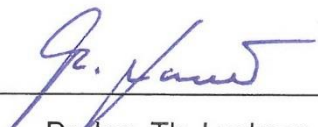


Teilbericht 2

Vorhaben	Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See
Auftraggeber	iKD Ingenieur-Consult GmbH Zur Wetterwarte 50, Haus 337/G 01109 Dresden
Verfasser	GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH Dresden Meraner Straße 10 01217 Dresden - Dr.-Ing. U. Uhlig - Dr.-Ing. Ch. Koch - M. Sc. M. Hering - Dr. / M.Sc. M. Blumstock
Datum	24.10.2017, Überarbeitung vom 28.12.2017


Dr.-Ing. Th. Luckner
Geschäftsführer


Dr.-Ing. U. Uhlig
Geschäftsführer

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Unterlagen / Literatur	3
Verzeichnis der Anlagen.....	3
Abkürzungen	4
1 Veranlassung und Aufgabenstellung.....	5
2 Probenahme, Bestimmung der Vor-Ort-Parameter, Versuchsanordnung	5
2.1 Grundsätzliches.....	5
2.2 Probenahmepunkte PL6 und PL9	7
2.3 Bestimmung der Wasserbeschaffenheitsparameter	9
2.4 Ergebnisse der bestimmten Wasserbeschaffenheitsparameter.....	10
2.4.1 Vor-Ort-Parameter	10
2.4.2 Laboranalytik	11
2.5 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung.....	12
3 Ergebnisse der Absetzversuche und Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten	14
3.1 Ergebnisse der Absetzversuche	14
3.2 Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten.....	18
3.2.1 Vorgehensweise	18
3.2.2 Modellergebnisse und Vergleich mit den Messwerten	19
3.2.3 Abschätzung der Sedimentationsgeschwindigkeit für definierte Konzentrationsbereiche	23
3.2.4 Weiterführende Rechnungen zum Prozessverständnis.....	24
4 Übertragung einer Sedimentationsgeschwindigkeit auf das Seemodell des Kahnsdorfer See.....	28

Unterlagen / Literatur

Folgende Unterlagen wurden für die Bearbeitung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und für die Bearbeitung genutzt:

- [U1] Einstein, H. A.; Krone, R. B. (1962): Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water. Journal of Geophysical Research 67. 1451-1461
- [U2] Johansen, C. (1998): Dynamics Of Cohesive Sediments, Aalborg University Denmark, Series Paper (16)
- [U3] LfULG (2014): Fließgewässerorganismen und Eisen Schriftenreihe. Heft 35/2014
- [U4] Metha, A. J. (1986): Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Springer Verlag, 290-325
- [U5] SGL (2014): Fließgewässermonitoring Pleiße 2014, Jahresbericht Wasseruntersuchungen, Auswertung der Wasseruntersuchungen bei Abflussklasse 2, Abflussklasse 3, Abflussklasse 4

Verzeichnis der Anhänge

Folgende Anhänge sind Bestandteil des vorliegenden Berichtes:

- Anhang 1 Titrationskurven
- Anhang 2 Randbedingungen der Modellberechnungen
- Anhang 3 Fotodokumentation PL6 – Pleiße und Versuchssäulen
- Anhang 4 Fotodokumentation PL9 – Pleiße und Versuchssäulen

Abkürzungen

Abkürzung	Begriffsbestimmung	Einheit
AK	Abflussklasse	
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	[mg/l]
AG	Auftraggeber	
AN	Auftragnehmer	
c	Masse-Konzentration	[mg/l]
c_{initial}	Initiale Fe_{ges} -Konzentration zu Beginn der Absetzversuche ($t = 0 \text{ h}$)	[mg/l]
EHF	Eisenhydroxid-Flocken	
el. LF	elektrische Leitfähigkeit	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Fe_{gel}	Eisen-(gelöst)-Konzentration	[mg/l]
Fe_{ges}	Eisen-(gesamt)-Konzentration	[mg/l]
K	Empirische Konstante zur Berechnung von w_s	[$\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s})$]
K_B	Basenkapazität	[mmol/l]
K_S	Säurekapazität	[mmol/l]
m	Exponent zur Berechnung von w_s	[-]
MHM	Montanhydrologisches Monitoring	
MOHID	Modelo Hidrodinâmico (Hydrodynamisches Modell in Portugiesisch)	
MST	Messstelle	
PL6 - PL9	Probenahmepunkte PL6 bis PL9 in der Pleiße	
PN	Probenahme	
PN_I	Probenahme am 21.03.2017 (siehe Teilbericht 1)	
PN_II	Probenahme am 10.04.2017 (siehe Teilbericht 1)	
PN_III	Probenahme am 22.06.2017	
PN_IV	Probenahme am 08.08.2017	
PN_V	Probenahme am 29.08.2017	
TC	Gesamter Kohlenstoff (total carbon)	[mg/l]
TIC	Gesamter anorganischer Kohlenstoff (total inorganic carbon)	[mg/l]
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon)	[mg/l]
$t_{1/2}$	Zeit, bei der die initiale Fe_{ges} -Konz. um die Hälfte gesunken ist	[h]
t_{Sed}	Sedimentationszeit	[h]
w_s	Sedimentationsgeschwindigkeit im Schwerkraftfeld	[m/s]

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Infolge der Exfiltration von sauren, eisen- und sulfatbelasteten Grundwässern aus der Kippe Witznitz und der Hochhalde Neukieritzsch formiert sich ab der Wyhramündung die „Braune Pleiße“, die mit den Eisenhydroxidflocken (EHF) den Flusslauf stromabwärts stark belastet.

Um die Braunfärbung zu mindern, ist die Abscheidung, d. h. die Sedimentation der EHF notwendig. Daher wurde vorgeschlagen, die Pleiße durch den Kahnsdorfer See zu leiten und diesen als Sedimentationsfalle zu nutzen. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten und hohe Aufenthaltszeiten lassen hier eine relativ hohe Abscheidungsrate erwarten.

Die Flockulation wird wesentlich durch die Wasserbeschaffenheit (pH-Wert, Temperatur, Eisen-Konzentration, Oxidationsgrad des Eisens) bestimmt, während die Sedimentationsgeschwindigkeit maßgebend von der Flockengröße bestimmt wird.

Durch den Jahresgang der Wasserbeschaffenheit des Vorfluters, die schwankenden Durchflüsse sowie den beabsichtigten Mischprozess im Kahnsdorfer See kann das Absetzverhalten variieren.

Vor diesem Hintergrund wurden durch die GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH Absetzversuche zur Ermittlung der Sedimentationsgeschwindigkeit der Eisenhydroxidflocken (EHF) quantitativ durchgeführt (Teilbericht 1). Da während der ersten Untersuchungen die Eisenkonzentrationen zu gering ($<4,0$ mg/l) waren (LD Fachgutachten), soll mit den in diesem Bericht dokumentierten weitergehenden Untersuchungen (Teilbericht 2) die Ergebnisse der ersten Bearbeitung weiter untersetzt werden, um die Entscheidungssicherheit bei der Maßnahmenumsetzung zu erhöhen.

Ziel der Versuche im Teil 2 war es, die Probenahme so zu koordinieren, dass die Fe_{ges} -Konzentrationen über $4,0$ mg/l liegen, was bei einem Durchfluss von $3,5$ bis $4,5$ m³/s in der Pleiße gemäß Monitoring vorliegt. Insgesamt wurden an 3 Probenahmetagen jeweils 2 Proben an den Messstellen PL6 und PL9 entnommen.

2 Probenahme, Bestimmung der Vor-Ort-Parameter, Versuchsanordnung

2.1 Grundsätzliches

Die Untersuchung des Sedimentationsverhaltens von Eisenhydroxidflocken (EHF) wurde im Rahmen der weiterführenden Quantifizierung an den Pegeln der Pleiße PL6 und PL9 durchgeführt. Im Bereich des Gewässerabschnittes nach der PL6 ist der Grundwasseranstrom stark eisenhaltig und prägt die Wasserbeschaffenheit der Pleiße bis zum Trachenauer Wehr und unterhalb.

Abb. 2-1 zeigt die Lage der Probenahmepunkte PL6 und PL9, mit den dazugehörigen Koordinaten.

Die in diesem Bericht dargestellten Analysen bilden die Grundlage für eine instationäre Betrachtung des Fe-Sedimentationsverhaltens im Kahnsdorfer See. Die Einleitung des Flusswassers an der PL9 in den Kahnsdorfer See soll untersucht werden. Den Proben der Probenahmestelle PL9 wird deshalb eine höhere Bedeutung beigemessen. Deshalb erfolgten

die Probenahmen an PL9 als qualifizierte Stichproben und sind für die Charakterisierung der Fließgewässereigenschaft geeignet.

An PL6 wurden am 22.06.2017 und am 08.08.2017 Stichproben im Bereich des Übergangs Wasser-Sediment entnommen, die nicht für die Charakterisierung der Wasserbeschaffenheit des Fließgewässers geeignet sind. Die Probenahmen erfolgten nicht nach den Anforderungen des MHM und hatte das Ziel, Fe_{ges} -Konz. in den Proben zu generieren, die im Bereich $> 10 \text{ mg/L}$ liegen. Mit den Untersuchungen sollte es somit möglich werden, einen Schwankungsbereich für Sedimentationsgeschwindigkeiten anzugeben bzw. experimentell zu prüfen, mit welchen Anforderungen die Auslegung der Durchleitung durch den Kahnsdorfer See zu erfolgen hat.

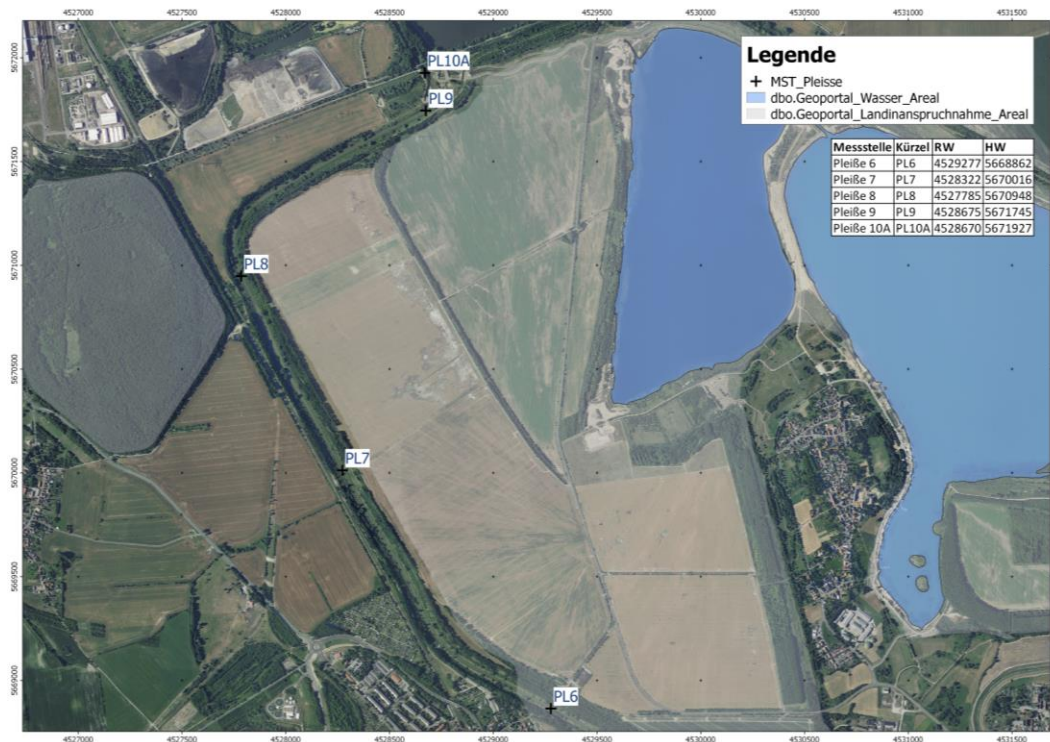


Abb. 2-1: Probenahmepunkte PL6 bis PL10A an der Pleiße

Für jede Entnahmestelle (PL6 und PL9) erfolgte ein Nullmonitoring vor Ort mit dem in Tab. 2-1 dargestellten Analyseprogramm. Die Konservierung der Proben für die nachfolgende Untersuchung im Labor erfolgte ebenfalls vor Ort (vgl. Abb. 2-2).

Tab. 2-1: Parameter des Monitorings

Vor-Ort-Parameter
pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Sauerstoffsättigung
Labor- Analytik
Fe^{2+} , Fe_{ges} , Fe_{gel}
$\text{K}_{\text{S}4,3}$, $\text{K}_{\text{B}8,2}$
abfiltrierbare Stoffe (AFS)
TIC, TOC, TC



Abb. 2-2: Probenkonservierung vor Ort

Die Entnahme der Proben für die Absetzversuche erfolgte am 22.06.2017, 08.08.2017 und am 29.08.2017. Wie bereits im Bericht „Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See“ (Teilbericht 1) festgestellt, variiert die Fe_{ges} -Konzentration in Abhängigkeit der jeweiligen Abflussklasse. Die Tage der Probenahme wurden daher so gewählt, dass die Pleiße Durchflüsse von 3,5 bis 4,5 m^3/s aufwies. Die Probenahmetage und PN-Stellen fasst Tab. 2-2 zusammen.

Tab. 2-2: Parameter des Monitorings

Datum	MST			
	PL6	PL7	PL8	PL9
21.03.2017	x	x	x	x
10.04.2107	x	x	x	x
22.06.2017	x			x
08.08.2017	x			x
29.08.2017	x			x

2.2 Probenahmepunkte PL6 und PL9

Die Entnahme der Wasserprobe aus der Pleiße erfolgte an den Pegeln PL6 und PL9. Abb. 2-3 und Abb. 2-4 zeigen die Probenahmepunkte sowie deren örtlichen Gegebenheiten.



Abb. 2-3: Probenahmepunkt PL6 – Neukieritzsch

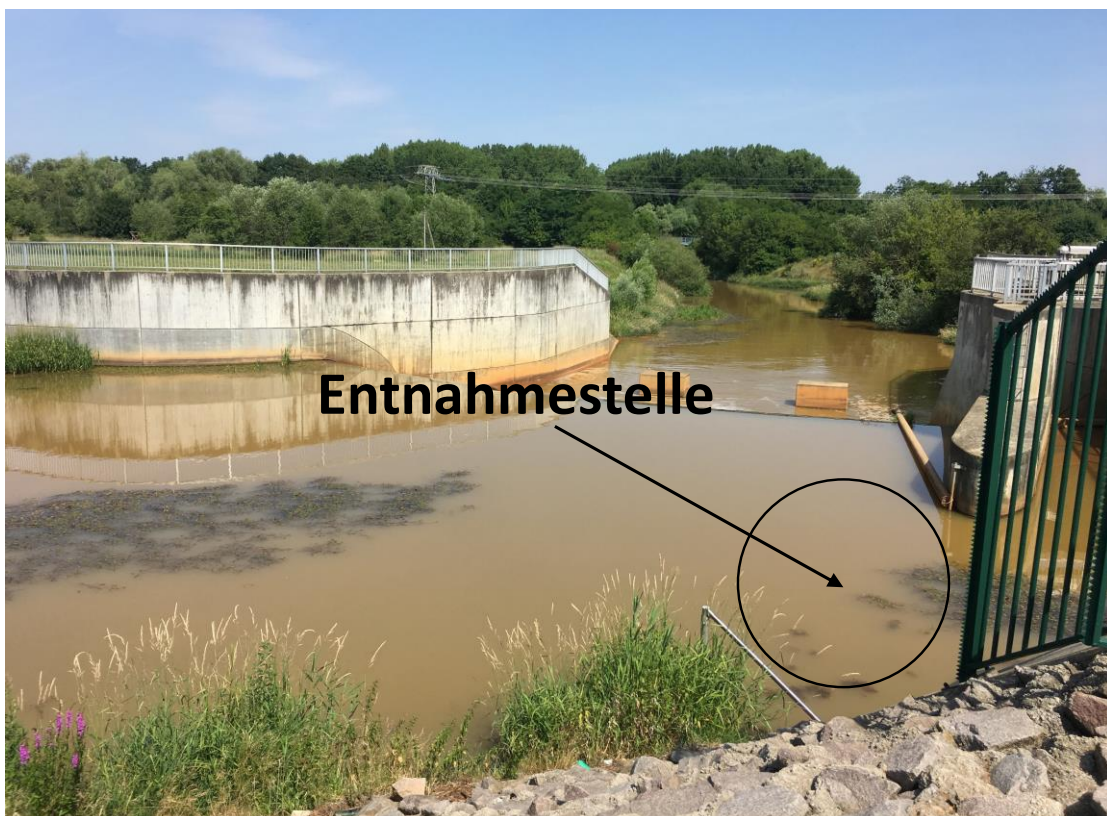


Abb. 2-4: Probenahmepunkt PL9 – oh. Trachenauer Wehr

2.3 Bestimmung der Wasserbeschaffenheitsparameter

Die Messung der Vor-Ort-Parameter pH-Wert, spezifische Leitfähigkeit, Temperatur und Sauerstoffsättigung erfolgte mit einer Multiparametersonde MS5 OTT, welche am Tag der Probenahme kalibriert wurde.

Die Bestimmung der Fe^{2+} -, Fe_{gel} - und Fe_{ges} -Konzentration erfolgte im akkreditierten Prüflabor der GFI GmbH Dresden. Die vor Ort entnommenen eisenhaltigen Wasserproben der Pleiße wurden DIN-gerecht vor dem Transport konserviert.

Für den Parameter Fe^{2+} wurde vorab ein Schnelltest durchgeführt. Anhand der Färbung des Teststäbchens konnte die Fe^{2+} -Konzentration der Wasserprobe abgeschätzt und die notwendige Verdünnung der Probe für die Analyse bestimmt werden. Anschließend wurden 2,5 ml einer Ammoniumacetat-Lösung vorgelegt, die Wasserprobe durch 0,45 μm Filter filtriert sowie durch Zugabe eines Komplexbildners stabilisiert, um somit die Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+} zu unterbinden.

Die Ermittlung der Parameter $K_{\text{S4,3}}$, $K_{\text{B8,2}}$, abfiltrierbare Stoffe (AFS) sowie TC, TIC und TOC erfolgte ebenfalls im Labor. Vor Ort wurden die Wasserproben luftdicht und blasenfrei in Glasflaschen überführt (siehe Abb. 2-2).

Die Bestimmung der genannten Wasserbeschaffenheitsparameter erfolgte DIN-gerecht im Labor nach den in Tab. 2-3 aufgelisteten Methoden.

Tab. 2-3: Übersicht des durchgeführten Untersuchungsprogrammes

Parameter	Methode	Untere Bestimmungsgrenze	Einheit
pH-Wert	DIN 38404 C 5	1,0	[-]
el. LF bei 25 °C	DIN EN 27888 C 8	0,1	[µS/cm]
Wassertemperatur	DIN 38404 C 4	0,1	[°C]
Sauerstoffsättigung	DIN EN 25814 G 22	0	[%]
Abfiltrierbare Stoffe	DIN 38409 H2 3	0,4	[mg/l]
Eisen-gesamt (Fe _{ges})	DIN 11464	0,01	[mg/l]
Eisen-gelöst. (Fe _{gel})	DIN EN ISO 11885	0,01	[mg/l]
Eisen(II)-Konz.	DIN 38406 E1	0,01	[mg/l]
Säurekapazität bis pH 4,3	DIN 38407	0,01	[mmol/l]
Basenkapazität bis pH 8,2	DIN 38407	0,01	[mmol/l]
Gesamt-anorganischer-Kohlenstoff	DIN EN 1484 H 3	0,3	[mg/l]

2.4 Ergebnisse der bestimmten Wasserbeschaffenheitsparameter

2.4.1 Vor-Ort-Parameter

Abb. 2-5 zeigt den Verlauf der bestimmten Vor-Ort-Parameter zum Zeitpunkt der Probenahme vom 22.06.2017, 08.08.2017 und 29.08.2017 für die Entnahmestellen PL6 und PL9. Auf das Null-Monitoring vor Versuchsbeginn wurde im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet. Die Ergebnisse aus Teilbericht I zeigten, dass die zum Zeitpunkt der Probenahme bestimmten Vor-Ort-Parameter im Vergleich zu den gemessenen Parametern vor Versuchsbeginn nur geringen Schwankungen unterlagen.

Der pH-Wert (grüne Kurven in Abb. 2-5) unterliegt im untersuchten Bereich der Fließstrecke nur geringen Schwankungen. Am Pegel PL6 schwankten die pH-Werte zwischen 6,2 und 7,7. Die pH-Werte am Pegel PL9 änderten sich dagegen kaum. Die pH-Werte lagen hier zwischen 6,9 und 7,3.

Ein deutliches anderes Verhalten geht aus den Ergebnissen der gemessenen spezifischen Leitfähigkeiten hervor (rote Kurven in Abb. 2-5). An jedem der drei Probenahmetage konnte ein Anstieg der spezifischen Leitfähigkeit innerhalb der untersuchten Fließstrecke aufgrund der hohen Sulfatkonzentrationen beobachtet werden. Im Mittel stieg die Leitfähigkeit zwischen PL6 und PL9 um 250 bis 300 µS/cm an. Ein ähnlicher Zusammenhang ging bereits aus Teilbericht 1 hervor, auch hier stieg die spezifische Leitfähigkeit innerhalb Fließstrecke (PL6 bis PL9) an.

Die Sauerstoffsättigung ist Rahmen dieser Untersuchung als konstant einzuordnen. Diese betrug im Mittel 90 % (schwarze Kurven in Abb. 2-5).

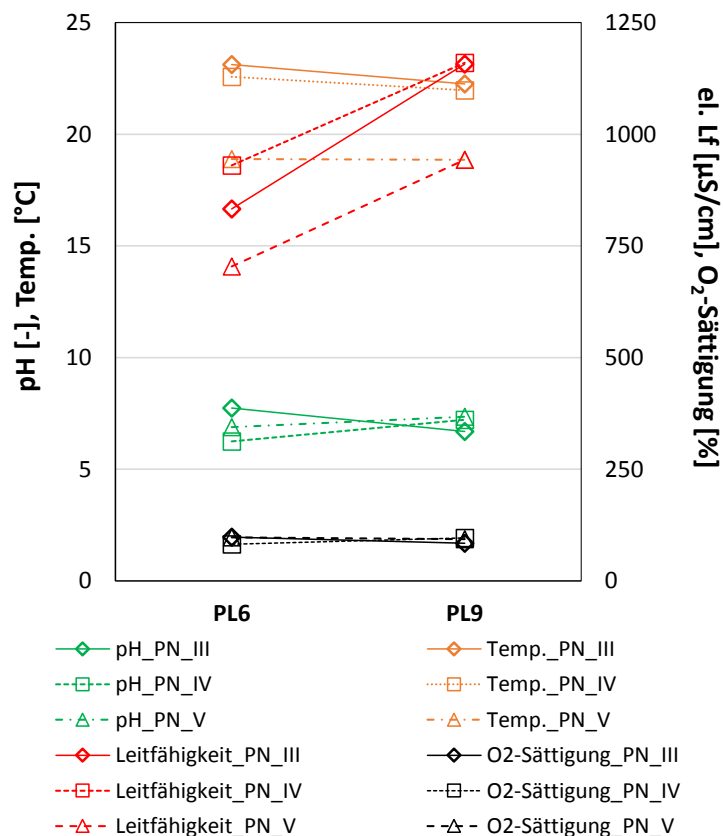


Abb. 2-5: Änderung der Vor-Ort-Parameter (pH-Wert, el. LF, O₂-Sättigung und Temp.) der Probenahmen vom 22.06.2017 (PN_III) , 08.08.2017 (PN_IV) und 29.08.2017 (PN_V)

2.4.2 Laboranalytik

Die Parameter TIC, TOC, AFS, Fe_{ges}, Fe_{gel}, Fe²⁺, K_{S4,3} und K_{B8,2} wurden nach den in Tab. 2-3 aufgelisteten Untersuchungsmethoden analysiert. Die Ergebnisse fasst Tab. 2-4 zusammen.

