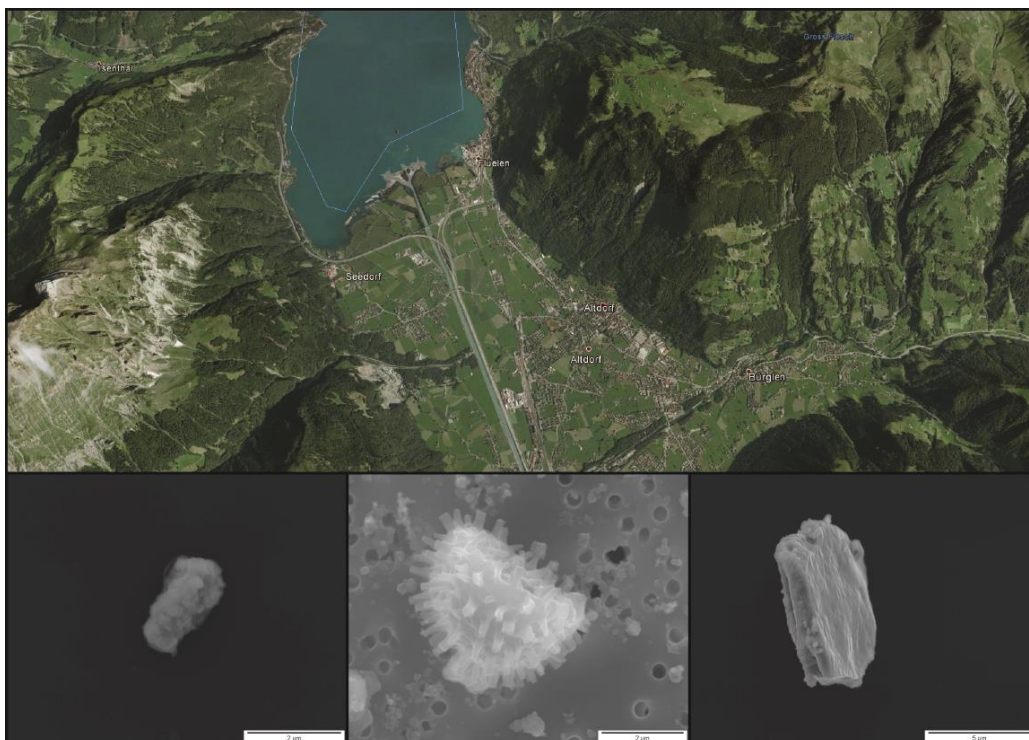


Bestimmung des PM₁₀ Anteils aus dem Schienen- und Strassenverkehr im Urner Reusstal (Altdorf, Kt. Uri)

Resultate des MFM-U Pilotprojektes, Sept.-Okt. 2016



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Freiburg, 30. November 2016
Version 1.31

Impressum

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Auftragnehmer

Particle Vision GmbH, c/o FriUp, Annexe 2, Passage du Cardinal 11, 1700 Fribourg,

www.particle-vision.ch

Autorinnen / Autoren

Dr. Juanita Rausch

Dr. David Jaramillo

Thomas Zünd

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist alleine der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
1. Fragestellung und MFM-U Ziele	7
2. Probenahme	8
2.1 Messstandorte	8
2.2 Passive Probenahme (Sigma-2)	9
2.3 Aktive Probenahme (SKC Airchek3000)	9
2.4 Wetterverhältnisse	10
2.5 Zugsdurchfahrten am Standort ARA	12
3. Methoden	13
3.1 Automatisierte Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDS)	13
3.2 Partikelklassifikator (PACLA)	13
3.3 Quelledifferenzierung	14
3.4 Elementarer Kohlenstoff	15
3.5 Interpretation der Resultate	15
4. Resultate	16
4.1 Undifferenzierte Massenkonzentrationen	16
4.2 Schienen- und Strassenverkehrspartikel	17
4.3 Relative PM10 Quellenanteile	19
4.4 Differenzierung der Fe-reichen Partikel	20
4.5 Absolute primäre PM10 und PM2.5-Massenkonzentrationsanteile aus dem Schienen- und Strassenverkehr und weiteren Quellen	23
5. Vergleichbarkeit der größeren Partikel mit verschiedenen Methoden	27
6. Fazit	28
7. Empfehlungen	29
8. Anhang	30
8.1 Details zu Kap. 4.2	30
8.2 Details zu Kap. 4.3	31
8.3 Details zum Kap. 4.5	36

Zusammenfassung

Zwischen dem 30.09. und 28.10.2016 wurden in einem Transekt, an vier Standorten im Urner Reusstal, Partikelmessungen durchgeführt, um die PM10-Anteile aus dem Schienen- und Strassenverkehr zu quantifizieren.



Abbildung 1: Messstandorte (ARA = Eisenbahnstandort). Satellitenbild aus Google Earth V.7.1.8.3036. (November 1, 2016). <http://www.earth.google.com>

Aus Kostengründen wurde im vorliegenden Pilotprojekt auf eine quantitative und quellendifferenzierte Bestimmung des elementaren Kohlenstoffes aus dem Strassen- und dem Schienenverkehr (Pantographtrieb) verzichtet. Auch die sekundär gebildeten Partikel wurden nicht berücksichtigt, da diese aufgrund ihrer verzögerten Bildung quantitativ keiner Quelle mehr zuordnen werden können. Es ist deshalb zu beachten, dass die im Bericht erwähnten Messresultate "nur" auf den primär emittierten Partikeln, ohne Berücksichtigung des elementaren Kohlenstoffes beruhen. Für die Beurteilung der Schienenverkehrspartikel ist diese Einschränkung nicht von grosser Bedeutung, da beim reinen elektrischen Betrieb nur über den Bremsvorgang mit Komposit-Bremsen flüchtige Verbindungen entstehen, welche zu sekundärer Partikelmasse führen können. Für den Strassenverkehr sieht dies ganz anders aus, da die Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu einem grossen Prozentsatz in sekundäre Partikel (Nitrate, organische Masse etc.) umgewandelt werden.

Die Messresultate zeigen auf, dass der grösste Teil der groben Partikel, welche massenmässig relevant sind, aus dem Strassen- und des Schienenverkehrs keine grosse Ausbreitungsreichweite haben. Diese Emittenten haben somit nur einen geringen Einfluss auf die Immissionsstandorte, welche nicht in der unmittelbaren Nähe der Emissionsquellen liegen.

Die Schwermetallpartikel aus dem Strassen- und dem Schienenverkehr sind grösstenteils sehr klein. Diese Partikel weisen kaum eine relevante Masse auf, breiten sich aber weiträumig aus.

Eine grössere Transportdistanz von Partikeln $d_p > 2.5 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser von beiden Emittenten ist meteorologisch bedingt. Mit grösseren Windgeschwindigkeiten werden diese Partikel weiterweg in Windrichtung transportiert, während sie unter dem Einfluss von kleinen Windgeschwindigkeiten nahe an der Quelle sedimentieren. Unter den vorgegebenen Standortverhältnissen ist zu beachten, dass die Windrichtungen häufig entlang der Talachse auftreten und damit parallel zur A2 resp. der NEAT wehen, was eine laterale Partikelausbreitung erschwert.

Die PM10-Konzentrationen aus dem Strassen- und Schienenverkehr (Abbildung 2) werden hauptsächlich durch eisenhaltige Partikel bestimmt. Beim Strassenverkehr ist auch der Pneubetrieb eine dominante PM10-Quelle.

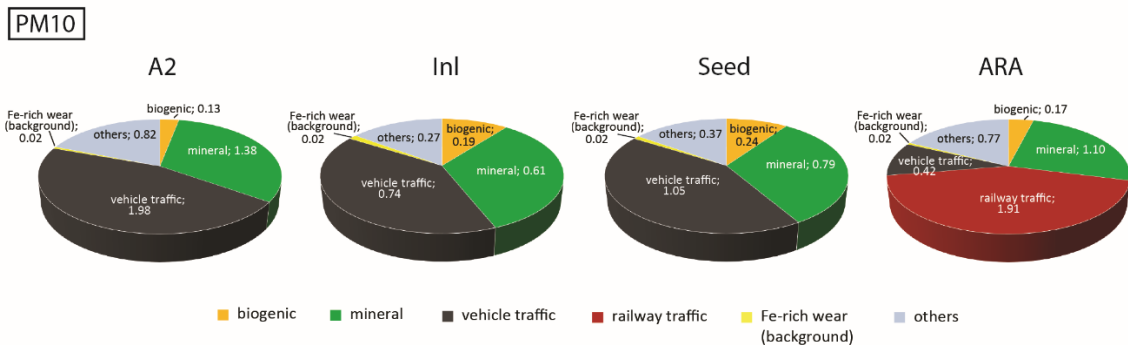


Abbildung 2: PM10 Quellenanteile (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) gemittelt über Periode 2-4. Periode 1 wurde nicht miteinbezogen, weil sich die Konzentrationen und Quellenverhältnisse, wahrscheinlich aus meteorologischen Gründen, stark von den anderen Perioden unterscheiden.

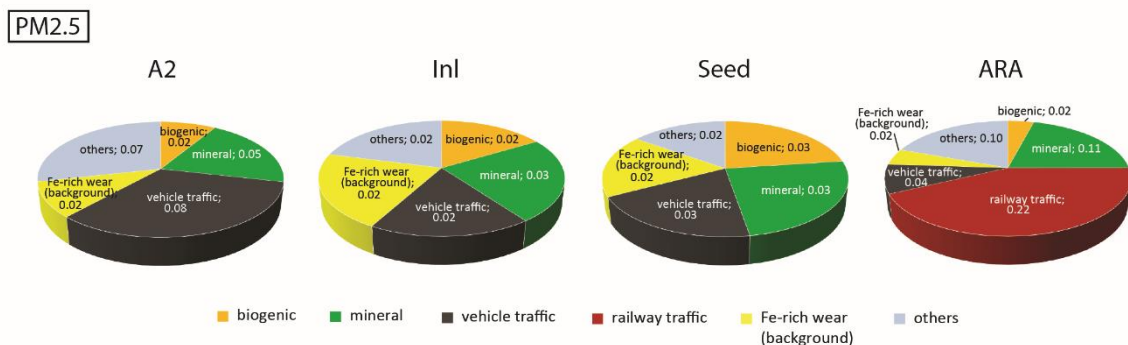


Abbildung 3: PM2.5 Quellenanteile (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) gemittelt über Periode 2-4.

Auch beim PM2.5 weisen die zwei emissionsnahen Standorte A2 und ARA die höchsten Konzentrationen auf, was darauf hindeutet, dass diese auch primäre PM2.5 Partikel emittieren. Die unterschiedlichen Quellenbeiträge an den beiden quellenentfernteren Standorten InI und Seed sind fast identisch, was auf eine homogene Ausbreitung dieser feinen Partikel hinweist. Diese Beträge können als Hintergrundbelastung an primären Partikel $d_p < 2.5 \mu\text{m}$ betrachtet werden. Ein gutes Beispiel dafür stellt die chemische Klasse "Fe-rich wear" dar.

Die massenkonzentrationsbezogene Differenz zwischen PM10 und PM2.5 (Abbildung 2 und Abbildung 3) mag auf den ersten Blick überraschend sein. Da das Partikelvolumen und damit die Massenkonzentration bezogen auf den Partikeldurchmesser mit 3. Potenz abnehmen, ist die tiefe PM2.5-Belastung an primären Partikeln jedoch plausibel¹.

Die vergleichsweise hohe Massenkonzentration an feinen Eisenbahnpartikeln am ARA Standort stimmen gut mit anderen Messresultaten von Particle Vision überein².

¹ Der massenmässige Unterschied zwischen einem 10 und einem 2.5 μm durchmessenden Partikels mit identischer Zusammensetzung beträgt Faktor 64.

² Persönliche Mitteilung 2016 von Thomas Zünd "Partikelmessungen im Gotthard Basistunnel"

Die von der Schiene verursachten Immissionen am Standort ARA sind allenfalls nicht ganz repräsentativ. Wahrnehmungen beim Wechsel der Proben lassen vermuten, dass die von den vorbeifahrenden Zügen verursachte Windgeschwindigkeit grösser ist, als die Ansauggeschwindigkeit der Probenahmesysteme und so keine isokinetische Probenahme vorliegt. Deshalb sollten die Messresultate mit entsprechender Vorsicht verwendet, resp. unter optimaleren Bedingungen validiert werden.

Zudem kann ein Einfluss der östlich vom Messstandort gelegenen Lärmschutzwand auf die Ausbreitung der Partikel nicht ausgeschlossen werden.

Die Immissionsmessungen an der ARA (gerade Schienenstrecke) sind nicht auf Strecken mit anderen Eigenschaften (Kurve, Steigung etc.) übertragbar, da das Emissionsverhalten deutlich anders sein dürfte und die Entstehung von Abriebpartikeln dadurch eher höher ausfallen könnte.

Die Massenkonzentrationsunterschiede zwischen den Perioden an den Quellenstandorten lassen sich nicht alleine durch Unterschiede der Windverhältnisse erklären. Die Immissionen werden noch durch weitere Faktoren, wie allenfalls der Boden- und Belagsfeuchtigkeit beeinflusst.

Die Massenkonzentrationsunterschiede zwischen den Perioden am Standort ARA lassen sich nicht mit den Schwankungen der Anzahl Zugsdurchfahrten oder Zugstypunterschiede erklären, da diese viel kleiner sind als die Massenkonzentrationsunterschiede. Sie sind sehr wahrscheinlich auf die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen zurückzuführen.

