

Bericht

VOC-Immissionsmessungen in der Schweiz 1991 - 2019

Andi Schneider
Yvonne Eggenberger

2001
Basel, 6.10.2020

**Projekt mit finanzieller Unterstützung der Kantone Aargau, Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Bern,
Graubünden, Uri, Wallis sowie von Ostluft und des BAFU**

Inhalt

Zusammenfassung	3
Résumé	5
1 Einleitung und Zielsetzung	7
2 Methodik	9
2.1 Messstandorte.....	9
2.2 Messmethode.....	10
2.3 Qualitätssicherung.....	11
2.4 Fehlerabschätzung.....	12
3 Resultate	15
3.1 Jahresmittelwerte	15
3.2 Saisonale Schwankungen.....	21
3.3 Minima und Maxima	27
3.4 Monoterpene	28
3.5 Verhältnis Toluol / Benzol.....	33
4 Vergleich mit früheren Messkampagnen	36
6 Vergleich mit weiteren VOC-Messungen in der Schweiz	43
7 Interpretation der Standortdaten	49
8 Schlussfolgerungen	59
Anhang 1 Messstationen	
Anhang 2 Messwerte	
Anhang 3 Klassifikation der Stationen	

Zusammenfassung

VOC (Volatile Organic Compounds / flüchtige organische Verbindungen) sind zusammen mit den Stickoxiden Vorläuferschadstoffe für die Bildung von bodennahem Ozon. Neben der Ozonbildung haben zahlreiche VOC weitere unerwünschte Eigenschaften: teilweise hohe Toxizität, Potenzial zur Bildung von sekundärem Feinstaub und Treibhausgaspotential.

Bund und Kantone haben in den vergangenen Jahrzehnten diverse Massnahmen zur Minderung der VOC-Emissionen umgesetzt. Um den Erfolg dieser getroffenen Massnahmen zu beobachten und zu kontrollieren werden neben den Emissionserhebungen und -schätzungen auch Immissionsmessungen eingesetzt.

VOC-Belastung nimmt ab

1991 wurde erstmals eine einjährige VOC-Immissions-Messkampagne an mehreren Standorten in der Schweiz durchgeführt, unter anderem mit Messungen in Allschwil, Altdorf, Chur und an der Feldbergstrasse in Basel. Ähnliche Kampagnen mit bis zu 24 Messstationen in 13 Kantonen erfolgten 1996, 2001, 2009, 2014 und nun 2019. Dadurch ist es möglich, die Entwicklung der VOC-Immissionen in den letzten 28 Jahren zu erfassen und darzustellen. Die folgende Abbildung zeigt dies am Beispiel der Summe ausgewählter VOC, gebildet aus den Jahresmittelwerten von Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol, Mesitylen, Pseudocumol, n-Heptan und Isooctan.

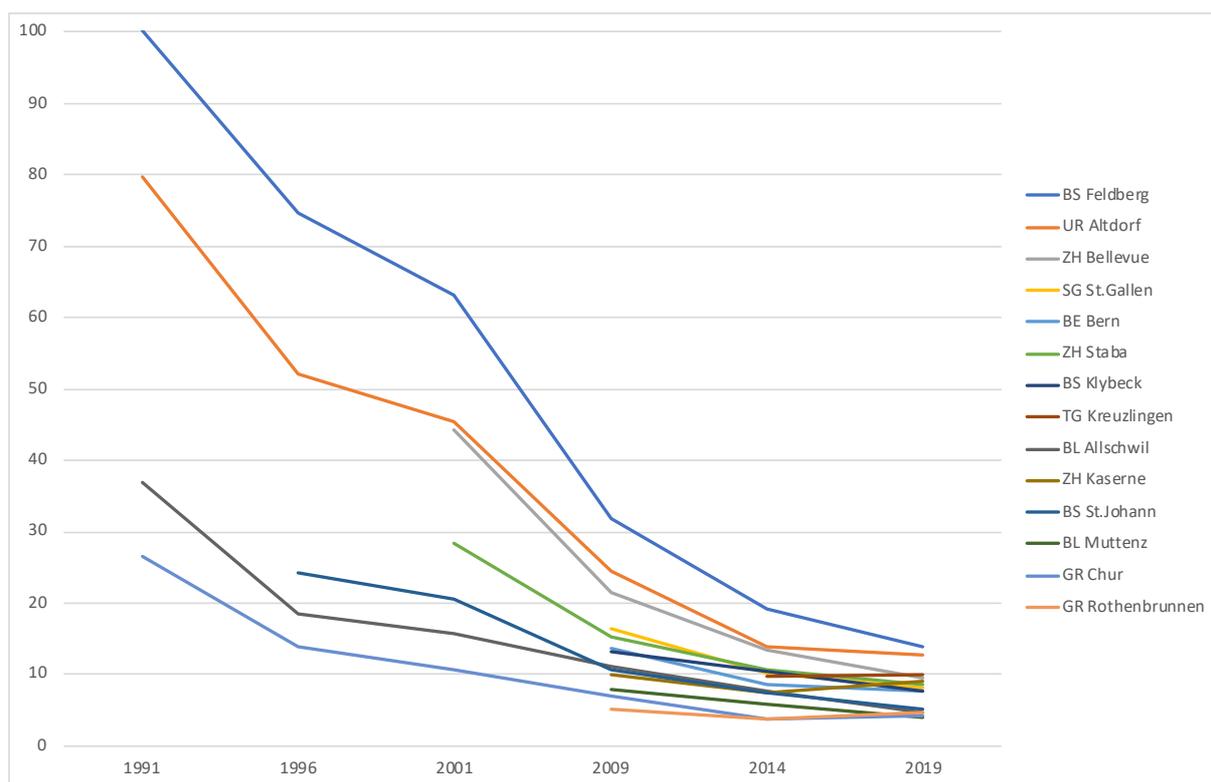


Abbildung Jahresmittel der Summe ausgewählter VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019

Die vier erwähnten Stationen zeigen einen Rückgang der VOC-Immissionen von 1991 bis 2019 um 84 bis 87%. Auch in den letzten fünf Jahren sind die VOC-Immissionen deutlich zurückgegangen. An den 14 Standorten, welche auch schon 2014 beprobt worden sind, sanken die Immissionskonzentrationen um durchschnittlich 16%, dies obwohl bei den beiden Bündner Standorten eine starke Kontamination mit n-Heptan ins Gewicht fiel und bei den meisten Standorten überhöhte Isooctan-Wert gemessen wurden, weil die meisten

Passivsammler verunreinigt waren. Der tatsächliche Immissions-Rückgang dürfte daher um einiges grösser sein. Die Resultate der VOC-Immissionsmesskampagnen sind im Einklang mit den Ergebnissen der 1994 aufgenommenen kontinuierlichen VOC-Immissionsmessungen an einzelnen NABEL-Stationen. Ebenso werden die Emissionserhebungen des BAFU weitgehend durch die Messresultate bestätigt. Das BAFU stellt seit 1991 eine Abnahme der VOC-Emissionen des Verkehrs um 88% und der Industrie- und Gewerbe-Emissionen um 78% fest.

Messkampagne 2019

Im Jahr 2019 wurden an 22 Standorten in zehn Kantonen eine einjährige VOC-Immissionsmesskampagne durchgeführt. Während 26 Messperioden wurden Passivsammler für jeweils 14 Tage ausgehängt, danach im Labor mit Schwefelkohlenstoff extrahiert und mit einem GC/MS-System auf 39 verschiedene flüchtige Verbindungen (Aromaten, Alkane, Monoterpene und chlorierte Verbindungen) analysiert. Die Analytik erfolgte in den Labors der Geopro in Roche oder der Umweltanalytik des Kantonalen Laboratoriums Basel-Landschaft. Zur Qualitätssicherung wurden mehrere Parallelproben von den beiden beteiligten Labors analysiert. Zudem nahm die Geopro während dieser Messkampagne an einem internationalen Ringversuch teil. An ländlichen und Agglomerations-Standorten zeigen die VOC einen leichten Jahresgang mit tieferen Werten im Sommer. An städtischen, Verkehrs-exponierten sowie Industrie-nahen Standorten ist kein Jahresgang erkennbar.

Der höchste Benzol-Mittelwert wurde mit $1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Altdorf ermittelt. Knapp über $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen die Jahresmittelwerte auch in Basel Feldbergstrasse und in Zürich Bellevue. An allen andern Standorten liegen die Werte unter $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, am tiefsten in Chur mit $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Etwas grösser sind die Standortunterschiede bei den übrigen Aromaten. Der höchste Toluol-Mittelwert beispielsweise wurde mit $5.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Visp West gemessen, der tiefste mit $0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Rothenbrunnen.

Monoterpene, die natürlichen Ursprungs sind, jedoch auch als Lösungsmittel resp. Duftstoffe in Haushalts- und Gewerbeprodukten eingesetzt werden, wurden vor allem an ländlichen Messstationen nachgewiesen. Hauptkomponenten sind alpha- und beta-Pinen. In Städten ist der Limonen-Anteil erhöht. In Höri liegt das Verhältnis von alpha-Pinen zu Limonen bei 16.3, in Rothenbrunnen bei 11.5, in Basel und Zürich (St. Johann, Bellevue und Stampfenbachstrasse) bei 1 und an der Feldbergstrasse in Basel bei 0.56.

Weitere Massnahmen nötig

Die Messungen bestätigen die Wirksamkeit der von Bund, Kantonen und Gemeinden getroffenen Massnahmen zur Reduktion der VOC-Emissionen. Die Luftqualität wird auch bezüglich VOC immer besser. Die immer noch vereinzelt zu hohen Feinstaubwerte und vor allem die flächendeckend zu hohen Ozonwerte zeigen aber, dass die Luftbelastung durch VOC noch weiter gesenkt werden muss - national und international.

Résumé

Les COV (composés organiques volatils) sont avec les oxydes d'azote les précurseurs de la formation de l'ozone troposphérique. Outre la formation d'ozone, de nombreux COV présentent d'autres propriétés indésirables : haute toxicité dans certains cas, potentiel de formation de particules secondaires et potentiel de gaz à effet de serre.

Au cours des dernières décennies, la Confédération et les cantons ont mis en œuvre diverses mesures pour réduire les émissions de COV. Afin de surveiller et de contrôler le succès de ces mesures, des mesures d'immissions sont utilisées en plus des enquêtes et des estimations d'émissions.

La pollution par les COV diminue

En 1991, une campagne de mesures avait été effectuée pour la première fois en Suisse durant un an sur plusieurs sites. Il s'agissait entre autres des mesures à Allschwil, Altdorf, Coire et à Bâle Feldbergstrasse. Des campagnes similaires comprenant jusqu'à 24 sites dans 13 cantons ont été renouvelées en 1996, 2001, 2009, 2014 et maintenant 2019. Il est ainsi possible de suivre l'évolution des immissions de COV durant les 28 dernières années. Le graphique ci-dessous présente l'évolution des immissions avec une sélection de COV. Il s'agit des concentrations de benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes, mésitylène, pseudocumène, n-heptane et isoctane.

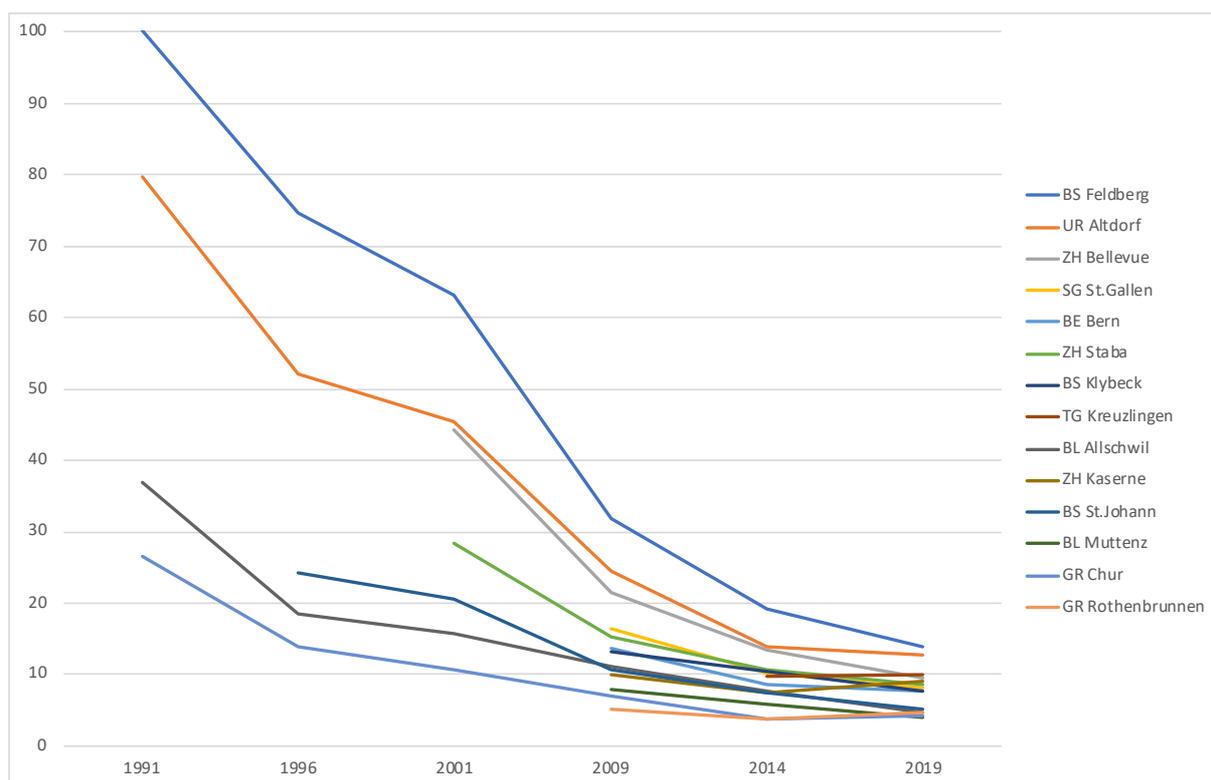


Figure Moyennes annuelles de la somme des COV choisis [en µg/m³] pour les années 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 et 2019

Sur les 4 sites où l'on mesure depuis 1991, le niveau des immissions a baissé de 84 à 87%. Au cours des cinq dernières années, les diminutions sont marquées. Sur les 14 stations où les mesures furent effectuées en 2014 et en 2019, la baisse des immissions en moyenne est de 16% bien que les deux sites dans les Grisons ont indiqué une forte contamination par du n-heptane et que la plupart des sites ont indiqué des concentrations

élevées d'iso-octane en raison d'une contamination des capteurs passifs. Il en résulte que la baisse effective des immissions de COV devrait être encore plus importante. Les résultats des campagnes de mesure d'immissions de COV sont conformes aux résultats des mesures continues effectuées depuis 1994 sur quelques stations NABEL. De même, l'évolution des émissions calculées par l'OFEV est aussi largement confirmée par les mesures d'immissions. L'OFEV estime que la baisse des émissions dues au trafic routier a atteint 88% et les émissions industrielles 78% par rapport à 1991.

Campagne de mesure 2019

En 2019, des mesures d'immissions de COV se sont déroulées sur 22 sites dans 10 cantons. Au cours des 26 périodes de mesures, des échantillons ont été prélevés durant 14 jours au moyen de capteurs passifs, puis extraits à l'aide de sulfure de carbone et analysés par GC/MS. 39 composés différents ont été déterminés dans les groupes des hydrocarbures aromatiques, des alcanes, des monoterpènes et des composés chlorés. Les analyses ont été effectuées par le laboratoire GEOPRO à Roche respectivement par le laboratoire cantonal d'analyse de Bâle-Campagne. Pour assurer le contrôle de qualité, plusieurs échantillons ont été analysés dans les deux laboratoires. De plus, GEOPRO a participé, durant la campagne de mesures, à une inter-comparaison au niveau international.

Les concentrations de COV, en milieu rural ou suburbain indiquent une légère variation saisonnière avec les valeurs les plus basses en été. Par contre, sur les emplacements urbains exposés au trafic routier, ainsi que sur les sites proches de l'industrie, il n'y a pas de cycle saisonnier.

La moyenne annuelle de benzène la plus élevée a été mesurée à 1,05 µg/m³ sur le site d'Altdorf. Des valeurs légèrement supérieures à 1 µg/m³ ont été enregistrées à Bâle Feldbergstrasse et à Zürich Bellevue. Des valeurs inférieures à 1 µg/m³ ont été enregistrées sur tous les autres sites. La moyenne annuelle la plus basse a été enregistrée à Coire avec une valeur de 0,36 µg/m³.

Les concentrations des autres hydrocarbures aromatiques varient plus fortement que le benzène. Par exemple, la moyenne annuelle de toluène maximale s'est élevée à 5,82 µg/m³ à Visp, alors qu'elle n'est que de 0,79 µg/m³ à Rothenbrunnen.

Les monoterpènes, qui sont d'origine naturelle mais qui sont également utilisés comme solvants ou parfums dans les produits ménagers et artisanaux, ont été détectés principalement dans les stations de surveillance rurales. Les principaux composants sont les alpha- et le bêta-pinène. Dans les villes, la teneur en limonène est augmentée. Sur le site de Höri, la proportion d'alpha-pinène par rapport au limonène est 16,3, à Rothenbrunnen de 11,5, à Bâle et à Zurich (St Johann, Bellevue et Stampfenbachstrasse) proche de 1 et de 0,56 à Bâle Feldbergstrasse.

Autres mesures nécessaires

Ces mesures confirment que les mesures de limitation des émissions mises en œuvre par la Confédération, les cantons et les communes ont permis d'améliorer la qualité de l'air. Toutefois, compte tenu que les concentrations d'ozone et de poussières fines, dont les COV constituent des précurseurs, sont encore trop élevées, il s'agira de poursuivre la diminution des émissions – au niveau national et international.

1 Einleitung und Zielsetzung

VOC (Volatile Organic Compounds / flüchtige organische Verbindungen) sind neben den Stickoxiden Vorläuferschadstoffe, die für die Bildung von bodennahem Ozon verantwortlich sind. Hochreaktive VOC sind verantwortlich für die kurzfristigen Ozonspitzenwerte, die schwach reaktiven tragen dagegen zur Erhöhung der grossräumigen Ozon-Grundbelastung bei. Neben ihrer Wirkung zur Ozonbildung haben zahlreiche VOC weitere unerwünschte Eigenschaften: teilweise hohe Toxizität, Potenzial zur Bildung von sekundärem Feinstaub und Treibhausgaspotential.

Bund und Kantone haben in den vergangenen Jahren neben dem Vollzug der LRV diverse Massnahmen zur Minderung der VOC-Emissionen umgesetzt und die VOC-Verordnung angepasst. Zur Ergänzung der Emissionserhebungen und -schätzungen soll der Erfolg der Massnahmen auch mit Immissionsmessungen beobachtet werden.

1991/92 führte die Carbotech AG im Auftrag mehrerer Kantone und des BUWAL eine erste VOC-Immissions-Messkampagne an insgesamt neun Standorten durch. Mit der Zielsetzung, die Entwicklung der VOC-Immissionen zu verfolgen, wurden in den Jahren 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019 (diese Arbeit) weitere VOC-Messkampagnen durchgeführt.

Die 2019 durchgeführten Messungen wurden im Auftrag der Kantone Aargau, Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Bern, Graubünden, Uri, Wallis sowie von Ostluft durchgeführt.

Tabelle 1 Analyalisierte VOC mit Emissionsquellen

Stoffklasse	Stoff	Wichtigste Quellen
Aromaten	Benzol	Verkehr (in Benzin enthalten und Neubildung im Motor)
	Toluol, Ethylbenzol, Xylole, Ethyltoluole, Mesitylen, Pseudocumol, Hemellitol	Verkehr, Industrie/Gewerbe/Haushalte (in vielen lösemittelhaltigen Produkten wie Farben, Lacken, Klebern, Reinigern etc. enthalten)
	Styrol	Industrie/Gewerbe (in technischen Produkten enthalten), Verkehr (Abgase)
Aliphaten	Isopropylbenzol (Cumol), n-Propyl-benzol	Verkehr
	Isooctan (2,2,4-TMPentan), n-Octan, n-Nonan	Verkehr
	n-Heptan, Cyclohexan	Verkehr, Industrie/Gewerbe
Chlorierte VOC	n-Decan, n-Undecan, n-Dodecan, n-Tridecan	Verkehr (Diesel, Kerosin), Industrie/Gewerbe (in Lösungsmitteln enthalten)
	1,2-Dichlorethan, 1,1,1-Trichlorethan, 1,1,2-Trichlorethan, Trichlorethen, 1,1,2,2-Tetrachlorethan, Chlorbenzol	Industrie, Gewerbe
	Chloroform	Industrie (seltene Anwendung)
	Tetrachlorkohlenstoff	Verbotener Stoff, keine relevanten Quellen, wird kaum abgebaut. Hintergrundbelastung circa 0.5 µg/m ³
	Tetrachlorethen (Per)	Industrie/Gewerbe (Chemisch Reinigungen, Entfettung)
Monoterpene	Dichlorbenzole	Industrie
	Pinene, Camphen, 3-Caren	Natur (Stoffwechsel von Pflanzen), Haushalt/Gewerbe (pflanzliche Harze und Öle)
	Limonen	Haushalte, Gewerbe (Duftstoff in Produkten, Bestandteil von Zitruschalenöl), Natur

2 Methodik

2.1 Messstandorte

22 Standorte wurden während eines Jahres beprobt. Vier Standorte (Allschwil Grabenring, Basel Feldbergstrasse, Altdorf, Chur RhB) wurden bereits in den Messkampagnen 1991/1992, 1996, 2001, 2009 und 2014, zwei Standorte (Zürich Bellevue, Zürich Stampfenbachstrasse) in den Kampagnen 2001, 2009 und 2014, sieben Standorte in der Kampagne 2009 und 2014 (Basel St.Johann, Basel Klybeck, Bern Wankdorf, Muttenz Hard, Rothenbrunnen, St.Gallen Blumenbergplatz, Zürich Kaserne (NABEL-Standort)) und ein Standort (Kreuzlingen) 2014 beprobt. Neu erfolgten auch Probenahmen an den Standorten Möriken, Killwangen, Monthey Nord, Monthey Süd, Visp West, Visp Ost, Höri und Kloten.

Die Messungen begannen am 15. Januar 2019, einzig in Allschwil und Basel Klybeck 14 Tage später. Die erste Probenahme an den anderen drei Basler Standorten (Basel Feldbergstrasse und St. Johann sowie Muttenz Hard) begann wegen fehlender Personalressourcen bereits Anfang Dezember 2018, wurde aber einer zweiwöchigen Messperiode gleichgestellt. An allen fünf Basler Standorten wurde im März aus demselben Grund ein Probewechsel ausgelassen. Diese vierwöchigen Proben wurde in der Auswertung wie zwei identische 14-Tagesproben behandelt. In Möriken wurde im April ein Sammler von Unbekannten entwendet. An den fünf Basler und den vier Walliser Standorten wurden die Probenahmen nur bis zum Jahresende durchgeführt, an allen andern Standorten bis Mitte Januar 2020. An den Bündner Standorten dauerte die letzte Probenahme drei resp. vier Wochen, wurde aber wie eine 14-Tagesprobe behandelt.

Tabelle 2 Standorte, Typ und Messperiode

Standort	Typ*	Messperiode	Anzahl Messungen	Labor
Allschwil, Grabenring	2 B a	29.1.19 – 30.12.19	23	KL BL
Altdorf	2 B d	15.1.19 – 14.1.20	26	Geopro
Basel, Feldbergstrasse	1 D d	15.1.19 – 30.12.19	24	KL BL
Basel, Klybeck	1 B b	29.1.19 – 30.12.19	23	KL BL
Basel, St. Johann	5 C b	15.1.19 – 30.12.19	24	KL BL
Bern, Wankdorf	1 B b	15.1.19 – 14.1.20	26	Geopro
Chur RhB	5 A b	15.1.19 – 14.1.20	25	Geopro
Höri ZH	7 A a	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro
Killwangen AG	2 A c	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro
Kloten ZH	5 A b	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro
Kreuzlingen	4 A b	15.1.19 – 21.1.20	26	Geopro
Monthey Nord	4 A a	15.1.19 – 31.12.19	25	Geopro
Monthey Süd	4 A a	15.1.19 – 31.12.19	25	Geopro
Möriken AG	6 B c	15.1.19 – 15.1.20	25	Geopro
Muttenz, Hard	3 D a	15.1.19 – 30.12.19	24	KL BL
Rothenbrunnen	3 B b	15.1.19 – 7.1.20	25	Geopro
St.Gallen, Blumenbergplatz	1 C d	15.1.19 – 14.1.20	26	Geopro
Visp West	4 A a	15.1.19 – 31.12.19	25	Geopro
Visp Ost	4 A a	15.1.19 – 31.12.19	25	Geopro
Zürich, Bellevue	1 C b	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro
Zürich, NABEL	5 A b	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro
Zürich, Stampfenbachstrasse	1 B c	15.1.19 – 15.1.20	26	Geopro

*Standorttyp gem. Immissions-Messempfehlungen (siehe Anhang)

2.2 Messmethode

Messprinzip

Die Messungen erfolgten wie 1996, 2001, 2009 und 2014 mit Passivsammlern "Monitor 3500" der Firma 3M. Im Gegensatz dazu wurden in der Messkampagne 1991/92 Aktivsammler (Grob-Aktivkohleröhrchen) verwendet.

Probenahme

Jeweils ein Passivsammler wurde – teilweise in einem belüfteten Kunststoffrohr - während zwei Wochen exponiert. Zur Qualitätssicherung wurden bei einzelnen Probenahmen zwei Passivsammler parallel exponiert. Die Probenahmen erfolgten durch Mitarbeiter der Auftraggeber.

Aufarbeitung

Die Sammler wurden von Mitarbeitern der kantonalen Fachstellen nach der Exposition verschlossen und per Post an das Labor der Geopro geschickt. Die Aufarbeitung erfolgte innert zwei Wochen nach Erhalt der Sammler. Die Passivsammler wurden mit internem Standard und 1.5 ml Schwefelkohlenstoff versetzt und während rund 30 Minuten mehrmals geschwenkt. Das Eluat wurde in Vials überführt und sofort analysiert. Das Lufthygieneamt beider Basel liess die Passivsammler beim Kantonalen Laboratorium Basel-Landschaft (KL BL) analysieren.

Analytik

Analysiert wurden die Eluate in einem GC/MS-System (Agilent Technologies 7890B / XLMSD 5977B). Das Einspritz-volumen betrug 0.7 µl. Die Kalibration erfolgte mit acht Standardlösungen unterschiedlicher Konzentrationen aller zu bestimmenden Verbindungen.

Die Chromatogramme und Spektren wurden von Auge überprüft und die Peaks der einzelnen Stoffe über das Massenspektrum identifiziert. Die Quantifizierung erfolgte an Hand einer spezifischen Masse mit der Methode des internen Standards.

Die Berechnung der Luftkonzentration erfolgte über die von 3M angegebenen Diffusionskonstanten. Die Wiederfindungsraten wurden auf der Grundlage der entsprechenden Resultate der Geopro resp. des KL BL bei der Berechnung berücksichtigt.

Analysierte Stoffe

Das Messprogramm der Geopro beinhaltet die folgenden 39 in vier Klassen aufgeteilten Stoffe:

Aromaten (13 Verbindungen):

Benzol, Toluol, Ethylbenzol, m/p-Xylol, Styrol, o-Xylol, Isopropylbenzol (Cumol), n-Propylbenzol, m/p-Ethyltoluol, o-Ethyltoluol, 1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen), 1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol), 1,2,3-Trimethylbenzol (Hemellitol)

Aliphaten (9 Verbindungen):

n-Heptan, 2,2,4-Trimethylpentan (Isooctan), n-Octan, n-Nonan, n-Decan, n-Undecan, n-Dodecan, n-Tridecan, Cyclohexan

chlorierte Stoffe (12 Verbindungen):

1,2-Dichlorethan, 1,1,1-Trichlorethan, Chloroform, Tetrachlorkohlenstoff, Trichlorethen, 1,1,2-Trichlorethan, Chlorbenzol, 1,2-Dichlorbenzol, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol, Tetrachlorethen (Perchloräthylen, Per), 1,1,2,2-Tetra-chlorethan

Monoterpene (5 Verbindungen):

Limonen, α-Pinen, β-Pinen, Camphen, 3-Caren

Das KL BL quantifizierte die folgenden 29 Verbindungen:

Benzol, Toluol, Ethylbenzol, m/p-Xylol, o-Xylol, m-Ethyltoluol, 1,3,5-Trimethylbenzol, 1,2,4-Trimethylbenzol, n-Hexan, n-Heptan, 2,2,4-Trimethylpentan, n-Octan, n-Nonan, n-Decan, Cyclohexan, 1,2-Dichlor-ethan, 1,1,1-Trichlorethan, Chloroform, Trichlorethen, 1,1,2-Trichlorethan, Chlorbenzol, 1,2, Dichlorbenzol, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol, Tetrachlorethen (Perchloroethylen, Per), 1,1,2,2-Tetrachlorethan, Limonen, α -Pinen, β -Pinen, Camphen, 3-Caren

Vertrauensgrenzen

Die absoluten Nachweisgrenzen der einzelnen VOC sind unterschiedlich und wurden nicht bestimmt. Stattdessen wurden Vertrauensgrenzen für die verschiedenen Verbindungen festgelegt. Der angegebene Wert resultiert aus der Verrechnung der Konzentration des kleinsten Standards aus der Kalibrierung (circa 0.01 ng/ μ l Injektionsvolumen) mit den gleichen Parametern wie für die realen Proben (Expositionszeit, substanzspezifische Rechenkonstante, Recovery). Das ergibt bei 14-tägiger Expositionszeit 0.02 - 0.04 μ g/ m^3 .

2.3 Qualitätssicherung

Während jeweils zwei Messperioden wurden an allen fünf Basler Standorten parallele Probenahmen und Analysen durch das KL BL und die Geopro durchgeführt. Die Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Labors ist zufriedenstellend. In Abbildung 1 sind die Toluol-Werte dieser Parallelmessungen beispielhaft dargestellt.