Tab. 2-4: Ergebnisse der Laboranalytik

	PN-Stelle	Fe ²⁺	Fe _{gel}	Fe _{ges}	pH	K _{S4,3}	K _{B8,2}	TC	TIC	TOC	AFS
Datum		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[-]	[mmol/l]	[mmol/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
22.06.2017	PL6	0,19	0,10	60,50	7,74	3,1	0,3	48,4	44,6	3,8	95,2
(PN_III)	PL9	0,03	0,03	3,55	6,69	3,4	0,4	49,3	45,8	3,6	14,0
08.08.2017	PL6	5,37	6,05	23,00	6,25	2,3	0,6	41,3	35,5	5,8	42,2
(PN_IV)	PL9	0,34	0,03	3,51	7,22	2,9	0,4	41,0	37,1	3,9	8,4
29.08.2017	PL6	0,844	0,07	5,78	6,89	2,4	0,3	33,1	30,2	2,9	27,0
(PN_V)	PL9	0,514	0,03	3,27	7,35	2,5	0,4	36,0	31,7	4,3	14,0
farblich markiert sind die Stichproben, die nicht nach MHM gewonnen wurden und deshalb nicht für die Charakterisierung der Pleiße verwendet werden können											

Deutlich wird eine Korrelation der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) mit der Fe_{ges} -Konzentration. Die ermittelten Fe_{gel} -Konzentrationen waren gering und betrugen weniger als 1,0 mg/l. Einzige Ausnahme bildet die am Pegel PL6 gemessene Fe_{gel} -Konzentration vom 22.06.2017. Die Fe_{gel} -Konzentration betrug 6,05 mg/l und liegt damit deutlich über den sonst gemessenen Konzentrationen von 0,07 mg/l bis 0,1 mg/l (PN III, PN_IV sowie PN_I und PN_II aus Teilbericht 1).

Die Bestimmung der Fe^{2+} -Konzentration lag jeweils zwischen 0,3 mg/l und 1,1 mg/l und ist damit deutlich größer als die gemessene Fe^{2+} -Konzentration aus Teilbericht 1, welche sowohl für die PN vom 21.03.2017 als auch für die PN vom 10.04.2017 unter der Nachweisgrenze lagen.

Der gesamte anorganischen Kohlenstoffs (TIC) variiert zwischen 33 mg/l und 45 mg/l. Der Parameter $K_{\text{S4,3}}$ unterlag im Bereich der untersuchten Fließstrecke nur geringen Schwankungen. Die gemessene Alkalinität variierte zwischen 2,5 mmol/l und 3,4 mmol/l. Des Weiteren ist ein Anstieg der Säurekapazität innerhalb der untersuchten Fließstrecke zu verzeichnen. Dieser betrug im Mittel 0,4 mmol/l. Die gemessenen Säurekapazitäten der Probenahmen III, IV und V sind mit denen aus Teilbericht 1 vergleichbar. Die gemessene Alkalinität betrug durchschnittlich 3,15 mmol/l.

Die $K_{\text{B8,2}}$ -Werte unterlagen im Vergleich zu den $K_{\text{S4,3}}$ -Werten geringeren Schwankungen. Die gemessene Basenkapazität betrug im Mittel 0,38 mmol/l. Auch die $K_{\text{B8,2}}$ -Werte sind mit denen aus Teilbericht 1 vergleichbar. Die gemessenen Titrationskurven für die Ermittlung der Säure- und Basenkapazität enthält Anlage 1.

2.5 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Die Absetzversuche wurden in Polyacrylsäulen mit einem Nutzvolumen von 8,8 l durchgeführt. Die Säulen haben eine Höhe von 60 cm und einen Durchmesser von 15 cm. Abb. 2-6 zeigt den schematischen Versuchsaufbau sowie die geometrischen Abmessungen einer Säule. Die Probenahme während der Absetzversuche erfolgte, wie in Abb. 2-6 dargestellt, in einer Wassertiefe von 15 cm. Abb. 2-7 zeigt den Vergleich einer Versuchsreihe jeweils vor und nach dem Sedimentationsvorgang (PN_III vom 22.06.2017). Die Dauer der durchgeführten Absetzversuche betrug 7 Tage ($t_{\text{Sed}} = 168 \text{ h}$).

Während der Versuche erfolgte nach 0h, 15h, 39h, 81h sowie 142h die Entnahme der Wasserproben. Mittels einer Spritze wurden jeweils 20 ml in ein Glasvial überführt und mit in 65%iger HNO_3 angesäuert. Die Bestimmung der Fe_{ges} -Konzentration erfolgte durch einen Königswasserauflschluss nach DIN 11464.

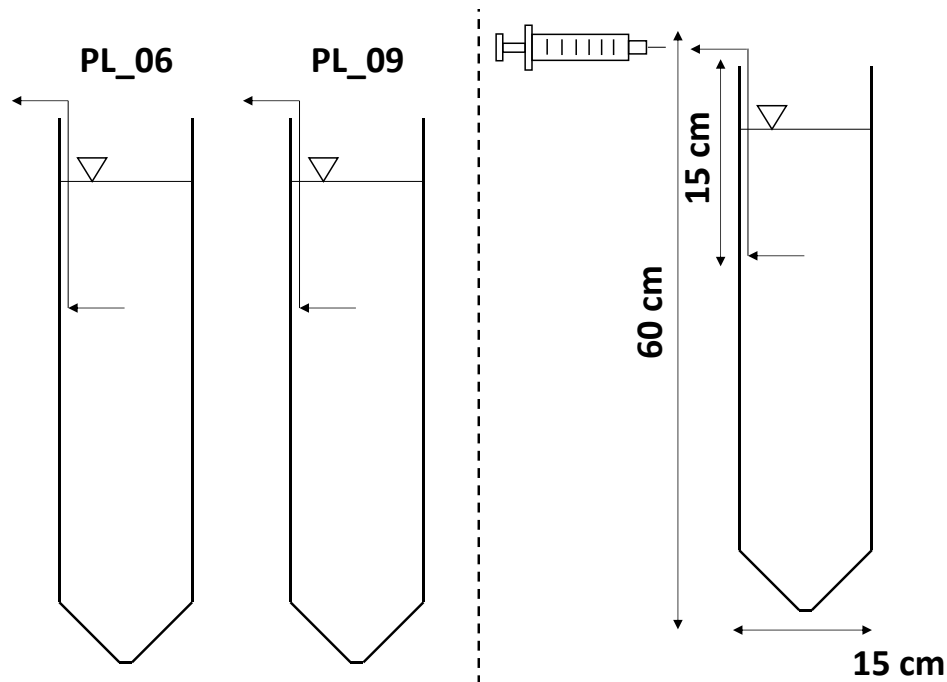
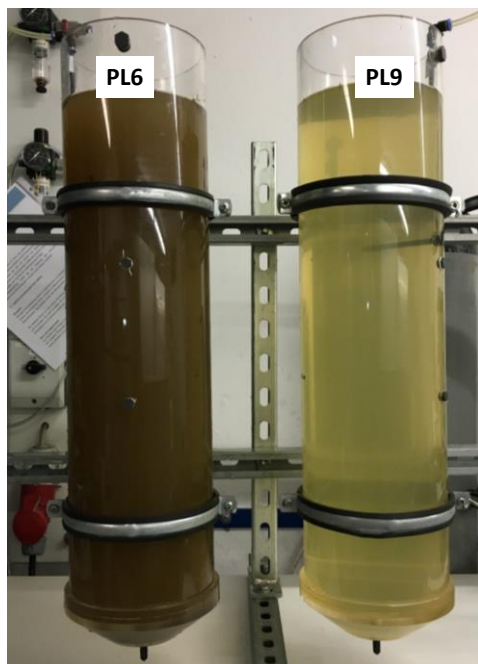
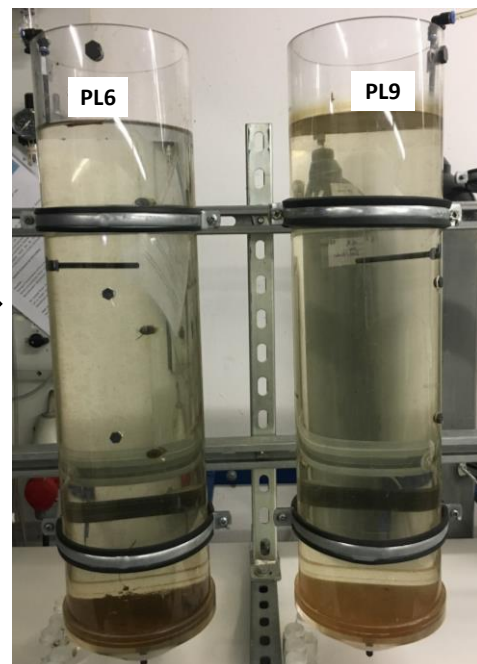


Abb. 2-6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus sowie die geometrische Abmessung der Polyacrylsäule

Beginn Sedimentationsversuche



Ende Sedimentationsversuche



$t_{\text{Sed}} = 168 \text{ h}$

Abb. 2-7: Generelle Darstellung des Versuchsaufbaus sowie eine Vergleichsaufnahme vor und nach dem Sedimentationsvorgang¹

¹ Weitere Abbildungen zur Färbung des Fließgewässers zum Zeitpunkt der Probenahme und der Versuchssäulen vor Versuchsbeginn sind den Anlagen 3 und 4 beigelegt.

3 Ergebnisse der Absetzversuche und Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten

3.1 Ergebnisse der Absetzversuche

Gegenstand der Auswertung sind die drei Absetzversuche der Probenahmen vom 22.06.2017 (PN_III), 08.08.2017 (PN_IV) und 29.08.2017 (PN_V). Zur vollständigen Darstellung der Ergebnisse wurden die Probenahmen vom 21.03.2017 (PN_I) und 10.04.2017 (PN_II) aus Teilbericht 1 in die Auswertung einbezogen.

Tab. 3-1 stellt die initialen Fe_{ges} -Konzentrationen der durchgeführten Absetzversuche (Teil 1 und 2 der Untersuchungen) zusammen.

Tab. 3-1: Initiale Fe_{ges} -Konzentration der einzelnen Probenahmen (PN_I bis PN_V)

MST	initiale Fe_{ges} -Konzentration [mg/l]				
	PN_I (21.03.2017)	PN_II (10.04.2017)	PN_III (22.06.2017)	PN_IV (08.08.2017)	PN_V (29.08.2017)
PL6	1,78	3,73	60,50	19,90	5,04
PL7	1,43	2,94	-----	-----	-----
PL8	1,18	3,07	-----	-----	-----
PL9	1,09	2,48	3,55	2,57	3,12
----- keine Probenahme					
farbig markiert sind die Konz. der Stichproben die nicht charakteristisch für die Pleiße sind					

Die während der 5 durchgeführten Absetzversuche (Teil 1 und Teil 2) gemessenen Fe_{ges} -Konzentrationen sind in Abb. 3-1 für den Pegel PL6 und in Abb. 3-2 für den Pegel PL9 dargestellt.

Wie Abb. 3-1 verdeutlicht, ist der Fe_{ges} -Konz.-Verlauf am Pegel PL6 bei hohen Fe_{ges} -Konz. (Abb. 3-1 unten) durch eine starke Fe-Abreicherung innerhalb der ersten 24 h gekennzeichnet. Mit fortschreitender Zeit wird der Konzentrationsverlauf flacher und damit die Fe-Abreicherungsrate kleiner. Ein vergleichbares Bild liefern die gemessenen Abreicherungskurven für geringe Konzentrationen im Bereich von 1,8 bis 5,0 mg Fe_{ges} /l. Der beobachtete Konzentrationsverlauf bis zu einer Fe-Konz. von 1-2 mg/l lässt auf eine höhere Abreicherungsrate schließen, als bei Konz. unterhalb von 1-2 mg/l.

Auch die Fe_{ges} -Konz. an der Versuchssäule mit Wasser der PL9 zeigt diese Entwicklung.

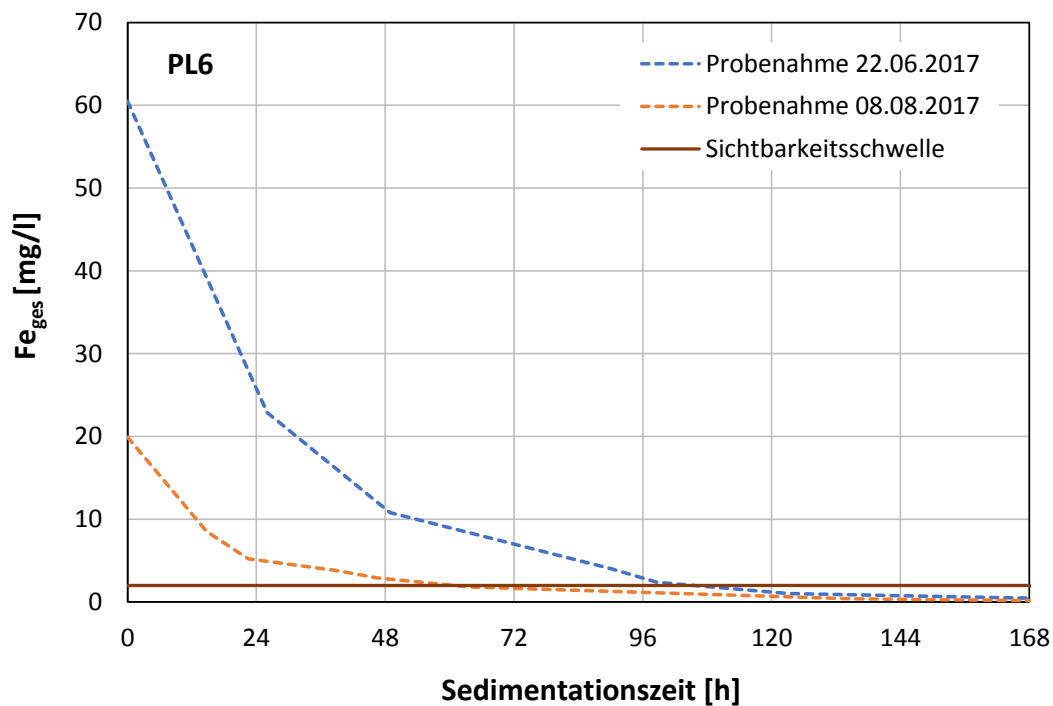
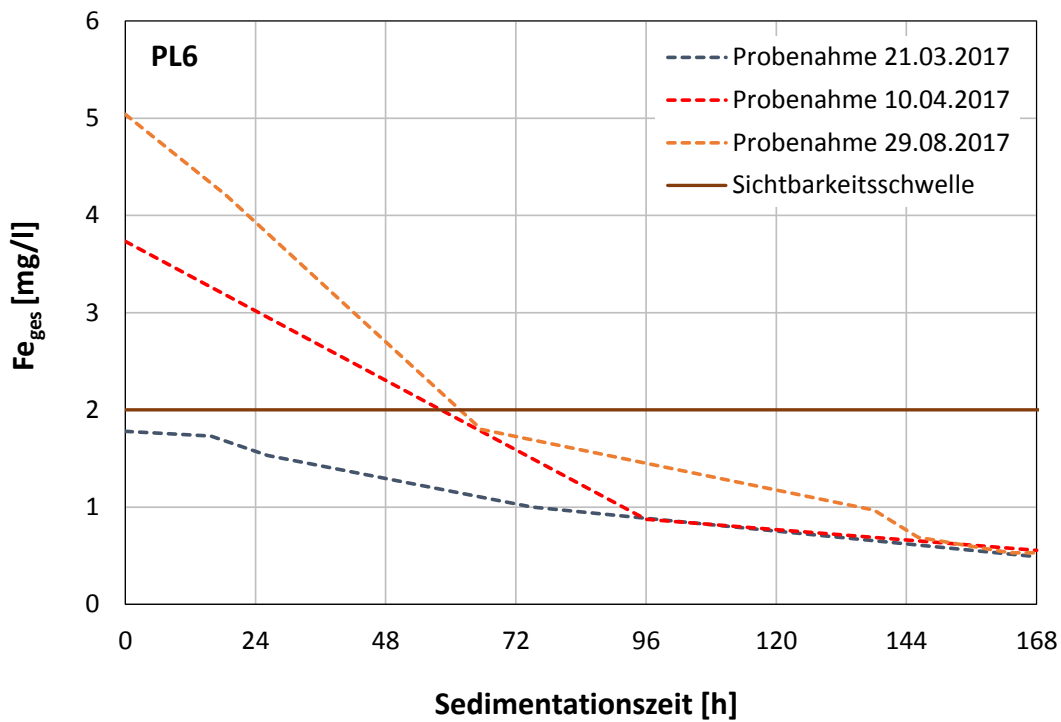


Abb. 3-1: Gemessene Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL6 (oben: PN_I, PN_II; PN_V; unten: PN_III, PN_IV)

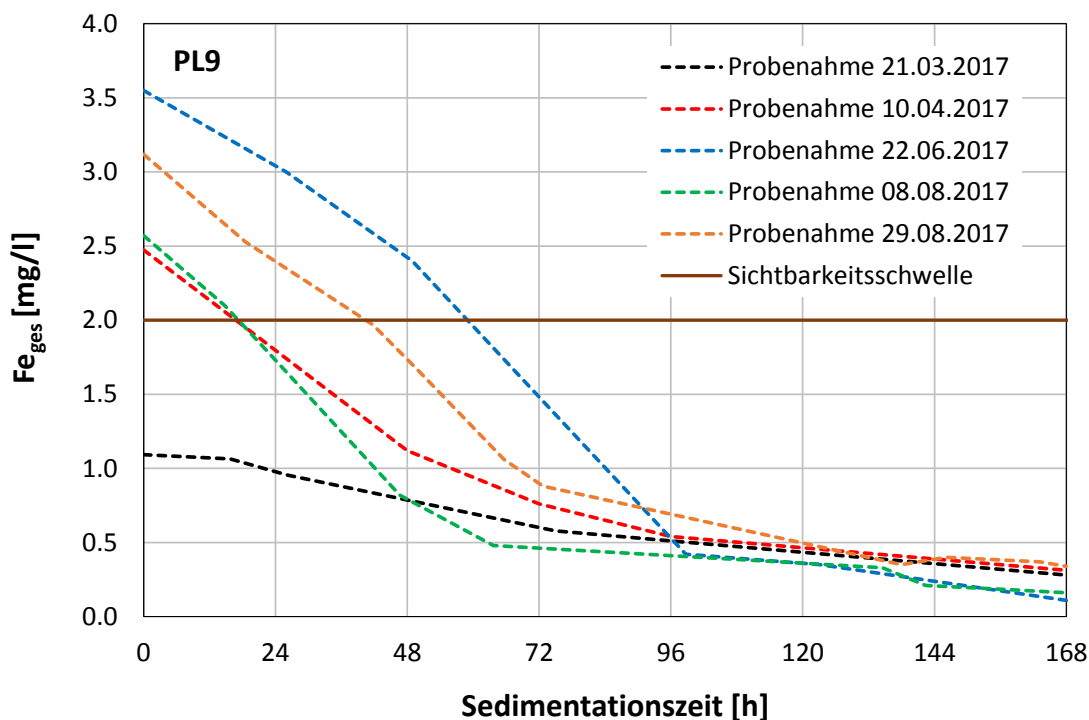


Abb. 3-2: Gemessene Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL9 (PN_I bis PN_V)

Wie Abb. 3-2 zeigt, variieren die gemessenen initialen Fe_{ges} -Konzentration von 1,09 mg/l bis 3,55 mg/l. Alle drei Kurven weisen ähnliche Sedimentationsgeschwindigkeiten auf. Die gemessenen Fe_{ges} -Konzentrationen am Ende der durchgeführten Absetzversuche lagen unterhalb von 0,5 mg/l.

Anhand der in Abb. 3-1 und Abb. 3-2 dargestellten Sedimentationskurven wird deutlich, dass die Zeit, die benötigt wird, um die Sichtbarkeitsschwelle zu unterschreiten mit steigender Fe_{ges} -Konzentration zunimmt (Tab. 3-2).

Abb. 3-3 verdeutlicht den genannten Zusammenhang und zeigt die Verringerung der Fe_{ges} -Konzentration bei gleichzeitiger Abnahme der Braunfärbung der Wassersäule am Beispiel der Sedimentationskurve vom 08.08.2017 am Pegel PL6.

Wie Abb. 3-3 zeigt, ist die Braunfärbung der Wassersäule, anhand der hier dargestellten Absetzkurve, erst ab einer Fe_{ges} -Konzentration von 1,8 mg/l optisch nicht mehr wahrnehmbar. Es ist eine leichte Trübung des Wassers jedoch erkennbar. Erst nach einer Sedimentationszeit (t_{Sed}) von 168 h (7 Tage) ist das Wasser in der Säule klar.

Unter 1mg/l ist eine wesentlich geringere Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration zu verzeichnen.

