

Inhalt

Danksagung	i
Zusammenfassung.....	ii
Abstract	iii
Inhalt.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungen und Symbole	xix
1 Einleitung	1
2 Zielstellung	3
Spurenstoffentfernung während der Bodenpassage	3
Bodensäulen als Modellsysteme der Bodenpassage	3
2.1	
2.2	
2.2.1	
2.2.2	
2.2.3	
2.2.4	
2.2.5	
2.2.6	
2.2.7	
2.3	
2.3.1	
2.3.2	
2.3.3	
2.3.4	
2.3.5	
2.3.6	
2.3.7	
2.3.8	
2.3.9	
2.3.10	
2.3.11	
2.3.12	
2.3.13	
2.3.14	
2.3.15	
2.3.16	
2.3.17	
2.3.18	
2.3.19	
2.3.20	
2.3.21	
2.3.22	
2.3.23	
2.3.24	
2.3.25	
2.3.26	
2.3.27	
2.3.28	
2.3.29	
2.3.30	
2.3.31	
2.3.32	
2.3.33	
2.3.34	
2.3.35	
2.3.36	
2.3.37	
2.3.38	
2.3.39	
2.3.40	
2.3.41	
2.3.42	
2.3.43	
2.3.44	
2.3.45	
2.3.46	
2.3.47	
2.3.48	
2.3.49	
2.3.50	
2.3.51	
2.3.52	
2.3.53	
2.3.54	
2.3.55	
2.3.56	
2.3.57	
2.3.58	
2.3.59	
2.3.60	
2.3.61	
2.3.62	
2.3.63	
2.3.64	
2.3.65	
2.3.66	
2.3.67	
2.3.68	
2.3.69	
2.3.70	
2.3.71	
2.3.72	
2.3.73	
2.3.74	
2.3.75	
2.3.76	
2.3.77	
2.3.78	
2.3.79	
2.3.80	
2.3.81	
2.3.82	
2.3.83	
2.3.84	
2.3.85	
2.3.86	
2.3.87	
2.3.88	
2.3.89	
2.3.90	
2.3.91	
2.3.92	
2.3.93	
2.3.94	
2.3.95	
2.3.96	
2.3.97	
2.3.98	
2.3.99	
2.3.100	
2.3.101	
2.3.102	
2.3.103	
2.3.104	
2.3.105	
2.3.106	
2.3.107	
2.3.108	
2.3.109	
2.3.110	
2.3.111	
2.3.112	
2.3.113	
2.3.114	
2.3.115	
2.3.116	
2.3.117	
2.3.118	
2.3.119	
2.3.120	
2.3.121	
2.3.122	
2.3.123	
2.3.124	
2.3.125	
2.3.126	
2.3.127	
2.3.128	
2.3.129	
2.3.130	
2.3.131	
2.3.132	
2.3.133	
2.3.134	
2.3.135	
2.3.136	
2.3.137	
2.3.138	
2.3.139	
2.3.140	
2.3.141	
2.3.142	
2.3.143	
2.3.144	
2.3.145	
2.3.146	
2.3.147	
2.3.148	
2.3.149	
2.3.150	
2.3.151	
2.3.152	
2.3.153	
2.3.154	
2.3.155	
2.3.156	
2.3.157	
2.3.158	
2.3.159	
2.3.160	
2.3.161	
2.3.162	
2.3.163	
2.3.164	
2.3.165	
2.3.166	
2.3.167	
2.3.168	
2.3.169	
2.3.170	
2.3.171	
2.3.172	
2.3.173	
2.3.174	
2.3.175	
2.3.176	
2.3.177	
2.3.178	
2.3.179	
2.3.180	
2.3.181	
2.3.182	
2.3.183	
2.3.184	
2.3.185	
2.3.186	
2.3.187	
2.3.188	
2.3.189	
2.3.190	
2.3.191	
2.3.192	
2.3.193	
2.3.194	
2.3.195	
2.3.196	
2.3.197	
2.3.198	
2.3.199	
2.3.200	
2.3.201	
2.3.202	
2.3.203	
2.3.204	
2.3.205	
2.3.206	
2.3.207	
2.3.208	
2.3.209	
2.3.210	
2.3.211	
2.3.212	
2.3.213	
2.3.214	
2.3.215	
2.3.216	
2.3.217	
2.3.218	
2.3.219	
2.3.220	
2.3.221	
2.3.222	
2.3.223	
2.3.224	
2.3.225	
2.3.226	
2.3.227	