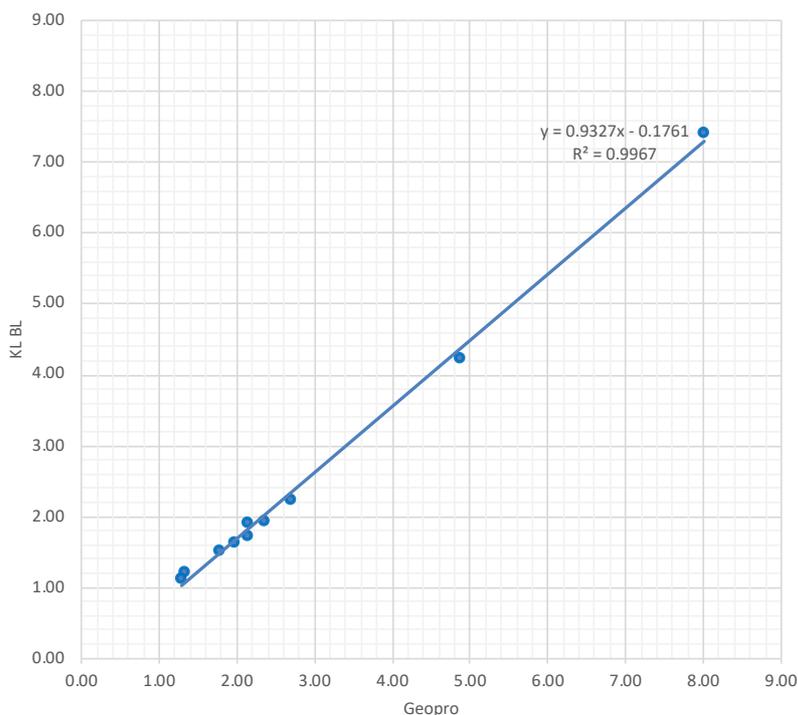


Abbildung 1 Ergebnisse der Toluolvergleichsmessungen [μ g/ m^3] KL BL / Geopro

Die Geopro hat am Ringversuch «Organische Lösemittel 2019» des IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin) erfolgreich teilgenommen.

Das Lufthygieneamt beider Basel hat mit dem KL BL ausserdem 2014 an einem Ringversuch in Strasbourg (Laboratoire interrégionale de chimie, Rapport d'essais interlaboratoires: Intercomparaison 2014 de mesures de BTEX par prélèvements passifs, Schiltigheim 2014) teilgenommen, bei welchem insgesamt 10 Labors aus Frankreich, Italien, Deutschland und der Schweiz BTEX mit verschiedenen Methoden bestimmt haben. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über alle Labors wurde als ziemlich gut eingestuft. Ein neuer Ringversuch ist in Planung.

2.4 Fehlerabschätzung

In diesem Bericht sind alle Messwerte nach Abzug allfälliger Blindwerte ohne weitere Korrekturen dargestellt. Das bedeutet, auch Messwerte, die nicht nachvollziehbar oder auf Grund einer Kontamination erhöht sind, fliessen in die Auswertung ein. Deshalb sind folgende Besonderheiten bei der Interpretation zu berücksichtigen:

Isoctan, Charge EA

Gemäss Rückmeldung des Labors Geopro waren die Passivsammler der Charge EA ab Werk bereits stark mit Isooctan verunreinigt, was zu hohen und vor allem schwankenden Blindwerten des Isooctans führte. Das KL BL stellte mit den Sammlern der Charge EA ähnliche Verunreinigungen fest. Geopro hat für die ganze Kampagne Sammler der Charge EA verwendet, das KL BL in der Zeit vom 18.6. bis 2.12.2019.

Die Standardabweichung des Isooctan-Blindwertes lag teilweise in der Grössenordnung der Messresultate. Diese Verunreinigungen auf den Passivsammler traten zum ersten Mal auf. Auf Grund dieser Erfahrung werden zukünftig Sammler vor Austragung an die Standorte auf Verunreinigungen überprüft.

Eine Auswertung der Isooctan Messwerte ist in dieser Kampagne nicht möglich.

n-Decan

Bei den Vergleichsmessungen wies das KL BL rund doppelt so viel n-Decan nach wie Geopro. Die n-Decan-Werte der Basler Standorte lassen sich laborbedingt nicht mit jenen der übrigen Standorte vergleichen.

n-Heptan, Bündner Standorte

An beiden Standorten des Kantons Graubünden, Chur RhB und Rothenbrunnen, zeigt n-Heptan einen Jahresverlauf auf hohem Niveau mit Peaks bis $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Gemäss Rücksprache mit dem Kanton können diese Werte nicht nachvollzogen werden und es liegt dafür auch keine eindeutige Erklärung vor. Es wird eine Kontamination bei den Probenahmen vermutet.

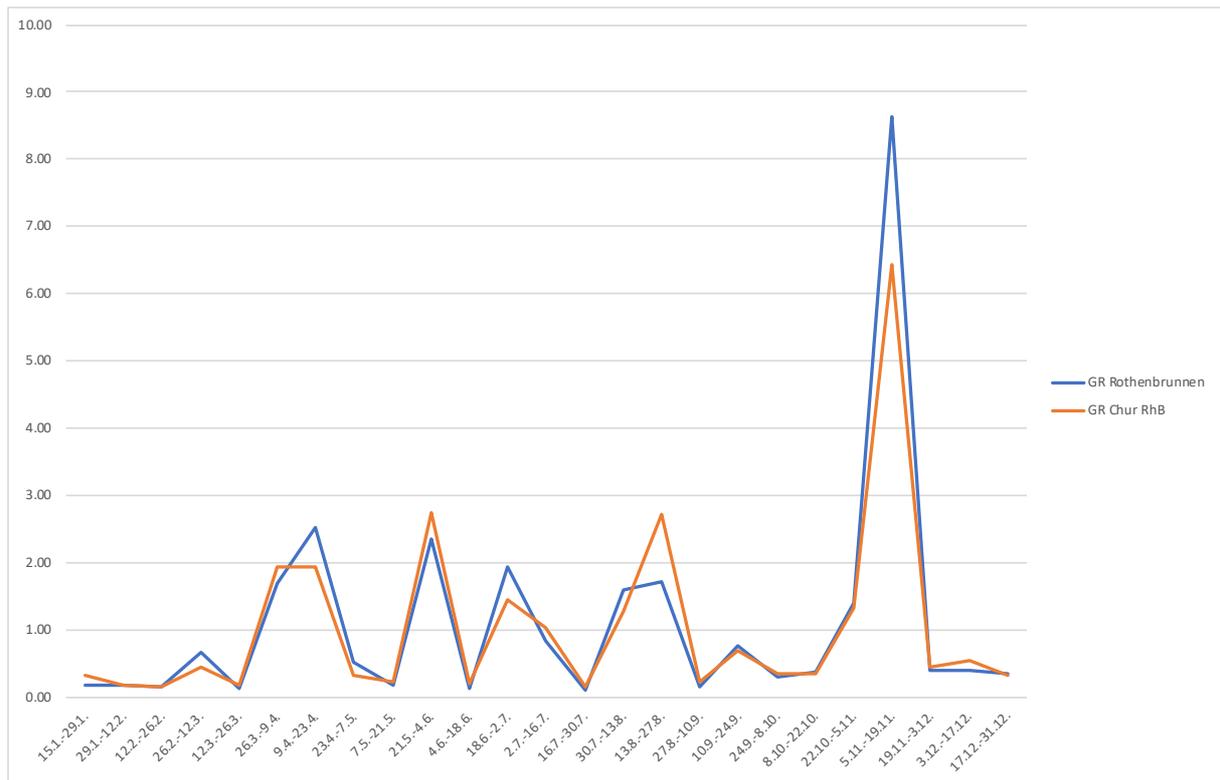


Abbildung 2 Jahresverlauf n-Heptan Standorte Graubünden [µg/m³]

Chloroform, Standorte Basel und Basel-Landschaft

Die Proben der Standorte in beiden Basel wurden während der gesamten Kampagne möglicherweise im Labor mit Chloroform kontaminiert, da die Proben teilweise in einem Raum gelagert waren, wo Chloroform verwendet wurde. Durch die Plastikdeckel der benutzten Passivsammler diffundierte Chloroform hindurch. Die Blindwerte hingegen wurden ungeöffnet in den verschweissten Aluminium-Originalgebinden gelagert und bilden die lagerungsbedingte Kontamination nicht ab, die der Aufarbeitung und Analytik schon. Dadurch bilden die Blindwerte zu tiefe Werte ab, was teilweise zu hohen Chloroform Ergebnissen führte.

Proben der Basler Standorte weisen auf Grund dieser Peaks zu hohe Mittelwerte aus. Die Ergebnisse können nicht mit anderen Standorten verglichen werden.

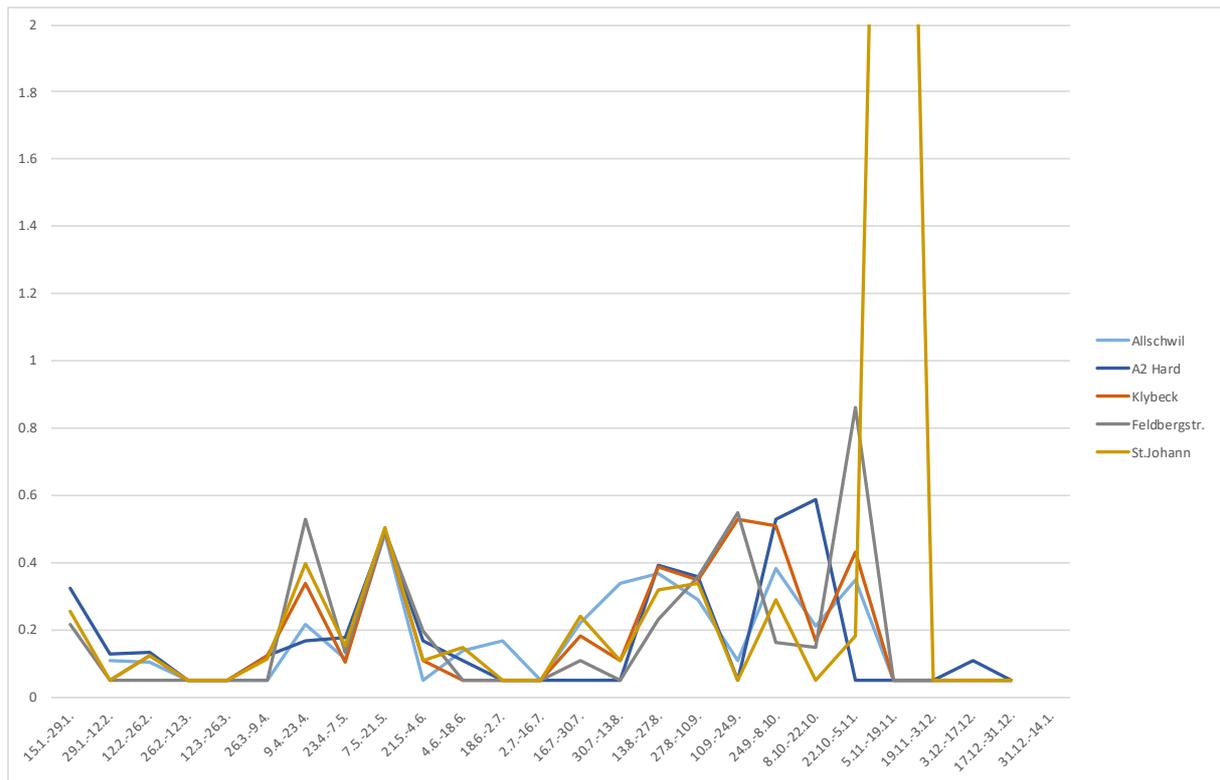


Abbildung 3 Jahresverlauf Chloroform Standorte beider Basel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen und der Ringversuche lassen vermuten, dass der Fehler für Probenahme und Analytik - mit den beschriebenen Ausnahmen - kleiner $\pm 20\%$ ist.

3 Resultate

3.1 Jahresmittelwerte

Die durchschnittliche Jahresbelastung an den 22 Standorten wurde aus den Einzelmesswerten ohne Gewichtung der teilweise unterschiedlichen Probenahmedauer gebildet. Die genauen Daten der Messungen finden sich in Anhang 2.

Die Jahresmittelwerte 2019 sämtlicher VOC an allen Standorten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Der höchste Jahresmittelwert jeder Substanz ist fett markiert. Die höchsten Aromaten-Konzentrationen finden sich in den Strassenschluchten in Basel Feldbergstrasse und in Altdorf, der höchste Toluol-Jahresmittelwert in Visp West. Hohe Alkan-Werte zeigen Basel Feldbergstrasse und Klybeck, sowie Bern und Zürich Kaserne. Interessanterweise werden die höchsten Dodecan- und Tridecan-Werte in Kloten gemessen. Monoterpene werden vor allem an den ländlichen Standorten Rothenbrunnen und Höri gemessen, wobei der Höchstwert für Limonen an der Feldbergstrasse in Basel gefunden wird. Relevante Konzentrationen chlorierter Verbindungen werden in Monthey und Visp nachgewiesen.

In den Abbildungen 4 bis 7 sind die Jahresmittelwerte für Σ VOC, Benzol, Toluol und m/p-Xylol grafisch dargestellt. Die grössten VOC-Belastungen (siehe Abbildung 4) weisen die Strassen-nahen Standorte Basel Feldbergstrasse und Altdorf auf, eine knapp dreimal geringere als Chur. Auch beim Benzol dominieren die beiden erwähnten Strassen-nahen Standorte zusammen mit Zürich Bellevue, die Belastungsunterschiede zwischen den Messstellen sind kleiner drei (Abbildung 5). Grösser sind die Unterschiede beim Toluol in Abbildung 6. Der Jahresmittelwert am Industriestandort Visp West ist mehr als siebenmal höher als in Rothenbrunnen. Abbildung 7 zeigt die Jahresmittel von m/p-Xylol. Das ländliche Höri ist fünfmal weniger belastet als Basel Feldbergstrasse.

Tabelle 3 VOC-Jahresmittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

	AG Killwangen	AG Möriken	BE Bern	BL Allschwil	BL Muttenz	BS Feldbergstr.	BS Klybeck	BS St. Johann
Benzol	0.50	0.55	0.68	0.49	0.46	1.03	0.53	0.48
Ethylbenzol	0.37	0.27	0.35	0.31	0.24	0.80	0.37	0.30
Toluol	1.44	1.82	2.63	1.66	1.57	5.07	3.59	2.04
o-Xylol	0.40	0.31	0.44	0.38	0.29	1.08	0.47	0.38
m/p-Xylol	1.29	0.91	1.28	0.95	0.72	2.75	1.14	0.92
Styrol	0.10	-	0.00	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
n-Propylbenzol	0.05	0.05	0.06	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Isopropylbenzol (Cumol)	0.00	0.00	0.01	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
o-Ethyltoluol	0.06	0.06	0.07	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
m/p-Ethyltoluol	0.20	0.19	0.26	0.17	0.10	0.62	0.21	0.17
Mesitylen (1,3,5-Trimethylbenzol)	0.07	0.07	0.10	0.08	0.05	0.28	0.09	0.07
Pseudocumol (1,2,4-Trimethylbenzol)	0.25	0.23	0.32	0.36	0.24	1.06	0.42	0.35
Hemellitol (1,2,3-Trimethylbenzol)	0.07	0.05	0.07	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
n-Heptan	0.18	0.25	0.31	0.23	0.20	0.70	0.49	0.26
n-Octan	0.06	0.06	0.08	0.05	0.05	0.13	0.28	0.07
Isooctan (2,2,4-TMPentan)	0.40	0.48	1.70	0.42	0.33	1.08	0.53	0.37
n-Nonan	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.18	0.18	0.16
n-Decan	0.06	0.06	0.05	0.20	0.19	0.29	0.31	0.24
Undecan	0.17	0.17	0.76	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Dodecan	0.29	0.24	0.46	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Tridecan	0.06	0.03	0.08	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Cyclohexan	0.10	0.19	0.16	0.25	0.33	0.58	0.45	0.41
alpha-Pinen	0.18	0.17	0.15	0.23	0.31	0.17	0.18	0.14
beta-Pinen	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05
3-Caren	0.04	0.03	0.04	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05
Camphen	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Limonen	0.08	0.07	0.04	0.09	0.08	0.31	0.12	0.13
Chloroform	0.05	0.08	0.06	0.17	0.17	0.19	0.19	0.36
1,2-Dichlorethan	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1,1,1-Trichlorethan	-	-	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1,1,2-Trichlorethan	-	-	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1,1,2,2-Tetrachlorethan	-	-	-	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Tetrachlorkohlenstoff	0.39	0.39	0.41	0.35	0.36	0.35	0.35	0.36
Trichlorethen	-	0.02	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Tetrachlorethen (Per)	0.05	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Chlorbenzol	0.00	0.00	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1,2-Dichlorbenzol	-	-	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1,3-Dichlorbenzol	-	-	0.00	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
1,4-Dichlorbenzol	0.02	0.02	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabelle 3 VOC-Jahresmittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Fortsetzung)

	GR Chur	GR Rothenbrunnen	SG Blumenbergplatz	TG Kreuzlingen	UR Altdorf	VS Visp West	VS Visp Ost
Benzol	0.36	0.39	0.78	0.64	1.05	0.70	0.81
Ethylbenzol	0.18	0.27	0.44	0.53	0.64	0.37	0.26
Toluol	1.03	0.79	2.90	5.08	3.81	5.82	3.20
o-Xylol	0.19	0.28	0.54	0.61	0.83	0.42	0.29
m/p-Xylol	0.60	0.89	1.64	1.89	2.51	1.34	0.91
Styrol	0.00	-	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
n-Propylbenzol	0.03	0.02	0.08	0.06	0.13	0.03	0.02
Isopropylbenzol (Cumol)	0.00	-	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00
o-Ethyltoluol	0.03	0.02	0.09	0.07	0.16	0.04	0.03
m/p-Ethyltoluol	0.10	0.10	0.35	0.26	0.66	0.18	0.13
Mesitylen (1,3,5-Trimethylbenzol)	0.04	0.03	0.12	0.09	0.24	0.08	0.06
Pseudocumol (1,2,4-Trimethylbenzol)	0.13	0.14	0.40	0.32	0.77	0.22	0.16
Hemellitol (1,2,3-Trimethylbenzol)	0.02	0.02	0.09	0.08	0.16	0.05	0.03
n-Heptan	1.03	1.10	0.28	0.29	0.50	0.26	0.26
n-Octan	0.05	0.04	0.11	0.08	0.13	0.05	0.05
Isooctan (2,2,4-TMPentan)	0.73	0.76	1.15	0.60	2.51	2.58	1.64
n-Nonan	0.04	0.04	0.09	0.07	0.10	0.07	0.05
n-Decan	0.04	0.07	0.09	0.11	0.09	0.07	0.06
Undecan	0.30	0.31	0.15	0.31	0.63	0.10	0.27
Dodecan	0.31	0.39	0.12	0.41	0.48	0.16	0.19
Tridecan	0.03	0.09	0.05	0.06	0.07	0.03	0.03
Cyclohexan	0.14	0.14	0.20	0.15	0.22	0.06	0.19
alpha-Pinen	0.38	0.80	0.15	0.16	0.35	0.36	0.41
beta-Pinen	0.13	0.21	0.05	0.03	0.10	0.11	0.12
3-Caren	0.05	0.09	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03
Camphen	0.06	0.10	0.04	0.03	0.09	0.05	0.05
Limonen	0.09	0.07	0.10	0.08	0.14	0.05	0.04
Chloroform	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08
1,2-Dichlorethan	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.24	0.16
1,1,1-Trichlorethan	0.00	0.00	-	-	-	0.00	-
1,1,2-Trichlorethan	-	-	-	-	-	-	-
1,1,2,2-Tetrachlorethan	-	-	-	-	-	-	-
Tetrachlorkohlenstoff	0.42	0.43	0.42	0.44	0.40	0.40	0.40
Trichlorethen	-	-	-	-	-	0.01	-
Tetrachlorethen (Per)	0.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.05	0.04
Chlorbenzol	-	-	-	-	-	0.06	0.11
1,2-Dichlorbenzol	-	-	0.00	-	-	0.04	0.02
1,3-Dichlorbenzol	-	-	-	-	0.01	-	-
1,4-Dichlorbenzol	0.01	0.01	0.03	0.01	-	0.00	0.01

Tabelle 3 VOC-Jahresmittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Fortsetzung)

	VS Monthey Nord	VS Monthey Süd	ZH Bellevue	ZH Höri	ZH Kaserne	ZH Kloten	ZH Stampfenbachstr.
Benzol	0.42	0.45	1.00	0.50	0.64	0.69	0.74
Ethylbenzol	0.42	0.37	0.56	0.18	0.36	0.41	0.46
Toluol	3.17	2.85	3.35	1.04	2.41	2.44	3.27
o-Xylol	0.85	0.69	0.68	0.20	0.41	0.48	0.55
m/p-Xylol	1.48	1.28	2.06	0.55	1.24	1.46	1.67
Styrol	-	0.00	0.01	-	0.00	-	0.00
n-Propylbenzol	0.02	0.03	0.10	0.04	0.06	0.07	0.09
Isopropylbenzol (Cumol)	-	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02
o-Ethyltoluol	0.04	0.05	0.12	0.03	0.07	0.08	0.12
m/p-Ethyltoluol	0.17	0.16	0.49	0.12	0.24	0.26	0.44
Mesitylen (1,3,5-Trimethylbenzol)	0.06	0.06	0.17	0.03	0.08	0.09	0.16
Pseudocumol (1,2,4-Trimethylbenzol)	0.22	0.22	0.56	0.15	0.29	0.32	0.59
Hemellitol (1,2,3-Trimethylbenzol)	0.05	0.05	0.12	0.03	0.07	0.08	0.14
n-Heptan	0.31	0.25	0.38	0.18	0.32	0.34	0.33
n-Octan	0.06	0.06	0.13	0.06	0.09	0.14	0.13
Isooctan (2,2,4-TMPentan)	0.97	2.85	0.81	2.68	3.25	2.62	0.93
n-Nonan	0.06	0.06	0.10	0.04	0.08	0.12	0.12
n-Decan	0.09	0.08	0.11	0.03	0.09	0.11	0.12
Undecan	0.15	0.07	0.23	0.46	0.57	0.73	0.30
Dodecan	0.21	0.05	0.20	0.33	0.45	0.50	0.28
Tridecan	0.03	0.02	0.05	0.06	0.09	0.10	0.07
Cyclohexan	0.29	0.18	0.19	0.12	0.20	0.19	0.21
alpha-Pinen	0.17	0.29	0.12	0.62	0.12	0.22	0.16
beta-Pinen	0.04	0.05	0.04	0.12	0.03	0.06	0.04
3-Caren	0.03	0.05	0.03	0.09	0.02	0.05	0.03
Camphen	0.03	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02
Limonen	0.03	0.05	0.12	0.04	0.11	0.07	0.15
Chloroform	0.17	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07
1,2-Dichlorethan	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
1,1,1-Trichlorethan	-	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00
1,1,2-Trichlorethan	-	-	-	-	-	-	-
1,1,2,2-Tetrachlorethan	-	-	-	-	-	-	-
Tetrachlorkohlenstoff	0.39	0.39	0.44	0.44	0.46	0.45	0.43
Trichlorethen	0.02	0.01	0.00	-	0.00	0.00	0.00
Tetrachlorethen (Per)	0.19	0.17	0.08	0.09	0.12	0.09	0.10
Chlorbenzol	0.08	0.07	-	-	-	-	-
1,2-Dichlorbenzol	0.81	0.39	0.00	-	-	-	-
1,3-Dichlorbenzol	-	-	-	-	-	-	-
1,4-Dichlorbenzol	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	-	0.03

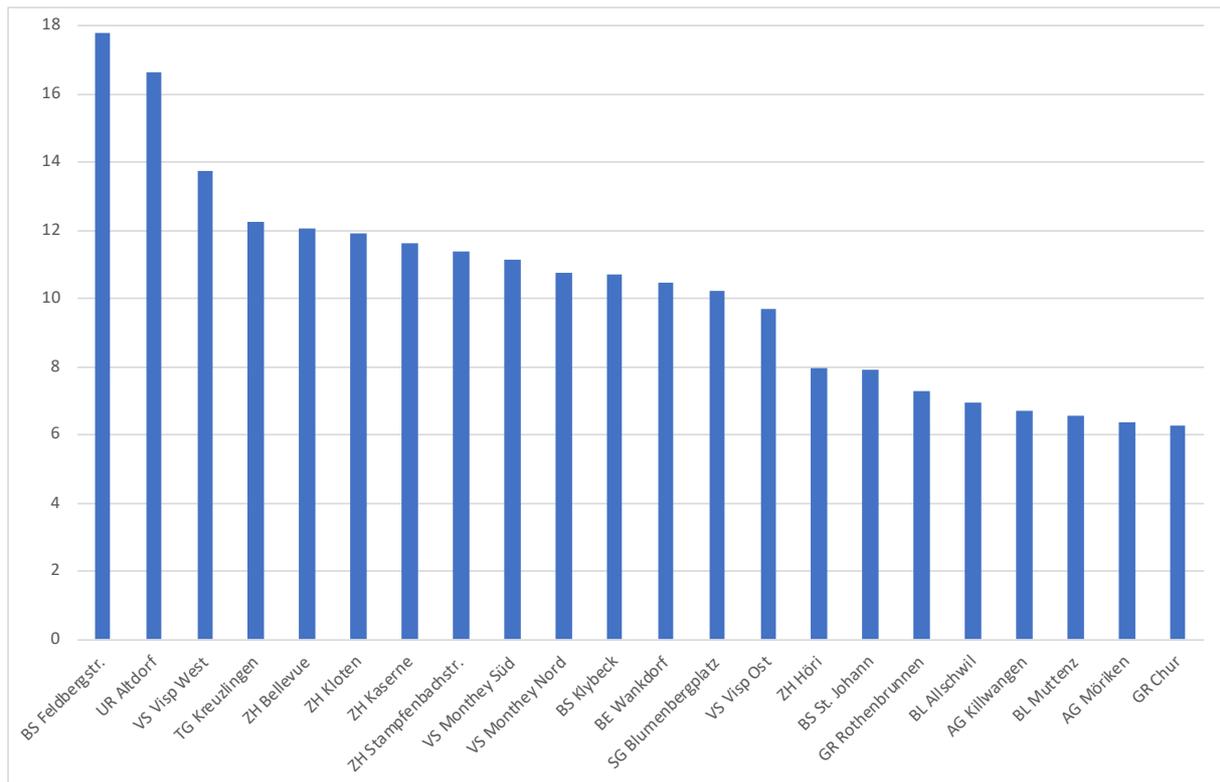


Abbildung 4 Jahresmittelwerte ΣVOC [µg/m³]

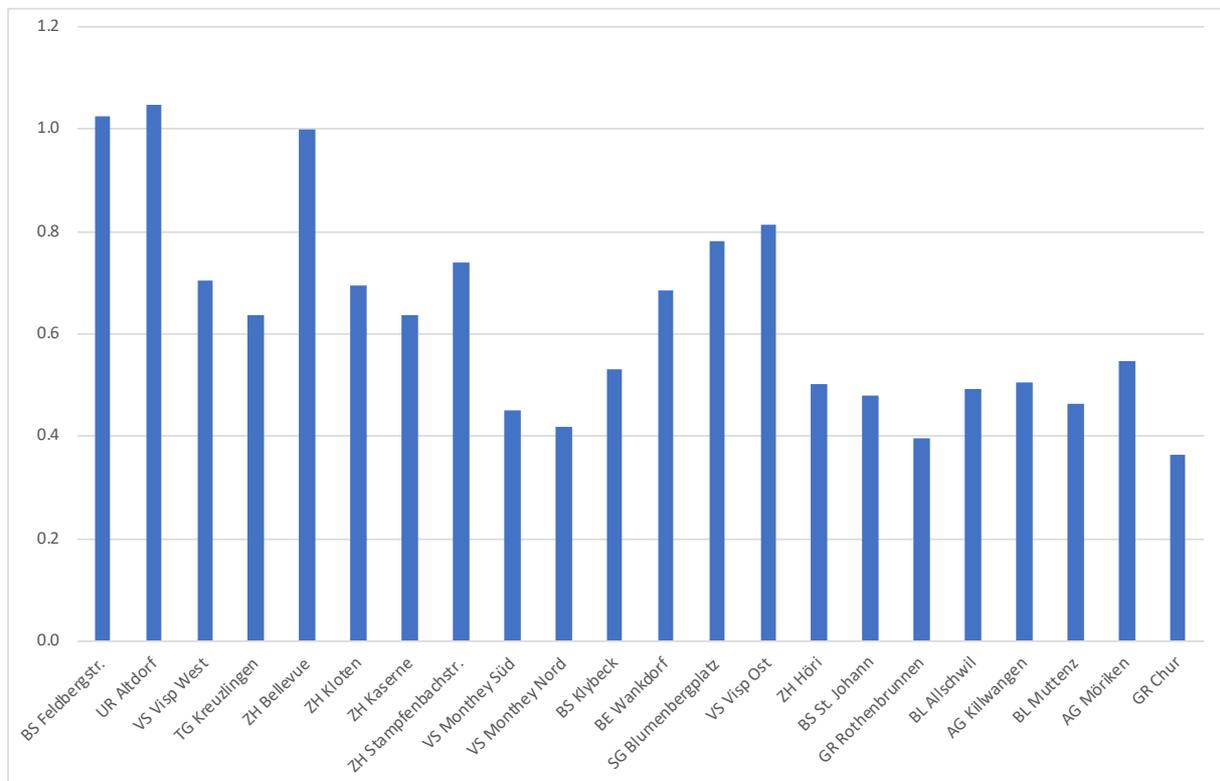


Abbildung 5 Jahresmittelwerte Benzol [µg/m³]