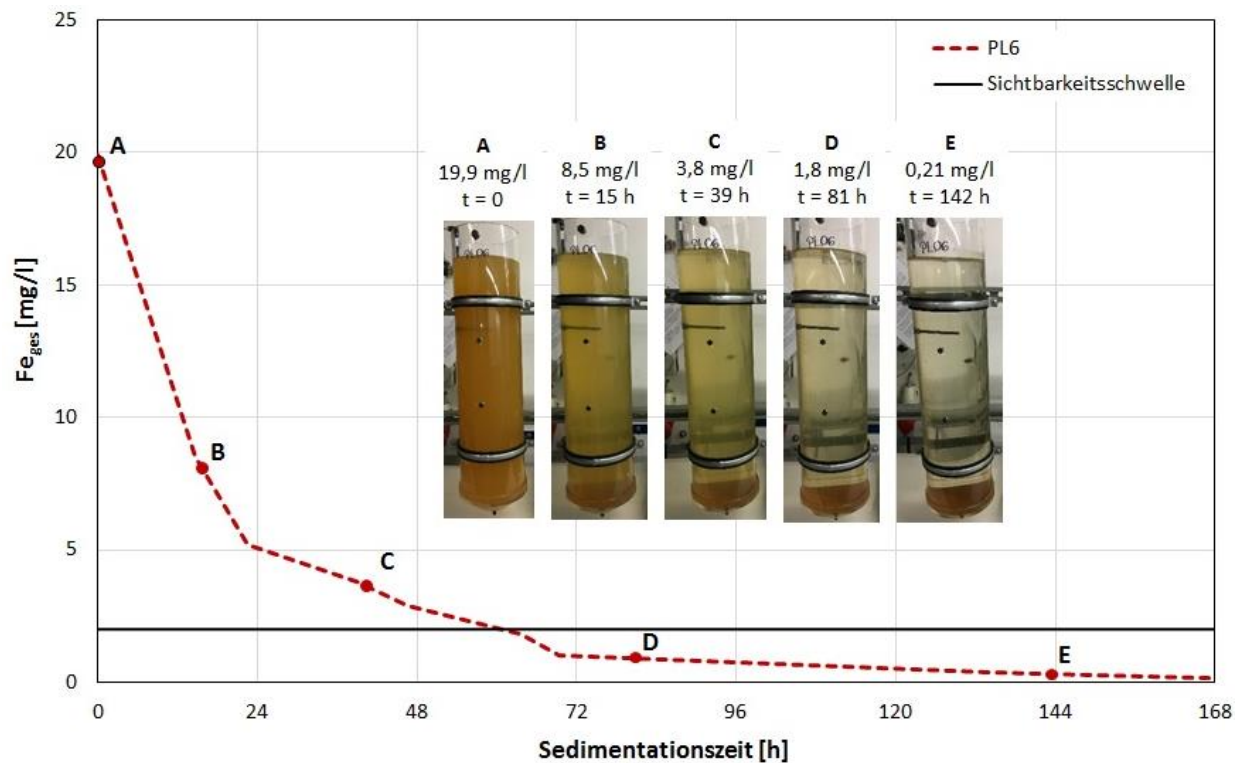


Abb. 3-3: Entwicklung der Fe_{ges}-Konzentration und Färbung des Wassers in der Versuchssäule

Tab. 3-2: Gegenüberstellung der benötigten Sedimentationszeit bis zum Erreichen der optischen Wahrnehmbarkeitsschwelle von 2 mg/l

Probenahme	PL6		PL9	
	C _{initial} [mg/l]	Zeit bis Fe _{ges} < 2 mg/l [h]	C _{initial} [mg/l]	Zeit bis Fe _{ges} < 2 mg/l [h]
21.03.2017	1,78	-----	1,09	-----
10.04.2107	3,73	58	2,48	18
22.06.2017	60,5	106	3,55	58
08.08.2017	19,9	63	2,57	18
29.08.2017	5,04	63	3,12	42
----- C _{initial} < 2 mg/l				

3.2 Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten

3.2.1 Vorgehensweise

Die Ermittlung der Sedimentationsgeschwindigkeiten erfolgte mit dem numerischen Modellcode MOHID, welcher als Open Source Software zur Verfügung steht. Dabei werden die Randbedingungen des Versuches auf das Modell übertragen. Variiert wird die Sedimentationsgeschwindigkeit der Einzelpartikel. Mit dem Vergleich der Berechnungsergebnisse und der Messwerte wird eine für die Fe-Partikel mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit des Partikelkollektivs abgeschätzt.

Zur detaillierten Beschreibung der Strömungsverhältnisse, Stofftransportprozesse, einschließlich der Bewertung der Hydrochemie eines Wasserkörpers, kommen dreidimensionale Hydrodynamikmodelle zum Einsatz. MOHID (**M**odelo **H**idrodinâmico) ist ein solches Modellierungsprogramm, mit dem derartige Prozesse abgebildet und beschrieben werden können. Durch die Verwendung von MOHID können:

- der Energieaustausch zwischen Wasserkörper und Atmosphäre durch Strahlung, Lufttemperatur, Windeinfluss, Niederschlag, Verdunstung und damit die Schichtung des Wasserkörpers,
- die Wirkung von Zu- und Abflüssen aus angeschlossenen Oberflächengewässern (Vorfluter/ Überleiter etc.) oder des Grundwassers auf die Beschaffenheit des Sees und die seeinternen Strömungen,
- die wind- und dichteinduzierten Strömungen im Wasserkörper einschließlich der Sekundärströmungen,
- der Partikeltransport von Schweb- und Feststoffen basierend auf der Strömungssituation

berechnet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird ausschließlich der vierte Gliederungspunkt, der Partikeltransport von Schweb- und Feststoffen, untersucht.

Die Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit kohäsiver Sedimente ist sehr komplex. In der Literatur sind sehr unterschiedliche Modellansätze zu finden. Häufig wird entweder eine konstante Sedimentationsgeschwindigkeit für das Partikelkollektiv angenommen oder die in [U4] beschriebene Gleichung, basierend auf Versuchen in einer Rinne [U1], verwendet (Gl. 1).

$$w_s = K \cdot c^m \quad \text{Gl. 1}$$

In Gl. 1 beschreibt w_s die Sedimentationsgeschwindigkeit im Schwerkraftfeld in m/s, K ist eine empirisch ermittelte Konstante in $\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s})$, die die Mineralogie der Partikel beschreibt, m ist ein dimensionsloser Exponent, der von der Partikelform und der Partikelgröße abhängt, und c ist die Partikelkonzentration in kg/m^3 . Für die Abschätzung der Sedimentationsgeschwindigkeit wurde zunächst vom einfachsten Fall einer konstanten Sedimentationsgeschwindigkeit ausgegangen. Für jede gemessene Konzentration an den Pegeln PL6 und PL9 wurden mehrere Modellrechnungen durchgeführt, bei denen jeweils die Sedimentationsgeschwindigkeit variiert wurde. In Summe wurden 42 Berechnungen mit MOHID durchgeführt und für die Auswertung verwendet.

3.2.2 Modellergebnisse und Vergleich mit den Messwerten

Abb. 3-4 bis Abb. 3-6 zeigen den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den experimentell bestimmten Daten für die Wässer der Pegel PL6 (jeweils Abb. A, oben) und PL9 (jeweils Abb. B, unten) der PN_III bis PN_V. Die Modellparametrisierung fasst Anlage 2 zusammen.

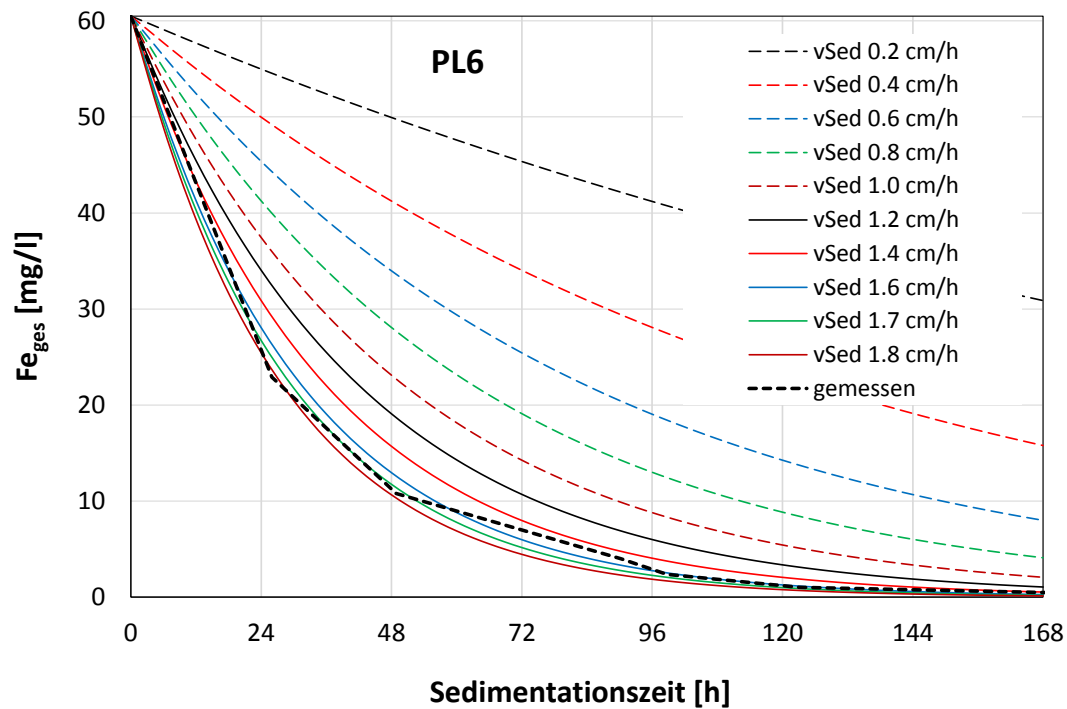
Die in Abb. 3-5 B und Abb. 3-6 B dargestellten Modellergebnisse für PL9 zeigen, dass die Messergebnisse hinreichend genau durch die Modellrechnungen wiedergegeben werden können, wenn dem Modell eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h zugrunde gelegt wird. Die initiale Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL9 betrug 2,55 mg/l (PN_IV) bzw. 3,12 mg/l (PN_V).

In Abb. 3-4 B und Abb. 3-6 A werden die Messergebnisse mit einer Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,6 cm/h nur noch ungenügend wiedergegeben. Diese Abweichung ist auf die höhere Fe_{ges} -Konzentration von 5,04 mg/l (PN_V) und 3,57 mg/l (PN_III) zurückzuführen. Wie Abb. 3-4 B und Abb. 3-6 A zeigen, wird die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration gut abgebildet, wenn im Modell eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,6 bis 0,8 cm/h zugrunde gelegt wird.

Demgegenüber stehen die Modellergebnisse in Abb. 3-4 A und Abb. 3-5 A. Diese zeigen den Vergleich der Fe_{ges} -Konzentrationsentwicklung bei Sedimentationsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 1,8 cm/h. Aufgrund der höheren Fe_{ges} -Konzentrationen von 60 bzw. 20 mg/l ist die mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit etwa um den Faktor 2 höher und liegt im Bereich von 1,6 bis 1,8 cm/h.

² Startkonzentrationen bei Modellrechnung niedriger als bei vor- Ort- Parameter (Tab. 2-4) aufgrund von Sedimentationsvorgängen bei Transport

A (PN_III)



B (PN_III)

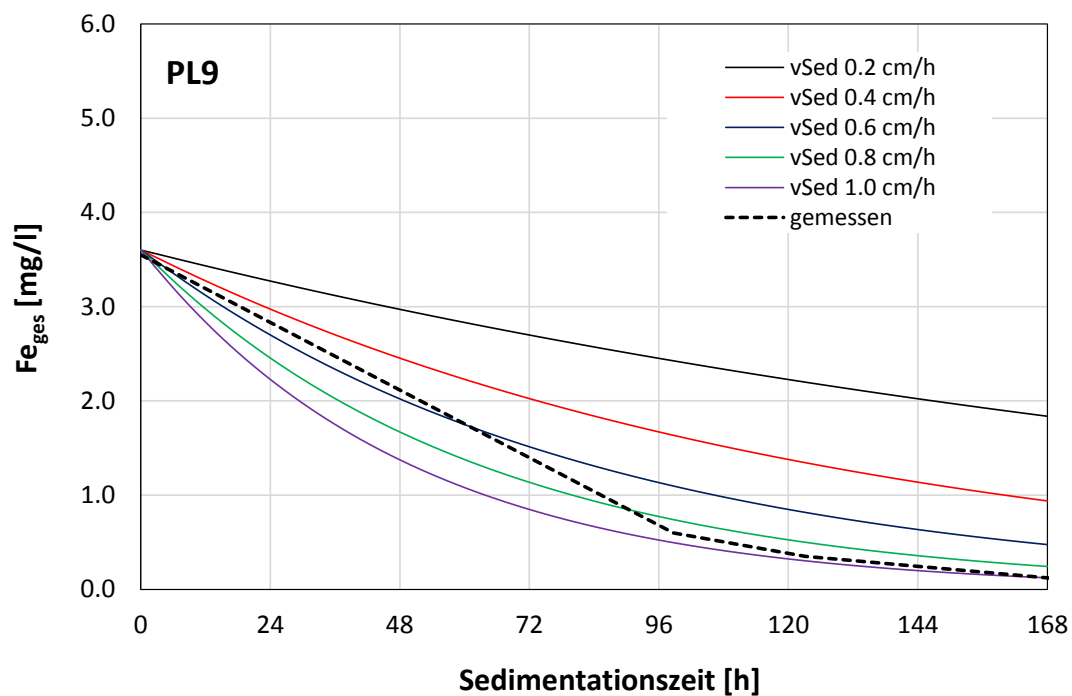
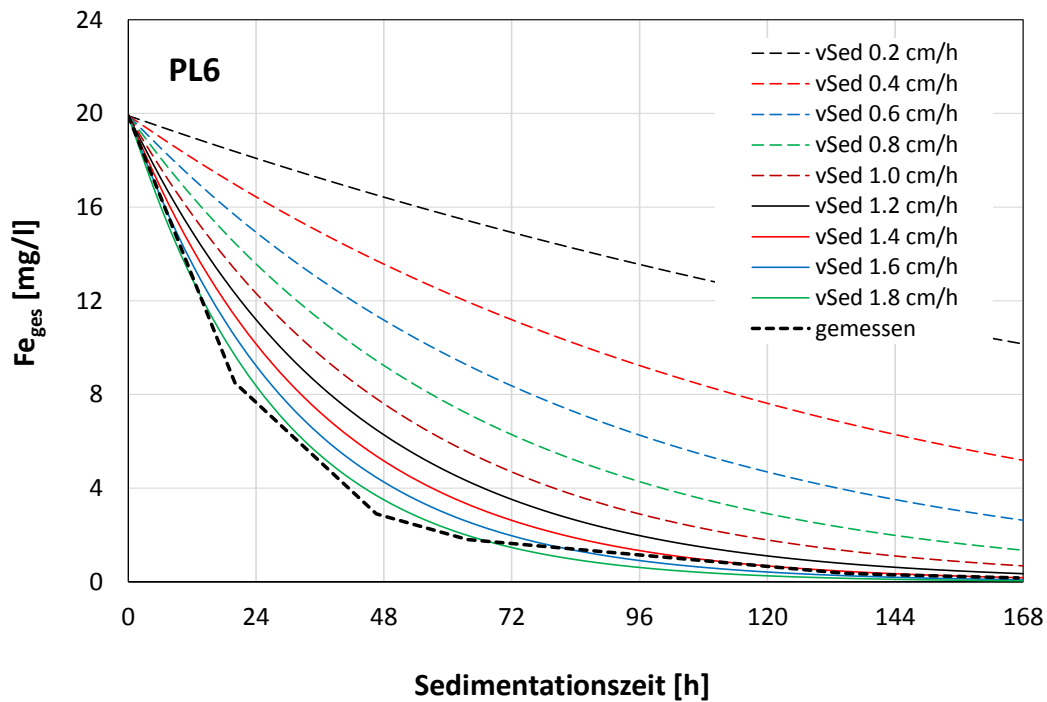


Abb. 3-4: Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Daten (PN_III vom 22.06.2017)

A (PN_IV)



B (PN_IV)

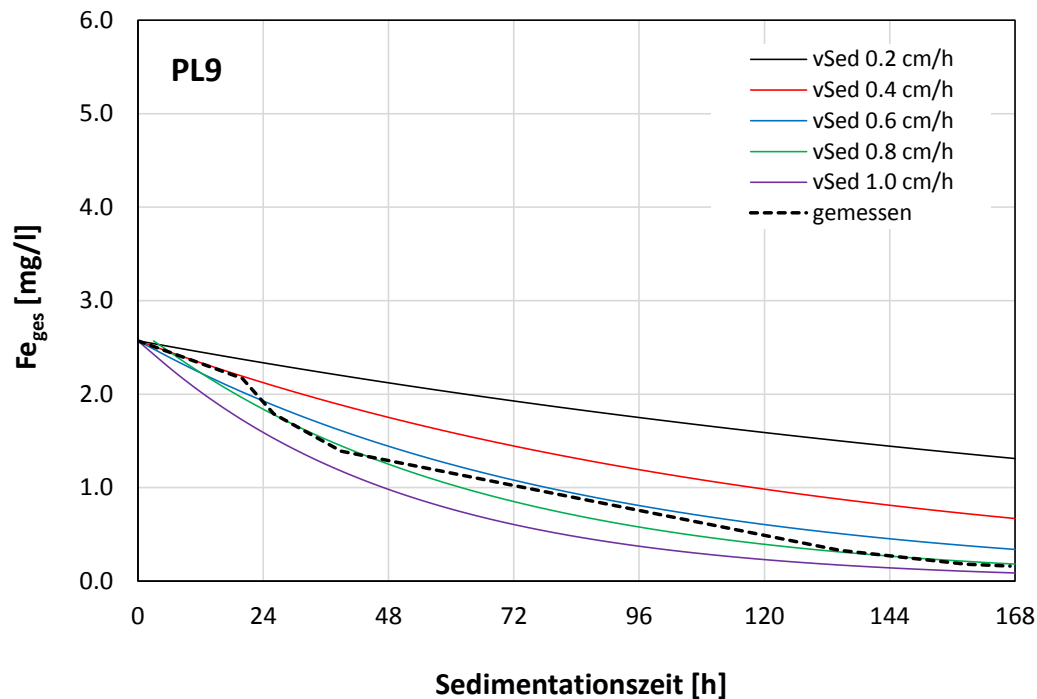
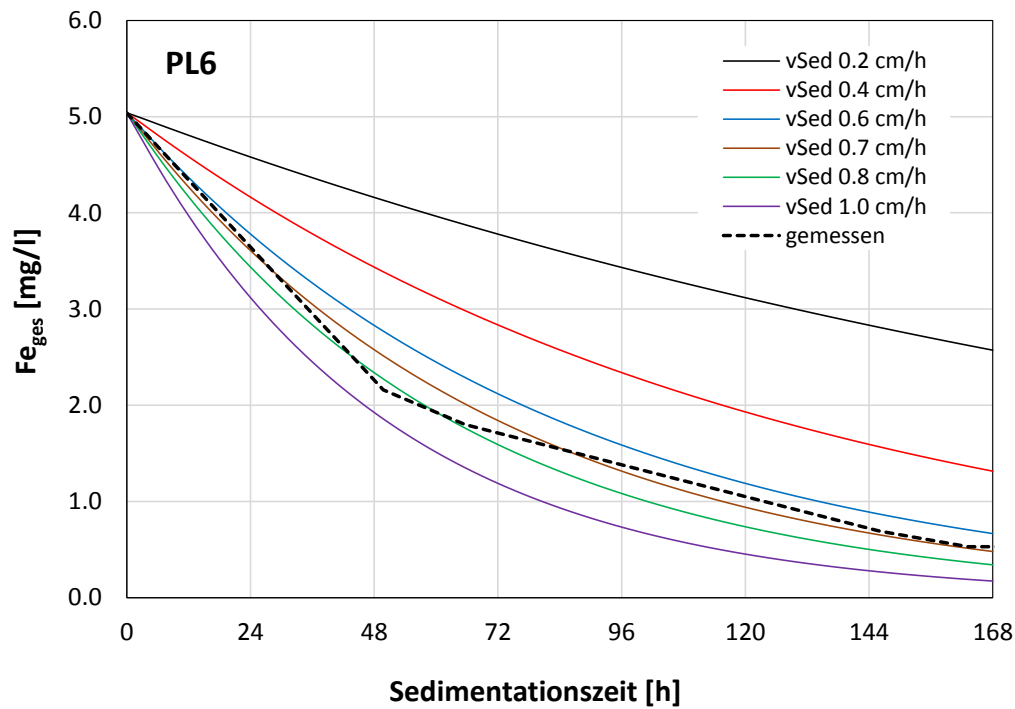


Abb. 3-5: Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Daten (PN_IV vom 08.08.2017)

A (PN_V)



B (PN_V)

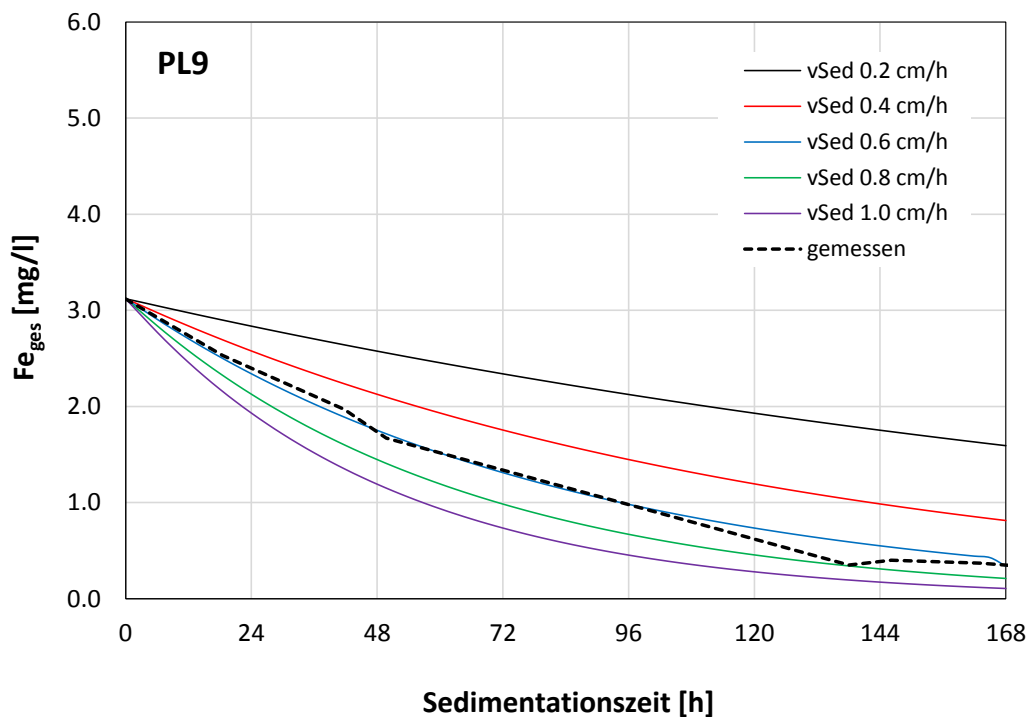


Abb. 3-6: Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Daten (PN_V vom 29.08.2017)

3.2.3 Abschätzung der Sedimentationsgeschwindigkeit für definierte Konzentrationsbereiche

Anhand der im vorliegenden Bericht dargestellten sowie den im Teilbericht 1 gewonnenen Ergebnissen können drei Konzentrationsbereiche definiert werden, in denen, bei bekannter Fe_{ges} -Konzentrationen, die Sedimentationsgeschwindigkeit hinreichend genau abgeschätzt werden kann.

Aus Teilbericht 1 wurde für eine Fe_{ges} -Konzentration < 2 mg/l eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,40 cm/h abgeleitet (PN_I vom 21.03.2107).

Für Eisenkonzentrationen im Bereich von 2,5 bis 3,7 mg/l wurde eine um den Faktor 1,5 höhere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h aus den Versuchen mit Hilfe des numerischen Modells bestimmt (PN_II vom 10.04.2017). Dieses Ergebnis wurde ebenfalls im Rahmen der weiterführenden Untersuchung bestätigt und für Fe_{ges} -Konzentrationen von 2,0 mg/l bis 5,04 mg/l erweitert (siehe Abb. 3-4 B, Abb. 3-5 B und Abb. 3-6 A und B).

Fe_{ges} -Konzentrationen von 20 bis 60,5 mg/l können mit einer Sedimentationsgeschwindigkeit von 1,80 cm/h hinreichend genau beschrieben werden. Tab. 3-4 stellt die abgeleiteten Sedimentationsgeschwindigkeiten in den jeweiligen Konzentrationsbereichen gegenüber.