1. Fragestellung und MFM-U Ziele

Das BAFU und das Amt für Umweltschutz des Kantons Uri haben Particle Vision GmbH den Auftrag erteilt, die PM10-Anteile aus dem Schienen- und Strassenverkehr im Reusstal bei Altdorf im Zeitraum 30.09.-28.10.2016 zu quantifizieren. Die Ergebnisse sollen einerseits eine Validierung der Schienenverkehrsemissionen im Emissionskataster des Kantons Uri ermöglichen. Andererseits soll der Einfluss der A2-Autobahn- und der NEAT-Emissionen auf die Immissionen in verschiedenen Distanzen zu den Quellen in einem Transekt beurteilt werden.

Um die Variabilität der Emissionen über mehrere Wochen, wenn möglich, unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, zu untersuchen, wurden Messungen während 4 Perioden, im Wochenintervall, durchgeführt.

Ein wichtiger Bestandteil des Pilotprojektes war auch die Beurteilung der Eignung der elektronenmikroskopischen morpho-chemischen Partikelanalyse für solche quellenspezifischen Fragestellungen. Die Resultate des Methodenvergleiches zwischen dem FIDAS und der Einzelpartikelanalyse mittels Rasterelektronenmikroskopie werden in einem separaten Bericht der Firma inNET Monitoring AG publiziert.

2. Probenahme

2.1 Messstandorte

Im Rahmen der Messkampagne wurden vier Probenahmesysteme für ein West-Ost Transekt installiert. Der westlichste Standort lag an der A2, ein Weiterer bei der Inluft Messstation im Raum Gartenmatt (135 m östlich von der A2), der Dritte befand sich an der Seedorferstrasse 57 (366 m östlich von der A2) und der Vierte lag bei der Abwasserreinigungsanlage (595 m östlich von der A2) und ca. 5 m westlich der NEAT (Abbildung 4 und Abbildung 5).



Abbildung 4: Geographische Lage der Messstandorte. Satellitenbild aus Google Earth V.7.1.8.3036. (November 1, 2016). <http://www.earth.google.com>

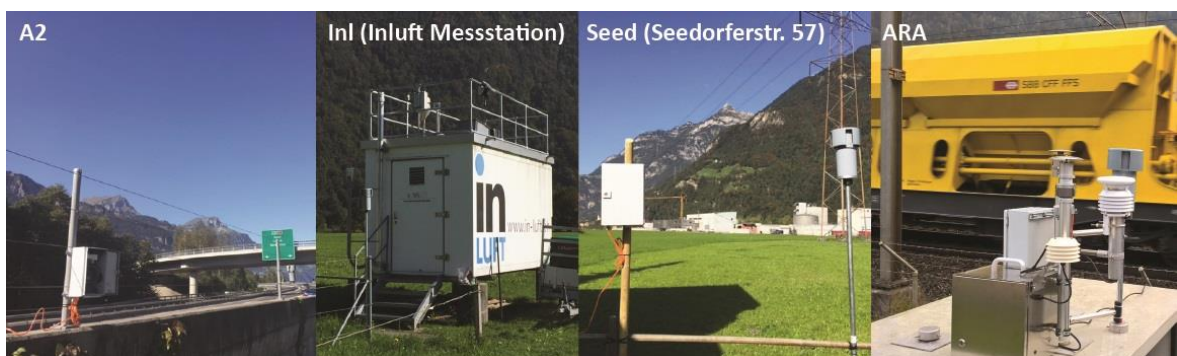


Abbildung 5: Messstandorte an der A2, der Inluft Messstation (Inl), der Seedorferstrasse 57 (Seed) und der ARA (Reihenfolge von Westen nach Osten).

Die Partikel wurden getrennt in zwei Grössenfraktionen beprobt. Diese Grössenfraktionierung hat den Vorteil, dass kleine Partikel nicht durch grosse Partikel verdeckt werden. Zudem verlangen die mikroskopischen Analysen für einen Partikelgrössenbereich zwischen 0.1 und 40 μm geometrischer Durchmesser nach der Benutzung von zwei Vergrösserungen, um grosse Partikel noch vollständig im Bildausschnitt zu haben und die kleinsten noch erkennen zu können.

2.2 Passive Probenahme (Sigma-2)



Für die morfo-chemische Charakterisierung der groben Partikel (2.5-40 μm) wurde die Partikelprobenahme mittels Sigma-2 Passivsammler (nach VDI 2119:2013) vorgenommen (Abbildung 6).



Abbildung 6: links: Sigma-2 Passivsammler; rechts: Haftoberfläche mit verschiedenen Substraten (Bor: unten rechts, C-Pad: oben rechts und Glasoberfläche: links)

2.3 Aktive Probenahme (SKC Airchek3000)



Für die morfo-chemische Charakterisierung der feinen primären Partikel ohne Russ ($d_p < 2.5 \mu\text{m}$) wurde eine aktive Partikelprobenahme mittels SKC AirChek3000 durchgeführt (Abbildung 7). Die verwendeten Partikelsammeloberflächen können für die Einzelpartikelanalytik mittels REM/EDS (Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energie-dispersiver Röntgenspektroskopie) eingesetzt werden (Kap. 3.1).



Abbildung 7: SKC Airchek3000 (links) und Probenahmegehäuse mit Polycarbonatfilter (rechts).

Messtandortbezeichnung	Standortbeschreibung	Periode	Probenahmeintervalle	Probenahmemethoden
A2	Auf der Hochwassermauer der A2 Ostseite (nahe der Ausfahrt Altdorf)	1 2 3 4	30.09.-07.10.2016 07.10.-14.10.2016 14.10.-21.10.2016 21.10.-28.10.2016	Passive (Sigma-2) und aktive (Vakuumpumpe) Probenahme
Inl	135 m östlich von der A2, bei der Inluft-Messstation	1 2 3 4	30.09.-07.10.2016 07.10.-14.10.2016 14.10.-21.10.2016 21.10.-28.10.2016	Passive (Sigma-2) und aktive (Vakuumpumpe) Probenahme
Seed	366 m östlich von der A2, Seedorferstrasse 57	1 2 3 4	30.09.-07.10.2016 07.10.-14.10.2016 14.10.-21.10.2016 21.10.-28.10.2016	Passive (Sigma-2) und aktive (Vakuumpumpe) Probenahme
ARA	595 m östlich von der A2, ca. 5 m westlich vom nächsten Schienenstrang	1 2 3 4	30.09.-07.10.2016 07.10.-14.10.2016 14.10.-21.10.2016 21.10.-28.10.2016	Passive (Sigma-2) und aktive (Vakuumpumpe) Probenahme

Tabelle 1: Angaben zu den Messtandorten, den Probenahmeintervallen und zu den Probenahmemethoden.

2.4 Wetterverhältnisse

Die Witterungsparameter, welche vor allem auf die Partikel einen Einfluss haben, wie Bodenfeuchtigkeit, Belagsnässe, Gischt aufwirbelung etc. wurden nicht im Detail erfasst. Die Auswertung der Winddaten der Meteoschweiz Messstation Altdorf zeigt auf, dass die meiste Zeit Windverhältnisse entlang der Talachse vorherrschen und aus ca. 155° (Südsüdost resp. 335° (Nordnordwest) wehen (Abbildung 8).

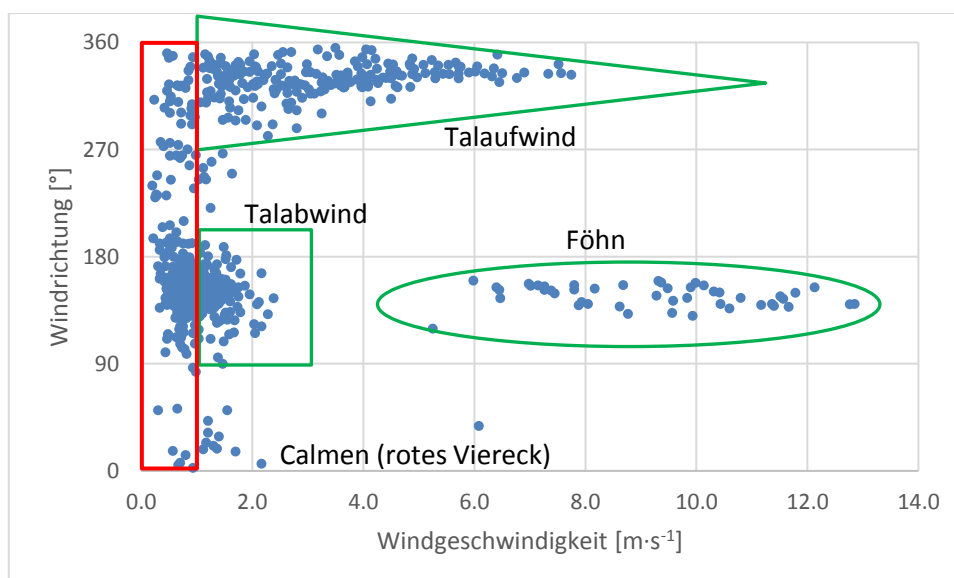


Abbildung 8: Windverteilung während der 4 Messperioden (1 h-Mittelwerte, Datenquelle Meteoschweiz)

In Abbildung 9 sind die zwei Föhnphasen in Periode 2 und 4 deutlich zu erkennen. Alle Perioden zeigen auch periodisch wiederkehrende Talaufwindphasen (Thermik) mit erhöhten Windgeschwindigkeiten aus NNW auf.

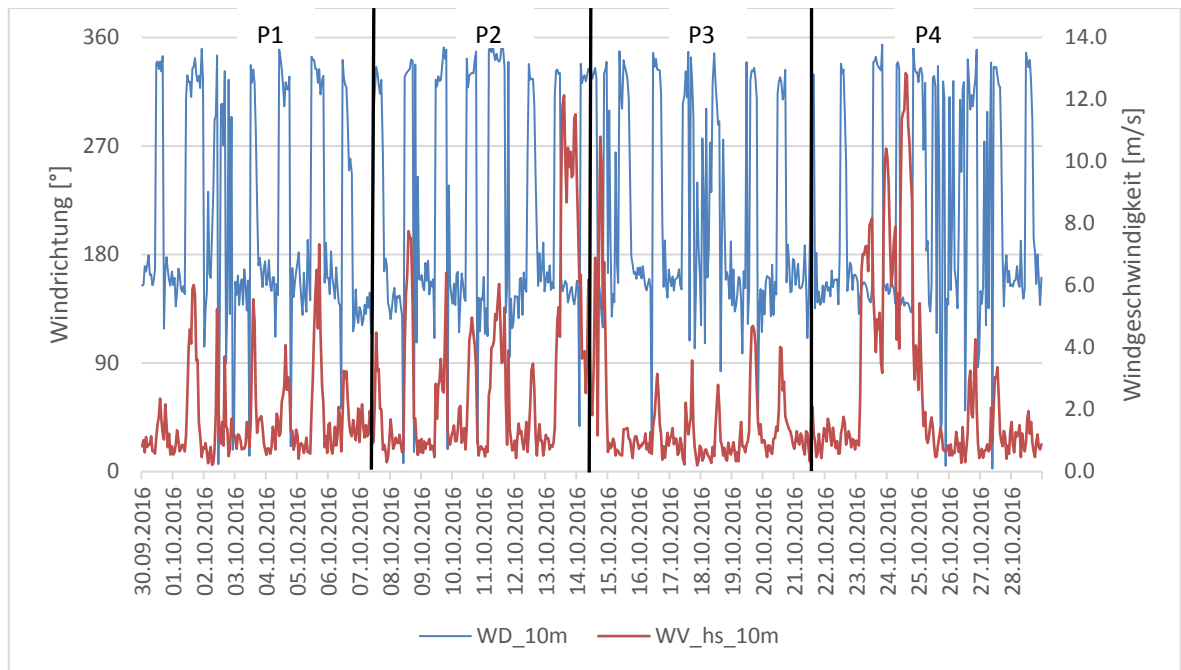


Abbildung 9: Windrichtung und Windgeschwindigkeitsverlauf während der 4 Messperioden (1 h-Mittelwerte, Datenquelle Meteoschweiz)

Die Windauswertung (Abbildung 10) zeigt, dass ca. 35 % der Zeit tiefe Windgeschwindigkeiten (Calmen) vorhanden waren, welche turbulente Windsituationen darstellen. Eine Ausnahme stellt die Periode 3 mit 50 % Calmen dar. Bei den höheren Windgeschwindigkeiten fällt auf, dass die Windhäufigkeit von Nordnordwest (See) mit 25% in den Perioden 3 und 4 weniger hoch ist als in den Perioden 1 und 2.

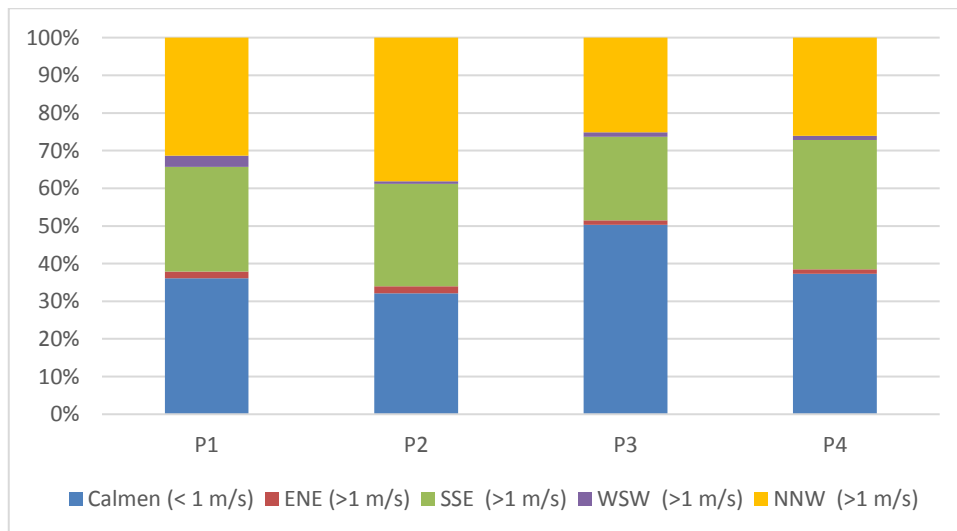


Abbildung 10: Windrichtungshäufigkeiten pro Periode, (1 h-Mittelwerte, Datenquelle Meteoschweiz)

2.5 Zugsdurchfahrten am Standort ARA

InNET Monitoring AG betreibt im Auftrag des Kantons Uri eine Lärmmessstation an der NEAT Gotthardlinie. Diese Messungen enthalten auch die Zählung der vorbeifahrenden Züge, die Geschwindigkeit und die Zuglänge. Die Zugdaten werden dabei in folgende vier Zugstypen klassiert.