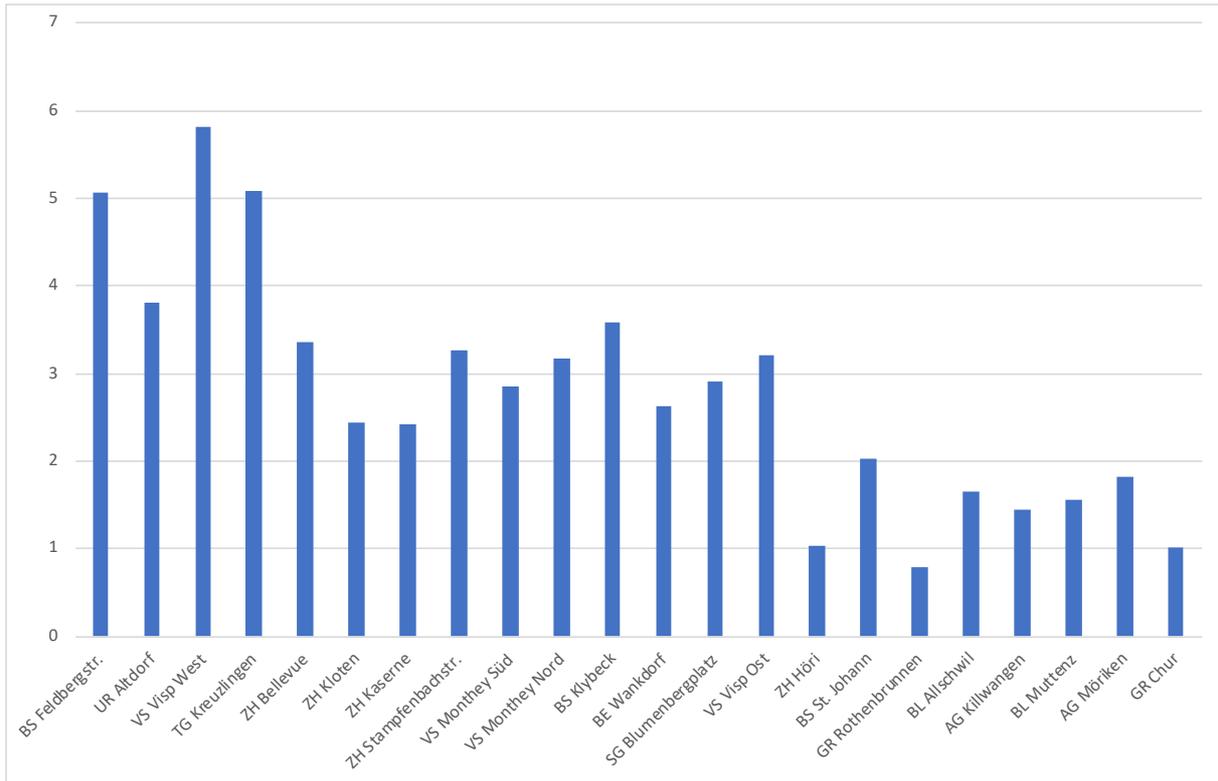


Abbildung 6 Jahresmittelwerte Toluol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

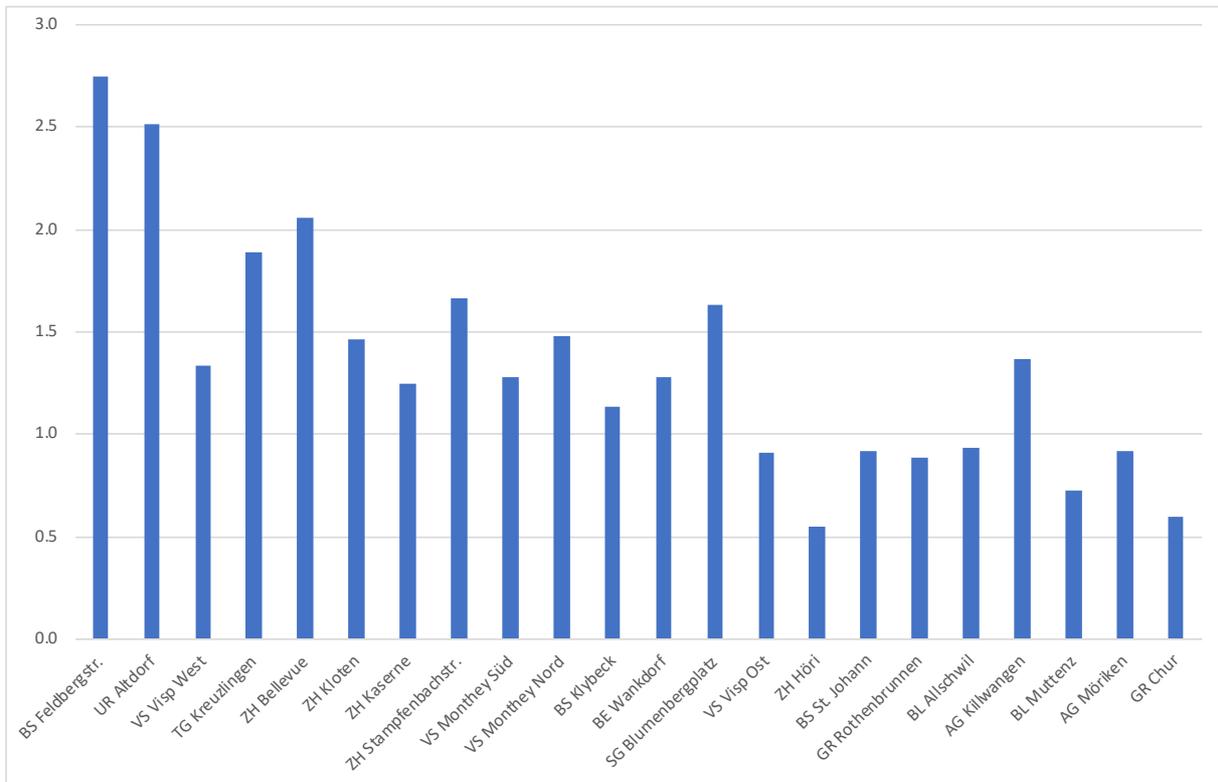


Abbildung 7 Jahresmittelwerte m/p-Xylol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

3.2 Saisonale Schwankungen

In den Abbildungen 8 bis 10 sind die Jahrgänge der Σ VOC aller Standorte dargestellt. Die angegebenen Messdaten entsprechen dabei der durchschnittlichen Probenahmedauer. Die effektiven Expositionszeiten an den einzelnen Standorten können davon leicht abweichen (siehe Anhang). Zur besseren Vergleichbarkeit der Jahrgänge sind die einzelnen Messwerte durch den jeweiligen Jahresmittelwert dividiert.

Die Messwerte der stärker belasteten Standorte, die in Abbildung 8 dargestellt sind, schwanken das ganze Jahr um den Mittelwert. Ein Jahrgang ist nicht erkennbar.

Die mittelstark belasteten Standorte in Abbildung 9 zeigen teilweise sehr starke Schwankungen. Ein Jahrgang ist auch hier kaum erkennbar.

Bei den schwächer belasteten Standorten ist ein leichter Jahrgang mit tieferer Belastung im Frühling und Sommer erkennbar (siehe Abbildung 10).

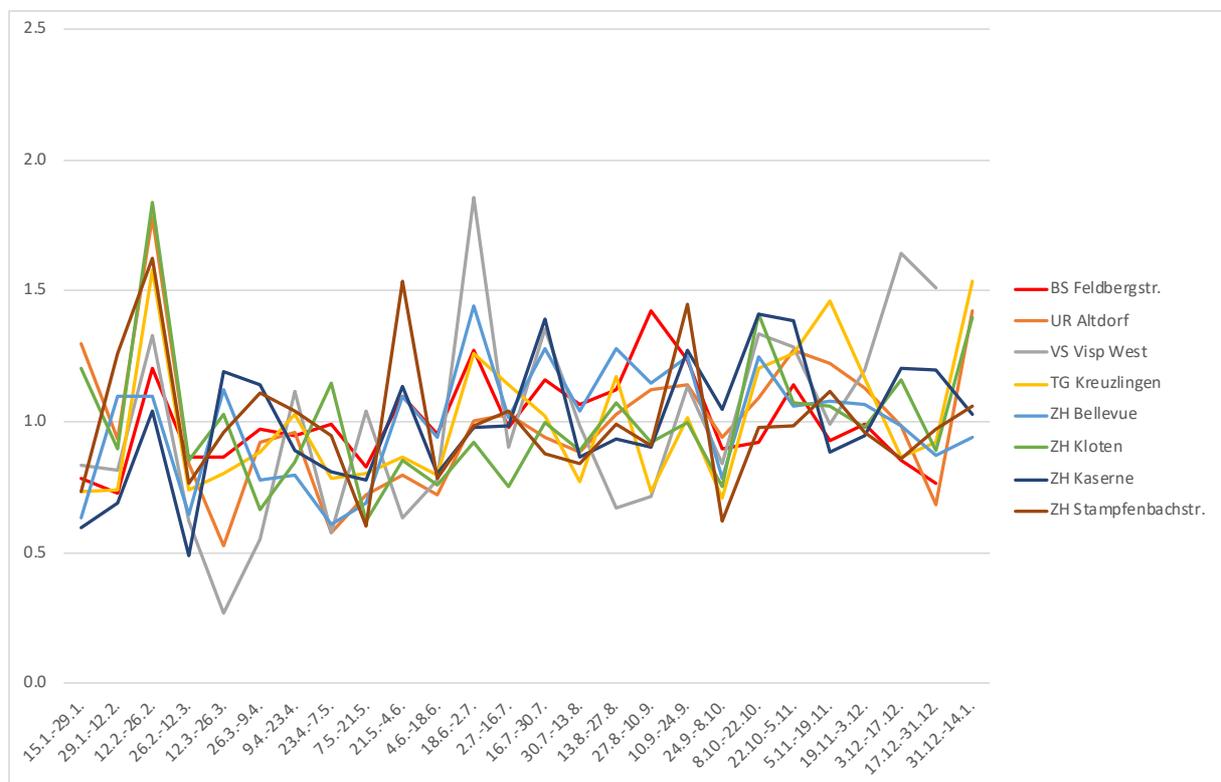


Abbildung 8 Jahrgang 2019 der Σ VOC normiert mit dem Jahresmittelwert

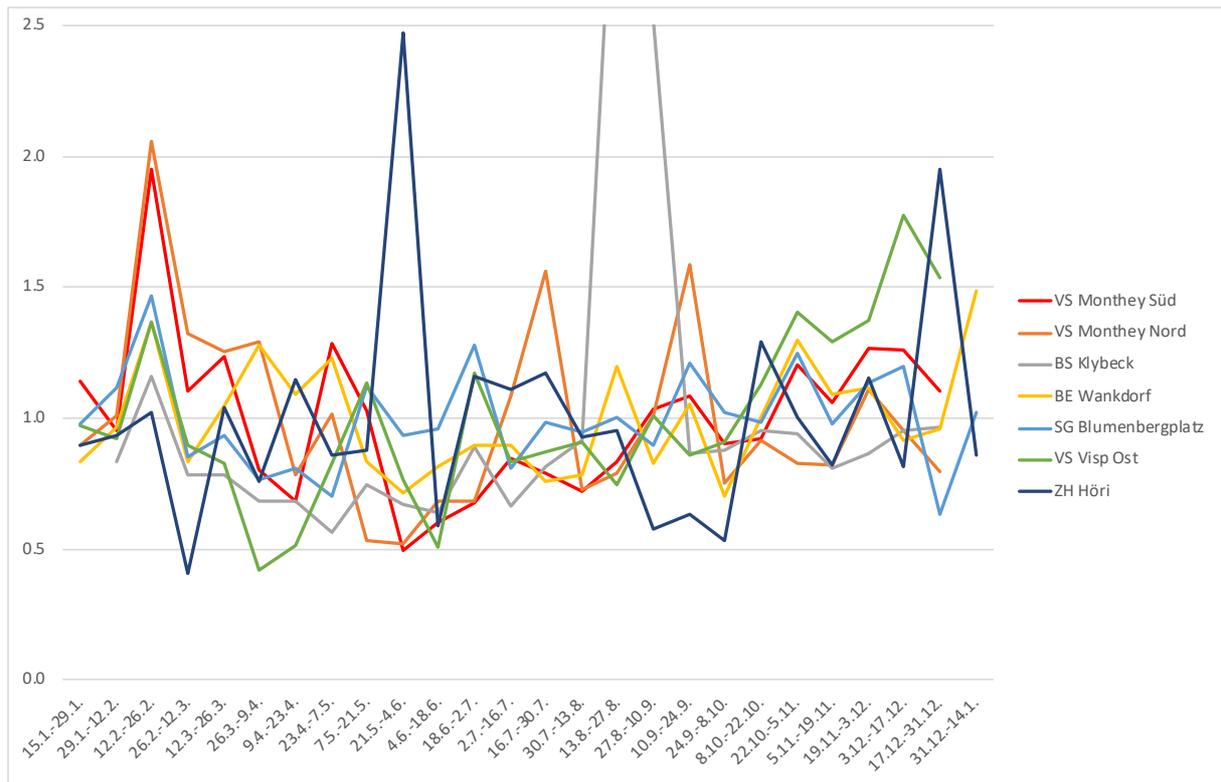


Abbildung 9 Jahrgang 2019 der Σ VOC normiert mit dem Jahresmittelwert

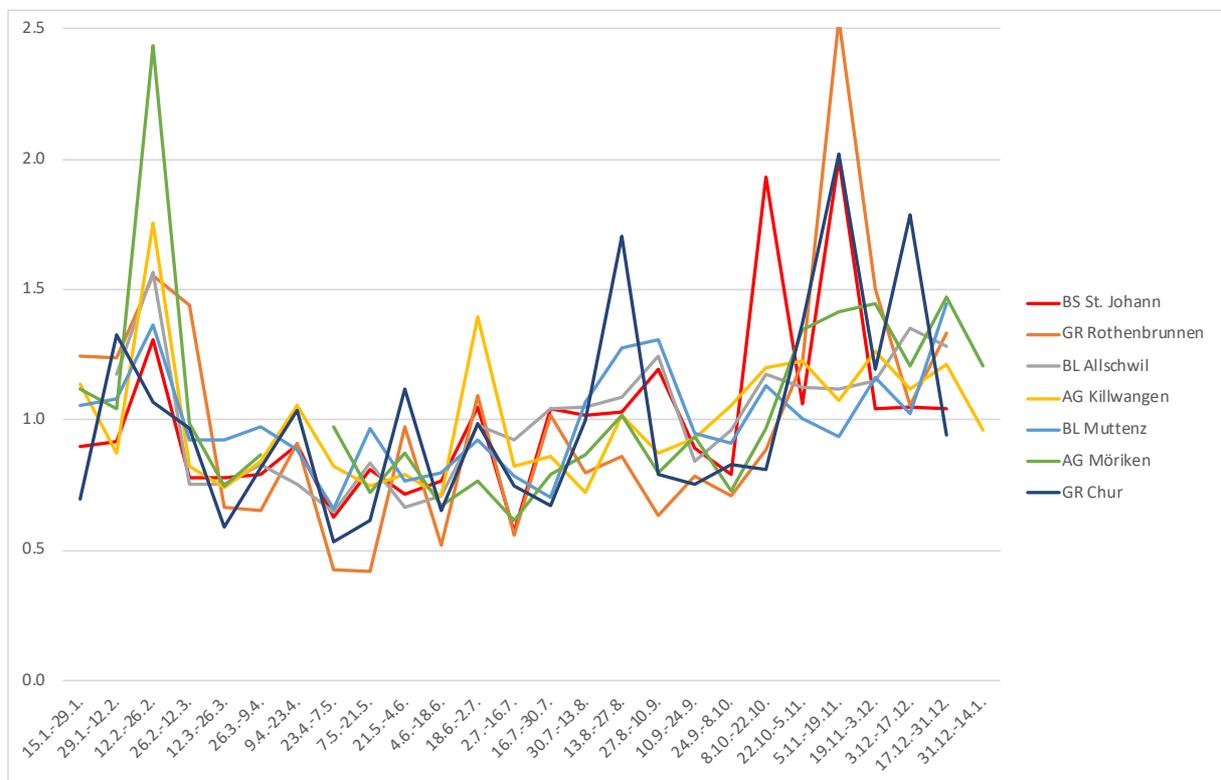


Abbildung 10 Jahrgang 2019 der Σ VOC normiert mit dem Jahresmittelwert

In den Abbildungen 11 bis 13 sind die Benzol-Ergebnisse aller 22 Standorte dargestellt. Die beiden städtischen, Verkehrs-nahen Standorte Basel Feldbergstrasse und Zürich Bellevue zeigen einen leichten, alle übrigen einen deutlichen Jahresgang mit geringeren Benzol-Werten im Sommerhalbjahr.

Tabelle 4 Verhältnis Benzol-Mittelwerte Sommer (Mai - Oktober) / Winter (November - April)

	Sommer/Winter
ZH Bellevue	0.86
BS Feldbergstrasse	0.84
SG Blumenbergplatz	0.68
UR Altdorf	0.65
ZH Stampfenbachstr.	0.62
GR Chur	0.56
ZH Kaserne	0.55
BS St. Johann	0.54
BL Muttenz	0.54
VS Visp Ost	0.54
BS Klybeck	0.52
BE Wankdorf	0.51
ZH Höri	0.50
ZH Kloten	0.49
GR Rothenbrunnen	0.47
VS Monthey Nord	0.47
AG Killwangen	0.45
AG Möriken	0.42
TG Kreuzlingen	0.42
VS Visp West	0.41
BL Allschwil	0.41
VS Monthey Süd	0.40

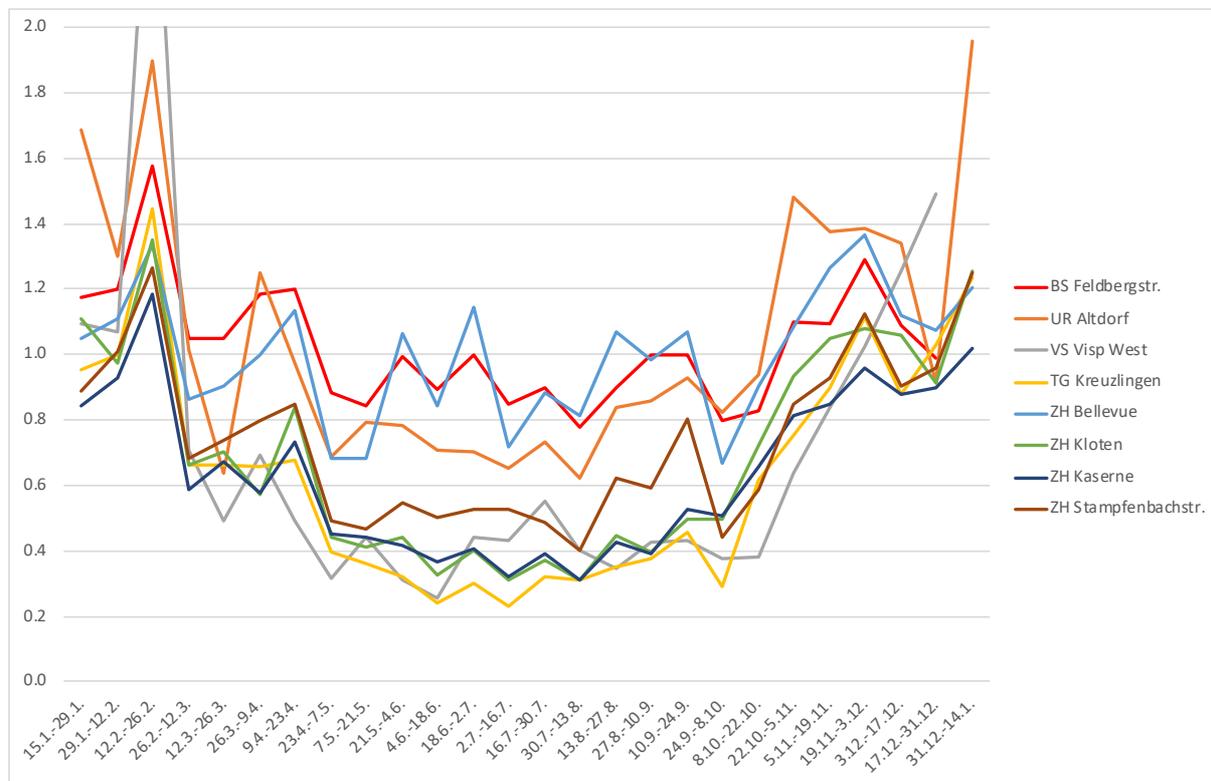


Abbildung 11 Benzol-Jahresgang 2019 [µg/m³]

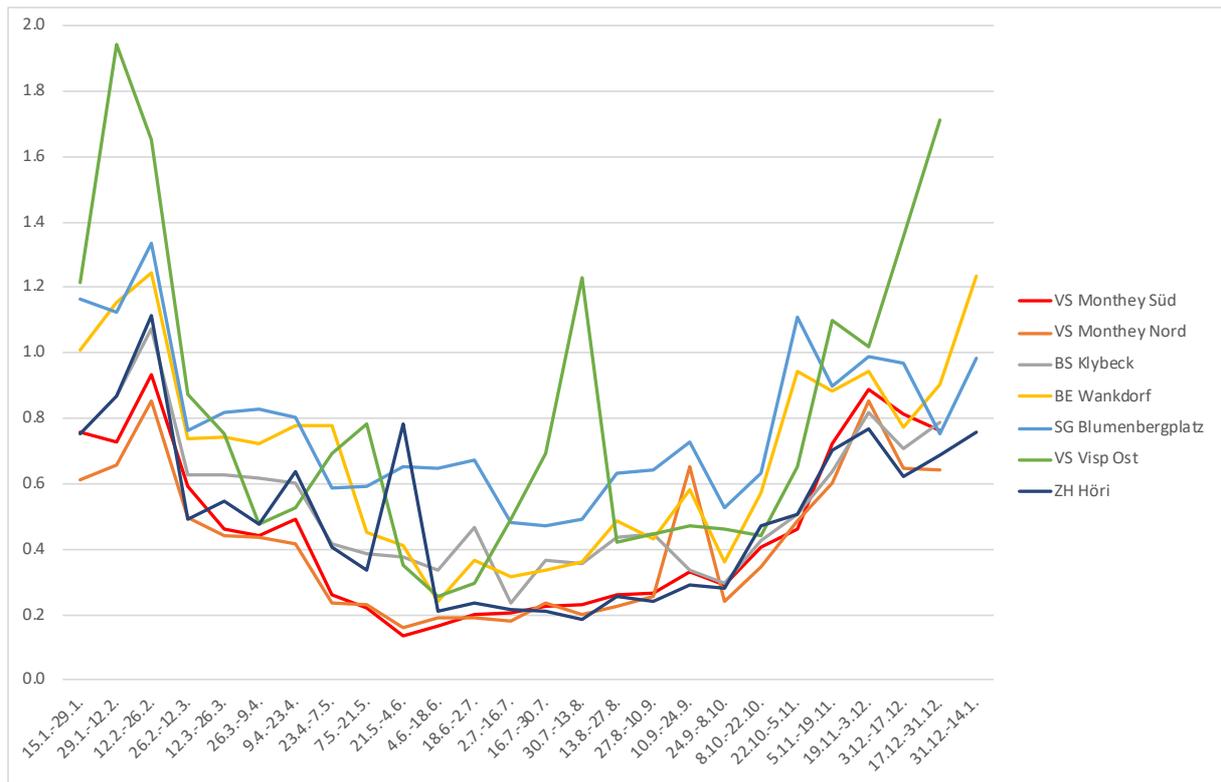


Abbildung 12 Benzol-Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

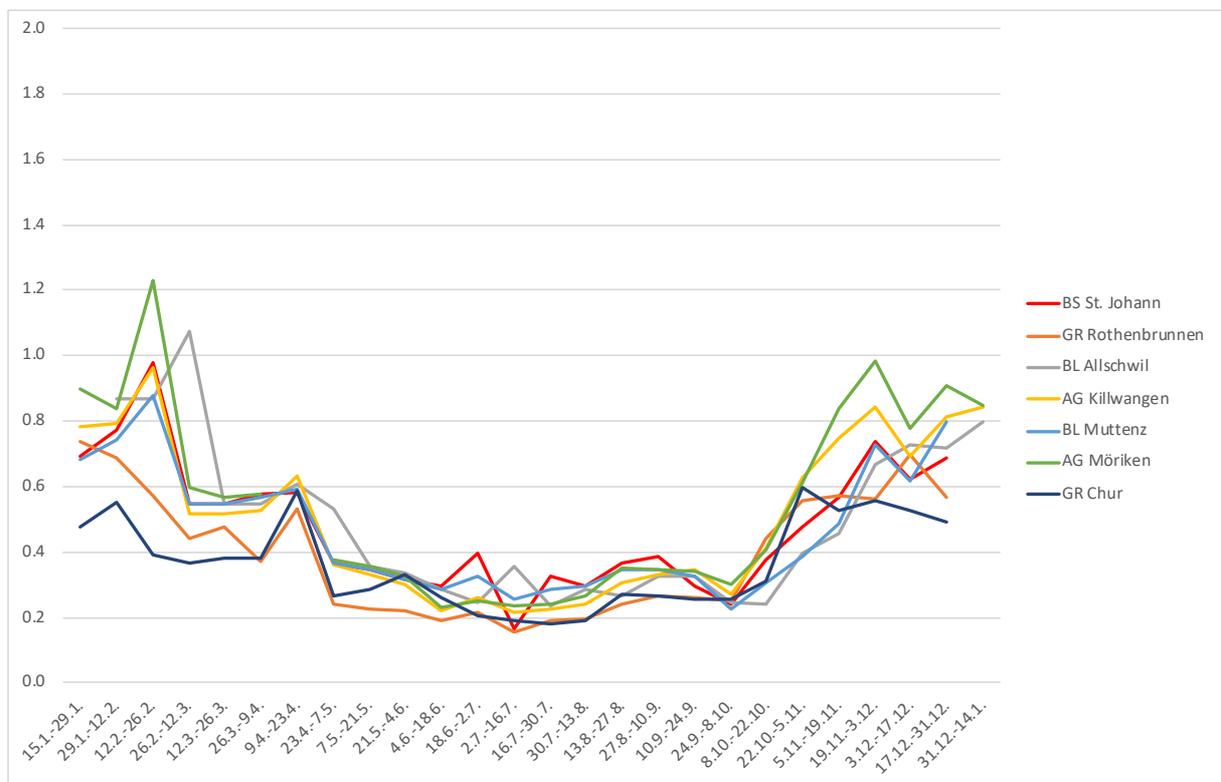


Abbildung 13 Benzol-Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Die Abbildungen 14 bis 16 zeigen die Toluol-Resultate. Anders als für Benzol ist beim Toluol kaum ein Jahresgang erkennbar. Die Resultate der einzelnen Messperioden schwanken an den meisten Messstellen stark. Die höchsten Einzelwerte wurden in Basel Klybeck - einem sonst nicht sehr stark belasteten Standort - im August, Anfang September gemessen (siehe Abbildung 15). Die Strassen-nahen Messstellen Basel Feldbergstrasse, Kreuzlingen und Zürich Bellevue aber auch Visp West zeigen Ende Juni die höchsten Toluol-Belastungen.

