zone mit einer geringen Primärschadstoffbelastung in 34% der Gebiete, dies besonders in den höher gelegenen Gebieten von Lostalio bis Mesocco sowie in Castaneda (Abb.10d). Die Zone mit einer sehr geringen Primärschadstoffbelastung und einer Gebietsfläche von 4% konnte 2012 nur in Santa Maria und den Monti nachgewiesen werden. Im Talboden von San Vittore und Grono zeigte sich hingegen mit einem Flächenanteil von 16% die gelbe Zone mit einer mässigen Primärschadstoffbelastung.

Abb. 10 Gesamtübersicht mit der früheren Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Misox von 1990 und 2012.

10a Primärschadstoffbelastung PS-FI von 1990

10b Ozon AOT40f-belastung von 1990

10c Ammoniakbelastung NH₃-FI von 1990

10d Primärschadstoffbelastung von 2012

10e Ozon AOT40f-belastung von 2012

10f Ammoniakbelastung NH₃-FI von 2012

--- siehe Seite 16

Relativ geringe Ozon AOT40f-Belastung von 2012

Mit der zweiten Erfolgskontrolluntersuchung von 2012 zeigte sich eine gut sichtbare Entlastung der Ozon AOT40f-Belastung zu Gunsten der grünen und teilweise sogar der blauen Belastungszonen (Abb.10e). Mit dem grössten Flächenanteil von 75% zeigte sich die dunkelgrüne Zone mit geringer Belastung im ganzen Misox von Mesocco bis hinunter nach San Vittore. Die hellgrüne Zone mit relativ geringer Ozonbelastung zeigte sich im westlich gelegenen Teil von San Vittore, im Gebietsstreifen von Cama bis vor Lostallo sowie im unteren Höhen transekt. Mit mässiger Ozonbelastung zeigte sich Santa Maria mit den Monti.

Hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung von 2012

Eine gut sichtbare Entlastung zu Gunsten der orangenen, gelben und teilweise hellgrünen Zone mit einer mässigen bis erhöhten Ammoniakbelastung mit 40% und 20% Flächenanteil zeigte sich für 2012 (Abb.10f). Eine sehr deutliche Belastungsminderung zeigte sich in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo, im westlichen San Vittore sowie in Teilen von Grono. Auch im Höhen transekt von Santa Maria zeigten sich mit einer hell- und dunkelblauen Zone sogar eine Verringerung in der Ammoniakbelastung. Die hellgrüne Zone mit einer relativ geringen Belastung zeigte sich auch in Castaneda und im Gebiet zwischen Norantola und Lostallo auf einer Fläche von 13%.

Trendanalyse der schadstoffspezifischen Belastungskarten mit der Luftgesamtbelastung mit Flechten im Bündner Rheintal und Misox

Der zeitliche Vergleich der aktuellen, früheren und differentiellen Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der integralen Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mit Flechten visualisiert Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Belastung mit diesen verschiedenen Schadstoffklassen im Bündner Rheintal und Misox der letzten 11 bis 36 Jahren. Diese Vergleiche erfolgen nachfolgend auch noch zusammen mit den Veränderung der Immissions-, Emissions- und Verkehrsbelastung.

Vergleich der aktuellen Primärschadstoffbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal

Eine recht gute Übereinstimmung im Belastungsmuster zur Luftgesamtbelastung (Abb.11a) zeigt die Primärschadstoffbelastung (Abb. 11b). Die tiefer gelegenen Industrie-/Gewerbegebiete und verkehrsgeprägten Muldenlagen zeigen meist eine gelbe Signatur mit leicht erhöhter mässiger Primärschadstoffbelastung, während die Hang- und Höhenlagen deutlich geringer belastet sind.

Bezüglich der Luftgesamtbelastung erscheint für 2022 das Höhen gebiet Rhäzüns Runcaglia wieder mit blau, also der geringsten Luftgesamtbelastung wie zur Erstuntersuchung von 1986, was sich auch bezüglich der Primärschadstoffbelastung bestätigt.

Im Direktvergleich der entsprechenden Differenzkarten (Abb.11e und 11f) zeigt sich auch für die Primärschadstoffbelastung eine teilweise Gleichläufigkeit im Ausbreitungsmuster. So zeigt der Grossraum Chur, welcher bezüglich Luftgesamtbelastung eine deutliche Verbesserung zeigt, auch eine starke bis sehr starke Reduktion in der Primärschadstoffbelastung. Dies obschon die Differenzkarte der Luftgesamtbelastung eine längere Periode von 36 Jahren gegenüber 27 Jahre bei der Primärschadstoffbelastung aufweist.

Vergleich der aktuellen Sommerdosis der Ozonbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal

Das zu erwartende inverse Verhalten zeigt der Kartenvergleich der Luftgesamtbelastung (Abb.11a) mit der Sommerdosis der Ozon AOT40f-Belastung (Abb.11c). Ozon als Sekundärschadstoff zeigt bekannterweise dieses inverse Verhalten mit tiefen Belastungen im mit Industrie und Verkehr geprägten Talboden und hohen Werten in emissionsfernen Hang- und Höhenlagen.

Zur Erklärung der Luftgesamtbelastung der Luftgütekarte sind diese Ozonanteile in eher ländlichen Gebieten essentiell, und unsere Flechtenimmissionsmodelle berücksichtigen dieses inverse Verhalten von Ozon seit Anbeginn. Dementsprechend sind auch die erhöhten gelben und orangen Gebiete der Ozonkarte zur Erklärung von Verlusten in der grünen Zone geringer Luftgesamtbelastung zwischen 1986, 1995 und 2022 relevant. Im Direktvergleich der entsprechenden Differenzkarten (Abb.11f,h) zeigt sich auch für Ozon keine so auffällige Übereinstimmung. Allerdings umfasst die Differenzkarte der Luftgesamtbelastung eine längere Periode von 36 Jahren gegenüber 27 Jahren bei der Ozonbelastung.

Vergleich der aktuellen Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal

Der synoptische Kartenvergleich der aktuellen Luftgesamtbelastung (Abb.11a) von 2022 mit der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung zeigt für die Ammoniakbelastung (Abb.11d) eine recht gute Übereinstimmung zum Belastungsmuster der Luftgesamtbelastung. Orange Zonen mit relativ grosser Luftgesamtbelastung erscheinen auch in der Ammoniakkarte mit oranger und roter Signatur und zeigen somit eine erhöhte bis hohe Ammoniakbelastung. Ebenso erscheinen in beiden Karten die geringer belasteten Gebiete in peripherer und in Hanglagen je mit grüner Signatur. Der Direktvergleich der entsprechenden Differenzkarten (Abb.11e,h) zeigt keine so auffällige Übereinstimmung. Allerdings umfasst die Differenzkarte der Gesamtbelastung auch eine längere Periode von 36 Jahren.

Vergleich der Belastungsänderung der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal der letzten 27 und 11 Jahre

Mit der synoptischen Darstellung und Trendanalyse von Abbildungen 11 und 12 werden nur noch die 27- und 11-jährigen Belastungsänderungen der bioindikativen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f-, Ammoniak- und Luftgesamtbelastung des IAP_{BR} miteinander verglichen. Ziel auch dieses visuellen Vergleichs ist es herauszufinden, wie gut die Ausbreitungsmuster der 27- und 12-jährigen Belastungsänderungen der Differenzkarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung diejenigen der integralen Luftgesamtbelastungsveränderung des IAP_{BR} erklären können.

Belastungsänderung der Primärschadstoffbelastung und der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal über 27 und 11 Jahre

Im 27-jährigen Direktvergleich der entsprechenden Differenzkarten der Luftgesamtbelastung mit der Primärschadstoffbelastung (Abb. 12a,b) zeigt sich für die Primärschadstoffbelastung eine teilweise Gleichläufigkeit im Ausbreitungsmuster.

Abb. 11 Trendanalyse mit Kartenvergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal mit der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 2022 und der Belastungsänderung seit 1995.

11a Luftgesamtbelastung IAP_{BR} 2022

11b Primärschadstoffbelastung PS-FI 2022

11c Ozon AOT40f-Belastung AOT-40f-FI 2022

11d Ammoniakbelastung NH₃-FI 2022

11e Belastungsänderung IAP_{BR} Luftgesamtbelastung 1986-2022

11f Belastungsänderung Primärschadstoffbelastung PS-FI 1995-2022

11g Belastungsänderung Ozon AOT40f-Belastung AOT-40f-FI 1995-2022

11h Belastungsänderung Ammoniakbelastung NH₃-FI 1995-2022

--- LRV Grenzwert

-. -. Critical Level für Höhere Pflanzen

.... Critical Level für Flechten und Moose

---- siehe Seite 21

So zeigt der Grossraum Chur, welcher bezüglich Luftgesamtbelastung eine deutliche Verbesserung aufweist, auch eine starke bis sehr starke Reduktion in der Primärschadstoffbelastung. Dies obschon die Differenzkarte der Luftgesamtbelastung eine längere Periode von 36 Jahren gegenüber 27 Jahren bei der differentiellen Primärschadstoffbelastung aufweist.

Auch im 11-jährigen Direktvergleich der Belastungsänderung der Luftgesamtbelastung mit der Primärschadstoffbelastung (Abb.12e,f) zeigen sich ähnliche Belastungsmuster mit gebietsweisen Belastungszunahmen wie auch Belastungsabnahmen. Leichte bis starke und relativ gut übereinstimmende Belastungszunahmen zeigen sich beispielweise in Hanglage zwischen Fläsch und Maienfeld und in St. Luziensteig oder in etwas erhöhten Lagen zwischen Haldenstein und Chur Nord und ebenso im westlichen Felsberg und im Gebiet des neuen Kreisel eingangs von Felsberg. Relativ gut übereinstimmende Gebiete mit sowohl verringerter Primärschadstoff- als auch Luftgesamtbelastung in beiden Belastungskarten finden sich in Hanglage zwischen Zizers, Trimmis und Obersays, im südlichen Chur im Gebiet der Masanser- und Grabenstrasse mit dem Schulhaus Quader, aber auch in Teilen von Bonaduz sowie im Höhegebiet von Rhäzüns Runcaglia.

Belastungsänderung der Sommerdosis der Ozonbelastung und der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal über 27 und 11 Jahre

Im 27-jährigen Direktvergleich der entsprechenden Differenzkarten der Luftgesamtbelastung mit der Sommerdosis der Ozonbelastung (Abb. 12a,c) zeigt sich für Ozon keine so auffällige Übereinstimmung. Allerdings umfasst die Differenzkarte der Gesamtbelastung auch eine längere Periode von 36 Jahren gegenüber 27 Jahren bei der Ozonbelastung.

Auch im 11-jährigen Direktvergleich der Belastungsänderung der Luftgesamtbelastung mit der Sommerdosis der Ozonbelastung (Abb.12e,g) zeigen sich in verschiedenen Gebieten des Bündner Rheintals ähnliche Belastungszunahmen.

Eine solche sehr starke Belastungszunahme (dunkel purpur) findet sich im Gebiet in den Gebieten Maienfeld, St. Luziensteig und in der Hanglage zwischen Tamins und Domat/Ems. Geringere lachsfarbene Belastungszunahmen in der Differenzkarte Ozon im Talboden zwischen Maienfeld, Malans, Landquart, Trimmis, Untervaz und Chur mit den Hanglagen sowie zwischen Felsberg, Domat/Ems, Tamins und dem östlichen Bonaduz, konvergieren entweder mit einer leichten Verschlechterung oder weitgehend indifferenten Verhältnissen der Luftgesamtbelastung.

Dagegen erscheinen Gebiete mit einer verringerten Sommerbelastung von Ozon wie im oberen Malans und zwischen Igis, Zizers und Trimmis sowie im Gebiet Felsberg, Domat/Ems und im östlichen Bonaduz meist auch mit einer erhöhten Luftgesamtbelastung oder zumindest mit indifferenten Verhältnissen wie in weiten Teilen der Stadt Chur.

Belastungsänderung der Ammoniakbelastung und Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal über 27 und 11 Jahre

Im 27-jährigen Direktvergleich der Belastungsänderung der Luftgesamtbelastung mit der Ammoniakbelastung (Abb. 12a,d) zeigt sich eine nur mässige Übereinstimmung.

