Particle Vision

Passage du Cardinal 13B, 1700 Fribourg, Schweiz

Staubmonitoring des Steinbruchs Auenstein/Veltheim der Jura-Cement-Fabriken AG

Resultate der Messkampagne 2025



Freiburg, 11.6.2026
Version 1.0

Auftraggeber	**Projektleitung**	**Autoren**
Jura Cement SA Talstrassse 13 5103 Wildegg	Andreas Kofler Markus Bolliger Projekte Steinbrüche	Dr. Juanita Rausch Dr. David Jaramillo Vogel Particle Vision GmbH

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		**2**
Zusammenfassung		**3**
1.	**Ausgangslage und Fragestellung**	**6**
2.	**Messstandorte und Probenahme**	**7**
2.1	Staubniederschlag-Probenahme (Bergerhoff-Topf)	9
2.2	Grobstaub-Probenahme (Sigma-2 Passivsammler)	9
3.	**Methoden**	**10**
3.1	Gravimetrische Staubbestimmung	10
3.2	Automatisierte Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDS)	10
3.3	Partikelklassifikator (ASPA MC2®)	10
3.4	Monitoring-Strategie	12
4.	**Resultate**	**13**
4.1	Staubniederschlag (Gravimetrie)	13
4.2	Morpho-chemische Charakterisierung und Quellendifferenzierung des Grobstaubes 2.5 – 80 µm (REM/EDS ASPA MC2®)	15
5.	**Wichtigste Ergebnisse**	**20**
6.	**Fazit**	**21**
7.	**Referenzen**	**22**
8.	**Anhang**	**23**
8.1	Heatmap Lesebeispiel	23
8.2	Heatmaps Emissionsstandort JCF2	23
8.3	Heatmaps Immissionsstandort JCF3	36

Zusammenfassung

Die Jura-Cement-Fabriken (JCF) haben sich nach der ersten Staubmonitoring-Messkampagne (2016) verpflichtet, die Staubemissionen am Standort Steinbruch Garage (JCF2) um ein Drittel zu reduzieren. Für die Überwachung der Staubemissionen und um die Staubreduktion dokumentieren zu können, wurde in den Jahren 2017-2025 erneut ein quellendifferenzierendes Staubmonitoring mit Particle Vision GmbH durchgeführt. Der vorliegende Bericht präsentiert die Resultate zwischen dem 14. Februar 2025 und dem 13. Februar 2026. Dazu wurde bei den wichtigsten Messparametern ein Vergleich zu den vergangenen Jahren gezogen.

Die Aufgabe war, den Staub, welcher aus den Steinbruchaktivitäten stammt, am Emissionsstandort (JCF2) zu differenzieren und zu quantifizieren. Zusätzlich wurde ab dem 3. Oktober 2023 am Standort JCF3 (Feldacher) gemessen. Die Motivation dafür war die Überwachung des Gebietes um den erweiterten Steinbruch. Somit wurde im vorliegenden Messjahr (Feb. 2025 – Feb. 2026) der Staub an zwei Standorten (JCF2 und JCF3) kontinuierlich beprobt, analysiert und schliesslich differenziert.

Für die Staubüberwachung wurde seit Messbeginn ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Einerseits wurden einmonatige Bergerhoffproben auf die Staubniederschlagmenge nach VDI 4320 Blatt 1 untersucht und mit dem LRV-Jahresgrenzwert verglichen. Anderseits wurden in zweiwöchigen Probenahmenintervallen Sigma-2 Proben mittels Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDS) analysiert, um die Massenkonzentration des Grobstaubes (2.5 - 80 µm) nach VDI 2119 Blatt 4 zu ermitteln. Für die detailliertere Partikelcharakterisierung wurden die morpho-chemischen Informationen aus der REM/EDS Einzelpartikelanalytik beigezogen. Mit diesen Daten und unter Berücksichtigung quellenspezifischer Referenzproben (d.h. Materialproben aus den Steinbruch-Ablagerungen und für den Einsatz in der Zementproduktion), wurde eine detaillierte Quellenzuordnung und eine Berechnung der Anteile der verschiedenen Quellen (Steinbruchpartikel vs. andere Partikel, welche biogene, geogene und Verkehrspartikel umfassen) vorgenommen.

Die Resultate der Messkampagne im Jahr 2025 zeigen auf, dass der Staubniederschlag am Emissionsstandort JCF2 (Jahresmittelwert: 133 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) und am Immissionsstandort JCF3 (Jahresmittelwert: 89 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) unter dem Immissions-Jahresgrenzwert von 200 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ lag.

Die Grobstaubbelastung (2.5-80 µm) im Steinbruch selbst und in der Umgebung wird von verschiedenen Partikelquellen beeinflusst. Bis 2018 bestanden die Staubemissionen aus dem Steinbruch hauptsächlich aus lokalem Kalkstein und Mergel. Im Jahr 2019 wurden zusätzlich neben Kalkstein und Mergel aus anderen Steinbrüchen (z.B. Seekreide und Bözberg-Kalkstein/Mergel) auch silikatische Gesteine (z. B. Moräne und Auffüllmaterial aus Gubrist, Bözberg und Giessereialtsand) in den Steinbruch geliefert. Zusätzlich wurde in den Jahren 2024-2025 zeitweise Holzasche in den Steinbruch geliefert und in das Material beigemischt. Daher wurden Referenzproben der neuen potenziellen Staubquellen immer im parallel zu den neuen Aktivitäten/Materiallieferungen genommen, um die respektiven Fingerprints zu bestimmen und in die Partikelbibliothek als «Steinbruchpartikel» einzufügen.

Ausser dem Kalkstein, Mergel und den silikatischen Partikeln aus dem Steinbruch sind auch natürliche (Pollen, Sporen und geogener Staub) und anthropogene Partikel (meist aus dem Strassenverkehr wie z. B. Pneu- und Bremsabrieb, welche typische Bestandteile der untersuchten Partikelfraktion: 2.5 - 80 µm sind) vorhanden. Diese beeinflussen die Staubkonzentration je nach Jahreszeit unterschiedlich und machten im Messjahr 2025 am Standort JCF2 zwischen 13 % (Periode 5) und 88 % (Periode 21) und am Standdort JCF3 zwischen 35 % (Periode 4) und 89 % (Periode 25) des gesamten Grobstaubes aus. Das bedeutet gleichzeitig, dass der relative und absolute Anteil an Steinbruchpartikeln über das ganze Jahr auch stark variieren kann (Abbildung 1). Deshalb kann kein konstantes Verhältnis zwischen Steinbruchpartikeln und anderen Partikeln angenommen werden. Im Durchschnitt betrug der Anteil der Partikel aus anderen Quellen als aus dem Steinbruch am

Standort JCF2, 33 %. Der Jahresmittelwert der Grobstaubbelastung (2.5-80 µm geom. Partikeldurchmesser) durch die Summe von Kalkstein, Mergel, Holzasche und silikatischen Partikeln (z.B. Moräne und Auffüllmaterial) aus den Steinbruchaktivitäten betrug an dem Emissionsstandort JCF2, 22.9 µg·m^{-3} (rote Linie in der Abbildung 1). Somit wurde im Vergleich zu dem Mittelwert der Steinbruchemissionen am JCF2 von 35 µg·m^{-3} aus der Messkampagne 2016 (schwarze Linie in der Abbildung 1) eine Abnahme von 35 % festgestellt (Abbildung 2). Diese ist um 13% höher als die Abnahme des vergangenen Jahres (2024 = 48 %). Dies bedeutet, dass der Zielwert (d.h. 1/3 der Staubemissionen vom Jahr 2016), welcher im Jahr 2018 erreicht wurde, im Jahr 2025 sowie im Jahr 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 und 2024 weiterhin aufrechterhalten wurde (Abbildung 2). Dennoch sollen die Emissionen/Immissionen aus dem Steinbruch im Auge behalten werden, da im Jahr 2025 eine Zunahme der Staubkonzentrationen aus dem Steinbruch im Vergleich zu den vergangenen Jahren festgestellt wurde.

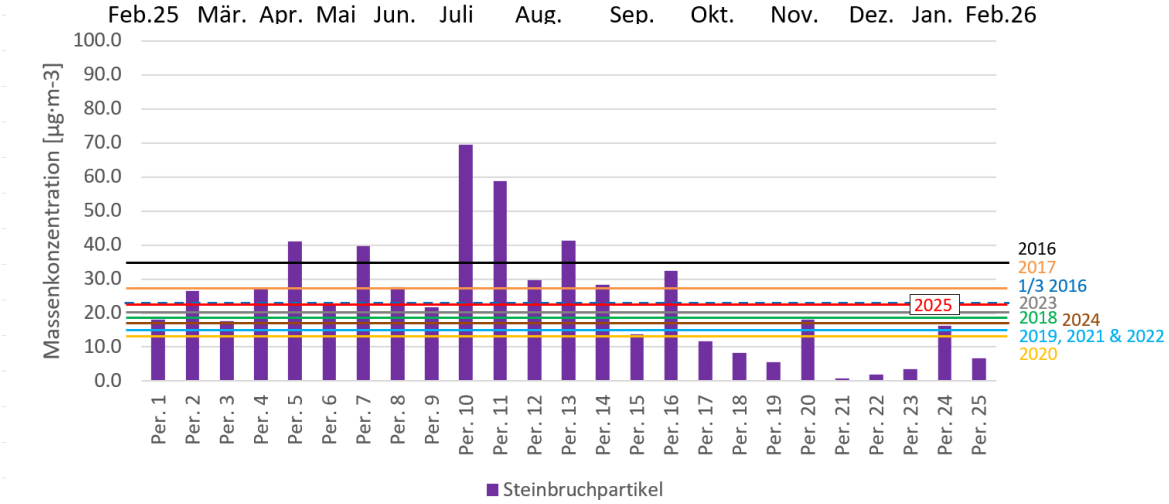


Abbildung 1: Konzentrationsverlauf der Steinbruchpartikel am JCF2 während der Messkampagne 2025. Schwarze Linie: Mittelwert aus der Messkampagne 2016 (berechnet aus 4 Stichperioden); orange Linie: Jahresmittelwert aus der Messkampagne 2017; gestrichene, blaue Linie: Zielwert, der eine Reduktion der Staubemissionen aus dem Steinbruch Auenstein/Veltheim um 1/3 des Mittelwertes aus dem Jahr 2016 entspricht. Graue Linie: Jahresmittelwert aus der Messkampagne 2023. Grüne Linie: Jahresmittelwert aus der Messkampagne 2018. Hellblaue Linie: Jahresmittelwert aus den Messkampagnen 2019, 2021 und 2022. Gelbe Linie: Jahresmittelwert aus der Messkampagne 2020. Braune Linie: Jahresmittelwert aus der Messkampagne 2024. Rote Linie: Jahresmittelwert aus der diesjährigen Messkampagne 2025.

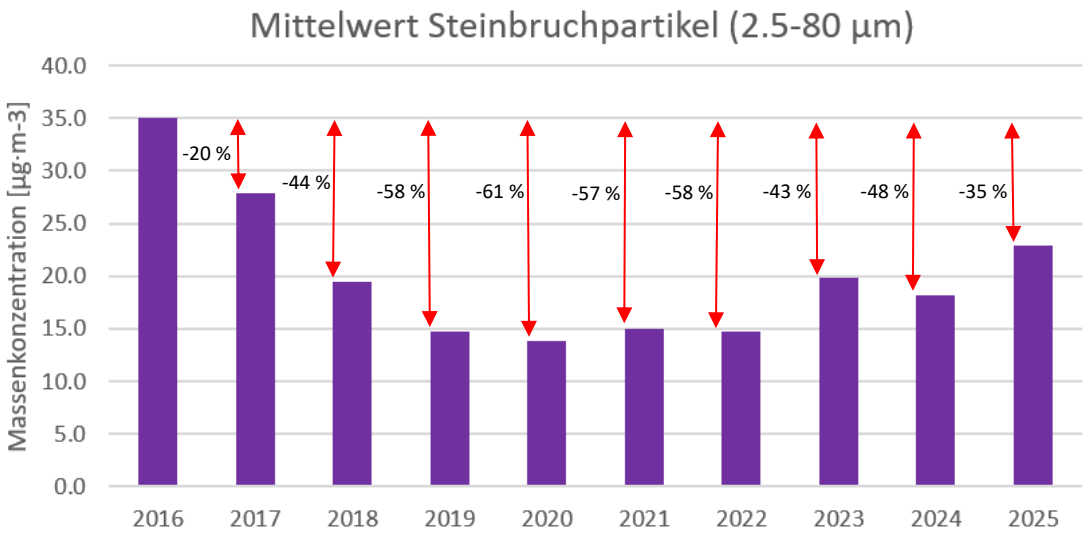


Abbildung 2: Vergleich der Jahresmittelwerte für die Massenkonzentration an Steinbruchpartikeln (2.5-80 µm geom. Durchmesser) der Messkampagnen 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 und 2025 für den Standort JCF2.

Am Immissionsstandort JCF3 betrug der Jahresmittelwert der Grobstaubbelastung (2.5-80 µm geom. Partikeldurchmesser) aus den Steinbruchaktivitäten 4.5 µg·m^{-3} (rote Linie in der Abbildung 3). Im Vergleich zum gleichen Zeitraum entspricht diese Konzentration ca. 20 % der Belastung durch Steinbruchpartikel am Standort JCF2.
Im Durchschnitt betrug die Konzentration der Partikel aus anderen Quellen als aus dem Steinbruch 8.7 µg·m^{-3} und somit 69 % des Gesamtstaubes am Standort JCF3.

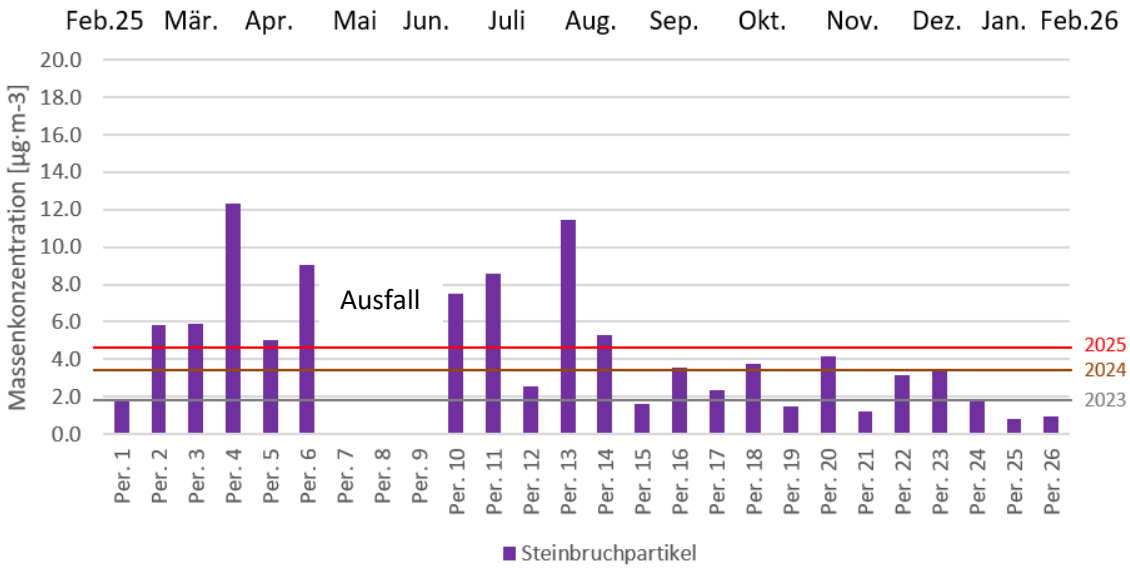


Abbildung 3: Konzentrationsverlauf der Steinbruchpartikel am JCF3 während der Messkampagne 2025. Rote Linie: Mittelwert aus der Messkampagne 2025. Braune Linie: Mittelwert aus der Messkampagne 2024. Graue Linie: Mittelwert aus der Messkampagne 2023.

1. Ausgangslage und Fragestellung

Die Jura-Cement-Fabriken (JCF) führen seit Ende Januar 2016 ein Staubmonitoring, das die Aktivitäten im Steinbruch Auenstein/Veltheim überwacht, mit Particle Vision GmbH durch. Im Jahr 2016 wurden die Staubemissionen und -immissionen aus dem Steinbruch Auenstein/Veltheim an mehreren Orten (vier permanent und sechs saisonal betriebene Standorte) in Detail untersucht. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde im Juni 2017 die Anzahl der Standorte reduziert. Es wurde entschieden, am Emissionsstandort JCF2 eine detaillierte Staubdifferenzierung über das ganze Jahr durchzuführen. Die Aufgabe war die Entwicklung der Emissionen zu dokumentieren, da JCF sich verpflichtet hat, die Staubemissionen um einen Drittel in Bezug auf den Mittelwert 2016 zu senken.

Zusätzlich dazu wurden die Proben des Immissionsstandortes JCF1 bis Mai 2020 weiter auf ihre Konzentration analysiert, und die Staubimmissionen auffälliger Perioden morpho-chemisch charakterisiert und nach Quellen differenziert. Diese Messstrategie wurde ab Mai 2020 angepasst, indem am JCF1 weiterhin Proben genommen aber nicht analysiert wurden. Diese stellten Reserveproben dar, welche zur Beurteilung von eventuellen auffälligen Staubereignissen bzw. Klagen der Bevölkerung zur Verfügung standen. Im Oktober 2023 wurde eine weitere Anpassung des Messkonzeptes unter Berücksichtigung der Steinbrucherweiterung Richtung Westen vorgenommen. Um die Staubbelastung durch die Steinbrucherweiterung überwachen zu können, wurde der Standort JCF3 Feldacher aus der ersten Messkampagne von 2016 wieder aktiviert und seit Oktober 2023 Proben synchron zu JCF2 genommen und anschliessend auf die Partikeldifferenzierung und Quantifizierung analysiert.

Die detaillierte Partikelherkunftsbestimmung der Proben aus dem Emissionsstandort JCF2 und dem Immissionsstandort JCF3 sollen einerseits weiterhin als Erfolgskontrolle der umgesetzten Massnahmen und anderseits als Überwachungsmechanismus für die neuen Aktivitäten im westlichen Bereich des Steinbruches dienen.

2. Messstandorte und Probenahme

Das betriebene Messnetz im Jahr 2025 umfasste die Standorte A) JCF2, Steinbruch Garage und B) JCF3, Feldacher (beide über das ganze Jahr). Die Lage der Messstandorte JCF2 und JCF3, welche genau der Lage der früheren Messkampagnen entsprach, sind in der Abbildung 4 zu sehen. Alle Standorte dienten einerseits der Erfassung des Staubniederschlags für Partikel mit einem geometrischen Durchmesser < 1 mm, der Staubmassenkonzentration für Partikel zwischen 2.5-80 µm geometrischem Durchmesser, und anderseits ihrer Herkunftsbestimmung.

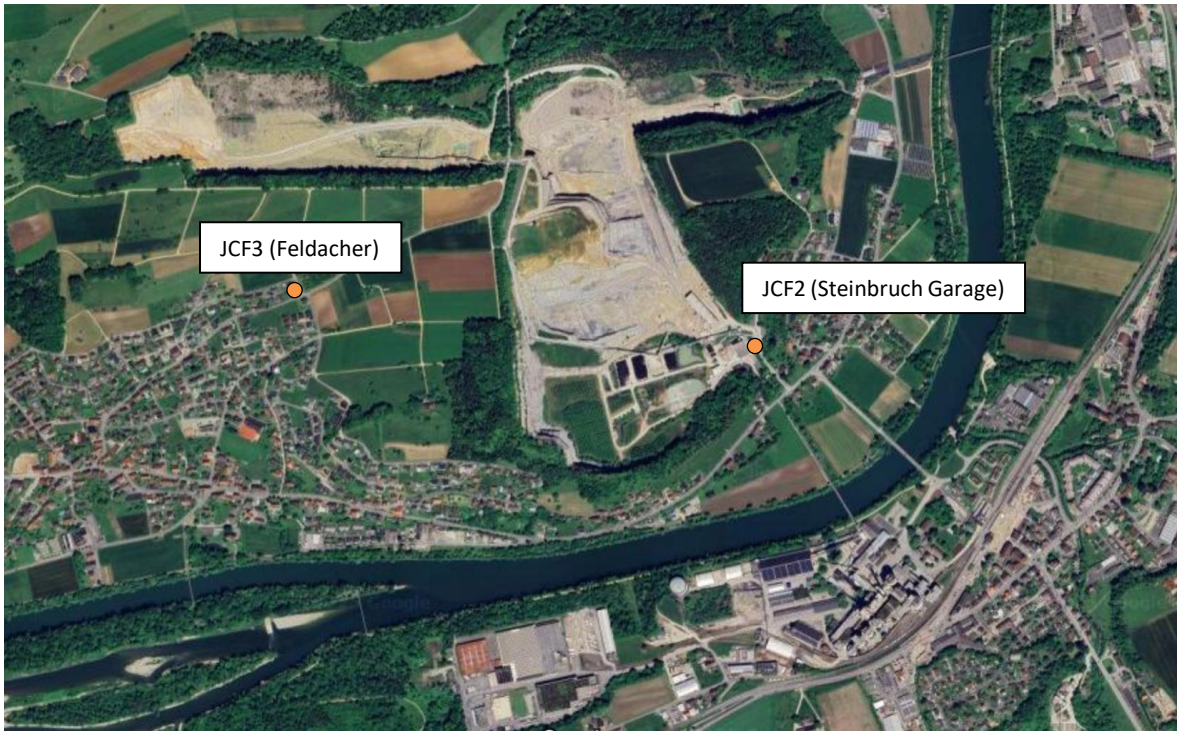


Abbildung 4: Geographische Lage der betriebenen Standorte im Jahr 2025 (JCF2 und JCF3: kontinuierliche Staubquantifizierung und -differenzierung).

Die
Tabelle *1* und Tabelle 2 geben die Standortbezeichnung, Probenahmemethoden und Probenahmezeiten der Standorte wieder. Da die Sigma-2 Messintervalle (= 2-wöchige Perioden) nicht synchron mit der Bergerhoffprobenahme (= 4-wöchige Serien) erfolgten, wurden sie jeweils unterschiedlich genannt.

Messstandort-code	**Messstandortbe-zeichnung**	**Standorttyp**	**Serie/ Perioden**	**Probenahmemethoden**
JCF2	Steinbruch Garage	Emission	1-13 1-26	Bergerhofftopf Sigma-2 Passivsammler
JCF3	Feldacher	Immission	1-13 1-26	Bergerhofftopf Sigma-2 Passivsammler

Tabelle 1: Angaben zu den Messstandorten (Bezeichnung, Standorttyp, Perioden und Methoden).

Periode	Probenahme Start	Probenahme Ende	Serie	Probenahme Start	Probenahme Ende
	Sigma-2 Passivsammler			**Bergerhofftopf**	
Per. 1	14.02.2025	28.02.2025	Ser. 1	14.02.2025	14.03.2025
Per. 2	28.02.2025	14.03.2025	Ser. 2	14.03.2025	11.04.2025
Per. 3	14.03.2025	27.03.2025	Ser. 3	11.04.2025	09.05.2025
Per. 4	27.03.2025	11.04.2025	Ser. 4	09.05.2025	04.06.2025
Per. 5	11.04.2025	23.04.2025	Ser. 5	04.06.2025	04.07.2025
Per. 6	23.04.2025	09.05.2025	Ser. 6	04.07.2025	31.07.2025
Per. 7	09.05.2025	23.05.2025	Ser. 7	31.07.2025	29.08.2025
Per. 8	23.05.2025	04.06.2025	Ser. 8	29.08.2025	24.09.2025
Per. 9	04.06.2025	19.06.2025	Ser. 9	24.09.2025	24.10.2025
Per. 10	19.06.2025	04.07.2025	Ser. 10	24.10.2025	20.11.2025
Per. 11	04.07.2025	17.07.2025	Ser. 11	20.11.2025	18.12.2025
Per. 12	17.07.2025	31.07.2025	Ser. 12	18.12.2025	19.01.2026
Per. 13	31.07.2025	15.08.2025	Ser. 13	19.01.2026	13.02.2026
Per. 14	15.08.2025	29.08.2025			
Per. 15	29.08.2025	12.09.2025			
Per. 16	12.09.2025	24.09.2025			
Per. 17	24.09.2025	10.10.2025			
Per. 18	10.10.2025	24.10.2025			
Per. 19	24.10.2025	07.11.2025			
Per. 20	07.11.2025	20.11.2025			
Per. 21	20.11.2025	03.12.2025			
Per. 22	03.12.2025	19.12.2025			
Per. 23	19.12.2025	06.01.2026			
Per. 24	06.01.2026	19.01.2026			
Per. 25	19.01.2026	30.01.2026			
Per. 26	30.01.2026	13.02.2026			

Tabelle 2: Angaben zu den Probenahmenintervallen.

Die Probenahmen und Analysen konnten mit der Ausnahme der Serie 4 (Bergerhoff) und der Perioden 7-9 am Standort JCF3 erfolgreich durchgeführt werden.

2.1 Staubniederschlag-Probenahme (Bergerhoff-Topf)

Der Staubniederschlag für Partikel mit einem geometrischen Durchmesser < 1 mm wurde mittels Bergerhoff-Töpfen gemäss VDI 4320 Blatt 1 erfasst (Abbildung 5). Dazu wird ein Kunststofftopf mit einer Öffnungsfläche von 90 cm^2 in einem Vogelschutzkorb ausgesetzt.



Abbildung 5: Staubniederschlag-Probenahme nach Bergerhoff mit einem Kunststofftopf (links vom Verkehrsschild) und Sigma-2 Passivsammler (rechts vom Verkehrsschild).

2.2 Grobstaub-Probenahme (Sigma-2 Passivsammler)

Für die Massenkonzentrationsberechnungen mit den Daten aus der automatisierten Rasterelektronenmikroskopie Einzelpartikelanalyse und für die morpho-chemische Charakterisierung der groben Partikel (2.5-80 µm) wurde die Probenahme mittels Sigma-2 Passivsammler (nach VDI 2119, Blatt 4) vorgenommen (Abbildung 5).



Das im Sigma-2 exponierten Kohlenstoff-Klebepad (Abbildung 6) wurde mittels automatisierter Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDS) für die morpho-chemische Charakterisierung der einzelnen Partikel analysiert. Für die Auswertung der morphologischen und chemischen Partikeldaten wurde der von Particle Vision GmbH entwickelte Partikelklassifikator (ASPA MC2®) eingesetzt (Methoden, Kap. 3)

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

3. Methoden

3.1 Gravimetrische Staubbestimmung

Der Inhalt des Bergerhofftopfes (in der Regel flüssige Phase) wird durch ein Edelstahlsieb mit einer Maschenweite von 1 mm Kantenlänge filtriert. Damit werden gröbere Partikel, wie Pflanzenreste, Insekten etc. aus der Probe entfernt. Das Wasser des Filtrates wird im Labor abgedampft und der feste Rückstand gewogen. Die resultierende Masse wird unter Einbezug der Öffnungsfläche des Auffanggefässes, und der Expositionszeit in die Massendepositionsrate in $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ berechnet.

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

Alle Proben wurden mittels automatisierter REM/EDS Einzelpartikelanalytik auf die chemische Zusammensetzung und morphologischen Eigenschaften untersucht (Abbildung 7). Dabei wurden die C-Pads der Sigma-2 Proben mit einem Zeiss Gemini SEM 300 Mikroskop ausgerüstet mit einem Oxford X-MAX 80 mm^2 EDS-Detektor analysiert. Mit den erzeugten n-dimensionalen morpho-chemischen Daten lässt sich unter Verwendung des Partikelklassifikators ASPA MC2® (Kap. 3.3) die Herkunft der Partikel und deren Anteile im nichtflüchtigen Grobstaub bestimmen.