- Dienstzüge (nur Lokomotiven)
- ETR-150 Personenzüge
- IR- und ICN Personenzüge
- Güterzüge

Die vier Zugskategorien unterscheiden sich vor allem in der Zuglänge und damit in der Anzahl Achsen. Diese ist der wichtigste Parameter bezüglich Schienen-Radabrieb und Bremsabrieb.

Eine Auswertung der Zugdaten bezogen auf die vier Messperioden zeigt, dass die Anzahl Züge und die aufsummierte Zuglänge im Periodenvergleich nur um wenige Prozente schwankt³. Die grösseren Abweichungen in der ersten Periode stammen davon, dass die Daten des 30.9.2016 darin fehlen. Die Werte zeigen, dass Immissionsunterschiede kaum von den kleinen Periodenunterschieden aus den aufsummierten Zuglängen (Achsenanzahl hat Einfluss auf den Abrieb) stammen können.

Periode	Dienstzüge	ETR-150	IR, ICN	Güterzüge
P1	1'608	26'415	80'476	272'278
P2	2'075	27'982	85'548	329'745
P3	1'878	27'449	85'032	333'441
P4	1'879	28'549	85'402	321'081

Tabelle 2: aufsummierte Zuglängen in m pro Periode und Zugskategorie

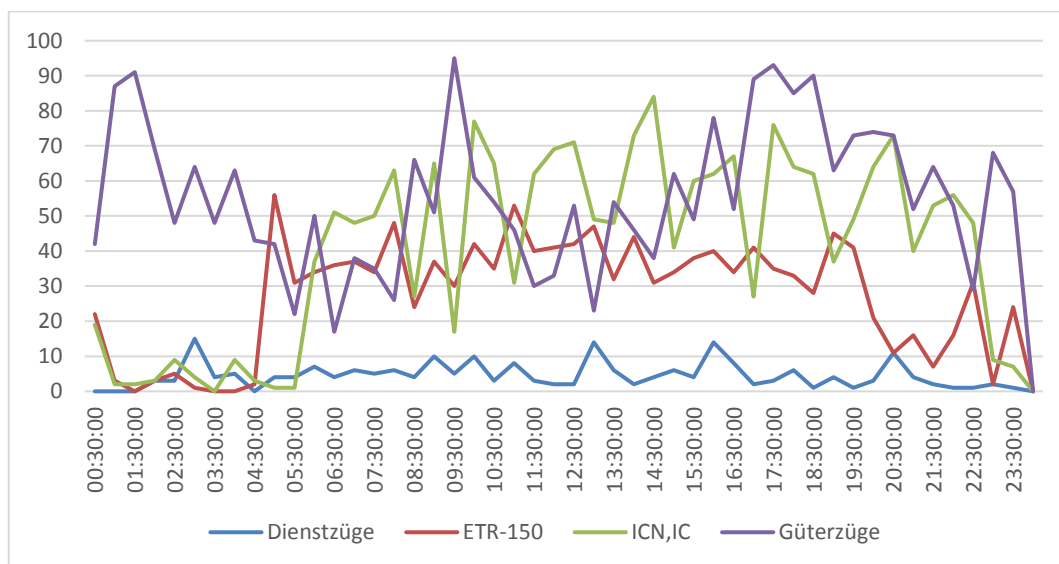


Abbildung 11: aufsummierte Anzahl Züge zwischen dem 1.10 und 28.10.2016 als Tagesgang

³ Gemäss Mail von Niklas Joos, Amt für Umweltschutz des Kantons Uri weisen die Daten der Zugskategorie Dienstzüge eine erhöhte Zählunsicherheit auf.

3. Methoden

3.1 Automatisierte Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDS)

Die 32 Proben wurden mittels automatisierter Einzelpartikel REM/EDS Analytik auf die chemische Zusammensetzung und morphologische Eigenschaften untersucht (Abbildung 12). Dabei wurden die Sigma-2 Proben (Grobstaub) mit 1'000-facher und die Airchek Proben mit 2'000-facher Vergrößerung analysiert. Mit den so erzeugten n-dimensionalen Daten lässt sich unter Verwendung des Partikelklassifikators (PACLA, Kap. 3.2) die Herkunft der Partikel und der nichtflüchtige PM10 Anteile bestimmen.

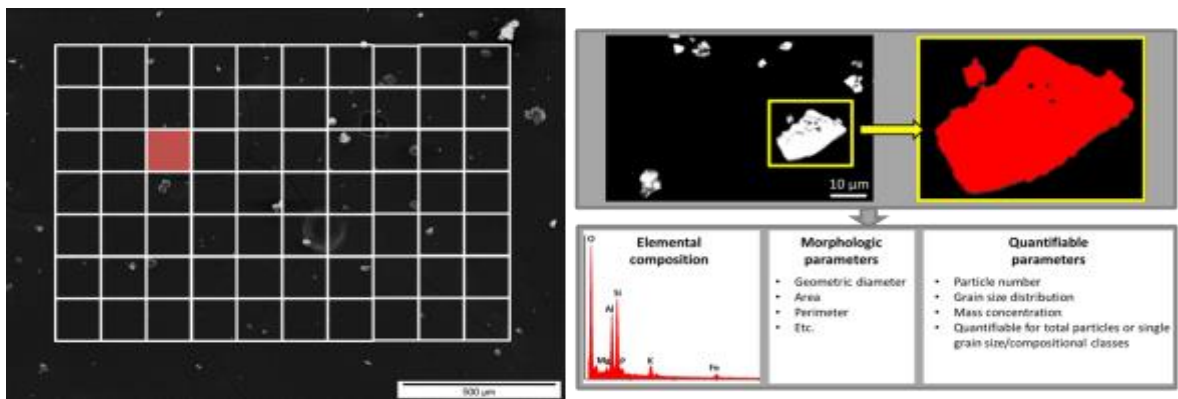


Abbildung 12: Ablaufschema der REM/EDS Analytik

3.2 Partikelklassifikator (PACLA)

Die Auswertung der grossen Anzahl von Parametern (Chemiedaten, Grössenverteilung, Formen etc.), welche aus der Einzelpartikelanalytik entstehen, ist ohne ein automatisiertes, statistisches Verfahren fehleranfällig und sehr zeitintensiv. Um diese komplexen Arbeit optimal und effizient zu gestalten, wurde die Hauptauswertung mit dem Partikelklassifikator (PACLA) vorgenommen. Dabei handelt sich um eine Software, die Particle Vision GmbH zusammen mit dem Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP) der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) und der Universität Fribourg mit Unterstützung der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) entwickelt hat.

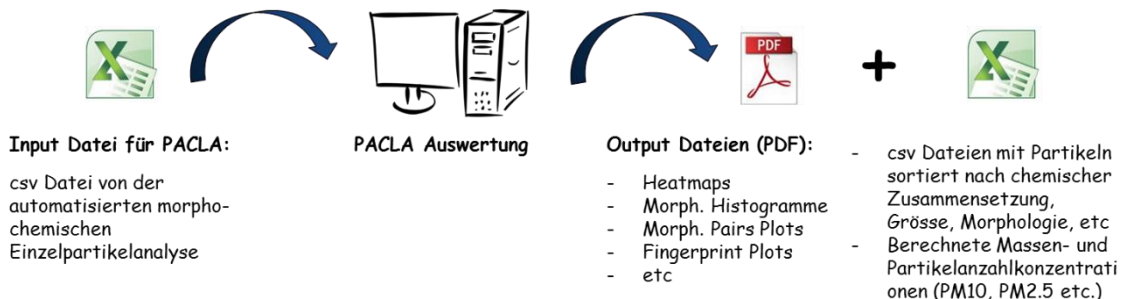


Abbildung 13: Ablaufschema der Partikeldatenauswertung mittels PACLA.

Basiert auf einer Cluster-Analyse werden die Partikel nach ihrer chemischen Zusammensetzung gruppiert und anschliessend nach ihren morphologischen Eigenschaften unterteilt (Abbildung 13). Die PACLA Klassierung umfasst 224 Haupt- und 444 Unterklassen ohne noch unbekannte Klassen.

3.3 Quellendifferenzierung

Die Quellendifferenzierung kann nur für Partikel vorgenommen werden, welche bei der Emission schon als Partikel vorliegen (primäre Partikel). Für die sekundären Partikel wie Nitrate, welche aus den Stickoxiden entstehen, kann die Differenzierung nicht vorgenommen werden, da sich diese Partikel erst nach einer stoffspezifischen Latenzzeit (Reaktionszeit) je nach Windverhältnissen weiter weg von der Quelle bilden. Dadurch, dass diese Partikel mit ca. $0.3 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser sehr klein sind, werden sie weit transportiert und sehr homogen in der Luft verteilt. Diese Eigenschaften führen dazu, dass z.B. der partikuläre Nitratanteil aus den Stickoxidemissionen der Autobahn messtechnisch nicht von übrigen Stickoxidquellen differenziert werden kann. Eine solche Differenzierung könnte allenfalls aufgrund der Emissionsbeiträge der entsprechenden Quellen modelhaft berechnet werden.

Um die Partikel mit einer definierten chemischen Zusammensetzung (z.B. Si.Fe_5 = Fe-dominierte Partikel mit Siliziumspuren) einer eindeutigen Quelle zuzuordnen zu können, wurden sie, geordnet nach verschiedenen Parametern wie PM10, PM2.5 etc, für die 4 Perioden in Transektplots dargestellt. Die Abbildung 14 zeigt beispielhaft den PM10 Transektplot für zwei chemische Klassen (Si.Fe_5 und Si.Al.Ca.Fe.S_1).

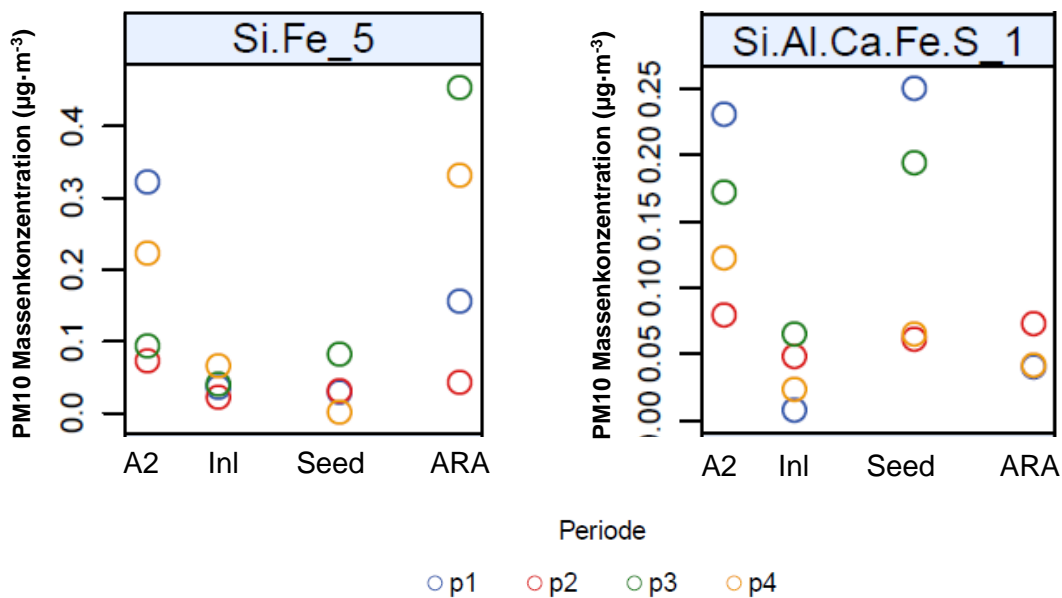


Abbildung 14: Transekt-Plots der PM10 Massenkonzentrationen für die chemischen Klassen Si.Fe_5 und Si.Al.Ca.Fe.S_1 für die vier Messperioden (p1-p4).

Mithilfe solcher Auswertungen konnte nachgewiesen werden, welche Partikel vom Strassenverkehr und welche vom Schienenverkehr emittiert werden. Fe-dominierte Partikel werden von beiden Quellen emittiert, die Massenkonzentrationen nehmen aber mit kurzer Entfernung von den Quellen schnell ab, da die grösseren Partikel eine relevante Sedimentationsgeschwindigkeit aufweisen resp. je nach Windrichtung nicht messbar sind (siehe geringere Konzentrationen am Standort Inl und Seed). Dies bedeutet, dass die erhöhten Konzentrationen an Fe-reichen Partikeln an den jeweiligen Emissionsstandorten (A2 und ARA) hauptsächlich vom jeweiligen Emittent (Strassenverkehr resp. Schienenverkehr) stammen. Die Standorte dazwischen (Inl und Seed) zeigen eine sehr ähnlich tiefe und stabile Konzentration von Si.Fe_5-Partikeln (PM10: $< 0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

über die gesamte Messzeit. Die Partikel an den quellenentfernten Standorten sind in der Regel sehr klein (Median < 2.0 µm aerodynamischer Durchmesser). Beides deutet darauf hin, dass die Fe-reichen Partikel in dieser Grösse keine Abhängigkeit zur Quellenentfernung und Windverhältnisse mehr aufweisen und homogen in der Luft verteilt werden. Somit kann angenommen werden, dass diese Konzentrationen (< 0.1 µg·m⁻³) an Si.Fe_5 Partikeln der Hintergrundkonzentration entsprechen.