Allerdings umfasst die Differenzkarte der Luftgesamtbelastung auch eine etwas längere Periode von 36 Jahren. Auch im 11-jährigen Direktvergleich der Belastungsänderung der Luftgesamtbelastung mit der Ammoniakbelastung seit 2011 (Abb. 12e,h) zeigen sich Belastungs-

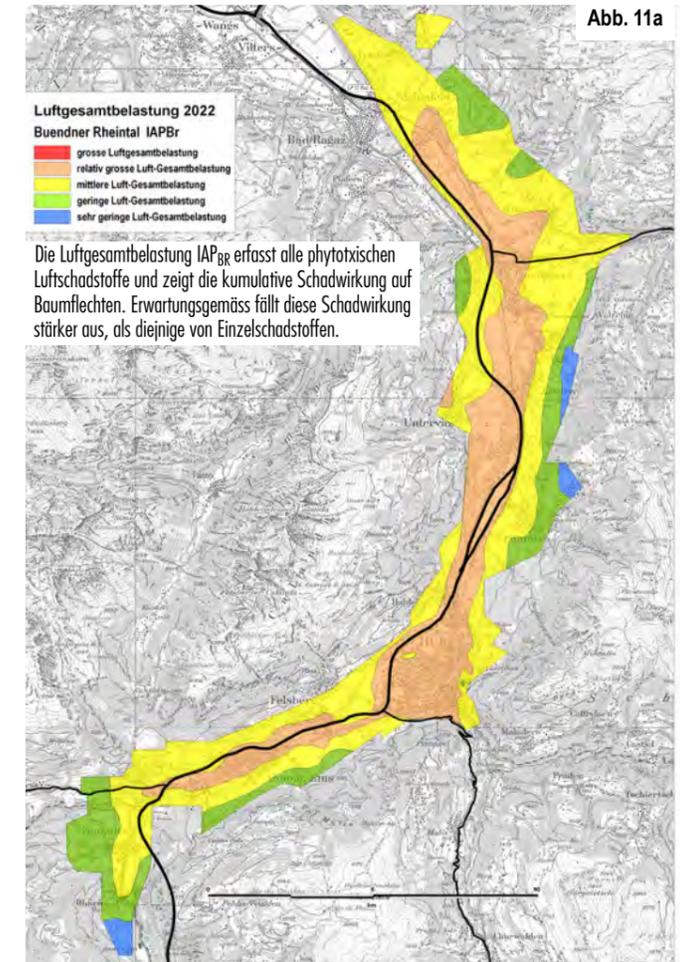
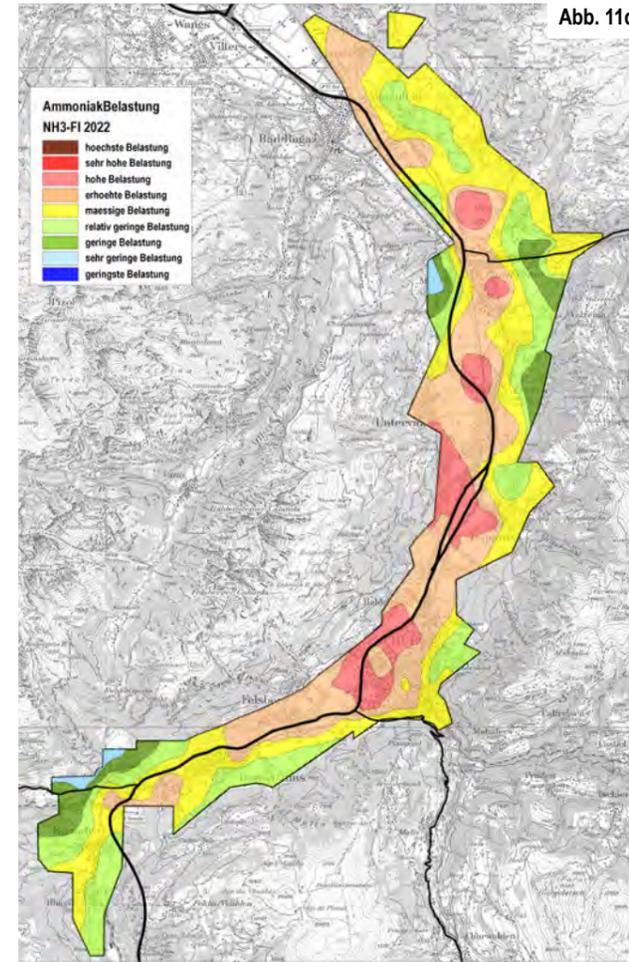
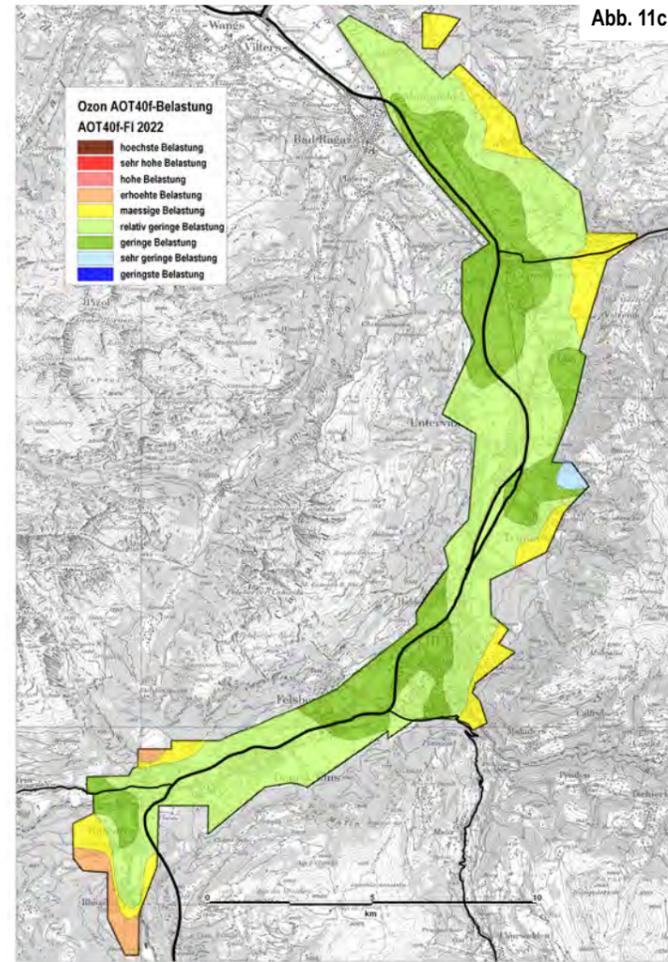
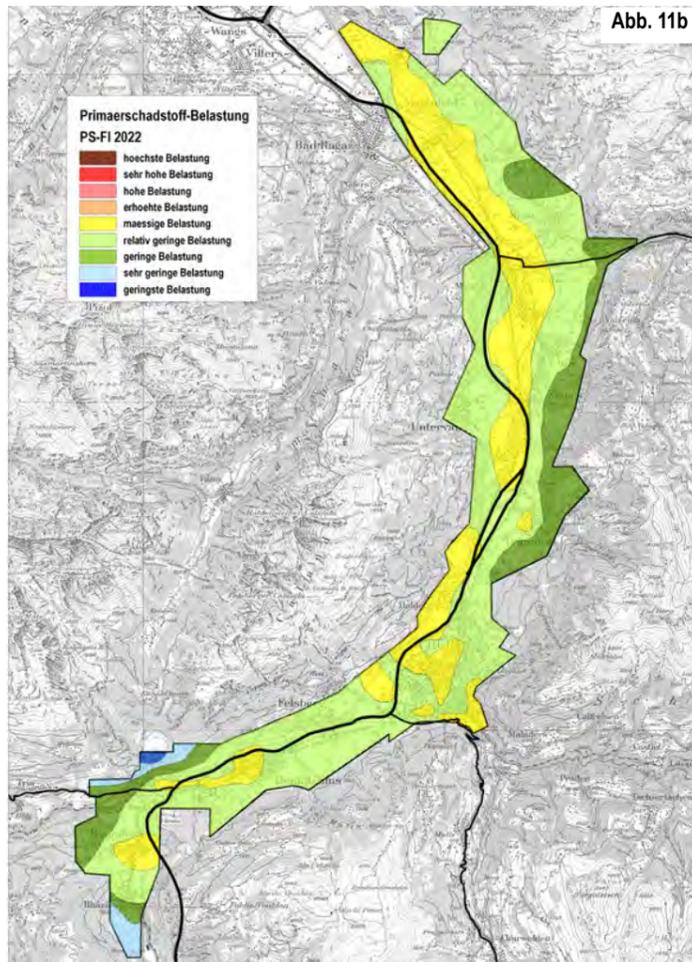


Abb. 11 a-d Aktuelle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung sowie Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 2022 im Bündner Rheintal mittels Flechtenbioindikation

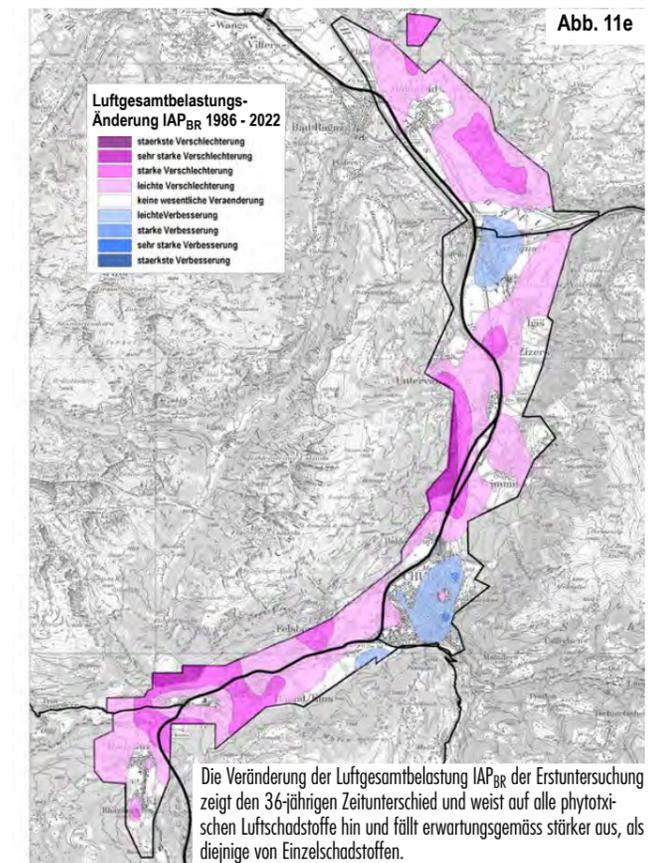
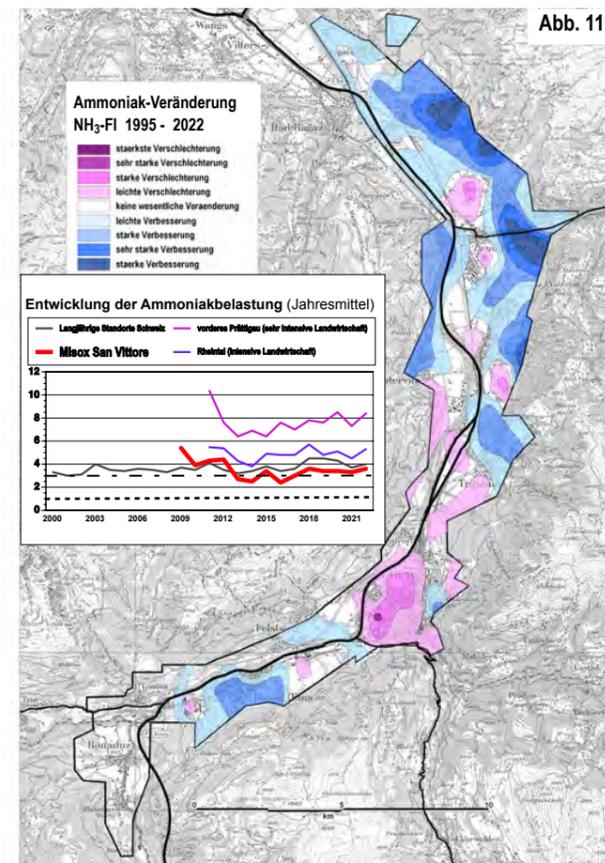
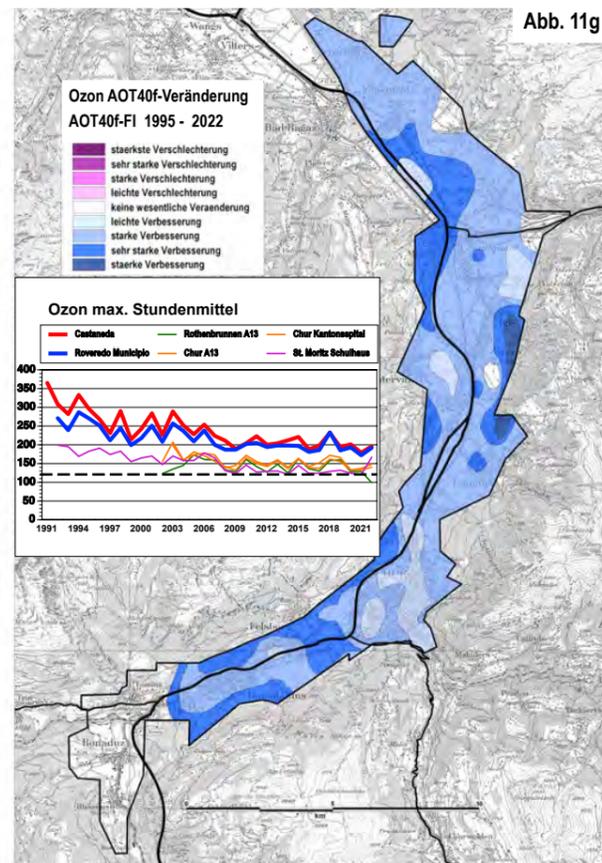
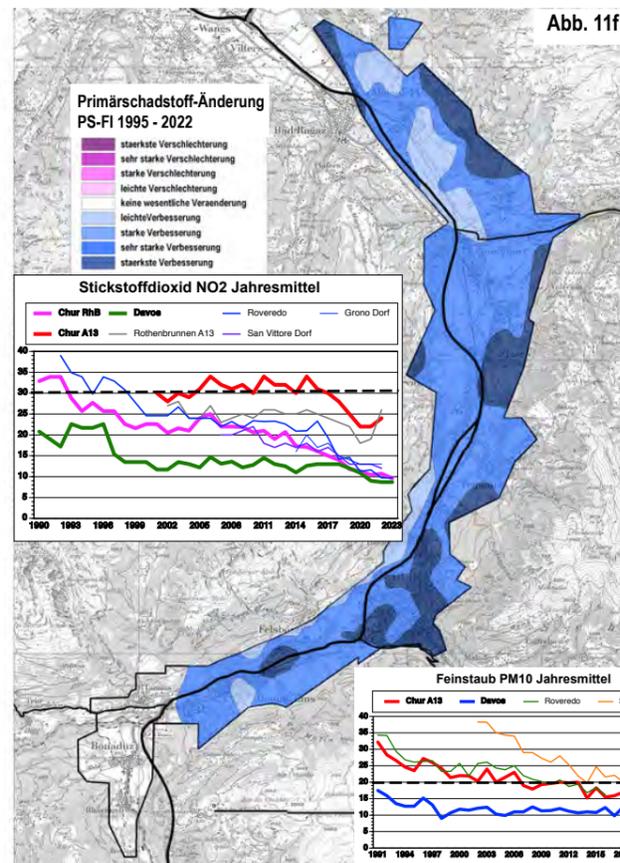