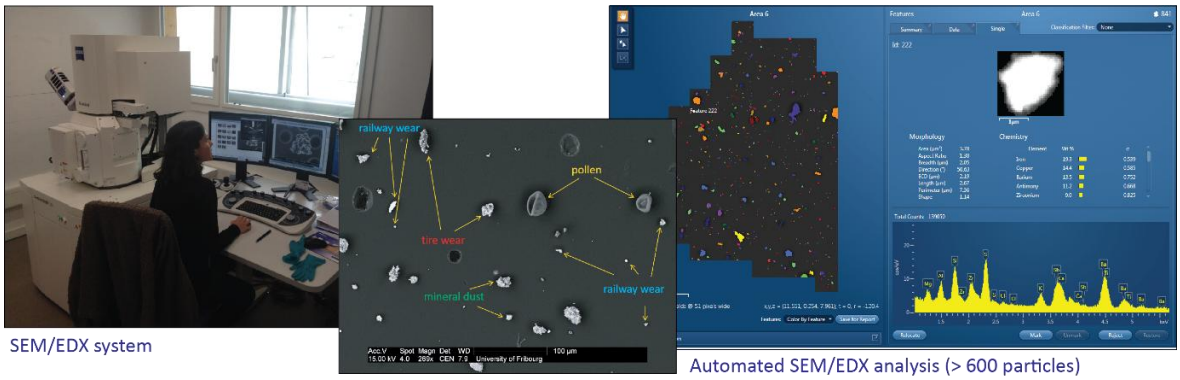


Abbildung 7: Ablaufschema der automatisierten REM/EDS Einzelpartikelanalytik.

3.3 Partikelklassifikator (ASPA MC2®)

Wegen der komplexen Beschaffenheit von Umweltpartikeln können Partikel mit sehr ähnlicher chemischer Zusammensetzung völlig unterschiedliche morphologische Eigenschaften aufweisen, was ein Hinweis auf ihre Herkunft sein kann (Abbildung 8). Dies kann eine korrekte Klassifizierung erschweren, wenn die morphologischen Eigenschaften und die Textur jedes einzelnen Partikels nicht berücksichtigt werden.

Die Analyse einzelner Partikel mit REM/EDS liefert chemische und morphologische Informationen zu jedem nachgewiesenen Partikel. Die chemischen Informationen wurden ursprünglich für die Klassifizierung in Partikelgruppen verwendet (PACLA-Klassifikator, Meier et al., 2018). Morphologische Informationen (mit Ausnahme des Partikeldurchmessers) konnten jedoch bis zur Entwicklung des neuen Partikelklassifikators ASPA MC® (Rausch et al., 2022) nicht für die Klassifizierung berücksichtigt werden. Diese Lücke konnte durch maschinelles Lernen geschlossen werden. Voraussetzung dafür ist ein großer Datensatz für das Training. Sowohl für das Training als auch für die spätere Klassifizierung werden für jedes Partikel die chemische Zusammensetzung sowie morphologische

und texturbezogene Parameter erfasst. Dank der Funktionsweise des Rückstreuelektronendetektors am Rasterelektronenmikroskop, der morphologische und chemische Partikeleigenschaften aufzeichnet, können neben «klassischen» Parametern auch andere aussagekräftigen morphologischen Parameter wie Festigkeit, Konvexität, fraktale Dimensionen und Infos über die Heterogenität der chemischen Zusammensetzung anhand der Graustufen der Partikel extrahiert werden. Mit diesen neuen umfassenden Partikel-Deskriptoren und dank maschinellem Lernen können alle bekannten Partikelparameter in einer Matrix zusammengefasst und für das Training genutzt werden. Das hat den Vorteil, dass für jedes Partikel zusätzliche morphologische Parameter verfügbar sind, die für eine weitere Differenzierung und Unterteilung der morpho-chemischen Gruppen genutzt werden können.
Für die vorliegenden Auswertungen wurde ein Partikelklassifikator auf Basis eines «Random Forest» mit einem Trainingsdatensatz von 100'000 Partikeln verwendet (Abbildung 8). Für weitere Details der Methodologie siehe Rausch et al., 2022.

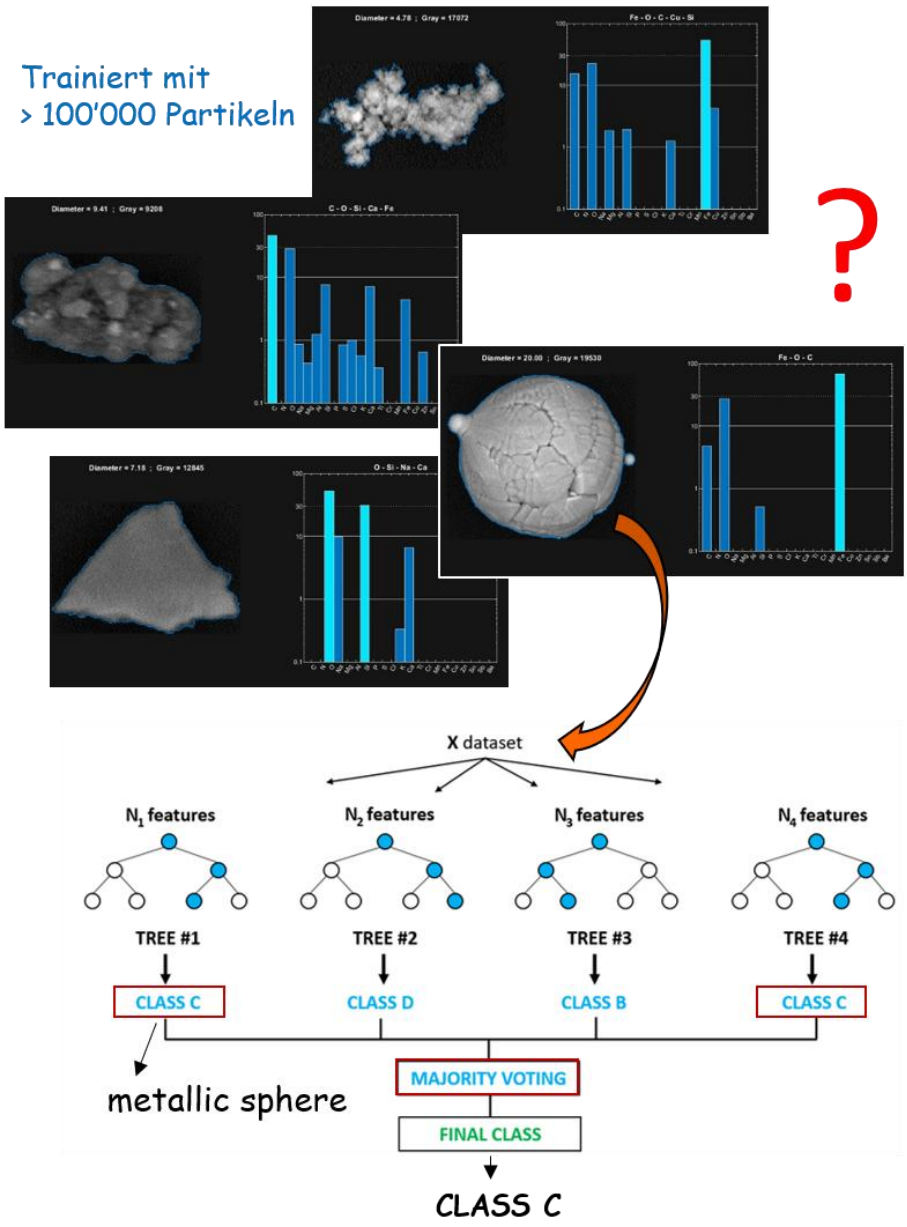


Abbildung 8: Ablaufschema der morpho-chemischen Partikeldatenauswertung mittels ASPA MC®.

3.4 Monitoring-Strategie

Für das quellendifferenzierende Staubmonitoring des Steinbruches Auenstein/Veltheim kamen zwei Methoden zum Einsatz (Abbildung 9), die Angaben über zwei bestimmte Staub-Grössenbereiche ermöglichen. Einerseits wurden die einmonatigen Bergerhoffproben auf den Staubniederschlag untersucht. Mit den Bergerhoffanalysen kann überprüft werden, ob der LRV-Jahresgrenzwert (200 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) an den untersuchten Standorten eingehalten wird, wobei am Emissionsstandort JCF2 dieser Wert nur als orientierend betrachtet wird, da der LRV-Jahresgrenzwert nur für Immissions- (z.B. JCF3) und nicht für Emissionsstandorte gültig ist.
Parallel dazu wurden die zweiwöchigen Sigma-2 Proben aus den Standorten JCF2 und JCF3 mittels REM/EDS Einzelpartikelanalyse morpho-chemisch charakterisiert. Diese Analysen ermöglichten die detaillierte Quellenzuordnung (z.B. als Steinbruchpartikel) und die Quellenanteilberechnung im vorhandenen Gesamtstaub. Bis Mai 2020 wurden die Sigma-2 Proben ebenfalls mittels Lichtmikroskopie analysiert.

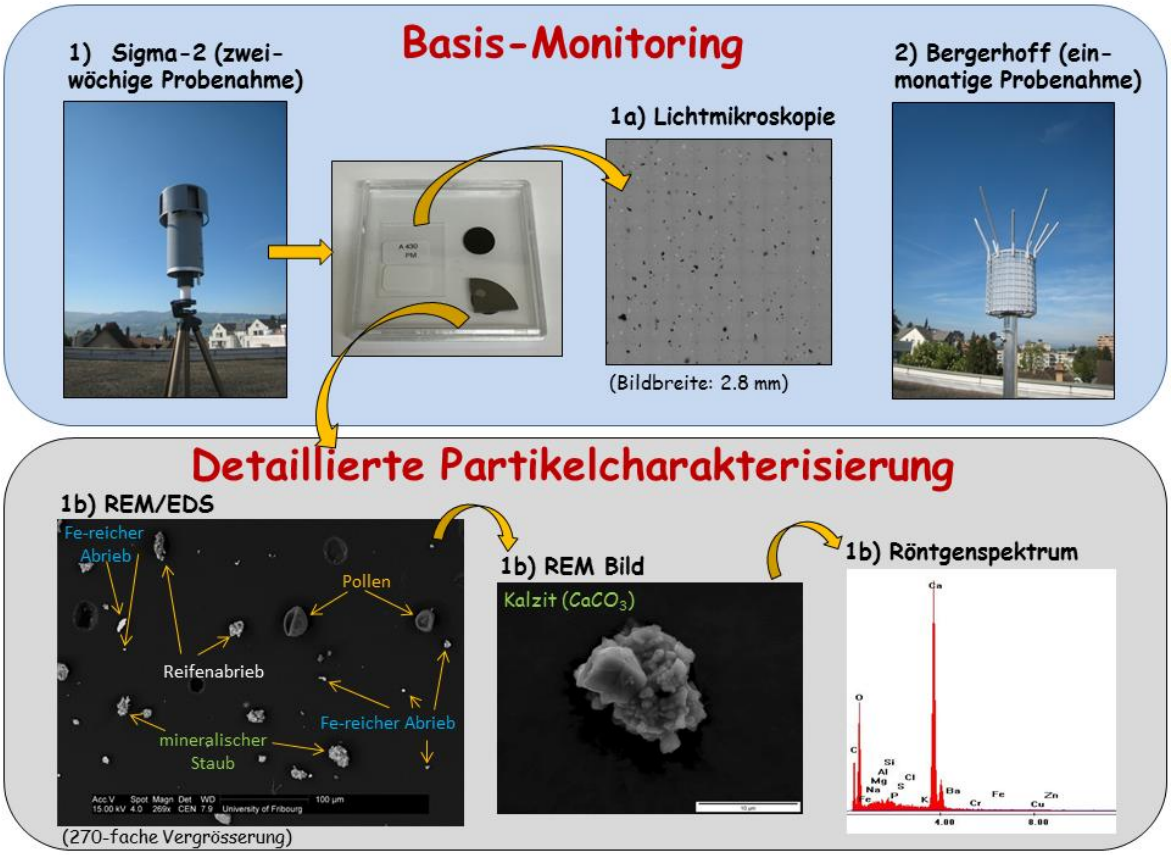


Abbildung 9: Ablaufschema des quellendifferenzierenden Staubmonitorings.

4. Resultate

4.1 Staubniederschlag (Gravimetrie)

Die Werte der Staubniederschlag-Deposition liegen am Standort JCF2 ausser an drei Serien (Serie 4: 09.05.-04.06.2025; Serie 5: 04.06.-04.07.2025 und Serie 6: 04.07.-31.07.2025) jeden Monat unter dem LRV-Jahresgrenzwert von 200 mg·m^{-2}·d^{-1} (*Abbildung 10*). Am Standort JCF3 fand an einer Serie (Serie 6: 04.07.-31.07.2025) eine Überschreitung des LRV-Jahresgrenzwertes statt.

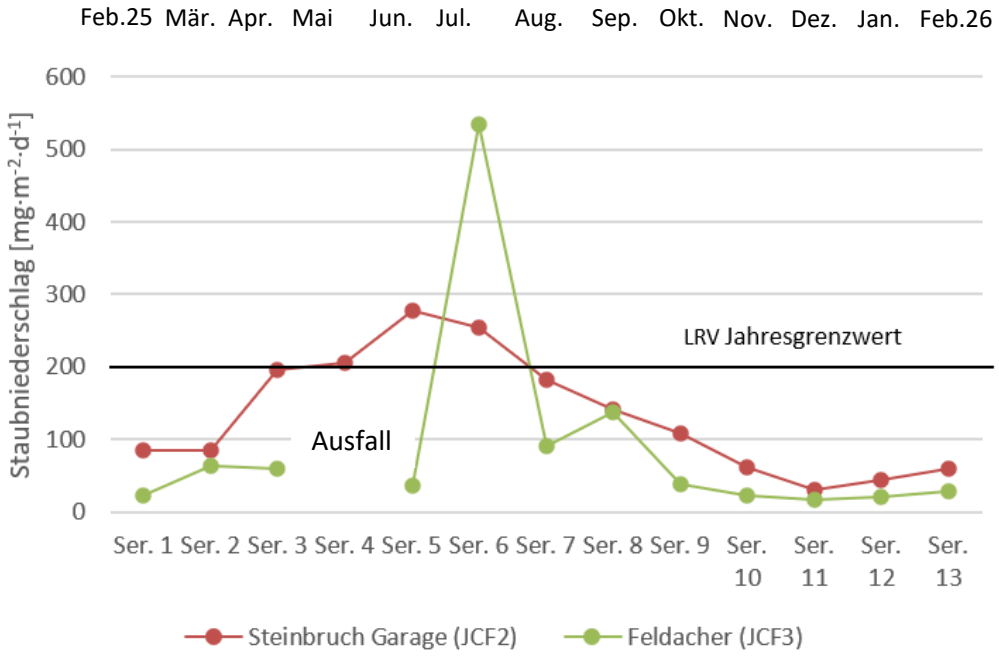


Abbildung 10: zeitlicher Staubdepositionsverlauf am JCF2 und JCF3. Die schwarze Linie zeigt den LRV-Jahresgrenzwert von 200 mg·m^{-2}·d^{-1}.

Trotz punktueller Überschreitungen wurde der LRV-Jahresgrenzwert an den Standorten JCF2 (133 mg·m^{-2}·d^{-1} Jahresmittel) und JCF3 (89 mg·m^{-2}·d^{-1} Jahresmittel) eingehalten (Abbildung *11*).
In Bezug auf den Jahresmittelgrenzwert für die Staubdeposition weist der Standort JCF2 ca. 67 % und der Standort JCF3 ca. 45 % der zulässigen Belastung für Immissionsstandorte auf.

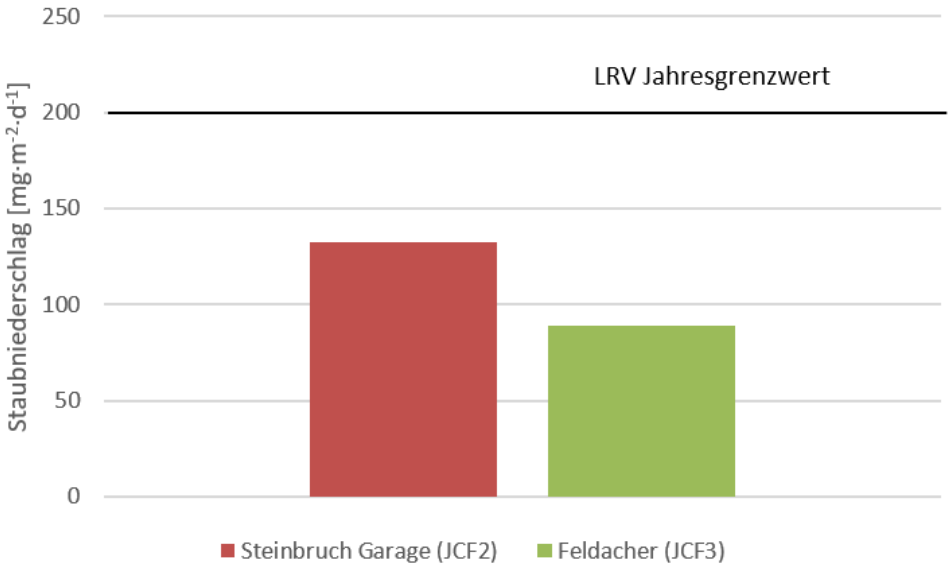


Abbildung 11: Staubniederschlag-Jahresmittelwert für die Standorte JCF2 und JCF3.

4.1.1 Vergleich der Staubniederschlagswerte zwischen 2016 und 2025

Im Vergleich zu der Messkampagne 2024 war die Staubdeposition im Jahr 2025 am JCF2 Standort praktisch identisch (1.5 % tiefer) (*Abbildung 12* und *Abbildung 13*). Die Jahresmittelwerte der früheren Messkampagnen 2023, 2022, 2021, 2020, 2019, 2018 und 2016 (mit der Ausnahme der Messkampagne im 2017) waren tiefer als der Mittelwert am JCF2 für die Messkampagnen 2024 und 2025.
Am Standort JCF3 war die Staubdeposition im Jahr 2025, 53 % höher im Vergleich zu der Messkampagne 2024 (*Abbildung 12* und *Abbildung 13*).

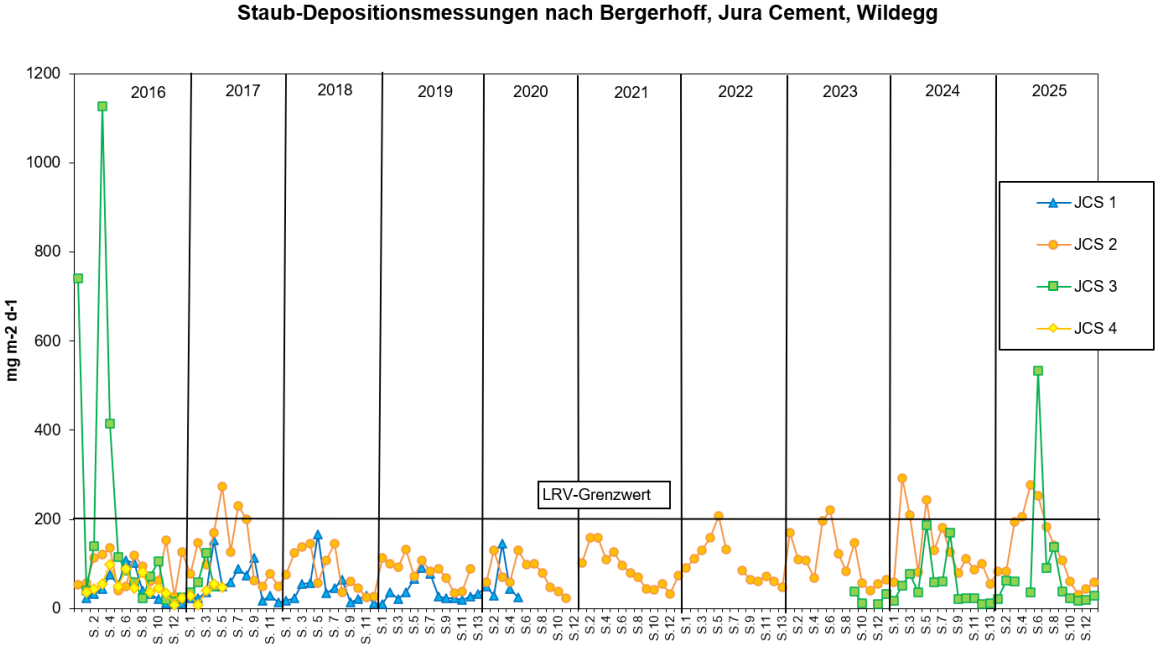


Abbildung 12: Vergleich des zeitlichen Staubdepositionsverlaufs an den untersuchten Standorten seit Messbeginn. Die schwarze Linie zeigt den LRV-Jahresgrenzwert von 200 mg·m^{-2}·d^{-1}.

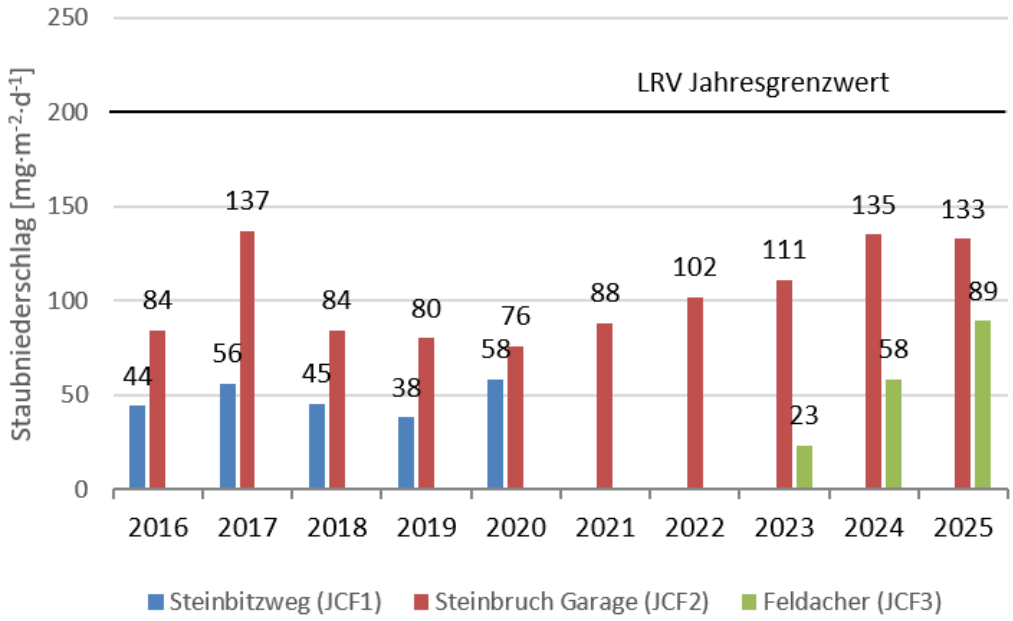


Abbildung 13: Vergleich der Jahresmittelwerte der Standorte JCF1, JCF2 und JCF3 für die Messkampagnen 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 und 2025. Ab 2021 stehen keine Werte für JCF1 zur Verfügung. Und ab Oktober 2023 stehen Werte für JCF3 neu zur Verfügung. Daher ist der Mittelwert für JCF3 im Jahr 2023 nur orientierender Natur, da nur Werte von 4 Monaten, welche typischerweise durch tiefe Staubkonzentrationen geprägt sind (Oktober – Februar) berücksichtigt werden.

4.2 Morpho-chemische Charakterisierung und Quellendifferenzierung des Grobstaubes 2.5 – 80 µm (REM/EDS ASPA MC2®)

Die morpho-chemische Charakterisierung des Grobstaubes mittels REM/EDS wurde für alle Standorte und Perioden vorgenommen, um einen lückenlosen Jahresmittelwert der emittierten bzw. immittierten Steinbruchpartikel ermitteln zu können. In dem Fall vom Standort JCF2 soll dieser Wert als Vergleichswert zu den vergangenen Jahren 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 und 2024 dienen. Der Jahresmittelwert 2025 des Standortes JCF3 kann nun auch mit dem Jahresmittelwert 2024 gegenübergestellt werden, da beide Werte das gesamte Jahr berücksichtigen.

4.2.1 Erweiterung des Fingerprint-Inventars

In den ersten Messkampagnen wurden in den Emissionsproben hauptsächlich Kalkstein und Mergel gemessen. Dies war auch im Einklang mit dem Steinbruchabbau, da bis 2017 hauptsächlich lokalen Kalkstein und Mergel in den Steinbruchaktivitäten involviert waren (mit der Ausnahme der Seekreide-Einfuhr im Herbst 2017). In der Staubmesskampagne 2018 wurde festgestellt, dass die Proben einen bedeutenden Anteil an silikatischen Partikeln enthielten. Diese Entwicklung war auf Veränderungen in den Steinbruchaktivitäten zurückzuführen. In den Jahren 2018 und 2019 wurden zusätzlich neben Kalkstein und Mergel aus anderen Steinbrüchen (z.B. Seekreide und Bözberg-Kalkstein/Mergel) auch silikatische Gesteine (z. B. Moräne und Auffüllmaterial aus Gubrist, Bözberg und Giesereialtsand) über das ganze Jahr in den Steinbruch eingeführt. Daher wurde der Fingerprint der neu eingeführten Gesteine in der Messkampagne 2018 bestimmt und in die Partikelbibliothek als «Steinbruchpartikel» eingefügt (für weitere Details s. Kapitel 7. Anhang im Bericht zum Staubmonitoring des Steinbruchs Auenstein/Veltheim der Jura Cement SA für die Messkampagne 2018). Im Jahr 2025 wurde ebenfalls Holzasche in das Fingerprint-Inventar eingefügt.

4.2.2 Zeitliche Variabilität am Emissionsstandort JCF2 (Steinbruch Garage)

Die Konzentrationen an Steinbruchpartikeln (d.h. Kalkstein, Mergel, silikatische Partikel und Holzasche) am Emissionsstandort JCF2 fluktuierten im Jahr 2025 zwischen 69.47 µg·m^{-3} (Periode 10) und 0.79 µg·m^{-3} (Periode 21) (Abbildung 14). Die letzten Perioden des Jahres 2025 (Per. 21-26) zeigten - wie in den Vorjahren - besonders tiefe Konzentrationen an Steinbruchpartikeln, welche z.T. auf die Betriebsferien und eingeschränkte Steinbruchaktivitäten zurückzuführen sind. Zusätzlich begünstigten die nassen und winterlichen Verhältnisse sehr wahrscheinlich die zurückhaltende Aufwirbelung (Resuspension) der Partikel.

Um den Anteil an Steinbruchpartikeln gegenüber Partikel anderer Quellen im gesamten Grobstaub darzustellen, wurden die Partikel aus allen anderen Hauptquellen (*biogene Partikel* wie Pollen, Sporen, Pilzfäden, *mineralischer Hintergrundpartikel* wie Boden, und *Strassenverkehrspartikel* wie Reifen, Fahrzeug- und Bremsabrieb) in der Klasse «Andere Partikel» zusammengefasst. Die *Abbildung 14* zeigt den Quellenanteilsverlauf für die Messkampagne 2025 (Feb. 2025 – Feb. 2026).