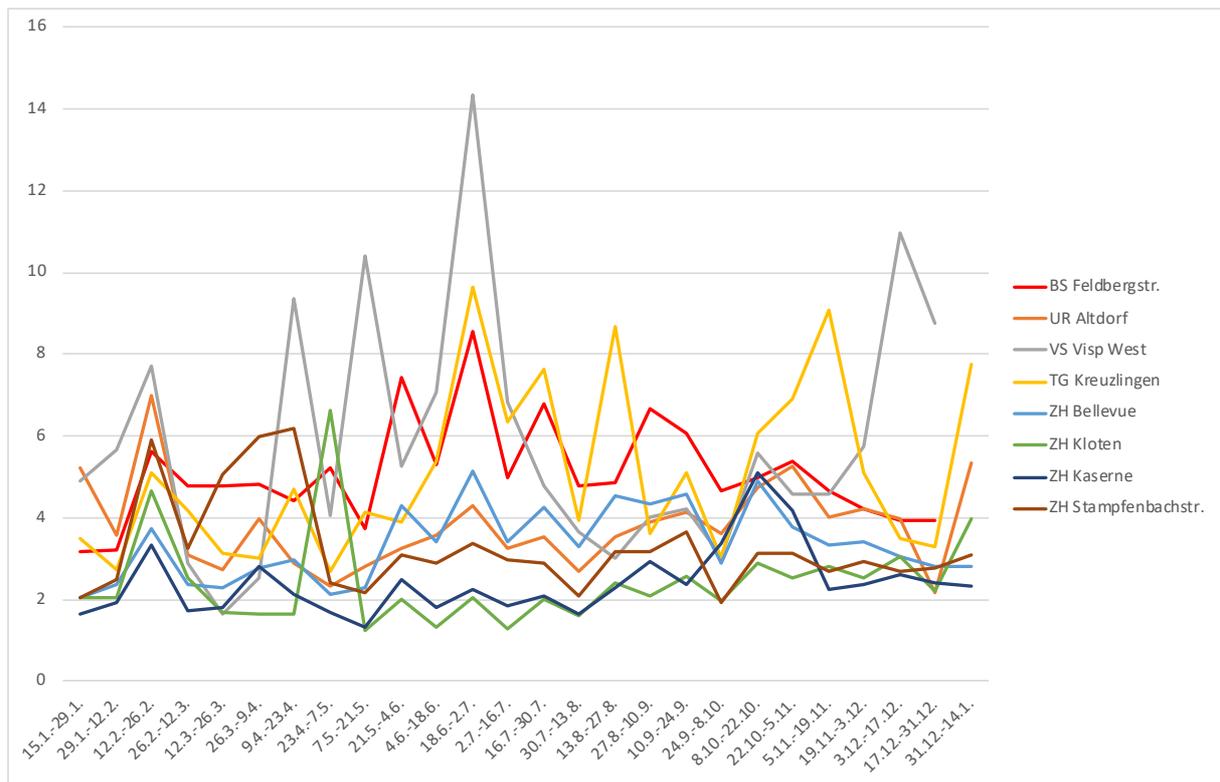


Abbildung 14 Toluol-Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

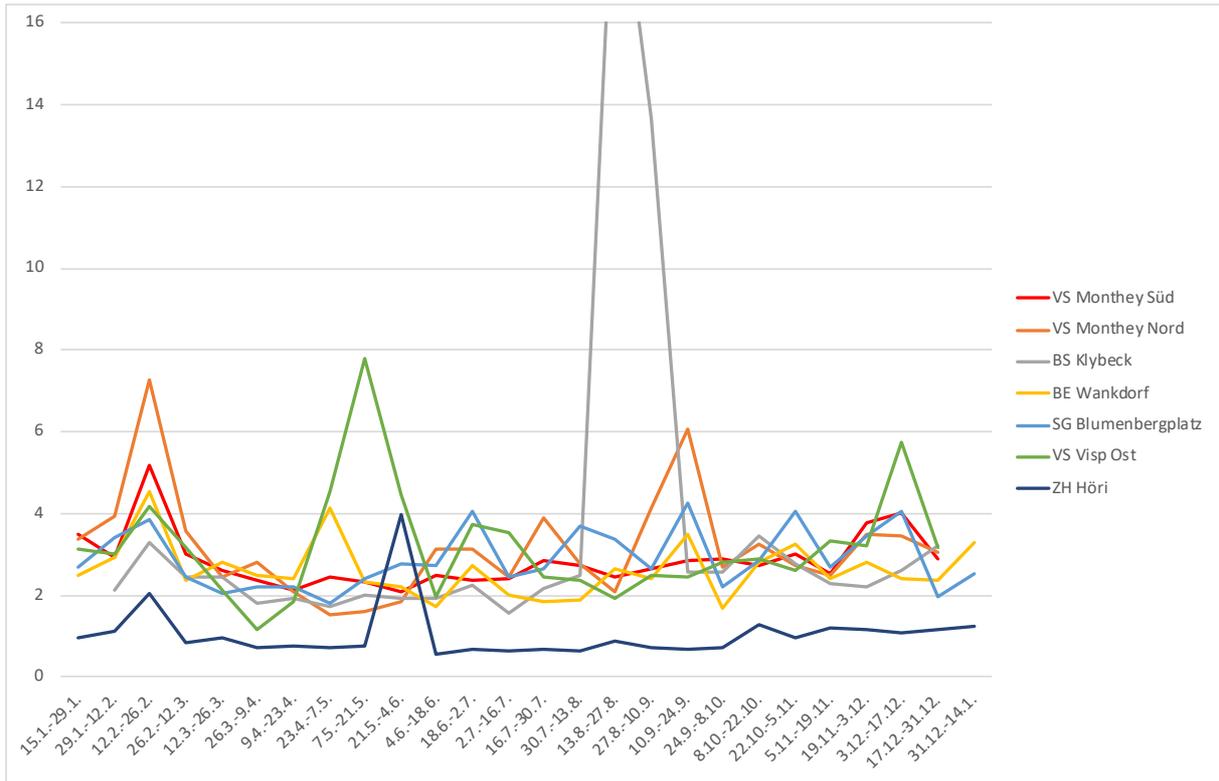


Abbildung 15 Toluol-Jahresgang 2019 [µg/m³]

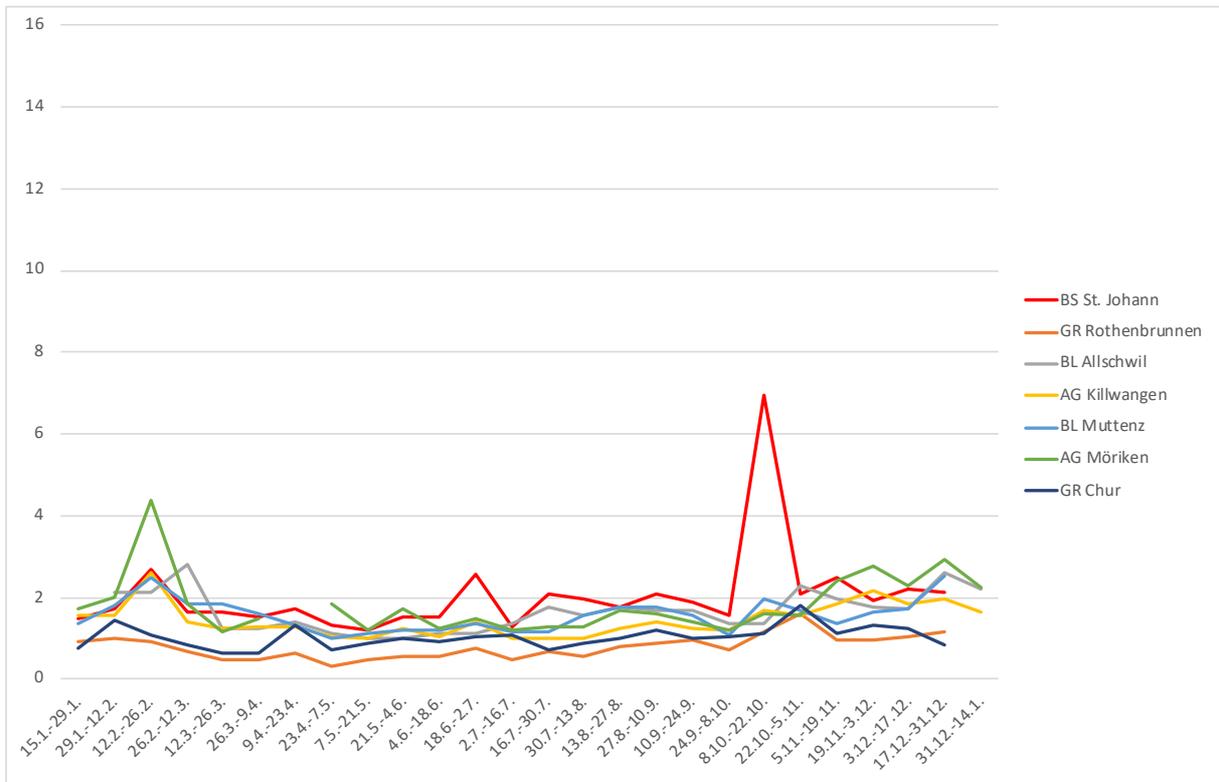


Abbildung 16 Toluol-Jahresgang 2019 [µg/m³]

3.3 Minima und Maxima

In Tabelle 5 sind die Minimal- und Maximalwerte für Σ VOC, Benzol und Toluol aller Standorte zusammen mit den Jahresmittelwerten aufgelistet.

Grössere Unterschiede zwischen Minima- und Maxima-Werten werden bei Benzol in Visp West und Visp Ost festgestellt, aber auch in Altdorf und Kreuzlingen.

Die Toluolwerte zeigen ebenfalls an Visp West und Visp Ost sowie in Kreuzlingen und Zürich Bellevue grosse Belastungsunterschiede. Die Toluolwerte des Standortes Klybeck weisen die grössten Schwankungen auf, was auf zwei Spitzenwerte Ende August / Anfang September zurückzuführen ist.

Wird die Summe der VOC betrachtet, sind die grössten Schwankungen bei Visp West und Altdorf zu verzeichnen.

Wie auch in den Vorjahren sind die grössten Schwankungen an Industrie-beeinflussten Standorten sichtbar.

Tabelle 5 Mittelwerte, Minima und Maxima

	Σ VOC			Benzol			Toluol		
	Mittel	Minima	Maxima	Mittel	Minima	Maxima	Mittel	Minima	Maxima
BS Feldbergstr.	17.10	12.92	25.38	0.99	0.78	1.58	4.88	3.18	8.57
UR Altdorf	16.65	8.82	29.68	1.05	0.62	1.96	3.81	2.16	6.99
VS Visp West	13.22	3.70	25.52	0.68	0.26	2.72	5.60	1.66	14.35
TG Kreuzlingen	12.25	8.66	19.38	0.64	0.23	1.45	5.08	2.69	9.63
ZH Bellevue	12.04	7.30	17.39	1.00	0.67	1.37	5.08	2.69	9.63
ZH Kloten	11.93	7.38	21.97	0.69	0.31	1.35	2.44	1.22	6.61
ZH Kaserne	11.61	5.71	16.41	0.64	0.31	1.18	2.41	1.33	5.12
ZH Stampfenbachstr.	11.40	6.87	18.51	0.74	0.40	1.26	3.27	1.91	6.17
VS Monthey Süd	10.69	5.49	21.71	0.43	0.14	0.93	2.74	2.07	5.20
VS Monthey Nord	10.33	5.61	22.12	0.40	0.16	0.85	3.04	1.51	7.25
BS Klybeck	9.90	6.07	36.38	0.49	0.24	1.08	3.31	1.57	20.67
BE Wankdorf	10.48	7.36	15.60	0.68	0.24	1.25	2.63	1.68	4.52
SG Blumenbergplatz	10.24	6.52	15.04	0.78	0.47	1.34	2.90	1.81	4.27
VS Visp Ost	9.32	4.04	17.23	0.78	0.25	1.94	3.08	1.14	7.79
ZH Höri	7.96	3.25	19.70	0.50	0.19	1.11	1.04	0.55	3.99
BS St. Johann	7.63	4.54	15.87	0.46	0.17	0.98	1.96	1.22	6.97
GR Rothenbrunnen	7.03	3.05	18.53	0.38	0.16	0.74	0.76	0.30	1.60
BL Allschwil	6.40	4.49	10.87	0.47	0.24	1.08	1.59	1.01	2.80
AG Killwangen	6.70	4.73	11.76	0.50	0.22	0.97	1.44	1.01	2.62
BL Muttenz	6.31	4.32	9.48	0.45	0.23	0.88	1.51	1.01	2.52
AG Möriken	6.40	0.00	15.58	0.53	0.23	1.23	1.75	1.15	4.39
GR Chur	6.03	3.31	12.66	0.35	0.18	0.60	0.99	0.64	1.79

3.4 Monoterpene

Ab 1996 wurden bei den schweizerischen VOC-Immissionsmesskampagnen neben Aromaten, Aliphaten und chlorierten Verbindungen auch die Monoterpene alpha- und beta-Pinen, Camphen, 3-Caren und Limonen bestimmt. Zu Beginn lagen die meisten Messwerte unter der damaligen Vertrauensgrenze von $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und nur an Standorten in der Nähe von Wald oder Holzverarbeitender Industrie (Spanplattenwerk, Holz Trocknungs-Anlage) wurden ganzjährig Konzentrationen über dieser Grenze erreicht. Mit der Senkung der Vertrauensgrenze auf 0.02 bis $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde eine Betrachtung dieser Stoffgruppe interessanter.

Monoterpene sind natürlichen Ursprungs, werden jedoch auch als Lösungsmittel resp. Duftstoffe in Haushalts- und Gewerbeprodukten eingesetzt. Dabei kommt Limonen gegenüber den anderen Monoterpenen vermehrt zum Einsatz.

Die alpha-Pinen Anteile an der Summe aller gemessenen Monoterpene liegen zwischen 27 und 68% (Feldbergstrasse resp. Höri), die beta-Pinen-Anteile zwischen 8 und 19%, die 3-Caren-Anteile zwischen 4 und 16%, die Camphen-Anteile zwischen 5 und 15% und die Limonen-Anteile zwischen 4 und 48% (Höri resp. Feldbergstrasse).

Das Verhältnis von alpha-Pinen¹ zu Limonen (Tabelle 6) zeigt sich, wie auch in den Vorjahren, als guter Indikator für eine Charakterisierung der Standortumgebung. Städtische Standorte haben ein Verhältnis unter 1.5 und ländliche über 3. Dazwischen liegen industrielle Zonen und städtischer Hintergrund.

Das Verhältnis alpha-Pinen zu Limonen ist an allen Standorten vergleichbar zu dem der Messkampagne 2014, nur der Standort Rothenbrunnen zeigt ein höheres Verhältnis, welches von 7.4 auf 11.5 angestiegen ist.

Die Jahresgänge von Limonen an allen Standorten sind in Abbildung 17, 18 und 19 dargestellt. An den meisten Standorten ist ein erhöhter Wert zu Beginn des Jahres (Februar) sichtbar, der abfällt und in den wärmeren Jahreszeiten vorübergehend ansteigt. Die Basler Feldbergstrasse zeigt den höchsten Jahresverlauf mit einem Jahresmittel von $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

In den Abbildungen 20, 21 und 22 sind die alpha-Pinen Jahresgänge aller Standorte dargestellt.

Die höchsten alpha-Pinen Jahresmittel weisen die ländlich geprägten Standorte Rothenbrunnen ($0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Höri ($0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$) auf. Alpha-Pinen ist an den Standorten Rothenbrunnen und Höri der gemessene Stoff mit dem höchsten Niveau im Jahresverlauf. Bei beta-Pinen sind Rothenbrunnen ($0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Chur an der Spitze. Für Camphen wurden die höchsten Jahresmittelwerte in Rothenbrunnen ($0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Altdorf, Chur und Muttenz, bei 3-Caren in Höri ($0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Rothenbrunnen ($0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gemessen, jedoch auf tiefem Niveau.

Tendenziell ist ein alpha-Pinen Anstieg in den wärmeren Monaten ersichtlich, mit einem Abfall ab Oktober. Sehr ausgeprägt ist dieser Jahresgang bei den ländlichen Standorten wie Höri, Rothenbrunnen und Chur, wie auch in Altdorf (Agglomeration strassennah) und Visp West (geringer Verkehr) zu erkennen. Auch städtische und industrielle Standorte zeigen diese Tendenz, jedoch auf tieferem Niveau und mit weniger steilem Anstieg in den wärmeren Monaten.

¹ Auch das Verhältnis aller Monoterpene zu Limonen zeigte dasselbe Ergebnis der Standortumgebungs-Charakterisierung.

Tabelle 6 Verhältnis alpha-Pinen zu Limonen

BS Feldbergstr.	0.56
ZH Bellevue	0.99
St.Johann	1.02
ZH Stampfenbachstr.	1.04
ZH Kaserne	1.14
BS Klybeck	1.52
SG Blumenbergplatz	1.59
TG Kreuzlingen	1.96
AG Killwangen	2.25
BL Allschwil	2.41
UR Altdorf	2.57
AG Möriken	2.60
ZH Kloten	3.01
BE Wankdorf	3.65
BL Muttenz	3.69
GR Chur RhB	4.31
VS Monthey Nord	5.07
VS Monthey Süd	6.07
VS Visp West	7.85
VS Visp Ost	10.49
GR Rothenbrunnen	11.52
ZH Höri	16.31

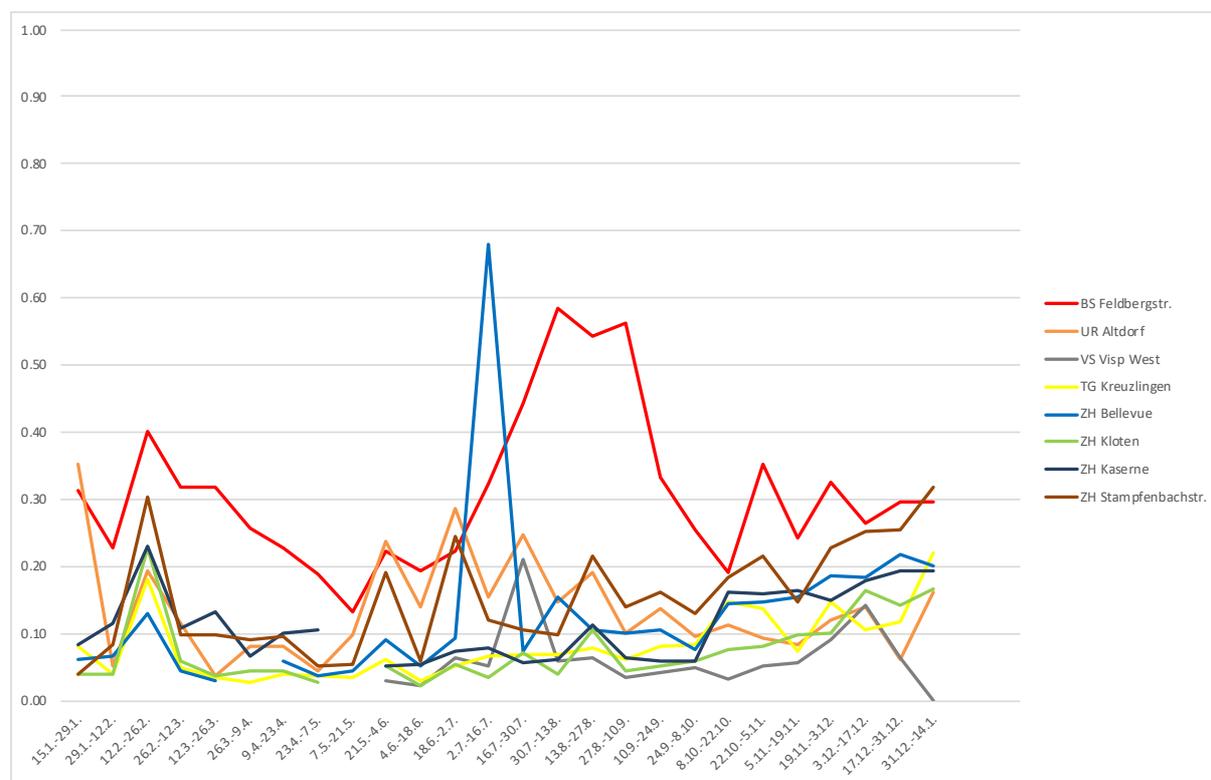


Abbildung 17 Limonen Jahrgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

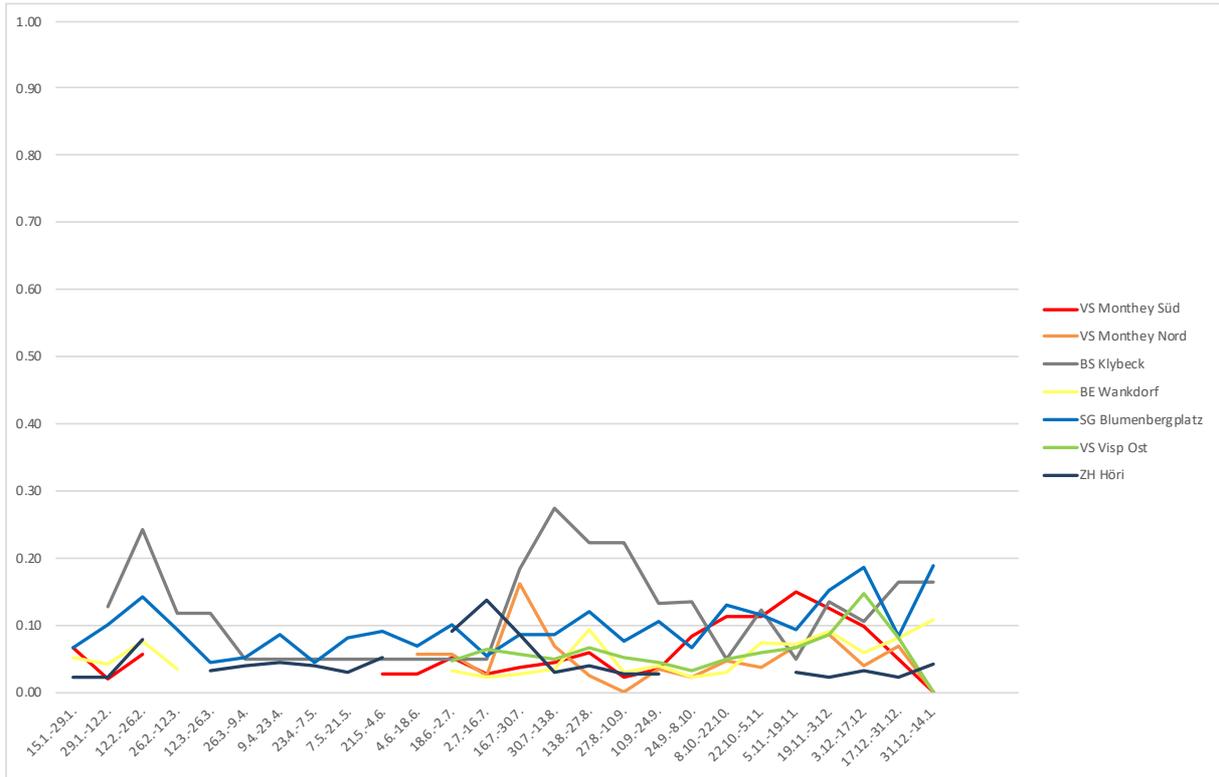


Abbildung 18 Limonen Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

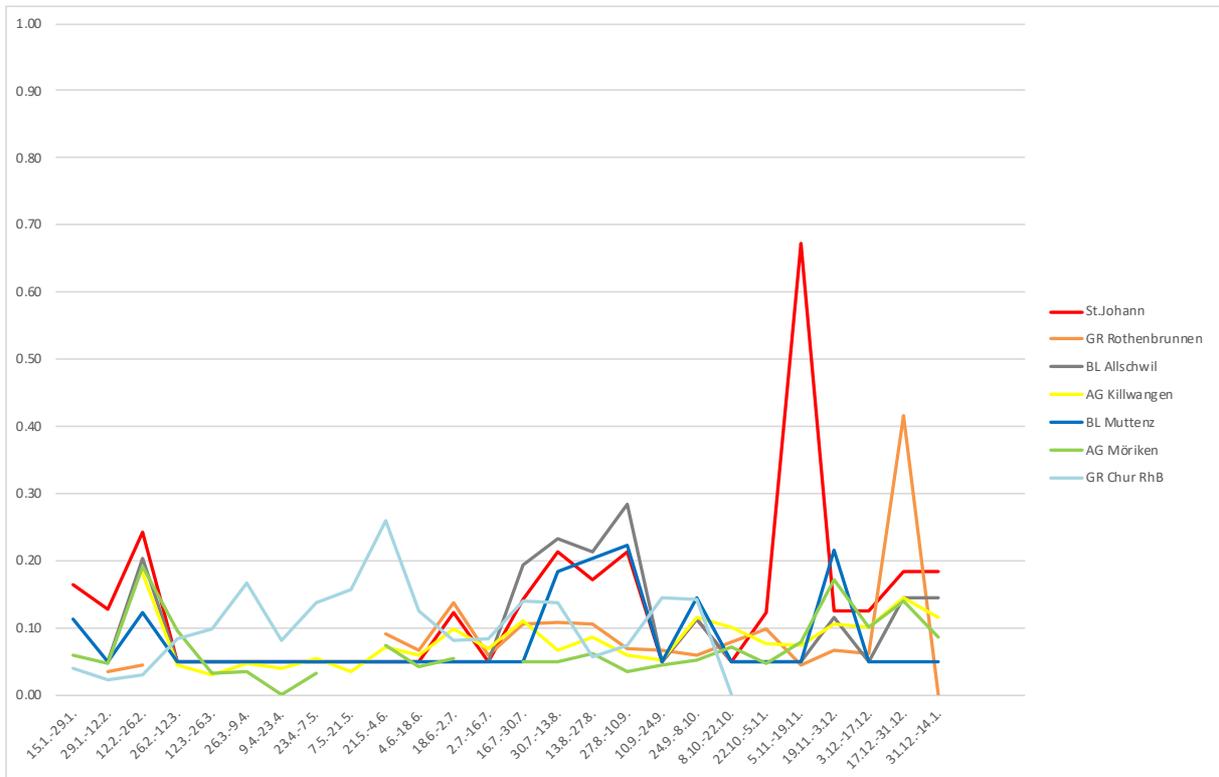


Abbildung 19 Limonen Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

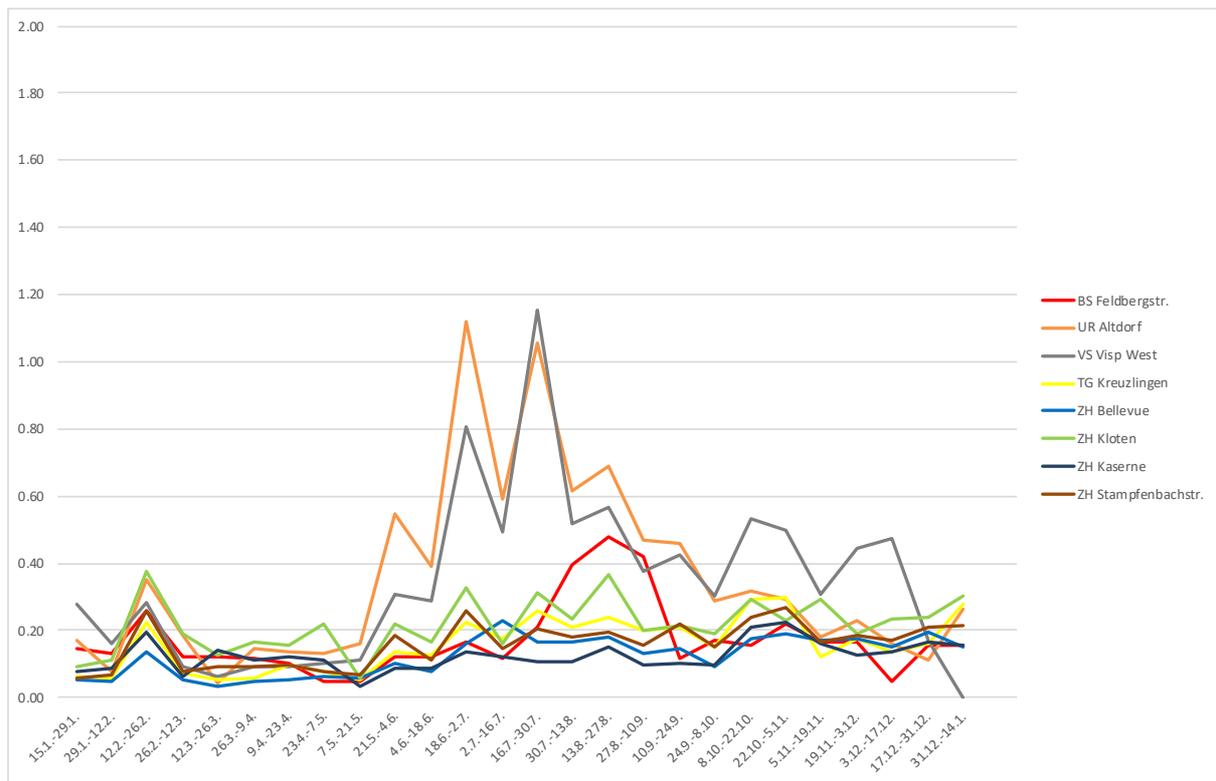


Abbildung 20 alpha-Pinen Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

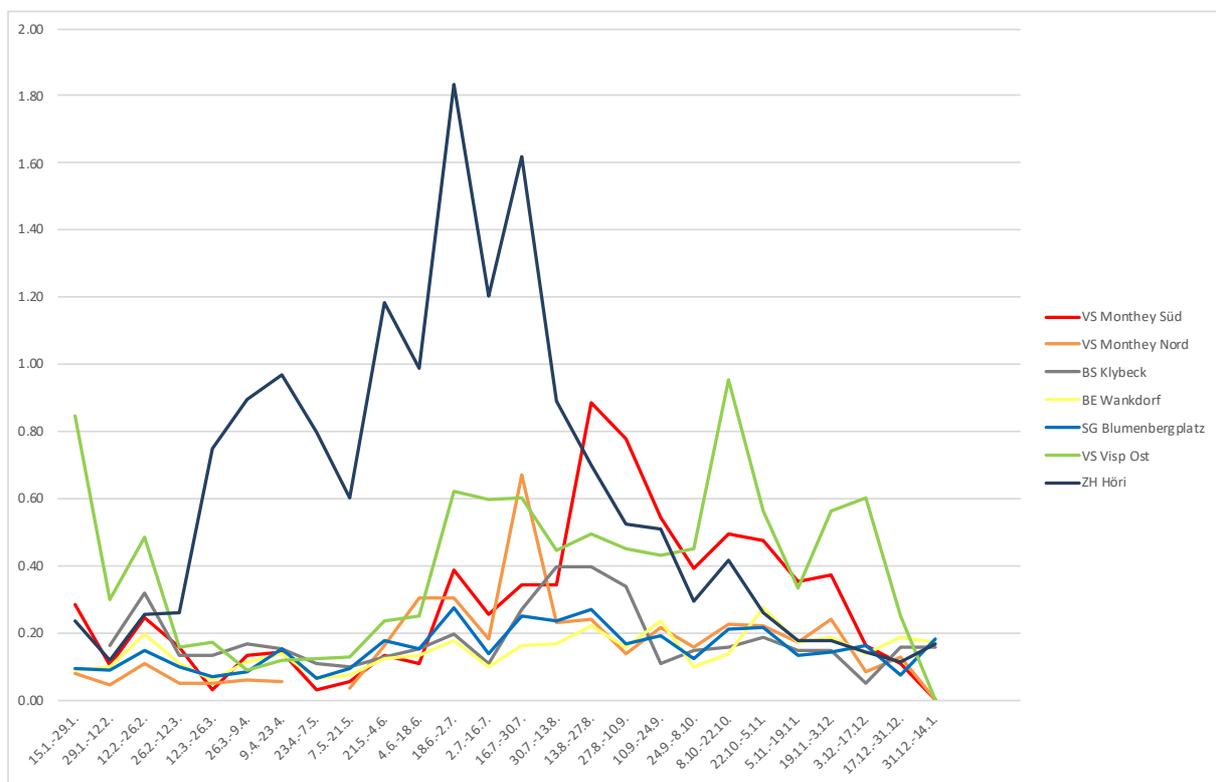


Abbildung 21 alpha-Pinen Jahresgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

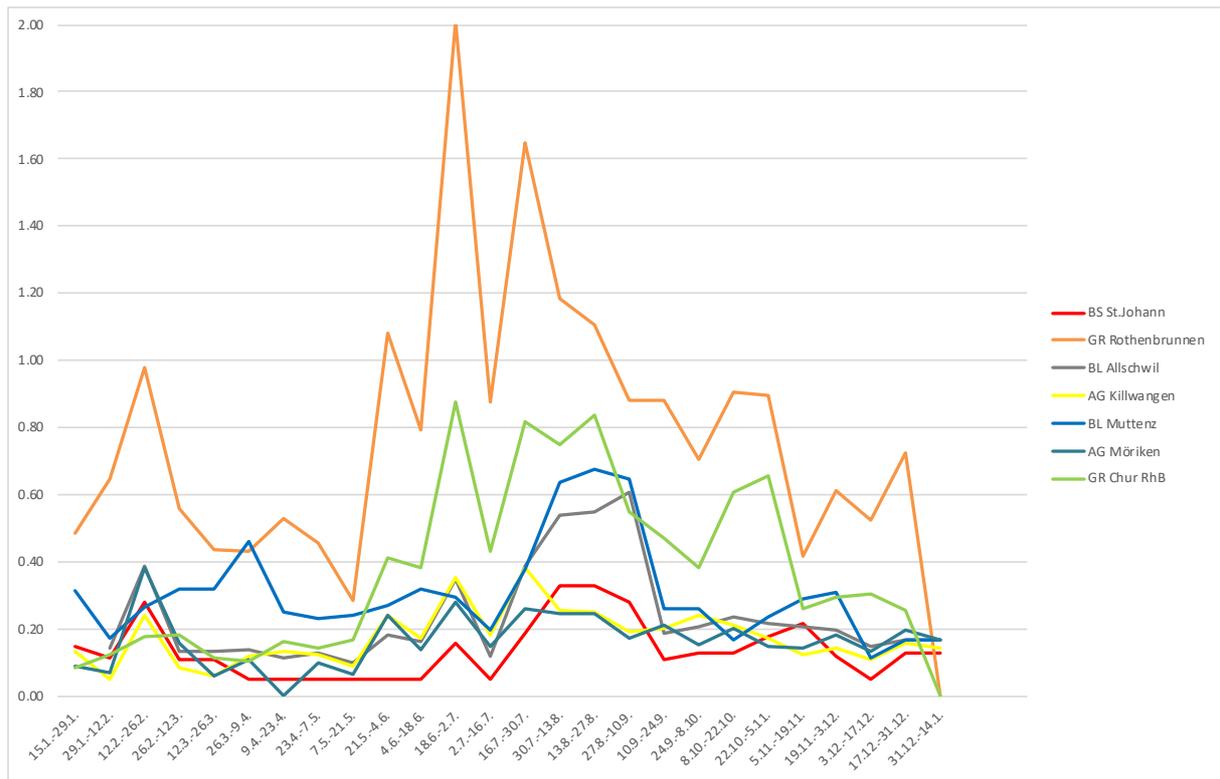


Abbildung 22 alpha-Pinen Jahrgang 2019 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

3.5 Verhältnis Toluol / Benzol

Die aus den Einzelwerten gebildeten Jahresmittel des Toluol/Benzol-Verhältnisses sowie die Minima und Maxima sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Aus früheren Kampagnen ist bekannt, dass dieses Verhältnis im Siedlungsgebiet normalerweise zwischen 3 und 5 liegt, in Industrie- und Gewerbegebieten höher und in ländlichen Gegenden tiefer. 2019 zeigen Kreuzlingen, Visp West, Monthey Nord und Süd sowie Basel Klybeck Werte grösser 7. In Rothenbrunnen und Höri liegt das Verhältnis durchschnittlich knapp über 2. An diesen ländlichen Orten werden die Immissionen durch stark gealterte Luftmassen geprägt, in welchen das reaktivere Toluol bereits stärker abgebaut ist. Bei allen anderen Stationen liegt das Jahresmittel zwischen 3.1 und 5.1.

