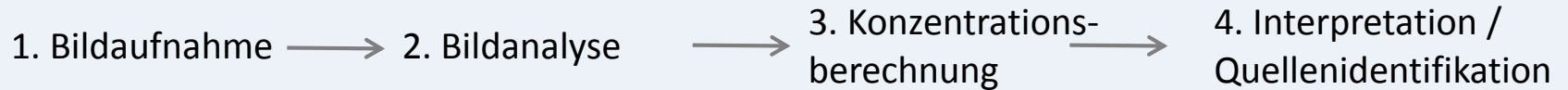


Mikroskopische Methoden für die Partikelcharakterisierung

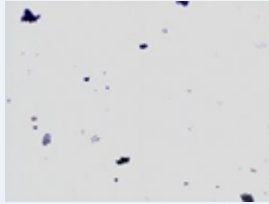
Methodologie für die Licht- und die Elektronenmikroskopie

Thomas Zünd
Dr. Juanita Rausch
Mario Meier

Lichtmikroskopie für Sigma-2 Proben



Output



Morphologie und Grauwert resp. Farbwert

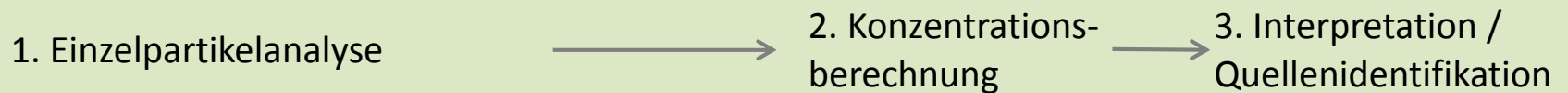
Massenkonzentration, Depositionstrate, Partikelgrößenverteilung der dunklen und hellen Partikelfraktion

Morpho-optischer Fingerprint, Quellenanteil, Messstandort Charakterisierung

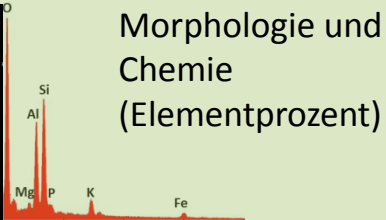
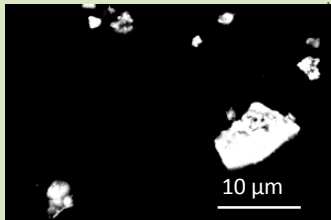
FUB, Rapperswil

Particle Vision, Freiburg

Elektronenmikroskopie für Sigma-2 Proben oder Polycarbonatfilter



Output



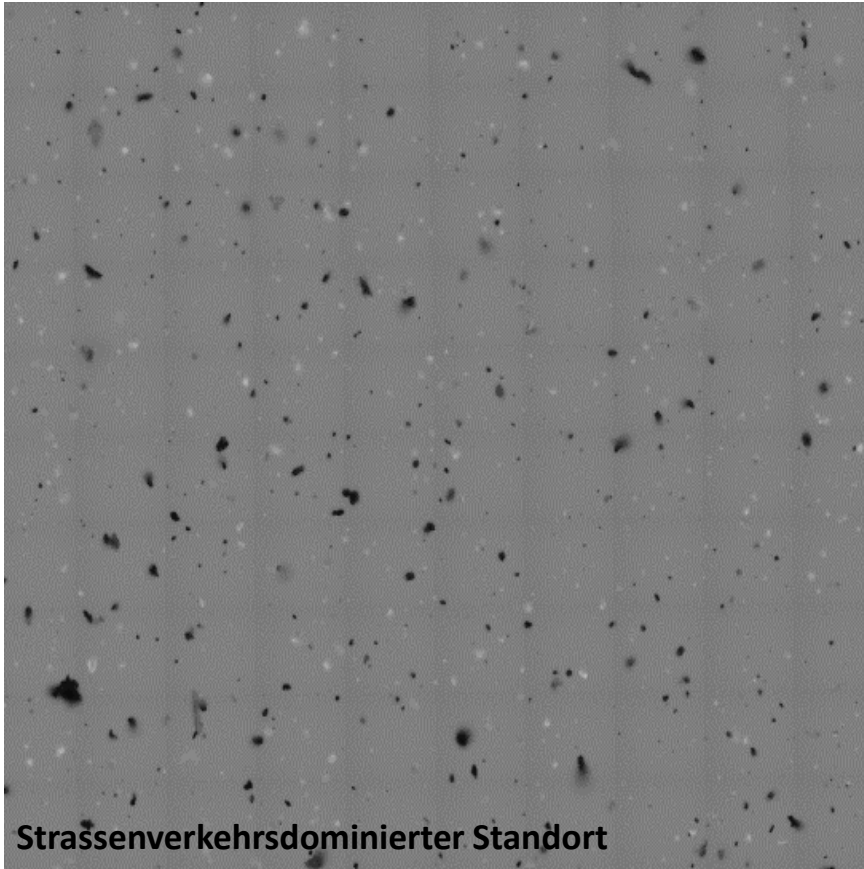
Massenkonzentration, Depositionstrate, Partikelgrößenverteilung pro Element oder Stoffklasse