Am Seed Standort sind die Konzentrationen der Fe-dominierten Partikel bei Periode 3 leicht höher als am Standort Inl. Dies ist auf die Emissionen des Strassenverkehrs auf der Seedorferstrasse unter dem entsprechenden Einfluss der Windverhältnisse zurückzuführen.

Die Konzentrationen an Si.Fe_5-Partikel am Standort A2, welche über der Hintergrundbelastung am Standort Inl liegen, können dem Motor- bzw. Fahrzeugabrieb, und somit dem Strassenverkehr zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Si.Fe_5-Partikeln bei der ARA, die ebenfalls über der Hintergrundbelastung liegen, um Schienen- und Radabrieb, und werden somit dem Schienenverkehr zugeordnet.

Die Verteilung der Si, Al, Ca, Fe, S-Partikel im Transekt zeigt dagegen ein anderes Verhalten auf, als die Fe-Partikel. Das Transektplot offenbart, dass diese Partikel von der A2 und der Seedorferstrasse 57 emittiert werden, während am Inl- und am ARA Standort entsprechend kleinere Partikeldurchmesser und damit tiefere Konzentrationen (Hintergrund) zu finden sind. Diese Partikel haben den morpho-chemischen Fingerprint von Pneumabrieb. Sie werden deshalb bei der PM10 Quellenanteilberechnungen dem Strassenverkehr zugewiesen.

3.4 Elementarer Kohlenstoff

An allen Standorten treten Russpartikel auf. Diese sind aber aufgrund analytischer Limitierungen nicht mitquantifiziert worden. Diese Partikel weisen an den Quellen sehr kleine Durchmesser auf (ca. 30 nm für frische Russkerne und 100 – 300 nm für Russagglomerate) und können nicht mit der identischen Vergrößerung analysiert werden. Zudem ist der chemische Kontrast zwischen Partikel und kohlenstoffhaltigem Substrat (Polycarbonatfilter) zu klein, sodass der analytische Fehler zu gross wäre. Für eine Bestimmung im Sigma-2 auf den Borsubstraten ist die Sedimentationsgeschwindigkeit für eine quantitative Analyse zu klein.

Deshalb muss für die Quantifizierung des elementaren Kohlenstoffs die herkömmliche Methode der Probenahme auf Quarzfaserfilter und der thermo-optischen Transmission (TOT) als Bestimmungsmethode benutzt werden.

3.5 Interpretation der Resultate

Die für das vorliegende Projekt ausgewiesenen quellenspezifischen PM10 Beiträge beinhalten nur die primären Partikel der entsprechenden Quellen, was massenmässig grob der Fraktion PM10-2.5 entspricht. Anzahlkonzentrationsmässig spielen die feineren primären Partikel eine grössere Rolle, als für die Massenkonzentration. Diese spielen vor allem bei den Schwermetallpartikeln für die Strasse- wie die Schiene eine Rolle.

4. Resultate

4.1 Undifferenzierte Massenkonzentrationen

Während die PM10 Konzentrationen an der A2 und der ARA eine sehr hohe Variabilität innerhalb der vier Messperioden aufzeigen, sind sie an der Seedorferstrasse 57 und insbesondere an der Inluft Messstation recht konstant über die gesamte Messzeit (Tabelle 3 und Abbildung 15). Dies deutet drauf hin, dass sich die groben Partikel ($d_p > 2.5 \mu\text{m}$) von der A2 nur geringfügig nach Osten ausbreiten und der Inl Messstandort hauptsächlich durch die Hintergrundkonzentration beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu sind die Standorte an der A2 und der ARA durch die jeweiligen lokalen Emittenten (Strassenverkehr und Schienenverkehr) und weiteren Parametern wie dem Niederschlag, der Windgeschwindigkeit und -richtung beeinflusst (Kap. 4.4).

Standort	Periode	TSP $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	IPM $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM2.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
A2	p1	14.2	10.5	5.9	2.1	0.8	0.09
Inl	p1	4.3	3.2	1.8	0.4	0.1	0.00
Seed	p1	8.8	6.4	3.1	0.6	0.1	0.01
ARA	p1	5.5	4.1	2.5	0.5	0.1	0.01
A2	p2	6.7	4.9	2.6	0.6	0.1	0.00
Inl	p2	3.9	3.0	1.9	0.5	0.1	0.00
Seed	p2	5.2	3.9	2.1	0.5	0.1	0.00
ARA	p2	4.8	3.6	2.2	0.5	0.1	0.01
A2	p3	9.6	7.4	4.7	1.1	0.2	0.01
Inl	p3	4.1	3.1	1.9	0.5	0.1	0.01
Seed	p3	5.5	4.3	2.8	0.7	0.2	0.01
ARA	p3	8.1	6.5	4.9	2.1	0.8	0.06
A2	p4	11.6	8.9	5.8	1.5	0.3	0.02
Inl	p4	4.3	3.2	1.8	0.4	0.1	0.01
Seed	p4	5.5	4.1	2.5	0.5	0.1	0.00
ARA	p4	16.7	12.0	6.1	1.7	0.6	0.05

Tabelle 3: Massenkonzentrationsberechnungen der primären Partikel ohne Russ pro Standort und Periode (TSP: Massenkonzentration für Partikel $d_p \leq 40 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser; IPM: Massenkonzentration der inhalierbaren Partikel).

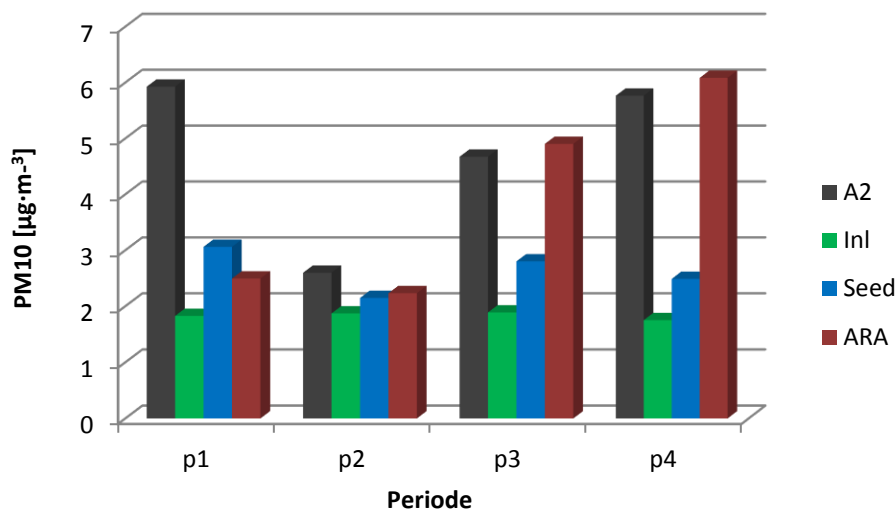


Abbildung 15: Vergleich des PM10 Massenkonzentrationsanteil an primären Partikeln an den vier verschiedenen Standorten und in den vier Perioden.

4.2 Schienen- und Strassenverkehrspartikel

Die Partikel, die vom Schienenverkehr emittiert werden, bestehen entweder ausschliesslich aus Eisen mit variablen Anteilen an Sauerstoff (Schienen- und Radabrieb) oder aus Eisen gemischt mit Silizium (auch Schienen- und Radabrieb) oder mit Kupfer, Zink und weiteren Spurenelementen (Bremsabrieb). Kupfer-Partikel von der Oberleitung werden nur vereinzelt emittiert. Der aerodynamische Durchmesser der vom Schienenverkehr emittierten Partikel schwankt meistens zwischen 1 und 20 μm .

Der Strassenverkehr emittiert ebenfalls Fe-reiche Partikel mit einer praktisch identischen chemischen Zusammensetzung wie die Partikel aus dem Schienenverkehr. Diese sind aber insgesamt kleiner (fast alle Partikel $d_p < 10 \mu\text{m}$ und mehrheitlich $d_p < 2.5 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser). Zusätzlich werden Pneumabriebpartikel mit einem sehr breiten Grössen-Spektrum (von $d_p > 100 \mu\text{m}$ bis $d_p < 5 \mu\text{m}$) und einer sehr heterogenen chemischen Zusammensetzung vom Strassenverkehr emittiert (Abbildung 16). Zusätzlich treten Russpartikel insbesondere beim Standort A2 auf. Mehr Informationen zu den berücksichtigten Partikelklassen sind im Anhang enthalten.

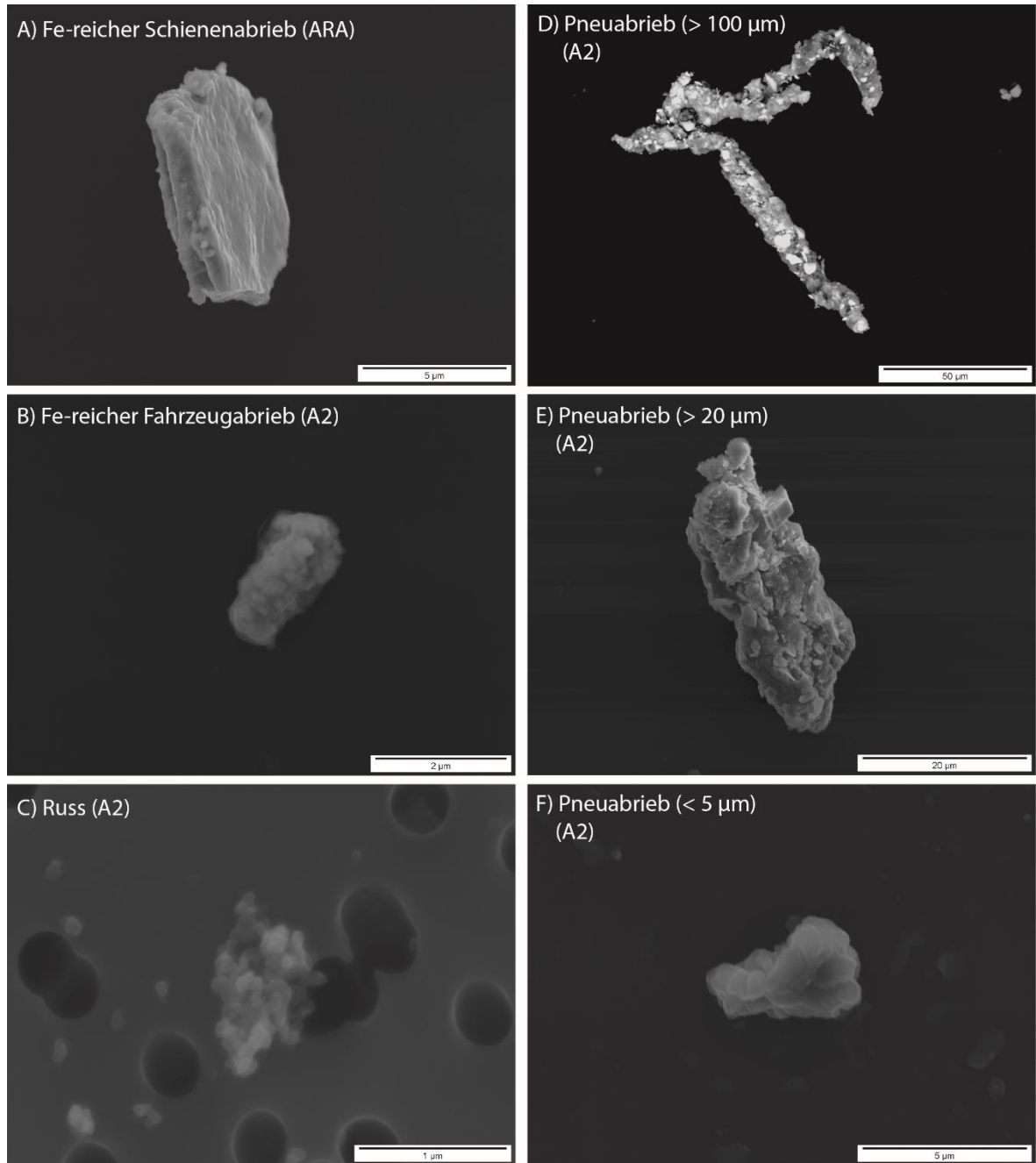


Abbildung 16: Hochaufgelöste Sekundärelektronen (SE) Bilder der vom Strassen- und Schienenverkehr emittierten Partikel: A) Fe-reicher Schienenabrieb, B) Fe-reicher Fahrzeugabrieb, C) Russagglomerate und einzelne Russkerne; D-F) Pneuabrieb in verschiedenen Grössen (von >100 bis < 5 μm).

4.3 Relative PM10 Quellenanteile

Basierend auf der chemischen Zusammensetzung wurden die Partikel in folgende Quellen aufgeteilt:

a) biogen, b) mineralisch, c) Zement, d) Bremsabrieb, e) Pneumabrieb, f) Fe-reicher Abrieb und g) andere (Abbildung 17).