Tab. 3-3: Messwerten abgeleiteten Sedimentationsgeschwindigkeiten zur Charakterisierung der Säulenversuche

PN-Datum	MST	Fe_{ges} [mg/l]	$v_{Sed,mittel}$ [cm/h]		PN-Datum	MST	Fe_{ges} [mg/l]	$v_{Sed,mittel}$ [cm/h]
21.03.2017	PL6	1,78	0,35		21.03.2017	PL8	1,18	0,35
10.04.2107	PL6	3,73	0,45		10.04.2107	PL8	3,07	0,55
22.06.2017	PL6	60,50	1,75		21.03.2017	PL9	1,09	0,30
08.08.2017	PL6	19,90	1,80		10.04.2107	PL9	2,49	0,50
29.08.2017	PL6	5,04	0,80		22.06.2017	PL9	3,55	0,58
21.03.2017	PL7	1,43	0,50		08.08.2017	PL9	2,57	0,60
10.04.2107	PL7	2,94	0,45		29.08.2017	PL9	3,12	0,60

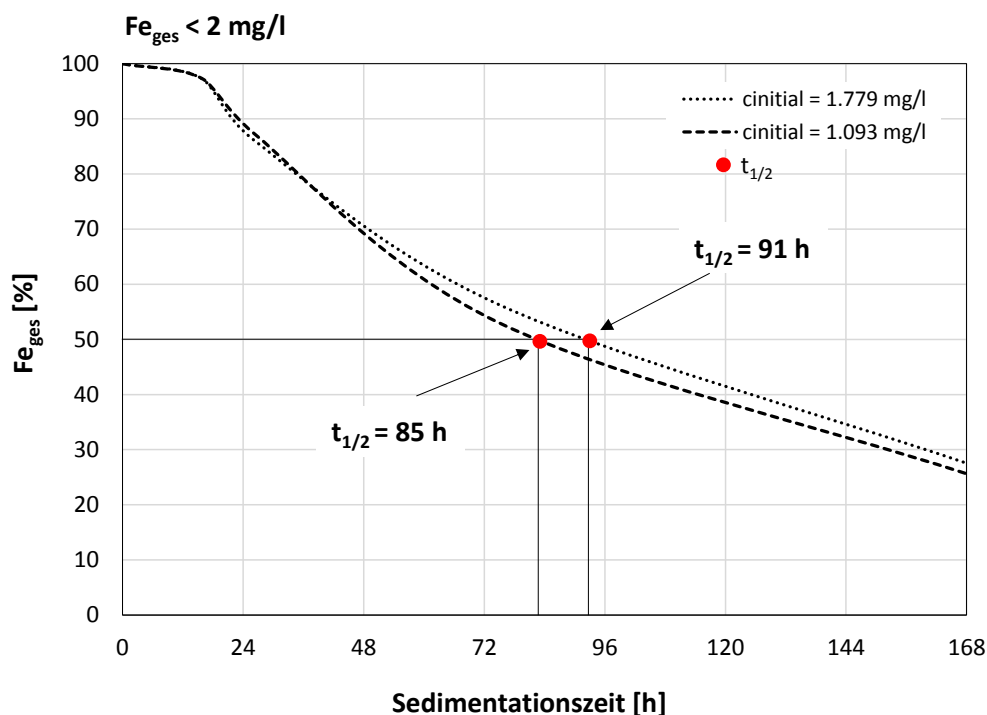
Tab. 3-4: Abgeleitete Sedimentationsgeschwindigkeiten in einem definierten Konzentrationsbereich

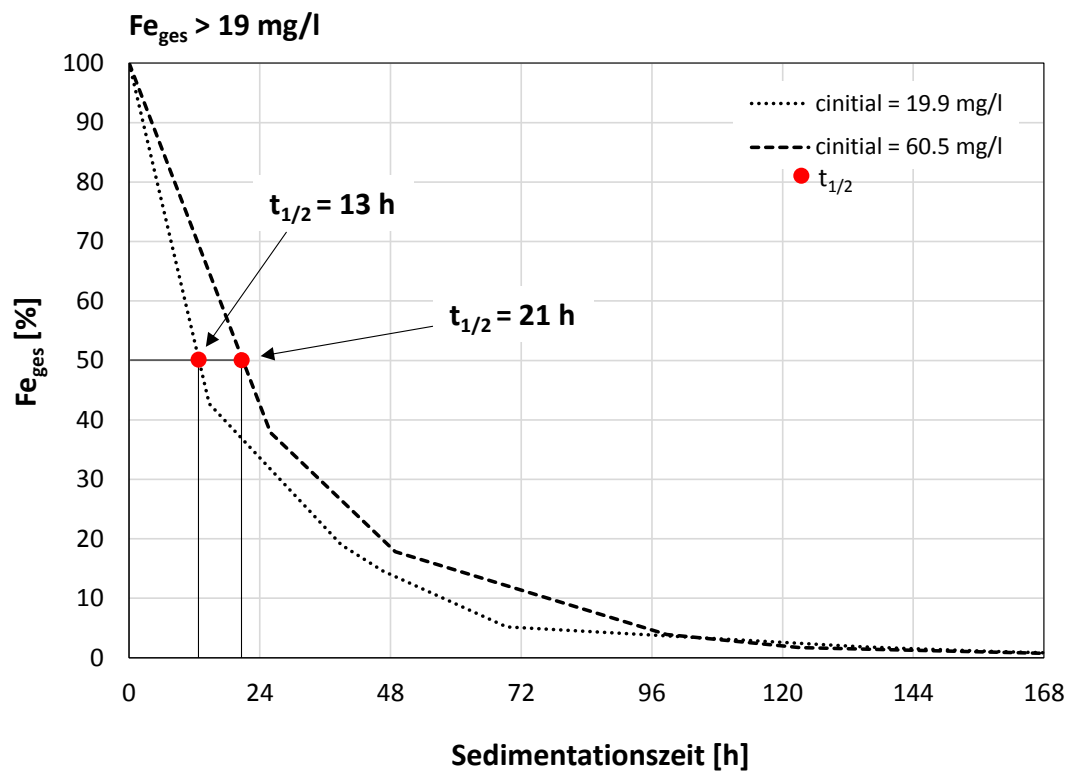
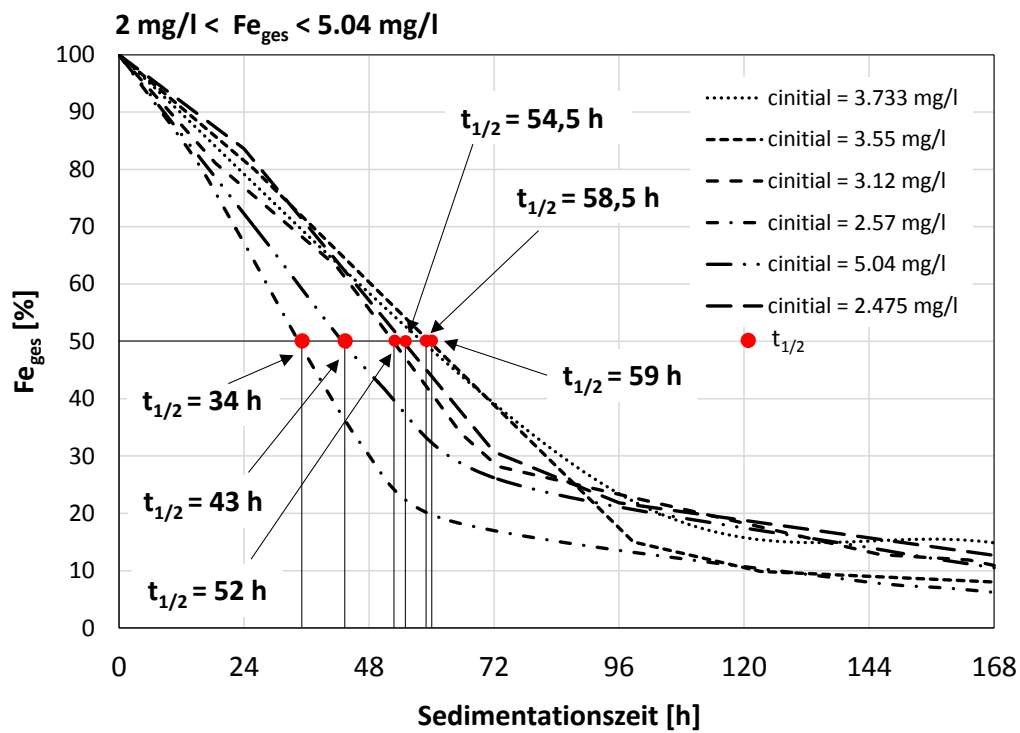
Konzentrationsbereich	v_{Sed} [cm/h]
$\text{Fe}_{\text{ges}} < 2 \text{ mg/l}$	0,4
$2 \text{ mg/l} < \text{Fe}_{\text{ges}} < 5 \text{ mg/l}$	0,6
$\text{Fe}_{\text{ges}} > 20 \text{ mg/l}$	1,8

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung (Teilbericht 1 und 2) wurden in Summe 14 Absetzversuche durchgeführt, aus denen jeweils, bei bekannter Fe_{ges} -Konzentration, eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit abgeleitet werden konnte (Tab. 3-3).

3.2.4 Weiterführende Rechnungen zum Prozessverständnis

Zur Überprüfung der in Tab. 3-4 dargestellten Konzentrationsbereiche wurden die Absetzkurven hinsichtlich ihrer prozentualen Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration ausgewertet. Abb. 3-7 stellt die prozentuale Abreicherung der Fe_{ges} -Konzentration in Abhängigkeit von der Sedimentationszeit dar. Die in Abb. 3-7 dargestellten Kurven zeigen damit, dass die Zeit, die benötigt wird, die initiale Konzentration um die Hälfte zu senken (Parameter $t_{1/2}$, roter Punkt in Abb. 3-7) mit steigender Fe_{ges} -Konzentration abnimmt.





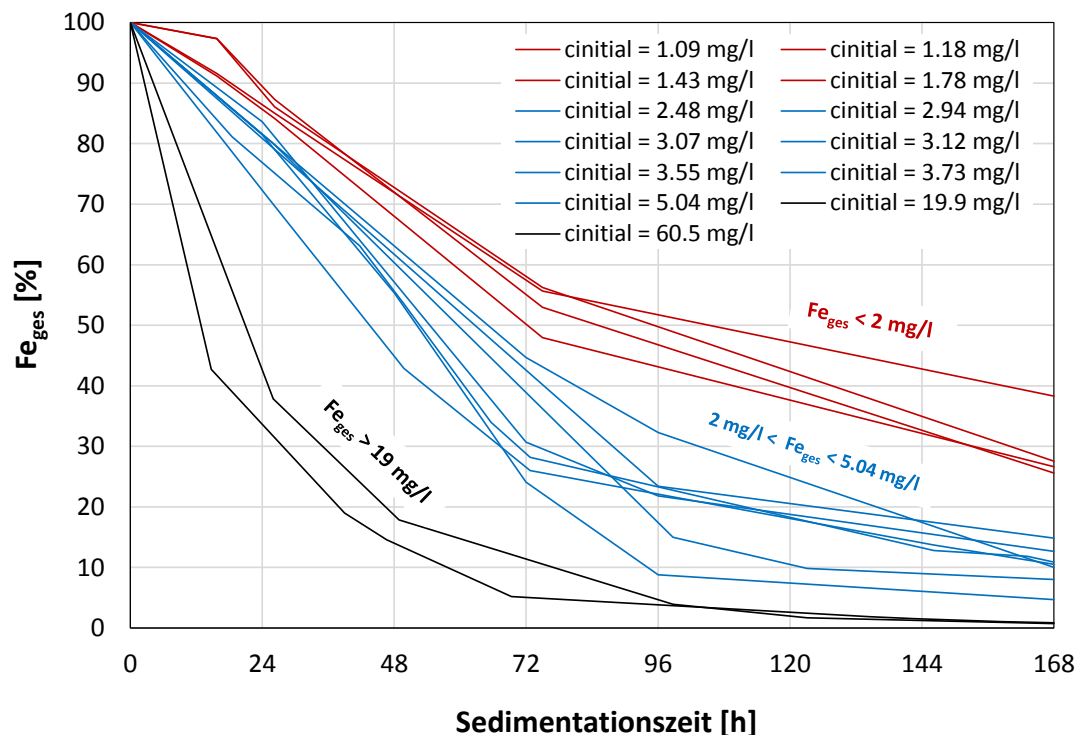


Abb. 3-7: Prozentuale Abreicherung der Fe_{ges} -Konzentration in den durchgeführten Absetzversuchen und Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Fe_{ges} -Konzentration und der abgeleiteten Sedimentationsgeschwindigkeit wird in Abb. 3-8 dargestellt. Die berechneten bzw. abgeleiteten Sedimentationsgeschwindigkeiten können dann in einem Gültigkeitsbereich von

$$1,0 \text{ mg/l} < Fe_{ges} < 60,5 \text{ mg/l}$$

durch eine Exponentialfunktion der Form (Gl. 2)

$$v_{sed} = a \cdot b - e^{-(c \cdot Fe_{ges})} \quad \text{Gl. 2}$$

wiedergegeben werden.

In Gl. 2 beschreibt v_{sed} die Sedimentationsgeschwindigkeit in cm/h und Fe_{ges} die Eisen-gesamt-Konzentration in mg/l. Die Konstanten a , b und c sind Anpassungsparameter, welche durch ein „Curve-Fitting“ rechnerisch bestimmt worden sind.

Werden in Gl. 2 folgende Werte angesetzt

$$a = 1,78 \quad | \quad b = 1,04 \quad | \quad c = 0,10$$

können die abgeleiteten Sedimentationsgeschwindigkeiten gut in einer Gleichung zusammengefasst werden. Den Zusammenhang zwischen den Fe_{ges} -Konz und den Sedimentationsgeschwindigkeiten zeigt Abb. 3-8.

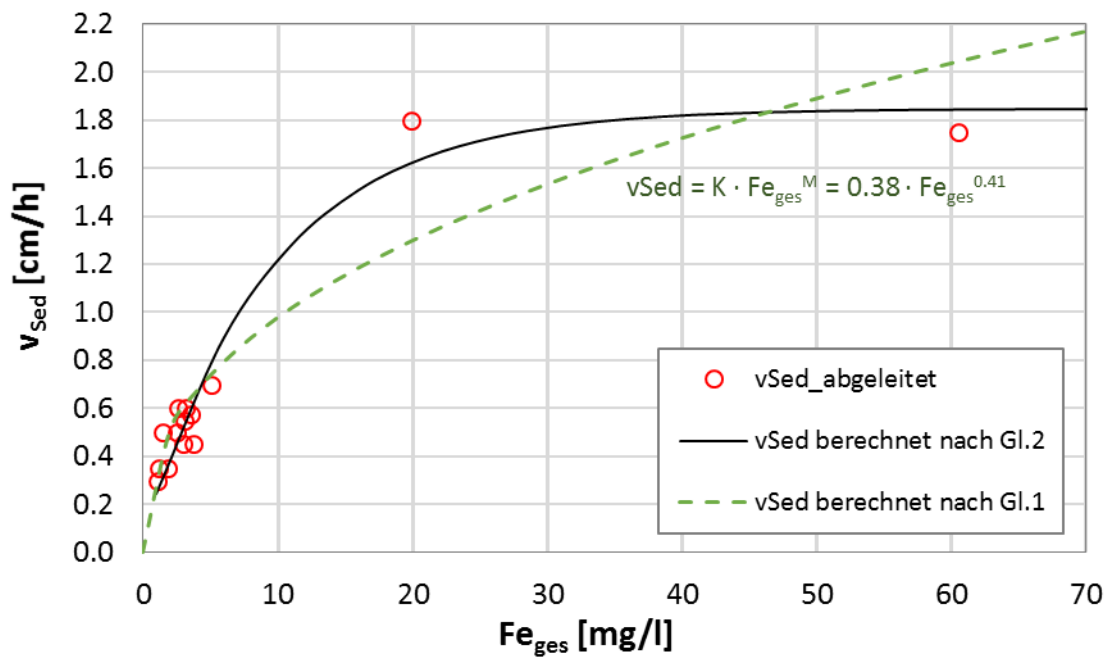


Abb. 3-8: Abhängigkeit zwischen Sedimentationsgeschwindigkeit und Fe_{ges} -Konzentration

4 Übertragung einer Sedimentationsgeschwindigkeit auf das Seemodell des Kahnsdorfer See

Ausgehend von den im Kap. 3 erhaltenen Ergebnissen wird deutlich, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit der EHF hinreichend genau durch Gl. 2 bestimmt werden kann. Die am häufigsten gemessenen Fe_{ges} -Konzentrationen lagen dabei in einem Bereich von 2,0 bis 5,04 mg/l.

Die Fe-Konzentration der Pleiße wird maßgeblich, wie bereits in Teilbericht 1 beschrieben, durch die Durchflussraten beeinflusst. Abb. 4-1 stellt den Jahresgang der Durchflüsse in der Pleiße dar, die im Zeitraum von 01.01.2015 bis 31.08.2017 erfasst wurden. Die Grenzen der Abflussklassen (AK) werden zum Vergleich mit dargestellt.

Wie aus Abb. 4-1 hervorgeht, schwanken die Durchflüsse verstärkt zwischen 3,0 und 8,0 m³/s und befinden sich damit hauptsächlich in AK II und AK III. Nur selten wurden Durchflüsse gemessen, die sich in den Abflussklassen I, IV und V befinden.

Die in Abb. 4-1 zusätzlich dargestellten schwarzen Markierungen kennzeichnen die Tage der durchgeführten Probenahme. Auch diese befinden sich, ausgenommen von PN_I und PN_IV, in den Abflussklassen II und III.

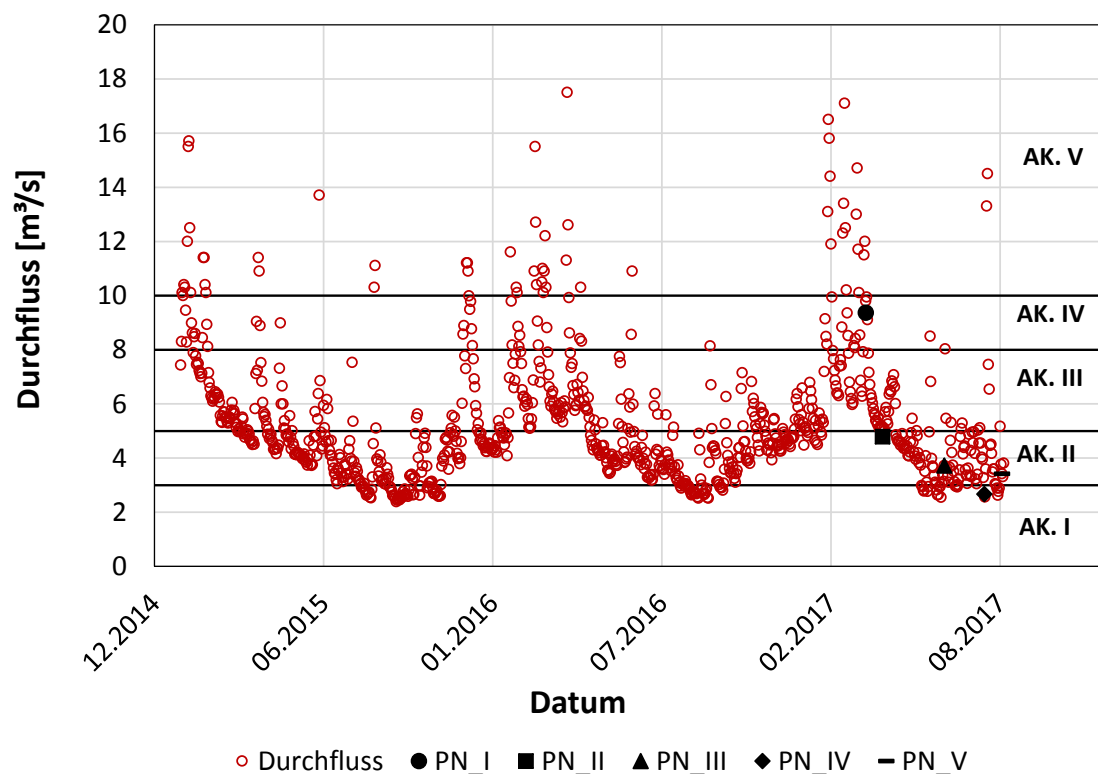


Abb. 4-1: Gemessene Durchflüsse der Pleiße (an der PL9) vom 01.01.2015 bis 31.08.2017 sowie deren Einteilung in die Abflussklassen AK (am Pegel Böhlen)

Die abflussabhängige Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL6 und PL9, die durch das MHM der LMBV erfasst wurde, ist in Abb. 4-2 dargestellt (schwarze und rote Ringe in Abb. 4-2). Die in der gleichen Farbe dargestellten ausgefüllten Markierungen sind die Ergebnisse der gemessenen Fe_{ges} -Konzentration am Tag der Probenahme (PN_I bis PN_V).

Die gemessene Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL6 von 19,9 und 60,5 mg/l sind in Abb. 4-2 nicht dargestellt, da die Ergebnisse nicht repräsentativ sind.

Abb. 4-2 zeigt, dass höhere Volumenströme zu einer Verringerung der Fe_{ges} -Konzentration führen. Die in Abb. 4-2 dargestellten horizontalen Linien zeigen den Konzentrationsbereich von 2,0 bis 5,04 mg/l.

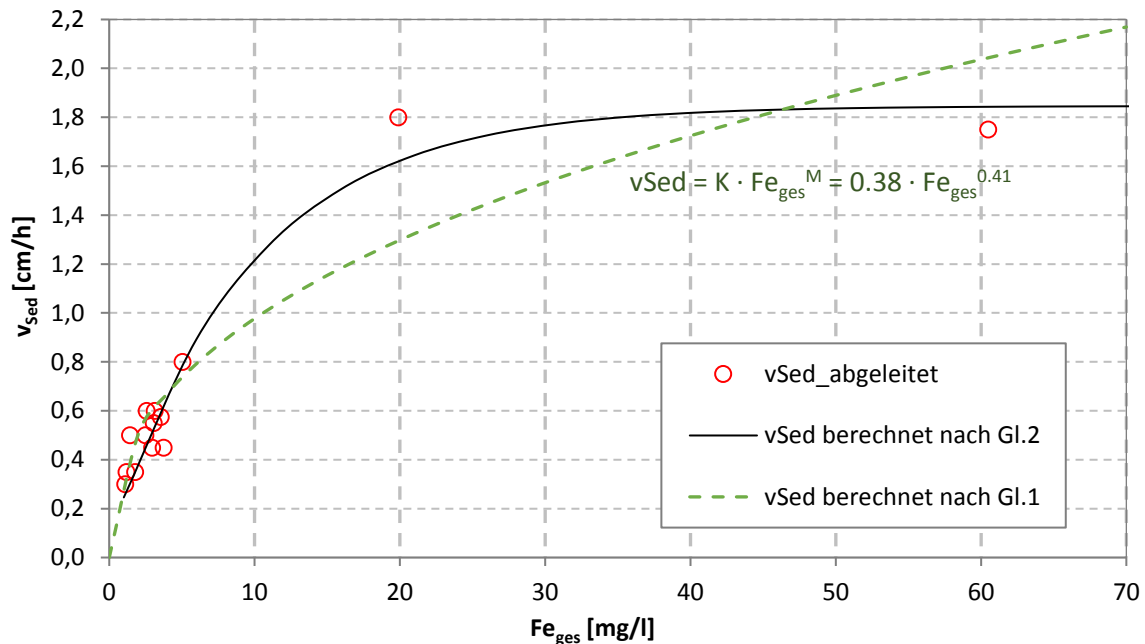


Abb. 4-2: Abhängigkeit der Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL6 (schwarz) und PL9 (rot) von den Durchflussraten der Pleiße (an der PL9)

Für Fe_{ges} -Konzentrationsbereich von 2,0 bis 5,0 mg/l wurde aus den Messdaten mit Hilfe des numerischen Modells eine **mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h** bestimmt.