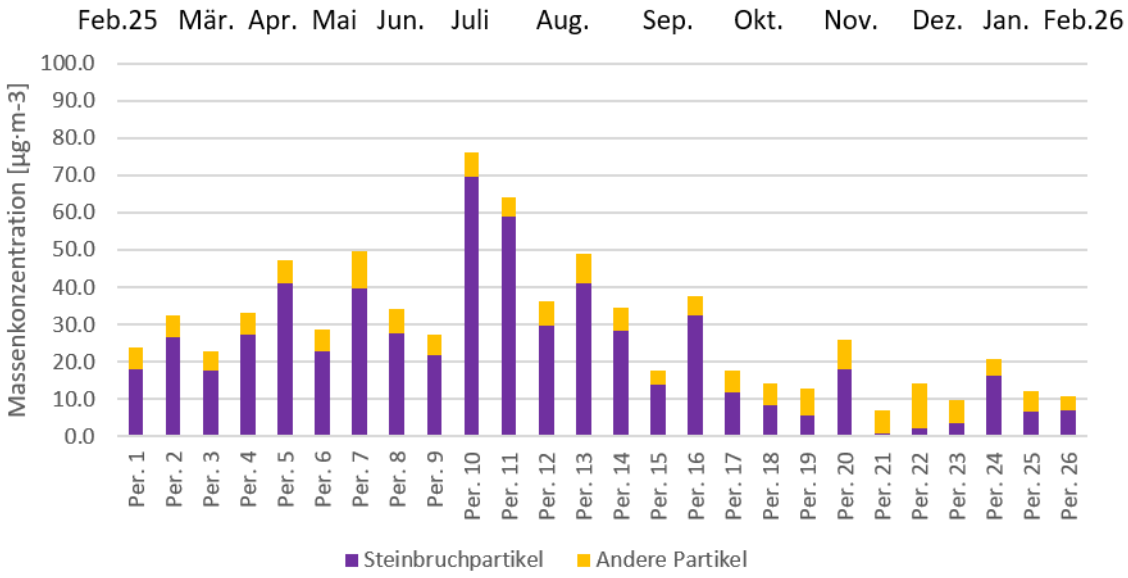


Abbildung 14: Konzentrationsverlauf der Summe der Steinbruchpartikel (Kalkstein + Mergel + silikatische Partikel + Holzasche) und der Anderen Partikel (hauptsächlich biogene, geogene und Verkehrspartikel) am Emissionsstandort JCF2 während der Messkampagne 2025.

Der Anteil an Steinbruchpartikeln im Grobstaub (2.5 – 80 µm) schwankt zwischen 12 % (Periode 21) und 92 % (Periode 11). Dies bedeutet, dass kein konstantes Verhältnis zwischen Steinbruchpartikeln und anderen Partikeln angenommen werden kann. Der durchschnittliche relative Anteil an Steinbruchpartikeln im Jahr 2025 beträgt 70 %. Einschließlich saisonal bedingter Schwankungen (z.B. höhere Einträge von Pollen im Frühling oder von Sporen im Herbst) schwankte die absolute Konzentration an «Anderen Partikeln» über das ganze Jahr 2025 zwischen 4 – 12 µg·m^{-3}. Die massenmässig relevantesten Partikelunterklassen innerhalb der Klasse «Andere Partikel» sind a) mineralische Partikel mit einer chemischen Zusammensetzung, die dem Fingerprint der Steinbruchpartikeln nicht entspricht und b) biogene Partikel, die verstärkt im Frühling (Pollen) und Herbst (Sporen) vorkommen. Dazu kommt ein kleinerer Anteil an Strassenverkehrspartikel wie z.B. Pneu- und Bremsabrieb.

4.2.3 Jahresmittelwert der Steinbruchpartikel am Standort JCF2

Die Massenkonzentration der Steinbruchpartikel für die Messkampagne 2025 betrug im Mittel 22.9 µg·m^{-3}. In den vorhergehenden Jahren 2024, 2023, 2022, 2021, 2020, 2019, 2018, 2017 und 2016 betrug der Jahresmittelwert 18.2 µg·m^{-3}, 19.8 µg·m^{-3}, 14.7 µg·m^{-3}, 15.0 µg·m^{-3}, 13.8 µg·m^{-3},

14.7 µg·m^{-3}, 19.4 µg·m^{-3}, 27.9 µg·m^{-3} bzw. 35 µg·m^{-3}. Somit ist der Jahresmittelwert für die Messkampagne 2025 ca. 26 % höher als im vergangenen Jahr 2024 und ca. 35 % tiefer im Vergleich zum Messbeginn (Messkampagne 2016) (*Abbildung 15* und Tabelle 3). Dabei gilt zu beachten, dass der Mittelwert aus der Messkampagne 2016 aus vier ausgewählten Perioden mit eher hohen Konzentrationen berechnet wurde und damit eher an der oberen Grenze des Mittelwertes für das Jahr 2016 lag. Im Gegensatz stellt der Mittelwert für die Messkampagnen 2017-2025, welcher aus allen Messperioden berechnet wurde, ein echter Jahresmittelwert dar.

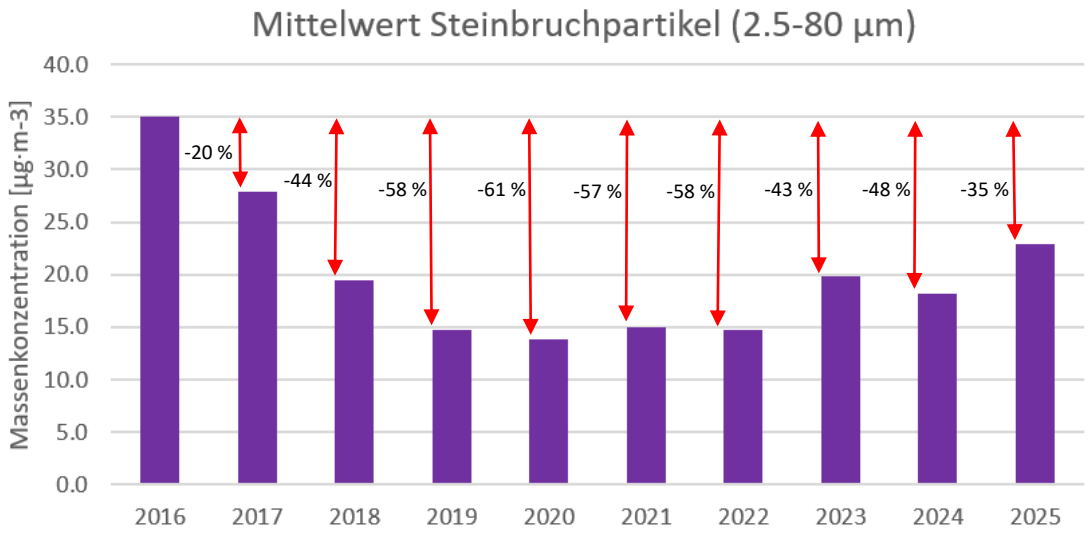


Abbildung 15: Vergleich der Jahresmittelwerte für die Massenkonzentration an Steinbruchpartikeln (2.5-80 µm geom. Durchmesser) der Messkampagnen 2016 - 2025 für den Standort JCF2.

Messkampagne	**Massenkonzentration (µg·m^{-3}) Steinbruchpartikel 2.5 – 80 µm**
2016	35.0
2017	27.9
2018	19.4
2019	14.7
2020	13.8
2021	15.0
2022	14.7
2023	19.8
2024	18.2
2025	22.9

Tabelle 3: Jahresmittelwerte der Massenkonzentration von Steinbruchpartikeln (2.5-80 µm geom. Durchmesser) am JCF2 für die Messkampagnen 2016 - 2025.

4.2.4 Zeitliche Variabilität am Immissionsstandort JCF3 (Feldacher)

Am Standort JCF3 betrug der Jahresmittelwert 2025 der Grobstaubbelastung (2.5-80 µm geom. Partikeldurchmesser) aus den Steinbruchaktivitäten 4.5 µg·m^{-3} (rote Linie in der Abbildung 3).
Im Vergleich zum vergangenen Jahr 2024 war der Jahresmittelwert der Steinbruchpartikel am JCF3 für die Messkampagne 2025, 32 % höher.
Im Durchschnitt betrug die Konzentration der Partikel aus anderen Quellen als aus dem Steinbruch 8.7 µg·m^{-3} und somit 66 % des Gesamtstaubes am Standort JCF3 (*Abbildung 16*).

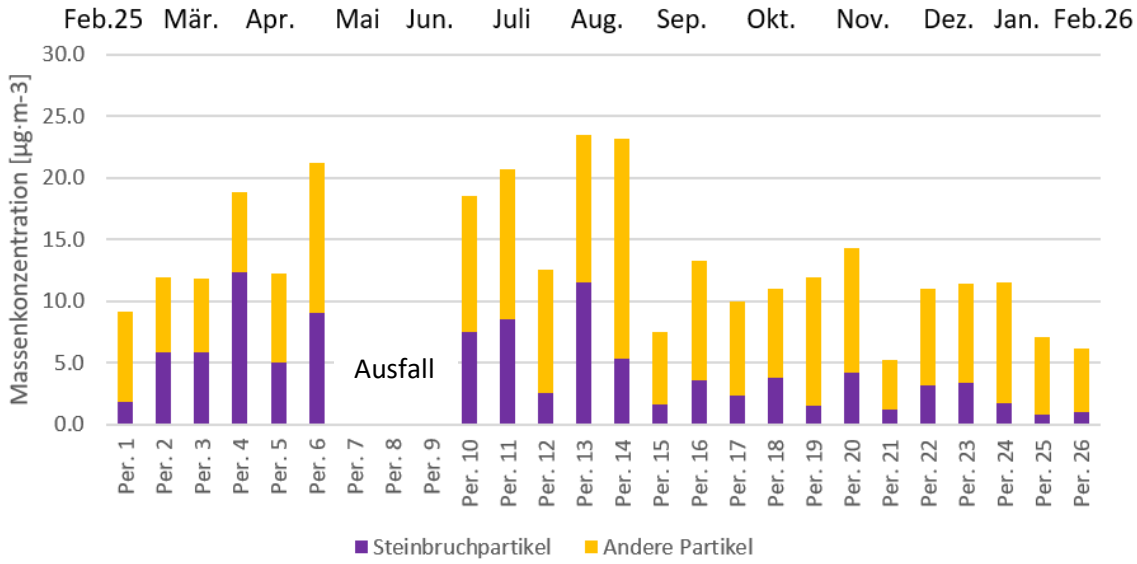


Abbildung 16: Konzentrationsverlauf der Summe der Steinbruchpartikel (Kalkstein + Mergel + silikatische Partikel + Holzasche) und der Anderen Partikel (biogene, geogene und Verkehrspartikel) am Immissionsstandort JCF3 während der Messkampagne 2024.

4.2.5 Vergleich der Standorte

Um die Grössenordnung und Konzentrationsunterschiede zwischen den untersuchten Standorten in der Messkampagne 2025 besser zu veranschaulichen, kann die *Abbildung 17* beigezogen werden. In fast allen Perioden (mit der Ausnahme der Perioden 21, 22 und 23) waren die Konzentrationen an Steinbruchpartikeln am Standort Steinbruch Garage JCF2 am höchsten und am Standort Feldacher JCF3 am tiefsten.

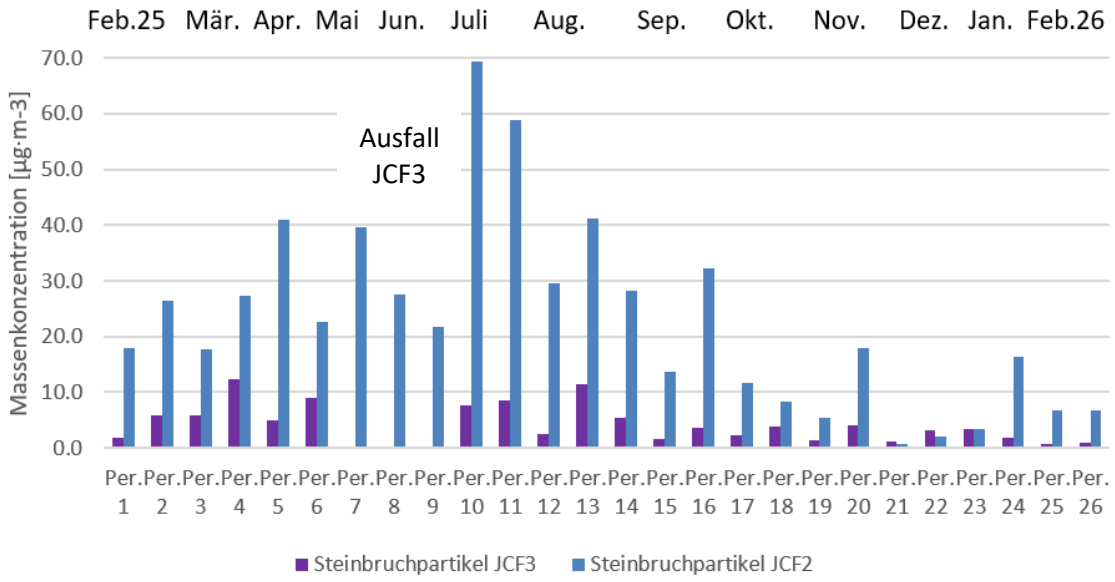


Abbildung 17: Vergleich der Konzentrationsverlauf der Summe der Steinbruchpartikel (Kalkstein + Mergel + silikatische Partikel + Holzasche) an den zwei untersuchten Standorten während der Messkampagne 2025.

5. Wichtigste Ergebnisse

Die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse der Messkampagne 2025 sind:

- Die Staubniederschlagbelastung lag am Emissionsstandort JCF2 unter dem Jahresgrenzwert von 200 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. Im Vergleich mit dem Jahresmittelgrenzwert für den Staubniederschlag wiesen der Standort JCF2 ca. 67 % (133 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) und der Standort JCF3 ca. 45 % (89 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) der zulässigen Belastung für Immissionsstandorte auf. Im Vergleich mit dem Jahresmittelwert für die Staubdeposition im Jahr 2024 wies der Standort JCF2 ca. 1.5 % niedrigere Werte und der Standort JCF3 ca. 53 % höhere Werte auf.

- Der Jahresmittelwert der Grobstaubbelastung von 2.5-80 µm geom. Durchmesser durch Kalkstein, Mergel, silikatische Partikel (z.B. Moräne und Auffüllmaterial) und Holzasche aus den Steinbruchaktivitäten betrug an dem Emissionsstandort JCF2, 22.9 $\mu g \cdot m^{-3}$. Somit wurde im Vergleich zu dem Mittelwert der Steinbruchemissionen am JCF2 aus der Messkampagne 2016 (35 $\mu g \cdot m^{-3}$) eine Abnahme von 35 % festgestellt. Somit wird der Zielwert (d.h. 1/3 der Staubemissionen vom Jahr 2016), welcher im Jahr 2018 erreicht wurde, im Jahr 2025 sowie in den Jahren 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 und 2024 weiterhin aufrechterhalten.

- Dennoch wird es empfohlen die Emissionen/Immissionen aus dem Steinbruch und die staubmindernden Massnahmen im Auge zu behalten, da im Jahr 2025 eine Zunahme der Staubkonzentrationen aus dem Steinbruch im Vergleich zu den vergangenen Jahren festgestellt wurde (+ 26% im Vergleich zum Jahresmittelwert 2024).

6. Fazit

Die Staubbelastung im Steinbruch Auenstein/Veltheim und in der Umgebung wird von verschiedenen Partikelquellen beeinflusst. Ausser den Kalkstein- Mergel-, silikatischen und Holzasche-Partikeln, aus dem Steinbruch, sind auch natürliche (biogene und geogene Partikel) und anthropogene Partikel (Pneuabrieb und metallischer Abrieb aus dem Strassenverkehr, siehe Rausch et al., 2022) vorhanden. Der relative Anteil dieser anderen «externen» Quellen kann je nach Steinbruchaktivitäten und saisonale Abläufe in der Natur stark variieren. Dieses Verhalten macht sich auch in dem breiten Spektrum der gemessenen Anteile der nicht durch den Steinbruch emittierten Partikel bemerkbar.

Somit ist die Ermittlung der aus dem Steinbruch emittierten Partikel unter der Berücksichtigung aller Jahreszeiten das akkurateste Vorgehen, um die Steinbruchemissionen bzw. Immissionen und die vorgenommenen Massnahmen zur Staubreduzierung zu überwachen und zu dokumentieren.

7. Referenzen

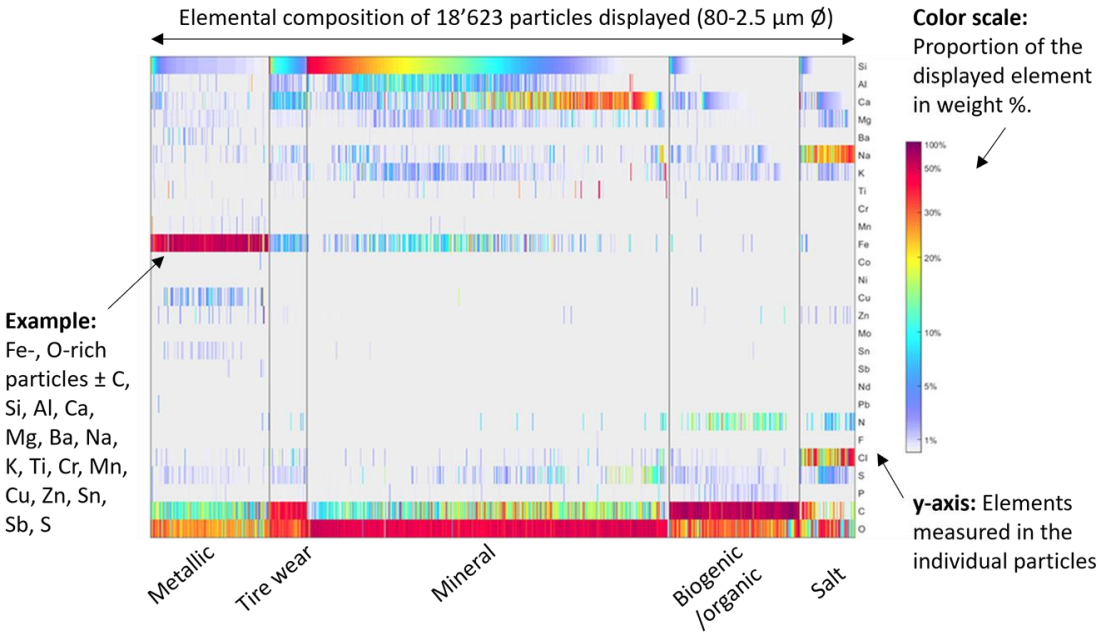
Meier MF, Mildenberger T, Locher R, Rausch J, Zünd T, Neururer C, Ruckstuhl A, Grobéty B (2018) A model based two-stage classifier for airborne particles analyzed with Computer Controlled Scanning Electron Microscopy. Journal of Aerosol Science 1;123:1-6.

Rausch J, Jaramillo-Vogel D, Perseguers S, Schnidrig N, Grobéty B, Yajan P. (2022) Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier. Science of The Total Environment: 10;803:149832.

VDI 2119 (2013). Ambient air measurements sampling of atmospheric particles > 2.5 µm on an acceptor surface using the Sigma-2 passive sampler. Characterization by optical microscopy and calculation of number settling rate and mass concentration. ICS: 13.040.01. Beuth Verlag, Berlin.

8. Anhang

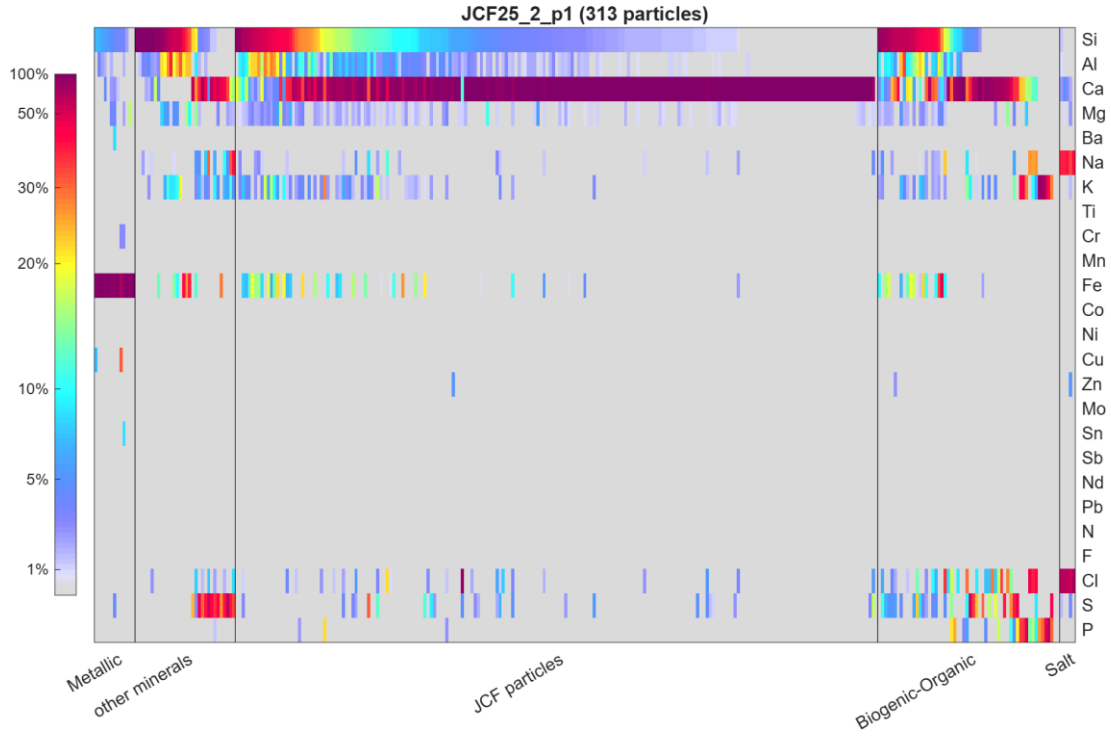
8.1 Heatmap Lesebeispiel



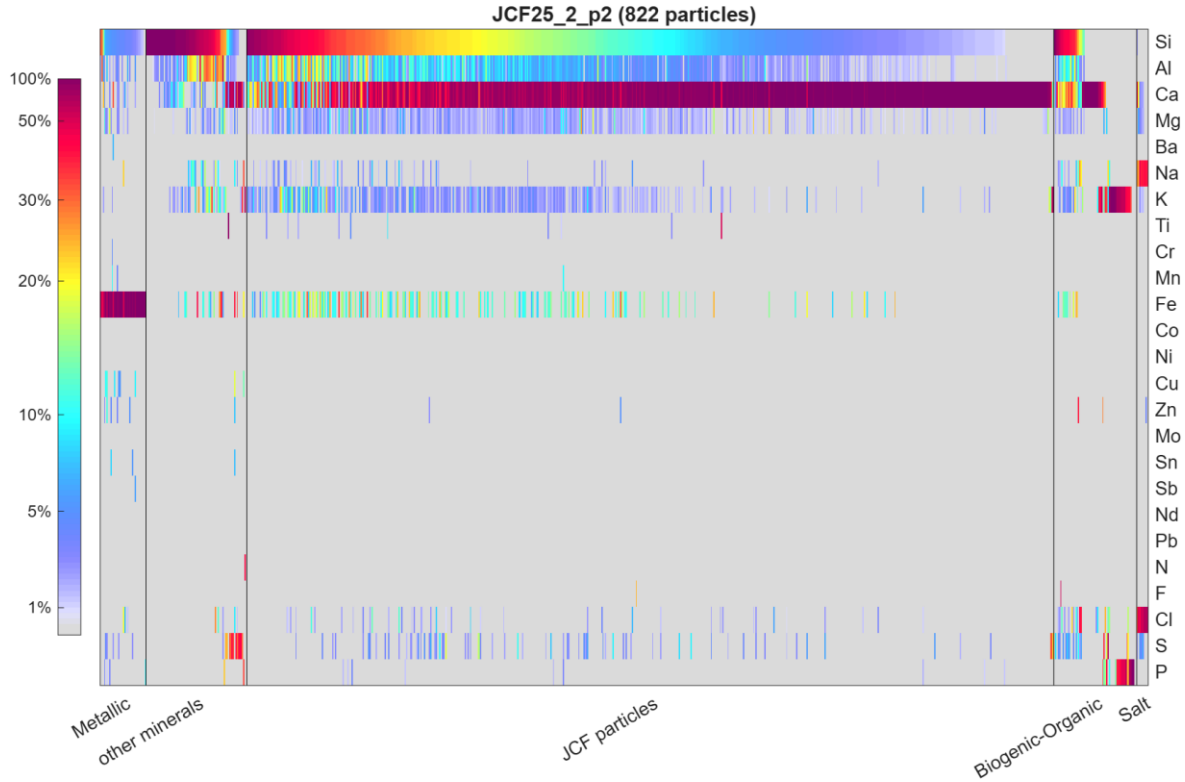
x-axis: Representation of the elemental composition of individual particles (each vertical line corresponds to one particle). Particles are already grouped according to the morpho-textural-chemical classes.