Morpho-chemischer Fingerprint, Quellenanteil, Messstandort Charakterisierung

Particle Vision, Freiburg

Lichtmikroskopie für Sigma-2 Proben

1. Bildaufnahme



Die Bildaufnahme besteht aus 10 x 10 Bilder und repräsentiert eine Fläche von 6 – 7 mm².

Dunkel erscheinende Partikel (opak):
Metalle, Metalloxide, Russ, Verkehrsabrieb
opake mineralische Partikel

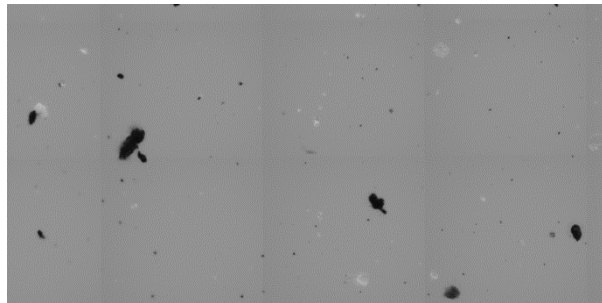
Hell erscheinende Partikel (transparent):
Pollern, Sporen, Bakterien, der grösste
Anteil des mineralischen Staubes

Masstab: 2.68 x 2.41 mm

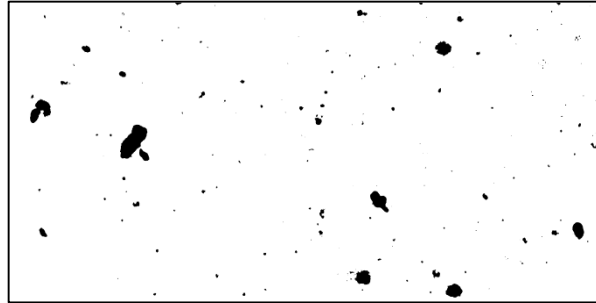
Lichtmikroskopie für Sigma-2 Proben

2. Bildanalyse

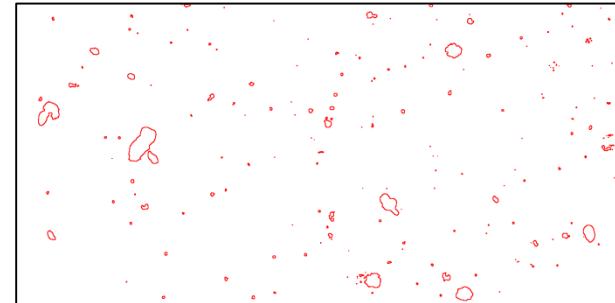
1. Originalbild



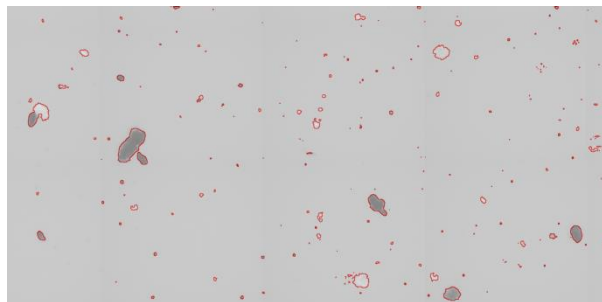
2. Partikelidentifikation



3. Kontourdetektion



4. Überlagerung des Originalbildes mit dem Konturbild



Bestimmung der Partikelfläche und des Grauwertes für die Differenzierung der dunkel und hell erscheinenden Partikel