Für Fe_{ges} -Konzentrationen > 20 mg/l wurde eine Sedimentationsgeschwindigkeit von **1,80 cm/h** abgeleitet.

Die Abflüsse in der Pleiße liegen an ca. 280 Tagen im Jahr in den Abflussklassen II und III. Die bei diesen Abflussklassen gemessenen Eisenkonzentrationen am Trachenauer Wehr (PL9) liegen zwischen 2,0 und 5,0 mg/l. Aus diesem Grund sollte basieren auf den Ergebnissen des vorliegenden Berichtes **für das stationäre Seemodell des Kahnsdorfer See eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h angesetzt werden**. Für die Abflussklasse I (Niedrigwasser bei Eisenkonzentrationen > 5 mg/l) wird dann die Sedimentationsgeschwindigkeit unterschätzt, während sie für die Abflussklassen IV und V (Hochwasser) überschätzt wird.

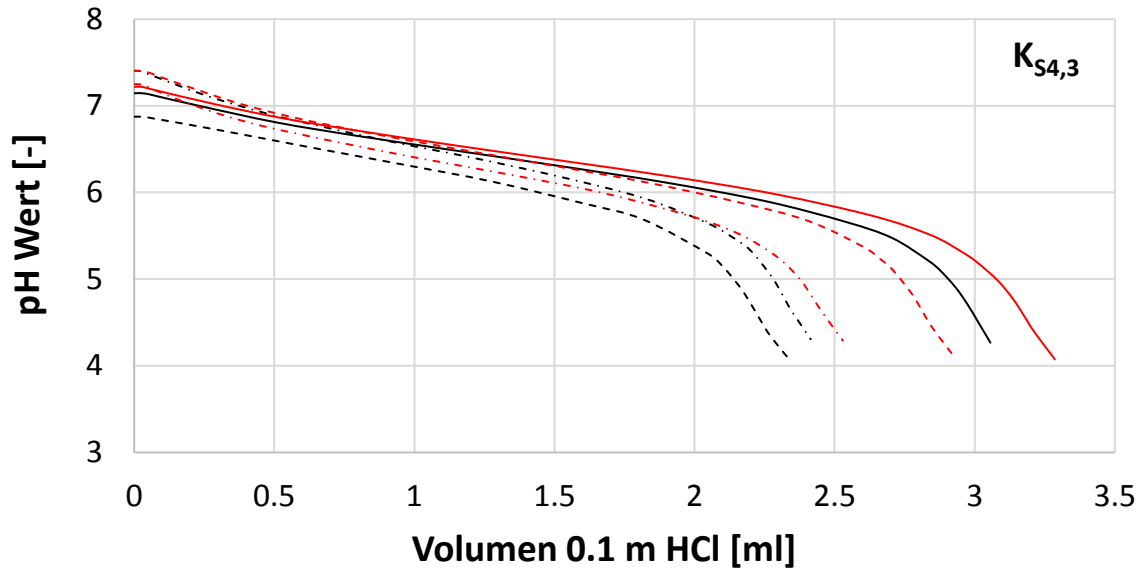
Mit den durchgeführten Absetzversuchen und der modellgestützten Abschätzung einer konzentrationsabhängigen, mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit wurde es möglich, dass Absetzverhalten des Parameters Fe_{ges} in einem Intervall von $1,09 \text{ mg/l} < \text{Fe}_{\text{ges}} < 60,5 \text{ mg/l}$

durch eine Exponentialfunktion hinreichend genau zu beschreiben. Diese Abhängigkeit kann in dem bestehenden Modell des Kahnsdorfer Sees jedoch nicht abgebildet werden, sodass im Seemodell mit einer mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit gearbeitet werden muss.

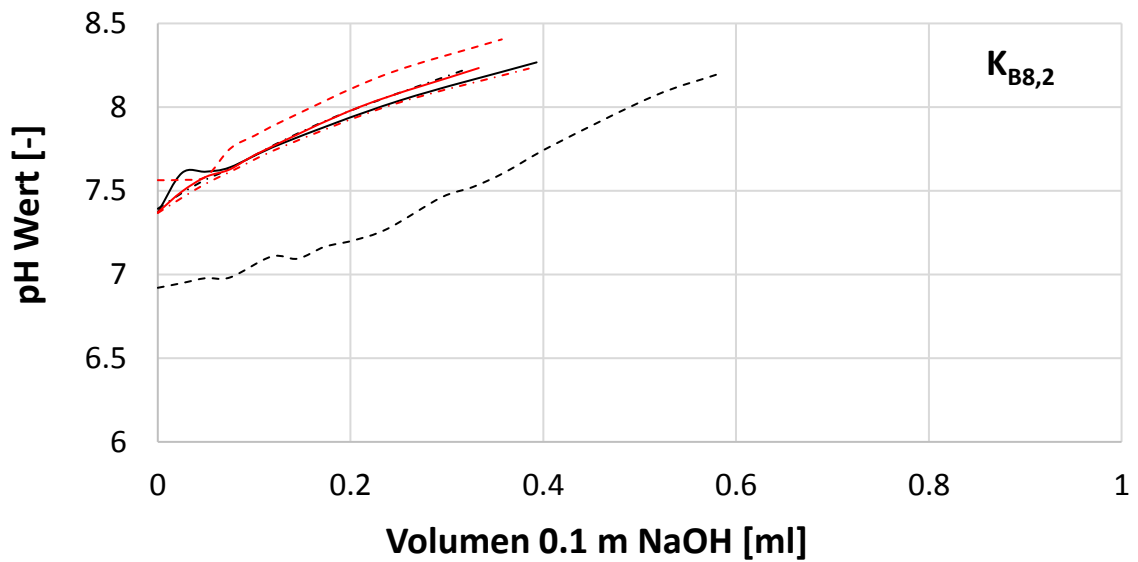
Anhang 1

Titration curves

Gemessene Titrationskurven der Säuren- und Basenkapazitäten



— KS4,3 PL6_PN_III - - - - KS4,3 PL6_PN_IV - · - · - KS4,3 PL6_PN_V
— KS4,3 PL9_PN_III - - - - KS4,3 PL9_PN_IV - · - · - KS4,3 PL9_PN_V



— KB8,2 PL6_PN_III - - - - KB8,2 PL6_PN_IV - · - · - KB8,2 PL6_PN_V
— KB8,2 PL9_PN_III - - - - KB8,2 PL9_PN_IV - · - · - KB8,2 PL9_PN_V

Anhang 2

Randbedingungen der Modellberechnungen

Szenario	PN-Datum /MST	v _{sed} [cm/h]	C _{initial} [mg/l]
#1	22.06.2017 / PL6	0,20	60,5
#2	22.06.2017 / PL6	0,40	
#3	22.06.2017 / PL6	0,60	
#4	22.06.2017 / PL6	0,80	
#5	22.06.2017 / PL6	1,00	
#6	22.06.2017 / PL9	0,20	3,6
#7	22.06.2017 / PL9	0,40	
#8	22.06.2017 / PL9	0,60	
#9	22.06.2017 / PL9	0,80	
#10	22.06.2017 / PL9	1,00	
#11	08.08.2017 / PL6	0,20	19,9
#12	08.08.2017 / PL6	0,40	
#13	08.08.2017 / PL6	0,60	
#14	08.08.2017 / PL6	0,80	
#15	08.08.2017 / PL6	1,00	
#16	08.08.2017 / PL9	0,20	2,57
#17	08.08.2017 / PL9	0,40	
#18	08.08.2017 / PL9	0,60	
#19	08.08.2017 / PL9	0,80	
#20	08.08.2017 / PL9	1,00	
#21	29.08.2017 / PL6	0,20	5,04
#22	29.08.2017 / PL6	0,40	
#23	29.08.2017 / PL6	0,60	
#24	29.08.2017 / PL6	0,80	
#25	29.08.2017 / PL6	1,00	
#26	29.08.2017 / PL9	0,20	3,12
#27	29.08.2017 / PL9	0,40	
#28	29.08.2017 / PL9	0,60	
#29	29.08.2017 / PL9	0,80	
#30	29.08.2017 / PL9	1,00	
#30	22.06.2017 / PL6	1,20	60,5
#31	22.06.2017 / PL6	1,40	
#32	22.06.2017 / PL6	1,60	
#33	22.06.2017 / PL6	1,80	
#34	08.08.2017 / PL6	1,20	19,9
#35	08.08.2017 / PL6	1,40	
#36	08.08.2017 / PL6	1,60	
#37	08.08.2017 / PL6	1,80	

PL6 zum Zeitpunkt der Probenahme

PN_I

$Q = 9,79 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 1,78 \text{ mg/l}$



PN_II

$Q = 5,15 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 3,73 \text{ mg/l}$



PN_III

$Q = 3,72 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 60,5 \text{ mg/l}$



PN_IV

$Q = 2,67 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 19,9 \text{ mg/l}$



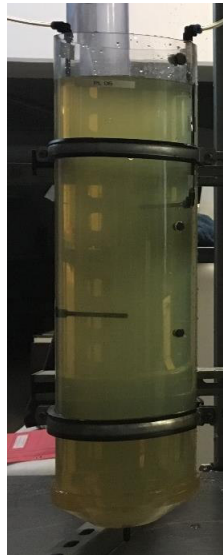
PN_V

$Q = 3,42 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 5,04 \text{ mg/l}$



PL6 vor Versuchsbeginn



PL9 zum Zeitpunkt der Probenahme

PN_I

$Q = 9,79 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 1,09 \text{ mg/l}$



PN_II

$Q = 5,15 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 2,47 \text{ mg/l}$



PN_III

$Q = 3,72 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 3,55 \text{ mg/l}$



PN_IV

$Q = 2,67 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 2,57 \text{ mg/l}$



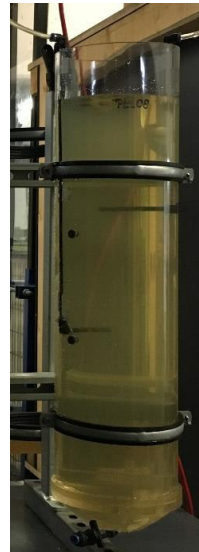
PN_V

$Q = 3,42 \text{ m}^3/\text{s}$

$\text{Fe}_{\text{ges}} = 3,12 \text{ mg/l}$

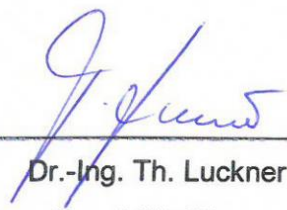


PL9 vor Versuchsbeginn

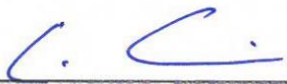


Teilbericht 1

Vorhaben	Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See
Auftraggeber	iKD Ingenieur-Consult GmbH Zur Wetterwarte 50, Haus 337/G 01109 Dresden
Verfasser	GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH Dresden Meraner Straße 10 01217 Dresden - Dr.-Ing. U. Uhlig - Dr.-Ing. Ch. Koch - M. Sc. M. Hering - M. Sc. M. Blumstock
Datum	13.06.2017, Überarbeitung 21.08.2017



Dr.-Ing. Th. Luckner
Geschäftsführer



Dr.-Ing. U. Uhlig
Geschäftsführer

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Anhänge	3
Unterlagen / Literatur	4
Abkürzungen.....	5
Unterlagen / Literatur	3
Abkürzungen.....	4
1 Veranlassung und Aufgabenstellung.....	5
2 Probenahme und Analytik.....	5
2.1 Grundsätzliches	5
2.2 Probenahmepunkte PL6 – PL9	6
2.3 Analytik zum Zeitpunkt der Probenahme	9
2.4 Vergleich der Vor-Ort-Parameter entlang der Fließstrecke	10
3 Durchführung der Absetzversuche	15
4 Grundlagen	16
4.1 Wasserbeschaffenheit des Kahnsdorfer Sees	16
4.2 Wasserbeschaffenheit der Pleiße und erwartbare Fe-Frachten	18
4.2.1 Wasserbeschaffenheit der Pleiße	18
4.2.2 Erwartbare Eisenfrachten	26
5 Ergebnisse der Absetzversuche und Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten	28
5.1 Ergebnisse der Absetzversuche	28
5.2 Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten.....	30
6 Schlussfolgerung und Empfehlungen	36

Unterlagen / Literatur

Folgende Unterlagen wurden für die Bearbeitung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und für die Bearbeitung genutzt:

- [U1] EINSTEIN, H. A.; KRONE, R. B. (1962). Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water. Journal of Geophysical Research 67. 1451-1461
- [U2] JOHANSEN, C. (1998). Dynamics Of Cohesive Sediments, Aalborg University Denmark, Series Paper (16)
- [U3] LFULG (2014). Fließgewässerorganismen und Eisen Schriftenreihe. Heft 35/2014
- [U4] METHA, A. J. (1986). Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Springer Verlag, 290-325
- [U5] SGL (2014). Fließgewässermonitoring Pleiße 2014, Jahresbericht Wasseruntersuchungen, Auswertung der Wasseruntersuchungen bei Abflussklasse 2, Abflussklasse 3, Abflussklasse 4

Abkürzungen

c	Masse-Konzentration	[mg/l]
EHF	Eisenhydroxid-Flocken	
el. LF	elektrische Leitfähigkeit	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Fe _{gel}	Eisen-(gelöst)-Konzentration	[mg/l]
Fe _{ges}	Eisen-(gesamt)-Konzentration	[mg/l]
K	Empirische Konstante zur Berechnung von ws	[$\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s})$]
KB	Basenkapazität	[mmol/l]
KS	Säurekapazität	[mmol/l]
m, β	Exponent zur Berechnung von ws	[-]
PL6 - PL9	Probenahmepunkte 6 bis 9 in der Pleiße	
PN	Probenahme	[mg/l]
TC	Gesamter Kohlenstoff (total carbon)	[mg/l]
TIC	Gesamter anorganischer Kohlenstoff (total inorganic carbon)	[mg/l]
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon)	[mg/l]
ws	Sinkgeschwindigkeit im Schwerkraftfeld	[m/s]
WRE	Wasserrechtliche Erlaubnis	
MOHID	Modelo Hidrodinâmico (Hydrodynamisches Modell in Portugiesisch)	

1 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

Infolge der Exfiltration von sauren, eisen- und sulfatbelasteten Grundwässern aus der Kippe Witznitz und der Hochhalde Neukieritzsch formiert sich ab der Wyhramündung die „Braune Pleiße“, die mit den Eisenhydroxidflocken (EHF) den Flusslauf stromabwärts stark belastet.

Um die Braunfärbung zu mindern, ist die Abscheidung, d. h. die Sedimentation der EHF notwendig. Daher wurde vorgeschlagen, die Pleiße durch den Kahnsdorfer See zu leiten und diesen als Sedimentationsfalle zu nutzen. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten und hohe Aufenthaltszeiten lassen hier eine relativ hohe Abscheidungsrate erwarten.

Die Flockulation wird wesentlich durch die Wasserbeschaffenheit (pH-Wert, Temperatur, Eisen-Konzentration, Oxidationsgrad des Eisens) bestimmt, während die Sedimentationsgeschwindigkeit maßgebend von der Flockengröße bestimmt wird.

Durch den Jahresgang der Wasserbeschaffenheit des Vorfluters, die schwankenden Durchflüsse sowie dem beabsichtigten Mischprozess im Kahnsdorfer See kann das Absetzverhalten variieren.

Vor diesem Hintergrund wurden durch die GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH Absetzversuche zur Ermittlung der Sedimentationsgeschwindigkeit der Eisenhydroxidflocken (EHF) quantitativ durchgeführt.

2 **Probenahme und Analytik**

2.1 **Grundsätzliches**

Die Untersuchung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxidflocken erfolgte mit den an vier ausgewählten Entnahmepunkten gewonnenen Wasserproben, die den Gewässerabschnitt der Pleiße erfassen, welcher über den Bereich der Kippe Kahnsdorf führt. In diesem Bereich ist der Grundwasseranstrom stark Fe-haltig und prägt die Wasserbeschaffenheit der Pleiße bis zum Trachenauer Wehr.

Abb. 1 zeigt die Lage der vier Entnahmestellen PL6 – PL9, mit den dazugehörigen Koordinaten. Die Messstellen entsprechen den LMBV-Messstellen aus dem Fließgewässermonitoring und zeigen Änderungen der Wasserbeschaffenheit nach dem Haupteintrag (PL6) bis zum Trachenauer Wehr (PL9) auf.



Abb. 1: Probenahmepunkte PL6 bis PL9 an der Pleiße

Die Entnahme der Proben für die Absetzversuche erfolgte am 21.03.2017 und am 10.04.2017. Aufgrund der geringen Fe-Konzentration, die mit der Analyse der Proben vom 21.03.2017 nachgewiesen wurde (Fe_{ges} von 1,2 bis 1,7 mg/L), erfolgte eine Wiederholung der Probenahme am 10.04.2017 sowie der Absetzversuche. Am 10.04.2017 betrug die Fe_{ges} -Konzentration 2,5 bis 3,7 mg/L.

Ursprünglich wurde mit höheren Konzentrationen im Bereich von 5-10 mg/L an den MST PL6 bis PL9 gerechnet. Die Annahme bestätigte sich nicht, weshalb die ursprünglich geplante Mischung des Flusswassers mit dem neutralisierten und Fe-freien Wasser des Kahnsdorfer Sees nicht umgesetzt wurde.

Generell ist die Fe-Konzentration der Pleiße stark vom Abfluss abhängig. Dieser betrug an den Probenahmetagen 5 m³/s (21.03.2017) bzw. 10 m³/s (10.04.2017).

2.2 Probenahmepunkte PL6 – PL9

Die Entnahme von Wasser aus der Pleiße erfolgte an den Punkten PL6 bis PL9. Die Abb. 2 bis Abb. 5 zeigen die Probenahmepunkte sowie die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten.



Abb. 2: Probenahmepunkt PL6



Abb. 3: Probenahmepunkt PL7

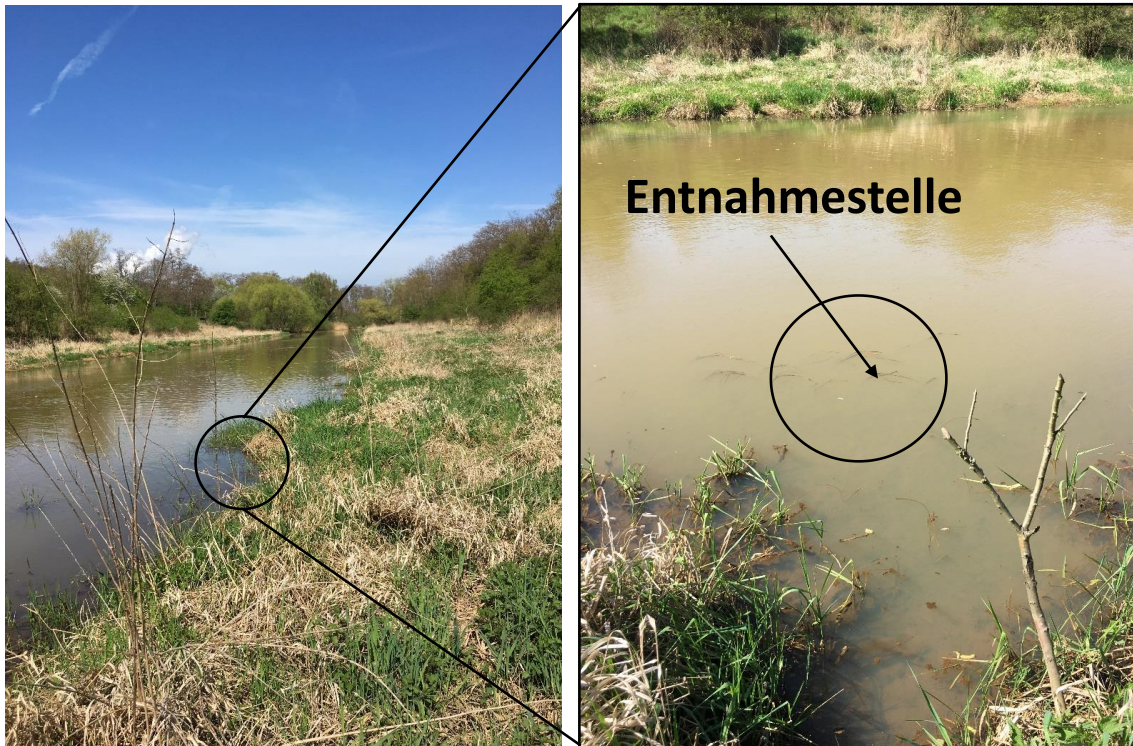


Abb. 4: Probenahmepunkt PL8



Abb. 5: Probenahmepunkt PL9

2.3 Analytik zum Zeitpunkt der Probenahme

Die Messung der vor-Ort-Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, und Trübung erfolgte an jeder Entnahmestelle (PL6 bis PL9) mit einer Multiparametersonde, welche am Tag der Probenahme kalibriert wurde.

Die Sauerstoffsättigung bzw. die Sauerstoffkonzentration konnte aufgrund eines Defektes der Multiparametersonde am 10.04.2017 nicht vor-Ort gemessen werden.

Die Messung der Parameter Fe^{2+} , Fe_{gel} und Fe_{ges} erfolgte im akkreditierten Labor der GFI GmbH Dresden. Die vor Ort entnommenen eisenhaltigen Wasserproben der Pleiße wurden vor dem Transport DIN-gerecht konserviert (Abb. 6).



Abb. 6: Vor-Ort-Probenkonservierung

Für den Parameter Fe^{2+} wurde vorab ein Fe^{2+} -Schnelltest durchgeführt. Anhand der Färbung des Teststäbchens konnte die Fe^{2+} -Konzentration der Wasserprobe abgeschätzt und die notwendige Verdünnung der Probe für die Analyse bestimmt werden (Abb. 7).

Anschließend wurden 2,5 ml einer Ammoniumacetat-Lösung vorgelegt, die Wasserprobe durch einen $0,45 \mu\text{m}$ Filter filtriert sowie durch Zugabe eines Komplexbildners stabilisiert, um die Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+} zu unterbinden.

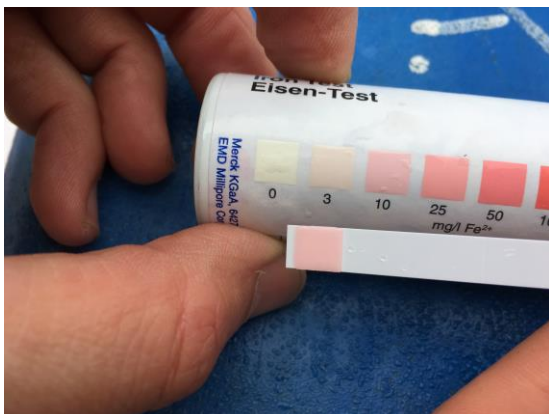


Abb. 7: Fe^{2+} -Schnelltest (deutliche Färbung des Teststäbchens)

Die Ermittlung der Parameter $K_{S4,3}$, $K_{B8,2}$, abfiltrierbare Stoffe sowie TC, TIC und TOC erfolgte ebenfalls im Labor. Vor Ort wurden die Wasserproben luftdicht und blasenfrei in Glasflaschen überführt (Abb. 6).