2.3.228	
2.3.229	
2.3.230	
2.3.231	
2.3.232	
2.3.233	
2.3.234	
2.3.235	
2.3.236	
2.3.237	
2.3.238	
2.3.239	
2.3.240	
2.3.241	
2.3.242	
2.3.243	
2.3.244	
2.3.245	
2.3.246	
2.3.247	
2.3.248	
2.3.249	
2.3.250	
2.3.251	
2.3.252	
2.3.253	
2.3.254	
2.3.255	
2.3.256	
2.3.257	
2.3.258	
2.3.259	
2.3.260	
2.3.261	
2.3.262	
2.3.263	
2.3.264	
2.3.265	
2.3.266	
2.3.267	
2.3.268	
2.3.269	
2.3.270	
2.3.271	
2.3.272	
2.3.273	
2.3.274	
2.3.275	
2.3.276	
2.3.277	
2.3.278	
2.3.279	
2.3.280	
2.3.281	
2.3.282	
2.3.283	
2.3.284	
2.3.285	
2.3.286	
2.3.287	
2.3.288	
2.3.289	
2.3.290	
2.3.291	
2.3.292	
2.3.293	
2.3.294	
2.3.295	
2.3.296	
2.3.297	
2.3.298	
2.3.299	
2.3.300	
2.3.301	
2.3.302	
2.3.303	
2.3.304	
2.3.305	
2.3.306	
2.3.307	
2.3.308	
2.3.309	
2.3.310	
2.3.311	
2.3.312	
2.3.313	
2.3.314	
2.3.315	
2.3.316	
2.3.317	
2.3.318	
2.3.319	
2.3.320	
2.3.321	
2.3.322	
2.3.323	
2.3.324	
2.3.325	
2.3.326	
2.3.327	
2.3.328	
2.3.329	
2.3.330	
2.3.331	
2.3.332	
2.3.333	
2.3.334	
2.3.335	
2.3.336	
2.3.337	
2.3.338	
2.3.339	
2.3.340	
2.3.341	
2.3.342	
2.3.343	
2.3.344	
2.3.345	
2.3.346	
2.3.347	
2.3.348	
2.3.349	
2.3.350	
2.3.351	
2.3.352	
2.3.353	
2.3.354	
2.3.355	
2.3.356	
2.3.357	
2.3.358	
2.3.359	
2.3.360	
2.3.361	
2.3.362	
2.3.363	
2.3.364	
2.3.365	
2.3.366	
2.3.367	
2.3.368	
2.3.369	
2.3.370	
2.3.371	
2.3.372	
2.3.373	
2.3.374	
2.3.375	
2.3.376	
2.3.377	
2.3.378	
2.3.379	
2.3.380	
2.3.381	
2.3.382	
2.3.383	
2.3.384	
2.3.385	
2.3.386	
2.3.387	
2.3.388	
2.3.389	
2.3.390	
2.3.391	
2.3.392	
2.3.393	
2.3.394	
2.3.395	
2.3.396	
2.3.397	
2.3.398	
2.3.399	
2.3.400	
2.3.401	
2.3.402	
2.3.403	
2.3.404	
2.3.405	
2.3.406	
2.3.407	
2.3.408	
2.3.409	
2.3.410	
2.3.411	
2.3.412	
2.3.413	
2.3.414	
2.3.415	
2.3.416	
2.3.417	
2.3.418	
2.3.419	
2.3.420	
2.3.421	
2.3.422	
2.3.423	
2.3.424	
2.3.425	
2.3.426	
2.3.427	
2.3.428	
2.3.429	
2.3.430	
2.3.431	
2.3.432	
2.3.433	
2.3.434	
2.3.435	
2.3.436	
2.3.437	
2.3.438	
2.3.439	
2.3.440	
2.3.441	
2.3.442	
2.3.443	
2.3.444	
2.3.445	
2.3.446	
2.3.447	
2.3.448	
2.3.449	
2.3.450	
2.3.451	
2.3.452	
2.3.453	
2.3.454	
2.3.455	
2.3.456	
2.3.457	
2.3.458	
2.3.459	
2.3.460	
2.3.461	
2.3.462	
2.3.463	
2.3.464	
2.3.465	
2.3.466	
2.3.467	
2.3.468	
2.3.469	
2.3.470	
2.3.471	
2.3.472	
2.3.473	
2.3.474	
2.3.475	
2.3.476	
2.3.477	
2.3.478	