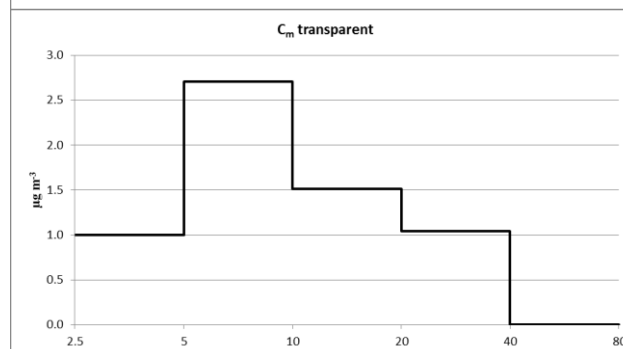
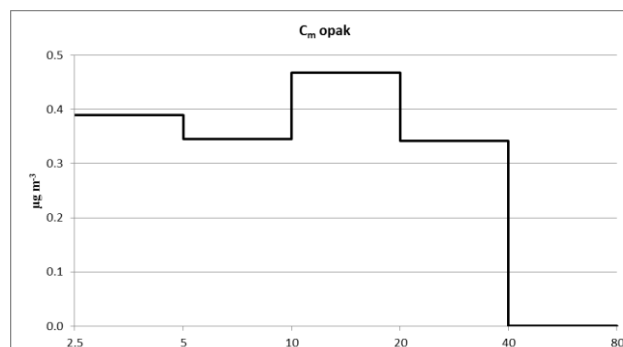
Lichtmikroskopie für Sigma-2 Proben

3. Konzentrationsberechnung

Particle number	Area (um ²)	opaque (0)		Volume (μm ³)	Mass (μg) ρ=1 g/cm ³	Concentration factor (μm)	Mass Concentration (μg/m ³)
		transpare	nt (1)				
1	87.338	0	614	0.000614	10.28161403	4.57E-02	
2	9.624	1	22.4594	2.246E-05	3.413009383	1.52E-02	
3	9.912	1	23.475	2.348E-05	3.463700415	1.54E-02	
4	9.122	1	20.7252	2.073E-05	3.32280388	1.48E-02	
5	24.205	1	89.5821	8.958E-05	5.412678334	2.40E-02	
6	11.133	0	27.9436	2.794E-05	3.67084274	1.63E-02	
7	41.514	0	201.213	0.0002012	7.088542793	3.15E-02	
8	94.592	1	692.063	0.0006921	10.70007641	4.75E-02	
9	317.893	0	4263.69	0.0042637	19.61553499	8.71E-02	
10	99.835	1	750.392	0.0007504	10.99261673	4.88E-02	
11	39.072	1	183.722	0.0001837	6.876896628	3.05E-02	
12	7.47	1	15.3584	1.536E-05	3.00690686	1.34E-02	
13	30.884	1	129.111	0.0001291	6.114014254	2.72E-02	
14	14.149	1	40.0362	4.004E-05	4.138305501	1.84E-02	
15	21.26	1	73.7409	7.374E-05	5.072724835	2.25E-02	
16	30.956	1	129.563	0.0001296	6.121136919	2.72E-02	
17	97.178	1	720.636	0.0007206	10.84535203	4.82E-02	
18	33.255	1	144.261	0.0001443	6.344364861	2.82E-02	
19	18.674	1	60.7044	6.07E-05	4.754209902	2.11E-02	
20	53.724	1	296.221	0.0002962	8.06387608	3.58E-02	
21	8.547	1	18.7968	1.88E-05	3.216373883	1.43E-02	
22	76.708	1	505.388	0.0005054	9.635627553	4.28E-02	
23	33.614	1	146.603	0.0001466	6.378517816	2.83E-02	
24	40.509	1	193.951	0.000194	7.002214915	3.11E-02	
25	20.111	1	67.8444	6.784E-05	4.933742827	2.19E-02	
26	15.873	1	47.5721	4.757E-05	4.383178762	1.95E-02	
27	16.089	1	48.5464	4.855E-05	4.412901166	1.96E-02	
28	80.658	1	544.923	0.0005449	9.880601856	4.39E-02	