Tab. 1: Übersicht der Parametererfassung zum Zeitpunkt der Probenahme

vor-Ort-Parameter
pH, el. LF, Temp., Trübung
Analytik
Fe^{2+} , Fe_{ges} , Fe_{gel}
$K_{S4,3}$, $K_{B8,2}$
abfiltrierbare Stoffe (AFS)
TIC, TOC, TC

2.4 Vergleich der Vor-Ort-Parameter entlang der Fließstrecke

Abb. 8 zeigt den Verlauf vor-Ort-Parameter zum Zeitpunkt der Probenahme (gestrichelte Linie) vom 21.03.2017 und 10.04.2017 sowie die Ergebnisse der Messung vor Versuchsbeginn (durchgezogene Linie) für die Entnahmestellen PL6 bis PL9.

Für die PN vom 21.03.2017 unterliegt der pH-Wert im untersuchten Bereich der Fließstrecke nur geringen Schwankungen. Die gemessenen pH-Werte vor-Ort, der Pegel PL6 bis PL9, lagen zwischen 6,91 und 7,23. Die ermittelten pH-Werte direkt vor Versuchsbeginn zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Es konnte jedoch eine Verringerung des pH-Wertes an den Pegel während des Transports um ca. 0,5 pH-Einheiten beobachtet werden. Die Lösung von atmosphärischem CO_2 in die wässrige Phase sowie die Fällung von Eisenhydroxid ($Fe(OH)_3$) könnten hierfür die Ursache sein.

Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten zeigen einen ähnlichen Verlauf wie der pH-Wert. Zwischen der Probenahme vor-Ort und der Messung vor Versuchsbeginn konnte an allen Messstellen (PL6 bis PL9) eine Verringerung der Leitfähigkeit um ca. 70 $\mu S/cm$ festgestellt werden. Innerhalb der untersuchten Fließstrecke ändert sich die Leitfähigkeit im Mittel um 43 $\mu S/cm$. Die Änderung der untersuchten Leitfähigkeit beträgt damit weniger als 10 %.

Die Beschaffenheitsparameter Trübung, Temperatur und Sauerstoffsättigung (rote, grüne und braune Kurve in Abb. 8) sind im direkten Vergleich zwischen der vor-Ort-Messung und der Messung vor Versuchsbeginn durch einen ähnlichen Verlauf gekennzeichnet.

Entlang der Fließstrecke kommt es zu einer Abnahme von Schwebstoffen, was vor-Ort beobachtet und durch den Verlauf der Trübungsmessung bestätigt wurde. Einzige Ausnahme bildet der gemessene Trübungswert am Pegel PL6 während der vor-Ort-Messung am 21.03.2017. Der Wert ist geringer als der Trübungswert der abstromig liegenden Messstelle PL7.

Die Beschaffenheitsparameter Temperatur und Sauerstoffsättigung bleiben nahezu unverändert. Dies gilt sowohl für den untersuchten Abschnitt der Fließstrecke (Pegel PL6 bis

PL9) als auch im direkten Vergleich zwischen der Vor-Ort-Messung und der Messung vor Versuchsbeginn.

Die gemessenen Beschaffenheitsparameter der PN vom 10.04.2017 sind im Vergleich zur PN am 21.03.2017 zwischen der Vor-Ort-Messung und der Messung vor Versuchsbeginn durch deutlich stärkere Schwankungen gekennzeichnet.

Die gemessenen pH-Werte vor-Ort lagen zwischen 6,68 und 7,70. Bei der Messung der Beschaffenheitsparameter direkt vor Versuchsbeginn wurden dagegen pH-Werte von 8,0 bis 8,3 gemessen. Als Ursache ist die unterschiedliche Temperatur während der Messung zu vermuten, da die Wasserproben der Pleiße über Nacht in einer Kühlzelle zwischengelagert wurden und die Messung des pH-Wertes unter anderem von der Temperatur beeinflusst wird.

Die gemessenen Leitfähigkeiten zeigen sowohl für die Messung vor Ort als auch vor Versuchsbeginn einen identischen Verlauf. Am Pegel PL6 wurde der geringste Wert der Leitfähigkeit mit 848 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Bis zum ca. 300 m entfernten Pegel PL7 steigt die Leitfähigkeit auf 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ an und ändert sich im weiteren Verlauf nur noch geringfügig.

Der Beschaffenheitsparameter Sauerstoffsättigung konnte am Tag der PN vom 10.04.2017, aufgrund eines Defektes in der Multiparametersonde nicht detektiert werden.

Die Abweichungen der Trübungsergebnisse zwischen der vor-Ort-Messung und der Messung vor Versuchsbeginn sind möglicherweise durch Ablagerungen der Schwebstoffe an der Behälterwand der Wasserproben-Container zurückzuführen.

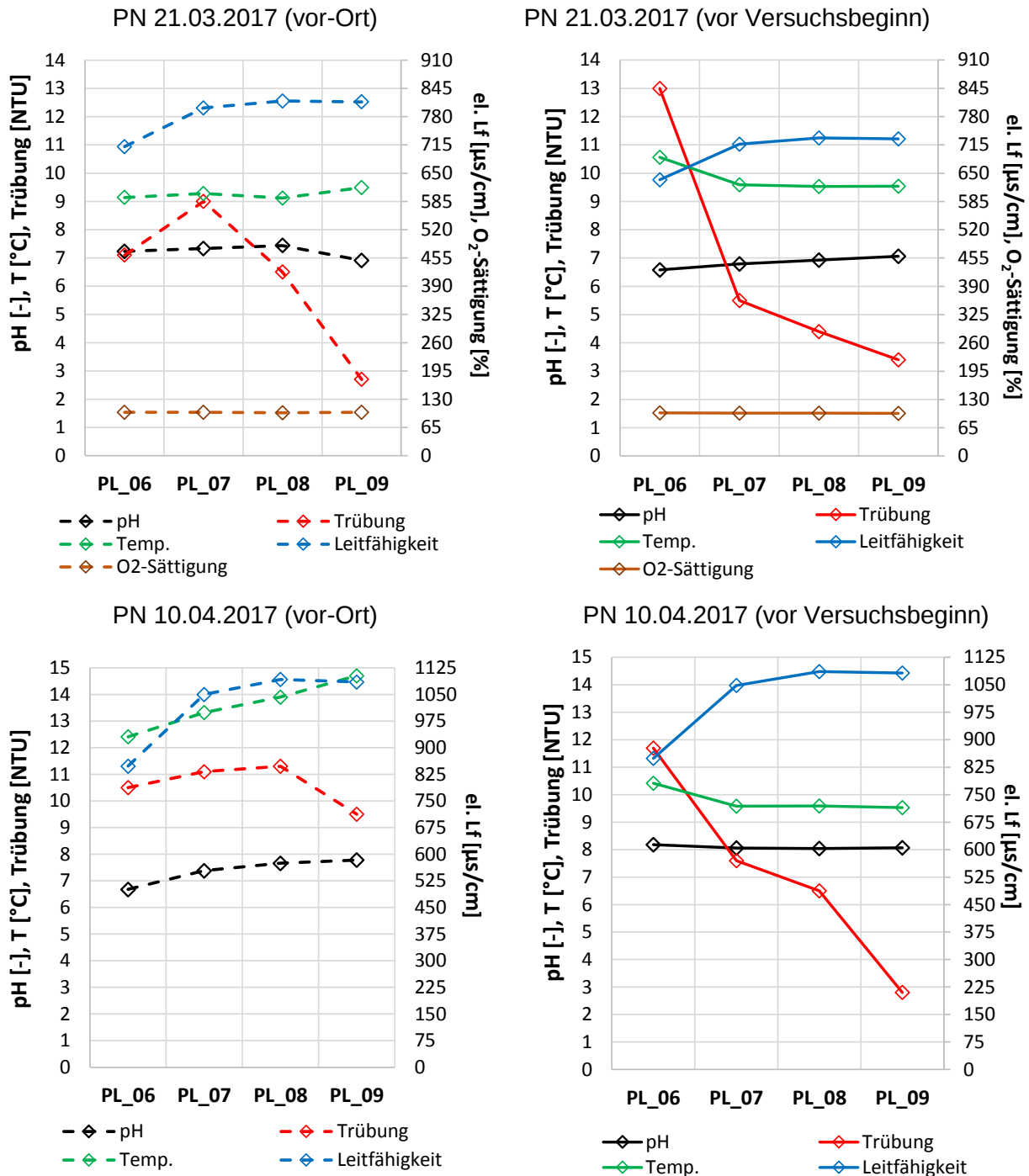


Abb. 8: Vergleich der Messungen zum Zeitpunkt der Probenahme und vor Versuchsbeginn für die Parameter pH-Wert, Temperatur, el. Leitfähigkeit, O₂-Sättigung und Trübung der PN vom 21.03.2017 (oben) und vom 10.04.2017 (unten)

Der Parameter $K_{S4,3}$ charakterisiert die Säurekapazität eines Wassers. Diese unterlag im Bereich der untersuchten Fließstrecke nur geringen Schwankungen (Abb. 9 A). Die gemessene Alkalinität betrug durchschnittlich 3,15 mmol/l.

Die $K_{B8,2}$ -Werte schwankten stärker als bei der ersten PN. Weiterhin sind die Differenzen zwischen dem Vor-Ort-Monitoring und dem vor Versuchsbeginn größer. Der durchschnittliche Wert betrug 0,27 mmol/l (Abb. 9 B).

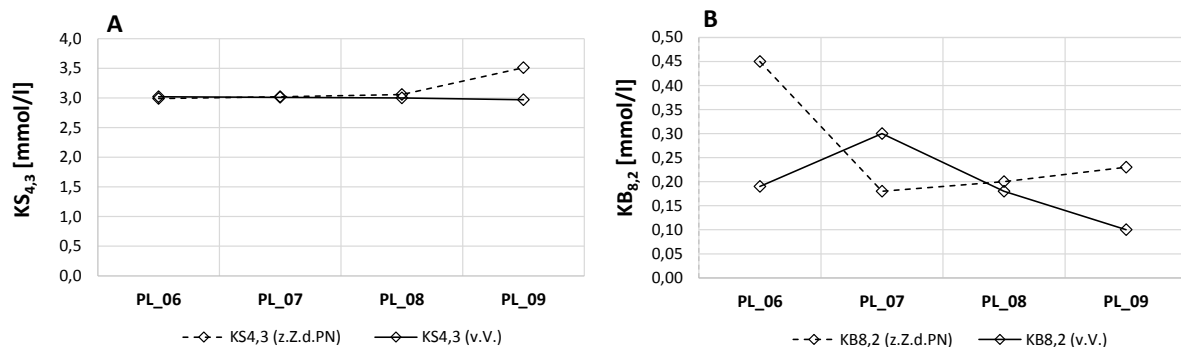


Abb. 9: Änderung der Parameter $K_{S4,3}$ und $K_{B8,2}$ (PN 10.04.2017) zum Zeitpunkt der Probenahme (z.Z.d.PN) und vor Versuchsbeginn (v.V.)

Die Messung des gesamten gelösten anorganischen Kohlenstoffs (TIC) zeigt sowohl für das vor-Ort-Monitoring als auch für das Nullmonitoring vor Versuchsbeginn gleichbleibende Werte. Diese betrugen im Mittel 33,3 mg/l (Abb. 10).

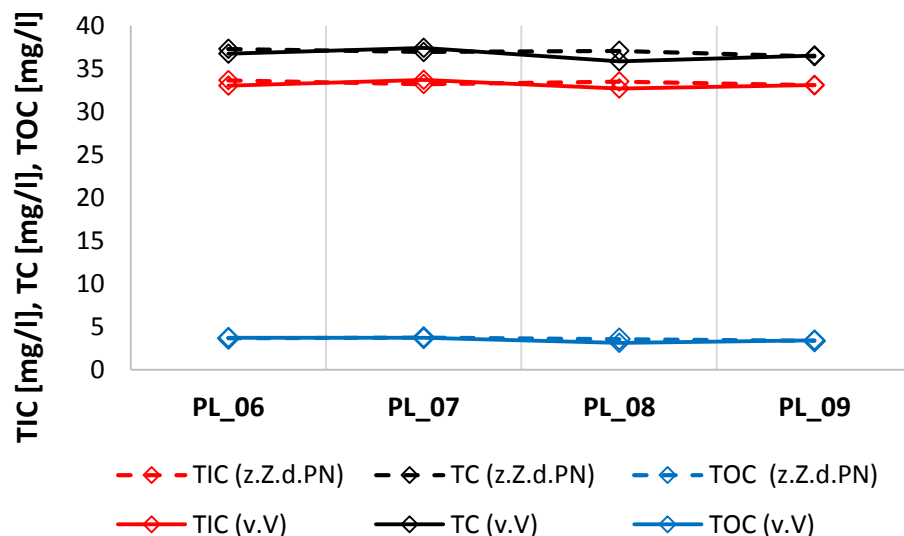


Abb. 10: Änderung der TIC und TOC-Konzentration (PN 10.04.2017) zum Zeitpunkt der Probenahme und vor Versuchsbeginn.

Die Fe_{ges} -Konzentration sank von der MST PL6 bis PL9 von 3,98 mg/l auf 2,49 mg/l (siehe Abb. 11). Gleiches Verhalten zeigten auch die gemessenen Fe_{gel} -Konzentrationen. Diese sanken von 0,76 auf 0,04 mg/l. Die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration ist auf die Verdünnung der Pleiße mit dem Wasser der Grubenwasserreinigungsanlage (GWRA) Neukieritzsch nach PL6 und die Sedimentation von gebildeten EHF innerhalb der untersuchten Fließstrecke zurückzuführen.

Abb. 11 zeigt weiterhin die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration zwischen dem Monitoring zum Zeitpunkt der Probenahme bzw. vor Versuchsbeginn. Die Fe_{gel} -Konzentrationen waren gering und betrug weniger als 1,0 mg/l. Die Abnahme der Fe_{gel} -Konz. ist auf die Bildung von Eisenhydroxiden während des Transportes zurückzuführen.

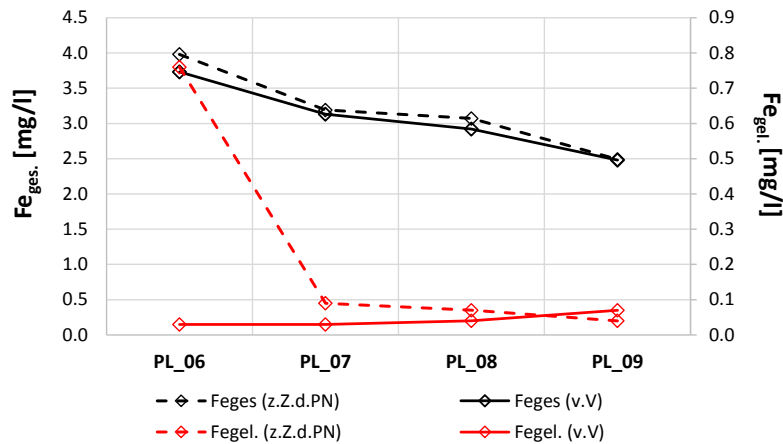


Abb. 11: Änderung der Fe_{gel} - und Fe_{ges} -Konzentration (PN 10.04.2017) zum Zeitpunkt der Probenahme und vor Versuchsbeginn.

Die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) (Abb. 12) zeigen entgegen der Erwartung keine Korrelation zur Fe_{ges} -Konzentration. Generell lagen die Konzentrationen der AFS im Bereich von 7,2 bis 14,2 mg/l.

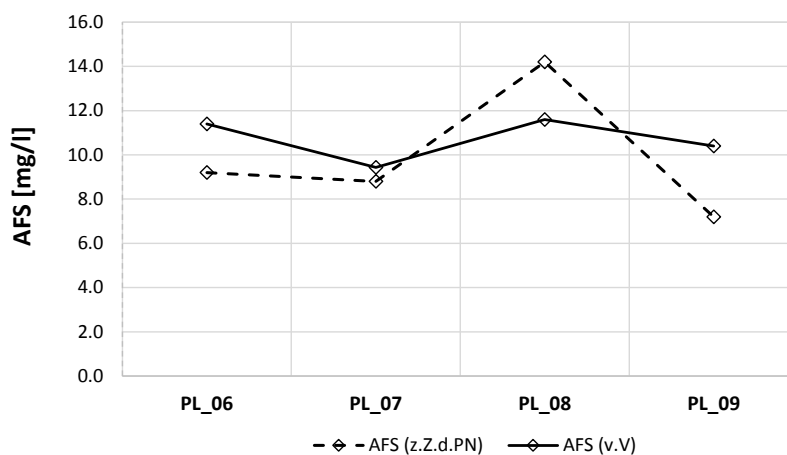


Abb. 12: Änderung des Parameters abfiltrierbare Stoffe (PN 10.04.2017) zum Zeitpunkt der Probenahme und vor Versuchsbeginn.

3 Durchführung der Absetzversuche

Die Durchführung der Absetzversuche wurde in vier Acrylsäulen mit einem Nutzvolumen von 8,8 l durchgeführt. Die Säulen haben eine Höhe von 60 cm und einen Durchmesser von 15 cm. Abb. 13 zeigt den schematischen Versuchsaufbau sowie die Abmessung einer Säule. Die Probenahme während der Absetzversuche erfolgte an den in Abb. 13 dargestellten Entnahmestellen in einer Wassertiefe von 15 und 30 cm.

Während der Versuche erfolgte in definierten Zeitintervallen die Entnahme der Wasserproben. Mittels einer Spritze wurden jeweils 20 ml in ein Glasvial überführt und anschließend in 65%iger HNO_3 stabilisiert. Die Bestimmung der Fe_{ges} -Konzentration erfolgte durch die Atom-Emission-Spektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) nach DIN EN ISO 11885.

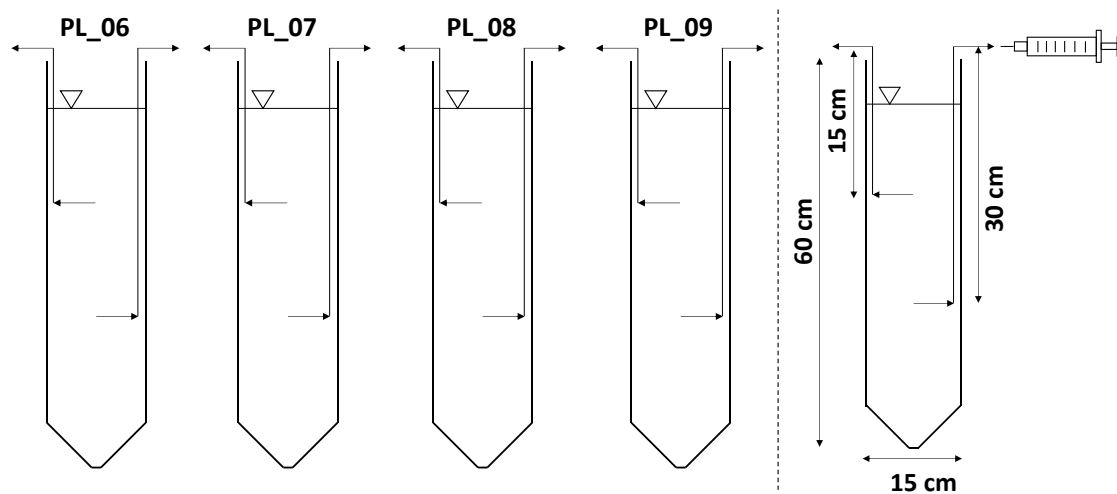


Abb. 13: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus sowie die Abmessung einer Acrylsäule



Abb. 14: Versuchsaufbau

4 Grundlagen

4.1 Wasserbeschaffenheit des Kahnsdorfer Sees

Der Kahnsdorfer See mit einer mittleren Tiefe von 18 m (maximale Tiefe 43,5 m), einer Fläche von 125 ha und einem Volumen von 22,0 Mio. m³ wurde im Zeitraum von 1999 bis 2003 mit Sumpfungswässern aus dem Tgb. Vereinigtes Schleenhain geflutet. Ansonsten unterliegt der See dem Eigenaufgang.

Die Beschaffenheitsentwicklung der Parameter pH-Wert, Acidität $K_{B4,3}$, Fe_{gel} und gelöstem Aluminium seit Beendigung der Fremdwasserzufuhr ist in Abb. 15 dargestellt.

Die gemessenen Beschaffenheitsparameter am Tag der Probenahme vom 21.03.2017 zeigt Tab. 2. Das Messintervall des montanhydrologischen Monitorings der LMBV beträgt 3 Monate. Hierbei wird eine Seewassermessstelle (RWS1) im tiefsten Bereich beprobt.

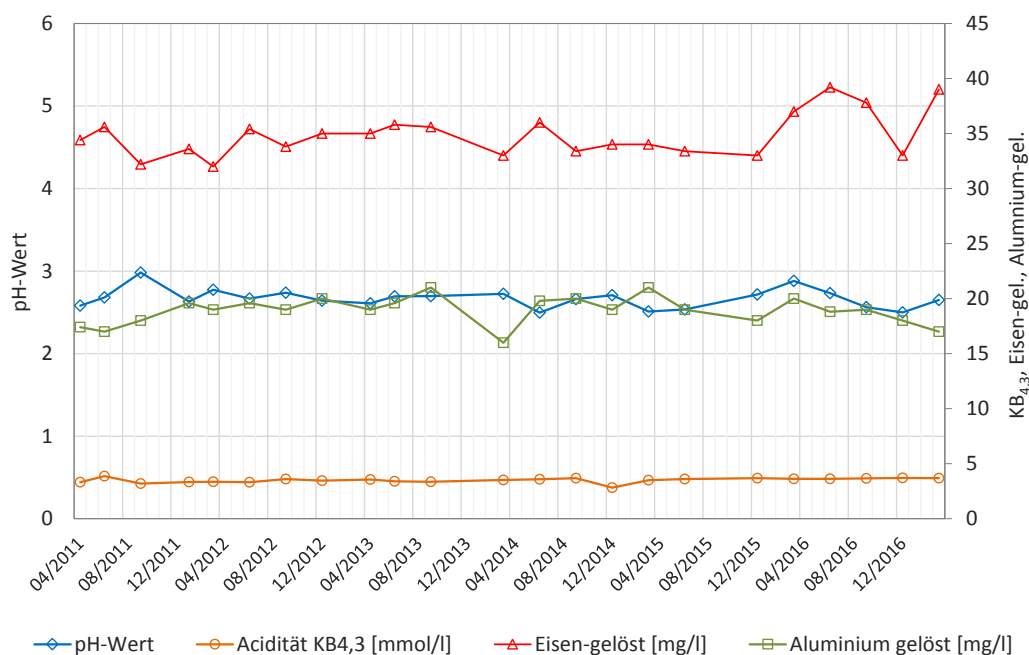


Abb. 15: Entwicklung der Parameter pH-Wert, Acidität $K_{B4,3}$, Fe_{gel} und Aluminium-gel. für den Zeitraum 04/2011 bis 04/2017

Tab. 2: Beschaffenheitsparameter des Kahnsdorfer Sees (Stand 21.03.2017)

Beschaffenheitsparameter	Einheit	Wert
Fe^{2+}	[mg/l]	2,46
Fe_{gel}	[mg/l]	34,6
Fe_{ges}	[mg/l]	34,7
pH	[-]	2,73
el. LF	[μ S/cm]	2912
Trübung	[NTU]	2,7
Temp.	[°C]	7,31
TIC	[mg/l]	1,3
TOC	[mg/l]	1,0

Beschaffenheitsparameter	Einheit	Wert
TC	[mg/l]	2,3
AFS	[mg/l]	15

Die Entwicklung der dargestellten Beschaffenheitsparameter lässt eine gleichbleibende Seewasserbeschaffenheit vermuten. Der pH-Wert schwankte im betrachteten Zeitraum zwischen 2,5 und 2,98 (Mittelwert 2,67). Die Acidität $K_{B4,3}$ lag zwischen 2,82 und 3,87 mmol/l (Mittelwert 3,5 mmol/l). Die Fe_{gel} -Konzentration schwankte zwischen 32,0 und 39,2 mg/l (Mittelwert 34,8 mg/l) und die Aluminium-gelöst-Konzentration zwischen 16 und 21 mg/l (Mittelwert 18,9 mg/l).