2.3.479	
2.3.480	
2.3.481	
2.3.482	
2.3.483	
2.3.484	
2.3.485	
2.3.486	
2.3.487	
2.3.488	
2.3.489	
2.3.490	
2.3.491	
2.3.492	
2.3.493	
2.3.494	
2.3.495	
2.3.496	
2.3.497	
2.3.498	
2.3.499	
2.3.500	
2.3.501	
2.3.502	
2.3.503	
2.3.504	
2.3.505	
2.3.506	
2.3.507	
2.3.508	
2.3.509	
2.3.510	
2.3.511	
2.3.512	
2.3.513	
2.3.514	
2.3.515	
2.3.516	
2.3.517	
2.3.518	
2.3.519	
2.3.520	
2.3.521	
2.3.522	
2.3.523	
2.3.524	
2.3.525	
2.3.526	
2.3.527	
2.3.528	
2.3.529	
2.3.530	
2.3.531	
2.3.532	
2.3.533	
2.3.534	
2.3.535	
2.3.536	
2.3.537	
2.3.538	
2.3.539	
2.3.540	
2.3.541	
2.3.542	
2.3.543	
2.3.544	
2.3.545	
2.3.546	
2.3.547	
2.3.548	
2.3.549	
2.3.550	
2.3.551	
2.3.552	
2.3.553	
2.3.554	
2.3.555	
2.3.556	
2.3.557	
2.3.558	
2.3.559	
2.3.560	
2.3.561	
2.3.562	
2.3.563	
2.3.564	
2.3.565	
2.3.566	
2.3.567	
2.3.568	
2.3.569	
2.3.570	
2.3.571	
2.3.572	
2.3.573	
2.3.574	
2.3.575	
2.3.576	
2.3.577	
2.3.578	
2.3.579	
2.3.580	
2.3.581	
2.3.582	
2.3.583	
2.3.584	
2.3.585	
2.3.586	
2.3.587	
2.3.588	
2.3.589	
2.3.590	
2.3.591	
2.3.592	
2.3.593	
2.3.594	
2.3.595	
2.3.596	
2.3.597	
2.3.598	
2.3.599	
2.3.600	
2.3.601	

	Verhalten von IOP in der Umwelt und seine Entfernung	31
	Transformationsprodukte von IOP	35
5	Bodensäulenversuche	37
	Bodensäulen für Langzeitexperimente zur Untersuchung der Einlaufphase	
4.5.2	sowie des Einflusses von verschiedenen Redoxbedingungen und Füllmaterialien...	37
4.5.3	Bodensäulensystem für in Reihe geschaltete Langzeitbodensäulen zur weiteren	
	Untersuchung des Spurenstoffabbaus.....	38
5.1	Kleinfiltersversuche	39
5.2	Einlaufphase (Betrieb und Aufbau)	39
5.3	Aufbau Kreislaufbetrieb	40
5.3.1	Doppelansätze	41
5.3.2	Betriebswässer	42
5.3.3	Füllmaterialien für die Bodensäulen	42
5.4	Technischer Sand (TS)	42
5.5.1	Ufersand (US)	43
5.5.2	Gemischter Sand	44
5.5.3	Probenahme, Aufbereitung und Lagerung.....	44
5.6	Analytik	44
5.7	Charakterisierung des DOC.....	44
5.8	Spurenstoffanalytik.....	46
5.9	Modellierung	47
6.1	6 Langzeitversuche.....	48
6.1.1	Langzeitentwicklung der DOC-Entfernung	48
6.1.2	DOC-Abbau in den verschiedenen Redoxmilieus.....	50
6.1.3	DOC-Abbau in den verschiedenen Füllmaterialien	51
6.1.4	Einfluss von Biomasse auf den DOC-Abbau	53
6.1.5	Einfluss des partikulären organischen Kohlenstoffs (POC) im Boden auf den	
6.2	DOC-Abbau	54