8.2 Heatmaps Emissionsstandort JCF2

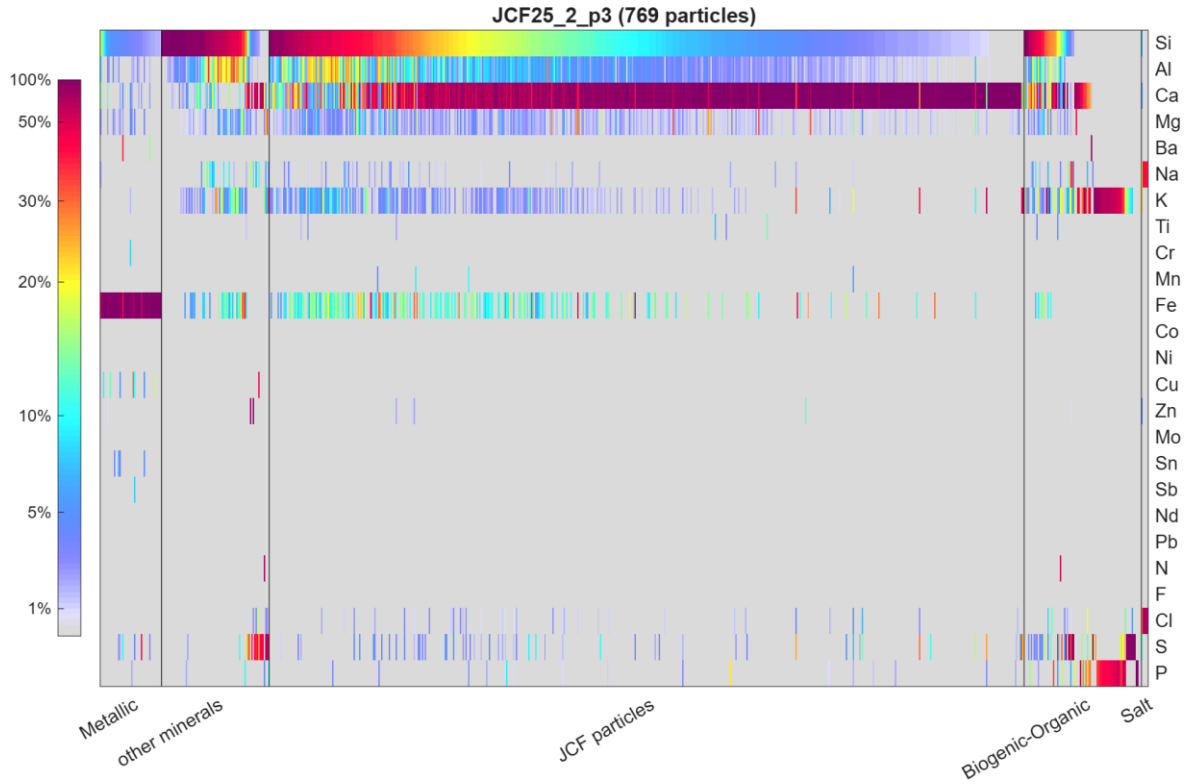
Per. 1



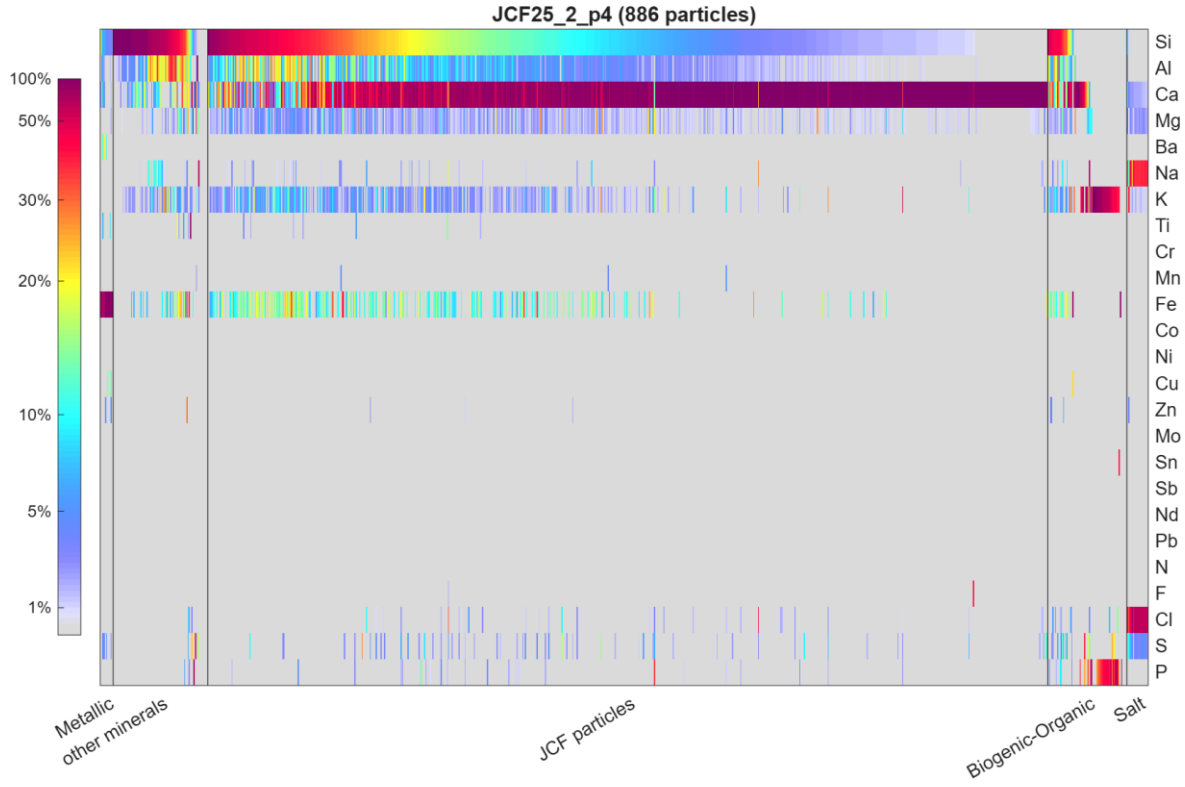
Per. 2


JCF25_2_p2 (822 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

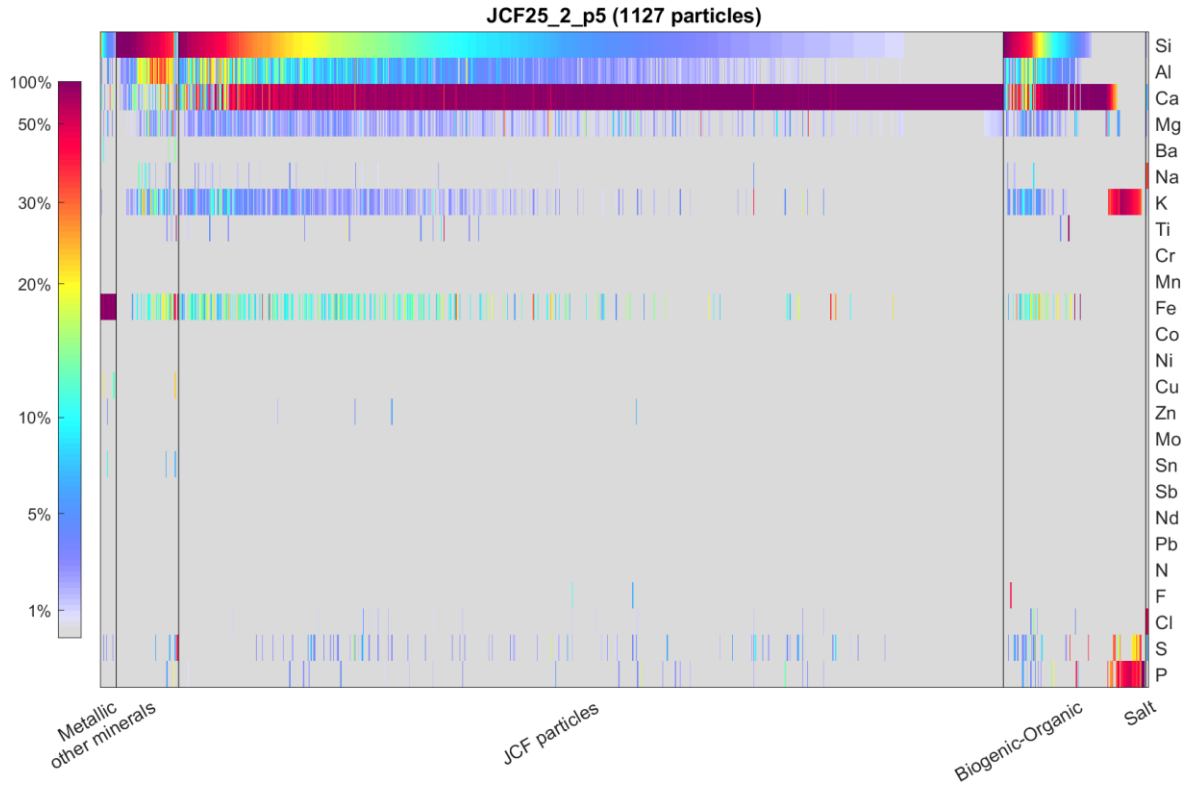
Per. 3


JCF25_2_p3 (769 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

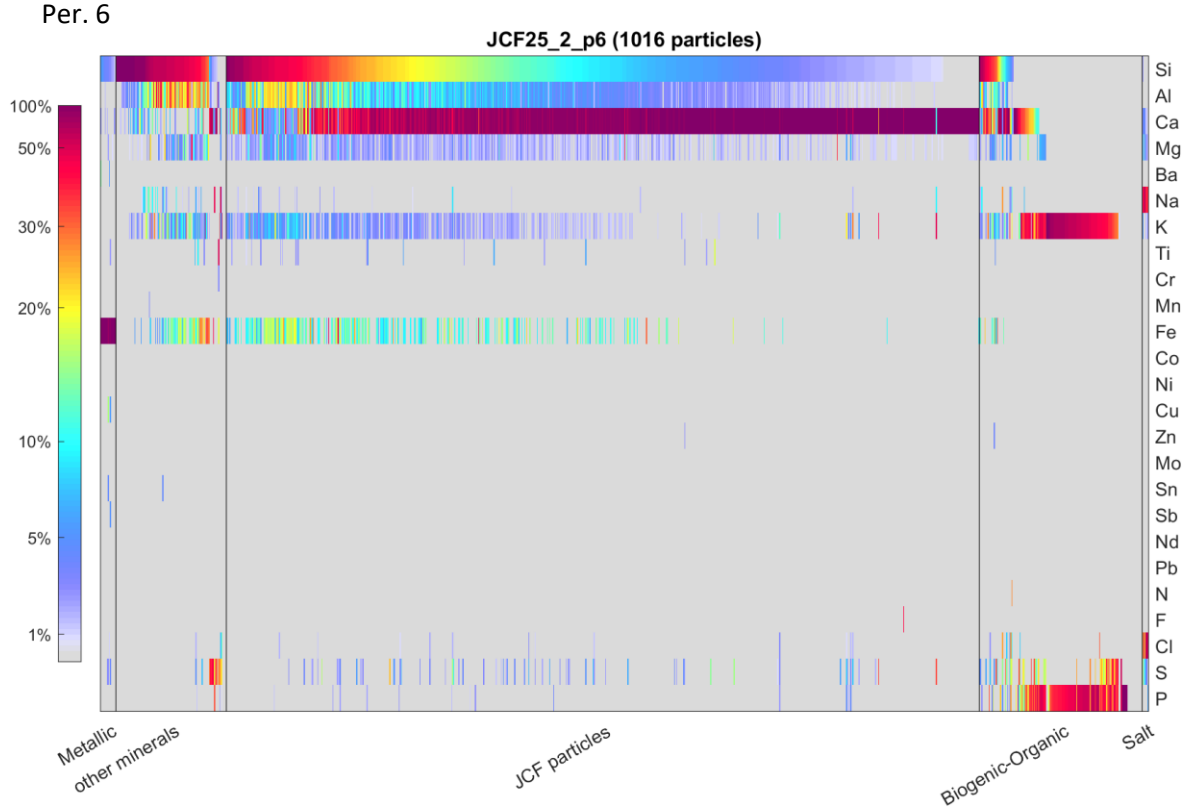
Per. 4


JCF25_2_p4 (886 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

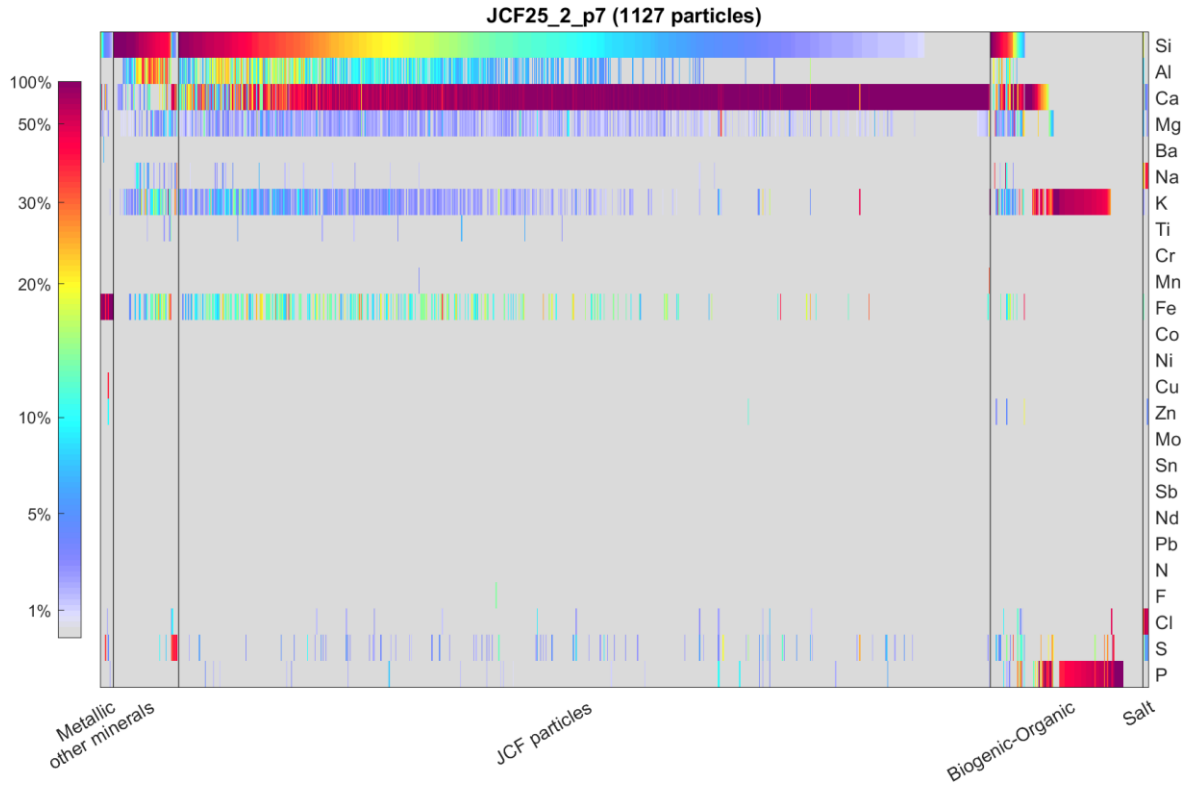
Per. 5


JCF25_2_p5 (1127 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

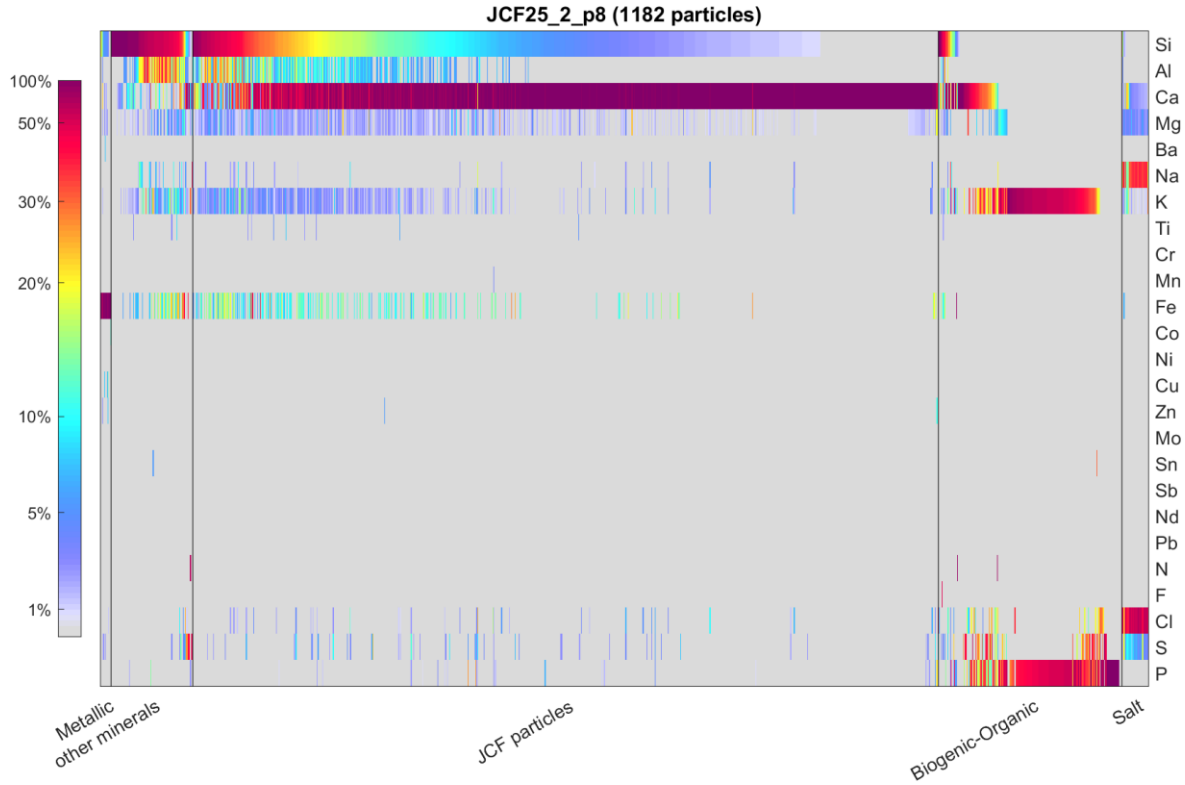
Per. 6


JCF25_2_p6 (1016 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

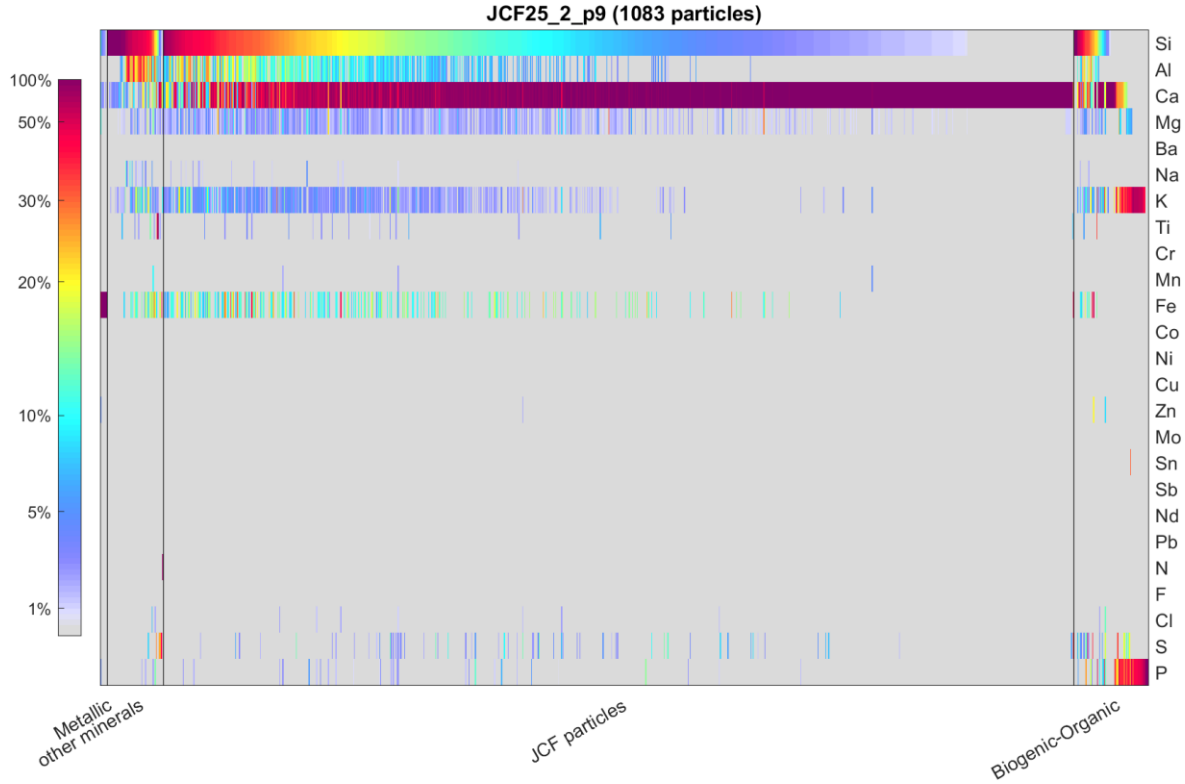
Per. 7


JCF25_2_p7 (1127 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

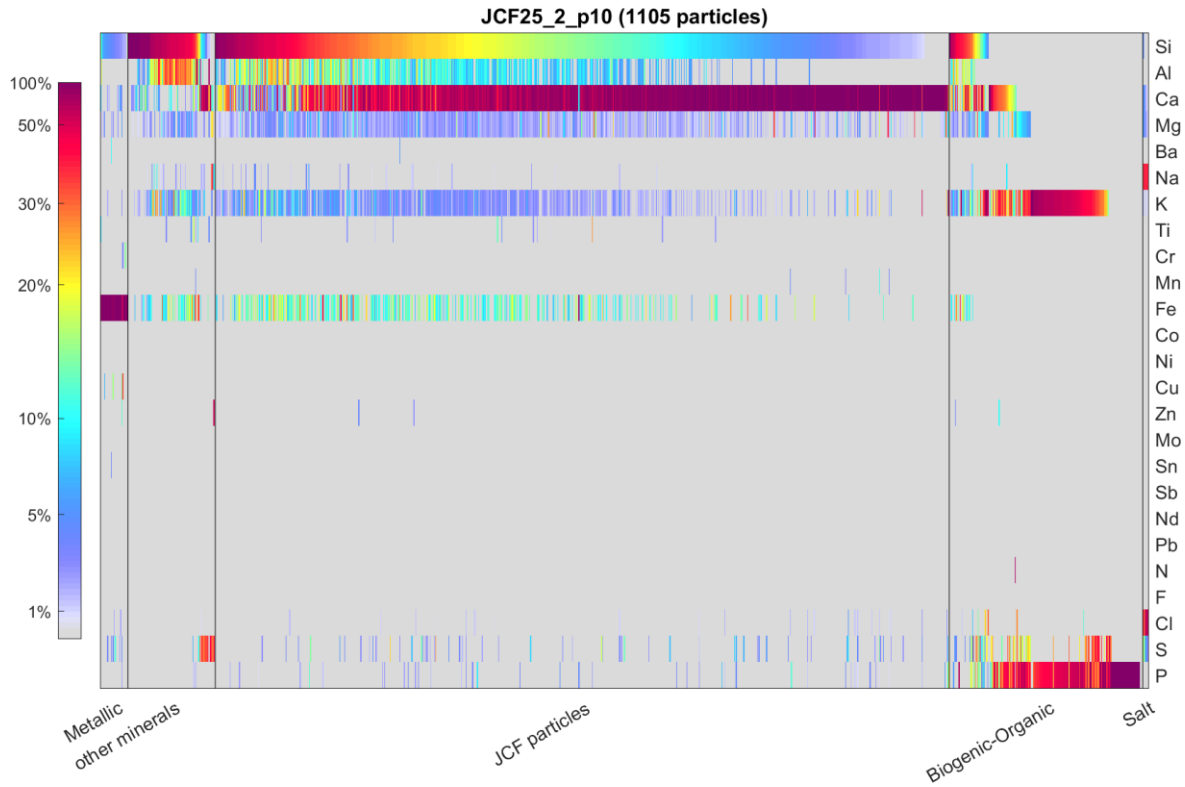
Per. 8


JCF25_2_p8 (1182 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

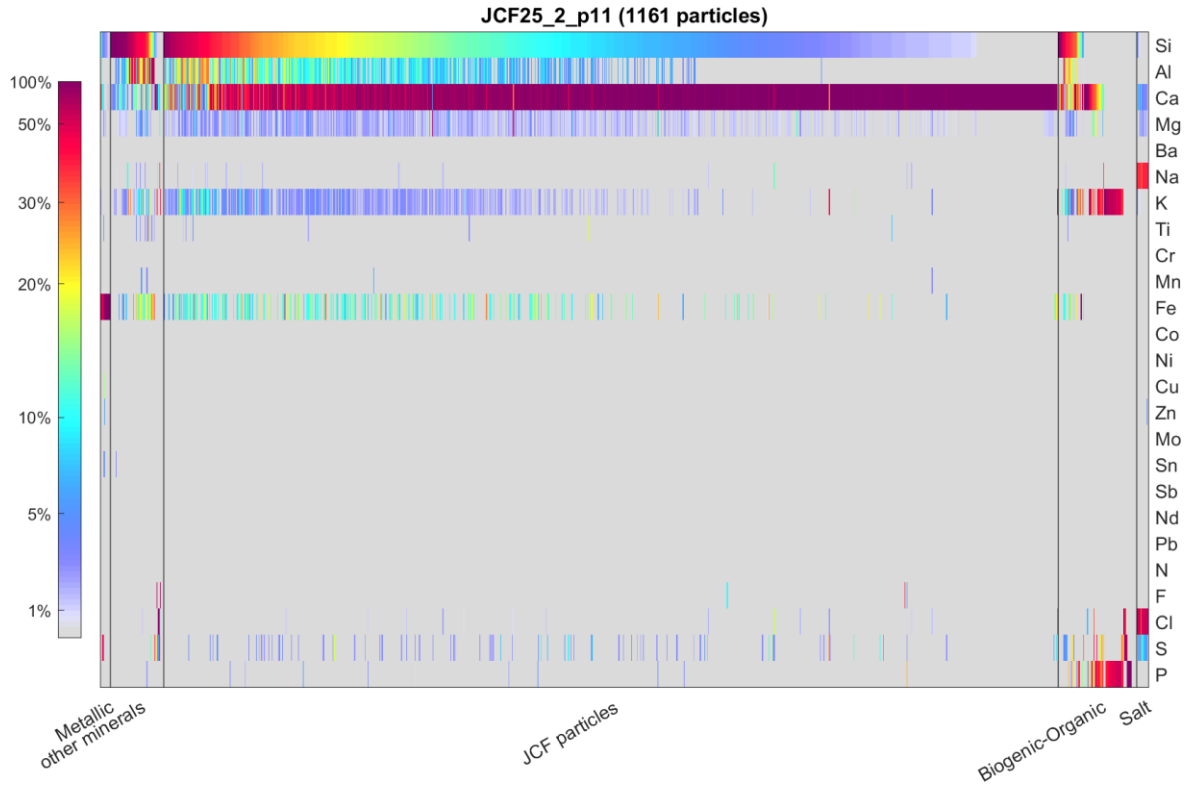
Per. 9


JCF25_2_p9 (1083 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic

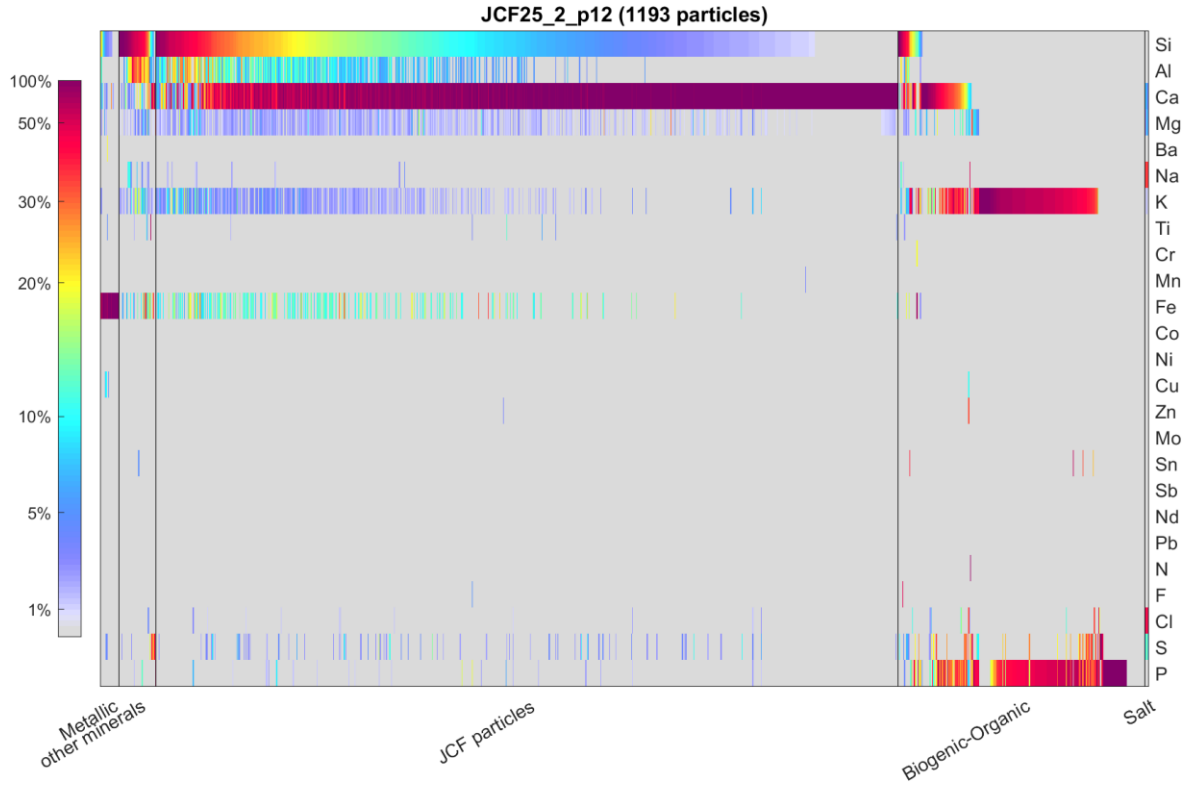
Per. 10


JCF25_2_p10 (1105 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