Abb. 11 e-h Differentielle Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung von 1995-2022 Luftgesamtbelastung IAP_{BR} 1986-2022 in Bündner Rheintal mittels Flechtenbioindikation

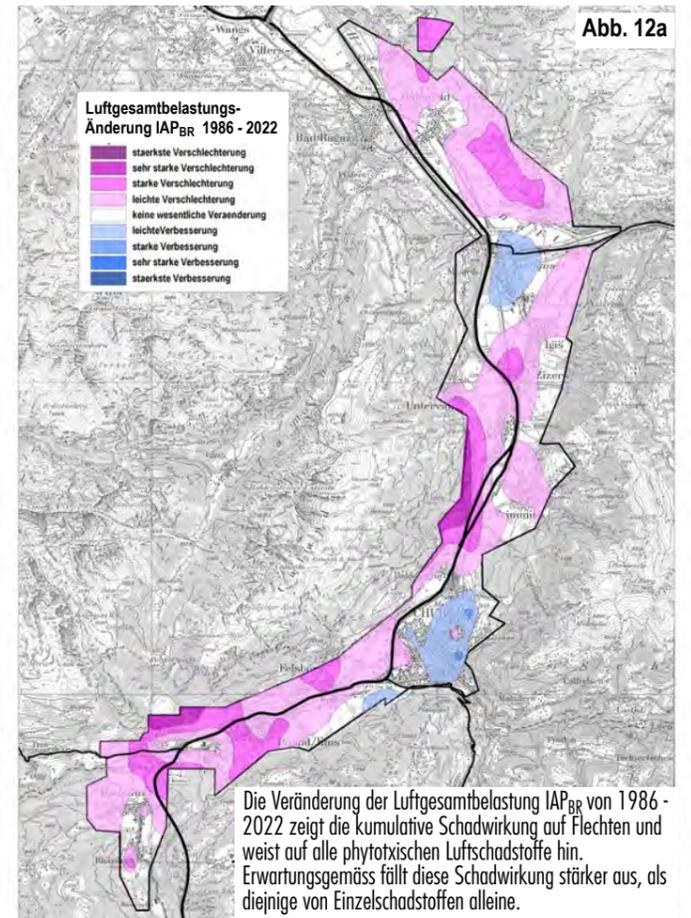
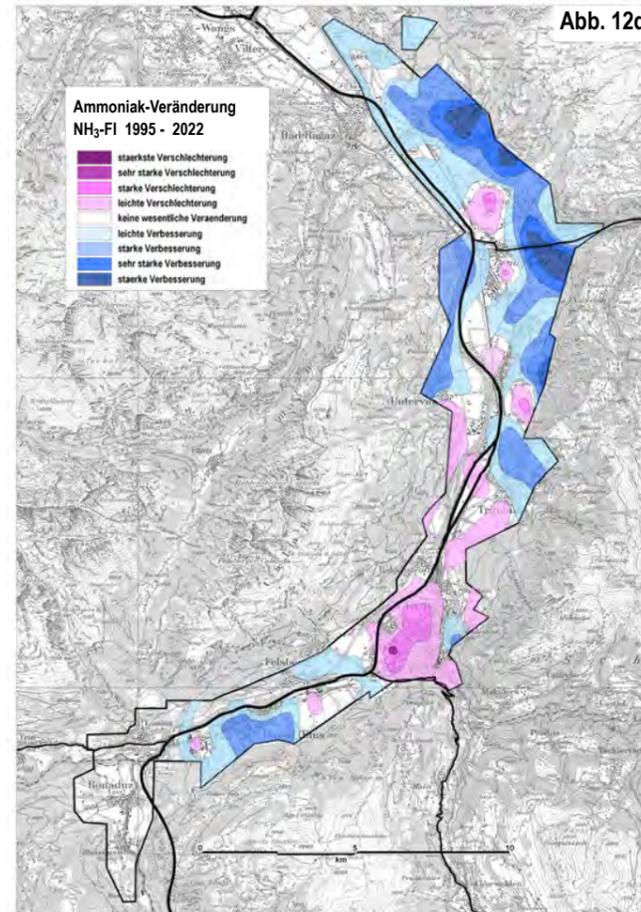
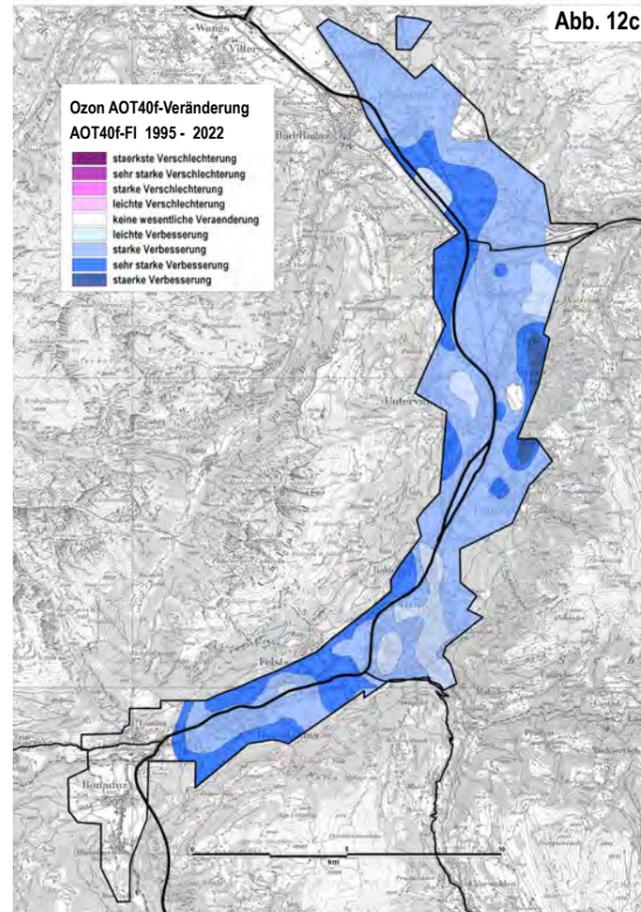
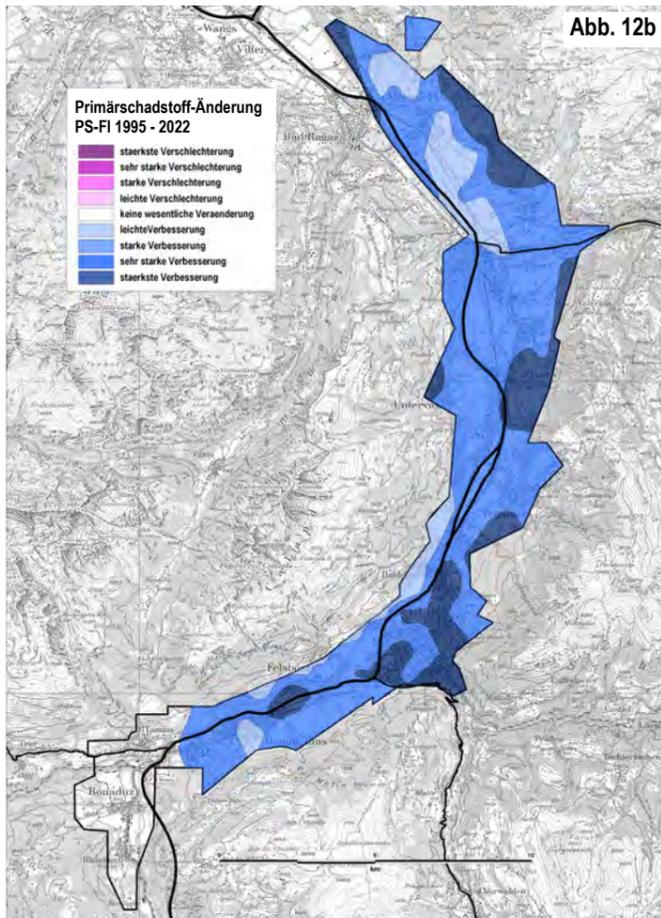


Abb. 12 a-d Belastungsänderung der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung von 1995-2022 und der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 1986-2022 mittels Flechtenbioindikation

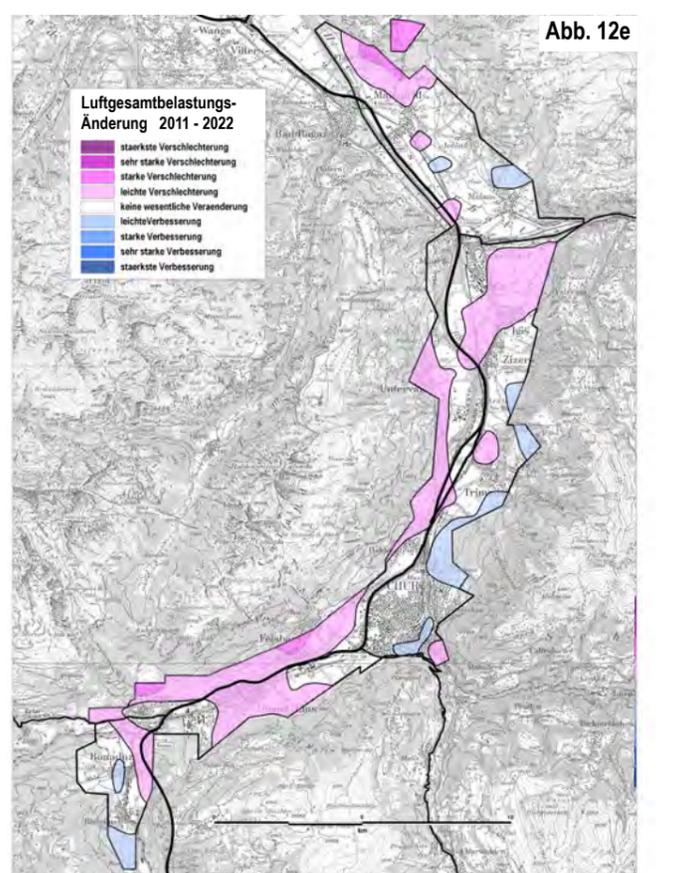
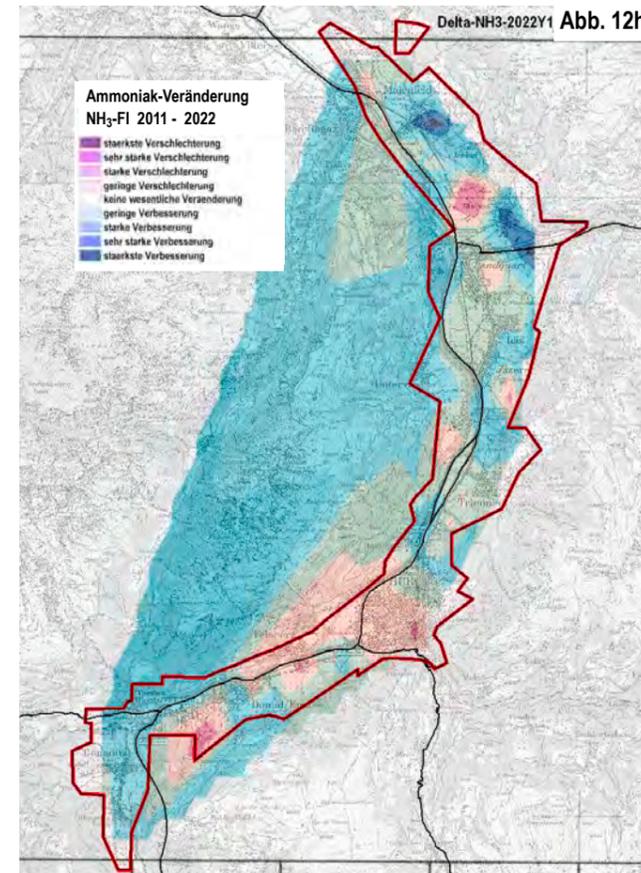
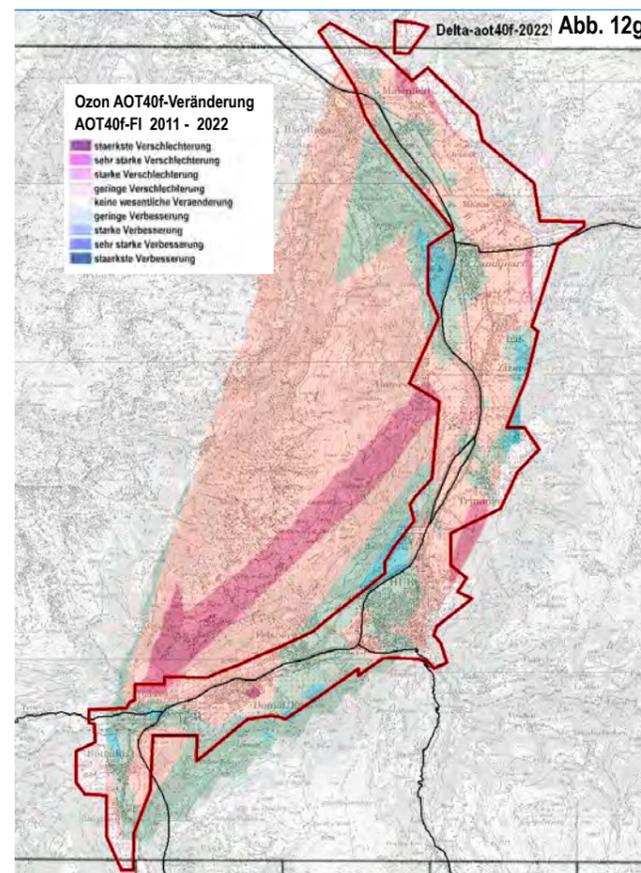
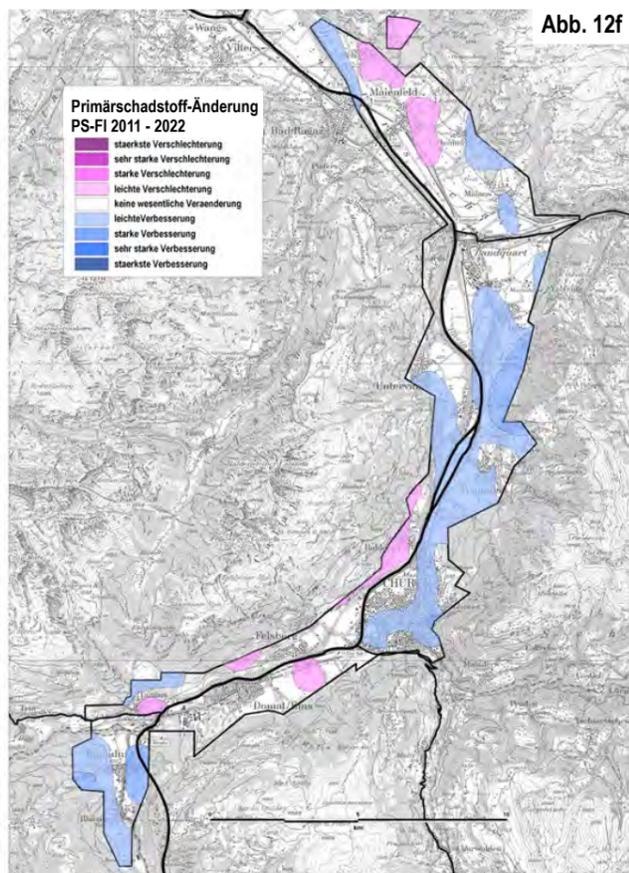