Die fünf erwähnten Industrie- und Gewerbebestandorte weisen auch vergleichsweise hohe Maxima grösser 10 auf. Dies gilt zusätzlich auch für Visp Ost, Basel St. Johann und Kloten. An den anderen Messstellen liegen alle Werte unter 9.

Tabelle 7 Toluol / Benzol - Verhältnis

	Jahresmittel	Minimum	Maximum
TG Kreuzlingen	10.94	2.74	32.22
VS Visp West	10.93	2.83	32.42
VS Monthey Nord	9.02	4.07	16.63
VS Monthey Süd	8.01	3.51	15.31
BS Klybeck	7.73	2.44	47.30
BS Feldbergstr.	5.10	2.68	8.59
VS Visp Ost	5.02	1.55	12.62
BS St. Johann	4.89	2.13	18.49
ZH Stampfenbachstr.	4.69	2.29	7.47
BE Wankdorf	4.37	2.47	7.44
ZH Kaserne	4.23	1.93	7.80
ZH Kloten	4.03	1.83	14.92
SG Blumenbergplatz	3.95	2.31	7.47
BL Allschwil	3.89	2.11	7.44
UR Altdorf	3.83	2.37	6.10
AG Möriken	3.77	1.90	5.86
BL Muttenz	3.71	2.02	6.41
ZH Bellevue	3.43	1.96	5.44
AG Killwangen	3.26	1.94	5.36
GR Chur	3.11	1.56	5.72
GR Rothenbrunnen	2.27	0.97	3.64
ZH Höri	2.27	1.21	5.11

In den Abbildungen 23 bis 25 sind die Jahressgänge der Toluol/Benzol-Verhältnisse dargestellt. Auffällig sind die stark schwankenden Werte in Kreuzlingen sowie in Visp West und Ost. Einzelne Extremwerte sind in Basel Klybeck, Kloten und Basel St. Johann erkennbar.

Alle Stationen weisen einen Jahressgang mit höheren Werten im Sommer auf. Im Winter sind stabilere Luftmassen zu erwarten, so dass das weniger reaktive Benzol stärker in Erscheinung tritt. Im Sommer führen die wärmeren Temperaturen zu einer vermehrten Verdunstung von Benzin. Da der Benzol-Anteil im Benzin geringer ist als im Abgas von Verbrennungsmotoren, führt die Verdunstung zu einem höheren Toluol/Benzol-

Verhältnis. Zudem verdunsten im Sommer mehr Lösungsmittel. Benzol wird im Gegensatz zu Toluol heute praktisch nicht mehr als Lösungsmittel verwendet.

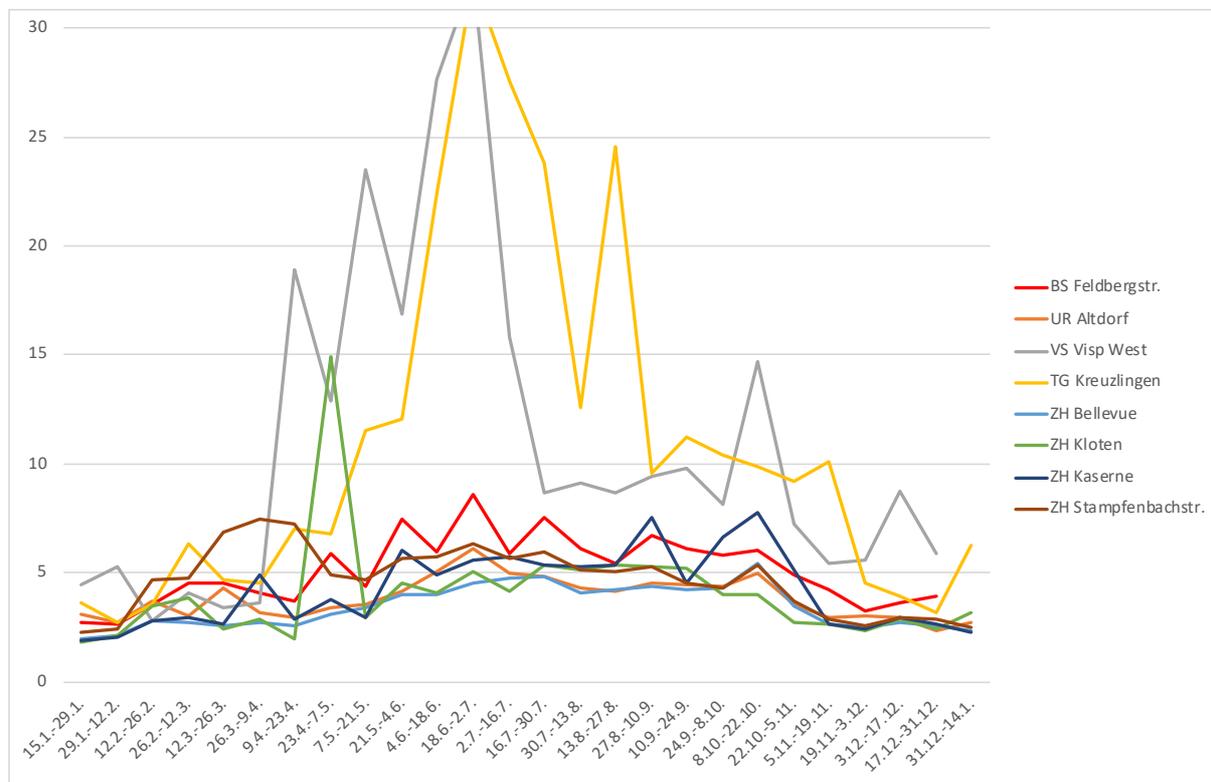


Abbildung 23 Jahrgang Toluol / Benzol – Verhältnis

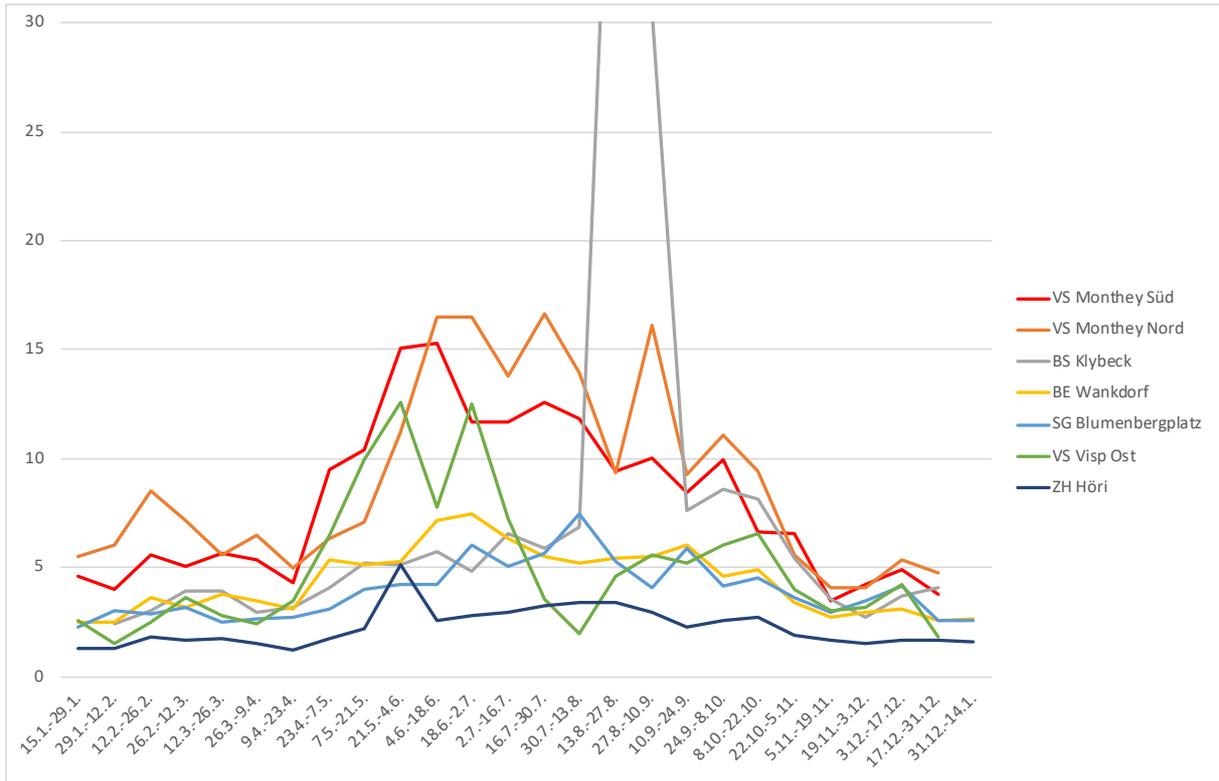


Abbildung 24 Jahrgang Toluol / Benzol - Verhältnis

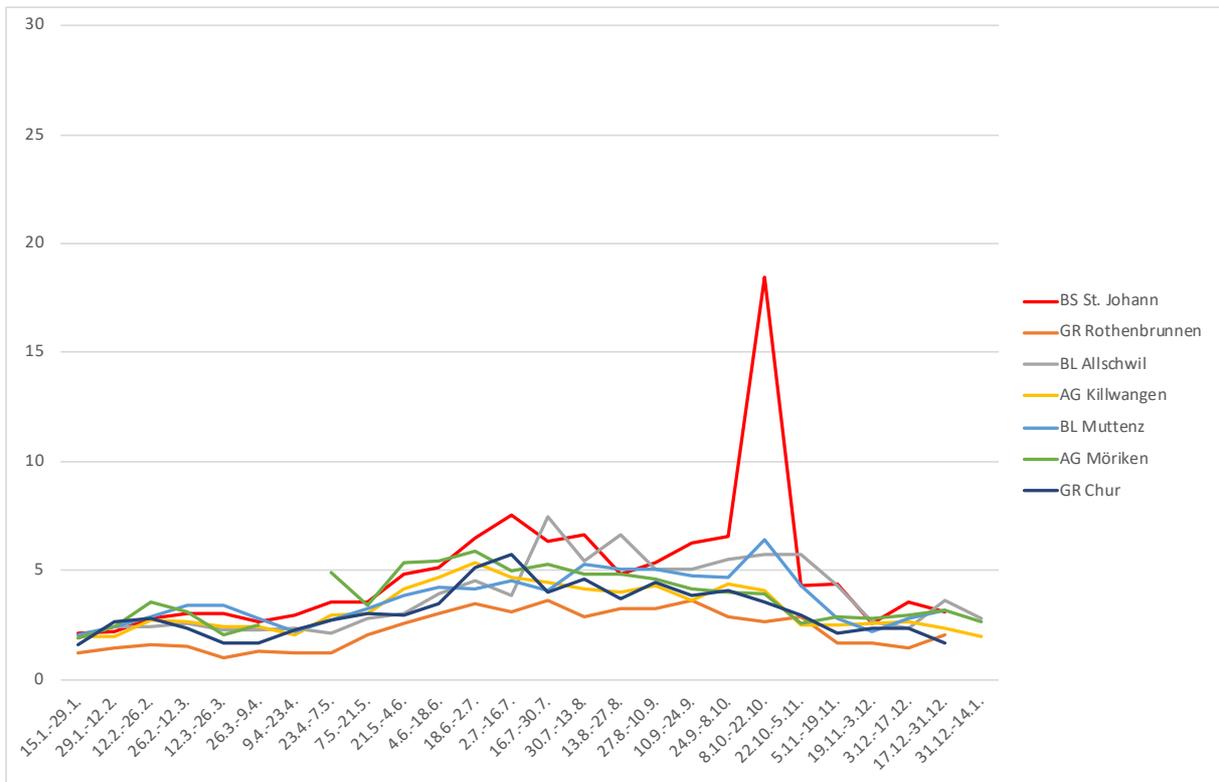


Abbildung 25 Jahrgang Toluol / Benzol - Verhältnis

4 Vergleich mit früheren Messkampagnen

Von den Kampagnen 1991, 1996, 2001, 2009 und 2014 liegen die Resultate vergleichbarer einjähriger Messungen für Basel Feldbergstrasse, Allschwil, Altdorf und Chur vor. Dadurch lässt sich die Entwicklung der VOC-Immissionen in den vergangenen 29 Jahren verfolgen. Ab 1996 kommt Basel St. Johann dazu, ab 2001 Zürich Bellevue und Stampfenbachstrasse, ab 2009 Basel Klybeck, Bern Wankdorf, Muttenz, Rothenbrunnen, St. Gallen Blumenbergplatz und Zürich Kaserne sowie im 2014 Kreuzlingen.

In Tabelle 8 sind alle ermittelten Jahresmittelwerte der Σ ausgewählter VOC zusammengestellt. Wie in den früheren Messkampagnen wurde diese Summe aus den Werten für Benzol, Toluol, Ethylbenzol, o/m/p-Xylol, Mesitylen, Pseudocumol, n-Heptan und Isooctan gebildet

Tabelle 8 Jahresmittelwerte Σ ausgewählter VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019

	1991	1996	2001	2009	2014	2019
BS Feldberg	100.1	74.7	63.1	31.9	19.2	13.9
UR Altdorf	79.7	52.2	45.4	24.5	13.9	12.9
ZH Bellevue			44.3	21.6	13.6	9.6
SG St.Gallen				16.5	10.1	8.3
BE Bern				13.7	8.6	7.8
ZH Staba			28.4	15.2	10.6	8.7
BS Klybeck				13.3	10.5	7.6
TG Kreuzlingen					10.0	10.1
BL Allschwil	36.9	18.5	15.7	11.1	7.6	4.8
ZH Kaserne				9.9	7.4	9.0
BS St.Johann		24.3	20.5	10.7	7.4	5.2
BL Muttenz				8.0	5.9	4.1
GR Chur	26.5	14.0	10.8	7.1	3.7	4.3
GR Rothenbrunnen				5.1	3.9	4.7

An den vier Standorten, die bei allen sechs Messkampagnen beprobt worden sind, kann ein Rückgang der Immissionskonzentrationen um 84 bis 87% festgestellt werden. In Abbildung 26 lässt sich erkennen, dass auch an den anderen Standorten die Konzentrationen im Verlauf der Jahre abgenommen haben. Durchschnittlich sind die Immissionen auch von 2014 auf 2019 nochmals um rund 16% gesunken, allerdings zeigen Kreuzlingen, Zürich Kaserne, Chur und Rothenbrunnen in diesem Zeitraum eine leichte Zunahme der Σ ausgewählter VOC. Diese Zunahme beruht auf einem Anstieg der Alkan-Werte, die wegen Kontaminationen der Passivsammler und bei der Probenahme in Graubünden wenig aussagekräftig sind.

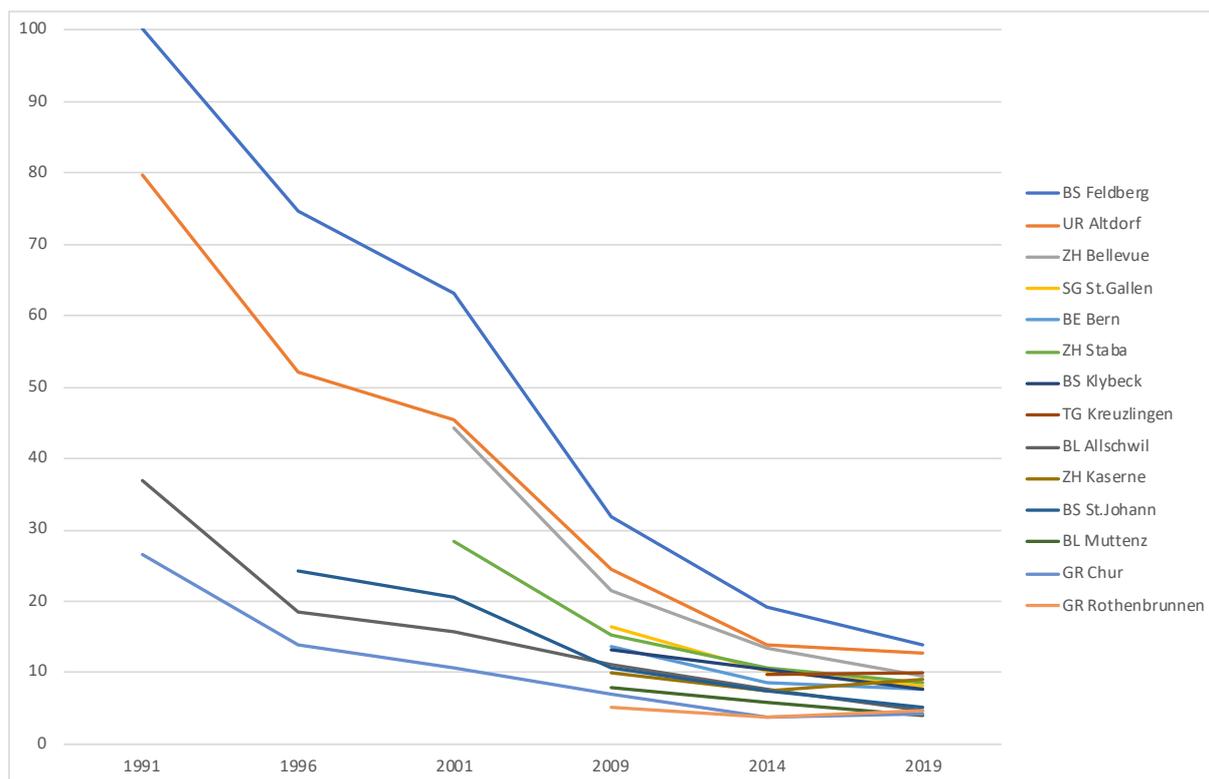


Abbildung 26 Jahresmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] der Σ ausgewählter VOC 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019

Noch ausgeprägter ist der Rückgang der Benzol-Immissionen (siehe Abbildung 27). An den vier Standorten, die seit 1991 beprobt werden, sind die Immissionen um 88 bis 91% gesunken. Die Werte gehen an sämtlichen Standorten von einer Kampagne zur nächsten zurück. Auch in den letzten fünf Jahren haben sie wieder um durchschnittlich ein Viertel abgenommen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 9 Jahresmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Benzol 2014 und 2019

	2014	2019	Differenz
BS Feldberg	1.45	1.03	-29%
ZH Bellevue	1.37	1.00	-27%
UR Altdorf	1.33	1.05	-21%
SG St.Gallen	1.07	0.78	-27%
ZH Staba	1.04	0.74	-29%
BE Bern	0.90	0.68	-24%
BS Klybeck	0.82	0.53	-35%
ZH Kaserne	0.75	0.64	-15%
TG Kreuzlingen	0.71	0.64	-10%
BS St.Johann	0.69	0.48	-31%
BL Allschwil	0.59	0.49	-16%
BL Muttenz	0.59	0.46	-21%
GR Rothenbr.	0.53	0.39	-25%
GR Chur	0.45	0.36	-19%

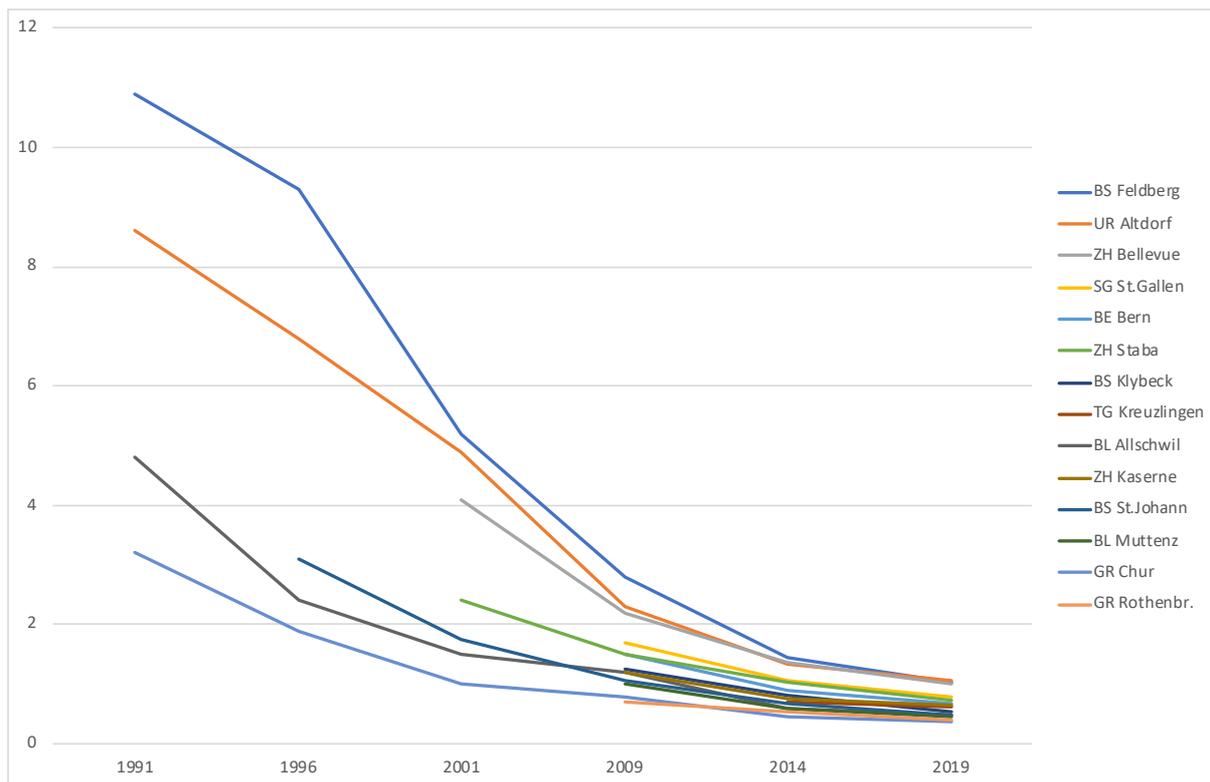


Abbildung 27 Benzol-Jahresmittel [µg/m³] 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019

Die Toluol-Immissionen gehen fast so stark zurück wie jene des Benzols. Seit 1991 beträgt die Abnahme zwischen 85 und 90%. Alle Standorte zeigen ein ähnliches Bild (Abbildung 28).

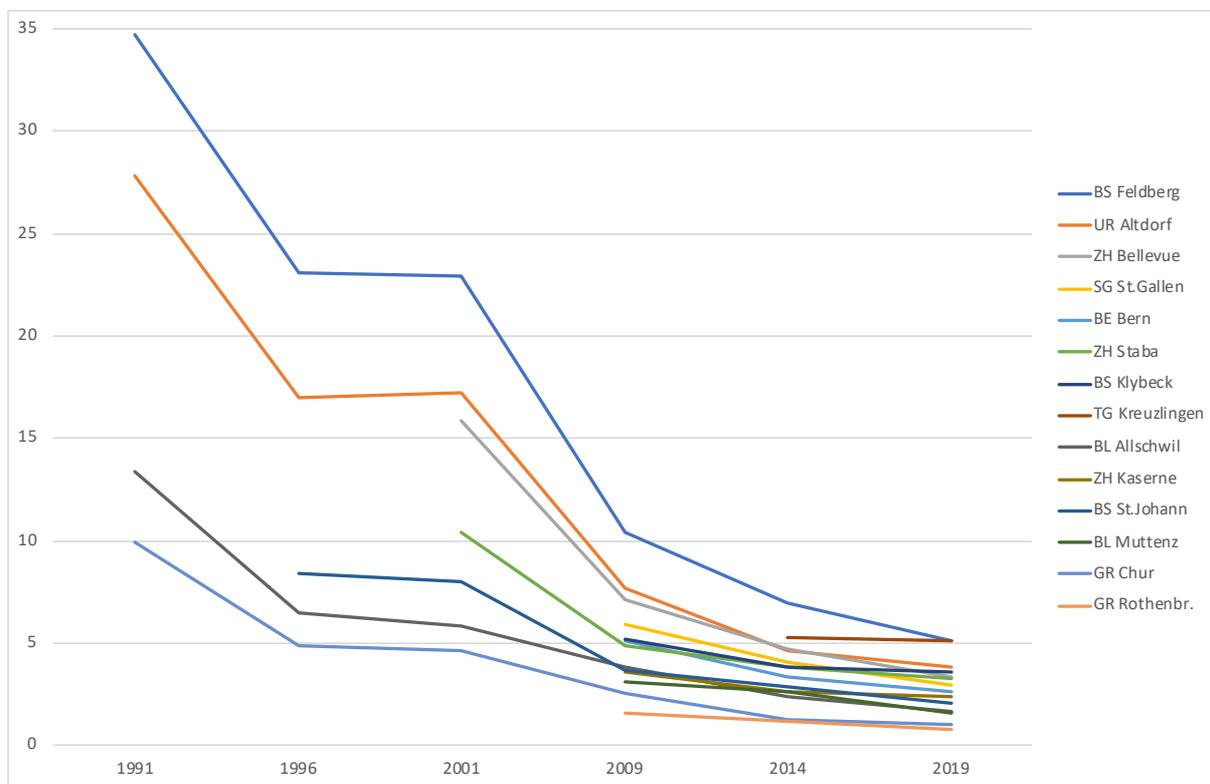


Abbildung 28 Toluol-Jahresmittel [µg/m³] 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019

Weniger deutlich und auch weniger einheitlich als bei den Aromaten ist der Rückgang beim n-Heptan. Auffällig ist der starke Konzentrationsanstieg an den beiden Bündner Messstellen. Es wird vermutet, dass dies auf eine Kontamination bei der Probenahme zurückzuführen ist (siehe auch Kapitel 2.4 Fehlerabschätzung).