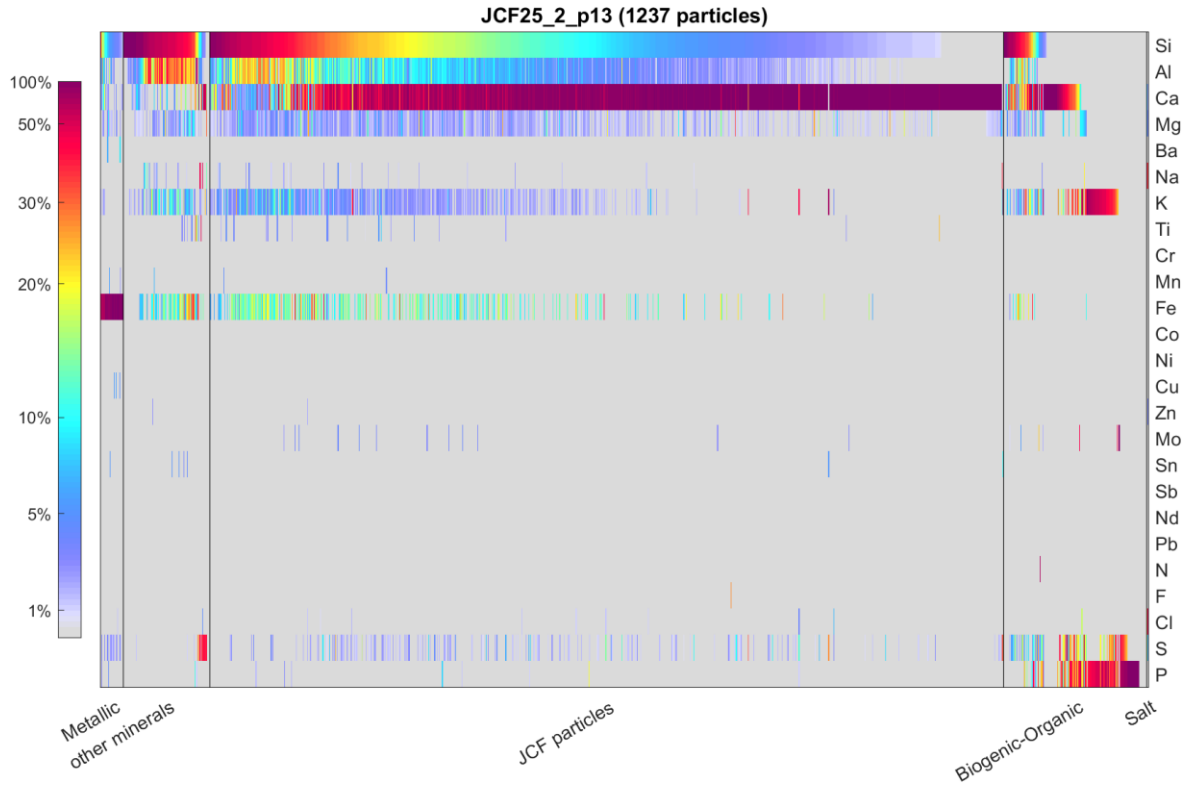
Per. 11


JCF25_2_p11 (1161 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

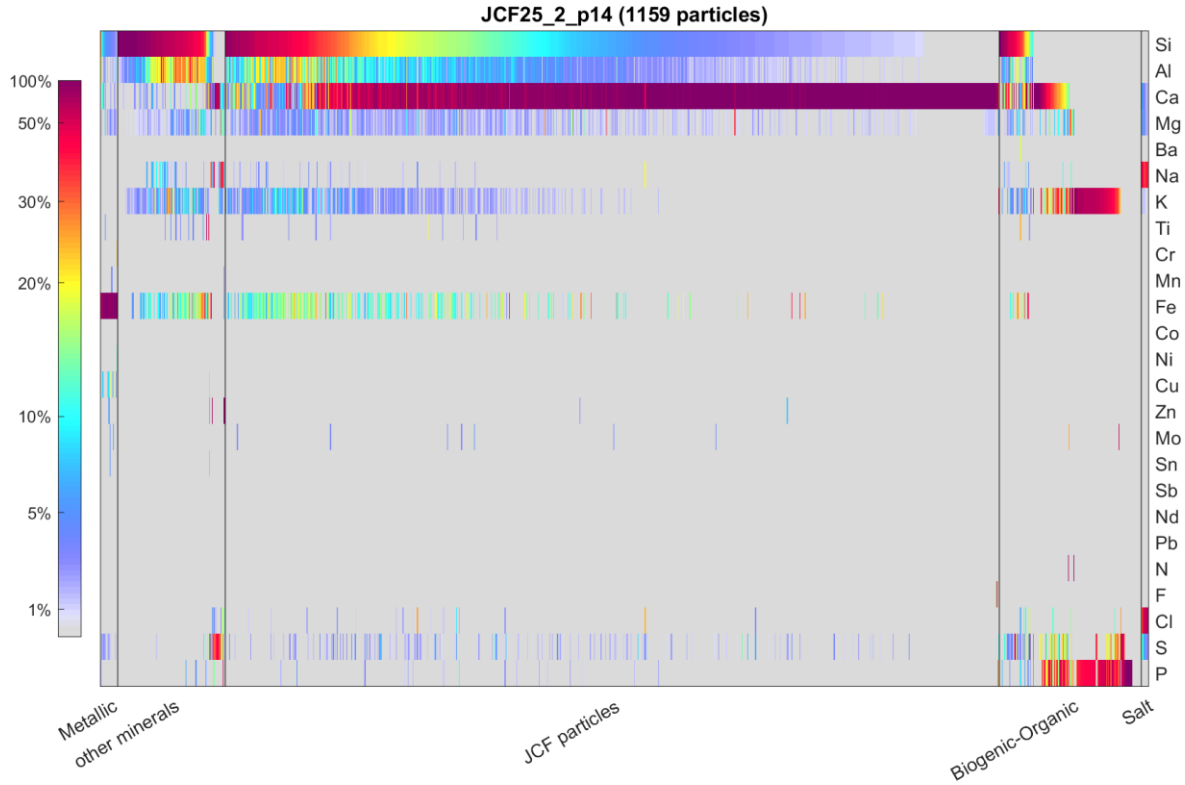
Per. 12


JCF25_2_p12 (1193 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

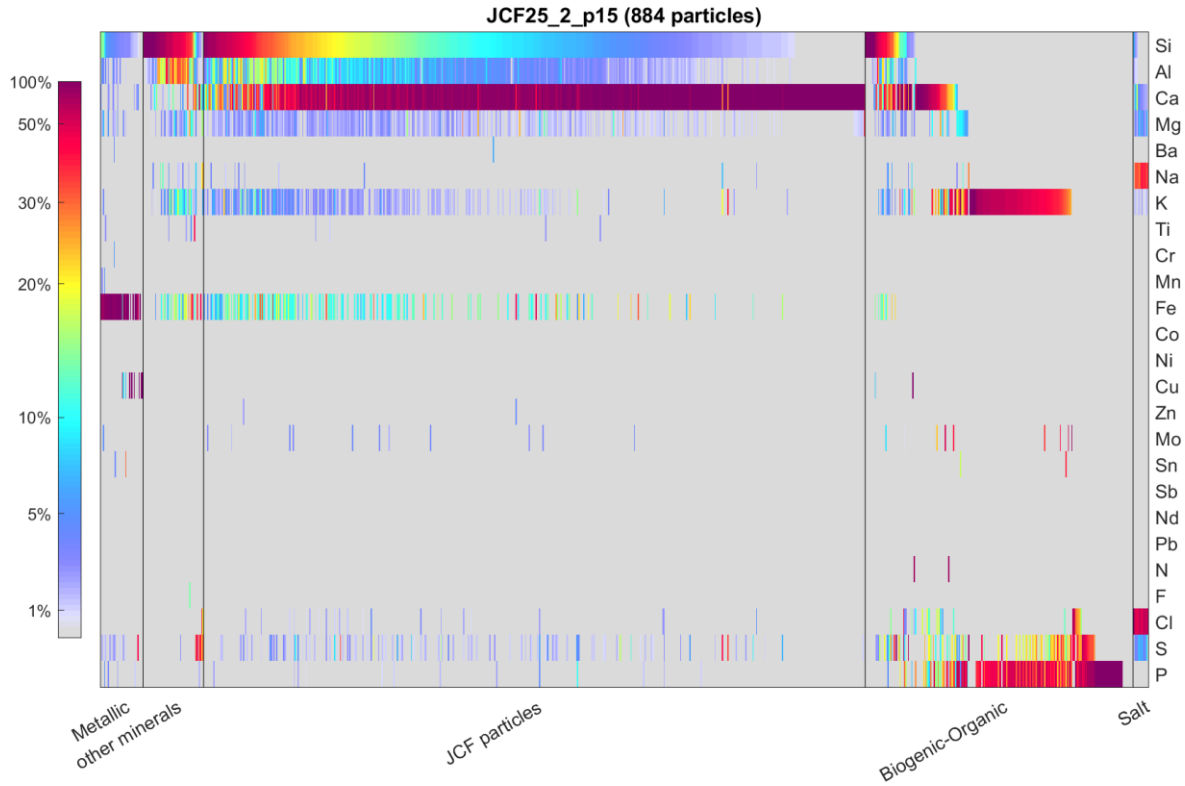
Per. 13


JCF25_2_p13 (1237 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

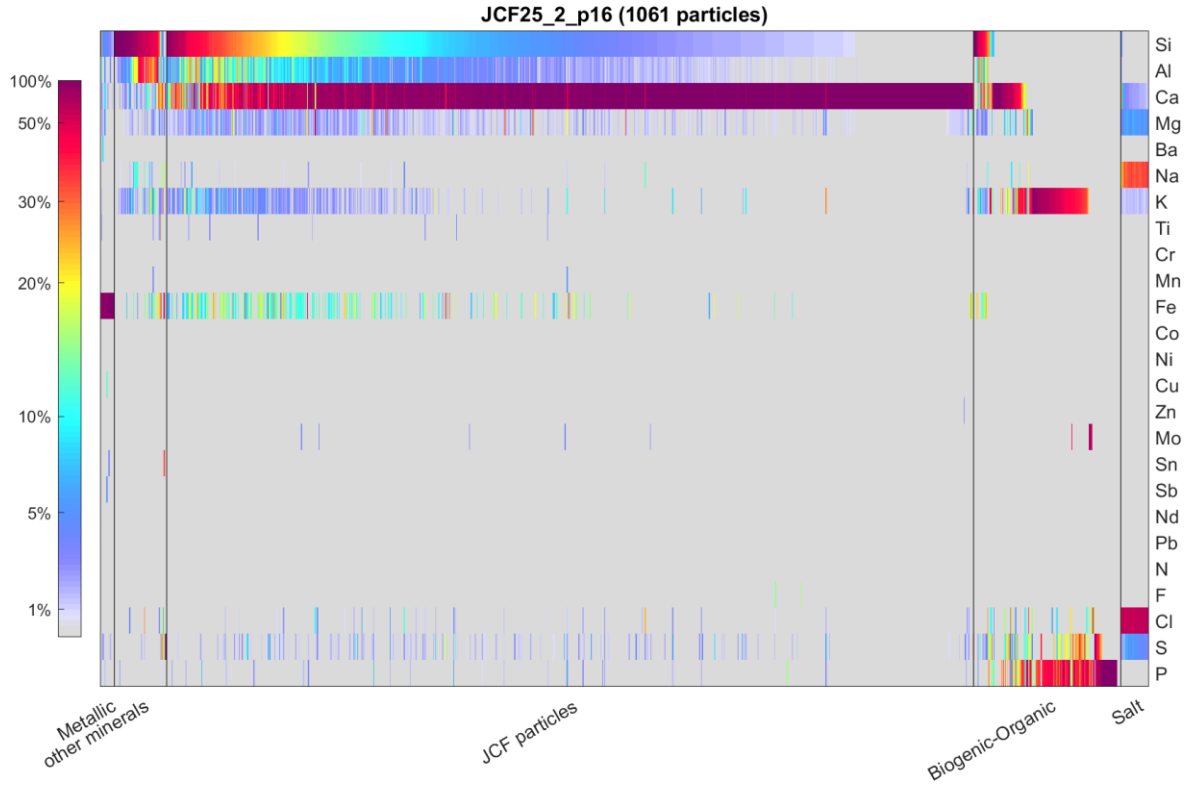
Per. 14


JCF25_2_p14 (1159 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

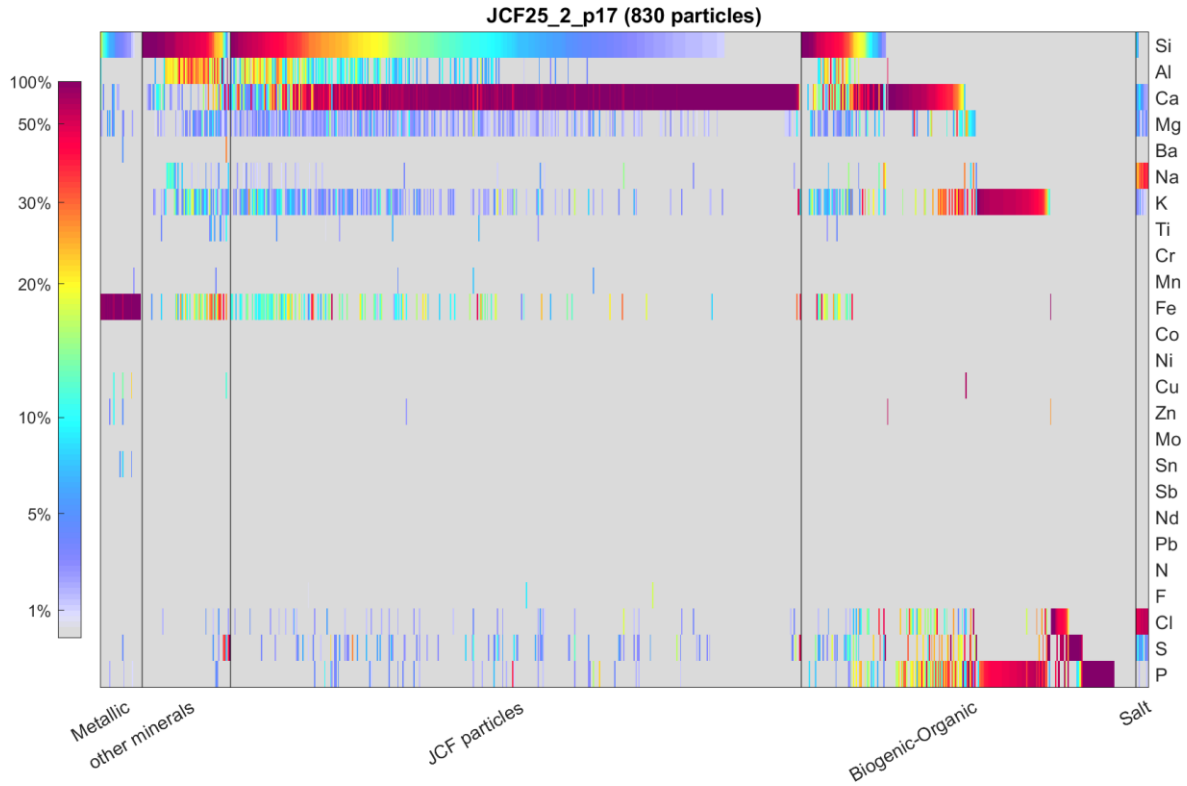
Per. 15


JCF25_2_p15 (884 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

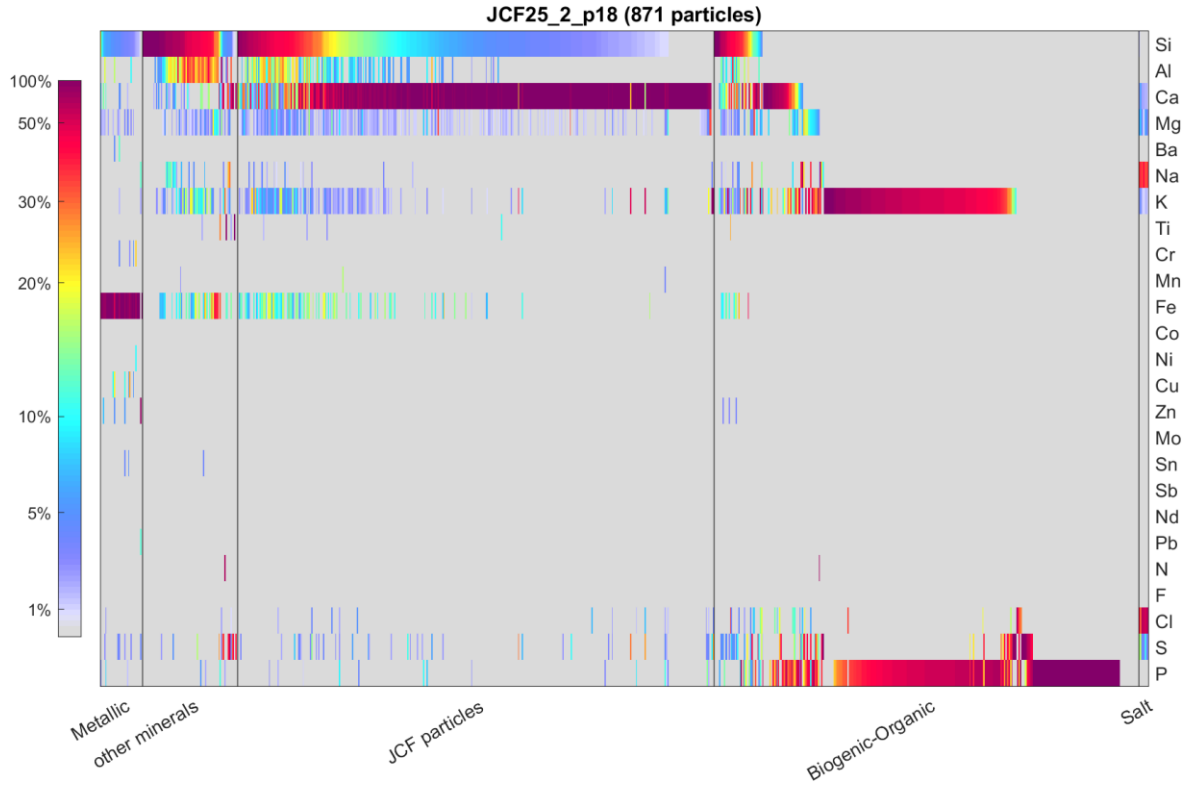
Per. 16


JCF25_2_p16 (1061 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

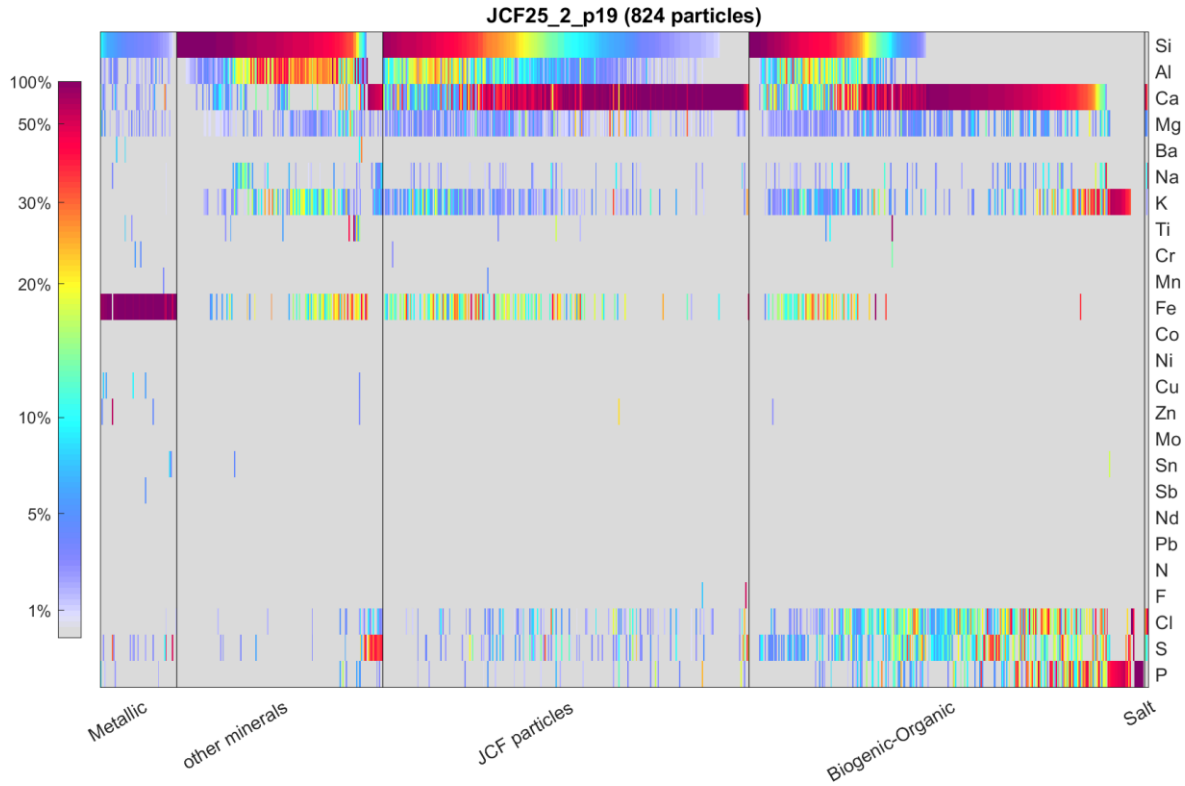
Per. 17


JCF25_2_p17 (830 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

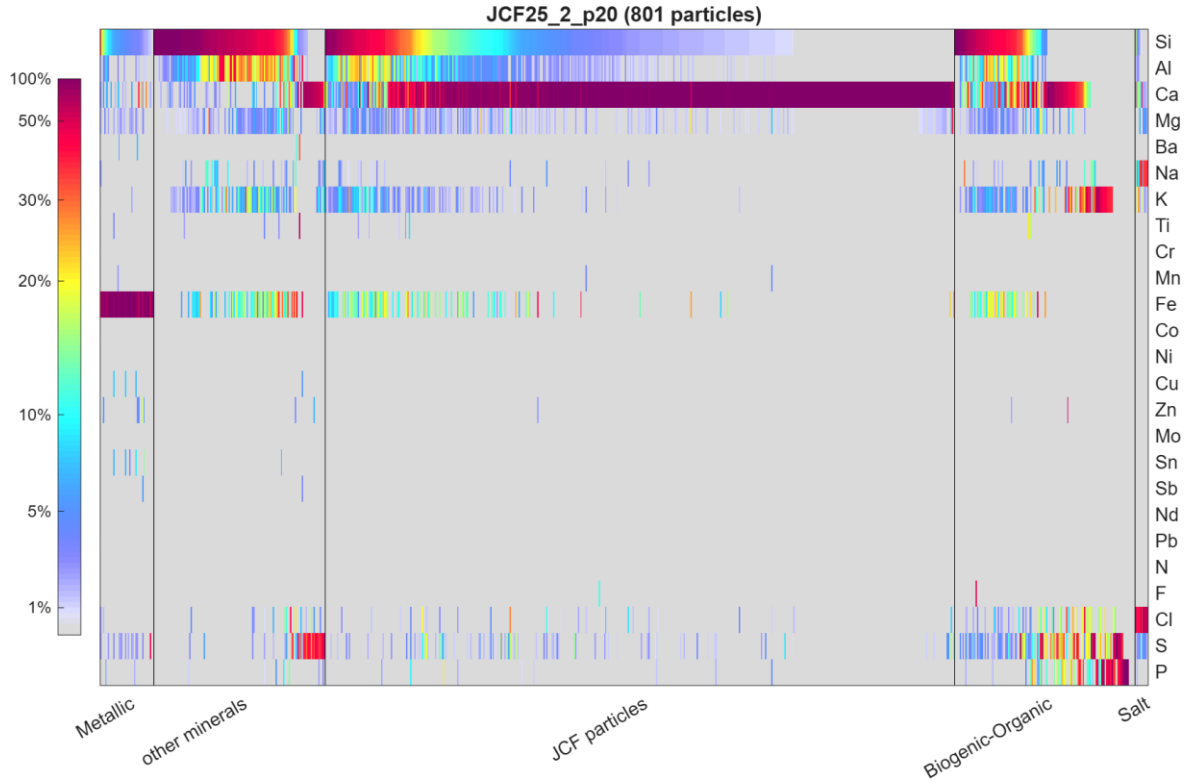
Per. 18


JCF25_2_p18 (871 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

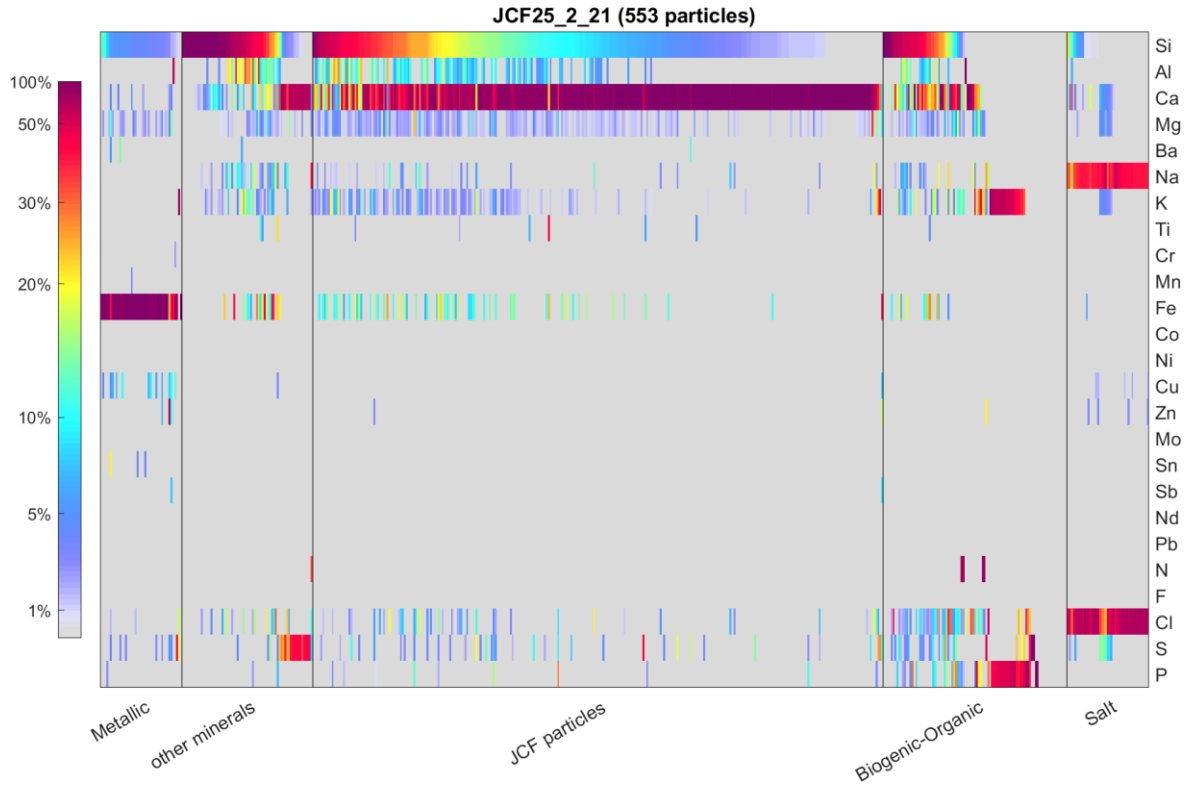
Per. 19


JCF25_2_p19 (824 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

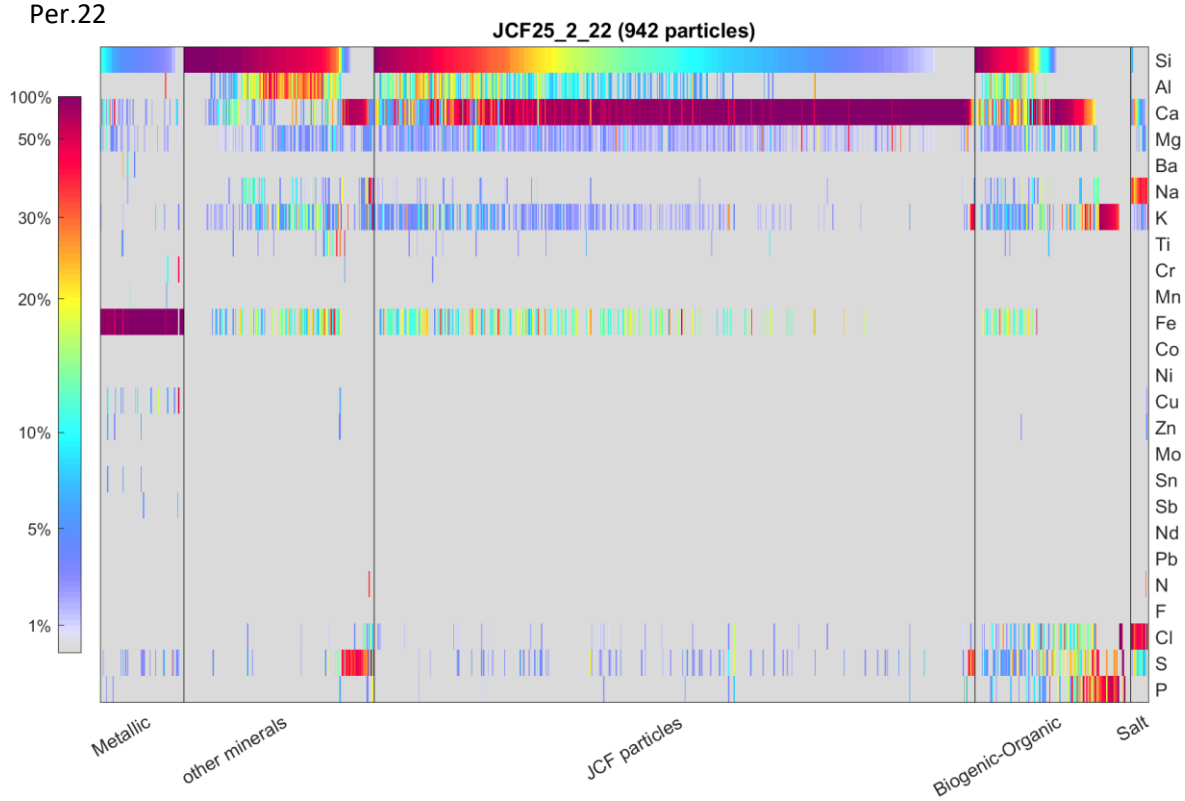