Abb. 12 e-h Belastungsänderung der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung sowie der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} in den letzten 12 Jahren von 2010-2022

zunahmen besonders im Gebiet Felsberg bis Tamins, Haldenstein bis Untervaz, Zizers bis Landquart und in Meienfld mit einer mässigen Übereinstimmung. Die Ausweitung der orangen Zone beim IAP_{BR} kann jedoch nur teilweise mit Zunahmen der Ammoniakbelastung erklärt werden.

Synoptischer Vergleich der aktuellen, früheren und differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Misox von 1990, 2012 und 2023

In der synoptischen Übersichtsdarstellungen von Abbildung 13 werden die Misoxkarten der früheren Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung des IAP_{BR} von 1990 und 2012 verglichen. In der Abbildung 14 erfolgen diese Belastungsvergleiche dann mit den aktuellen Karten von 2023 und den Belastungsänderungen über die ganze Beobachtungsperiode von 33 Jahren von 1990 bis 2023 sowie auch der letzten elf Jahre von 2012 bis 2023. Das Ziel auch dieses visuellen Belastungsvergleichs ist es, herauszufinden, wie gut die Ausbreitungsmuster der aktuellen und differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung diejenigen der integralen Luftgesamtbelastung des IAP_{BR} und deren Belastungsveränderung übereinstimmen sowie auch mit vorhandenen Immissions- und Verkehrsdaten erklärt werden können.

Abb. 12 Trendanalyse mit Kartenvergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der integralen Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal von 2022 und der Belastungsänderung seit 1986 und 1995.

- 12a *Belastungsänderung der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 1986-2022*
- 12b *Belastungsänderung der Primärschadstoffbelastung PS-FI 1995-2022*
- 12c *Belastungsänderung der Ozon AOT40f-Belastung von 1995-2022*
- 12c *Belastungsänderung der Ammoniakbelastung NH₃-FI von 1995-2022*
- 12d *Belastungsänderung der IAP_{BR} Luftgesamtbelastung von 2012-2022*
- 12b *Belastungsänderung der Primärschadstoffbelastung von 2012-2022*
- 12c *Belastungsänderung der Ozon AOT40f-Belastung von 2012-2022*
- 12c *Belastungsänderung der Ammoniakbelastung NH₃-FI von 2012-2022*

---- siehe Seite 22

Vergleich der früheren Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Misox von 1990 und 2012

Belastungsvergleiche der Erstuntersuchung von 1990

Mit fast uniform roten und orangen Farbtönen zeigte sich zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung von 1990 im Misox eine hohe bis sehr hohe Primärschadstoff- und Ozon AOT40f-Belastung (Abb.13a-d). Einzig in Castaneda und Santa Maria zeigten sich im Höhenrandssekt deutlich geringere Primärschadstoffbelastungen, dafür aber sehr hohe Ozonbelastungen. Die in weiten Teilen des Misox ebenfalls hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung zeigt nur in Roveredo, im Höhenrandssekt sowie in Mesocco tiefere Belastungswerte der Belastungszonen gelb und grün. Der direkte Vergleich mit dem Ausbreitungsmuster der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} von 1990 mit den schadoffspezifischen Karten zeigt im Höhenrandssekt und in Ai Rogg von Roveredo ebenfalls eine deutlich geringere Luftgesamtbelastung, so wie dies auch die Primärschadstoff- und Ammoniakbelastung ausweisen. In weiten Teilen des Talgebiets zeigen die Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung hohe bis sehr hohe Belastungen, während das Ausbreitungsmuster der Luftgesamtbelastung für 1990 etwas differenzierter ausfällt. Obschon die hohe Toxizität von Ozon auf Baumflechten klar nachgewiesen ist, stimmen die Ausbreitungsmuster der Ozon- und Luftgesamtbelastung im Höhenrandssekt von 1990 nicht überein. Die sehr hohe Ozonbelastung von 1990 liesse eine geringere Luftgesamtbelastung erwarten.

Belastungsvergleiche der zweiten Erfolgskontrolle von 2012 Mässige bis geringe Primärschadstoffbelastung von 2012

Eine sehr deutliche Entlastung gegenüber 1990 zeigte die Primärschadstoffbelastung zu Gunsten der hellgrünen Zone mit einer relativ geringen Belastung und einem Flächenanteil von 46%, gefolgt von der dunkelgrünen Zone mit einer geringen Primärschadstoffbelastung in 34% der Gebiete, dies besonders in den höher gelegenen Gebieten von Lostallo bis Mesocco sowie in Castaneda (Abb.13b). Die Zone mit einer sehr geringen Primärschadstoffbelastung und einer Gebietsfläche von

4% konnte 2012 nur in Santa Maria und den Monti nachgewiesen werden. Im Talboden von San Vittore und Grono zeigte sich hingegen mit einem Flächenanteil von 16% die gelbe Zone mit einer mässigen Primärschadstoffbelastung, trotz starkem Belastungsrückgang.

Relativ geringe Ozon AOT40f-Belastung von 2012

Mit der zweiten Erfolgskontrolluntersuchung von 2012 zeigte sich gegenüber 1990 eine gut sichtbare Entlastung der Ozon AOT40f-Belastung zu Gunsten der grünen und teilweise sogar der blauen Belastungszonen (Abb.13c). Mit dem grössten Flächenanteil von 75% zeigte sich die dunkelgrüne Zone mit geringer Belastung im ganzen Misox von Mesocco bis hinunter nach San Vittore. Die hellgrüne Zone mit relativ geringer Ozonbelastung zeigte sich im westlich gelegenen Teil von San Vittore, im Gebietsstreifen von Cama bis vor Lostallo sowie im unteren Höhen transekt. Mit mässiger Ozonbelastung zeigte sich Santa Maria mit den Monti.

Hohe bis sehr hohe Ammoniakbelastung von 2012

Eine gut sichtbare Entlastung zu Gunsten der orangen, gelben und teilweise hellgrünen Zone mit einer mässigen bis erhöhten Ammoniakbelastung mit 41 und 30% Flächenanteil zeigte sich für 2012 gegenüber 1990 (Abb.13d). Nur in Leggia, Soazza und Lostallo zeigte sich mit kleiner Fläche noch eine rote Zone mit hoher Ammoniakbelastung. Im Höhen transekt von Santa Maria zeigte sich mit einer hell- und dunkelblauen Zone sogar eine Verringerung in der Ammoniakbelastung. Die hellgrüne Zone mit einer relativ geringen Belastung zeigte sich auch in Castaneda und im Gebiet zwischen Norantola und Lostallo auf einer Fläche von 13%.

Relativ hohe bis mittlere Luftgesamtbelastung von 2012

Trotz starkem bis sehr starkem Belastungsrückgang der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung zeigten 2012 weite Teile des Misoxer Talbodens eine orange Zone mit relativ hoher Luftgesamtbelastung und im Zentrum von Roveredo bis Santa Maria und Teilen von Grono sogar noch eine rote Zone mit grosser Luftbelastung (Abb.13a). Eine gelbe und grüne Zone mittlerer und geringer Luftgesamtbelastung zeigten sich dagegen im nördlichen Misox sowie im Höhen transekt.

Vergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Misox von 2023

Aktuelle Primärschadstoffbelastung im Misox von 2023

Generell zeigt sich für 2023 eine deutliche Belastungsreduktion mit einer nur noch mässigen bis relativ geringen Primärschadstoffbelastung. Bis auf die orange Zone mit erhöhter Primärschadstoffbelastung in Grono sind die früheren roten Zonen mit starker bis stärkster Primärschadstoffbelastung vollständig aus dem Misoxer Untersuchungsgebiet verschwunden (Abb.14b). In 44% der gelben und 40% der hellgrünen Gebiete zeigt sich aktuell eine mässige bis relativ geringe Belastung, dies im Talboden und in peripheren Lagen von Roveredo bis Leggia und San Vittore.

Aktuelle Ozon AOT40f-Belastung im Misox von 2023, Roveredo mit sehr geringer und Castaneda, Santa Maria, Grono und Leggia mit erhöhter Ozon AOT40f-Belastung. Die früheren orangen und roten Zonen mit erhöhter bis hoher Ozonbelastung sind vollständig aus dem Gebiet von Roveredo und San Vittore verschwunden (Abb.14c).

Abb. 13 Frühere Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der integralen Luftgesamtbelastung im Misox von 1990 und 2012.

- 13a Luftgesamtbelastung IAPBR 1990
- 13b Primärschadstoffbelastung PS-FI 1990
- 13c Ozon AOT40f-Belastung AOT-40f-FI 1990
- 13d Ammoniakbelastung NH₃-FI 1990

- 13e Luftgesamtbelastung IAPBR 2012
- 13f Primärschadstoffbelastung PS-FI 2012
- 13g Ozon AOT40f-Belastung AOT-40f-FI 2012
- 13h Ammoniakbelastung NH₃-FI 2012
- - - LRV Grenzwert
- .. . Critical Load für Höhere Pflanzen
- ... Critical Level für Flechten und Moose
- siehe Seite 25

Frühere Luftbelastung im Misox von 1990 und 2012 mittels der Flechtenbioindikation

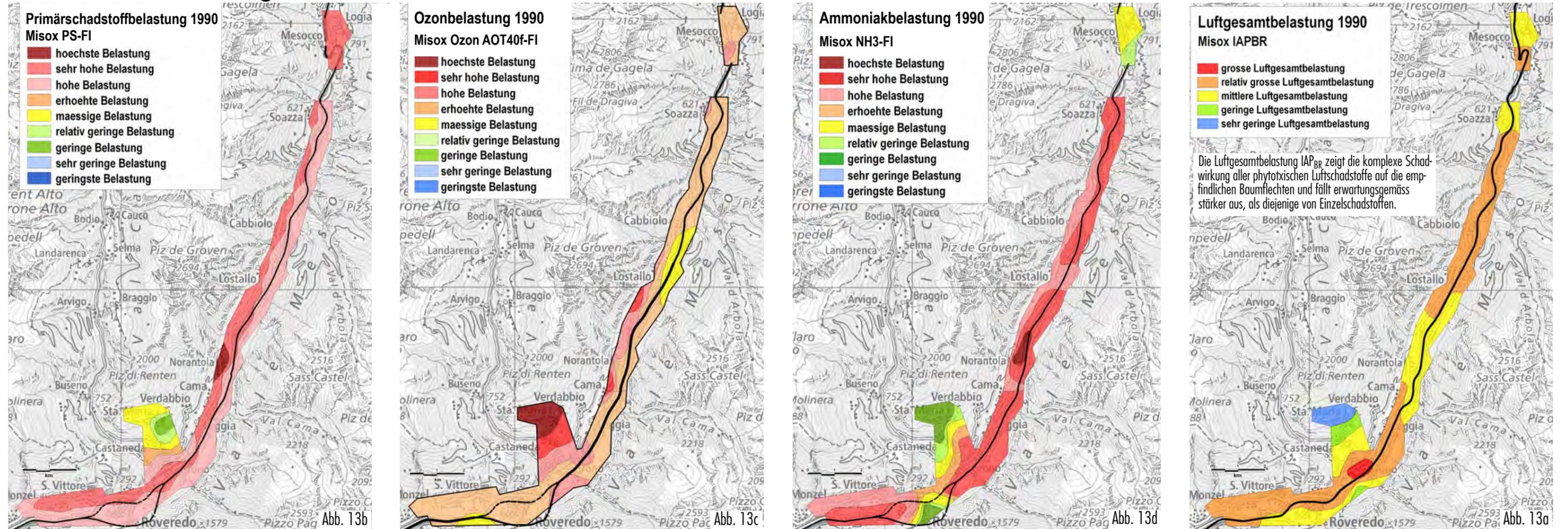


Abb. 13 a-d Misox 1990 Belastungskarten der Primärschadstoff-, der Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung sowie der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mittels der Flechtenbioindikation