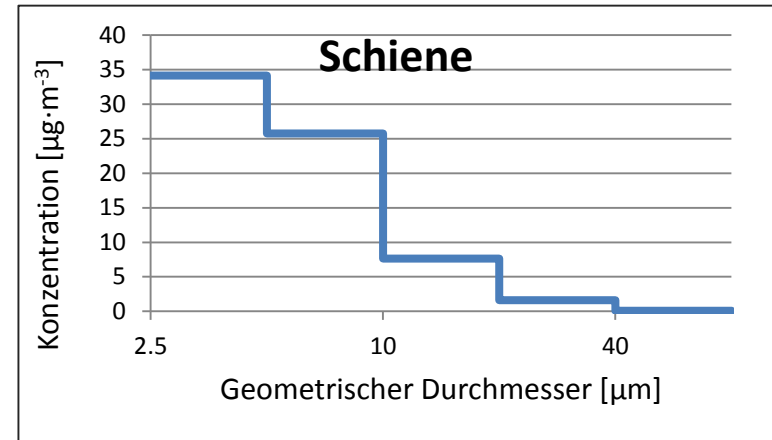
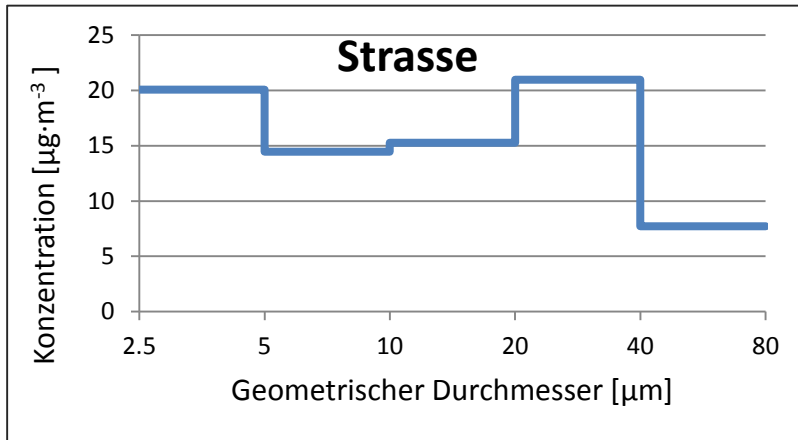
Dunkel erscheinende Partikel		
Durchmesser (μm)	C _m (μg/m ³)	D _n (n cm ⁻² d ⁻¹)
2.5-5.0	0.39	53
5.0-10.0	0.35	24
10.0-20.0	0.47	18
20.0-40.0	0.34	7
40.0-80.0	0.00	0

Hell erscheinende Partikel		
Durchmesser (μm)	C _m (μg/m ³)	D _n (n cm ⁻² d ⁻¹)
2.5-5.0	1.00	128
5.0-10.0	2.70	192
10.0-20.0	1.52	59
20.0-40.0	1.05	18
40.0-80.0	0.00	0



Lichtmikroskopie für Sigma-2 Proben

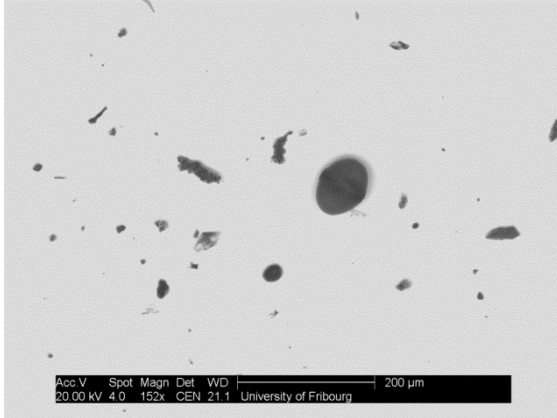
4. Interpretation und Quellenidentifikation



Größenklassierte Massenkonzentration der dunkel erscheinenden Partikel

Elektronenmikroskopie für Sigma-2 Proben oder Polycarbonatfilter

1. Einzelpartikelanalyse (inklusive Bildanalyse)



Eine Analyse umfasst ca. 600-1'500 Partikel, welche automatisch erkannt und morphochemisch analysiert werden.

AlK	SiK	SK	ClK	KK	CaK
1.9	0	0	0	0	1.2 10.91
4.53	0	0	0	0	0 2.41
0	0	0	0	0	0 6.14
1.41	13.49	2.21	0	0	0 7.14