Per.20


JCF25_2_p20 (801 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

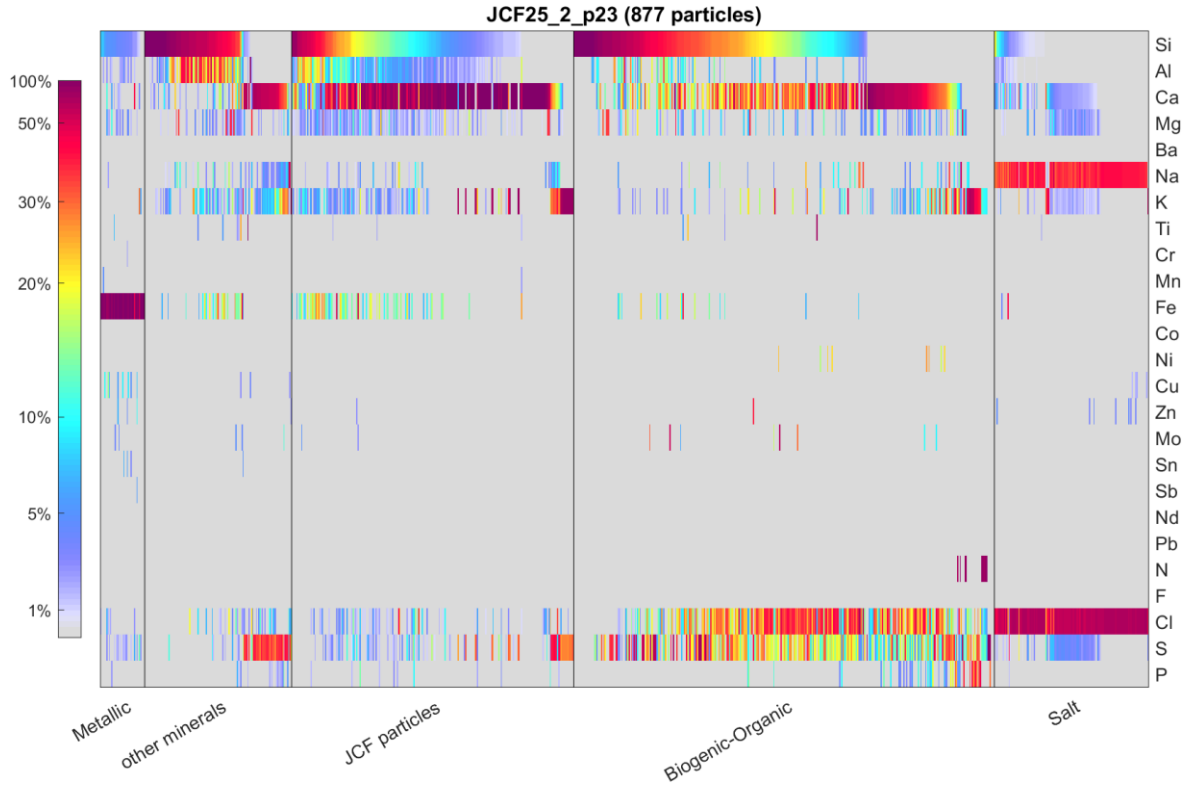
Per.21


JCF25_2_21 (553 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

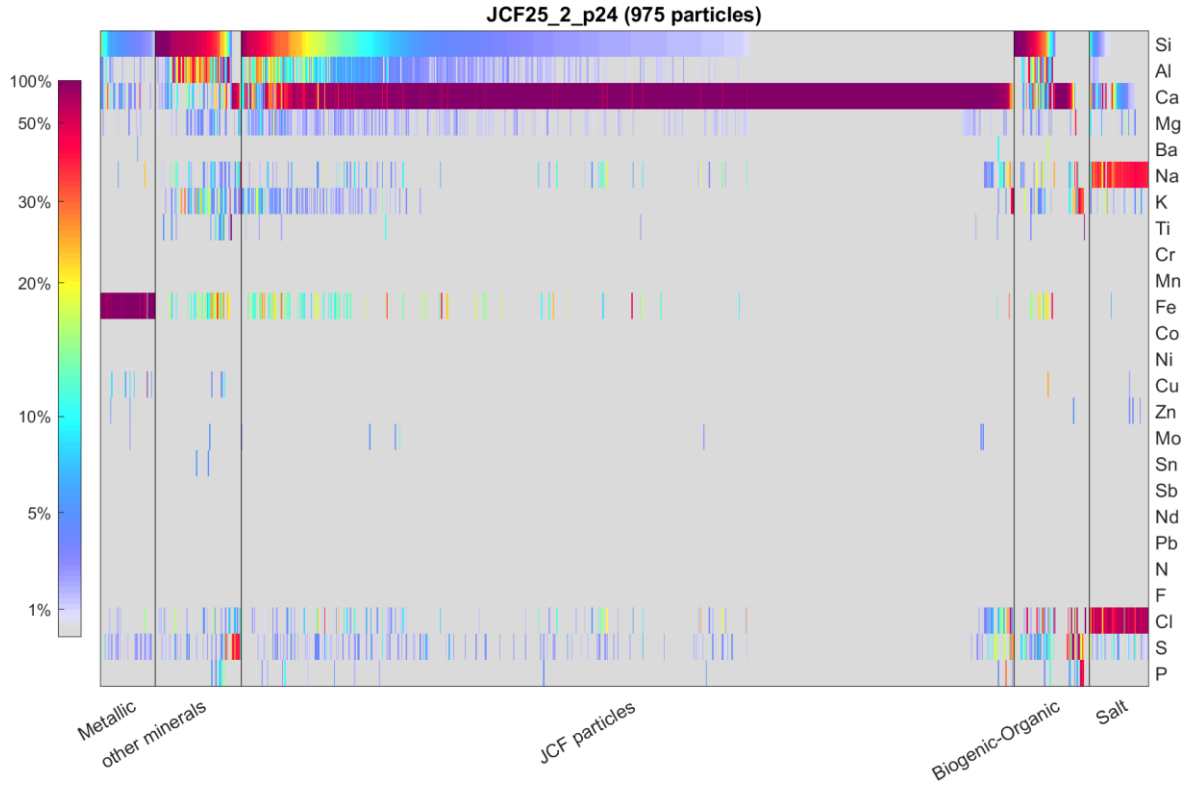
Per.22


JCF25_2_22 (942 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

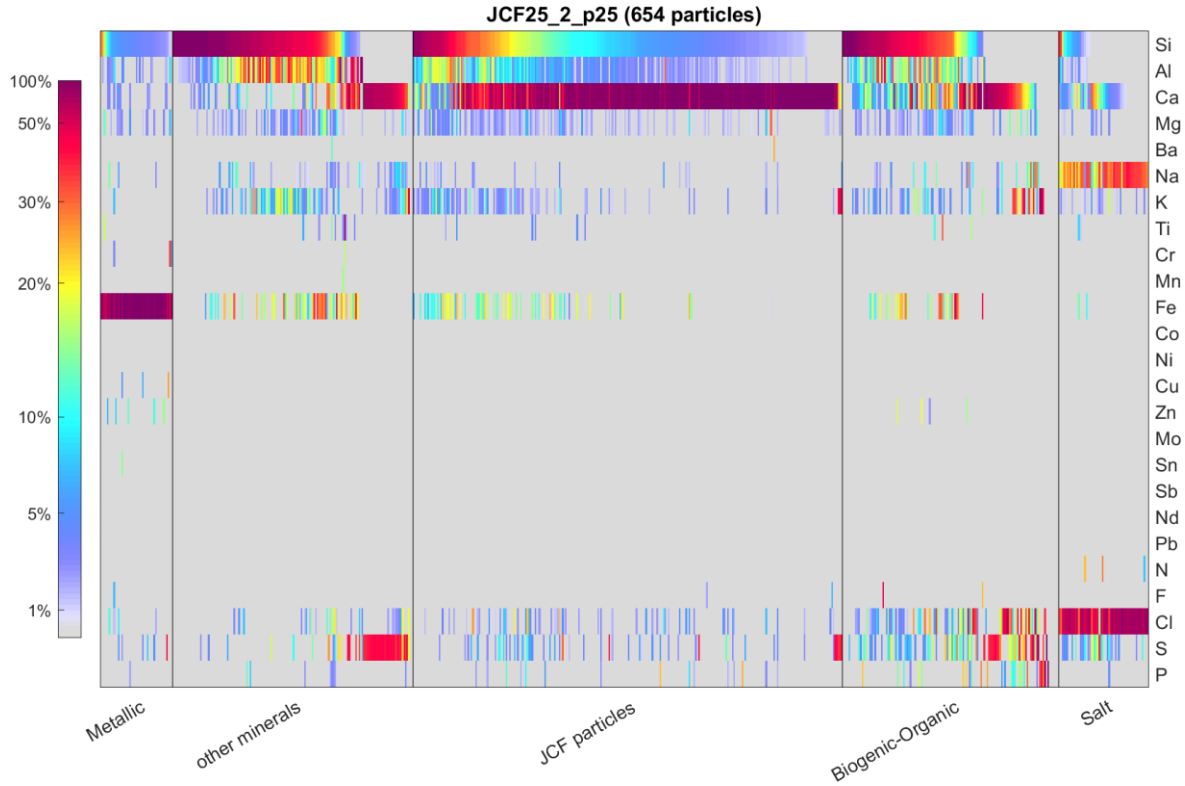
Per.23


JCF25_2_p23 (877 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

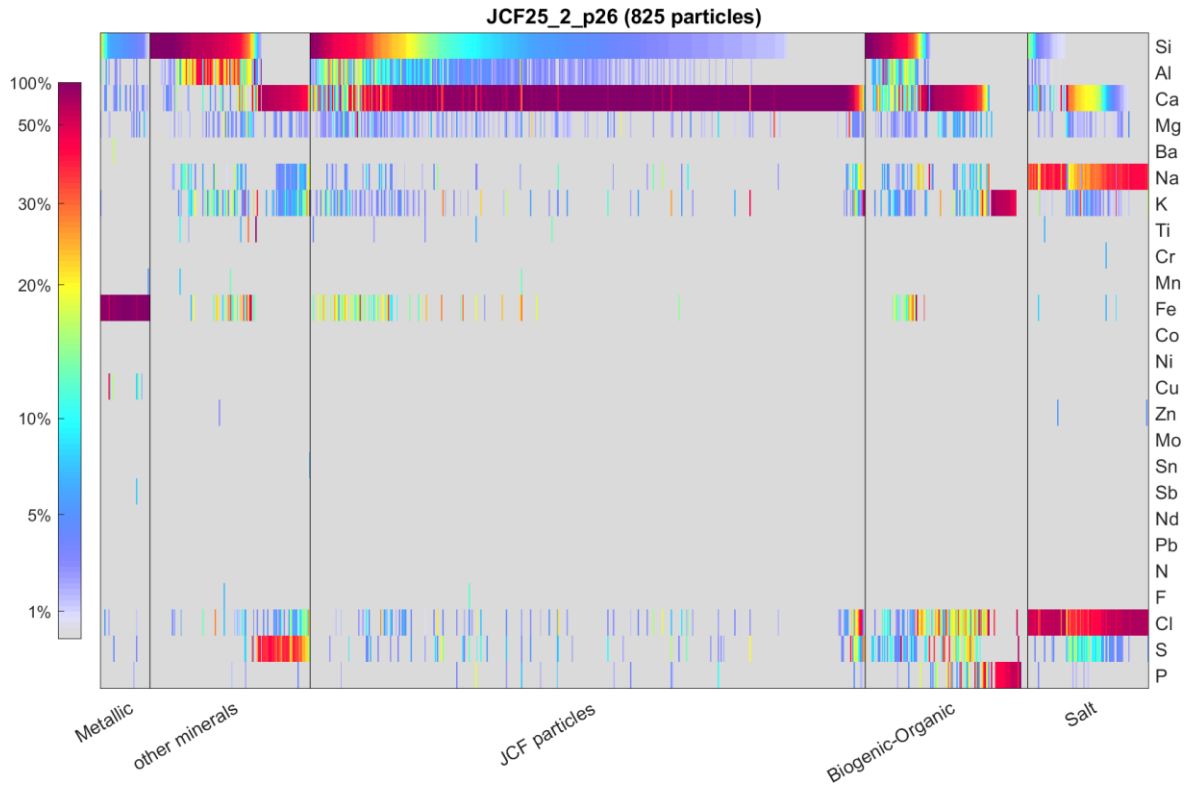
Per.24


JCF25_2_p24 (975 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per.25

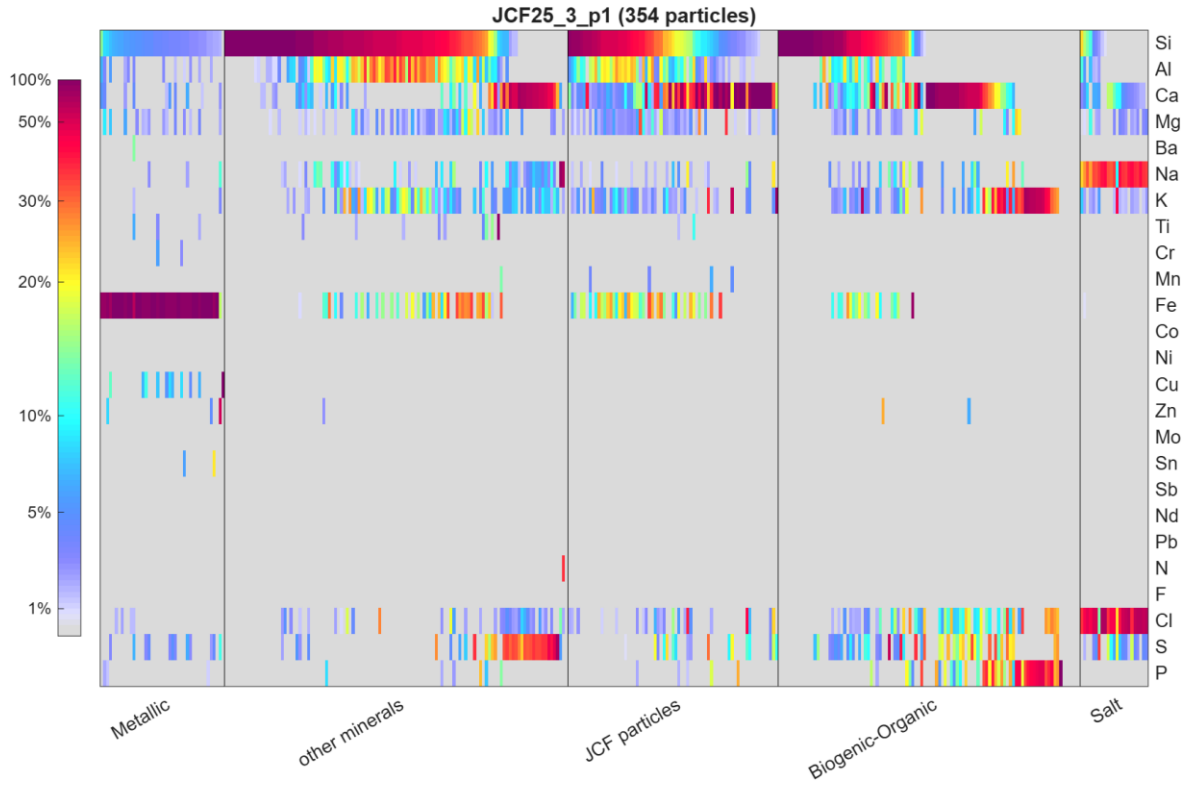

JCF25_2_p25 (654 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per.26

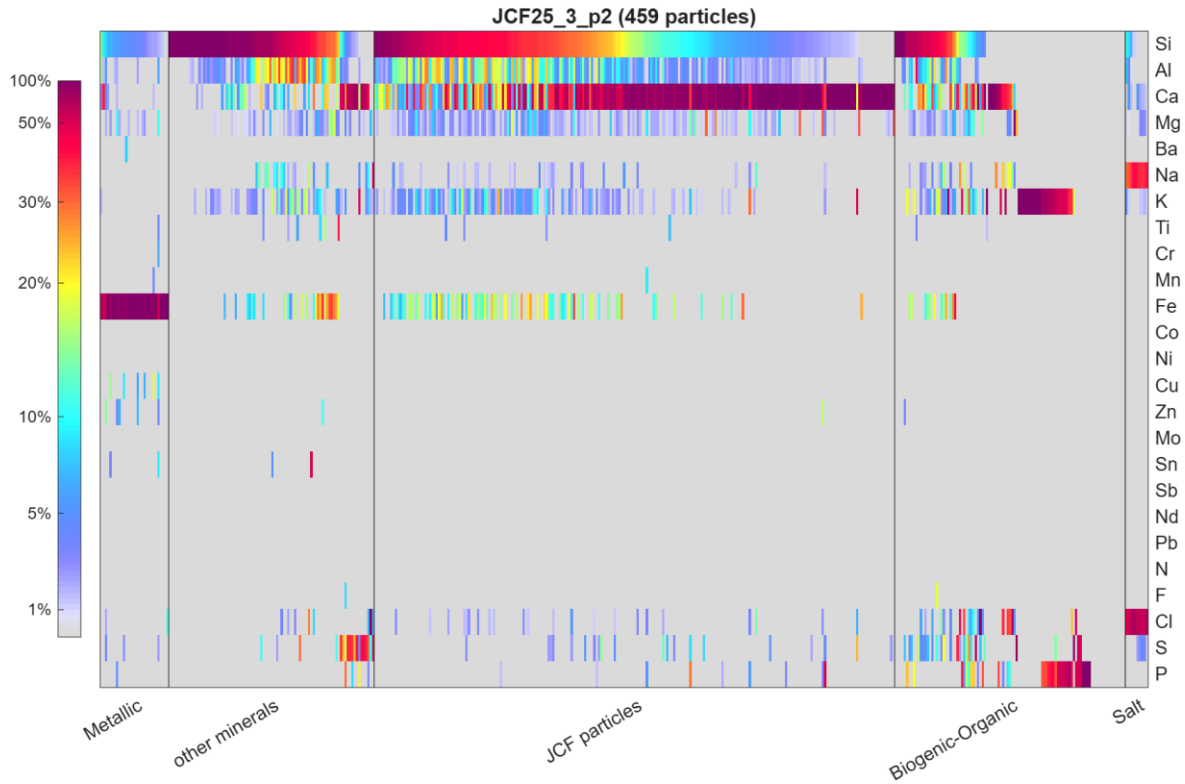


8.3 Heatmaps Immissionsstandort JCF3

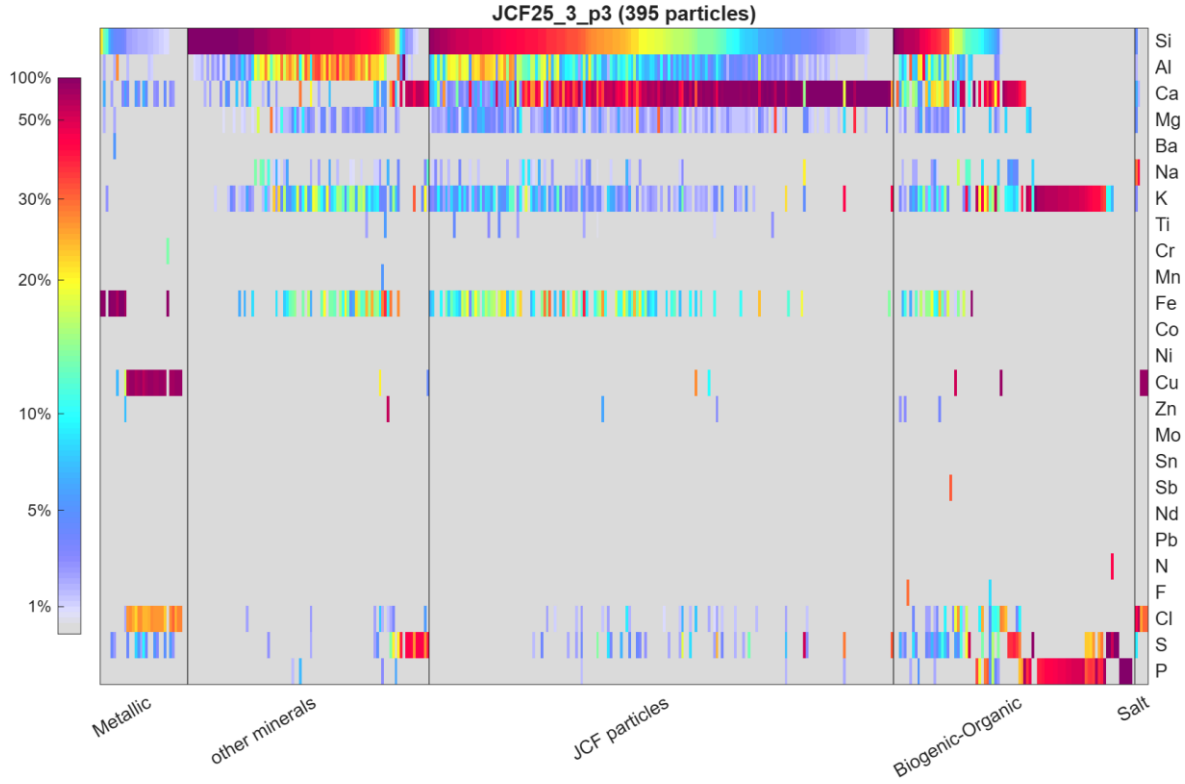
Per. 1



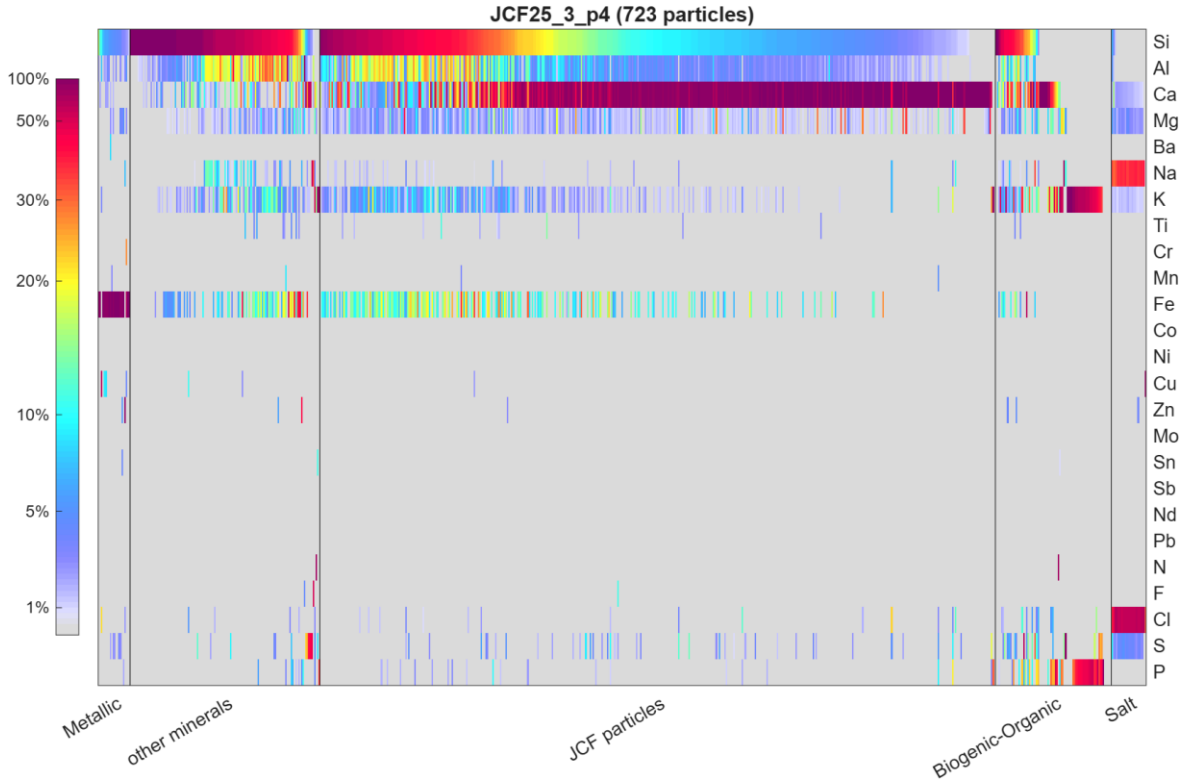
Per. 2


JCF25_3_p2 (459 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

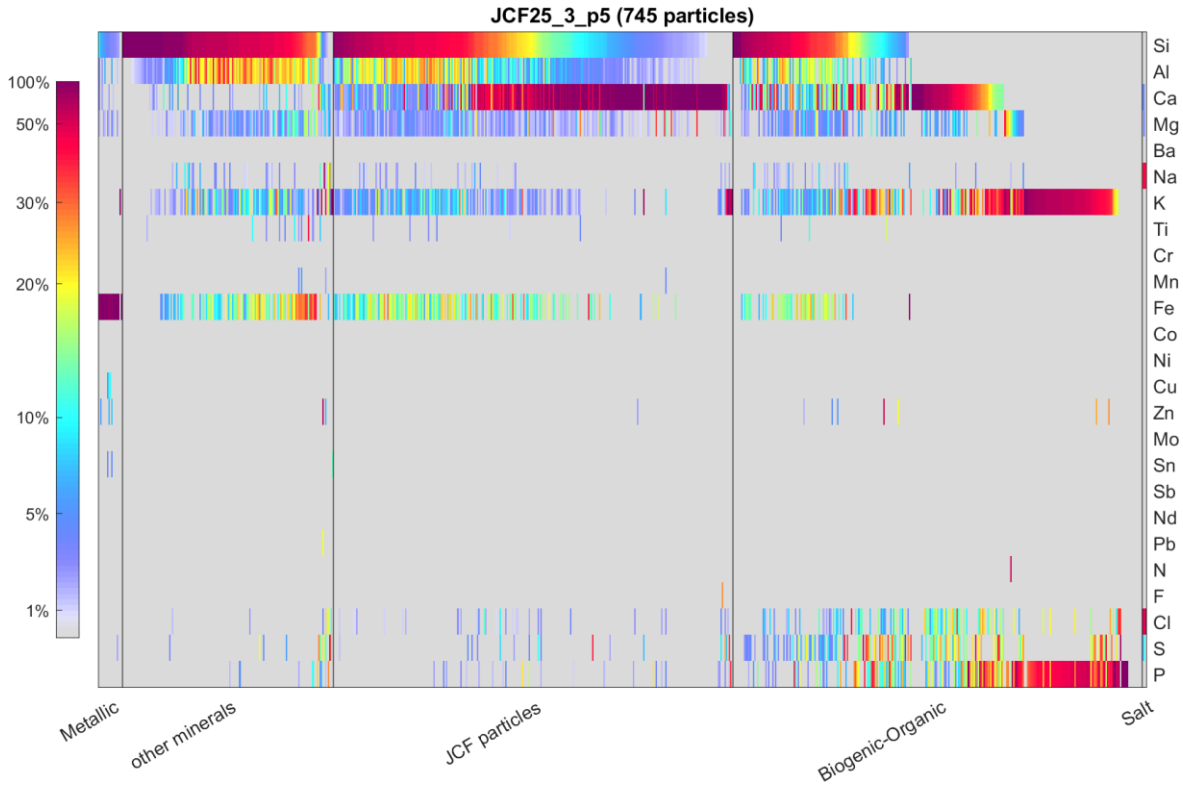
Per. 3


JCF25_3_p3 (395 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

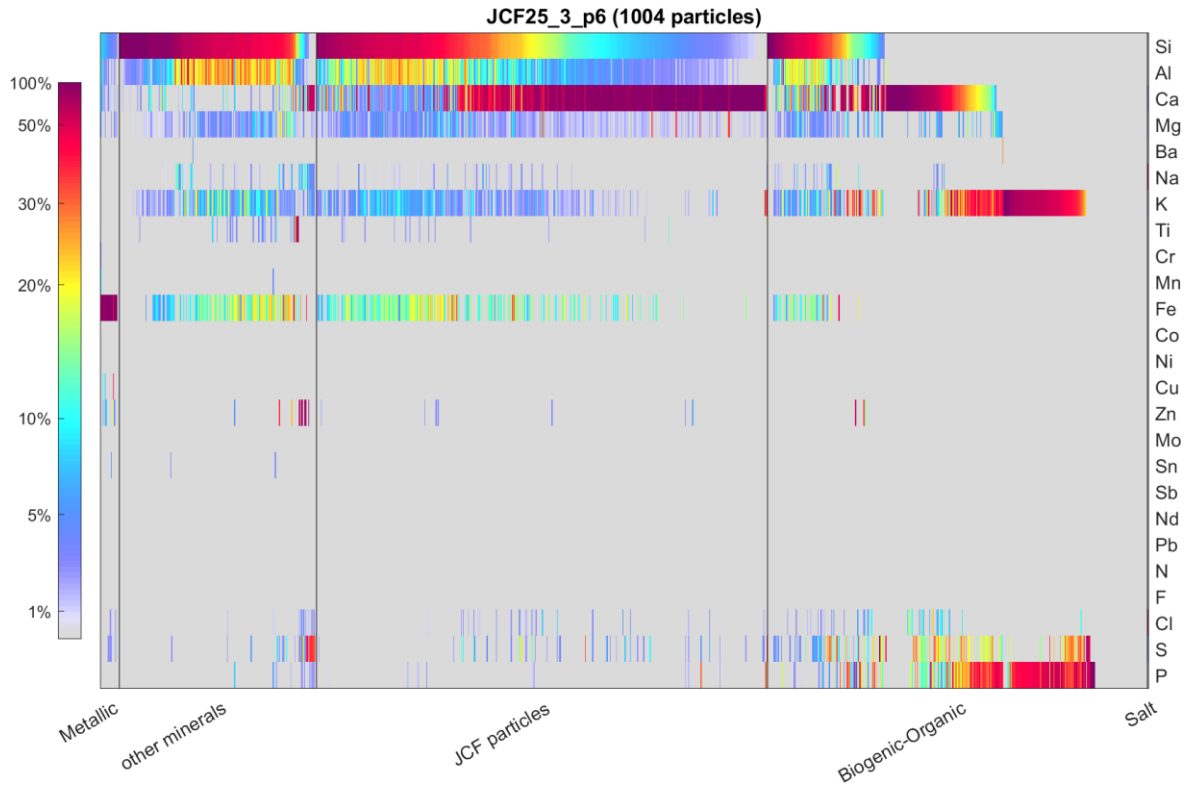
Per. 4


JCF25_3_p4 (723 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per. 5