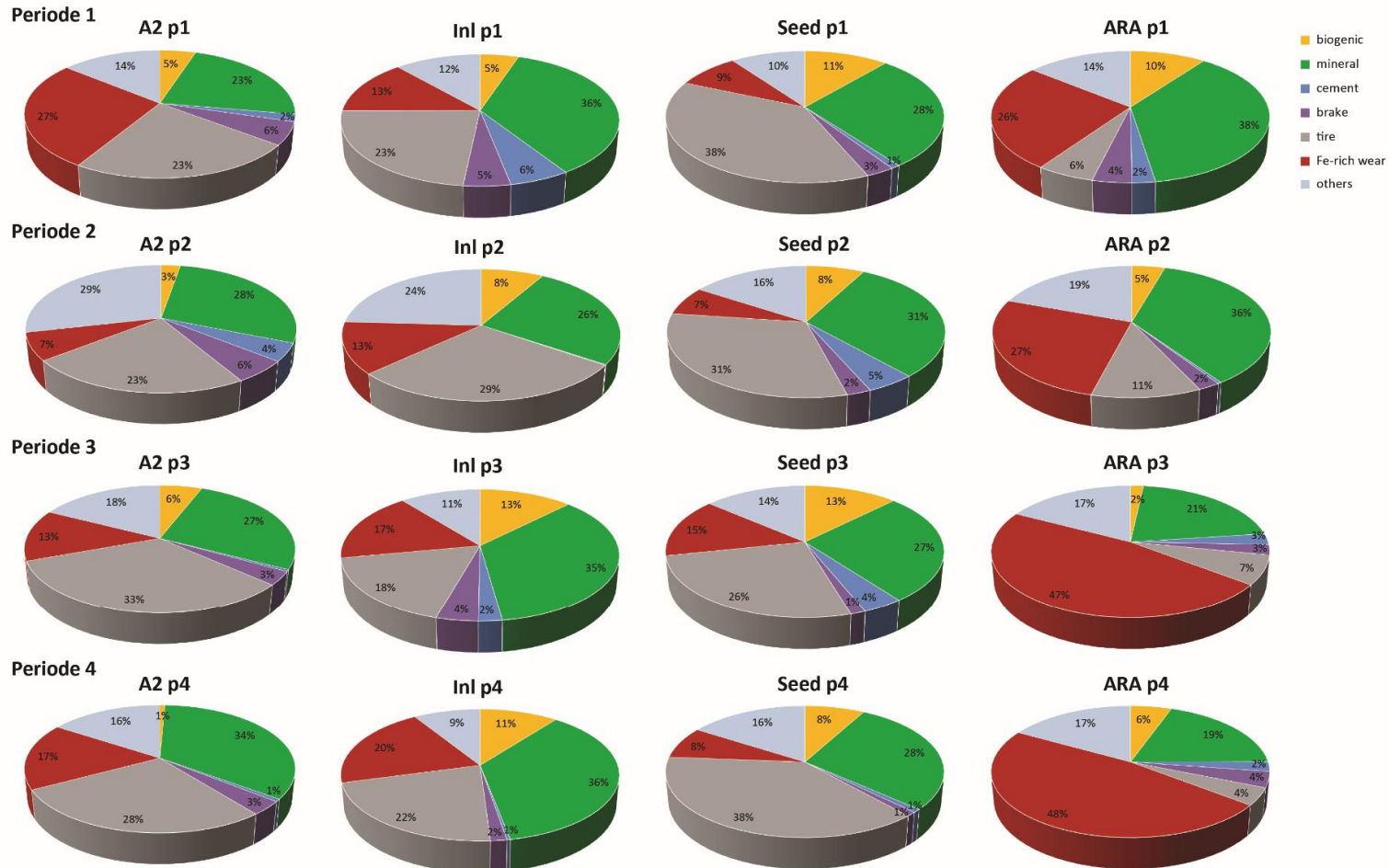


Abbildung 17: Detaillierte relative PM10 Quellenanteile (nur primäre Partikel ohne Russ) nach Standorten und Perioden.

4.4 Differenzierung der Fe-reichen Partikel

Da sowohl der Schienen- als auch der Strassenverkehr Fe-reiche Partikel (\pm Si, Ca etc.) mit einer sehr ähnlichen chemischen Zusammensetzung emittieren, müssen sie anhand anderer Kriterien unterschieden werden. Die Partikelgrösse ist dabei ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen Fe-reichen Partikeln beider Quellen. Anhand der PM10, PM4, PM2.5 und PM1 Konzentrationen an den jeweiligen Standorten und Perioden kann hergeleitet werden, welche Partikelgrösse hauptsächlich welcher Quelle zugeordnet werden kann (Tabelle 4 und Abbildung 18).

Periode 1	A2	Inl	Seed	ARA
PM10	1.61	0.25	0.26	0.64
PM4	0.84	0.05	0.05	0.12
PM2.5	0.39	0.02	0.02	0.03
PM1	0.04	0.00	0.00	0.00
Periode 2				
PM10	0.18	0.24	0.15	0.59
PM4	0.05	0.04	0.03	0.12
PM2.5	0.02	0.01	0.01	0.04
PM1	0.00	0.00	0.00	0.00
Periode 3				
PM10	0.61	0.32	0.41	2.32
PM4	0.13	0.11	0.14	1.10
PM2.5	0.04	0.04	0.05	0.44
PM1	0.00	0.00	0.00	0.03
Periode 4				
PM10	0.98	0.35	0.20	2.90
PM4	0.28	0.06	0.03	0.76
PM2.5	0.09	0.02	0.01	0.25
PM1	0.01	0.00	0.00	0.02

Tabelle 4: PM10, PM4, PM2.5 und PM1 Massenkonzentrationen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] der Fe-reichen Partikel in den jeweiligen Standorten und Perioden.

Die Transektresultate zeigen von Periode zu Periode eine grosse Variabilität der PM10, PM4, PM2.5 Konzentrationen bei den Fe-reichen Partikeln an den quellennahen Standorten A2 und ARA. Diese Schwankungen dürften stark durch die sehr lokalen meteorologischen Verhältnissen beeinflusst sein. Im Gegensatz dazu sind die PM10, PM4, PM2.5 und PM1 Konzentrationen an den dazwischen liegenden Standorten (Inl und Seed) viel stabiler, was aufgrund des Abstandes zu den Quellen plausibel ist. Da die Konzentrationen der feinen Partikel ($d_p < 2.5 \mu\text{m}$) über das ganze Transekt recht konstant sind, hat mit der langen Verweilzeit dieser Partikel zu tun (homogene Durchmischung). Eine erhöhte Konzentration einer Grössenfraktion an einem der Quellenstandorte (z.B. A2) bedeutet, dass diese Partikel von dieser Quelle selber stammen. Eine Abnahme dieser Partikel mit zunehmendem Abstand zu der Quelle (A2) bedeutet, dass der Standort ARA nicht oder nur wenig von den A2 Partikeln belastet ist. Eine identische Schlussfolgerung gilt auch umgekehrt, wobei der Standort ARA auch von der Seedorferstrasse oder von der Kantonsstrasse mit Fe-haltigen Partikeln belastet sein könnte.

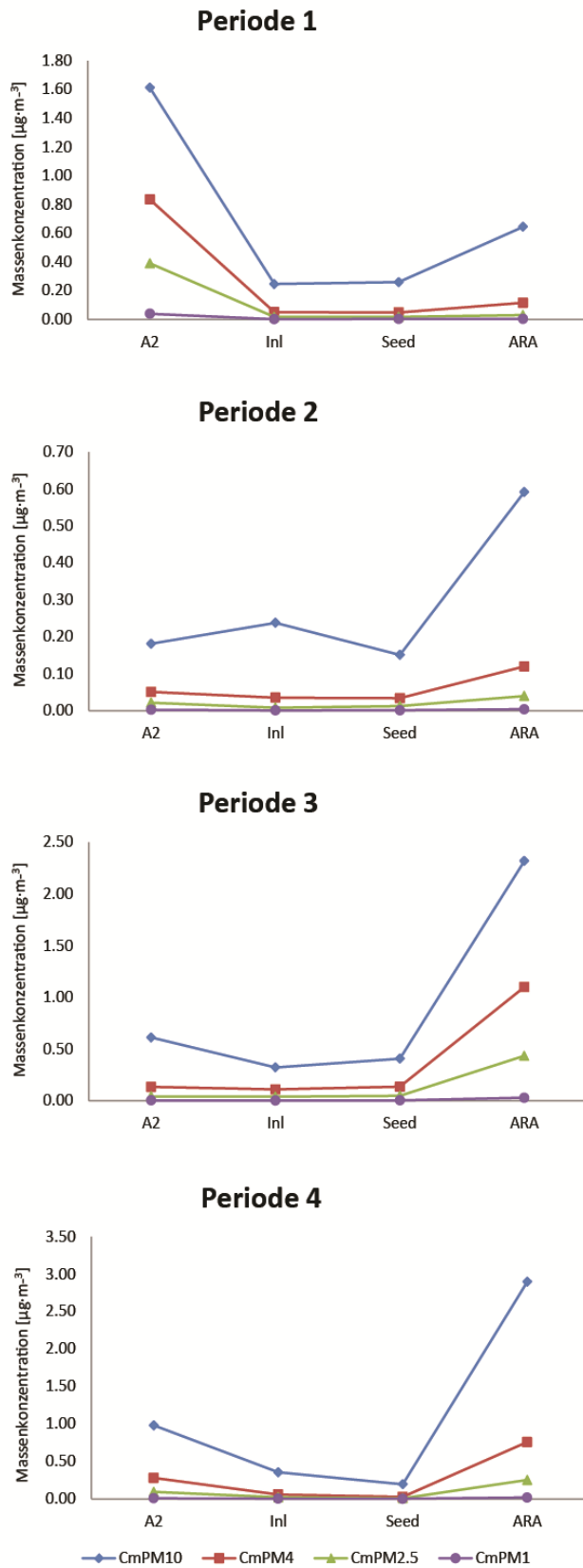


Abbildung 18: Transekt-Plots der PM10, PM4, PM2.5 und PM1 Massenkonzentrationen der Fe-reichen Partikel für die vier Perioden (unterschiedliche Y-Skalen beachten)

Die Periode 1 am A2 Standort ist als Ausnahme zu betrachten. Ein Kontrollgang am Anfang der Messkampagne zeigte auf, dass sehr viel Gischt von der Fahrbahn aufgewirbelt wurde und bis zu den Messsystemen gelangte. Die damit transportierten Partikel dürften den Anlass für die auffällig hohen Konzentrationen sein.

Dies könnte auch die auffällig tiefen Werte am Standort ARA erklären, welche zur selben Zeit gemessen wurden. Die nasse Oberfläche vermindert eine Aufwirbelung z.B. von sedimentierten Partikeln im Einflussbereich des Zugfahrtwindes.

Eine Einschätzung des Windes auf die Messwerte ist mit den FIDAS200 Daten möglich. Für die Erstellung der nachfolgenden Abbildungen wurde auf die Messwerte des FIDAS200 am InI Standort zurückgegriffen.

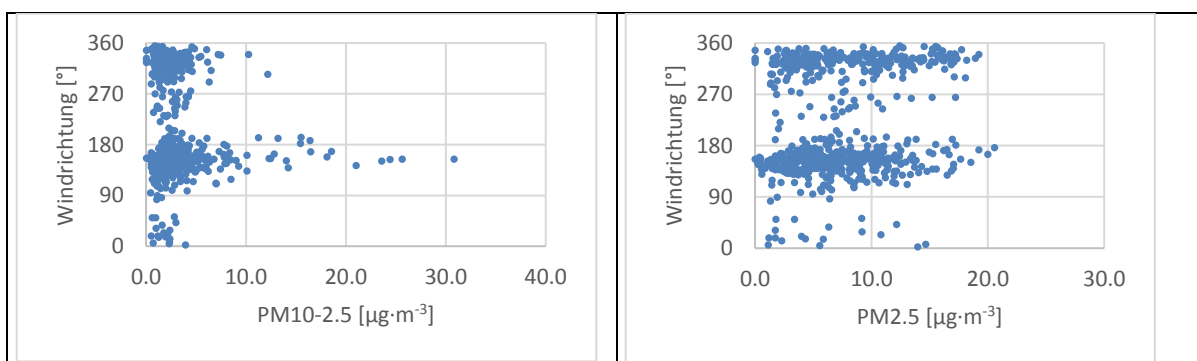


Abbildung 19: Massenkonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung; links: PM10-2.5, rechts: PM2.5

Die Abbildung 19 zeigt, dass die größeren Partikel (PM10-2.5) von Süden her vermehrt auftreten, währenddessen die feinen Partikel egal ihrer Herkunft (Windrichtung) sehr homogen verteilt sind. Es zeigt sich auch, dass der Hauptteil der PM10-2.5-Massenkonzentration aus südlicher und nördlicher Richtung stammt. Dies bedeutet für den Standort InI, dass die A2 Partikel nicht direkt westlich von der A2, sondern eher von der weiterweg liegenden A2 West-Ost Talquerung oder im Falle von Südsüdwestwind gar nicht von der A2 beeinflusst ist. Am Standort ARA verläuft die NEAT ziemlich genau in der Hauptwindrichtung, weshalb die Eisenbahnpartikel eher des Schienenstranges entlang (Nordnordwest – Südsüdost Achse) transportiert werden.