6.2.1	Zusammenfassung Langzeitentwicklung DOC-Entfernung	55
6.2.2	Nitratentfernung.....	56
6.3	Nitratentfernung in anoxischen Säulen	56
	Vergleich Nitrat- vs. DOC-Abbau	57
	Sauerstoffentfernung	60

	Sauerstoffentfernung in aeroben Säulen.....	60
	Vergleich Sauerstoff- vs. DOC-Abbau.....	61
	DOC-Entfernung im Verlauf der Fließstrecke	62
	Modellierung der DOC-Entfernung	64
6.3.1	Weiterführende Charakterisierung des DOC mittels LC-OCD-Analyse	66
6.3.2	Quantitative Untersuchung des Abbaus von Biopolymeren	69
6.4	Zusammenfassung der Kinetik der DOC-Entfernung	71
6.4.1	Zusammenfassung Langzeitbodensäulen.....	72
6.4.2	Iopromid (Langzeitversuche)	73
6.4.3	Entfernungsverhalten von IOP	73
6.4.4	Vergleich der IOP-Transformation mit dem Biopolymer- sowie DOC-Abbau und der Elektronenakzeptorzehrung	74
6.5	Verhalten von IOP während der Bodenpassage als chirales Molekül.....	77
7.1	Verhalten der Transformationsprodukte	79
7.2	Erste Gruppe der Transformationsprodukte.....	79
7.3	Zweite Gruppe der Transformationsprodukte.....	81
7.4	Dritte Gruppe der Transformationsprodukte	82
7.4.1	Vergleich der IOP-Transformation mit dem AOI-Verhalten.....	83
7.4.2	Zusammenfassung zum Verhalten von IOP in den Langzeitbodensäulen	84
7.4.3	Eigenschaften und Verhalten des DOC und der Biopolymere während der KleinfILTERkreisläufe.....	89
7.5	Kinetik der IOP-Entfernung	92
7.6	Transformationsprodukte	93
8	Kleinfiltersysteme und Bodensäulen mit einer Variation der Biopolymerausgangs- konzentration.....	85
8.1	Einlaufphase Kleinfiltersysteme	85
8.1.1	DOC-Verhalten während der Einlaufphase	85
8.1.2	Sauerstoffsättigung während der Einlaufphase.....	85
8.1.3	Vergleich DOC-Abbau vs. Sauerstoffzehrung.....	86
8.1.4	Biopolymerverhalten während der Einlaufphase	87
8.1.5	IOP-Transformation während der Einlaufphase	87
8.1.6	Zusammenfassung Einlaufphase	88
8.2	KleinfILTERkreisläufeversuche (KLS)	88
8.2.1	Eigenschaften und Verhalten des DOC und der Biopolymere während der KleinfILTERkreisläufe.....	89
8.2.2	Kinetik der IOP-Entfernung	92
8.2.3	Transformationsprodukte	93

	Bodensäulen mit einer Variation der Biopolymerausgangskonzentration	96
	Aerob betriebene Langzeitbodensäulen	96
	Anoxisch betriebene Langzeitbodensäulen	97
	Schlussfolgerung.....	98