JCF25_3_p5 (745 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per. 6



Per. 7

Ausfall

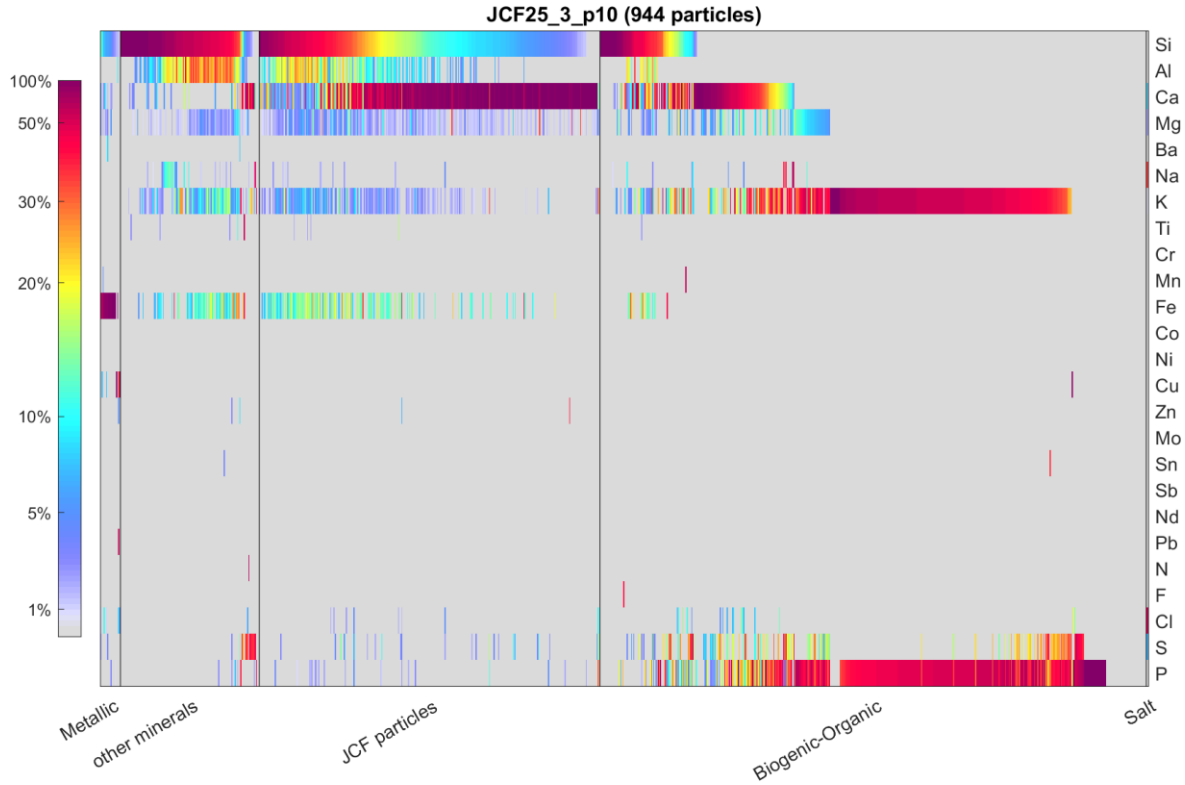
Per. 8

Ausfall

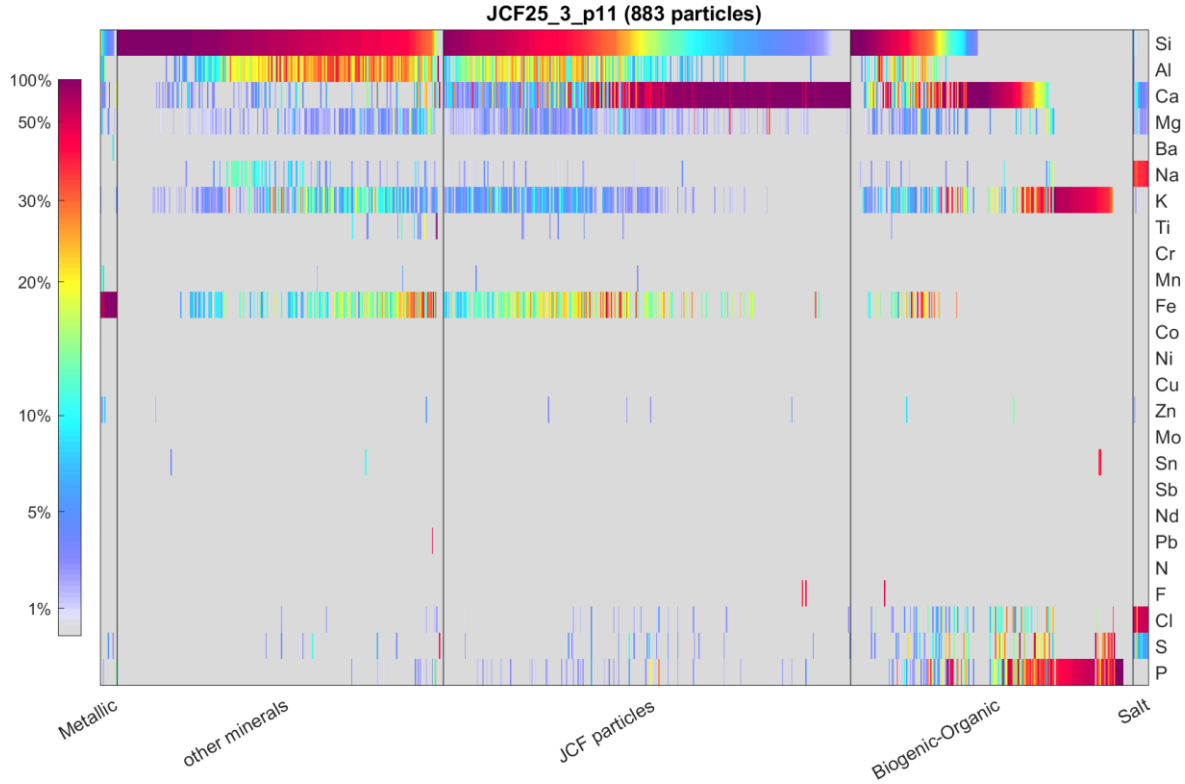
Per. 9

Ausfall

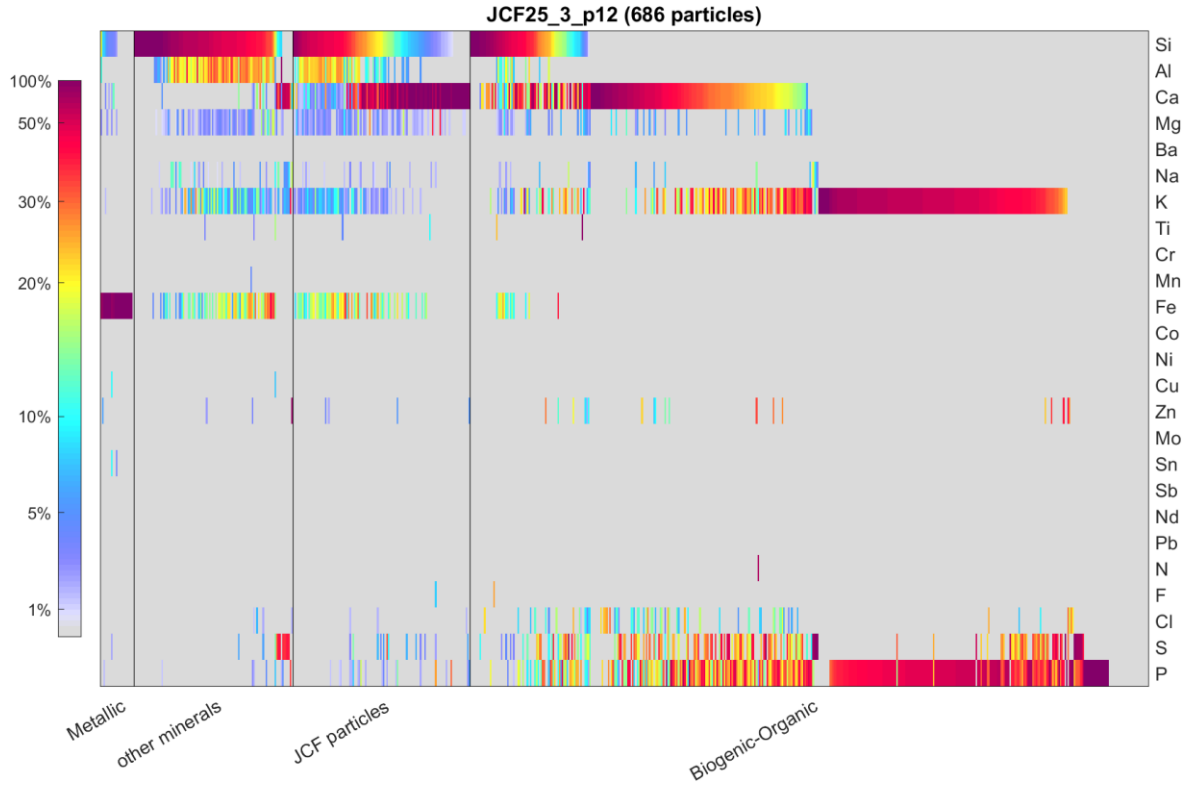
Per. 10


JCF25_3_p10 (944 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

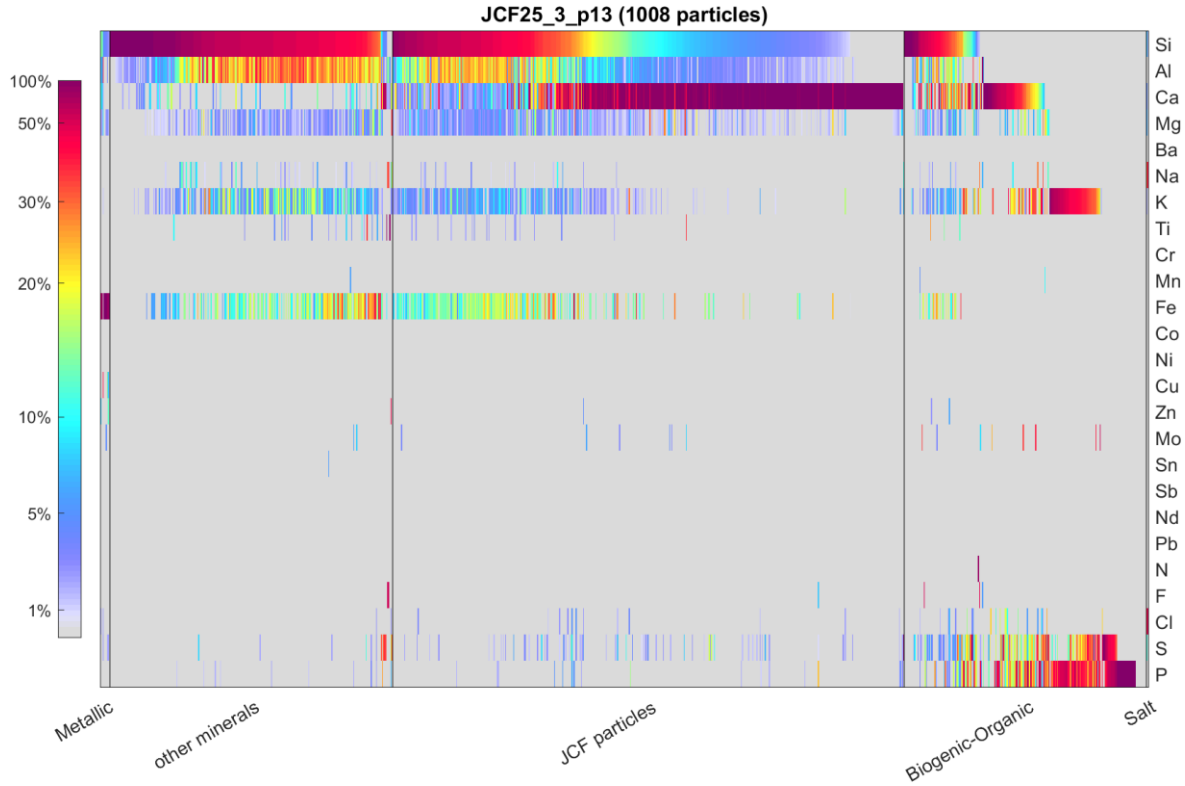
Per. 11


JCF25_3_p11 (883 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

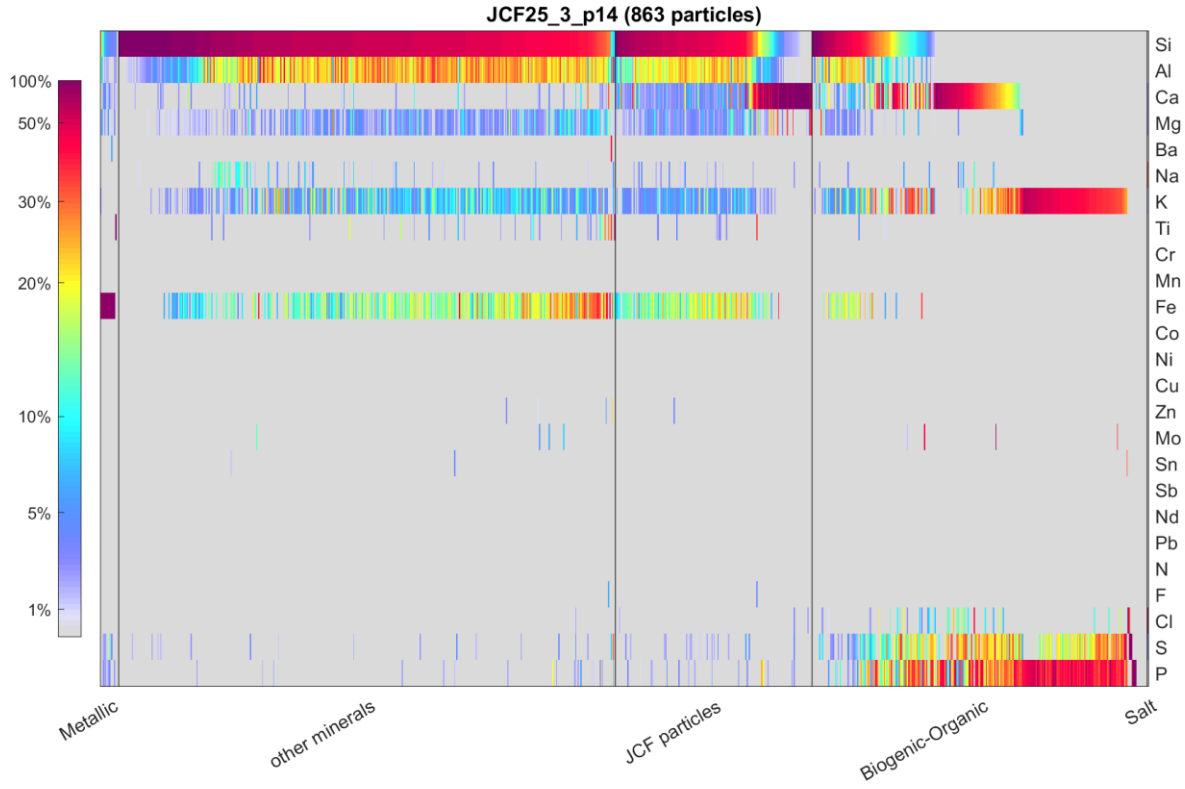
Per. 12


JCF25_3_p12 (686 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic

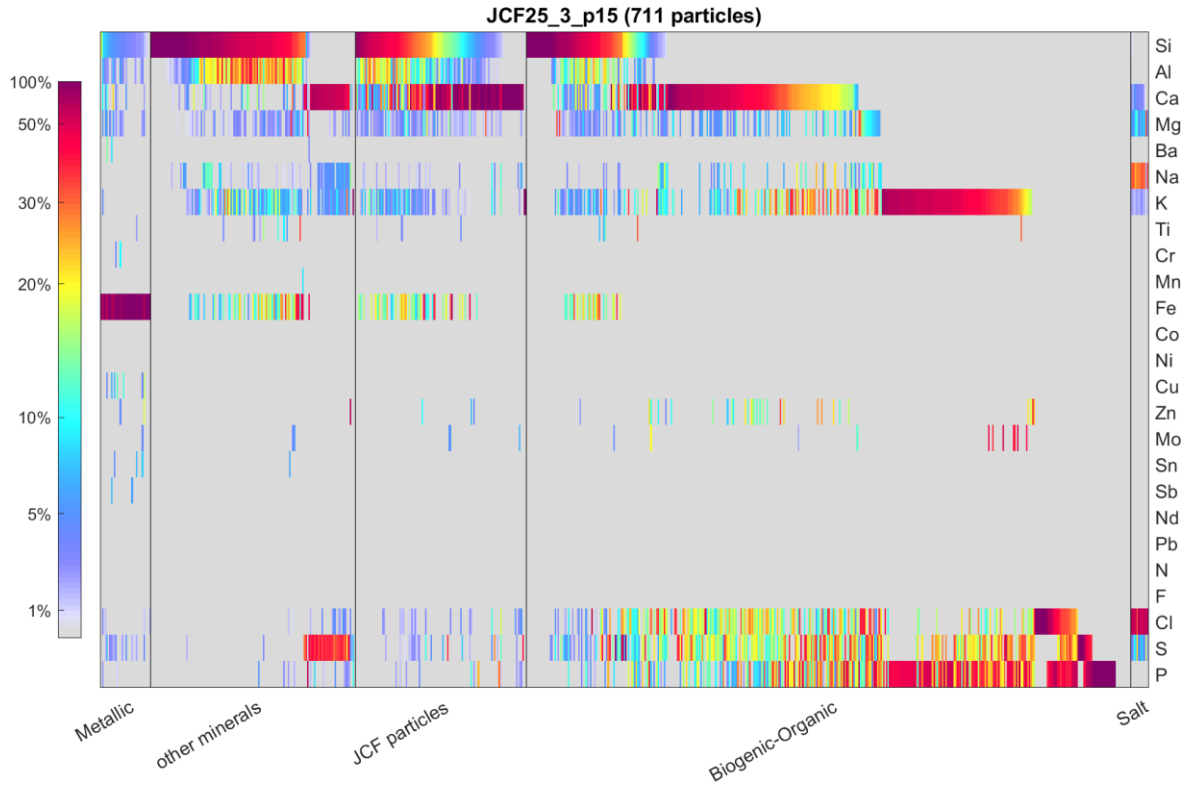
Per. 13


JCF25_3_p13 (1008 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

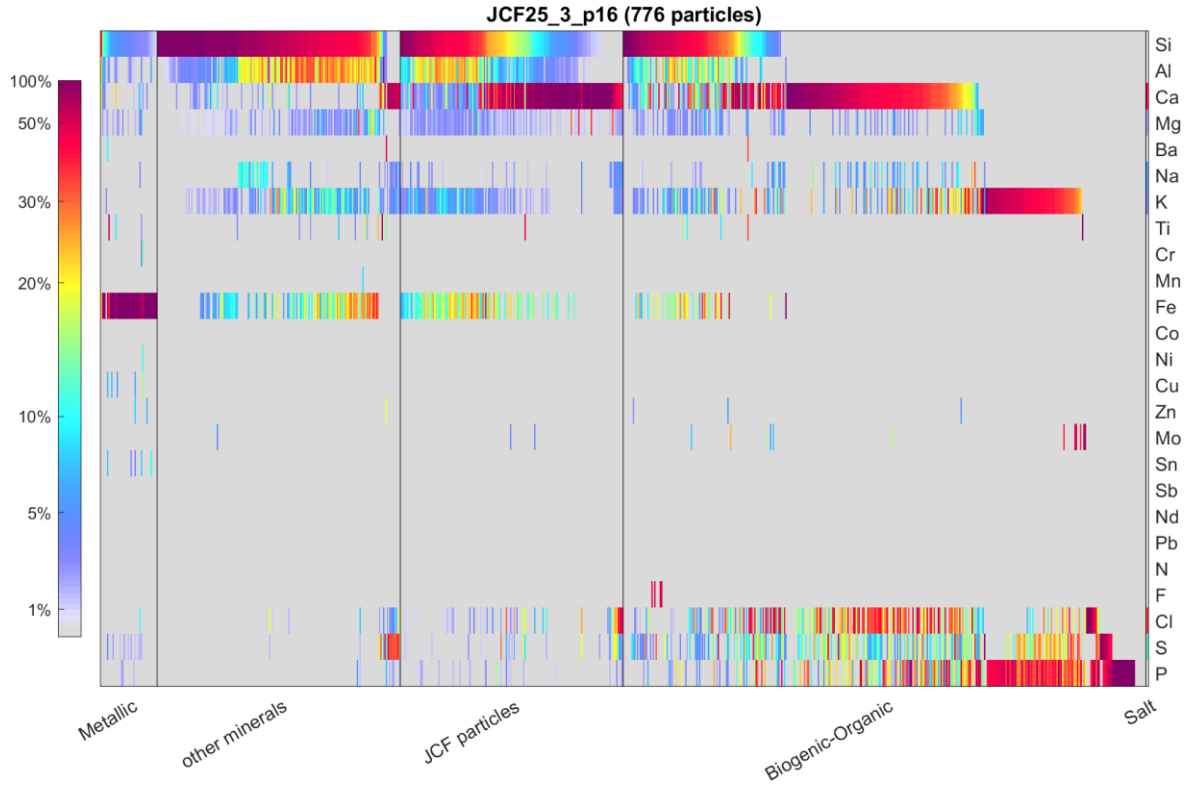
Per. 14


JCF25_3_p14 (863 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

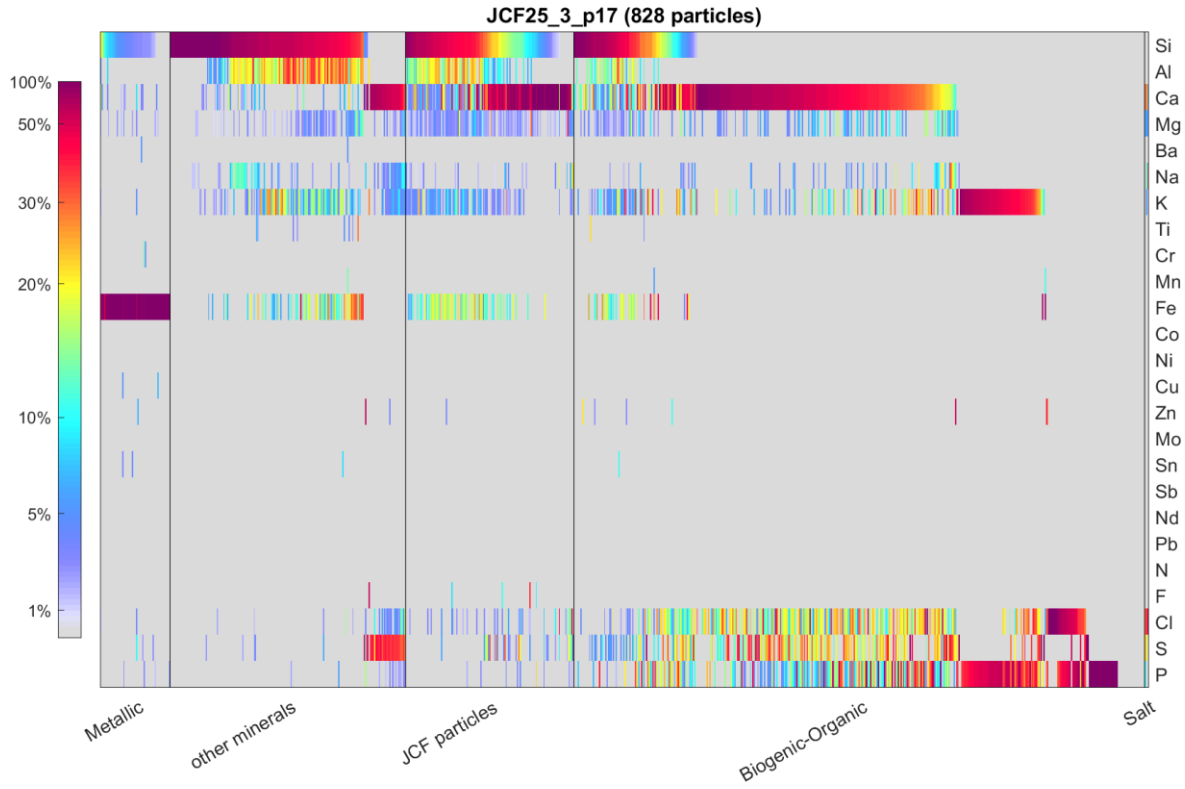
Per. 15


JCF25_3_p15 (711 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

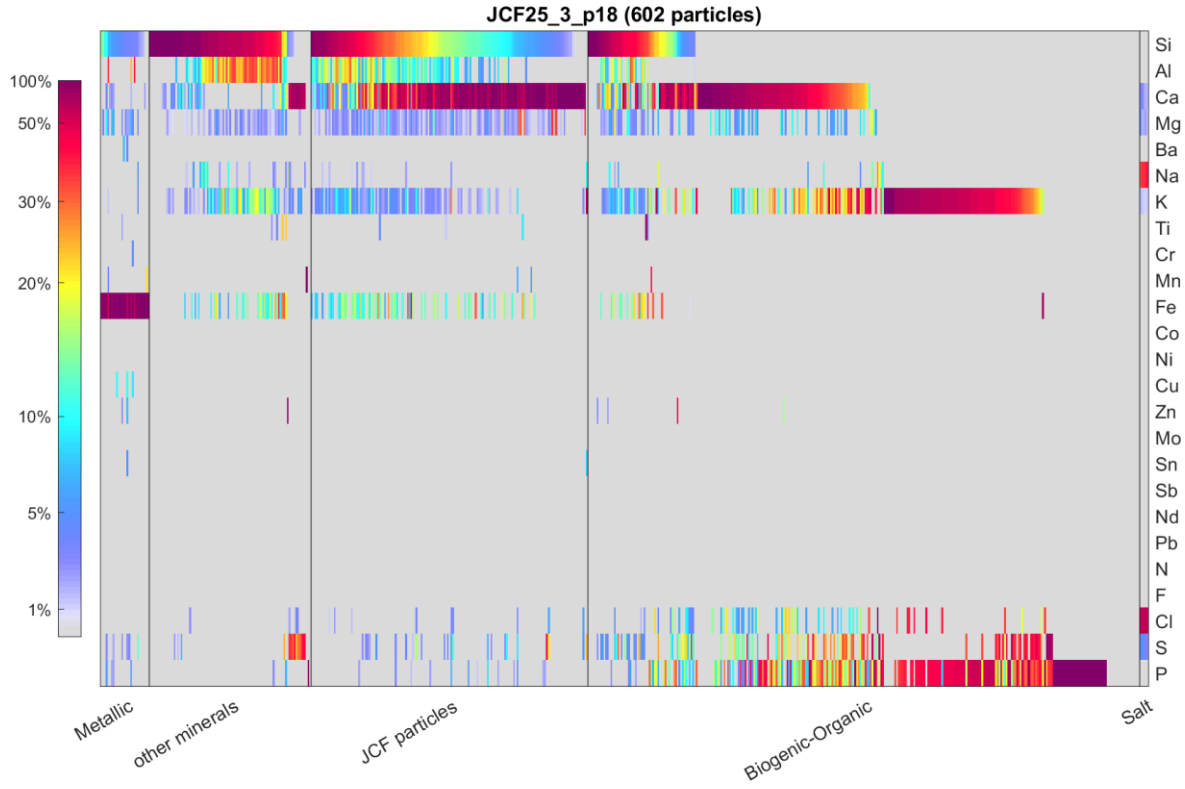
Per. 16


JCF25_3_p16 (776 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per. 17


JCF25_3_p17 (828 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