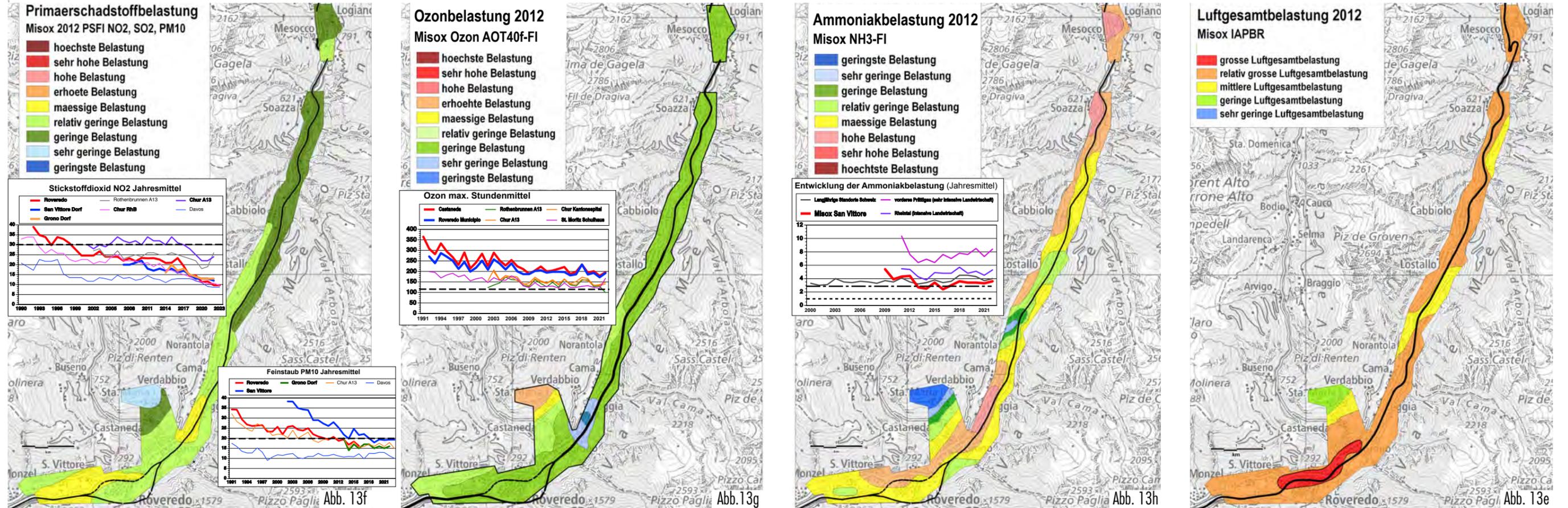


Abb. 13 e-h Misox 2012 Belastungskarten der Primärschadstoff-, der Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung sowie der Luftgesamtbelastung IAP_{BR} mittels der Flechtenbioindikation

Aktuelle Luftbelastung und deren Belastungstrends im Misox von 1990 bis 2023 über 11 und 33 Jahre mittels der Flechtenbioindikation

Die Luftgesamtbelastung IAP_{BR} erfasst alle phytotoxischen Luftschadstoffe und zeigt die komplexe Schädigung auf die empfindlichen Baumflechten. Erwartungsgemäss fällt diese Schädigung stärker aus, als diejenige von Einzelschadstoffen.

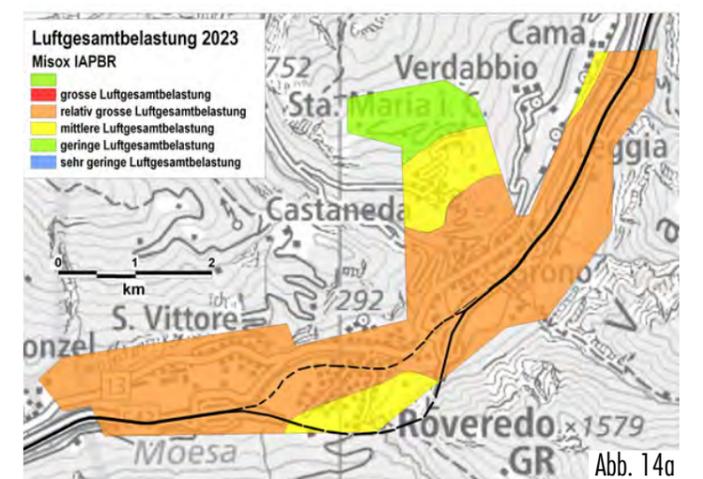
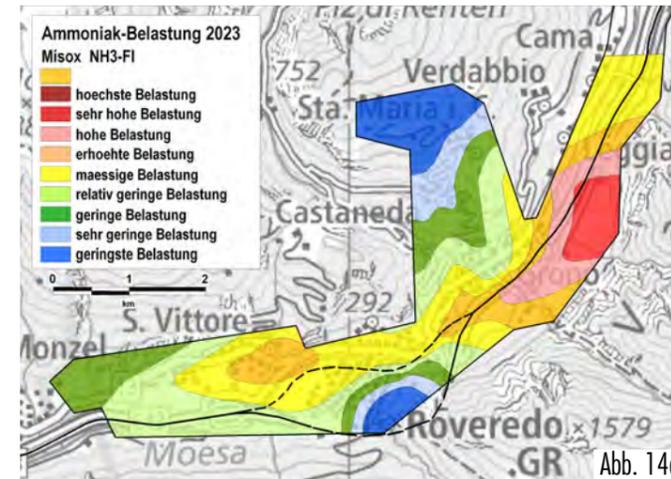
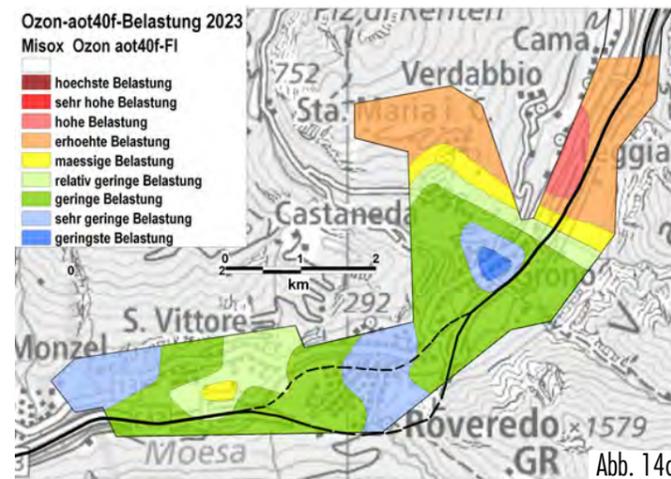
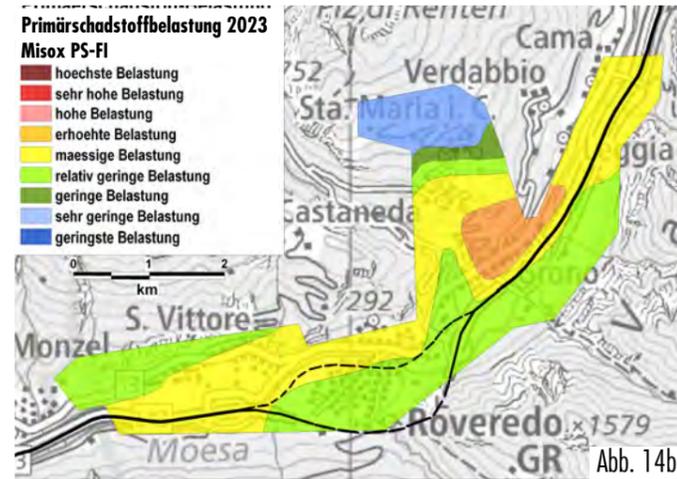


Abb. 14 a-d Misox 2023 Synoptischer Vergleich der aktuellen Belastungskarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung mit der der Luftgesamtbelastung IAP_{BR}

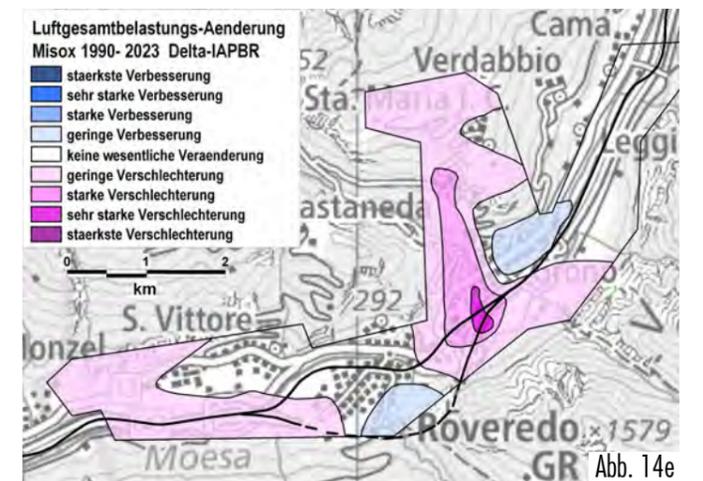
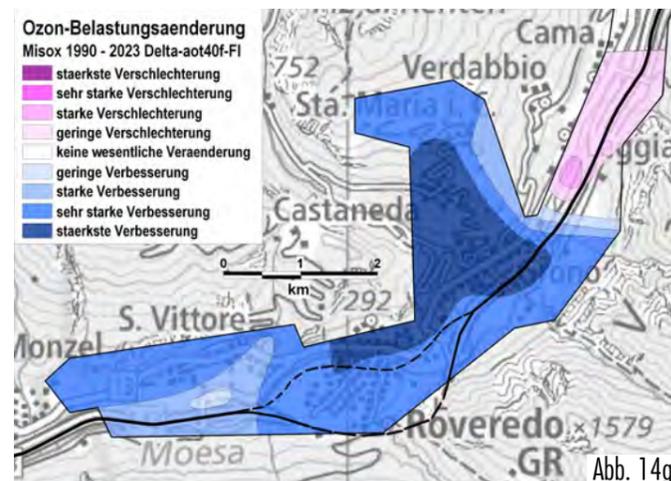
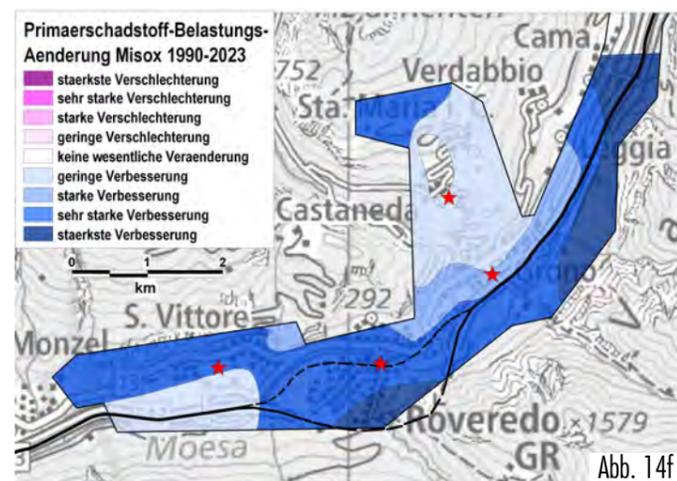


Abb. 14 e-h Misox 1990 - 2023 Synoptischer Vergleich der 33-jährigen Differenzkarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung mit der Luftgesamtbelastung IAP_{BR}

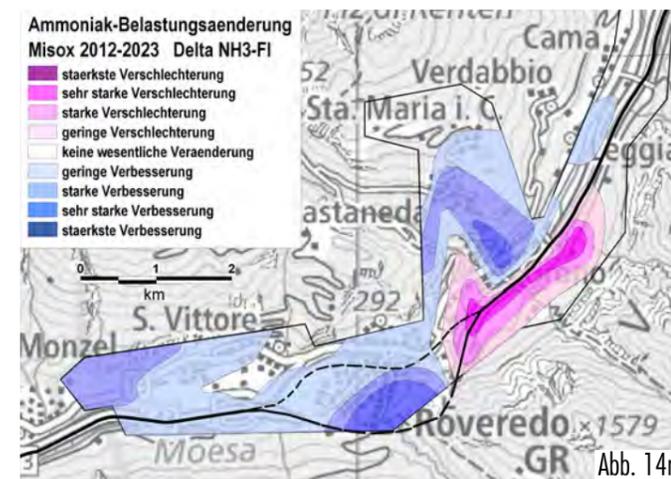
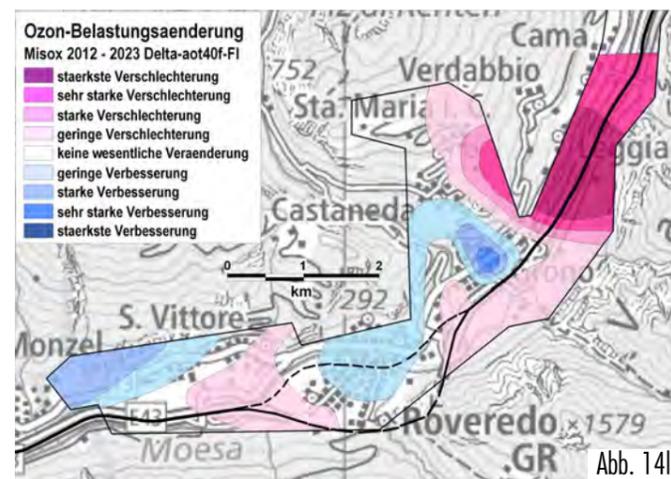


Abb. 14 i-m Misox 2012 - 2023 Synoptischer Vergleich der 11-jährigen Differenzkarten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniak-Belastung mit der Luftgesamtbelastung IAP_{BR}

Abb. 14 Trendanalyse mit Kartenvergleich der aktuellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der integralen Luftgesamtbelastung im Misox von 2023 und der Belastungsänderung seit 1990.