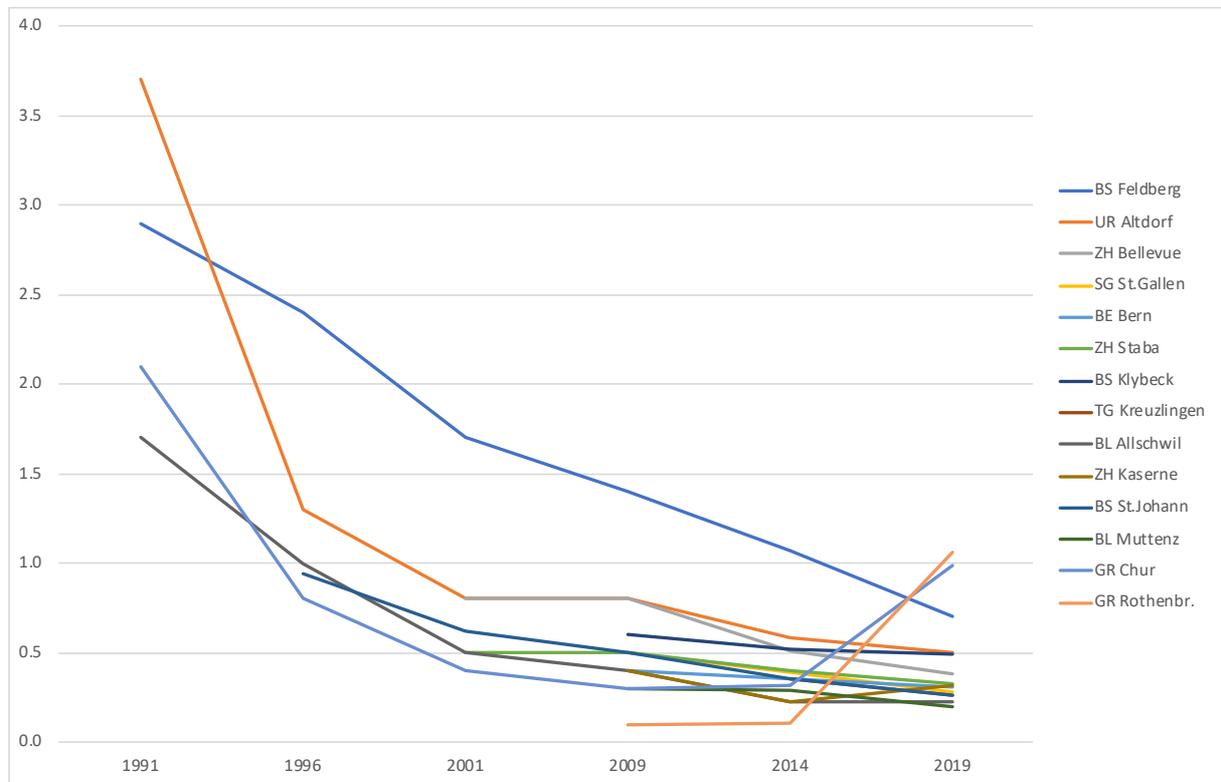


Abbildung 29 n-Heptan-Jahresmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019, (erhöhte Werte 2019 in Chur und Rothenbrunnen wegen Kontamination)

In Basel werden an der Feldbergstrasse seit 1996 jedes Jahr VOC-Messungen in gleicher Art wie in den hier beschriebenen Kampagnen durchgeführt. Damit lässt sich überprüfen, ob die in den einzelnen Messkampagnen 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019 erzielten Resultate auf Grund meteorologischer Einflüsse - die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden - Extremwerte sind.

Abbildung 30 zeigt die Σ VOC (sämtliche analysierten Substanzen) in BS Feldbergstrasse. Die Ergebnisse der Jahre, in welchen eine schweizweite Messkampagne erfolgt ist, sind rot eingefärbt. Es zeigt sich, dass die Resultate 1996 leicht unter und 2001 leicht über den Erwartungen liegen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Kampagnenjahre zumindest in Basel im Jahresmittel nicht gross durch meteorologische Einflüsse verzerrt sind.

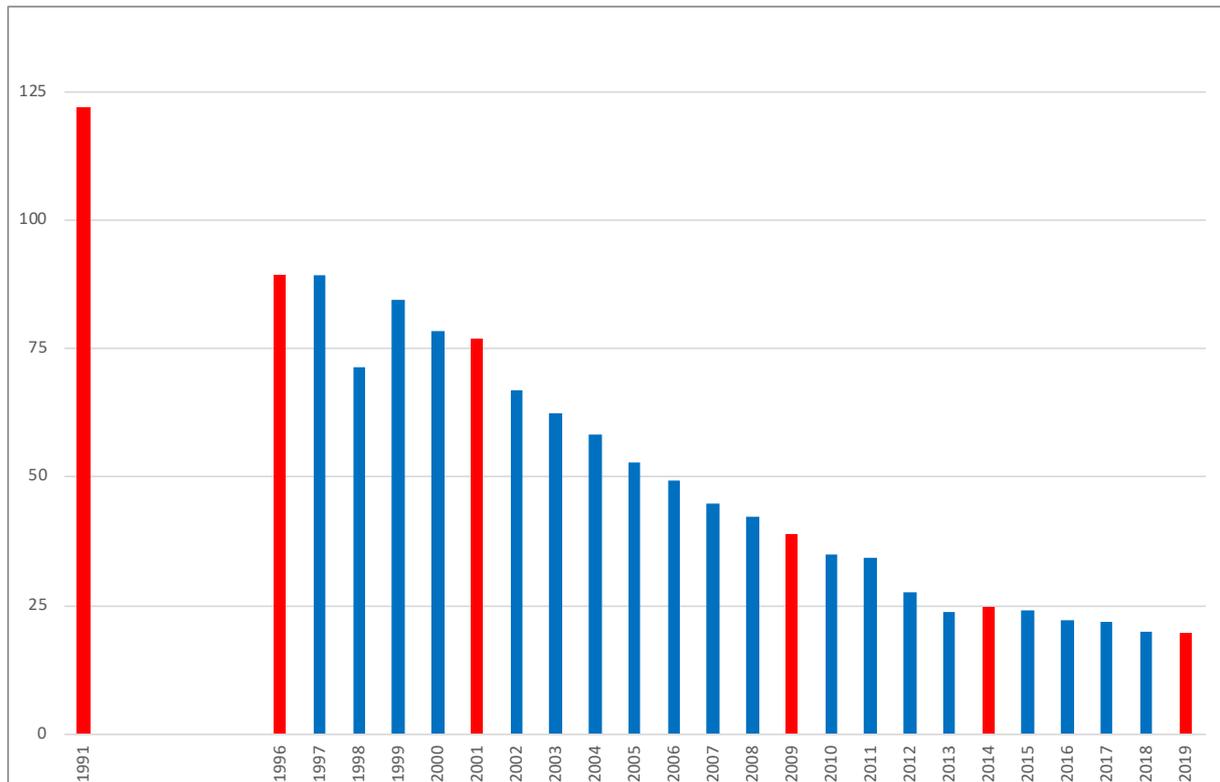


Abbildung 30 Σ VOC-Jahresmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] BS Feldbergstrasse (rot = Jahr mit CH-Messkampagne)

5 Entwicklung der VOC-Emissionen

Gemäss der Emissionsdatenbank des BAFU konnten die VOC-Emissionen des Verkehrs von 87'000 Tonnen im Jahr 1990 auf etwas über 9'000 Tonnen 2019 reduziert werden.

Wesentlich zu dieser Entwicklung beigetragen hat die Katalysator-Technik, die Reduktion der Verdampfungsverluste, die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte und die Reduktion des Treibstoffverbrauchs nach dem CO₂-Gesetz. Ein Benzinfahrzeug mit Abgasnorm EURO 6b emittiert rund 90% der gesamten Kohlenwasserstoff-Emissionen in den ersten fünf Minuten nach einem Kaltstart, ein Dieselfahrzeug rund 39%. Für die Reduktion von Kaltstart-Emissionen ist die Katalysator-Technik noch nicht wirksam.

Im Bereich Industrie und Gewerbe ist im gleichen Zeitraum durch den konsequenten Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung eine Reduktion von 164'000 auf 20'000 Tonnen feststellbar. Einen wichtigen Beitrag leisteten auch kantonale Massnahmenpläne sowie die im Jahr 2000 in Kraft getretene VOC-Verordnung. Viele Grosseinstallationen haben zur Minderung der VOC-Emissionen Abluftreinigungsanlagen in Betrieb gesetzt. Diesen Betrieben wurde unter gewissen Bedingungen eine Befreiung von der VOC-Lenkungsabgabe gewährt. Mit der Änderung der VOC-Verordnung 2013 wurden diese Bedingungen verschärft, in dem die Betriebe neu die beste verfügbare Technik einsetzen müssen, um auch in Zukunft von der Abgabe befreit zu bleiben.

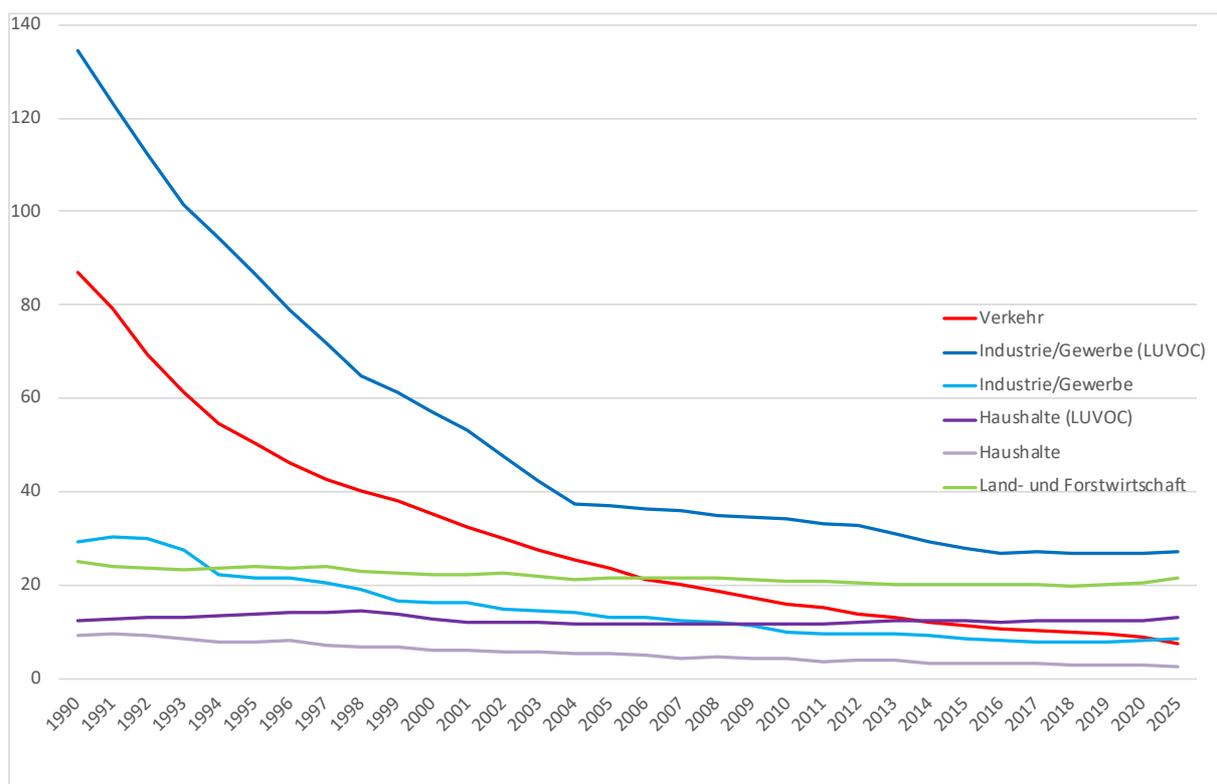


Abbildung 31 VOC-Emissionen [1'000 t/a] Schweiz gemäss BAFU

Abbildung 31 zeigt die Entwicklung der NMVOC-Emissionen in der Schweiz seit 1990 gemäss der Emissionsdatenbank des BAFU. Den stärksten Rückgang bis 2019 zeigen die Verkehrsemissionen (-89%) und die der Lenkungsabgabe unterstellten VOC (LUVOC) aus Industrie und Gewerbe (-80%). Ebenfalls deutlich rückläufig sind die übrigen (d.h. nicht der Lenkungsabgabe unterstellten) VOC-Emissionen aus Industrie und Gewerbe (-74%) sowie aus Haushalten (-70%). Gering fällt die Emissionsreduktion in Land- und VOC-Immissionsmessungen in der Schweiz 2019

Forstwirtschaft aus (-19%), während die LUVOC-Emissionen aus Haushalten im Jahr 2019 gleich hoch sind wie 1990. LRV und VOCV entfalten bei den Haushalts-Emissionen kaum Wirkung. Hier empfiehlt es sich, neue Wege zur Emissionsminderung – eventuell unter Einbezug des Detailhandels und der Baumärkte – zu evaluieren.

Insgesamt konnten die NMVOC-Emissionen in den letzten 29 Jahren um 73% von 297'000 auf 79'000 Tonnen reduziert werden. Der Anteil von Industrie und Gewerbe an den gesamten NMVOC-Emissionen sank von 55% im Jahr 1990 auf 44% im Jahr 2019, jener des Verkehrs von 29 auf 12%. Dagegen erhöhte sich der Beitrag der Land- und Forstwirtschaft von 8 auf 25% und jener der Haushalte von 7 auf 19%.

In Abbildung 32 werden die Ergebnisse der Immissionsmessungen (Summe ausgewählter VOC, siehe Kapitel 5) jener vier Standorte, an welchen 1991, 1996, 2001, 2009, 2014 und 2019 einjährige Messkampagnen durchgeführt worden sind, mit den Emissionsberechnungen des BAFU verglichen.

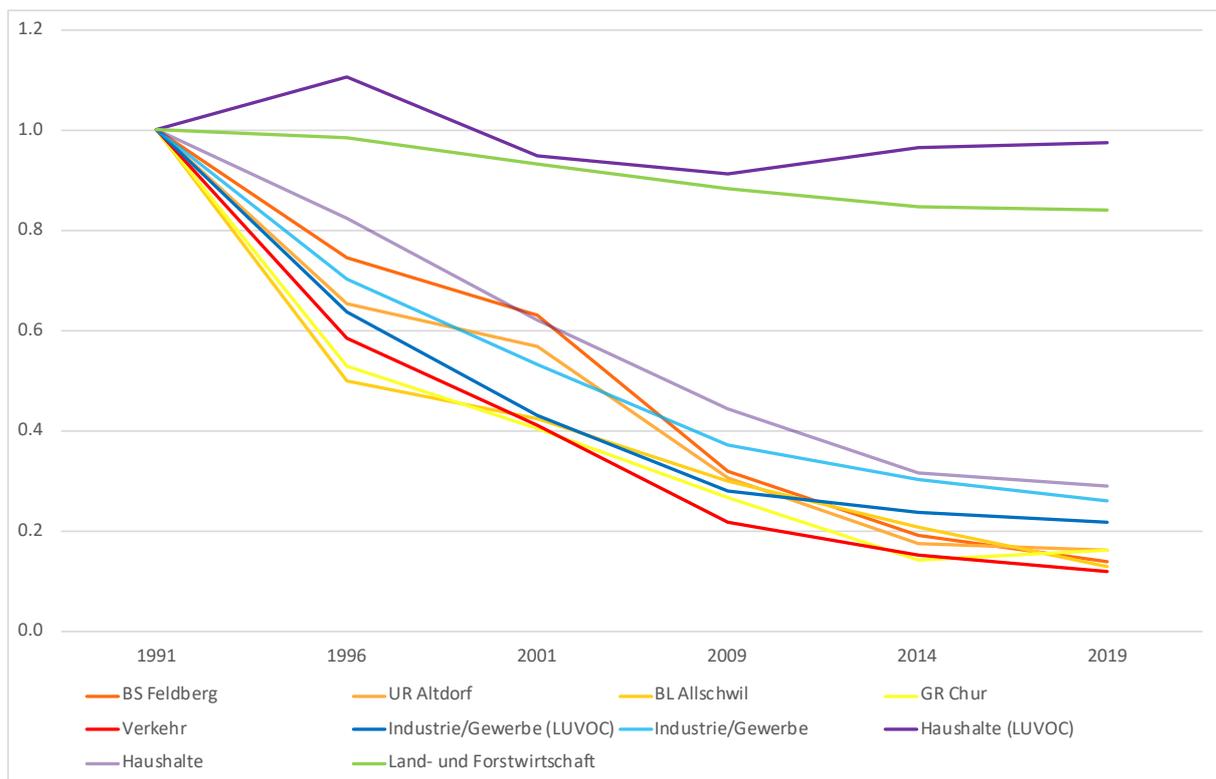


Abbildung 32 Vergleich der VOC-Immissionen mit den NMVOC-Emissionen gemäss BAFU (Werte 1991 normiert auf 1)

Die Immissionsmessresultate an den vier Standorten Allschwil, Altdorf, Basel Feldbergstrasse und Chur bestätigen den bei den Emissionen festgestellten deutlichen Rückgang der NMVOC-Werte seit 1991. Die Immissionskonzentrationen sind um 84 bis 87% zurückgegangen, die Emissionen aus dem Verkehr um 88%, jene aus Industrie und Gewerbe um 78%.

Obwohl nur ein Teil der Vielzahl organischer Verbindungen analytisch erfasst wurde und meteorologische Einflüsse sowie allfällige Veränderungen in der direkten Umgebung der Messstandorte unberücksichtigt bleiben mussten, zeigen Immissionen und Emissionen über einen längeren Zeitraum betrachtet die gleiche Tendenz. Auf Grund der Wahl dieser vier Standorte und des erfassten Stoffspektrums werden die Immissions-Messresultate eher von den Strassenverkehrs-Emissionen beeinflusst.

6 Vergleich mit weiteren VOC-Messungen in der Schweiz

NABEL

An sechs NABEL-Stationen ermitteln die EMPA und das BAFU VOC-Immissionskonzentrationen mittels FID- oder PID-Detektoren.

Abkürzung	Standort	Standorttyp	Aromatische Verbindungen	Gesättigte KW	Ungesättigte KW	Polare VOC
ZUE	Zürich Kaserne	städtisch	BTEX (seit 2001 - 2017)	C2-C7	a-Pinen, Limonen	MeOH, EtOH, Propanol, MTBE Acetonitril, Aceton, Ethylacetat
BER	Bern Bollwerk	städtisch verkehrsbelastet	BTEX (seit 2011)	-	-	-
BRM	Beromünster	ländlich unterhalb 1000m.ü.M.	BTEX (seit 2018)	C2-C7	Ethen, Ethin Propen 1,3-Butadien Isopren a-Pinen, Limonen	MeOH, EtOH, Propanol, MTBE, Acetonitril, Ethanal/Acetaldehyd, Aceton Ethylacetat, Methylethylketon
DUE	Dübendorf EMPA	vorstädtisch	BTEX (seit 1994 - 2010) BT seit 1994	-	-	-
JUN	Jungfrauoch	Hochgebirge	BT (seit 2000)	C4, C5	-	-
RIG	Rigi Seebodenalp	ländlich über 1000m.ü.M	BTEX (seit 2001 - 2017)	C2-C7	-	-

Für die nachfolgende Auswertung wurden BTEX-Jahresmittelwerte berücksichtigt.

Die Immissionskonzentrationen sind am Standort Zürich Kaserne seit 2001 um durchschnittlich 70% zurückgegangen. Seit der letzten Messkampagne im Jahr 2014 bis 2017 sind die Werte nochmals gesunken, für Ethylbenzol und die Xylole um rund 30%, für Toluol um rund 24% und für Benzol um rund 13%.

Die Stagnation für Toluol, respektive die Zunahme der Xylol- und Ethylbenzol-Werte, welche im letzten Bericht festgestellt wurde, lässt sich nicht mehr erkennen.

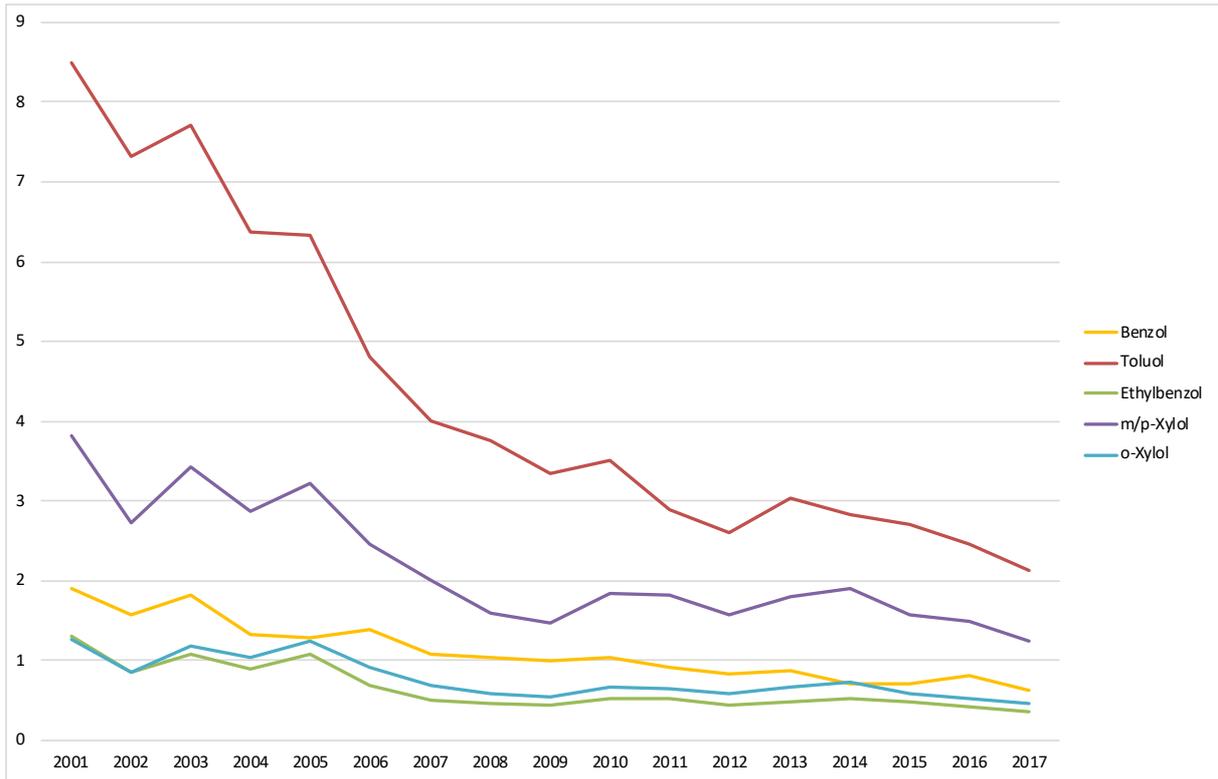


Abbildung 33 Jahresmittel aromatischer VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in Zürich 2001 bis 2017 (NABEL-Standort Kaserne)

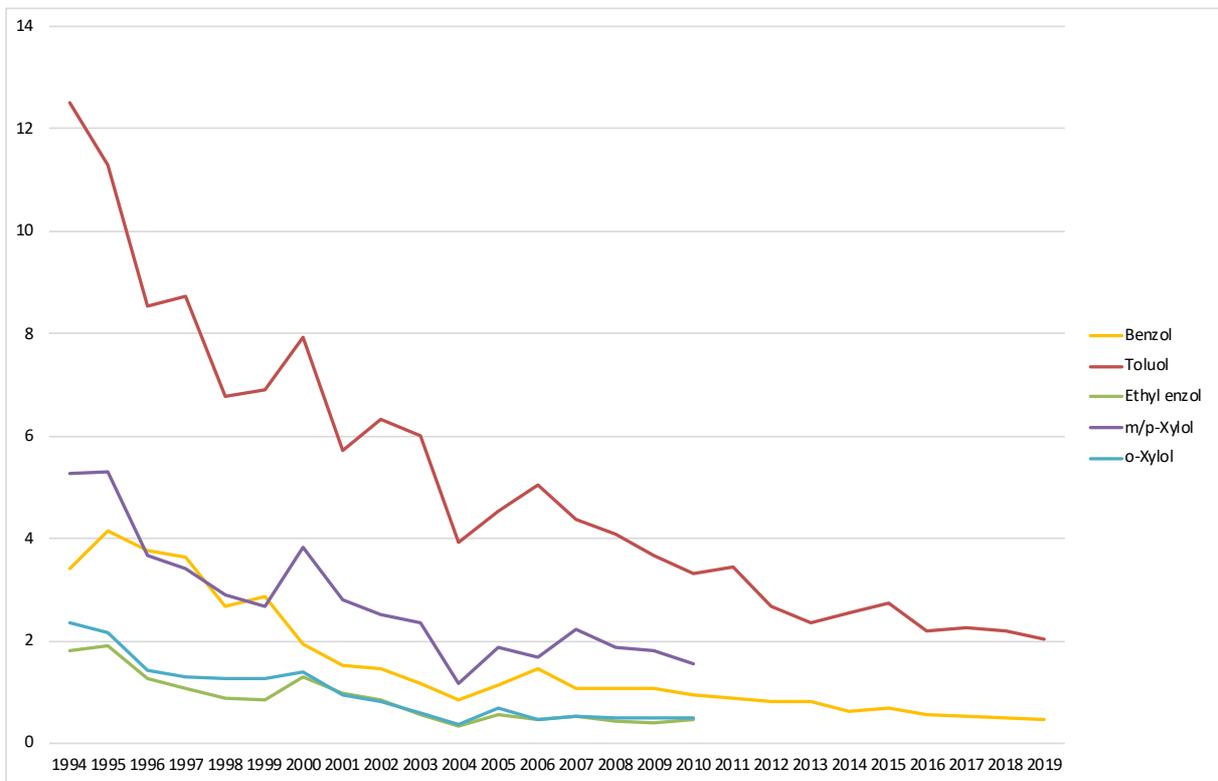


Abbildung 34 Jahresmittel aromatischer VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in Dübendorf 1994 bis 2010, Jahresmittel Benzol Toluol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 1994 bis 2019 (NABEL)

Bereits seit 1994 werden BTEX-Messungen in Dübendorf durchgeführt. Bis 2010 wurden Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole erfasst, seit 2011 nur noch Benzol und Toluol (dafür wurden ab diesem Zeitpunkt BTEX-Messungen in Bern aufgenommen).

In den letzten zwanzig Jahren sind die Benzol- und Toluol-Werte auf rund ein Fünftel der ursprünglichen Konzentrationen gesunken (siehe Abbildung 34). Seit der letzten Messkampagne im Jahr 2014 sind die Werte um nochmals rund 20% gesunken.

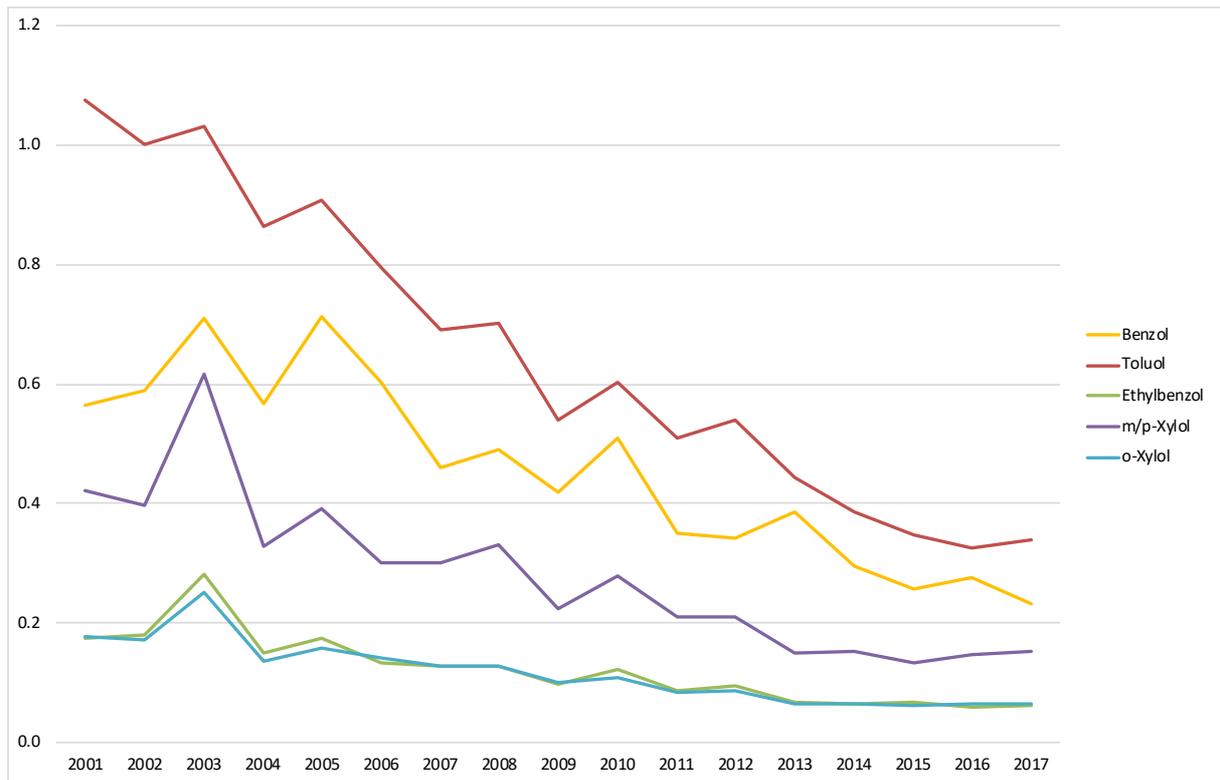


Abbildung 35 Jahresmittel aromatischer VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in Rigi-Seebodenalp 1994 bis 2017 (NABEL)

An der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp erfolgen BTEX-Messungen seit 2001 und wurden 2017 gestoppt. Auch an diesem Standort kann ein Rückgang der Immissionskonzentrationen seit Messbeginn um fast zwei Drittel für Toluol und die C2-Benzole festgestellt werden (siehe Abbildung 35). Die Benzol-Werte dagegen gingen um knapp 60% zurück. Seit 2014 gingen die Benzol- und Toluolwerte nochmals zurück (-21% respektive -12%), Ethylbenzol und die drei Xylolisomere blieben mehr oder weniger konstant.

Auf dem quellfernen Jungfraujoch (Abbildung 36) übersteigt seit 2015 die Benzol-Konzentration jene des Toluols deutlich. Seit 2014 ist nach zwischenzeitlichem Anstieg wieder ein Rückgang der Toluol- und Benzol-Immissionen im Hochgebirge erkennbar. Der Jahresmittelwert 2019 unterschritt jedoch nicht den seit Messbeginn tiefsten Jahresmittelwert von 2006 für Benzol respektive von 2007 für Toluol. Ein Rückgang der Immissionen lässt sich im Hochgebirge weder für Toluol noch für Benzol erkennen.