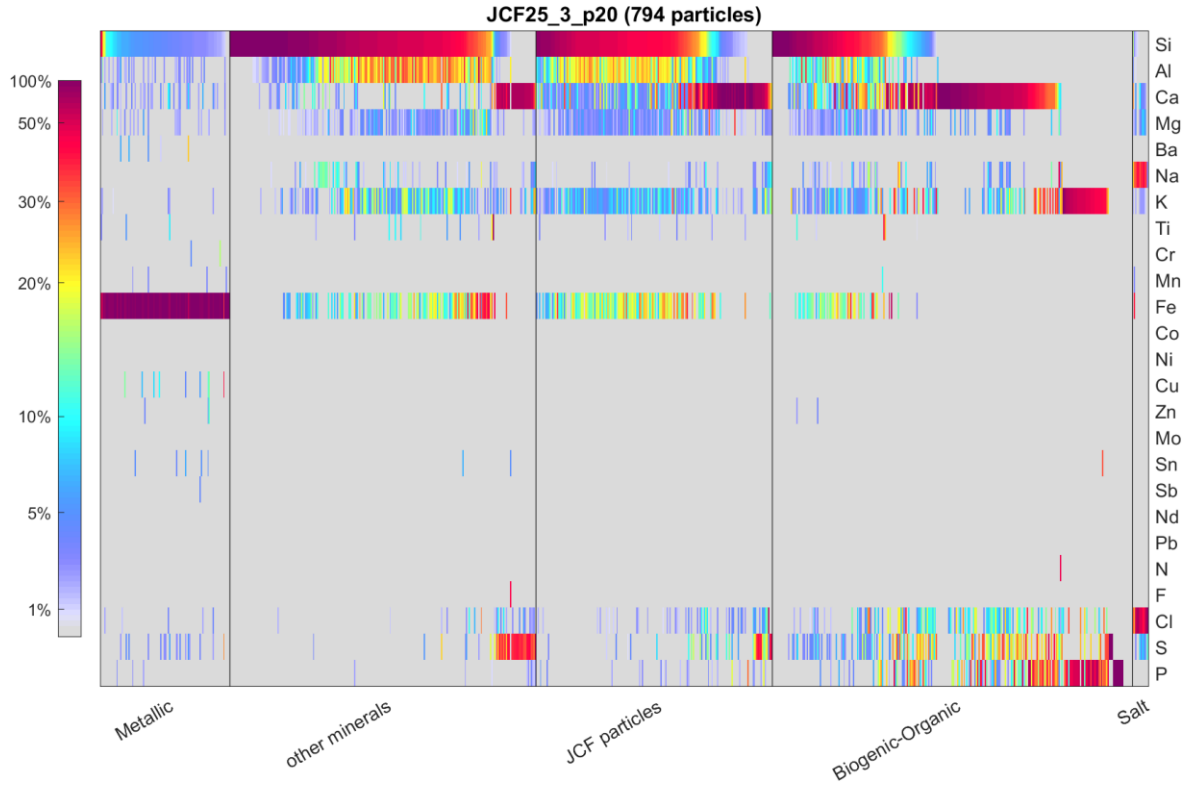
Per. 18


JCF25_3_p18 (602 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

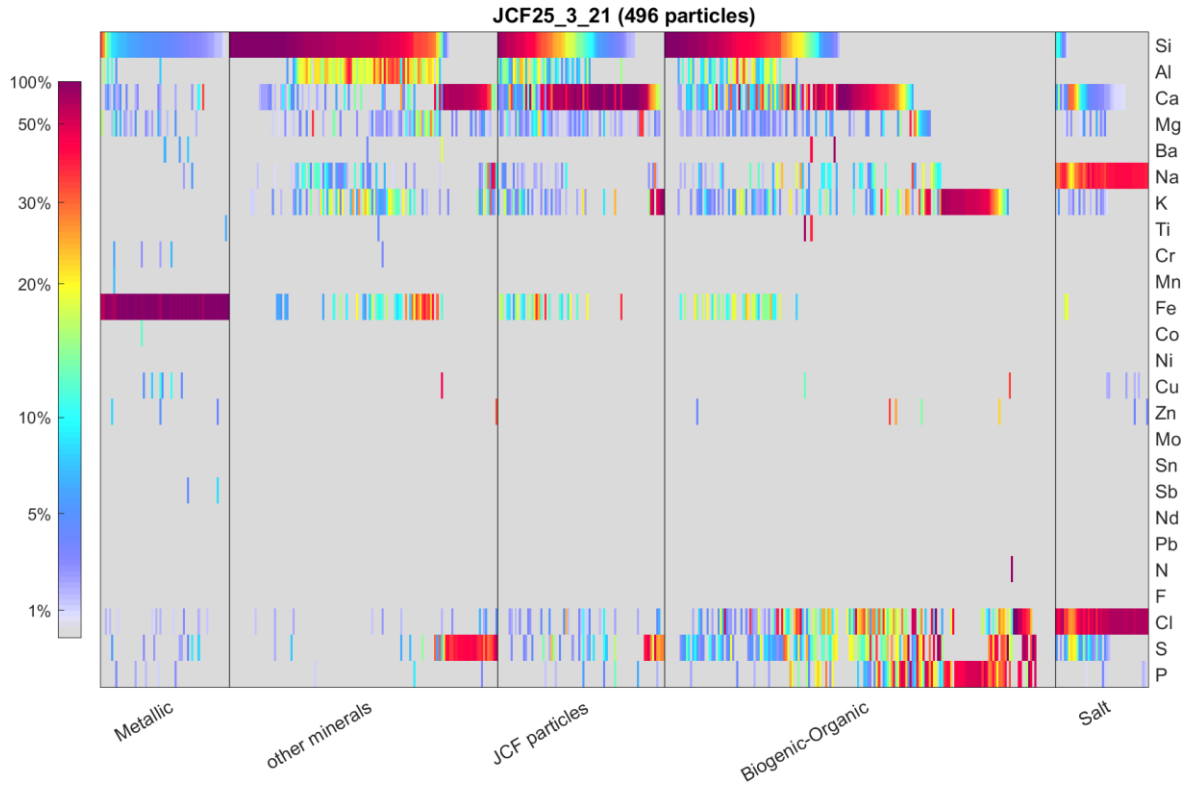
Per. 19


JCF25_3_p19 (842 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

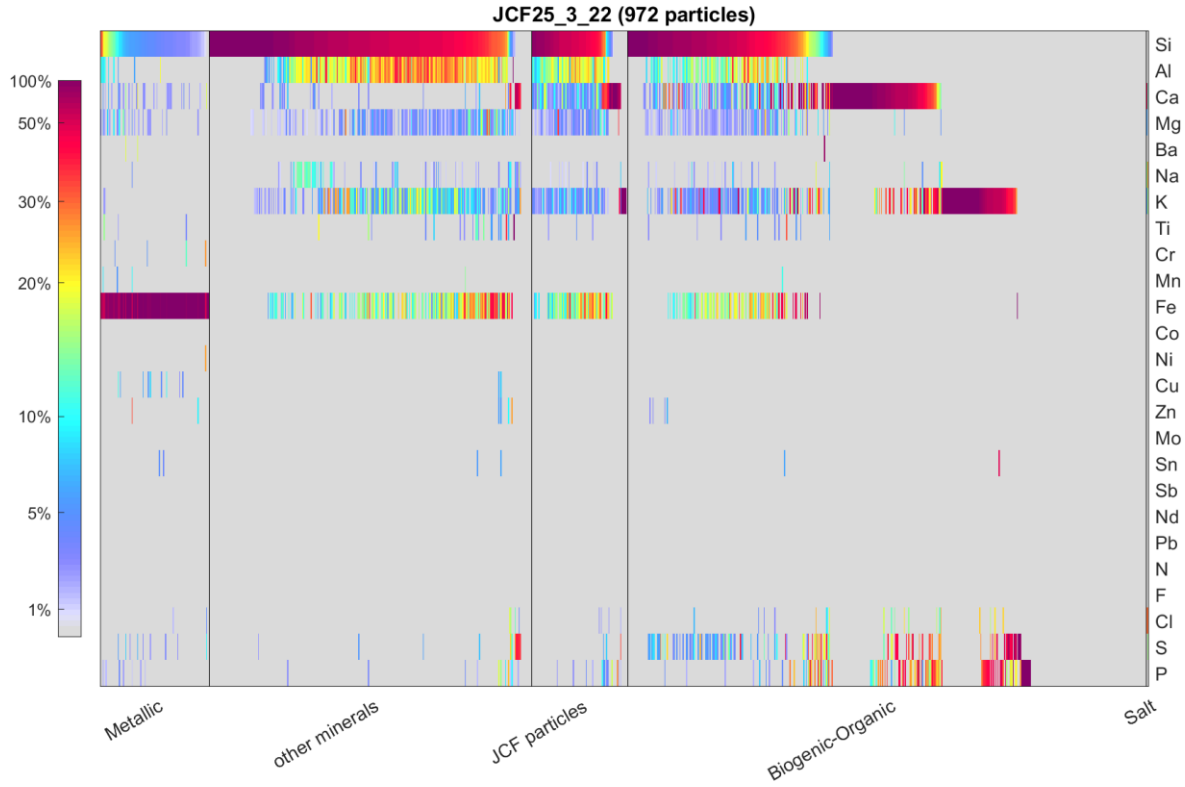
Per. 20


JCF25_3_p20 (794 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

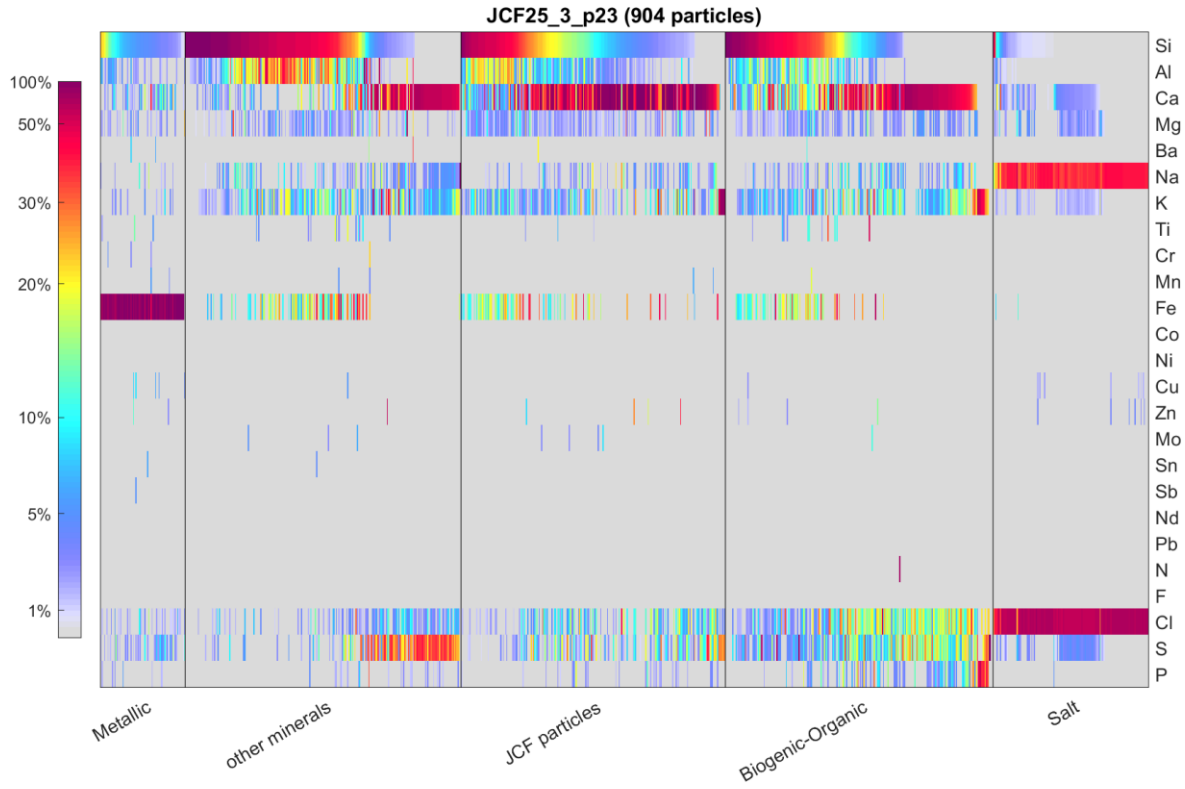
Per. 21


JCF25_3_21 (496 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

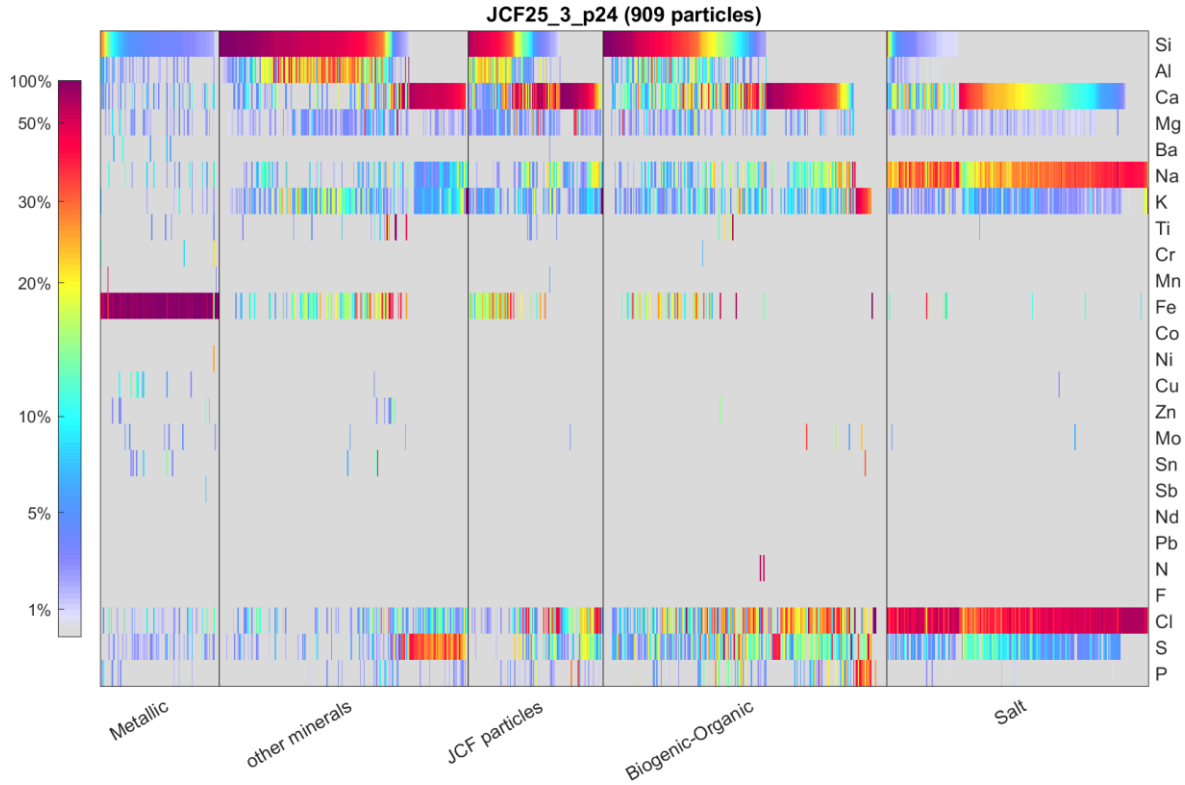
Per. 22


JCF25_3_22 (972 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

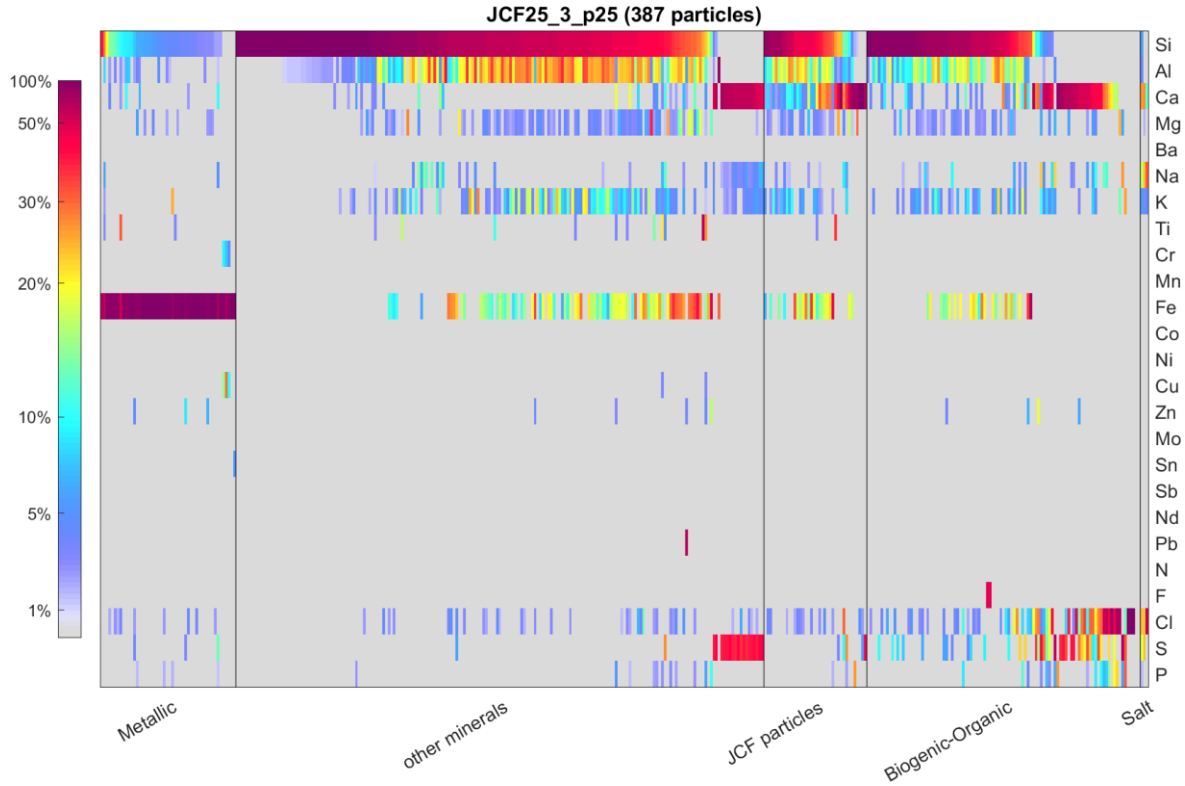
Per. 23


JCF25_3_p23 (904 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

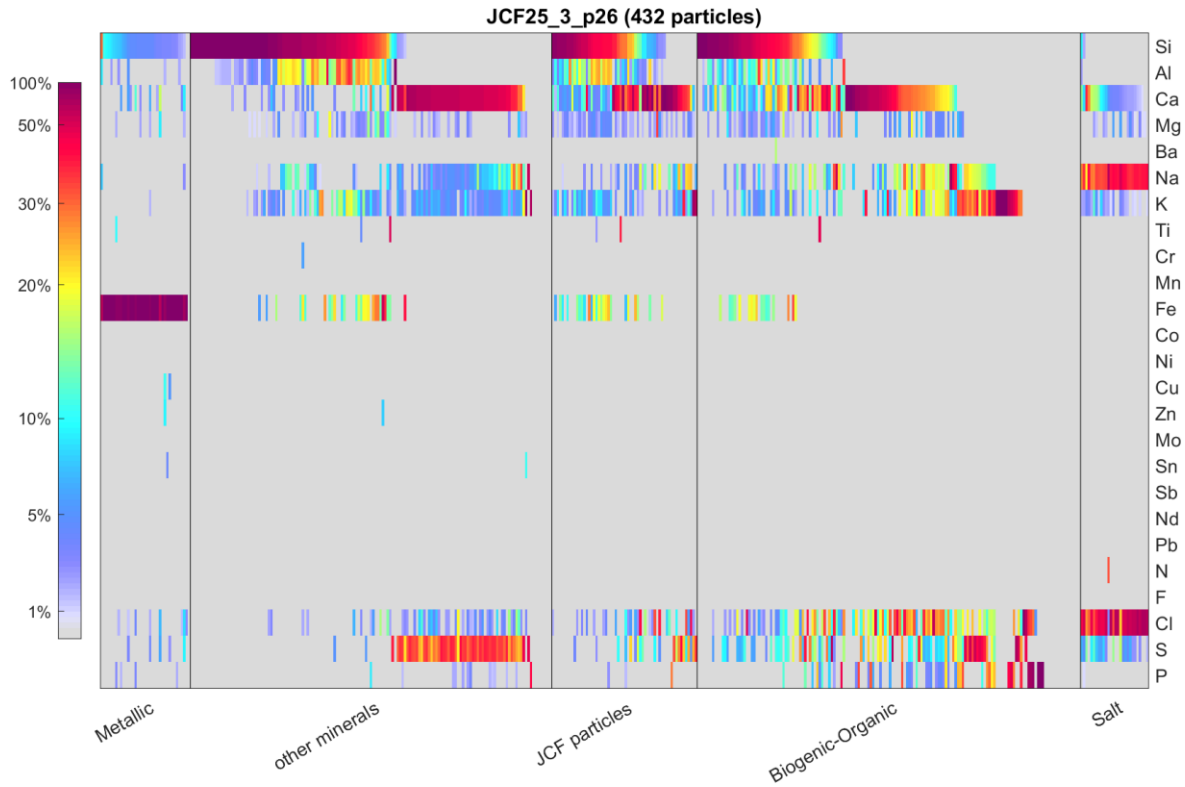
Per. 24


JCF25_3_p24 (909 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per. 25


JCF25_3_p25 (387 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt

Per. 26


JCF25_3_p26 (432 particles)
100%
50%
30%
20%
10%
5%
1%
Si
Al
Ca
Mg
Ba
Na
K
Ti
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Mo
Sn
Sb
Nd
Pb
N
F
Cl
S
P
Metallic
other minerals
JCF particles
Biogenic-Organic
Salt