- 14a Luftgesamtbelastung IAP_{BR} 2023
- 14b Primärschadstoffbelastung PS-FI 2023
- 14c Ozon AOT40f-Belastung AOT-40f-FI 2023
- 14d Ammoniakbelastung NH₃-FI 2023
- 14e Belastungsänderung Luftgesamtbelastung IAP_{BR} 1990-2023
- 14f Belastungsänderung Primärschadstoffbelastung PS-FI 1990-2023
- 14g Belastungsänderung Ozon AOT40f-Belastung 1990-2023
- 14h Belastungsänderung Ammoniakbelastung NH₃-FI 1990-2023
- 14i Belastungsänderung Luftgesamtbelastung IAP_{BR} 2012-2023
- 14k Belastungsänderung Primärschadstoffbelastung PS-FI 2012-2023
- 14l Belastungsänderung Ozon AOT40f-Belastung 2012-2023
- 14m Belastungsänderung Ammoniakbelastung NH₃-FI 2012-2023

---- siehe Seite 26

Einzig zwischen Grono und Leggia zeigt sich entlang der A13 ein rotes Gebiet mit deutlich erhöhter Ozonbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung gegenüber 1990 zeigt sich in Roveredo, wo aktuell eine hellblaue Zone mit sehr geringer Ozon AOT40f-Belastung nachgewiesen wurde. Dies hat auch mit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 und dem erzielten Belastungsrückgang von NO₂, PM₁₀, VOC in Roveredo zu tun.

Aktuelle Ammoniakbelastung im Misox von 2023

Geringere Ammoniakbelastung in Roveredo und erhöhte Belastung in Grono und Leggia. Seit der Eröffnung des San Fedele Umfahrungstunnels von 2016 hat sich die Ammoniakbelastung in Roveredo deutlich verringert (Abb.14d). Während früher im unteren Misox meist nur gelbe, orange und rote Zonen mit mässiger bis sehr hoher Belastung nachgewiesen wurden, zeigen sich 2023 auch wieder grüne und sogar blaue Zonen mit einer geringen bis geringsten Ammoniakbelastung, so in Ai Rogg und San Fedee von Roveredo und westlich von San Vittore. Einzig zwischen Grono und Leggia findet sich entlang der A13 und in der Landwirtschaftszone noch eine orange bis rote Zone mit einer erhöhten bis sehr starken Ammoniakbelastung.

Relativ grosse Luftgesamtbelastung im Talboden von 2023

In der Luftgesamtbelastung (IAP_{BR}) im unteren Misox von 2023 (Abb. 14a) zeigte sich gegenüber den früheren Untersuchungen, dass die rote Zone mit grosser Luftgesamtbelastung vollständig aus dem früheren Gebiet von Roveredo, Grono und San Vittore verschwunden ist. Trotz der starken Belastungsminderung bei der Primärschadstoff-, Ozon und Ammoniakbelastung findet sich die orange Zone mit relativ starker Belastung und geringem Flechtenbewuchs heute immer noch entlang der A13 in 78% der Gebiete. Die gelbe Zone mit mittlerer Luftgesamtbelastung und mittlerem Flechtenbewuchs findet sich wieder in 14% in höheren Lagen von Roveredo im Gebiet Ai Rogg und San Fedee in Santa Maria und in nördlicher Hanglage von Cama. Im oberen Teil von Santa Maria und den Monti findet sich mit einem Flächenanteil von 8% die grüne Zone mit geringer Luftgesamtbelastung und viel Flechtenbewuchs. Die noch 1990 und 1999 festgestellte blaue Zone in den Monti von Santa Maria mit sehr geringer Luftgesamtbelastung und sehr viel Flechtenbewuchs kann auch 2023 nicht mehr nachgewiesen werden.

Vergleich der differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung mit der Luftgesamtbelastung im Misox der letzten 33 und 11 Jahren

Belastungsveränderungen der letzten 33 Jahre von 1990-2023

Eine starke bis sogar stärkste Belastungsabnahme zeigt sich im 33-jährigen Beobachtungszeitraum von 1990 - 2023 für alle drei Schadstoffkomponenten (Abb.14 e-h).

Die **Primärschadstoffbelastung** zeigt den stärksten Belastungsrückgang in weiten Teilen des Talbodens und besonders in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo sowie zwischen Grono und Cama aufweist (Abb.14f).

Die **Ozon AOT40f-Belastung** zeigt die stärkste Verbesserung im Höhentransekt zwischen den nördlichen Gebieten von Roveredo und Castaneda und Santa Maria (Abb.14g). Allerdings zeigt sich im Gebiet von Leggia und Cama auch eine leichte bis geringe Verschlechterung bzw. eine Zunahme der Ozon AOT40f-Belastung.

Auch die **Ammoniakbelastung** zeigt im Gebietsstreifen vom westlichen Roveredo bis San Vittore sowie in Santa Maria und vom nördlichen Leggia bis Cama ein besonders starker Belastungsrückgang (Abb.14h). Allerdings zeigen sich im Zentrum von San Vittore und im östlichen Roveredo bis Grono eine geringe Verschlechterung und in einem kleinen Gebiet in Grono sogar eine starke Zunahme der Ammoniakbelastung.

Die Luftgesamtbelastung zeigt differenzierte Veränderungen mit Belastungszunahmen wie auch Abnahmen

Im 33-jährigen Langzeitvergleich von 1990 zu 2023 zeigen sich im unteren Misox für 2023 in 42% der transparentfarbenen Gebiete indifferente Verhältnisse ohne wesentliche Veränderungen (Abb.14e). In 45% der hell purpurfarbenen Gebiete zeigt sich in weiten Teilen des unteren Misox eine leichte und in den dunkel purpurfarbenen Gebieten eine starke Verschlechterung von 7% und in 1% der Gebietsfläche (satter purpur) sogar eine sehr starke Verschlechterung der Luftgesamtbelastung. Diese Gebiete mit geringer, starker und sehr starker Verschlechterung befinden sich im Gebietsstreifen zwischen dem heutigen nördlichen San Fedele Tunnel-Eingang der A13 und Grono bis hinauf nach Castaneda. Die Eröffnung dieses Umfahrungstunnels erfolgte allerdings erst 2016.

Nebst der zeitlichen Verschlechterung der Luftgesamtbelastung konnten aber auch 7% der Gebiete mit einer geringen Verbesserung der Luftgesamtbelastung festgestellt werden. Diese finden sich in den höher gelegenen Teilen von Roveredo und entlang der Kantonsstrasse in Grono. Im oberen Roveredo und Grono waren die lufthygienischen Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen und auch die Entlastung durch den San Fedele Tunnel der A13 ab 2016 der Hauptgrund dieser Verbesserung.

Belastungsveränderungen im Misox der letzten 11 Jahre von 2012-2023

Primärschadstoffbelastung. Diese zeigt eine nur noch leichte Belastungsabnahme in Roveredo und eine Belastungszunahme in Grono und dem Höhenstranekt, bei sonst indifferenter Verhältnissen in weiten Teilen des Talbodens (Abb.14k).

Ozon AOT40f-Belastung. Diese zeigt leichte Belastungsminderungen in Roveredo, im westlichen San Vittore sowie im Gebietsstreifen von Grono und in der Hangzone bis unterhalb von Castaneda (Abb.14l). Eine deutliche Belastungszunahme zeigt sich im Gebiet nördlich von Grono bis Leggia und Cama mit dem Höhenstranekt bis hinauf nach Santa Maria. Westlich exponierte Gebiete im Höhenstranekt zeigen indifferente Verhältnisse, so auch die Gebiete zwischen einer Verbesserung und Verschlechterung der Ozonbelastung.

Ammoniakbelastung. Eine sehr deutliche Belastungsminderung zeigten sich in den Quartieren Ai Rogg und San Fedee von Roveredo, im westlichen San Vittore sowie in Teilen von Grono und im Höhenstranekt bis Santa Maria, während die Monti und das Zentrum von San Vittore indifferente Verhältnisse zeigen (Abb.14m). Eine sehr deutliche Belastungszunahme von Ammoniak zeigt sich im Gebiet des nördlichen San Fedele Tunnelportals und Zubringers sowie entlang der A13 bis nach Grono.

Luftgesamtbelastung. Im 11-jährigen Zeitvergleich von 2023 (Abb.14i) zeigt sich in 36% der hellblauen Gebiete eine geringe Verbesserung der Luftgesamtbelastung, dies im ganzen Siedlungsgebiet von Roveredo, in Teilen von Grono bis nach Castaneda und Santa Maria. Im Gebiet Ai Rogg und San Fedee im oberen Roveredo zeigt sich aktuell sogar ein kleineres Gebiet mit starker (1%) bis sehr starker Verbesserung (1%) der Luftgesamtbelastung. Diese Verbesserung steht im direkten Zusammenhang mit der Eröffnung des A13-Entlastungs-tunnels San Fedele von 2016 (fein getricheltem A13-Verlauf, gegenüber dickem altem Verlauf quer durch Roveredo) sowie mit den erfolgten Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen in diesen Gebieten. Degegen zeigt sich in 62% der transparentfarbenen Gebiete eine weitgehend konstante Luftgesamtbelastung.

Während sich im 33-jährigen Belastungsvergleich ein deutlicher Belastungsrückgang auch bei der differentiellen Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung zeigte, fallen diese Vergleiche im 11-jährigen Zeitintervall seit 2012 weniger eindeutig aus.

Dennoch zeigte sich während der letzten 11 Jahre leichte bis stärkere Belastungsabnahmen der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f-, Ammoniak- und auch der Luftgesamtbelastung. Diese Belastungsabnahmen finden sich besonders auch im Hauptort Roveredo, welcher ab 2016 mit dem San Fedele Tunnel von starken Verkehrsimmissionen (NO_x, PM10, z.T. VOC) wesentlich entlastet wurde.

Allerdings hat die neue Verkehrserschliessung der A13-Zufahrt im Raum Roveredo und Grono im Bereich des Nordportals örtlich auch zu einer Verschiebung und Zunahme der Verkehrsimmissionen nach Nordosten hin geführt. Dieser Effekt zeigt sich in der differentiellen Primärschadstoffkarte (Abb.14k) mit einer leichten bis stärkeren Belastungszunahmen im Raum Grono bis Santa Maria. Bei der differentiellen Ozon AOT40f-Belastung (Abb.14l) zeigt sich dieser Effekt auch bis zum Südportal hin, am stärksten jedoch im nördlichen Grono und Leggia und Cama und auch im Höhentransekt bis ins östliche Santa Maria hinauf. Auch bei der differentiellen Ammoniakbelastung (Abb.14m) zeigt sich dieser San Fedele Tunneleffekt besonders in Gebiet des nördlichen A13 Portals und entlang der A13 bis hinauf nach Grono.

Trotz der teilweisen örtlichen Unterschiede im Belastungsmuster der verschiedenen Schadstoffkomponenten der Primärschadstoff-, Ozon AOT40f- und Ammoniakbelastung, erklären diese im gleichzeitig komplexen Zusammenspiel das Ausbreitungsmuster der Luftgesamtbelastung im Bündner Rheintal und Misox zwischen 1986 und 2022/23 hinreichend gut.

Weiter zeigt sich damit auch das sehr komplexe Verhalten von Luftschadstoffgemischen auf die Flechtenwirkung und deren Toxizität. Die Luftgesamtbelastung des IAP_{BGR} zeigt nämlich die komplexe Schadwirkung aller phytotoxischen Luftschadstoffe auf die empfindlichen Baumflechten und fällt erwartungsgemäss stärker aus als diejenige von Einzelschadstoffen. Diese komplexe Wirkungsantwort auf Flechten beinhaltet auch synergistische und antagonistische Prozesse, welche die Schadwirkung sehr verstärken oder auch abschwächen können. Eine gewisse Diskrepanz rührt auch daher, dass für die Luftgesamtbelastung nur fünf, während für die schadstoffspezifischen Belastungen, methodenbedingt je neun Belastungszonen ausgewiesen werden, was direkte Vergleiche beider Grössen etwas erschwert.

Entwicklung der Immissions-, Emissions- und Verkehrsbelastung im Bündner Rheintal und Misox und Vergleich mit den schadstoffspezifischen Belastungskarten und der Luftgesamtbelastung mit Flechten

Vergleich der gemessenen NO₂ und PM₁₀-Belastung mit der Primärschadstoffbelastung mit Flechten

Im Bündner Rheintal und Misox zeigen die Gebiete mit geringer, starker bis stärkster Verbesserung bzw. Verminderung der kumulativen Primärschadstoffbelastung zwischen den Erstuntersuchungen von 1986 und 1990 und den Erfolgskontrollen von 2022/23 eine sehr starke Reduktion in der Belastung der Primärschadstoffe NO₂ und PM₁₀, wie aus den Verlaufsgrafiken 11f und 13f ersichtlich ist.