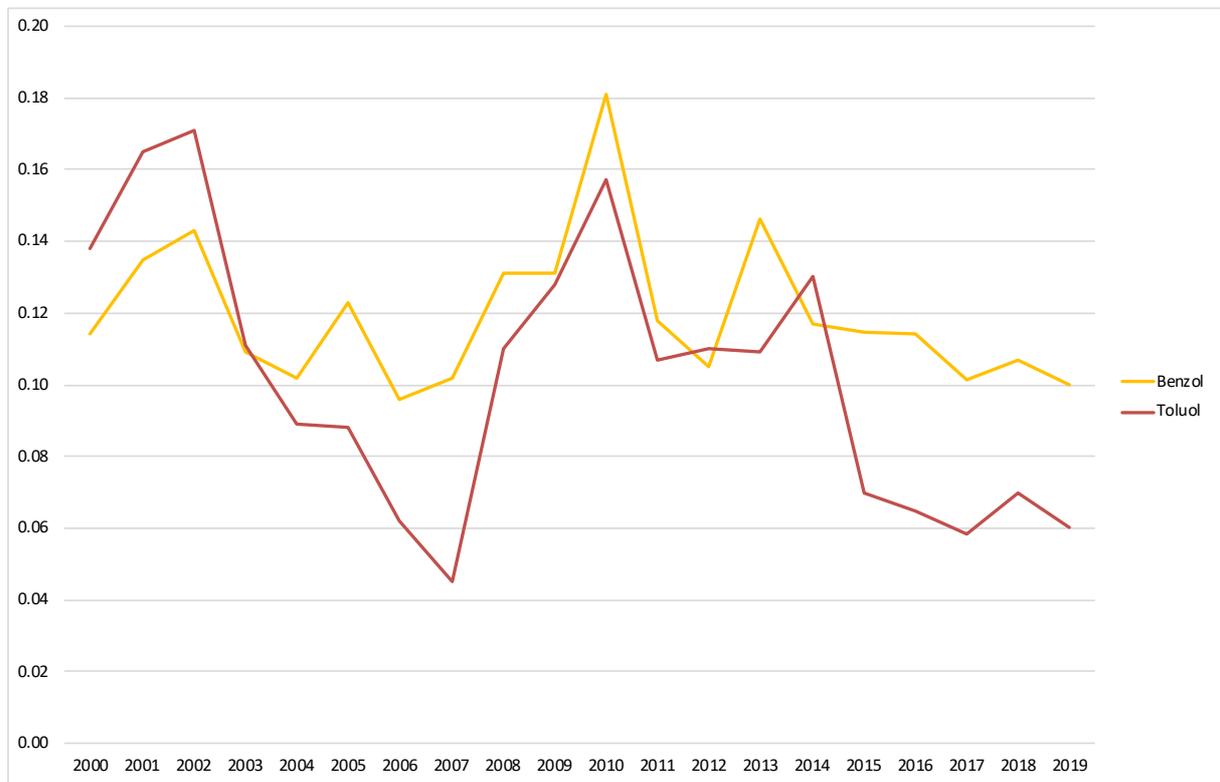


Abbildung 36 Jahresmittel Benzol und Toluol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] auf dem Jungfraujoch 2000 bis 2019 (NABEL)

Am städtisch geprägten Standort Bern-Bollwerk mit sehr hohem Verkehrsaufkommen werden seit 2011 BTEX Messungen durchgeführt. Seit Messbeginn 2011 sind die Immissionen für Toluol und Benzol um rund 50% gesunken, für die C2-Benzole gar um 60% (siehe Abbildung 37).

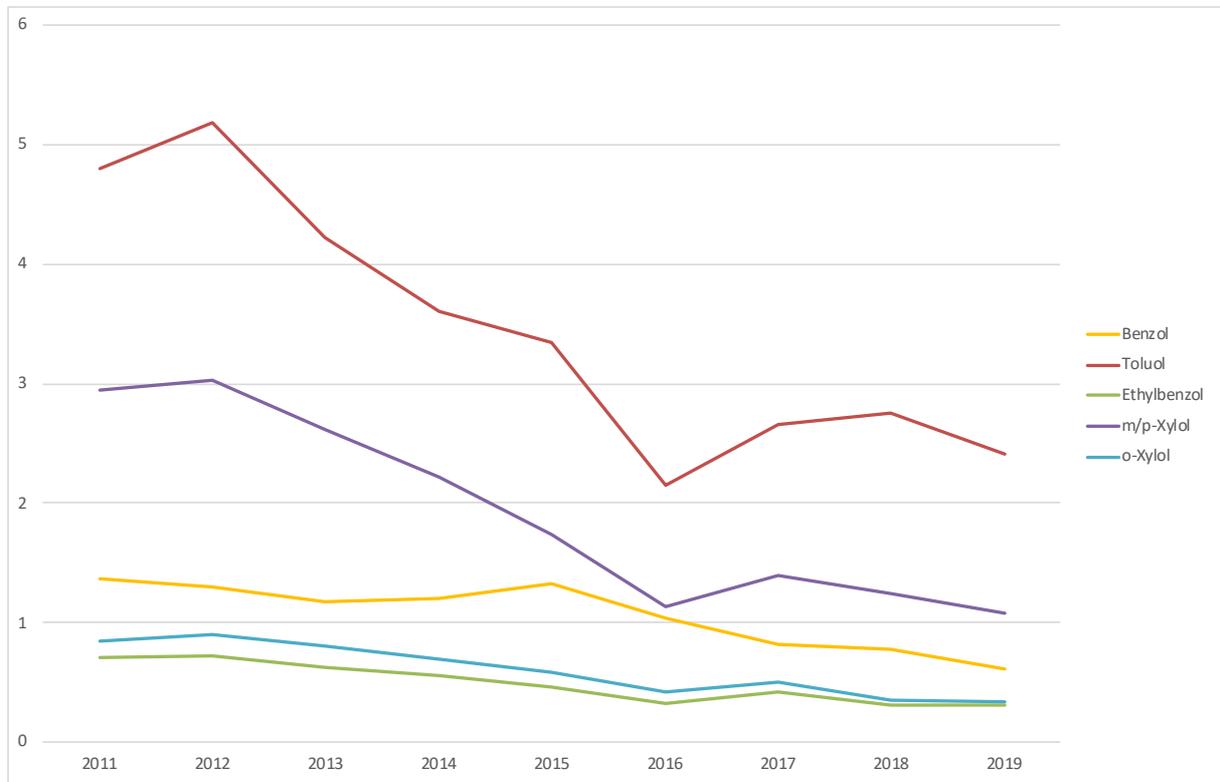


Abbildung 37 Jahresmittel aromatischer VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Bern Bollwerk 2011 bis 2019 (NABEL)

Am in landwirtschaftlicher Umgebung liegenden Standort Beromünster werden seit 2018 BTEX erfasst. Auf Grund der erst zweijährigen Messreihe lässt sich noch keine Aussage über den Rückgang der Immissionen treffen. Im Vergleich zu anderen ländlichen Standorten (z.B. Höri) kann gesagt werden, dass die BTEX-Werte in Beromünster zwischen Faktor 1.5 und 2.5 tiefer liegen.

Tabelle 10 **Jahresmittel aromatischer VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Beromünster 2018 bis 2019 (NABEL)**

	Benzol	Toluol	Ethylbenzol	m/p-Xylol	o-Xylol
2018	0.3463	0.7447	0.0813	0.2165	0.0868
2019	0.3154	0.7238	0.0770	0.2034	0.0821

Sehr schön zu erkennen ist in diesen Messungen, dass die Immissionskonzentrationen mit zunehmender Distanz zu den Quellen logischerweise abnehmen, der relative Anteil des Benzols jedoch zunimmt. Im quellfremden Jungfrauoch liegt das Toluol/Benzol-Verhältnis um 1.

Genf

Der Kanton Genf (SABRA - DT - Etat de Genève, Service de l'air, du bruit et des rayonnements non ionisants - Département du territoire) führte in den Jahren 2017, 2018 und 2019 PAK- Messungen an zwei vorstädtischen, einem städtischen und einem ländlichen Standort durch. Die Tagesproben wurden mittels Digital PM10-Filtern genommen und als Monatsmittelwerte ausgewertet. Analysiert wurden 11 der 16 EPA-PAK (grösser gleich vier Ringe), welche staubgebunden in der Luft vorliegen.

Zusammenfassend kann gesagt, werden, dass für die Wintermonate erwartungsgemäss ein Anstieg der Werte vorliegt. Der maximale Summenwert der 11 PAK wurde im Januar 2017 an der vorstädtischen Messstation Foron gemessen und beträgt 9.38 ng/m³.

7 Interpretation der Standortdaten

In Anhang 1 sind die 22 Standorte genauer beschrieben und die Analyseergebnisse pro Standort interpretiert. An dieser Stelle werden einzelne auffällige Befunde erwähnt.

Basel Klybeck, Toluol

In Basel Klybeck treten an zwei Messungen hintereinander Toluol-Peaks auf (Abb. 38), welche die höchsten Werte der gesamten Messkampagne sind. Auf Grund der Auffälligkeit wurden diese Proben vom Labor zweimal analysiert. Gemäss Kanton sind diese Werte plausibel. Es gab im Zeitraum der Extremwerte in der Nähe eine Strassenbaustelle.

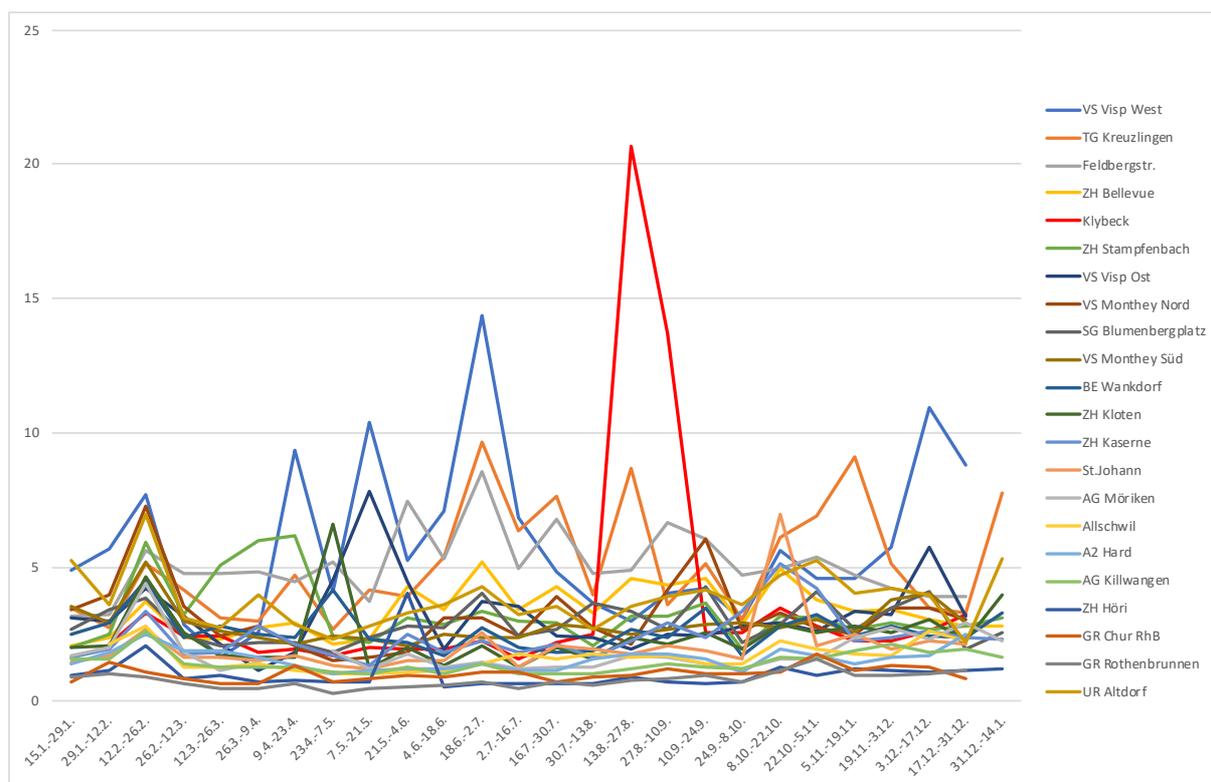


Abbildung 38 Jahresverlauf Toluol -Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aller Messstandorte, Toluol-Peak Klybeck

Beide Basel, Cyclohexan:

Die Basler Standorte weisen im Jahresmittel höhere Cyclohexanwerte aus als die restlichen Standorte (0.23-0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Abb. 39). Die restlichen Standorte liegen unter 0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Cyclohexan-Werte der Basler Standorte liegen im Bereich der vorjährigen Kampagne.

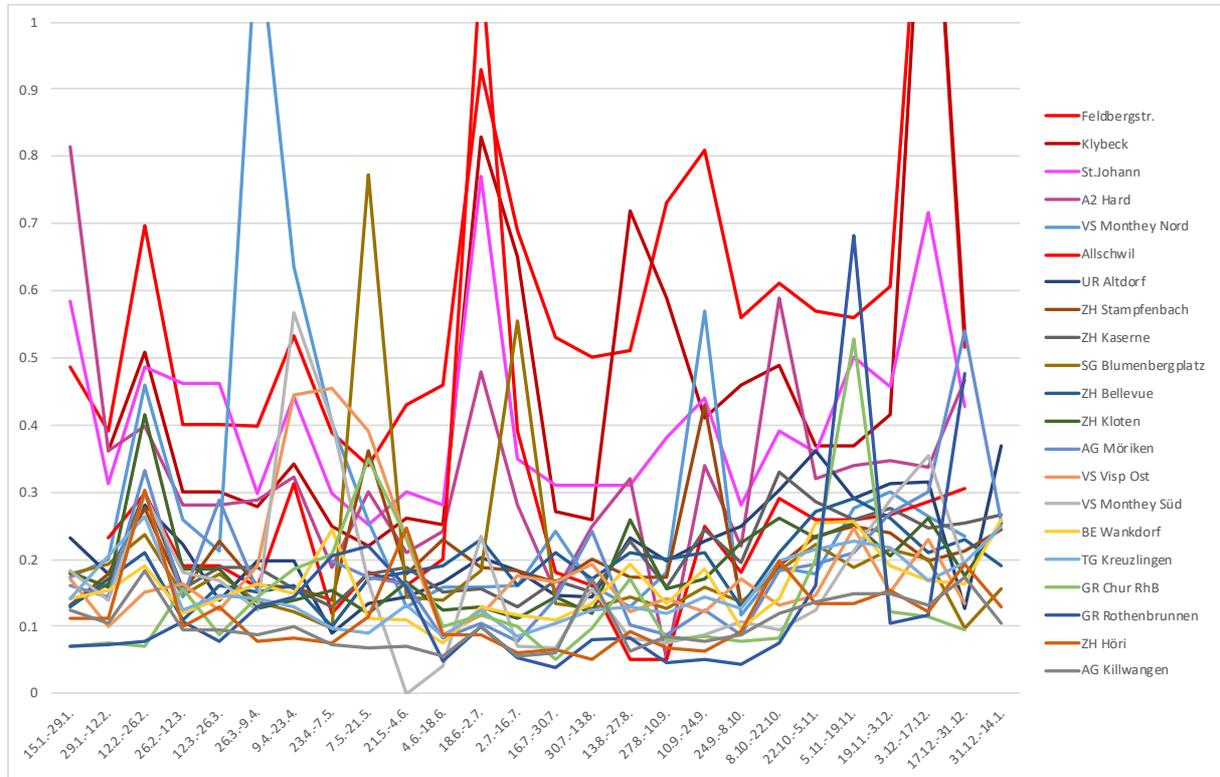


Abbildung 39 Jahresverlauf Cyclohexan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aller Messstandorte, auffällig sind die Basler-Standorte

Monthey Nord und Monthey Süd, 1,2-Dichlorbenzol

Die Standorte in Monthey weisen sowohl an der Süd- wie auch an der Nordlage die höchsten Jahresmittelwerte der Kampagne für 1,2-Dichlorbenzol auf (höchster Messwert im August mit $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Werte sind gemäss Kanton plausibel, da in umliegender Nähe industriell 1,2-Dichlorbenzol verwendet wird. Auch die Zunahme der Konzentration gegen den Nordstandort hin ist nachvollziehbar, da im Jahr 2019 zu zwei Drittel der Zeit der Wind von Südost nach Nordwest blies.

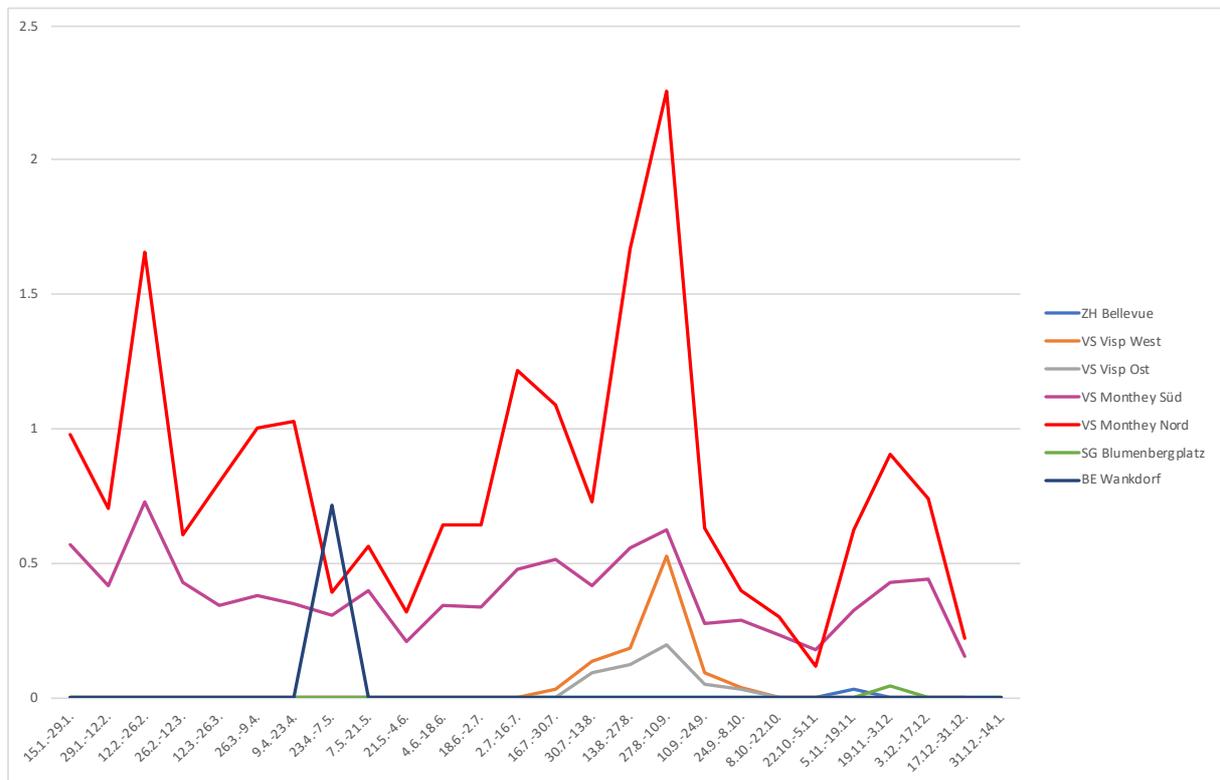


Abbildung 40 Jahresverlauf 1,2-Dichlorbenzol-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aller Messstandorte grösser Bestimmungsgrenze

Monthey Nord und Monthey Süd, o-Xylol

Bei Betrachtung der typischen BTEX-Verhältnisse (Verhältnis Ethylbenzol / o-Xylol ca. 1, Verhältnis m/p-Xylol / o-Xylol ca.3) ist aufgefallen, dass an beiden Standorten in Monthey o-Xylol gegenüber den andern Aromaten um den Faktor 2 erhöht ist im Vergleich zu den übrigen Messstationen (siehe Abbildungen 41 und 42).

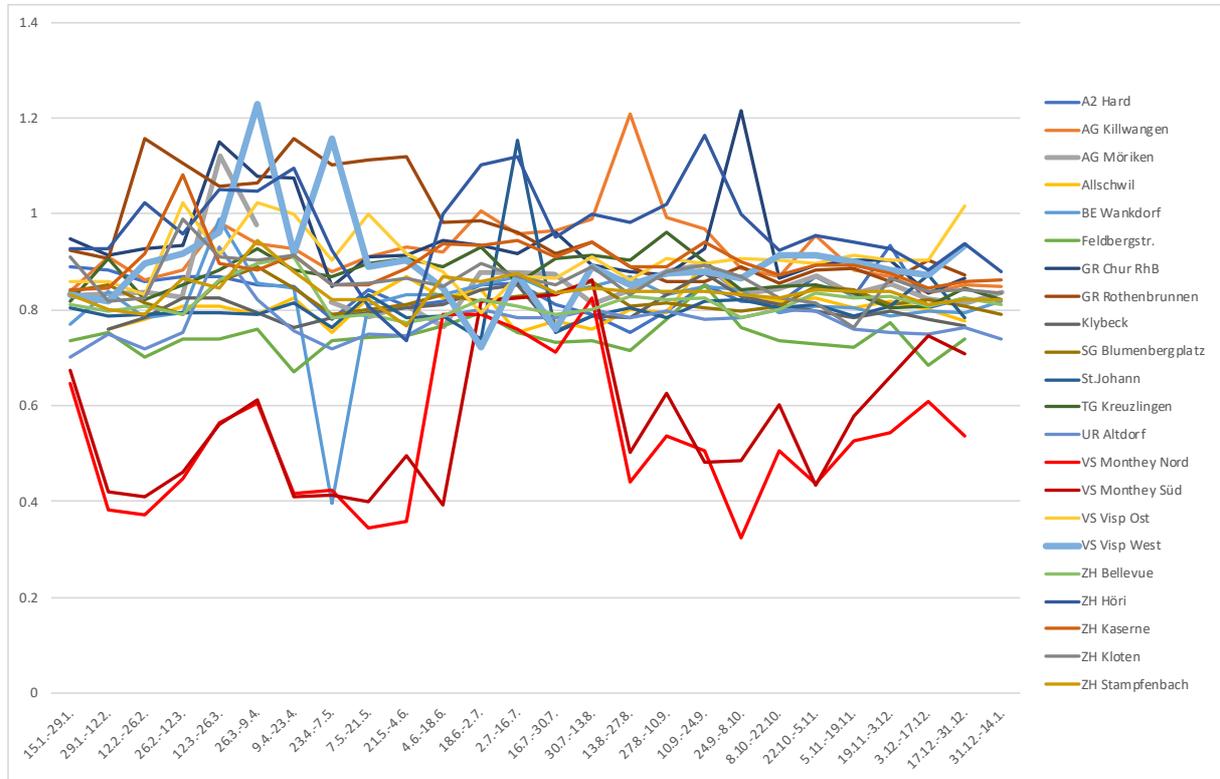


Abbildung 41 Jahresverlauf Verhältnis Ethylbenzol / o-Xylol

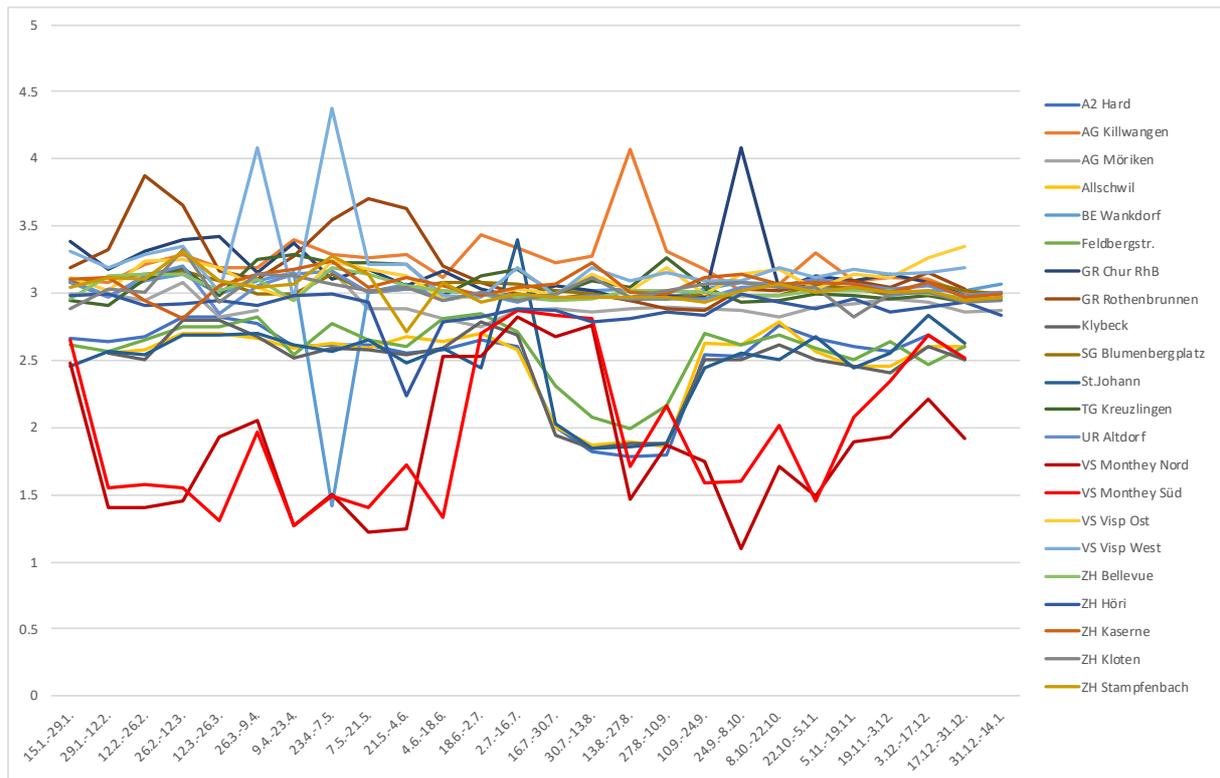
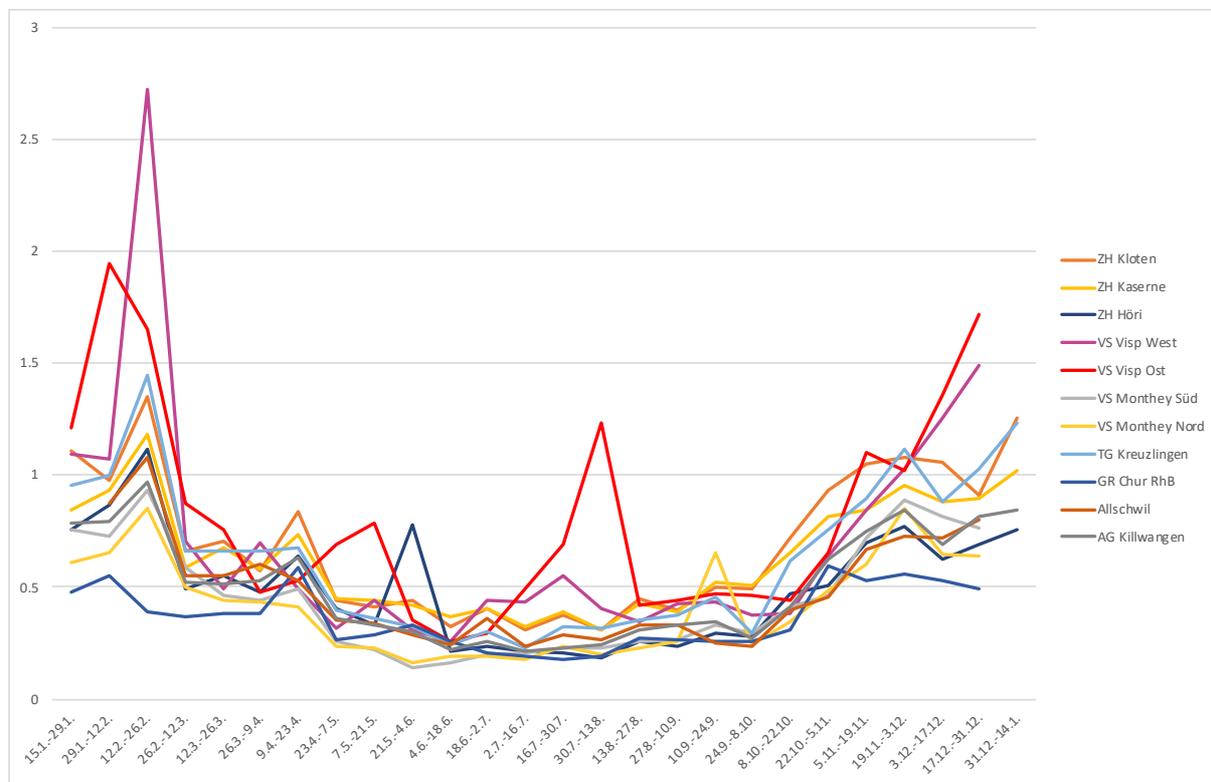


Abbildung 42 Jahresverlauf Verhältnis m/p-Xylol / o-Xylol

Visp Ost und Visp West, Benzol

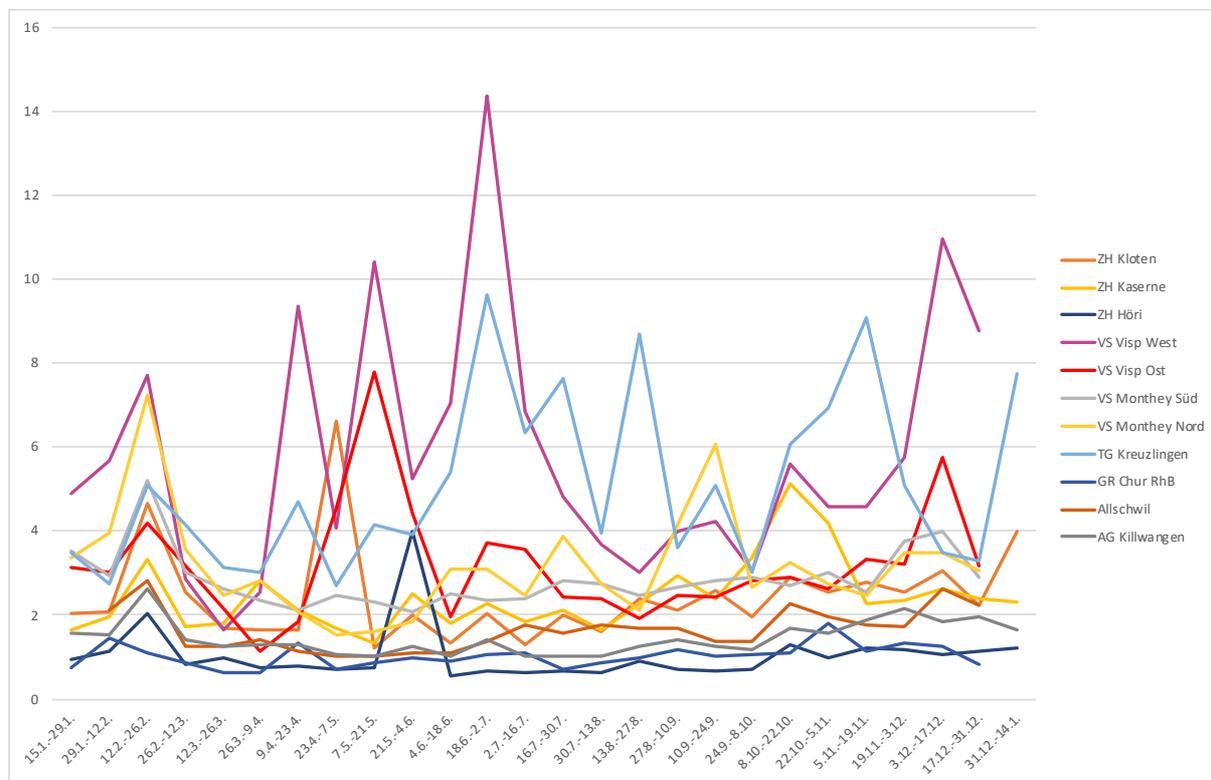
Visp Ost und West weisen für Standorte mit relativ kleinem Verkehrsaufkommen (gemäss Kanton kaum Verkehr) erhöhte Benzol-Werte auf (Abb. 43). In den Messwerten sind unterjährige Zusatzpeaks auffällig, was auf eine Benzol-Quelle hindeutet. In Visp hat es eine Spaltanlage, die als Benzolquelle in Frage kommt.