Weitere nennenswerte Konzentrationen sind

- Sulfat 1290 – 1662 mg/l (Mittelwert 1462 mg/l)
- Ammonium-N 1,54 mg/l (Mittelwert von 2016)
- Mangan 3,67 mg/l (Mittelwert von 2016).

Ein quasi-stationärer Zustand der Seewasserbeschaffenheit ist noch **nicht erreicht**. Die Parameter Acidität, Fe_{gel} und Sulfat weisen einen steigenden Trend, der pH-Wert einen sinkenden Trend aus. Das heißt, eine geringfügige Versauerung des Seewasserkörpers findet gegenwärtig noch immer statt. Deutlicher wird dieser Anstieg beim Betrachten des LMBV-Flutungsdiagramms in Abb. 16. Hierbei werden ein leichter aber stetiger Anstieg der Acidität ($K_{B4,3}$) und das geringfügige Absinken des pH-Wertes ersichtlich.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der See einen aciditäts- und Fe-reichen GW-Zustrom hat, was bei der Planung der Pleißedurchleitung und Fe-Abscheidung zu beachten sind. Das gilt vor allem für die Phasen der saisonalen Zirkulation des Wasserkörpers.

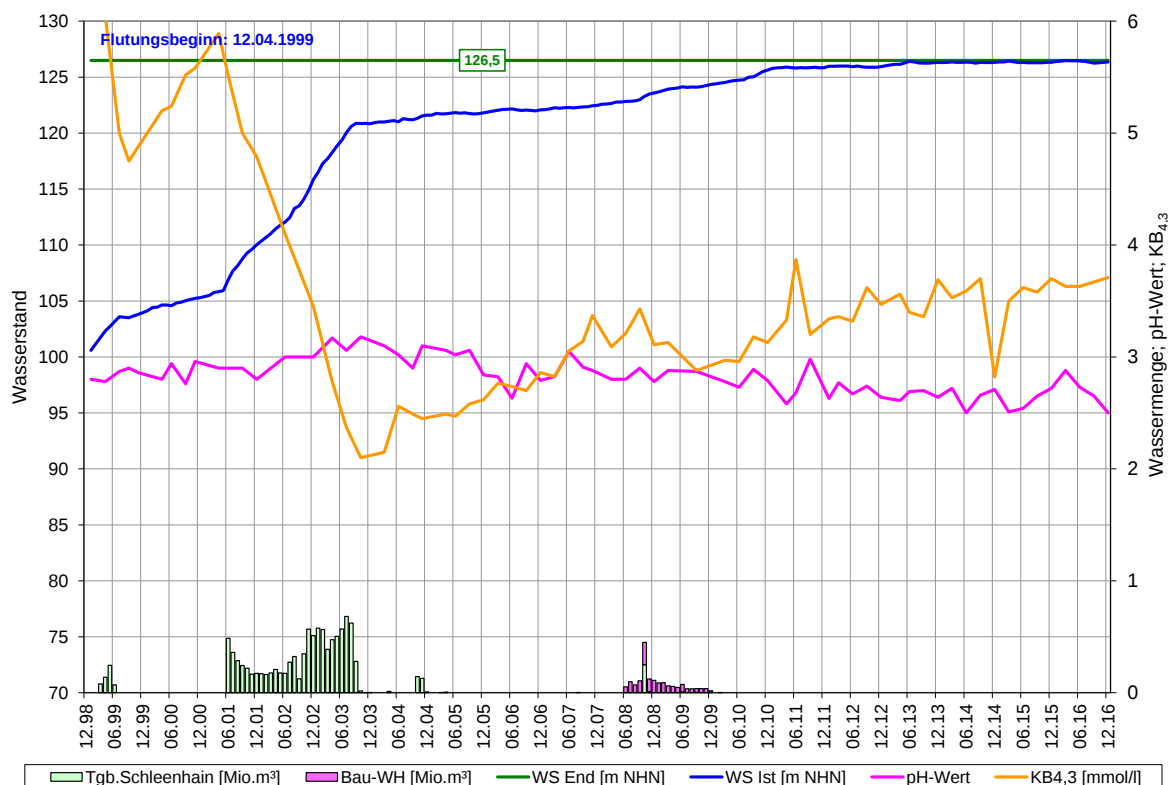


Abb. 16: LMBV-Flutungsdiagramm für den Kahnsdorfer See

4.2 Wasserbeschaffenheit der Pleiße und erwartbare Fe-Frachten

4.2.1 Wasserbeschaffenheit der Pleiße

Die Pleiße fungiert in ihrem künstlichen Gewässerbett bei der Querung der Kippe Witznitz im Bereich der Wyhra-Mündung bis zum Trachenauer Wehr als Vorfluter für das beidseitig exfiltrierende Grundwasser, anteilig aus der Kippe und dem Gewachsenen. In diesem Bereich wird die Beschaffenheit der Pleiße maßgeblich beeinflusst.

Das Kippengrundwasser zeichnet sich durch eine hohe Mineralisierung, insbesondere hohe Eisen- und Sulfatkonzentrationen aus. Das ökologische Potential des stark veränderten Gewässers (HMWB¹) Pleiße-4b (DESN_5666-4b²) wird gem. OGewV bzw. den aktuellen Bewirtschaftungsplänen des LfULG als unbefriedigend bewertet (Note 4). Die hierbei überschrittenen allgemein physikalisch chemischen Parameter (APC-Parameter) sind Nitrit-N, Fe_{ges}, Phosphor gesamt, Sulfat und die max. Jahrestemperatur im Winter. Messwerte zum Parameter Phosphor gesamt liegen nicht vor.

4.2.1.1 pH-Wert

Die für den Zeitraum 11/2014 bis 08/2016 aus dem LMBV-Fließgewässermonitoring vorliegenden Messwerte für den **pH-Wert** am Pegel PL6 (Neukieritzsch) und PL9 (oberhalb Trachenauer Wehr) sind in Abb. 17 dargestellt. Beide Pegel weisen ganzjährig neutrale Verhältnisse um pH 7,6 auf (s. Abb. 17). Eine Versauerung dieses Fließgewässerabschnitts ist nicht zu beobachten. Begünstigend ist dabei die hohe Säurepufferkapazität des Pleiße-wassers (Mittelwert $K_{S4,3,2016} = 2,9 \text{ mmol/l}$).

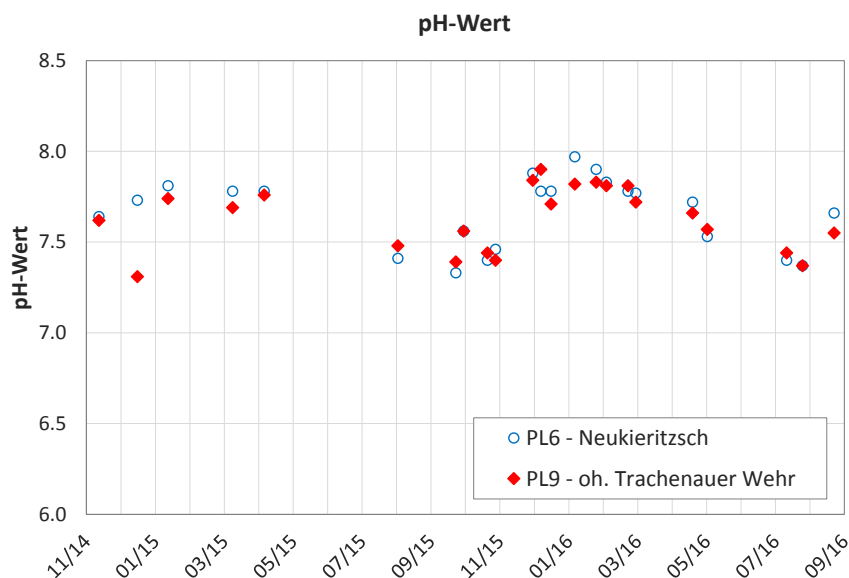


Abb. 17: pH-Wertentwicklung an den Pleiße-MST PL6 und PL9 (oh Trachenauer Wehr)

¹ heavy modified water body

² DESN_5666-4b (OWK-ID)

4.2.1.2 Eisen

Die für den betrachteten Zeitraum vorliegenden Messwerte für Fe_{ges} am Pegel PL6 (Neukieritzsch), nach Querung der Kippe Witznitz und PL9 (oberhalb Trachenauer Wehr) sind in Abb. 18 dargestellt. Die Fe_{ges} -Konzentrationen schwankten demnach am Pegel PL9 im betrachteten Zeitraum zwischen 1,3 mg/l und 8,8 mg/l (Mittelwert 3,77 mg/l). Am Pleiße Pegel PL6 (Neukieritzsch) nach Querung der Kippe Witznitz lagen die Konzentrationen geringfügig höher bei 4,17 mg/l.

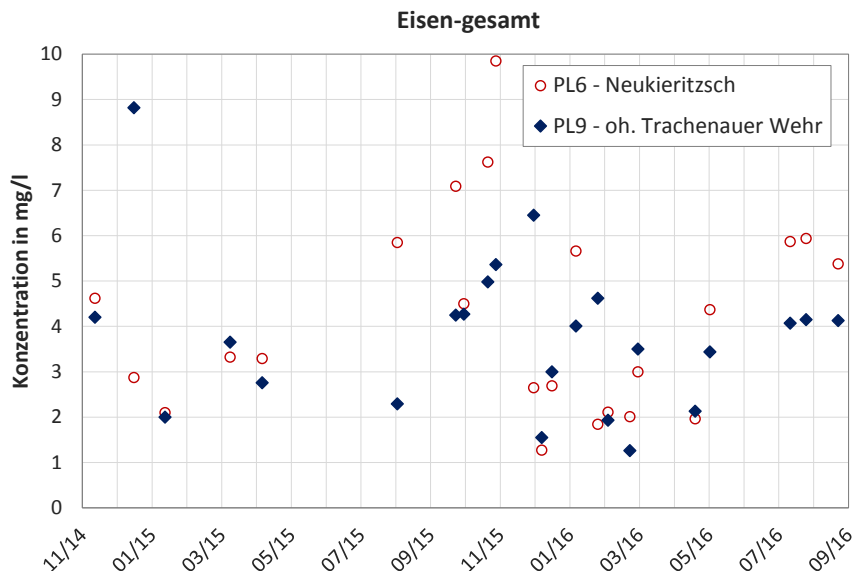


Abb. 18: Fe_{ges} -Konzentrationsentwicklung an der Pleiße-MST PL6 (Neukieritzsch) und PL9 (oh Trachenauer Wehr) im Zeitraum 11/2014 bis 09/2016

Betrachtet man die Konzentrationsentwicklung entlang der Fließstrecke PL6 bis PL9, so ist bei geringen Durchflüssen und höheren Eisenkonzentrationen in der Regel eine Konzentrationsabnahme erkennbar – vgl. Abb. 19.

Bei höheren Abflüssen, die in der Regel auch mit geringeren Fe_{ges} -Konzentrationen einhergehen, bleiben diese auf der Fließstrecke etwa gleich. Bei sehr hohen Abflüssen ($> 10 \text{ m}^3/\text{s}$), die jedoch sehr selten auftreten, konnte zeitweilig eine starke Zunahme der Fe_{ges} -Konzentrationen von PL6 bis PL9 beobachtet werden, die mit dem Abtrag abgelagerter Eisenhydroxidschlämme von der Gerinnesohle begründbar sind.

Mit der Messung vom 26.01.2016 liegt bisher nur eine Erfassung der Fe-Konzentrationen für die Abflussklasse V ($Q > 10 \text{ m}^3/\text{s}$) vor. Der mittlere Durchfluss an diesem Tag lag bei etwa $10,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die abflussabhängige Konzentration am Pegel PL6 und PL9 ist in Abb. 20 dargestellt. Die Grenzen der Abflussklassen (AKI.) sind zum besseren Vergleich in Abb. 20 ebenfalls dargestellt.

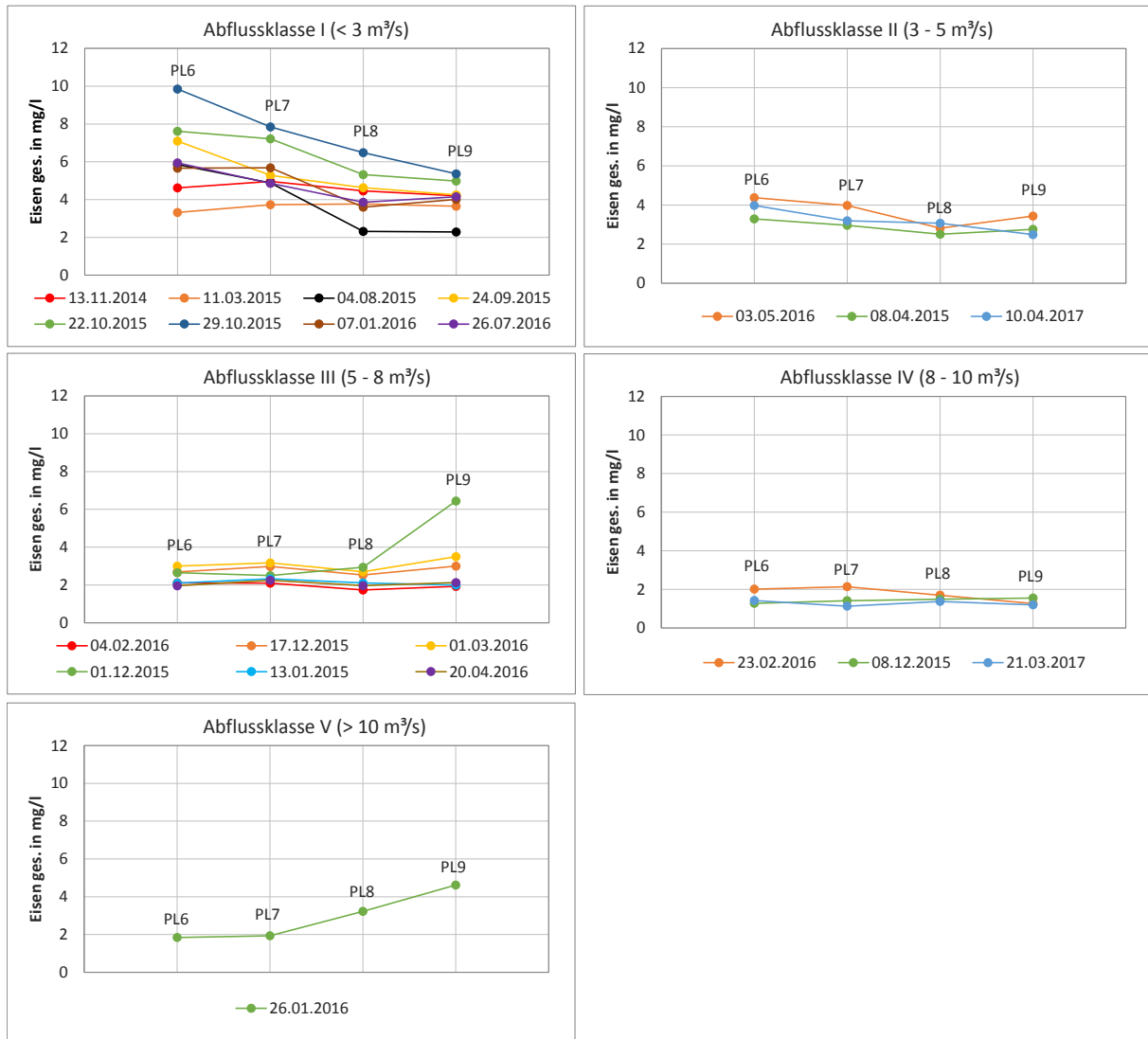


Abb. 19: Entwicklung der Fe_{ges.}-Konzentration auf der Fließstrecke von PL6 bis PL9 für die Abflussklassen I, II, III, IV und V

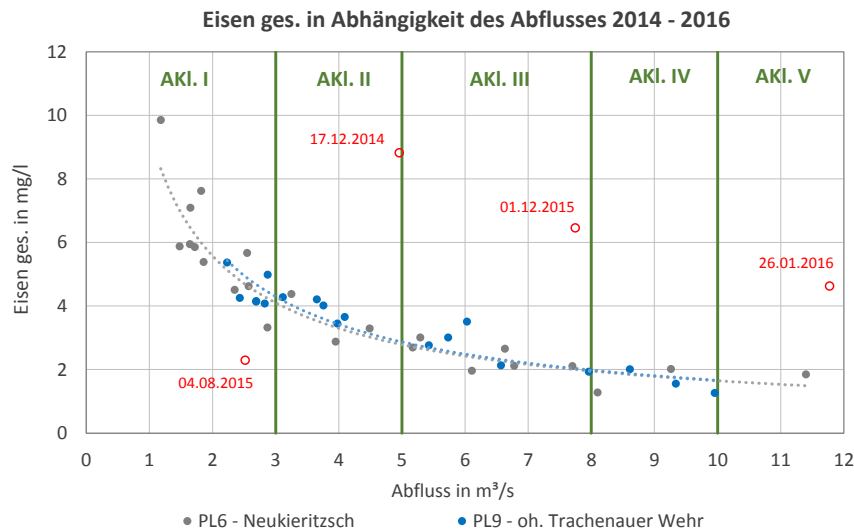


Abb. 20: Abhängigkeit der Fe_{ges} -Konzentration am Pegel PL6 und PL9 vom Abfluss der Pleiße (Akl. bezogen auf Pegel Böhlen)

In Abb. 20 sind Ausreißer rot markiert, die nachfolgend erläutert werden (Tab. 3).

Tab. 3: Erläuterung der Ausreißer in Abb. 20

Datum	Erläuterung
17.12.2014	Eintrag durch GWRA der MIBRAG (Totalausfall des Kalksilos am 16.12.2014) → hohe Eisen- und Sulfatkonzentrationen im Abstrom (s. nachstehende Abbildung) Eisen(ges.)-Konzentrationen Fluss-km Pleiße Fe_{ges}-Konzentrationen im Wasser der Pleiße bei 3 verschiedenen Abflussklassen, Abb. 2 in SGL (2014) [U5]
04.08.2015	hohe Wassertemperatur (21,6 °C) → möglicherweise verbesserte Eisenabscheidung (allerdings ähnliche Abflussverhältnisse und Temperaturen im Juli/August 2016, hier aber höhere Fe_{ges} -Konz. um 4 mg/l)
01.12.2015	hoher Anteil an abfiltrierbaren Stoffen (46 mg/l, sonst 1 – 20 mg/l), vergleichsweise wenig Sulfat, d. h. nicht durch MIBRAG bedingt → kurzzeitig

	erhöhter Sedimenttransport durch schnell ansteigende Strömungsgeschwindigkeit												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Datum</th><th>Q in m³/s</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>27.11.2015</td><td>3,79</td></tr> <tr> <td>28.11.2015</td><td>4,01</td></tr> <tr> <td>29.11.2015</td><td>4,6</td></tr> <tr> <td>30.11.2015</td><td>6,02</td></tr> <tr> <td>01.12.2015</td><td>8,57</td></tr> </tbody> </table>	Datum	Q in m³/s	27.11.2015	3,79	28.11.2015	4,01	29.11.2015	4,6	30.11.2015	6,02	01.12.2015	8,57
Datum	Q in m³/s												
27.11.2015	3,79												
28.11.2015	4,01												
29.11.2015	4,6												
30.11.2015	6,02												
01.12.2015	8,57												
26.01.2016	hoher Anteil an abfiltrierbaren Stoffen (79 mg/l) und vergleichsweise wenig Sulfat → kurzzeitig erhöhter Sedimenttransport durch schnell ansteigende Strömungsgeschwindigkeit												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Datum</th><th>Q in m³/s</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>22.01.2016</td><td>4,08</td></tr> <tr> <td>23.01.2016</td><td>4,74</td></tr> <tr> <td>24.01.2016</td><td>5,66</td></tr> <tr> <td>25.01.2016</td><td>6,96</td></tr> <tr> <td>26.01.2016</td><td>11,6</td></tr> </tbody> </table>	Datum	Q in m³/s	22.01.2016	4,08	23.01.2016	4,74	24.01.2016	5,66	25.01.2016	6,96	26.01.2016	11,6
Datum	Q in m³/s												
22.01.2016	4,08												
23.01.2016	4,74												
24.01.2016	5,66												
25.01.2016	6,96												
26.01.2016	11,6												

Die **Fe_{gel}-Konzentration** in Abb. 21 schwankten im betrachteten Zeitraum am Pegel PL9 zwischen 0,03 mg/L und 3,85 mg/L (Mittelwert 0,4 mg/L), wobei das gelöste Eisen unter den gegebenen Milieubedingungen hauptsächlich als Fe²⁺ vorliegen wird. Am oberstromig liegenden Pegel PL6 lagen die Konzentrationen im Mittel bei 1,15 mg/l und damit etwas höher. Grund hierfür ist die Oxidation des Fe²⁺ zu Fe³⁺ mit nachfolgender Flockulation.

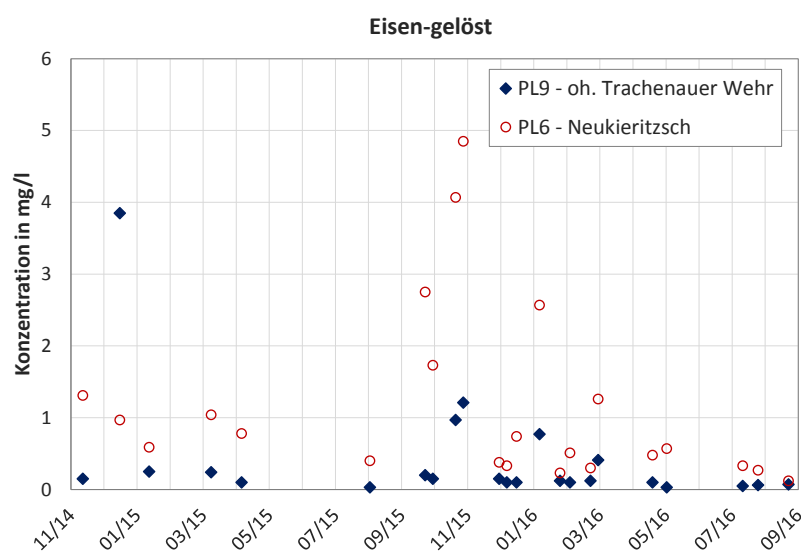


Abb. 21: Fe_{gel}-Konzentrationsentwicklung an der Pleiße-MST PL6 (Neukieritzsch) und PL9 (oh Trachenauer Wehr) im Zeitraum 11/2014 bis 09/2016

Die GWRA der MIBRAG bei Neukieritzsch leitet zwischen den Messpunkten PL6 und PL7 die gereinigten Sumpfungswässer gemäß WRE mit $\leq 3 \text{ mg/l Fe}_{\text{ges}}$ und $\leq 1 \text{ mg/l Fe}_{\text{gel}}$ in die Pleiße ein (LfULG, 2014 [U3]). In Abhängigkeit von den Verhältnissen

$$Q_{\text{Einleitung_GWRA}} / Q_{\text{Pleiße}}$$

und

$$\text{Fe}_{\text{ges, Einleitung_GWRA}} / \text{Fe}_{\text{ges, Pleiße}}$$

wird das Pleißewasser in Bezug auf den Parameter Fe_{ges} meistens verdünnt.