Diese gute Übereinstimmung resultiert direkt aus der hohen Modellgüte des Primärschadstoff-Flechtenscores (PS-FI) mit den modellierten NO₂, SO₂ und PM₁₀-Immissionsdaten im Bündner Rheintal, Misox und Lichtenstein (adj. R² = 0.94). Weitere Details dazu finden sich in der wissenschaftlichen Publikation im Gesamtbericht in Kapitel 9.1. Infolge sehr geringer Belastungswerte wurden die SO₂-Konzentrationsmessungen bereits 1995 aufgegeben. SO₂ ist jedoch der dritte für Flechten wichtige Primärschadstoff des kumulativen Primärschadstoff-Indexes mit Flechten.

Stickstoffdioxid (NO₂) und lungengängiger Feinstaub PM₁₀ sowie Primärschadstoffbelastung sind stark reduziert

Die Messreihen von NO₂ und PM₁₀ (kontinuierlich und NO₂-Passivsammler) reichen im Kanton Graubünden zurück bis 1989/90, jene von Ozon bis 1991, während die ersten Flechtenkartierungen 1986 und 1990 erfolgten. Seit Messbeginn hat die gemessene NO₂-Belastung im ganzen Kanton Graubünden sehr stark abgenommen, und für 2022 kann der LRV-Grenzwert für Jahresmittelwerte an allen Standorten gut eingehalten werden. An den Churer Fixmessstandorten Rhätische Bahn beträgt der Belastungsrückgang seit Messbeginn 71% und für Chur A13 20%. Mit den NO₂-Passivsammlern ergeben sich seit 1989 ebenfalls hohe NO₂-Reduktionen, wie Chur Spital 63%, Chur Kornhaus 63%, Chur Altstadt 62%, Domat/Ems Sportplatz 59%, Fläsch Dorf 70% und Maienfeld 65%. Auch im Misox zeigt San Vittore eine starke NO₂-Belastungsreduktion der Jahresmittelwerte von 40% zwischen 2007 - 2022, in Grono sind dies 18% zwischen 2013 - 2022. Mit NO₂-Passivsammlern zeigen sich für Roveredo, Grono, Lostalio und Mesocco zwischen 1995 - 2022 Belastungsreduktionen von 54 - 64%.

Beim lungengängigen Feinstaub PM₁₀ weist besonders das Misox mit vielen veralteten Holzfeuerungen und dem Alpenstrassverkehr auf der A13 einen weitergehenden Sanierungsbedarf auf. Gestützt auf den Massnahmenplan "Beschreibung der Luftbelastung im Unteren Misox und der Massnahmen zur Verbesserung der Luftqualität" erfolgen seit 2014 zahlreiche emissionsmindernde Massnahmen. Für PM₁₀ zeigt sich bei den Kurzzeitbelastungen ein ähnliches Bild wie für Ozon. Obschon die Langzeitbelastung mit PM₁₀ an den A13 Messstationen in Chur und San Vittore und 2022 im Grenzwertbereich liegen, führt die Kurzzeitbelastung mit PM₁₀ in der Rheintalebene und im Misox nach wie vor zu Problemen, welche weitergehende Massnahmen erfordern. Im Misox sind es in den Wintermonaten besonders die zahlreichen alten Holzfeuerungen, die am meisten zur Feinstaubbelastung beitragen.

Die Reduktion der PM10 Feinstaubbelastung fällt geringer aus als jene von NO₂, was sich auch in den Differenzkarten im Bündner Rheintal von Abb. 11f zu 11g deutlich zeigt. So zeigen die Jahresmittel der PM10 Feinstaubwerte für die Fixmessstation Chur A13 eine nur 14%ige, für San Vittore eine 32%ige und für Grono eine 20%ige Reduktion seit Messbeginn. Der LRV-Jahresmittel-Grenzwert für PM10 und NO₂ konnte 2022 allerdings an allen Standorten eingehalten werden.

Als Hauptursache für die starke Belastungsreduktion der Primärschadstoffe gelten die strenge Luftreinhaltepolitik mit Katalysator- und Filtertechnik seit 1986, die lufthygienischen Sanierungen von alten, stark emittierenden Holzfeuerungen und auch die Entlastung durch den San Fedele Tunnel der A13 ab 2016, welcher besonders im Gebiet von Roveredo zu einer sehr deutlichen Entlastung geführt hat.

Spitzenwerte der Ozonbelastung zwar deutlich gebrochen, aber immer noch viel zu hohe Belastung in den Sommermonaten

Auch zwischen der bioindikativ ermittelten Belastungsreduktion für die Sommerbelastung von AOT40f-Ozon und den gemessenen Ozonbelastungswerten an den Bündner Messstandorten zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung und Plausibilität. Diese gute Übereinstimmung resultiert aus der hohen Modellgüte des Ozon AOT40f-Flechtescores mit den modellierten Ozondaten im Bündner Rheintal und Misox (adj. $R^2 = 0.90$).

Bei der kurzzeitigen Spitzenbelastung fällt vor allem Ozon auf, das in den Sommermonaten zwischen April und September regelmässig zu deutlichen Überschreitungen der Kurzzeit-Grenzwerte in weiten Teilen von Nord- und Südbünden führt. Die Überschreitungshäufigkeit der Kurzzeitwerte für Ozon hat erfreulicherweise seit etwa 2006 weiter abgenommen. Eine weitere Reduktion der Luftbelastung mit dem Sekundärschadstoff Ozon kann nur durch eine weitere starke und gleichzeitige Reduktion der Vorläufersubstanzen NO_x und VOC erreicht werden.

So haben sich in Castaneda die maximalen Ozon-Stundenmittelwerte seit 1991 um 46% und in Roveredo und Chur A13 um 29% reduziert (Abb. 11h und 13h). Ebenso reduziert haben sich die Gesamtstunden mit Grenzwertüberschreitungen von Ozon ($>120\mu\text{g}/\text{m}^3$) für Castaneda von 1'419 auf 627 Stunden, d.h. sie haben sich somit für 2022 mehr als halbiert. Für Roveredo fiel die Reduktion von 599 auf 472 Stunden pro Jahr etwas weniger stark aus, was sich so auch bioindikativ zeigt. Allerdings ist auch die verringerte, aktuelle Ozonbelastung immer noch stark genug, um Ozon-empfindliche Flechtenarten nachhaltig zu schädigen.

Sowohl Zu- wie Abnahmen der Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal und Misox

Wie aus dem Belastungstrend der Ammoniakbelastung in den Abbildungen 11h und 13d ersichtlich ist, stimmen die mit dem Ammoniak-Flechtenindex ermittelten Belastungsänderungen gut überein mit der mit Passivsammlern in San Vittore (rote Linie) und weiteren Standorten im Bündner Rheintal und Prättigau gemessenen Ammoniakbelastung der Luft. Diese gute Übereinstimmung resultiert auch aus der respektablen Modellgüte des Ammoniak-Flechtescores (NH₃-FI) mit der modellierten NH₃ Ammoniakbelastung im Bündner Rheintal und Misox ($R^2 = 0.75$).

Beide Verfahren weisen für die untersuchten Bündner Gebiete einen, wenn auch nur leichten Belastungsrückgang aus, während Ammoniakmessungen an 13 Standorten in der ganzen Schweiz seit ihrer Inbetriebnahme im Jahr 2000 eher konstante Verhältnisse ausweisen.

In Teilen des Misox wie im Bündner Rheintal ist es somit in dieser Zeitspanne zu einer leichten Verringerung der Ammoniakbelastung gekommen, während sich diese in anderen Gebieten auch erhöht hat. So zeigen der Grossraum Chur und landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete von Malans, Landquart, Trimmis und Untervaz auch eine Zunahme der bioindikativen Ammoniakbelastung. Insgesamt ist die aktuelle Belastungsstärke in weiten Teilen des Bündner Rheintals und im Misox allerdings noch immer so hoch, dass sich diese auf Stickstoffempfindliche Flechtenarten klar schädigend auswirkt. Zum Schutz empfindlicher Ökosysteme sowie von Flechten und Moosen hat die UNECE Konvention einen Critical Level für NH_3 -Belastungen von $1 \mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$ festgelegt (UNECE 2007).

Dass auch der Motorfahrzeugverkehr örtlich zu erhöhten Ammoniakkonzentrationen führen kann, ist schon seit Jahren bekannt. In Roveredo zeigt sich diese Auswirkung seit der Eröffnung des San Fedele Tunnels und der damit erzielten Entlastung für das früher von der A13 durchtrennte Roveredo sehr eindrücklich. Aber auch im Grossraum Chur zeigt sich dieser on-road-Effekt deutlich dadurch, dass nicht nur die landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete eine Belastungszunahme von Ammoniak zeigen, sondern auffälligerweise auch hochfrequentierte Verkehrsstandorte in der Stadt.

Qualitative Veränderungen der Schadstoffzusammensetzung seit den 1980ziger Jahren

Zusätzlich zu den erfreulichen, sanierungsbedingten Konzentrationsverminderungen der Emissionen und der davon direkt abhängigen Immissionen ist es seit den 1980ziger Jahren auch zu einer starken qualitativen Veränderung in der Schadstoffzusammensetzung von einem früher sauren zu einem aktuell stickstoffhaltigen und meist basisch-geprägten Immissions-Mix gekommen, welcher auch zu einer bedeutenden Artenverschiebung der Flechtengemeinschaften von früher meist säuretoleranten (acidophilen) zu aktuell mehr stickstofftoleranten (basiphilen) Arten geführt hat, wie dies in unseren Bündner Rheintal und Misox Berichten von 2012 ausführlich dargestellt wurde. Im aktuellen Gesamtbericht Bündner Rheintal und Misox 2024 wird diese qualitative Veränderung des Luftschadstoff-Mixes mit Belastungskarten eingehend erläutert.

Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlenmonoxid (CO) weitgehend eliminiert

Während noch bis in die frühen Achzigerjahre des letzten Jahrhunderts die hohe Schwefeldioxid- (SO_2) und Kohlenmonoxidbelastung (CO) die Leitsubstanzen der damaligen Luftreinhalte waren, konnten SO_2 und CO durch eine Vielzahl von meist technischen Massnahmen (Optimierung Verbrennungstechnik, Heizölentschwefelung und Substitution durch emissionsärmere Brennstoffe) weitestgehend eliminiert werden. Die hohe Luftbelastung mit SO_2 war Anfang der Achzigerjahre zur Zeit der Entwicklung der beiden Flechtenindikationsmethoden im NFP14 und Kanton Graubünden (Luftgesamtbelastungs-Index IAP18 und IAPBR) zusammen mit Nitrat, Staubbiederschlag und den Schwermetallen eine der wichtigen Leitsubstanzen für die Methodenkalibration (Eichung).

Stickstoffdioxid (NO₂) und lungengängiger Feinstaub PM10 stark reduziert

Die NO₂- und Feinstaubbelastung, welche in den frühen 1990er Jahren in fast allen grösseren Schweizerstädten und deren Agglomerationen zu weitläufigen Grenzwertüberschreitungen geführt hat, konnte mit zahlreichen technischen Verbesserungen (Katalysatoren, Verkehrsberuhigung, LowNox-Feuerungen, Substitution durch Wärmepumpen, Gebäudeisolation) soweit reduziert werden, dass die Jahresmittelgrenzwerte für NO₂ und PM10 fast überall eingehalten werden können und es aktuell nur noch entlang der Hauptverkehrsachsen und lokal in grössten Städten und Agglomerationen zu Grenzwertüberschreitungen der Kurzzeitwerte von NO₂ und PM10 kommt.

Spitzenwerte der Ozonbelastung zwar deutlich gebrochen, aber immer noch viel zu hohe Belastung in den Sommermonaten

Bei der Ozonbelastung zeigt sich seit den frühen 1990er Jahren eine deutliche Abnahme der Ozon-Spitzenbelastungen und deren Einwirkungszeit. Dargestellt ist der 98% Perzentilwert aller 1/2h-Werte des Monats, der LRV-Grenzwert dazu beträgt 100µg/m³. Dieser Rückgang ist gesamtschweizerisch mit dem NABEL-Messnetz und auch im Kanton Graubünden mit eigenen Messstationen gut belegt. Während die Ozon-Spitzenbelastungen in den 90er Jahren im gesamten Schweizer Mittelland und den Voralpen ein flächendeckendes und im Tessin sogar ein besorgniserregendes Problem darstellten, sind diese Belastungsspitzen heute sichtbar zurückgegangen. Dieser Belastungsrückgang zeigt sich auch bei der Ozonexposition (AOT40 > 40ppb*h), welche zum Schutz empfindlicher Ökosysteme wie der Wald, Flechten und andere Ozon-sensible Kulturen mit einem Schutzwert von 5 ppm*h definiert wurde.

Weil aber die Ozongrenzwerte (Kurzzeitwerte) in den Sommermonaten nach wie vor deutlich und viel zu lange überschritten werden, stellen diese Belastungsspitzen in allen Landesgegenden und ganz besonders im Tessin und den Südbündner Tälern ein erstrangiges Luftreinhalteproblem für den Bevölkerungs- und den Pflanzenschutz dar. Umsomehr sind weitere NO_x- und VOC-Reduktionen zur weiteren Verringerung der noch viel zu hohen Ozonkonzentrationen dringend erforderlich.