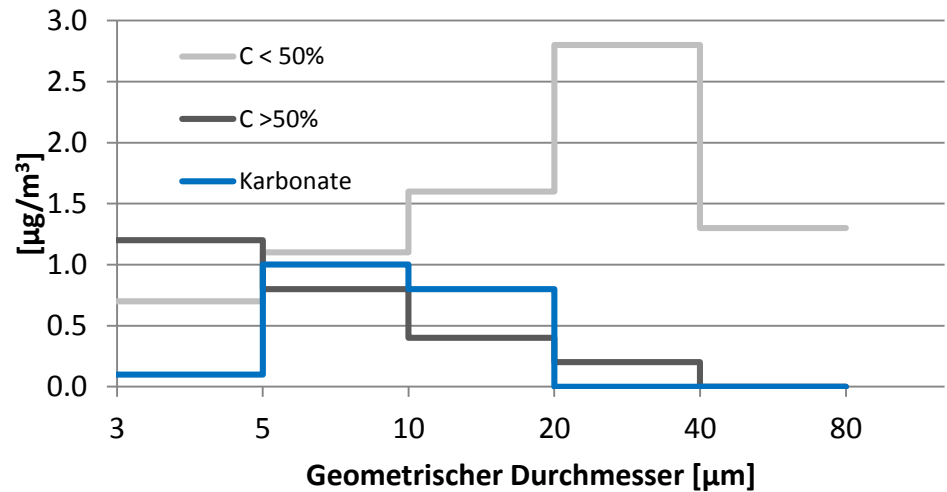
Part#	Field#	Phase#	X_stage	Y_stage	X_cent	Y_cent	X_left	Y_low	X_width	Y_height	Xferet	Yferet	AvgDiam	LProj	Area	Perim	Shape	Aspe	Orient	CK	OK	NaK	MgK	AlK	SiK	SK	ClK	KK	CaK	TiK	CrK	FeK	NiK	CuK	ZnK	AuL	CPS	AvgVideo	
1	10001	1	-1212	-564	221	1009	139	937	160	126	16.2	11.73	11.97	16.44	112.59	74.2	3.89	1.89	-10	19.85	32.08	0	0	1.9	0	0	1.2	10.91	0	0	0	0	0	0	0	34.06	27408	64	
2	10001	1	-1212	-564	764	939	732	915	64	51	2.46	4.36	3.03	4.36	7.192	11.06	1.35	2.08	90	4.21	30.7	0	0	4.53	0	0	0	0	2.41	0	0	0	0	0	0	0	58.15	39700	74
3	10001	1	-1212	-564	1510	484	1470	441	80	63	7.6	6.26	6.17	7.83	29.8543	28.61	2.18	1.61	-15	23.27	25.79	1.57	0	0	0	0	0	6.14	0	0	0	0	0	0	0	43.23	21696	66	
4	10001	1	-1212	-564	1333	178	1096	29	464	363	37.21	39.89	33.73	44.77	893.51	234.1	4.88	1.18	-49	33.9	32.37	0	0	1.41	13.49	2.21	0	0	7.14	0	0	0	0	0	0	0	9.47	9252	39
5	10002	1	-938	-564	1921	1414	1890	1393	64	51	5.48	3.8	4.29	5.73	14.4839	20.56	2.32	1.78	16	29.01	7.85	0	0	0	0	1.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61.57	26265	78
6	10002	1	-938	-564	1594	1303	1570	1285	48	38	4.69	2.57	3.38	4.73	8.99	16.09	2.29	1.95	-8	29.38	7.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63.32	30642	78	
7	10002	1	-938	-564	1297	1191	1264	1173	64	51	2.57	4.25	2.48	4.34	4.8196	11.73	2.27	3.07	90	5.94	20.68	5.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67.91	40351	72	
8	10002	1	-938	-564	559	1093	537	1070	48	38	4.02	4.13	3.78	4.23	11.2	13.74	1.34	1.25	90	0	4.59	0	0	60.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.3	47160	64
9	10002	1	-938	-564	192	303	58	159	224	176	14.08	19.44	9.57	19.81	71.8826	68.61	5.21	4.29	79	30.63	8.67	0	0	0	1.56	0	0	1.19	0	0	0	0	0	0	0	57.96	36390	71	
10	10002	1	-938	-564	280	286	256	260	48	38	2.79	3.24	2.44	3.76	4.6948	11.96	2.42	2.36	90	23.96	7.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68.53	39780	79	
11	10003	1	-664	-564	556	1365	508	1323	96	76	7.37	7.82	7.14	7.85	40.0555	30.62	1.86	1.21	90	43.52	5.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51.39	35668	70	
12	10004	1	-390	-564	843	1264	819	1251	48	38	4.69	3.91	4.13	4.74	13.4101	14.53	1.25	1.32	-9	39.74	5.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54.38	31969	63	
13	10004	1	-390	-564	267	862	218	817	96	76	10.17	7.37	7.6	10.18	45.3246	41.12	2.97	1.8	-3	9.36	40.83	1.92	1.72	1.38	1.32	0	0	22.9	0	0	0.78	0	0	0	19.79	26580	61		
14	10004	1	-390	-564	1576	699	1552	684	48	38	3.69	3.46	3.35	3.82	8.7902	12.96	1.52	1.31	-17	36.17	10.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53.78	24568	74	
15	10004	1	-390	-564	1501	639	1468	600	64	51	2.23	4.25	2.41	4.39	4.5449	11.62	2.36	3.33	76	3.28	30.26	0	0	0	1.39	0	0	0	0	0	41.77	0	2.05	0	0	21.25	20026	71	
16	10004	1	-390	-564	332	578	317	566	32	26	2.35	2.23	1.46	2.61	1.6731	13.3	8.41	3.19	-50	33.01	3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63.29	39740	84		
17	10004	1	-390	-564	1118	44	1071	14	96	76	10.06	6.82	7.33	10.08	42.228	40.9	3.15	1.89	3	0	47.93	0	1.89	37.71	0	0	1.27	1.02	0	0.99	0	0	0	9.2	17997	60			
18	10005	1	-116	-564	833	501	810	481	48	38	5.25	2.35	3.35	5.31	8.8277	16.2	2.37	2.51	-9	16.29	7.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76.09	38330	79		