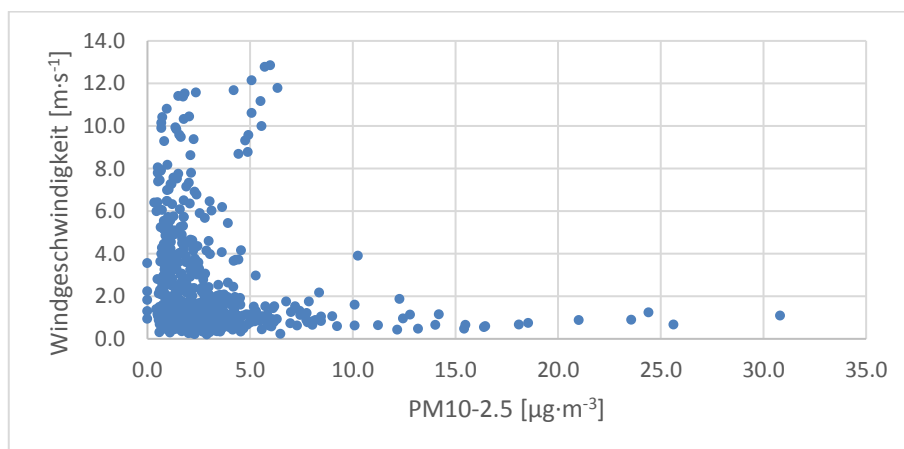


Abbildung 20: Abhängigkeit der größeren Partikel (PM10-2.5) von der Windgeschwindigkeit

Die Abbildung 20 zeigt zudem auf, dass die höchsten Massenkonzentrationen an groben Partikeln bei tiefen Windgeschwindigkeiten auftreten. Ein Spezialfall stellen die Partikel dar, welche bei hohen Windgeschwindigkeiten (Föhn) auftreten, welche in einer engen Konzentrationsgruppe von $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ auftreten. Die vorliegenden Daten lassen aber keine Schlüsse zu, um was für Partikel es sich dabei handelt.

Auf die Quellen bezogen bedeutet dies, dass die groben Partikel gut aufgrund ihrer Grösse und ihrer Chemie im Transsekt den Quellen zugeordnet werden können, während bei den feinen Partikeln dies nur über ihre Chemie möglich ist.

Dies bedeutet aber auch, dass eine Partikeldifferenzierung nach Quellen nur über die Kombination von Morphologie und Chemie gesichert möglich ist.

4.5 Absolute primäre PM10 und PM2.5-Massenkonzentrationsanteile aus dem Schienen- und Strassenverkehr und weiteren Quellen

In der folgenden Auswertung wurden die PM2.5 Konzentration der Fe-reichen Partikel am Standort InI als Hintergrundbelastung eingestuft und von den PM10 Konzentrationen an allen Standorten abgezogen. Dieser Anteil kommt sehr wahrscheinlich auch vom Strassenverkehr, kann jedoch ohne zusätzliche Messungen nicht sauber differenziert werden. Da der massenkonzentrationsmässige Anteil jedoch klein ist, stört der damit verbundene Fehler kaum. Die Massenkonzentrationen der Fe-reichen Partikel $dp > 2.5$ wurden jeweils den beiden Quellen Strassen- und Schienenverkehr zugeordnet. Die verschiedenen chemischen Zusammensetzungen, die dem Pneuabrieb zugeordnet wurden, sind im Anhang aufgelistet. Die Pneuabriebpartikel wurden logischerweise dem Strassenverkehr zugeordnet. Sie wurden aufgrund deren Grösse (meistens > 2.5 aerodynamischer Durchmesser) dem lokalen Strassenverkehr an den jeweiligen Standorten zugeordnet (d.h. A2 Standort, Quelle: A2 Autobahn und der parallel dazu verlaufenden Reussstrasse; Seed Standort, Quelle: Seedorferstrasse).

Die Abbildung 21 zeigt die über die Perioden 2 – 4 gemittelten PM10 Anteile und die Abbildung 22 die über die gleichen Perioden gemittelten PM2.5 Anteile der Hauptquellen. Die Periode 1 wurde aufgrund des hohen meteorologischen Einflusses nicht in die Mittelwertbildung einbezogen. Deutlich ist die Abnahme der von der NEAT emittierten Partikel am Standort ARA zu erkennen. Dieser Standort zeigt die tiefste Belastung an Strassenverkehrspartikel. Dies ist plausibel, weil er auch die grösste Distanz zu einer Durchgangsstrasse aufweist. Die fehlenden Eisenbahnpartikel an den anderen 3 Standorten sind auf das Windregime (Hauptwindrichtungen entlang der Talachse) und der hohen Sedimentationsgeschwindigkeit der metallhaltigen Partikel zurückzuführen. Die mineralischen Konzentrationen sind an den emissionsnahen Standorten am höchsten, was darauf hindeutet, dass diese selber mineralische Bestandteile emittieren und / oder solche auch vom erzeugten Fahrtwind suspendiert resp. resuspendiert werden.

PM10

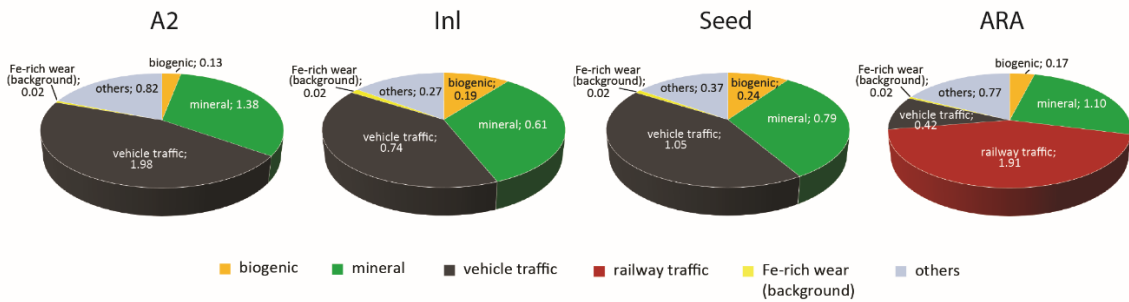


Abbildung 21: PM10 Quellenanteile (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) gemittelt über Periode 2-4. Periode 1 wurde nicht miteinbezogen, weil sich die Konzentrationen und Quellenverhältnisse, wahrscheinlich aus meteorologischen Gründen, stark von den anderen Perioden unterscheiden.

PM2.5

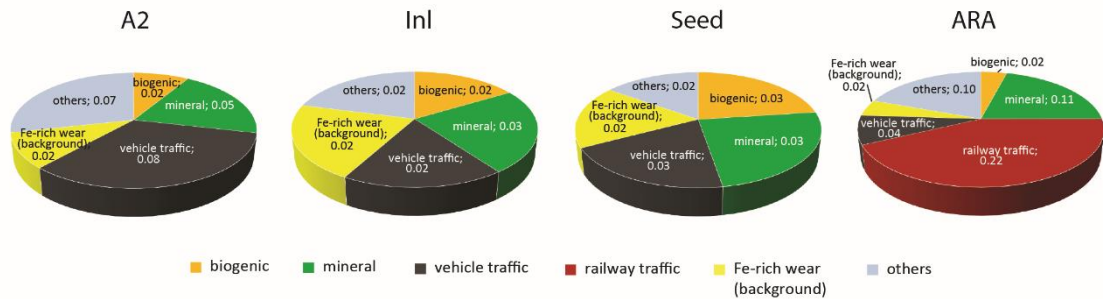


Abbildung 22: PM2.5 Quellenanteile (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) gemittelt über Periode 2-4.

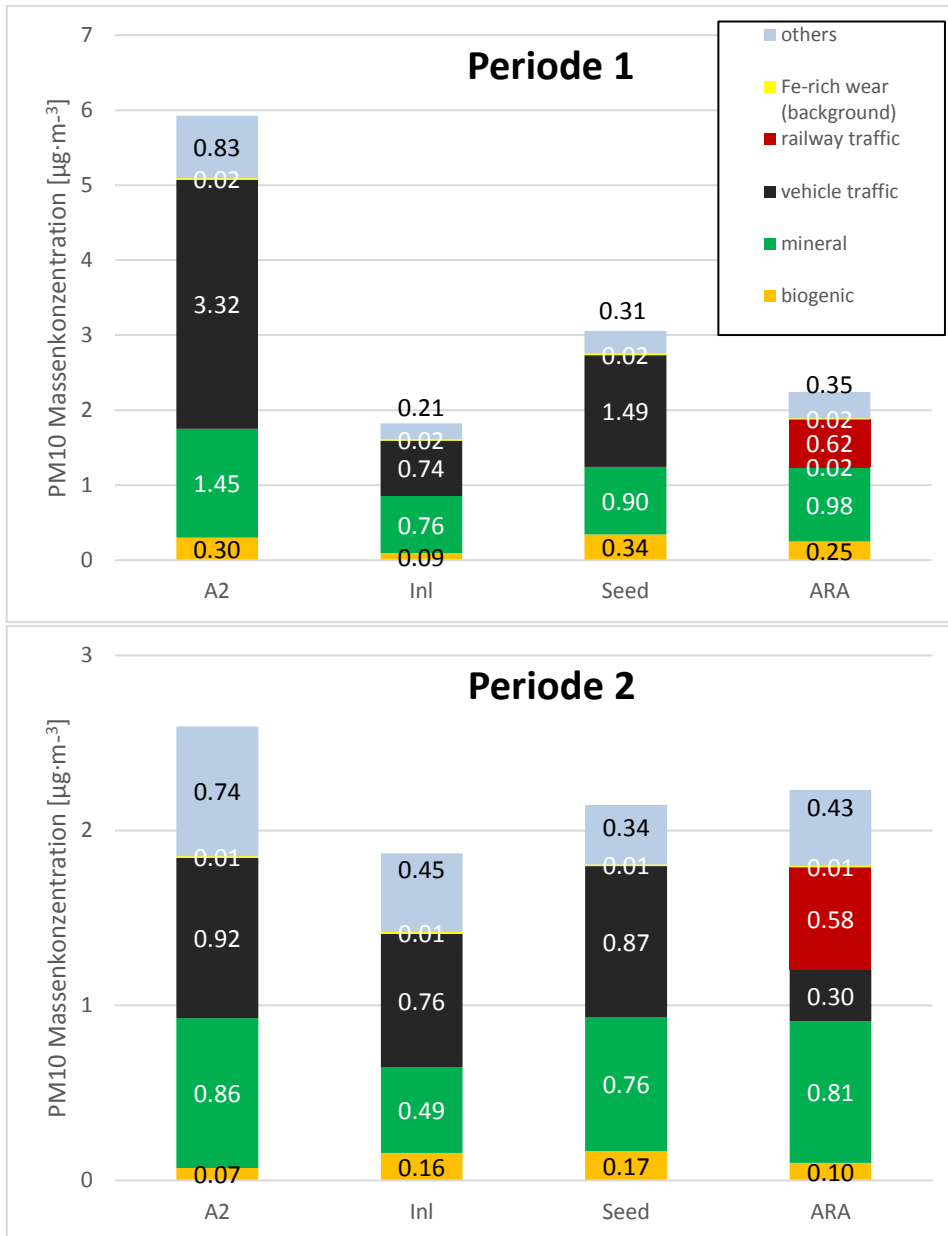
Auch beim PM2.5 weisen die zwei emissionsnahen Standorte A2 und ARA die höchsten Konzentrationen auf, was darauf hindeutet, dass diese auch primäre PM2.5 Partikel emittieren. Die unterschiedlichen Quellenbeiträge an den beiden quellenentfernteren Standorten InI und Seed sind fast identisch, was auf eine homogene Ausbreitung dieser feinen Partikel hinweist. Die Konzentrationen der "mineral"-, der "vehicle traffic"-, "Fe-rich wear"- Partikel dieser zwei Standorte kann als grobe Hintergrundbelastung an primären Partikel $d_p < 2.5 \mu\text{m}$ betrachtet werden. Dies gilt aufgrund der gleichförmigen Belastung sehr wahrscheinlich auch für die "biogenic"- Partikel.

Die massenkonzentrationsbezogene Differenz zwischen PM10 und PM2.5 (Abbildung 21 und Abbildung 22) mag auf den ersten Blick überraschend sein. Da das Partikelvolumen und damit die Massenkonzentration bezogen auf den Partikeldurchmesser mit 3. Potenz abnehmen, ist die tiefe PM2.5-Belastung an primären Partikeln jedoch plausibel⁴.

Die Unterschiede zwischen PM10 und PM2.5 betragen je nach Standort zwischen Faktor 8 und 32 und liegen damit über der theoretischen Differenz von Faktor 64. Diese erhöhten Werte kommen durch die höhere Anzahl an feinen Strassen- und Schienenverkehrspartikeln zustande.

Partikelmessungen im Gotthard Basistunnel zeigen auf, dass der Schienenverkehr eine hohe Anzahl an, zum Teil, sehr feinen (PM2.5 bzw. PM1) metallhaltigen Partikel emittiert (persönliche Mitteilungen von Thomas Zünd 2016/2017 basiert auf Particle Vision internen Messungen). Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die erwähnten Tunnelmessungen bezüglich morphologischen und chemischen Eigenschaften.

⁴ Der massenmäßige Unterschied zwischen einem 10 und einem 2.5 μm durchmessenden Partikels mit identischer Zusammensetzung beträgt Faktor 64.