8.3	Spurenstoffentfernung in der Bodenpassage	99
8.3.1	Röntgenkontrastmittel neben Iopromid	99
8.3.2	Iomeprol (IOM).....	99
8.3.3	Amidotrizoesäure (ATS).....	101
9.1	Pharmaka	103
9.1.1	Bezafibrat (BZF)	103
9.1.2	Diclofenac (DCF)	105
9.2	Diclofenac (DCF)	105
9.2.1	Gabapentin (GAB).....	108
9.2.2	Metoprolol (MTP).....	111
9.2.3	Primidon (PRI).....	114
9.2.4	Sulfamethoxazol (SMX)	114
9.2.5	Valsartan (VAL)	117
9.2.6	Valsartan (VAL)	117
9.2.7	Valsartan (VAL)	117
9.3	Korrosionsschutzmittel	119
9.3.1	Benzotriazol (BTA)	119
9.3.2	Tolyltriazol (TT).....	122
9.3.3	Tolyltriazol (TT).....	122
9.4	Bewertung und Zusammenfassung zu BTA und TT	124
9.4.1	Weitere Substanzen.....	125
9.4.2	Weitere Substanzen.....	125
9.5	Acesulfam (ACS)	125
	4-Formylaminoantipyrin (FAA).....	126
10.1	Zusammenfassung Spurenstoffe	128
10.2	Zusammenfassende Diskussion.....	132
10.3	Zusammenfassende Diskussion.....	132
10.4	Einlaufzeit für Bodensäulen.....	132
	Verhalten von Spurenstoffen während der Bodenpassage	132
	Entfernung von Iopromid während der Bodenpassage	134
	Fazit zum Einsatz von Bodensäulen.....	135
11	Literaturverzeichnis.....	136
A	Ergänzende Abbildungen zur Einleitung und Bodenpassage	168
B	Spurenstoffe.....	170
B.1	Röntgenkontrastmittel	170

B.1.1	lomeprol (IOM).....	170
B.1.2	Amidotrizoesäure (ATS).....	172
B.2	Pharmaka	175
B.2.3	Bezafibrat (BZF)	175
B.2.4	Carbamazepin (CBZ)	179
B.2.5	Diclofenac (DCF)	184
B.2.6	Gabapentin (GAB).....	190
B.2.7	Metoprolol (MTP).....	192
B.2.8	Primidon (PRI).....	196
B.2.9	Sulfamethoxazol (SMX)	198
B.2.10	Valsartan (VAL)	203
B.3	Weitere Substanzen: Korrosionsschutzmittel, Süßstoff und Humanmetabolit	206
B.3.11	Benzotriazol (BTA), 4-Methyl-Benzotriazol (4MBT) und 5-Methyl-Benzotriazol (5MBT)	206
B.3.12	Acesulfam (ACS)	215
B.3.13	4-Formylaminoantipyrin (FAA).....	217
C	Betriebswässer.....	219
C.1	Wasser des Tegeler Sees (TSW).....	219
C.2	Filtriertes Oberflächenwasser und Konzentrat aus Oberflächenwasser.....	222
D	Analytik	224
D.1	Biomassebestimmung	225
D.2	Spurenstoffmessung.....	226
E	Versuchsaufbau.....	228
F	Signifikanztest	229
G	Carbamazepin (CBZ).....	232
G.1	Ergebnisse der Langzeitbodensäulen und der Kleinfilterkreislaufversuche zu CBZ.....	232
G.2	Diskussion und Zusammenfassung zu CBZ	232
H	Ergänzende Abbildungen und Tabellen	234