19	10006	1	158	-564	1041	1091	1000	1069	80	63	7.37	5.92	6.18	8.11	29.9542	50.51	6.78	1.72	-25	7.37	28.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47.59	30055	76		
20	10006	1	158	-564	1398	445	1366	429	64	51	2.12	4.92	2.31	5.1	4.2078	10.28	2	4.85	90	5.32	10.25	0	0	0	0	3.11	0	0	1.36	0	0	0	0	0	79.95	24623	69		
21	10007	1	432	-564	1491	1452	1476	1444	32	26	2.79	2.01	2.13	2.85	3.5585	9.83	2.16	1.79	9	6.41	20.76	0	0	0	0	0	0	0	3.86	0	0	0	0	0	0	68.97	35199	79	
22	10007	1	432	-564	144	1405	122	1387	48	38	2.91	3.13	2.21	3.18	3.8332	16.2	5.45	2.07	81	5.68	21.85	0	0	1.17	0	0	0	0	4.18	0	0	0	0	0	0	67.12	46754	82	
23	10007	1	432	-564	105	1318	52	1265	240	188	25.92	11.73	12.46	26.43	121.93	187.17	22.86	4.5	-11	6.55	26.2	0	0	1.19	1.5	0	0	5.2	0	0	0	0	0	0	59.36	45523	76		
24	10007	1	432	-564	211	1309	146	1216	144	113	14.41	8.49	9.52	14.42	71.1833	76.77	6.59	2.29	0	6.72	23.51	0	0	0	0	0	0	6.75	0	0	0	0	0	0	63.01	44972	77		
25	10007	1	432	-564	299	1082	274	1067	48	38	4.58	3.91	3.76	4.8	11.0877	23.13	3.84	1.63	-29	8.06	36.44	0	0	0	0	0	0	20.74	0	0	0	0	0	0	34.76	32367	73		
26	10007	1	432	-564	1743	564	1799	644	48	38	4.58	3.35	3.57	4.63	10.5882	14.3	1.54	1.59	-9	47.65	8.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48.17	21937	74			
27	10007	1	432	-564	1834	337	1797	1323	64	51	6.48	5.59	4.63	6.58	16.8563	32.85	5.1	2.02	-10	8.11	42.9	0	0	0	0	0	0	27.68	0	0	0	0	0	0	21.32	13646	72		
28	10007	1	432	-564	1790	291	1734	244	96	76	5.48	7.26	4.97	8.15	19.366	23.69	2.31	2.69	63	3.8	23.8	0	0	2.29	3.53	0	0	0.92	2.57	0	0	0.97	0	0	62.12	22440	76		
29	10007	1	432	-564	1714	297	1691	277	48	38	2.57	3.8	2.65	3.81	5.9064	12.63	2.3	2.07	90	3.2	25.45	0	0	0	0	0	0	0	22.46	0	0	0	0	0	0	48.89	22602	74	
30	10007	1	432	-564	790	217	774	204	32	26	2.01	2.01	1.8	2.06	2.5472	6.26	1.22	1.31	79	19.76	13.52	0	0	0	0	0	0	1.66	0	0	0	0	0	0	65.07	33170	79		
31	10008	1	706	-564	276	1321	227	1273	80	63	5.59	5.81	4.74	7.02	17.6554	21.57	2.1	2.19	37	31.43	12.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56.52	38554	77		
32	10008	1	706	-564	361	1161	336	1144	48	38	3.24	3.12	3.12	3.24	7.6415	11.17	1.3	1.08	90	0	27.56	0	0	4.34	6.27	0	0	1.09	0	0	1.85	0	0	0	58.89	44262	72		
33	10008	1	706	-564	867	1157	843	1138	48	38	4.47	3.69	3.92	4.48	12.0491	13.86	1.27	1.31	2	34.87	8.84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56.28	34797	72			
34	10008	1	706	-564	224	1097	198	1081	48	38	3.02	2.79	2.51	3.63	4.9445	11.29	2.05	2.09	-36	0	36.46	0	0	0	0	0	20.32	0	2.46	0	0	0	0	40.76	37530	77			
35	10008	1	706	-564	531	1059	487	1008	96	76	9.05	7.71	7.4	9.69	42.9647	28.49	1.5	1.72	-21	32.92	15.77	0	0	0	0	2.34	0	0	0	0	0	2.48	0	0	46.69	31757	57		
36	10008	1	706	-564	1139	135	1124	1119	32	26	3.24	2.46	2.64	3.31	4.9399	11.17	1.81	1.57	-14	2.96	23.73	0	0	1.5	3.89	0	0	2.11	0	0	1.13	0	0	64.68	29116	74			
37	10009	1	980	-564	806	969	750	922	112	88	12.29	8.38	9.85	12.35	76.1278	33.52	1.17	1.57	5	56.85	11.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31.95	21517	49			
38	10009	1	980	-564	747	763	710	734	80	63	6.82	6.37	6.22	7.11	30.391																								