Exemplarische Darstellung von realisierten Emissionsreduktionen wichtiger Grosseinheiten im Bündner Rheintal und Vergleich mit den Luftgütekarten

Bei der Besprechung der realisierten Schadstoffreduktionen mit den Luftqualitäts- und Differenzkarten wurde verschiedentlich auf Gebiete mit einer auffallenden Luftqualitätsverbesserung hingewiesen, wie in in Teilen der Stadt Chur und der Region Trimmis bis Landquart. Diese Luftqualitätsverbesserungen sind der sichtbare Ausdruck von sehr bedeutenden Reduktionen der früher sehr hohen Emissionsfrachten und sind wesentlich beeinflusst von erfolgreich realisierten Sanierungsmassnahmen weniger Grossbetriebe in der Untersuchungsregion der letzten 36 Jahre. Im exemplarischen Sinne werden hier einige dieser Sanierungsmassnahmen mit Zahlen des aktualisierten Emissionskatasters skizziert.

Region Landquart und Trimmis

Die Grossziegelei Landquart AG hat seit der ersten Flechtenuntersuchung von 1996 in mehreren Sanierungsschritten die Befuerung ihre Brennöfen von Schweröl, auf Heizöl leicht bereits 2011 zu 80% auf Gasbetrieb umgestellt.

Die Schadstofffrachten von SO₂, NO_x, Staub und NMVOC konnten so um 72 - 99% gesenkt werden und aktuell ist die Ziegelproduktion sogar ganz eingestellt. Seit 1995 ist auch die rote Zone mit einer sehr starken Luftgesamtbelastung in Landquart ganz verschwunden.

Auch die Spezialitäten-Papierfabrik Landquart AG hat auf allen Prozessebenen grosse und sehr erfolgreiche Sanierungsanstrengungen unternommen. Im Vergleich zum Referenzjahr 2000 konnten damit allein bis 2010 die früheren Emissionsfrachten von NO_x, SO₂, NMVOC und CO₂ um 87 - 99% gesenkt werden.

Region Trimmis und Untervaz

Beim Zementwerk Holcim AG in Trimmis konnten in einem mehrstufigen Prozessoptimierung und Sanierungsprozess seit 2001 die früheren Emissionsfrachten von 2000 für SO₂ um satte 96% und für PM10 mehr als 99% und für Pb und Cd um 70 - 76% reduziert werden. Die Emissionsreduktion für NO_x beträgt dagegen 36% und für CO₂ 26%. Für NH₃ und N₂O zeigen sich bei allerdings geringen Emissionsfrachten eine Belastungszunahme von 19-142%.

Kehrichtverbrennung und Strom-Fernwärmezentrale Trimmis der GEVAG AG

Auch die KVA Trimmis (GEVAG) hat in mehreren Sanierungsschritten ihre Emissionsfrachten gegenüber früher massiv reduzieren können. In den Jahren 2009/10 wurde eine moderne fünfstufige Rauchgasreinigungsanlage mit Katalysatorstufe für die nachträgliche Reduktion von Stickoxiden und Oxidation von Dioxinen gebaut. Trotz einer 87% Zunahme der Abfallmenge seit 2000 konnten bis 2021 die Emissionsfrachten für Pb und Cd um 70-80%, für NMVOC um 24% und für SO₂ um 2% reduziert werden, während NO_x eine Belastungszunahme von 115% und NH₃ eine Zunahme von 75%, bei allerdings relativ kleiner Frachten, aufweisen. Zusätzlich wurde die Strom- und Fernwärmeversorgung stark ausgebaut und die KVA Trimmis ist nebst der Wasserkraft zum grössten Energielieferanten für Strom und Fernwärme im Bündnerland geworden. Bisher konnten dank der Fernwämeproduktion bereits 5 Mio Liter Heizöl pro Jahr eingespart und der Dampf der KVA reicht für den Anschluss von bis zu 10'000 Bündner Haushalten. Die differentiellen Luftgesamtbelastungskarten und die Ammoniak-Differenzkarte über 27 Jahre zeigen in Teilen dieses Gebiets ebenfalls Belastungssteigerungen, allerdings befindet sich in Oldis auch ein grosses Kieswerk mit weiteren Emissionen im Gebiet.

Kantonsspital Chur - Mehrstufige Sanierung der Grossfeuerungsanlage

Modernisierung und Umstellung der Grossfeuerungsanlage auf Heizöl leicht, später Gas und aktuell sogar Stilllegung mit dem Anschluss ans städtische Fernwärmenetz. Damit konnten die früheren relevanten Emissionen des Kantonspitals beinahe auf Null reduziert werden. Auch diese Entlastung lässt sich anhand der Differenzkarte der Luftgesamtbelastung (Abb. 4), zusammen mit anderen Massnahmen, mit einer deutlichen Verbesserung der Luftgüte in den südlichen Quartieren Arlibon, Lürlibad, Katz deutlich erkennen.

Ems Chemie und Axpo Tegra in Domat/Ems

Auch bei den Emser Chemie konnten in einem mehrstufigen Prozessoptimierung und Sanierungsprozess allein zwischen 1995 und 2010 die Gesamtemissionen sehr deutlich reduziert werden. Die Emissionsreduktion seit 2000 betragen für Staub und PM10 von 85%, für NO_x 51% und für SO₂ 58%, während es für VOC zu Mehrbelastungen bei geringen Frachten gekommen.

Holzenergiekraftwerks der Axpo Tegra. Seit der Betriebsaufnahme des Holzenergiekraftwerks der Axpo Tegra von 2007 ist es bis 2021 nur bei NH₃ und CH₄ zu deutlichen Belastungsreduktionen von ca. 40% und für BaP von 94% gekommen, während andere Parameter z.T. auch bei höheren Frachten mittlere bis hohe Belastungszunahmen zeigen wie 35% für PM₁₀, 117% für NO_x und 853% für SO₂. Die aktuellen Karten der Luftgesambelastung und Ammoniakbelastung zeigen in diesem Gebiet eine erhöhte Belastung, welche bei Ammoniak wohl eher auf landwirtschaftlichen Quellen gründet.

Entwicklung der Mfz-Verkehrsbelastung

Ganz im Gegensatz zu den nachgewiesenen Entlastungstrends für die meisten Luftschadstoffe sich hat die Mfz-Verkehrsmenge (DTV, durchschnittlicher täglicher Verkehr) auf der A13 und der wichtigsten kantonalen Verkehrsachsen im Bündner Rheintal in den letzten 36 Jahren seit der ersten Flechtenuntersuchung von 1986 um bis zu einem Faktor 2.5 deutlich vergrössert und somit mehr als verdoppelt. Auf der Alpentransitachse A13 hat sich der DTV um einen Faktor 1.4 bis 2.5 vergrössert, was mit der festgestellten 10%igen Vergrösserung der orangen Luftgütezone mit relativ grosser Gesamtbelastung in derselben Zeitspanne gut übereinstimmt (Abb.4). Auch auf den kantonalen Hauptachsen der Prättigauer- und Vorderrheinstrasse bei Tamins hat die Verkehrsmenge um einen Faktor 1.8-2.1 zugenommen. Auch zwischen 1990 und 2022 zeigten sich auf denselben Achsen hohe Verkehrszunahmen um einen Faktor 1.6-1.9. Damit zeigt sich nicht nur auf der Alpentransitachse A13 eine besonders starke Verkehrszunahme.

Trotz der markanten Belastungsreduktion von NO₂, PM₁₀ und Ozon zeigt sich trotz einer starken Verkehrszunahme auf der A13 Achse, welche sich seit 1986 mehr als verdoppelt hat. Für die A13 Messstelle Maienfeld zeigt sich eine besonders starke 146%ige DTV-Zunahme, für Domat/Ems eine 111% und für den San Bernardino Tunnel eine 81%ige sowie für Roveredo eine 40%ige DTV-Zunahme zwischen 1986 und 2022.

Nebst den landwirtschaftlichen Hauptquellen der Ammoniak-Emissionen in der Schweiz, welche für 1995 auf 93% veranschlagt wurden, gibt es wohl auch in der Schweiz zumindest lokal auch geringere Beiträge aus dem Motorfahrzeugverkehr.

Dass auch der Motorfahrzeugverkehr örtlich zu erhöhten Ammoniakbelastungen führen kann, insbesondere bei kalten Motoren, Staulagen und Beschleunigungsmanövern, ist schon seit Jahren bekannt.

Mittels Remote Sensing Methoden haben Burgard et al. ab 2006 in Californien Studien von "on-road ammonia emissions" vorgelegt, welche darauf hindeuten, dass Ammoniak-Emissionen aus benzin- und dieselbetriebenen Motorfahrzeugen bisher unterschätzt wurden. Dass auch der Motorfahrzeugverkehr örtlich zu erhöhten Ammoniakbelastungen führen kann, insbesondere bei kalten Motoren, Staulagen und Beschleunigungsmanövern, ist somit schon seit Jahren bekannt.

Dieser Hinweis ergibt sich nämlich auch im Bündner Rheintal und im Misox aus der Interpretation der Differenzkarten der Ammoniakbelastung und dem Beizug von mehreren Literaturstudien, nachdem wir diesen "on-road ammonia emissions" bereits in unserer Urner Studie von 2020 in den Mfz-Staulagen auf der Gotthardachse entlang der A2 im Grossraum Altdorf, Erstfeld und zwischen Wassen und Göschenen mit erhöhten Ammoniakbelastungen im nur 10-jährigen Zeitunterschied deutlich aufgezeigt haben.

Auch in Roveredo zeigt sich diese Auswirkung seit der Eröffnung des San Fedele-Tunnels und der damit erzielten Entlastung für das früher von der A13 durchtrennte Roveredo sehr eindrücklich (Abb.14i). In Castaneda und Santa Maria zeigen sich gegenüber der letzten Untersuchung von 2012 konstante Verhältnisse mit einer nur sehr geringen bis geringsten Ammoniakbelastung.

Aber auch im Grossraum Chur zeigt sich dieser on-road-Effekt deutlich dadurch, dass nicht nur landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete eine Ammoniakzunahme zeigen, sondern auffälligerweise auch hochfrequentierte Verkehrsstandorte in der Stadt (Abb.11h).

Zwar haben Katalysatoren, welche seit 1986 bei neuen Personenwagen obligatorisch sind, zu einer markanten Verminderung der Mfz-bedingten NO_x - und VOC-Belastung der PW-Flotte geführt. Allerdings hat die sehr deutliche Verkehrszunahme diesem Entlastungstrend deutlich entgegengewirkt. In derselben Zeitspanne wurde auch das 28t Limit für den Schwerverkehr auf eurokompatible 40t erhöht.

Trotz Alpenschutzartikel von 1994, welcher die Verlagerung des alpenquerenden Schwerverkehrs auf die Schiene verlangt, hat sich seither der alpenquerende Schwerverkehr stark und deutlich zu Ungunsten des Schienenverkehrs auf beiden Alpentransitstrecken A2 und A13 vergrössert.

Obwohl dieser Schwerverkehr nur gerade 5-10% der Gesamtverkehrsmenge ausmacht, ist mit Profilmessungen auch im Kanton Graubünden nachgewiesen worden, dass dieser bis zu 40% der NO_x - und Russmissionen und zwischen Bonaduz und Bellinzona sogar die Hälfte der NO_x - und ein Viertel der CO_2 -Emissionen allein verursacht.

Bedenkt man weiter, dass schwere Nutzfahrzeuge sehr viel längere Betriebszeiten als PWs aufweisen und in der Regel 1 Mio. Kilometer absolviert haben, bevor sie ersetzt werden, so wird verständlich, dass auch die strengere Euro 5-Norm, welche für den dieselbetriebenen Schwerverkehr endlich den Partikelfilter zwingend vorschreibt und die strengere Euro 6-Norm, welche für Dieselfahrzeuge eine noch grössere Reduktion des Feinstaubes und der NO_x (65 und 80%) verlangt, beim Schwerverkehr erst mit grösserer Zeitverzögerung wirksam werden können.

Für eine Signifikante Entlastung von NO_2 , PM10, VOCs und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen sowie der Partikelzahl im Verkehrsbereich wird auch die zunehmende e-Mobilität und die kurz vor der Einführung stehende strengere Euro7-Norm sorgen, welche neu auch den wichtigen Reifen- und Bremsabrieb, die Begrenzung der Partikelzahl und das on-board Monitoring zur permanenten Abgasmessung erstmals einführen und begrenzen wird. Auch die in der Schweiz bevorstehende Verschärfung des PM10-Grenzwertes nach den Vorschlägen der WHO und EKL wird zusätzlich grosse Wirkung zeigen.

Nach aktuellen Prognosen des BAFU¹¹ werden die Schwerverkehrs-bedingten NO_x - und PM10-Emissionen aufgrund der verschärften EU-Abgasnormen trotz markanten Verkehrs- und Fahrleistungszunahmen bis 2035 deutlich sinken, jene von CO_2 allerdings ansteigen. Die steigende e-Mobilität wird dazu einen wichtigen Beitrag zur weiteren Emissionsreduktion von NO_x und PM10 leisten.

Gegenüber dem Emissionsstand von 2000 müssen im Kanton Graubünden daher die NO_x -Emissionen weiter um 40-60%, die VOC's um ca. 50%, der Feinstaub und Ammoniak je um 45%, sowie diejenigen von CO_2 um weitere 10% reduziert werden um die Schutzzeile der LRV zu erreichen. Gemäss Berechnungen des aktualisierten Emissionskatasters Kanton Graubünden Luftschadstoffe und Treibhausgase von 2022 werden sich die Verkehrsemissionen im Kanton zwischen 2020 und 2030 weiter reduzieren. Es wird dabei mit folgenden prozentualen Abnahmen gerechnet für NO_x mit 33%, mit 21% für PM10, 36% für BC exhaust, wogegen fast unverändert für NH_3 sowie mit einer Zunahme von 9% für NMVOC.