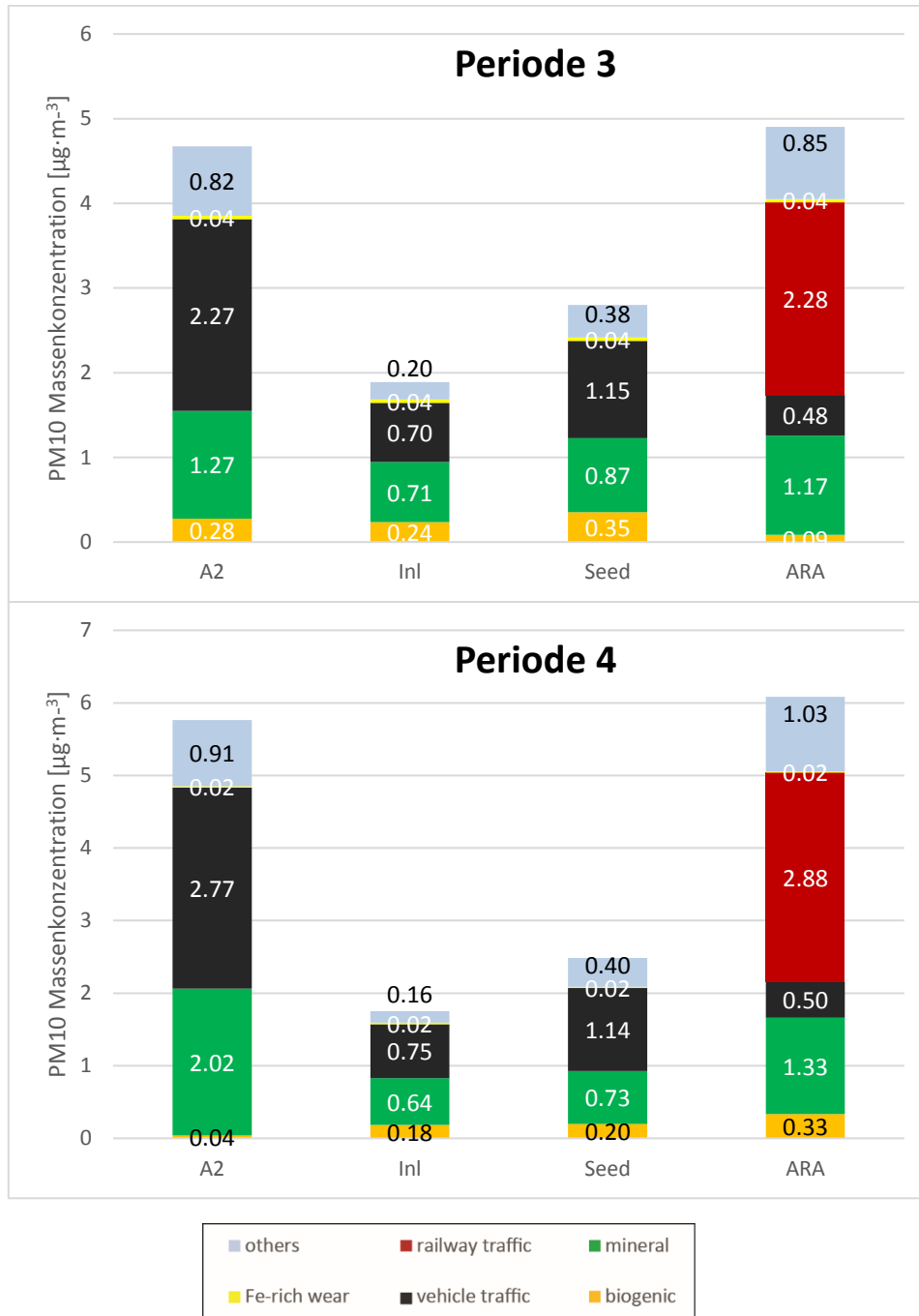


Abbildung 23: PM10 Hauptquellenanteile (in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) für die einzelnen Perioden

Die in Abbildung 23 dargestellten Konzentrationen zeigen starke Schwankungen zwischen den Perioden auf. Diese sind an den quellennahen Standorten am ausgeprägtesten und an den Standorten Inl und Seed minimal. Welche Faktoren dafür verantwortlich sind, lässt sich mit den vier Messperioden noch nicht beantworten.

Bei der Beurteilung der Schienenverkehrsimmissionen ist zu beachten, dass die Mehrheit der Züge mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Strecke ohne Kurven und Neigung vorbeifahren. Dies bedeutet, dass die Messresultate nur für diese Situation gelten und ohne weitere Messungen nicht auf andere Verhältnisse übertragen werden dürfen.

5. Vergleichbarkeit der größeren Partikel mit verschiedenen Methoden

Am inl Standort stand ein optischer Partikelzähler (FIDAS200) während der Messdauer im Einsatz und erfasste die PM10 und PM2.5 Massenkonzentrationen. Dies erlaubt einen groben Vergleich der mikroskopischen und der optischen Methode für die groben Partikel.

Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass folgende Unsicherheiten vorhanden sind:

Der FIDAS misst den optischen Durchmesser, während bei der Mikroskopie der geometrische Durchmesser der Partikel erfasst wird und anhand der Dichte jedes einzelnen Partikels in den aerodynamischen Durchmesser umgerechnet wird.

Beim FIDAS werden theoretische Dichten angenommen, bei der Mikroskopie wird die Dichte aufgrund der chemischen Zusammensetzung zugeordnet.

Vergleichsmessungen zwischen dem FIDAS200 und der gravimetrischen Referenzmethode zeigt auf, dass zum Teil grössere Unterschiede resultieren können (Information an die Kantone durch die EMPA; 2016)

Aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien wird die Übereinstimmung im vorliegenden Pilotprojekt von den Autoren als genügend beurteilt.

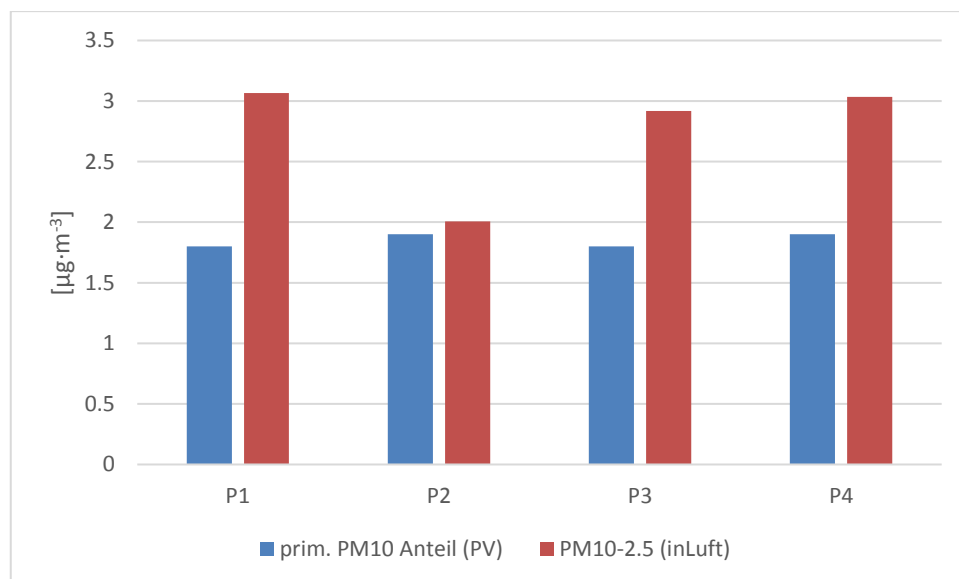


Abbildung 24: Massenkonzentrationsvergleich der groben Partikel der optischen und der mikroskopischen Methode am inl Standort (Datenquelle: InNET Monitoring AG).

Für die Berechnung der FIDAS Daten wurde die Differenz zwischen PM10 und PM2.5 auf der Basis der 30 min. Mittelwerte berechnet und diese für die Periodenintervalle gemittelt.

Für die Berechnung der REM/EDS Daten wurde der aerodynamische Durchmesser jedes einzelnen Partikels berechnet und mit der PM10-Abscheidefunktion gewichtet aufsummiert (Bsp: ein Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 12 µm hat einen Abscheidegrad von $\gamma\%$, sodass dessen Masse nur zu $\gamma\%$ in die PM10-Summe eingeht).

6. Fazit

- Der grösste Teil der massenmässigen Immissionen des Strassen- als auch des Schienenverkehrs haben keine grosse Ausbreitungsreichweite. Sie haben somit nur einen geringen Einfluss auf die Immissionsstandorte, die nicht in der unmittelbaren Nähe der Emissionsquelle liegen.
- Grössere Transportdistanzen grober Partikel ($d_p > 2.5 \mu\text{m}$) von beiden Emittenten ist windbedingt. Mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten werden die Partikel weiter weg in Windrichtung transportiert, während sie unter dem Einfluss von kleinen Windgeschwindigkeiten nahe an der Quelle sedimentieren. Unter den gegebenen Standortverhältnissen ist zu beachten, dass die Windrichtungen häufig entlang der Talachse auftreten und damit parallel zur A2 resp. der Eisenbahnlinie wehen, was eine laterale Ausbreitung der Partikel erschwert.
- Die feinen Partikel ($d_p < 2.5 \mu\text{m}$) von beiden Emittenten werden bereits innerhalb von kurzen Distanzen homogen verteilt. Aus diesem Grund ist es sehr wahrscheinlich, dass quellenentfernt vorwiegend Hintergrund zu messen ist. Über eine morpho-chemische Charakterisierung ist es aber selbst bei diesen Partikeln möglich auf die Quellen zu schliessen.
- Trotz der geringen Massenkonzentration der feinen Eisenpartikel an allen Standorten treten diese an den Standorten A2 und ARA in hoher Anzahlkonzentration auf. Dieser Sachverhalt ist auf die geringe Masse kleiner Partikel zurückzuführen (Massenabnahme in 3. Potenz zur Durchmesserabnahme). Dies bedeutet, dass für so kleine Partikel die Massenkonzentration kein aussagekräftiger Parameter darstellt, da er die Häufigkeit dieser Partikel, welche alle alveolengängig sind, unterschätzt.
- Die von der Schiene verursachten Immissionen am Standort ARA sind allenfalls nicht ganz repräsentativ. Beobachtungen bei den Wartungsarbeiten auf dem Messcontainer lassen vermuten, dass die von den vorbeifahrenden Zügen verursachte Windgeschwindigkeit grösser ist als die Ansauggeschwindigkeit der Probenahmesysteme, und somit keine isokinetische Probenahme vorliegt. Da zudem der Abstand und die Höhe der Partikelerfassung von der Quelle in einem solchen Fall von grosser Bedeutung sind, sollten die Messresultate mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden.
- Die vorliegende Auswertung kann die Periodenunterschiede nicht abschliessend beantworten. Ein Versuch diese Lücke zu schliessen könnte darin bestehen, die wichtigsten meteorologischen Grössen wie die Bodenfeuchte, Belagsfeuchte und das Auftreten von Gischt (an der A2) zu messen resp. in die Auswertung zu integrieren.

7. Empfehlungen

- Die hohe Variabilität der PM10 Massenkonzentrationen an den Quellenstandorten (A2 und ARA) über die vier 7-Tages-Messperioden weist drauf hin, dass die Ergebnisse einer solchen kurzen Messkampagne nicht auf das ganze Jahr übertragbar sind. Einerseits werden die Emissionswerte stark durch Emissionsfaktoren wie z. Bsp. Häufigkeit und Geschwindigkeit der fahrenden Fahrzeuge bzw. Züge, Typ der Fahrzeuge bzw. Züge, Beschaffenheit der Strecke (gerade Strecke, Kurve, Steigung, usw.) beeinflusst. Dies gilt insbesondere für den Schienenverkehr. Andererseits werden die Immissionen durch meteorologische Verhältnisse beeinflusst und sollten deshalb zumindest über längere Zeiträume gemessen werden, um eine stabile Datengrundlage zu erreichen.
- Um die Emissionen des Strassen- bzw. Schienenverkehrs möglichst vollständig messen zu können, sollten die Standorte in der Hauptwindrichtung liegen. Bei der Auswahl der Immissionsstandorte sollten möglichst keine interferierenden Quellen vorhanden sein. Ein Beispiel stellt der Seed Standort dar, welcher zusätzlich durch die Rolle als Autobahnzubringer und Verbindungstrasse nach Seedorf zusätzlichen Verkehrspartikeln ausgesetzt ist. Dadurch ist die Unterscheidung der Partikel von der A2 und der Seedorferstrasse nur unvollständig möglich.
- Um das Verhalten der Fe-haltigen Partikel noch besser erklären zu können, wäre ein weiterer Transektstandort östlich des Bahntrassees hilfreich. Allerdings könnte dieser allenfalls durch die Lärmschutzwand auf der Ostseite einen Einfluss auf die Partikel $d_p > 2.5$ haben. Trotzdem könnte der Einfluss der Kantonsstrasse auf den ARA Standort besser abgeschätzt werden.
- Anstelle des Sigma-2 einen Sigma-Z (PV/FUB Neuentwicklung, einsetzbar ab 2017) für die Grobstaubpartikel (PM10-2.5) einzusetzen. Bei diesem Passivsammler kann die Probenahme durch externe Signale z.B. die Windrichtung gesteuert werden

8. Anhang

8.1 Details zu Kap. 4.2

Die nachfolgenden Tabellen geben Auskunft, welche chemischen Klassen für die jeweiligen Partikelquellen berücksichtigt worden sind. Es werden dabei nur die massen- und anzahlrelevanten Klassen aufgeführt. In die Berechnungen sind jedoch alle entsprechenden Klassen eingeflossen. Unterschiedliche Ziffern hinter den Elementen geben einen Hinweis auf unterschiedliche Elementgehalte ähnlicher Verbindungen.

main source	sub sources	chemical class
vehicle traffic	brake	Al_1
		Al.Fe_1
		Al.Fe_2
		Al.Fe_3
		Ca.Fe_3
		Ca.Fe.S_2
		Ca.Fe.S_3
		Si.Al.Fe_3
		Si.Al.Fe_4
		Si.Mg.Fe_3
		Si.Fe.Cu_1
		Cr.Fe_3
		Fe.Cu_1
		Fe.Cu_2
		Fe.Cu_3
		Fe.Zn_1

vehicle traffic	tire wear	Si.Al_1
		Si.Al.Ca_1
		Si.Al.K_2
		Si.Ca.S_1
		Si.Ca.Fe_4
		Si.Ca.Fe_4
		Si.Al.Ca.Fe_1
		Si.Al.Ca.Fe_2
		Si.Al.Ca.Fe_3
		Si.Al.Ca.S_1
		Si.Al.Mg.Fe_3
		Si.Al.Ca.Na.Fe_1
		Si.Al.Ca.K.Fe_1
		Si.Ca.Fe.Cl.S_1
		Si.Al.Ca.Fe.Zn_1
		Si.Al.Ca.Fe.S_1