Elektronenmikroskopie für Sigma-2 Proben oder Polycarbonatfilter

2. Konzentrationsberechnung

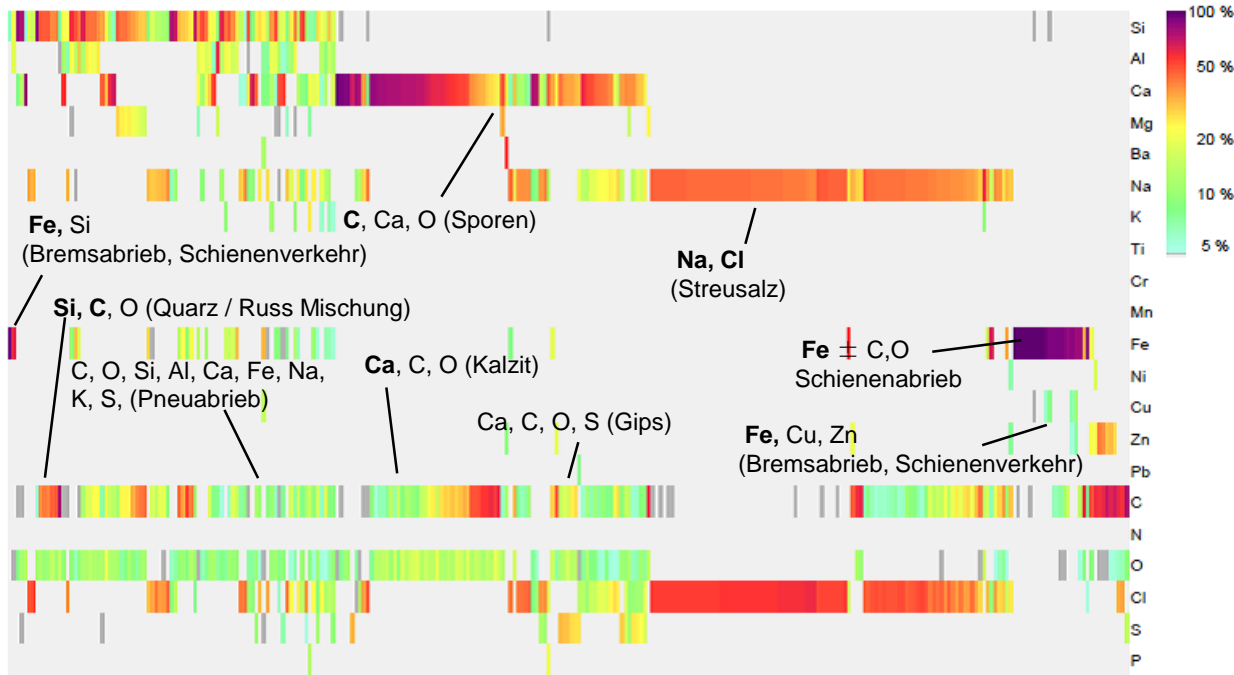
Particle number	Area (um ²)	Volume (μm ³)	Mass (μg) ρ=1 g/cm ³	Concentration factor (μm)	Concentration (μg/m ³)
1	87.338	614	0.000614	10.28161403	4.57E-02
2	9.624	22.4594	2.246E-05	3.413009383	1.52E-02
3	9.912	23.475	2.348E-05	3.463700415	1.54E-02
4	9.122	20.7252	2.073E-05	3.32280388	1.48E-02
5	24.205	89.5821	8.958E-05	5.412678334	2.40E-02
6	11.133	27.9436	2.794E-05	3.67084274	1.63E-02
7	41.514	201.213	0.0002012	7.088542793	3.15E-02
8	94.592	692.063	0.0006921	10.70007641	4.75E-02
9	317.893	4263.69	0.0042637	19.61553499	8.71E-02
10	99.835	750.392	0.0007504	10.99261673	4.88E-02
11	39.072	183.722	0.0001837	6.876896628	3.05E-02
12	7.47	15.3584	1.536E-05	3.00690686	1.34E-02
13	30.884	129.111	0.0001291	6.114014254	2.72E-02
14	14.149	40.0362	4.004E-05	4.138305501	1.84E-02
15	21.26	73.7409	7.374E-05	5.072724835	2.25E-02
16	30.956	129.563	0.0001296	6.121136919	2.72E-02
17	97.178	720.636	0.0007206	10.84535203	4.82E-02
18	33.255	144.261	0.0001443	6.344364861	2.82E-02
19	18.674	60.7044	6.07E-05	4.754209902	2.11E-02
20	53.724	296.221	0.0002962	8.06387608	3.58E-02
21	8.547	18.7968	1.88E-05	3.216373883	1.43E-02
22	76.708	505.388	0.0005054	9.635627553	4.28E-02
23	33.614	146.603	0.0001466	6.378517816	2.83E-02
24	40.509	193.951	0.000194	7.002214915	3.11E-02
25	20.111	67.8444	6.784E-05	4.933742827	2.19E-02
26	15.873	47.5721	4.757E-05	4.383178762	1.95E-02
27	16.089	48.5464	4.855E-05	4.412901166	1.96E-02
28	80.658	544.923	0.0005449	9.880601856	4.39E-02