Abbildungen 43 Benzol-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen

Industriestandorte, Toluol

Bei Industriestandorten mit geringem Verkehrsaufkommen werden teilweise erhöhte und stark schwankende Toluol-Konzentrationen gemessen. In Abbildung 44 ist dies vor allem für die Standorte in Visp, Kreuzlingen und Monthey Nord erkennbar.



Abbildungen 44 Toluol-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen

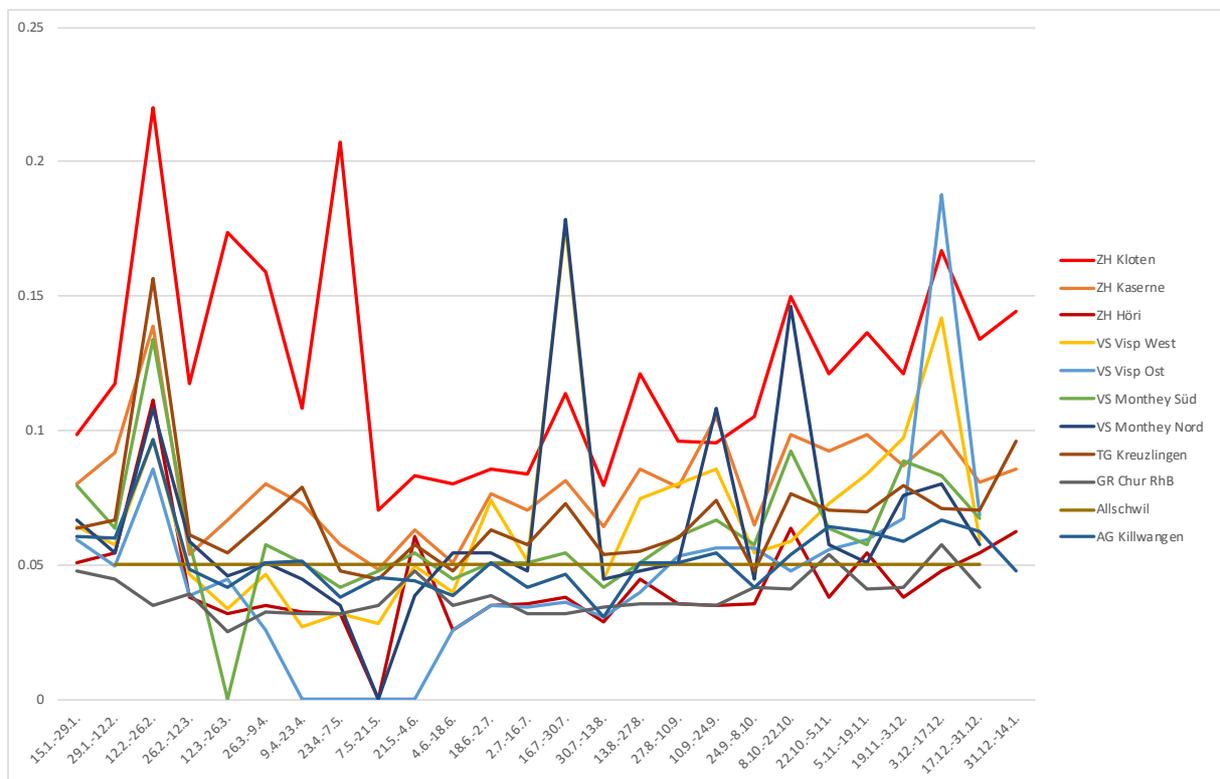
Kloten und Höri, längerkettige Alkane

Die längerkettigen Alkane (C9-C13) der Standorte mit geringem Verkehrsaufkommen wurden genauer untersucht. Kloten weist für die Stoffe n-Nonan, Undecan, Dodecan und Tridecan die höchsten, für n-Decan den zweithöchsten Jahresmittelwert aller Standorte mit geringem Verkehrsaufkommen auf.

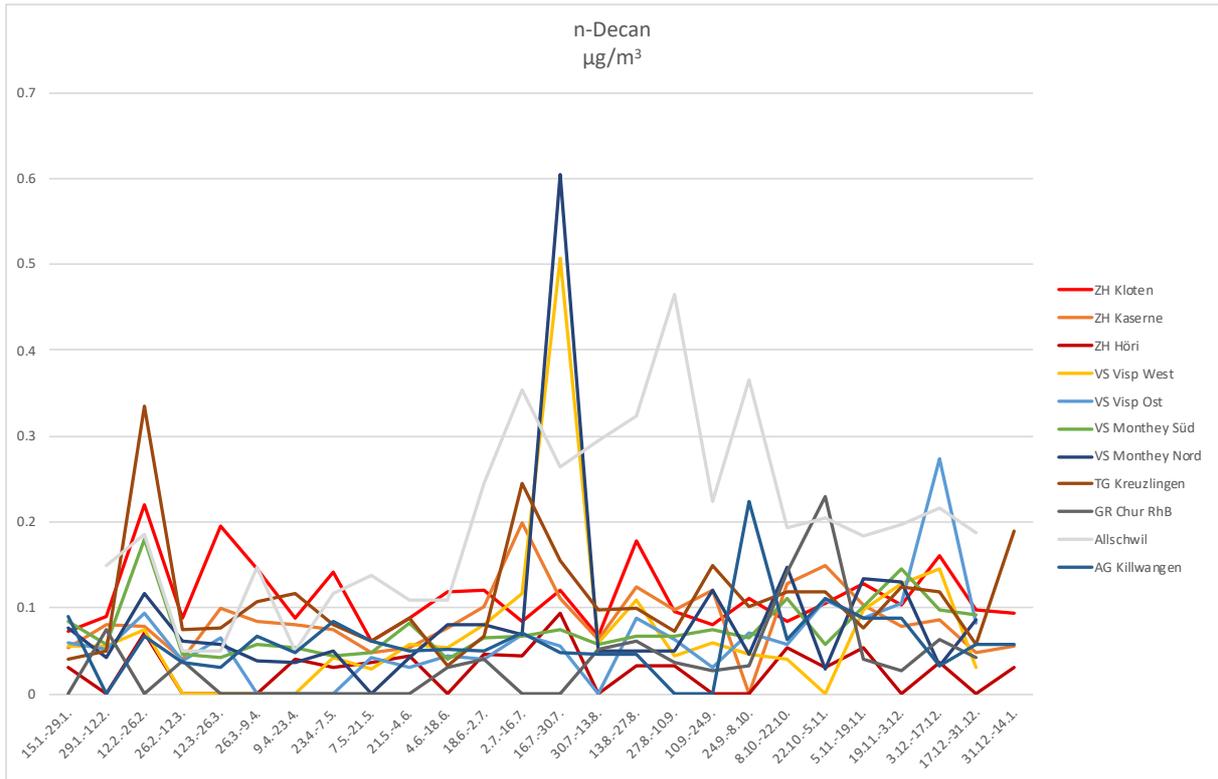
Auch im Vergleich zu allen Standorten weist Kloten den höchsten Dodecan- und Tridecan-Mittelwert auf.

Wird berücksichtigt, dass die Basler-Standorte laborbedingt ca. Faktor 2 höher liegen als die restlichen Standorte, zeigt Kloten auch bei n-Decan den mit $0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zweithöchsten aller Messwerte sowie den zweithöchsten Undecan-Wert nach Bern Wankdorf ($0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

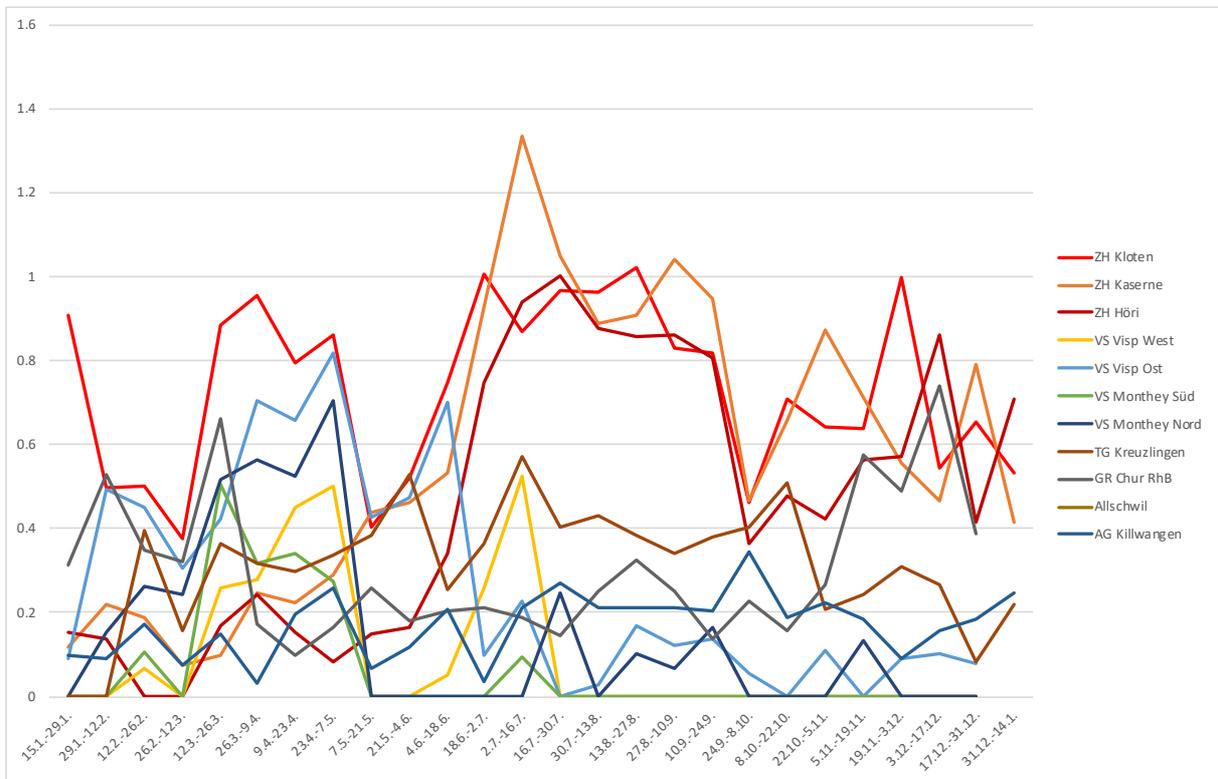
Kloten weist bei höherkettigen Alkanen die höchsten Jahresmittel auf und liegt beim Jahresverlauf gemeinsam mit Höri und Zürich Kaserne tendenziell auf höherem Niveau als die restlichen Standorte. Kloten wird als städtischer Hintergrund-Standort beschrieben. Im weiteren Umfeld wird er beeinflusst vom regionalen Autoverkehr (Autobahn, Pendlerwege, Stadtverkehr) und Industrie (u.a. eine Asphaltmischanlage). Zudem ist er circa einen Kilometer von der Hauptstartbahn des Flughafens Zürich entfernt. Gemäss Auskunft des AWEL über weitere Messungen, welche in diesem Bericht nicht abgebildet sind, ist in den NO_x -Werten wenig Flugeinfluss zu erkennen, in den ultrafeinen Partikeln jedoch schon. Für eine eindeutige Quellenzuweisung wären zusätzliche Messungen mit kürzeren Messintervallen unter Einbezug der Windverhältnisse zu empfehlen.



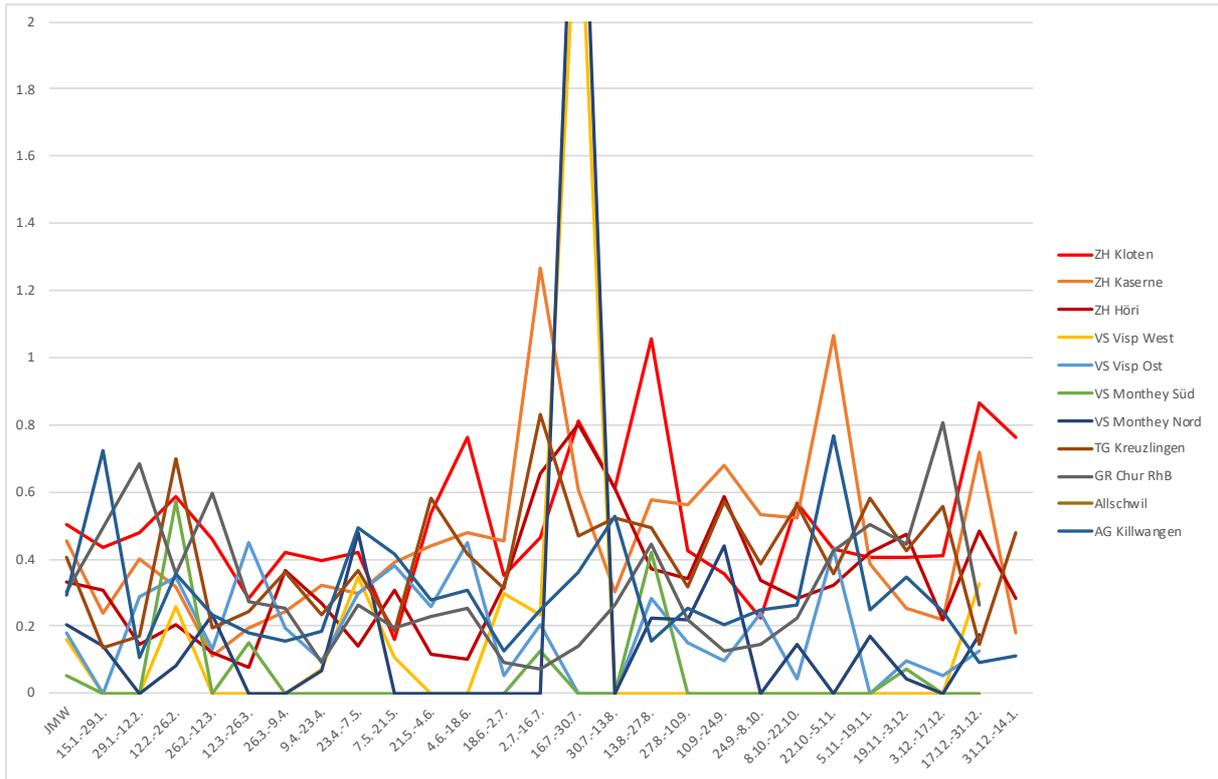
Abbildungen 45 n-Nonan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen



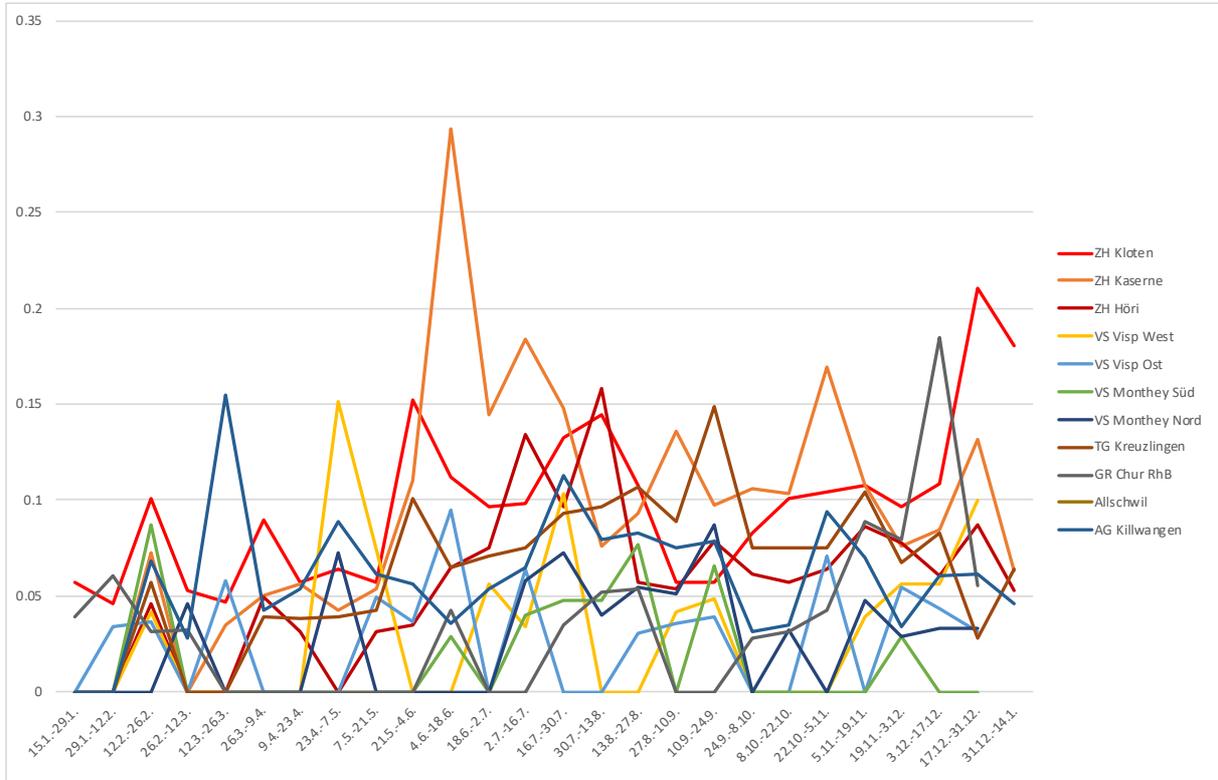
Abbildungen 46 n-Decan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen



Abbildungen 47 Undecan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen



Abbildungen 48 Dodecan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen



Abbildungen 49 Tridecan-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Messstandorte mit geringem Verkehrsaufkommen

Killwangen /Spreitenbach, Styrol

Die Styrolwerte am Standort Killwangen/Spreitenbach (Abb. 50) sind die höchsten der Messkampagne (Jahresmittel $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Maximalwert $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$). An den übrigen Standorten war Styrol nicht nachweisbar oder im Bereich der Vertrauensgrenze. Die Styrolwerte können sehr wahrscheinlich der Farben- und Lackfabrik zugeordnet werden, welche sich in 180 m Distanz zur Messstation befindet, da diese nebst Lacken auch in Styrol gelöste UP-Harze herstellt.

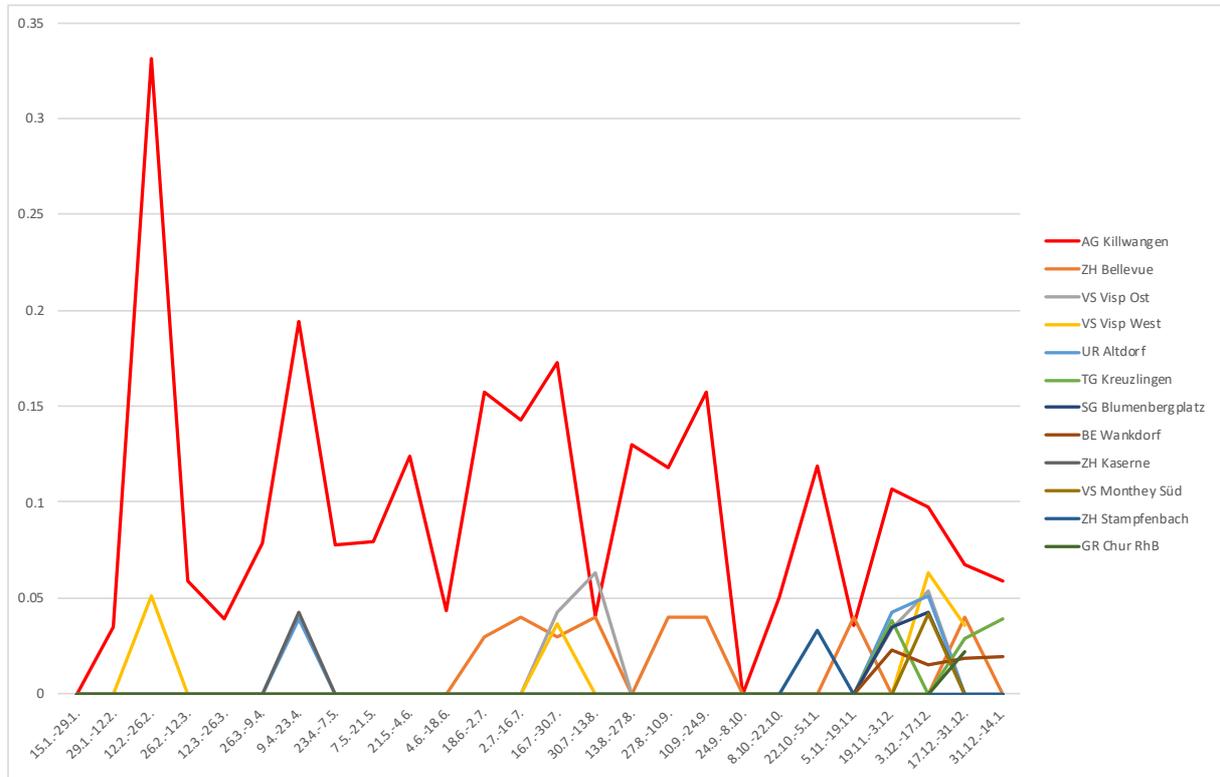


Abbildung 50 Jahresverlauf Styrol-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aller Messstandorte grösser Bestimmungsgrenze

8 Schlussfolgerungen

In der VOC-Messkampagne 2019 wurden gleichzeitig an 22 Standorten in zehn Kantonen während eines Jahres die VOC-Immissionen bestimmt. Dadurch konnte ein guter Überblick über die Belastungssituation in der Schweiz gewonnen werden.

14 dieser Standorte waren bereits in der VOC-Messkampagne 2014 beprobt worden. Die 2019 analysierten aromatischen Verbindungen zeigten an allen Stationen geringere Konzentrationen als vor fünf Jahren. Einzelne Standorte waren auch schon in den früheren Messkampagnen 1991, 1996, 2001 und 2009 beprobt worden. Der Rückgang der VOC-Immissionskonzentrationen ist beträchtlich und deckt sich weitgehend mit den Emissionserhebungen des BAFU. Die Befunde aus dem auf wenige Standorte beschränkten NABEL-VOC-Messnetz werden mit den vorliegenden Ergebnissen bestätigt und auf eine breitere Basis gestellt.

Für zukünftige Kampagnen ist vorgängig der Fokus auf die Fehlerabschätzung und die Qualität der Blindwerte zu legen. Sinkende Messwerte erfordern einen anderen Umgang mit Verunreinigungen der Proben.

Bei den Strassen-nahen Standorten führt insbesondere eine dichte Bebauung, welche die Ausbreitung der Schadstoffe verhindert, zu hohen Immissionen. Nicht direkt verkehrsexponierte Standorte zeigen einen deutlichen Jahresgang mit höheren Immissionen im Winter. Ländliche, quellferne Stationen weisen einen höheren Anteil des weniger reaktiven Benzols an den Immissionen auf.

Standorte in Industrienähe, wie in Visp, Kreuzlingen und teilweise in Basel, zeigen erhöhte, stark schwankende Toluol-Werte. In Visp konnte zudem eine Benzol-Punktquelle festgestellt werden und in Monthey weisen erhöhte 1,2-Dichlorbenzol-Werte auf Emissionen aus umliegender Industrie hin.

Bei den beiden Zürcher Standorten in der Nähe des Flughafens sind die Werte für Undecan, Dodecan und Tridecan erhöht. Für eine eindeutige Quellenzuweisung wären zusätzliche Messungen mit kürzeren Messintervallen unter Einbezug der Windverhältnisse zu empfehlen.

Die Monoterpen-Konzentrationen sind bei Standorten in Waldnähe erwartungsgemäss am höchsten. Dominierende Komponenten sind alpha- und beta-Pinen. In den Städten dominiert dagegen Limonen. Der alpha-Pinen/Limonen-Koeffizient ist in ländlichen Gebieten am höchsten und nimmt mit zunehmender Siedlungsdichte ab.

Gemäss Messungen der Empa emittiert ein Benzinfahrzeug mit Abgasnorm EURO 6b in den ersten fünf Minuten nach einem Kaltstart rund 90%, ein Dieselfahrzeug rund 39% der gesamten Kohlenwasserstoff-Emissionen, 2-Takt-Motorräder und Mofas emittieren beim Kaltstart gar zehnmal mehr Kohlenwasserstoffe als ein Personenwagen. Belastet sind davon vor allem dicht besiedelte Wohnquartiere, weil Ampeln, Stoppstrassen, Fussgängerstreifen oder Staus oft zu mehreren Kaltstarts hintereinanderführen. Bei diesem Stop-and-go-Verkehr wird der Motor häufig abgestellt und wieder gestartet oder ist lange im Leerlauf. Dabei können Benzinmotor und Katalysator gar nicht richtig warm werden. Dieses Kaltstart-Problem liesse sich massgeblich entschärfen, wenn der Katalysator nach dem Motorstart möglichst rasch aufgeheizt würde oder am besten noch bevor der Verbrennungsmotor startet. Die Schweiz engagiert sich in der Forschung neuer Katalysatoren und international im Bereich Fahrzeuggesetzgebung auf Stufe des UNECE «Weltforum für die Harmonisierung der Vorschriften für Kraftfahrzeuge (WP.29)»².

² Dieses harmonisierte Verfahren kann nun beispielsweise von der Europäischen Kommission in die neue Abgasnorm EURO 7 aufgenommen werden, welche dann auch für die Schweiz gelten wird. Die Schweiz beteiligt sich dabei aktiv in der «Working Party on Pollution and Energy (GRPE)», wo an international anerkannten Vorschriften für Schadstoffemissionen sowie Messverfahren für Verbrauch und CO₂-Emissionen mitgearbeitet wird. Dabei setzt sich das BAFU ebenfalls für strengere Kaltstart-Vorschriften ein, die den Schweizer Verhältnissen bezüglich kalten Temperaturen gerecht werden. Unter Mithilfe des BAFU wurde ein neues harmonisiertes Testverfahren für die Messung von Kaltstartemissionen (bei -7°C) innerhalb des WLTP-Testverfahrens entwickelt, welches innerhalb der UNECE im Juni 2020 verabschiedet werden konnte. Es umfasst alle relevanten Luftschadstoffe und gilt für sämtliche Fahrzeuge (inkl. Hybride).

Die VOC-Verordnung befindet sich derzeit in Revision. Forderungen zur Abschaffung der VOC-Lenkungsabgabe sind vom Parlament abgelehnt worden. Mit der laufenden Revision soll die Erfüllung der Vorgaben für die Betriebe vereinfacht werden, ohne dass mit einem Anstieg der VOC-Emissionen gerechnet werden muss. Seit 2013 müssen Betriebe, die eine Abgabebefreiung nach Art. 9 VOCV beantragen, die diffusen Emissionen gemäss bester verfügbarer Technik reduzieren. Der Bund hat diese Vorgabe in branchenspezifischen Richtlinien konkretisiert. Weitere Emissionsreduktionen lassen sich erzielen, wenn diese beste verfügbare Technik von allen Betrieben, nicht nur jenen mit einer Befreiung, verlangt und für zusätzliche Branchen definiert wird, wie dies in einzelnen Kantonen bereits der Fall ist.

LRV und VOCV entfalten bei den Haushalts-Emissionen kaum Wirkung. Zwar konnten die Emissionen trotz Zunahme der Bevölkerung konstant gehalten werden. Da in anderen Sektoren jedoch deutliche Emissionsreduktionen erzielt wurden, steigt der Anteil der VOC-Emissionen aus Haushalten an den Gesamtemissionen kontinuierlich an. Hier empfiehlt es sich, neue Wege zur Emissionsminderung – eventuell unter Einbezug des Detailhandels und der Baumärkte – zu evaluieren.

Die Ergebnisse der VOC-Messkampagne erlauben eine Plausibilisierung der gesamtschweizerischen Emissionserhebungen und eine Bewertung der Resultate zukünftiger Messungen, die vorzugsweise in der Umgebung von Industriefirmen und Tanklagern, aber auch bei Tankstellen und Gewerbebetrieben in Wohngebieten durchgeführt werden dürften. Sie dienen zudem durch Wiederholung der Messungen an einzelnen Standorten der Erfolgskontrolle emissionsmindernder Massnahmen.

Die Messungen bestätigen, dass die von Bund, Kantonen und Gemeinden getroffenen Massnahmen zur Reduktion der VOC-Emissionen wirken. Die Luftqualität wird auch bezüglich VOC immer besser. Die immer noch teilweise zu hohen Feinstaubwerte und vor allem die flächendeckend zu hohen Ozonwerte zeigen aber, dass die Luftbelastung durch VOC noch weiter gesenkt werden muss.