		Si.Al.Ca.Fe.S_2
		Si.Al.Ca.Fe.Zn.S_1
		Si.Al.Ca.Na.Fe.Cl_1
		Si.Al.Ca.Na.Fe.S_1
		Si.Al.Ca.Na.Fe.Cl.S_2

main source	sub sources	chemical class
vehicle traffic	vehicle wear	Si.Fe_3
		Si.Fe_4
		Si.Fe_5
		Ca.Fe_2
		Ca.Fe.S_1
		Mn.Fe_1
		Ti.Fe_2
		Fe_1
		Fe.Ni_1
		Fe.S_1
		Fe.S_2
		Fe.Zn_1

railway traffic	railway/wheel wear	Si.Fe_3
		Si.Fe_4
		Si.Fe_5
		Fe_1
		Ca.Fe_2
		Cu_1

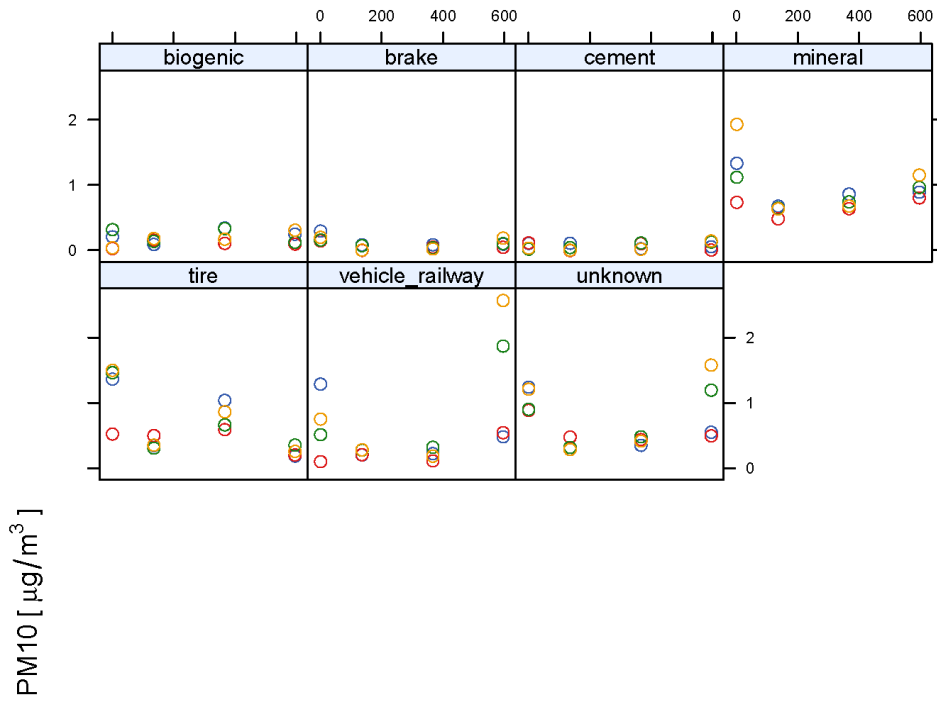
Tabelle 5: Zugehörigkeit der chemischen Klassen zu den Quellen

8.2 Details zu Kap. 4.3

Die PM10, PM4, PM2.5 und PM1 Transekte pro Quelle zeigen, dass die Pneuabriebpartikel massenkonzentrationsmässig hauptsächlich im Grössenbereich PM10-PM4 vorkommen. Sie zeigen auch auf, dass mineralische Partikel an den Quellen Strasse und Schiene erhöht sind und somit ein Teil jeweils dem Strassen- bzw. Schienenverkehr zugeordnet werden könnte. Diese Partikel sind entweder natürliche mineralische Partikel oder Strassenabrieb, welche durch Aufwirbelung zustande gekommen sind. Eine Abschätzung dieses Teils könnte über die Differenzbildung mit der Konzentration vom Inl Standort gemacht werden. Um eine stabile Aussage dazu machen zu können, wäre die Verwendung von weiteren Messresultaten empfehlenswert.

Das Auftreten der nicht zuordenbaren Partikel (unknown) deutet aufgrund der Transektverteilung ebenfalls drauf hin, dass sie zum Teil aus dem Strassen- bzw. Schienenverkehr stammen dürften. Diese Partikel haben aber keinen eindeutigen Strassen-, Schienenverkehr- oder sonstigen Quellen-Fingerprint. (Klassierungsversion Herbst 2016). Mit weiteren PACLA Klassierungstrainings wird der "unknown" Anteil steigt abnehmen und damit die Klassierungsgrad heraufsetzen.

PM10

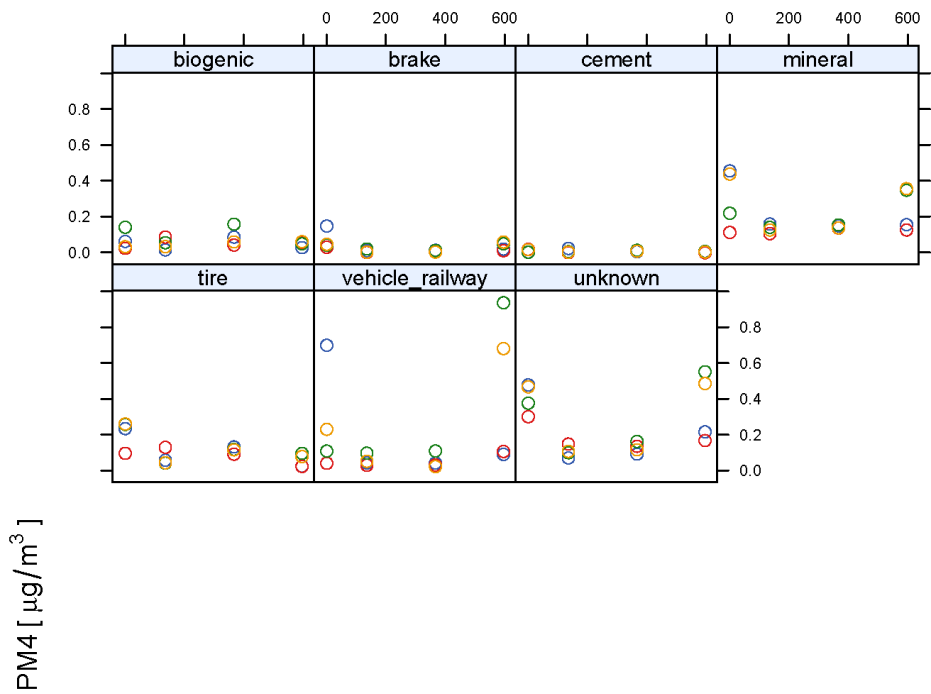


distance [m]

Periode

○ p1 ○ p2 ○ p3 ○ p4

PM4

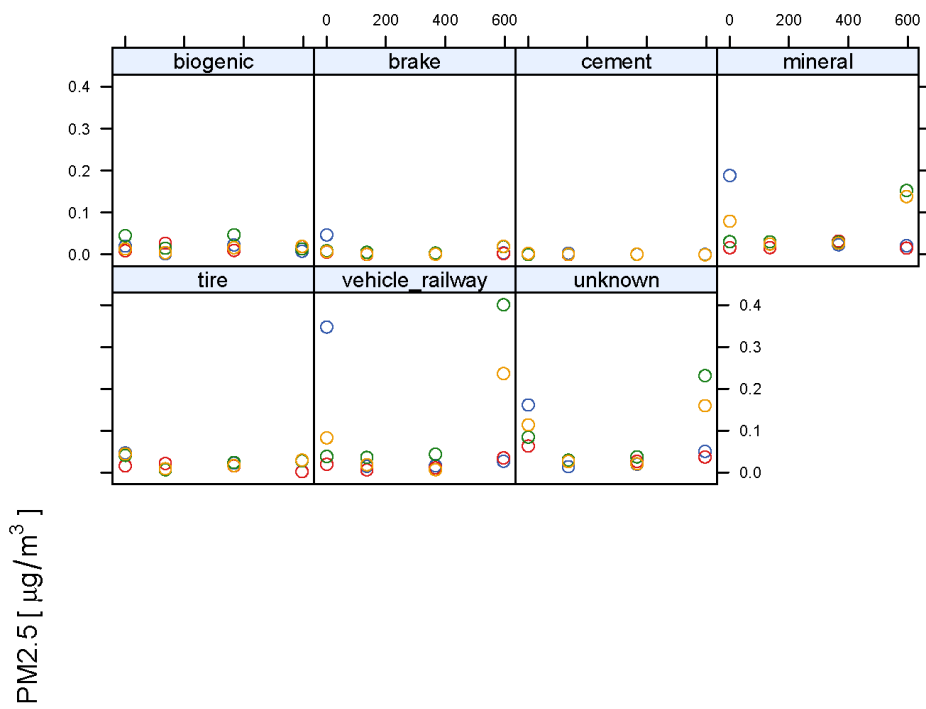


distance [m]

Periode

○ p1 ○ p2 ○ p3 ○ p4

PM2.5

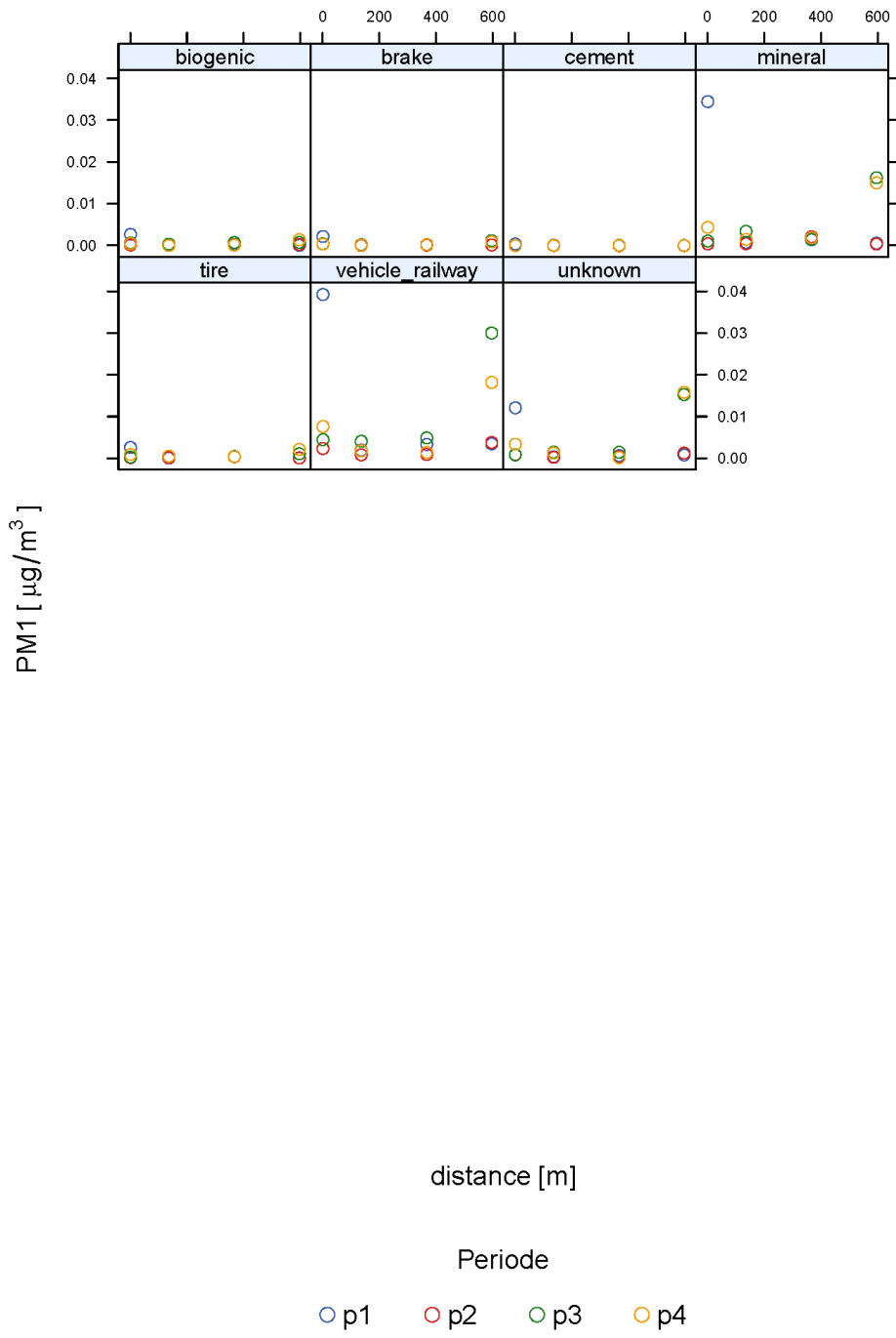


distance [m]

Periode

○ p1 ○ p2 ○ p3 ○ p4

PM1



8.3 Details zum Kap. 4.5

Mit den klassierten Einzelpartikeldaten lässt sich die mittlere PM2.5 Massenkonzentration an den verschiedenen Standorten berechnen. Die Konzentrationen des inl- und Seed Standortes lassen eine grobe Abschätzung der Hintergrundkonzentration an primären PM2.5 Partikel zu. Der Standort Seed ist bei den "vehicle traffic"- Partikel jedoch schon von der nahen Seedorferstrasse beeinflusst. Ob der tiefere "vehicle traffic" Wert am Standort ARA die bessere Schätzung für diese Quelle darstellt, oder ob dieser Wert durch die dort herrschenden Probenahmeverhältnisse beeinflusst ist, lässt sich aufgrund der kurzen Messkampagne nicht beurteilen.