Stoffklassen	Masse %	Sedimentations rate #/cm ² ·d	Konzentration μg/m ³
Quarz	Si + O > 77 ; C < 21	9.4	0.8
Gips	S > 11; Ca > 12	5.5	0.2
Schwefel	S > 10; Ca < 12	1.0	0.1
Kohlenstoff	C < 50	48.5	7.5
Kohlenstoff	C > 50	13.7	2.6
Karbonate	Ca > 15; Si < 10; S < 11	8.6	1.9
Eisen	Fe > 30	2.2	1.1
Kalziumsilikate	Si > 10; Ca > 10	0.5	0.1
Anderer Silikate	Si > 10 ; Ca < 10; Si + O < 77	4.4	1.3
Anderes		6.0	1.8

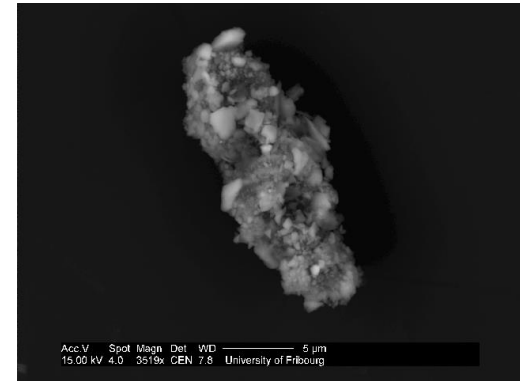


Elektronenmikroskopie für Sigma-2 Proben oder Polycarbonatfilter

3. Interpretation und Quellenidentifikation



Pneubrieb (C,O,Si,Ca,Al,Fe,S,Zn)



Acc.V Spot Magn Det WD 15.00 kV 4.0 3519x CEN 7.8 University of Fribourg

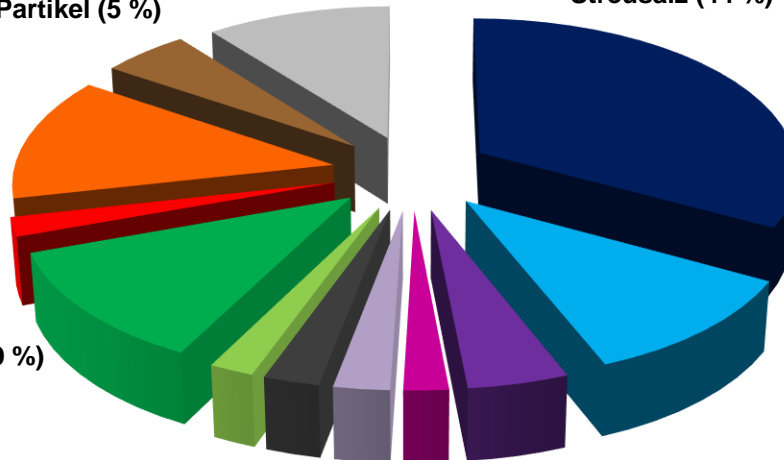
Schienenabrieb (Fe, O)



Biogene Partikel (5 %)

Streusalz (44 %)

Geogene Partikel (29 %)



Strassenverkehr (2.5 %)

Schienenverkehr (9 %)

- Streusalz
- Streusalz-Mischpartikel
- Schienenabrieb
- Bremsabrieb (Eisenbahn)
- Pantographabrieb
- Pneubrieb
- Quarz + Russ
- Kalzit
- Gips
- Andere mineralische Partikel
- Sporen
- Andere