4.2.1.3 Sulfatkonzentration

Die Entwicklung der **Sulfatkonzentration** an den Pegeln PL9 und PL6 im Zeitraum 11/2014 bis 09/2016 sind in Abb. 22 dargestellt.

Die Sulfatkonzentration schwankte am Pegel PL9 im betrachteten Zeitraum zwischen 192 mg/l und 473 mg/l (Mittelwert 322 mg/l). Die Konzentrationen am oberstromigen Pegel PL6 nach Querung der Kippe liegen weitaus niedriger. Diese schwankten im betrachteten Zeitraum zwischen 135 mg/l und 287 mg/l (Mittelwert 178 mg/l).

Weiter oberhalb der Pleiße am Pegel PL4 (vor Mündung der Whyra) lagen die Konzentrationen im Mittel bei 165 mg/l und entsprachen somit den Konzentrationen am Pegel PL6.

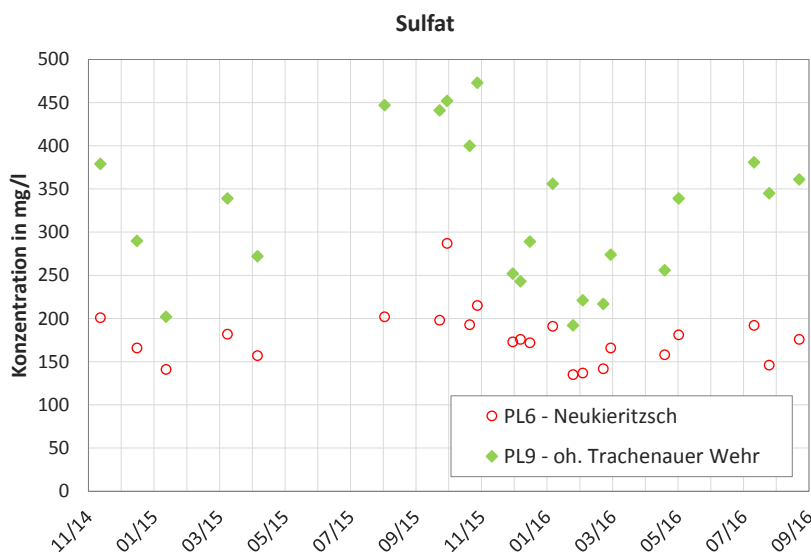


Abb. 22: Sulfat- Konzentrationsentwicklung an der Pleiße-MST PL6 (Neukieritzsch) und PL9 (oh Trachenauer Wehr) im Zeitraum 11/2014 bis 09/2016

Bei Betrachtung der Konzentrationsentwicklung auf der Fließstrecke von PL6 bis PL9 zeigte sich eine starke Erhöhung der Sulfatkonzentration bis zum Pegel PL7 und anschließend eine gleichbleibende Konzentration bis zum Pegel PL9. Die Konzentrationserhöhung wird auf die Einleitung der Grubenwässer der GWRA Neukieritzsch zurückgeführt.

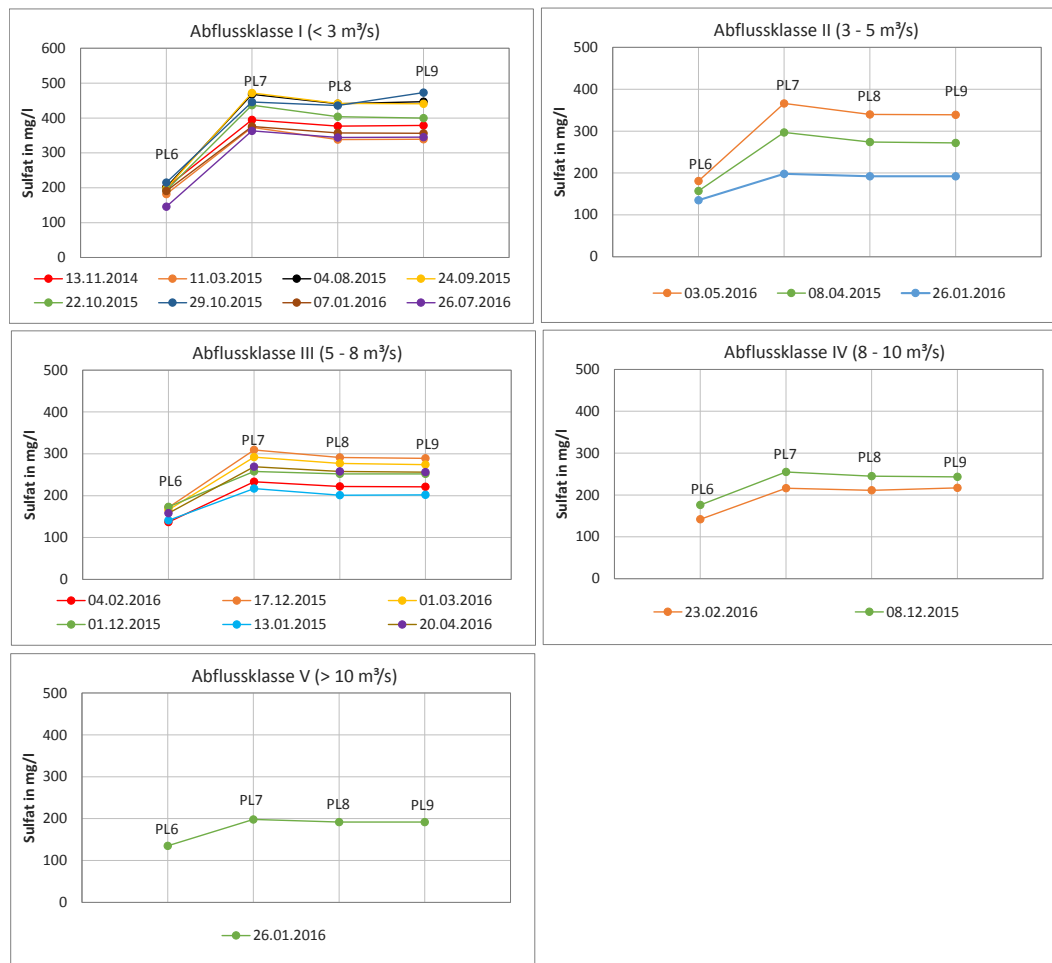


Abb. 23: Entwicklung der Sulfat-Konzentration auf der Fließstrecke von PL6 bis PL9 für die Abflussklassen I, II, III, IV und V

Insgesamt weisen die Sulfatkonzentrationen, wie auch die Fe_{ges} -Konzentrationen, eine Abhängigkeit vom Durchfluss auf. Hohe Konzentrationen werden am Pegel PL9 insbesondere bei geringen Abflüssen gemessen. Höhere Abflüsse bewirken eine Verdünnung und damit niedrigere Konzentrationen. Diese Abhängigkeit ist jedoch, anders als bei Fe_{ges} , am Pegel PL6 nicht zu beobachten. Dort sind die Konzentrationen unabhängig vom Durchfluss etwa gleichbleibend (vgl. Abb. 24).

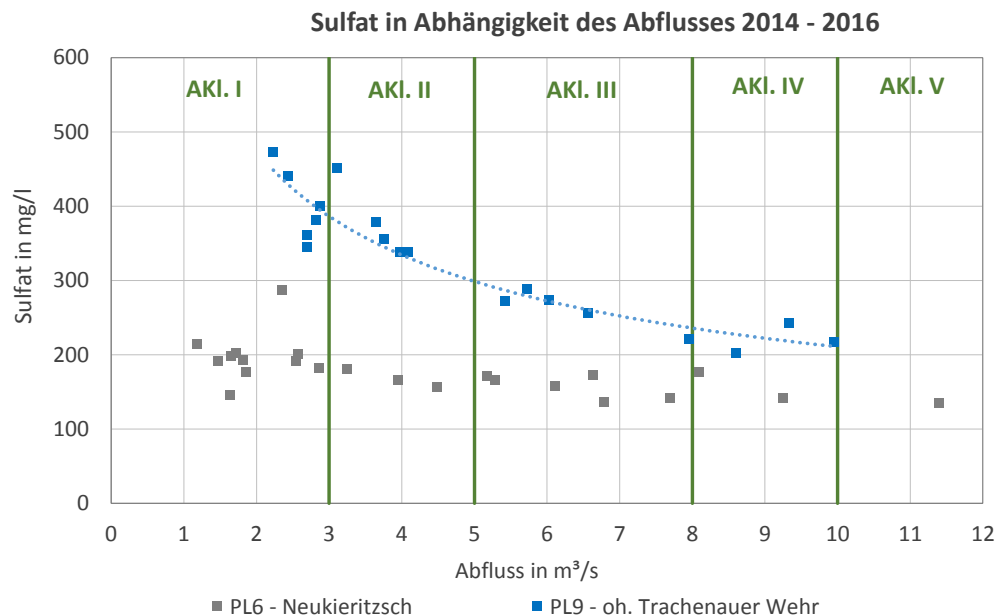


Abb. 24: Abhängigkeit der Sulfat-Konzentration am Pegel PL6 und PL9 vom Abfluss der Pleiße (AKI bezogen auf Pegel Böhlen)

Weitere abflussabhängige Parameter sind Calcium und Magnesium. Diese nehmen mit zunehmendem Abfluss in ihrer Konzentration ab.

Für Nitrat konnte ebenfalls eine Abhängigkeit festgestellt werden. Hierbei nimmt die Konzentration mit zunehmenden Abfluss zu. Für Ammonium konnte hingegen keine Abhängigkeit nachgewiesen werden.

Die folgende Tabelle stellt die mittleren Konzentrationen, Min-Wert und Max-Werte für den betrachteten Zeitraum am Pegel PL9 zusammen.

Tab. 4: Beschaffenheit des Pleißewassers am Pegel PL9 (oh. Trachenauer Wehr) im Zeitraum 11/2014 bis 08/2016

Parameter	Einheit	Min	Max	Mittel
Wassertemperatur	[°C]	2,6	21,6	10,0
pH-Wert	[-]	7,3	7,9	7,6
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	872	1316	1110
Sauerstoffgehalt	[mg/l]	7,2	13,0	10,6
Sauerstoffsättigung	[%]	79,9	100,0	92,9
Redoxspannung	[mV]	181	398,0	301,3
Säurekapazität $K_{S4,3}$	[mmol/l]	2,3	3,4	2,9
Basenkapazität $K_{B8,2}$	[mmol/l]	0,1	0,4	0,2
Abfiltrierbare Stoffe	[mg/l]	3,4	79,0	16,2
$Fe_{ges}^{1)}$	[mg/l]	1,26	8,82	3,77
$Fe_{gel}^{1)}$	[mg/l]	0,03	3,85	0,41
$Fe^{2+}^{1)}$	[mg/l]	0,02	3,81	0,37
Fe^{3+} (berechnet)	[mg/l]	0,00	0,15	0,03

Parameter	Einheit	Min	Max	Mittel
Aluminium, gelöst	[mg/l]	0,01	0,05	0,03
Calcium ¹⁾	[mg/l]	109	206	154
Magnesium ¹⁾	[mg/l]	21,6	36,8	30,2
Kalium	[mg/l]	5,5	11,7	7,4
Natrium	[mg/l]	28,6	78,2	36,2
Ammonium-N	[mg/l]	0,10	0,66	0,24
Nitrat-N ¹⁾	[mg/l]	1,57	7,67	3,97
Sulfat	[mg/l]	192	473	323
Chlorid	[mg/l]	53,4	156	71,5
TIC	[mg/l]	28,1	43,2	35,5
Mangan gesamt	[mg/l]	0,19	0,72	0,42
Kjeldahl Stickstoff	[mg/l]	0,20	1,51	0,65
Gesamt - Stickstoff	[mg/l]	2,0	9,1	4,7
Nitrit-N	[mg/l]	0,016	0,066	0,038

¹⁾ abflussabhängiger Parameter

4.2.2 Erwartbare Eisenfrachten

Für den Pegel Böhlen, der ca. 4,7 km unterhalb des Pegels PL9 liegt, liegen für den Zeitraum 2006 bis 2015 Tagesabflusswerte vor (LfULG). Zwischen dem Pegel PL9 und dem Pegel Böhlen konnte eine Korrelation hergestellt werden, mit welcher die Tagesabflusswerte für den Pegel PL9 korrigiert bzw. berechnet werden konnten. Die ermittelte Korrelation zwischen dem Pegel Böhlen und dem Pegel PL9 ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

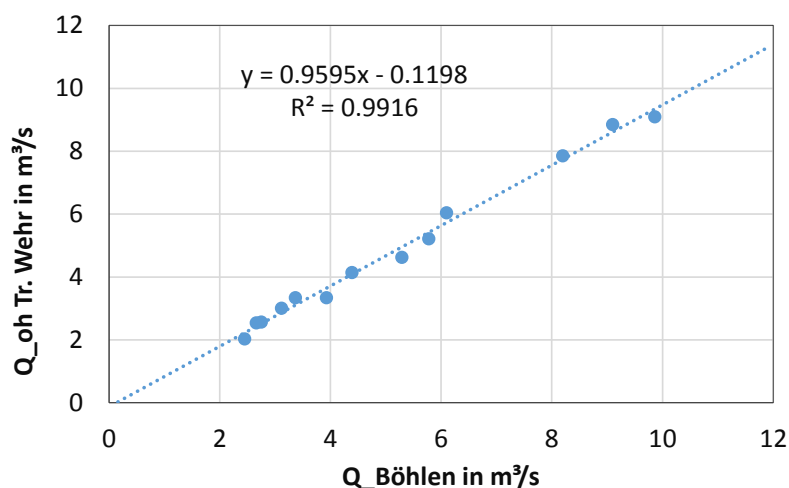


Abb. 25: Korrelation der Abflüsse an der PL9 und dem Pegel Böhlen

Beispielhaft sind die damit vom Pegel Böhlen abgeleiteten Abflussganglinien am Pegel PL9 für die Jahre 2006, 2009, 2013 und 2015 in Abb. 26 dargestellt.

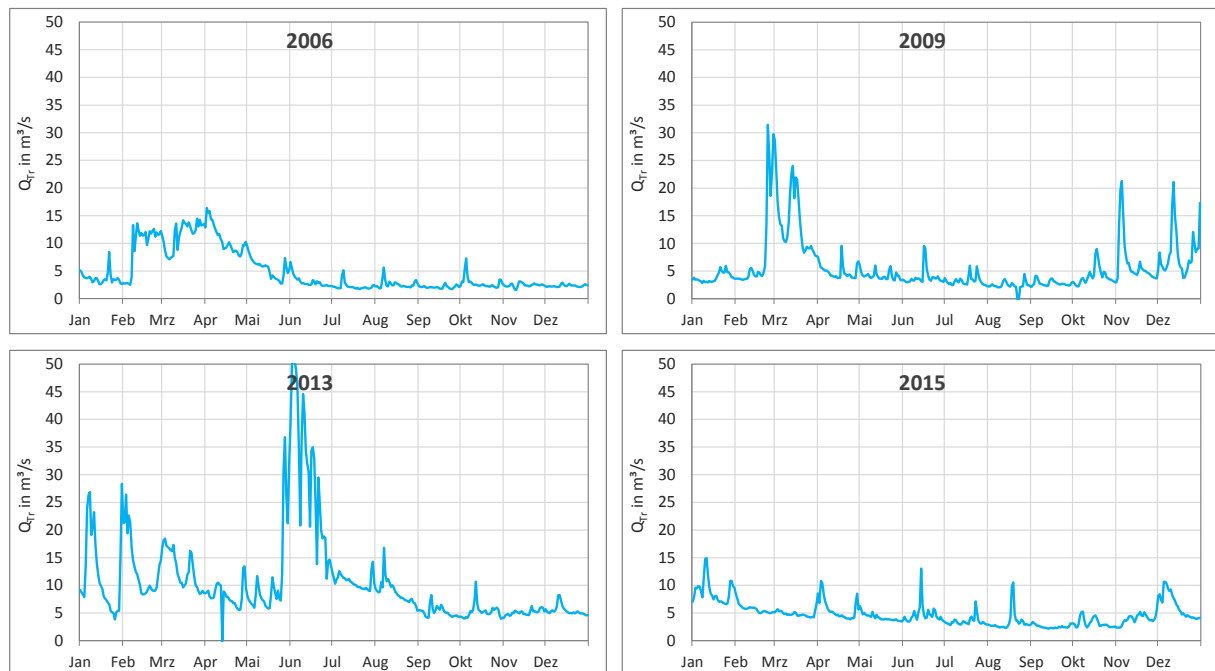


Abb. 26: Abgeleitete Tagesabflussganglinien am Pegel PL9 (oh. Trachenauer Wehr) für ausgewählte Jahre

Anschließend wurden für alle Jahre Dauerlinien erstellt, sodass eine **mittlere Dauerlinie** für den Pegel PL9 ermittelt werden konnte. Das Abflussjahr 2013, welches durch ein HW-Ereignis gekennzeichnet ist, wurde hierbei nicht berücksichtigt. Für die jeweilige Abflussklasse wurde auf der Grundlage der korrigierten Dauerlinie für den Pegel PL9 und anhand der mittleren Eisenkonzentrationen für jede Abflussklasse (siehe Abb. 20) die mittlere Eisenfracht pro Jahr berechnet – vgl. Abb. 27.

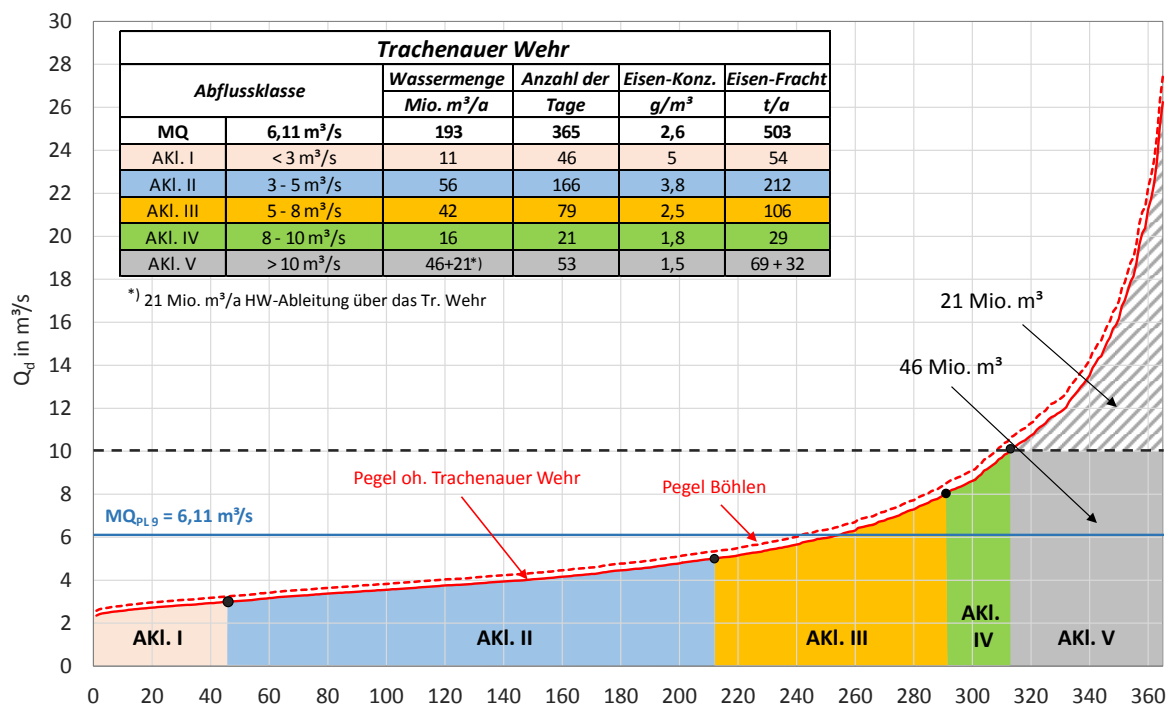


Abb. 27: Abgeleitete mittlere Dauerlinie am Trachenauer Wehr (LMBV-Messstelle PL9) der Jahre 2006 bis 2015 (unter Streichung des HW-Jahres 2013)

5 Ergebnisse der Absetzversuche und Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten

5.1 Ergebnisse der Absetzversuche

Für die Auswertung und Interpretation der Absetzversuche und der im Anschluss folgenden Ableitung der Sedimentationsgeschwindigkeit wurden zwei Versuchsreihen mit der im Kapitel 3 dargestellten Versuchsanlage durchgeführt.

Versuchsreihe A beinhaltet die Ergebnisse der Absetzversuche basierend auf der Probenahme vom 21.03.2017 (PN1). In Versuchsreihe B erfolgt die Auswertung der Ergebnisse auf der Grundlage der Probenahme vom 10.04.2017 (PN2).

Abb. 28 stellt die Ergebnisse der Absetzversuche beider Versuchsreihen bei einer Entnahmetiefe von 15 cm gegenüber. Wie Abb. 28 verdeutlicht, war die initiale Fe_{ges} -Konzentration der Wasserprobe PN2 höher.

Auch entlang der Fließstrecke, insbesondere für Versuchsreihe B, war eine Verringerung der Fe_{ges} -Konzentration von 3,98 auf 2,42 mg/l festzustellen. Tab. 5 stellt die initialen Fe_{ges} -Konzentrationen beider Versuchsreihen gegenüber.

Tab. 5: Initiale Fe_{ges} -Konzentrationen der Probenahme von 21.03.2017 (PN1) und 10.04.2017 (PN2)

Initiale Fe_{ges} -Konzentration [mg/l]		
Pegel	Versuchsreihe A (PN1)	Versuchsreihe B (PN2)
PL6	1,70	3,98
PL7	1,20	3,13
PL8	1,20	2,92
PL9	1,45	2,42

Vergleicht man die Sedimentationskurven der Versuchsreihe A mit der von Versuchsreihe B (Abb. 28) wird ersichtlich, dass die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration in Versuchsreihe B durch einen stärkeren Abfall gekennzeichnet ist, was auf höhere Sedimentationsgeschwindigkeiten schließen lässt. Sowohl der Kurvenverlauf von Versuchsreihe A als auch der von Versuchsreihe B sind bis zu einer Versuchsdauer von ca. 100 Stunden durch einen annähernd linearen Verlauf gekennzeichnet.

Danach weichen die Sedimentationskurven insbesondere für Versuchsreihe B vom linearen Verlauf ab und unterliegen nur noch geringen Konzentrationsänderungen. Nach einer Sedimentationszeit von 168 h (7 Tage) sank die Fe_{ges} -Konzentration für beide Versuchsreihen auf unter 0,5 mg/l. Für die Wasserproben des Pegels PL8 wurde nach Beendigung der Absetzversuche eine Fe_{ges} -Konzentration < 0,15 mg/l gemessen.

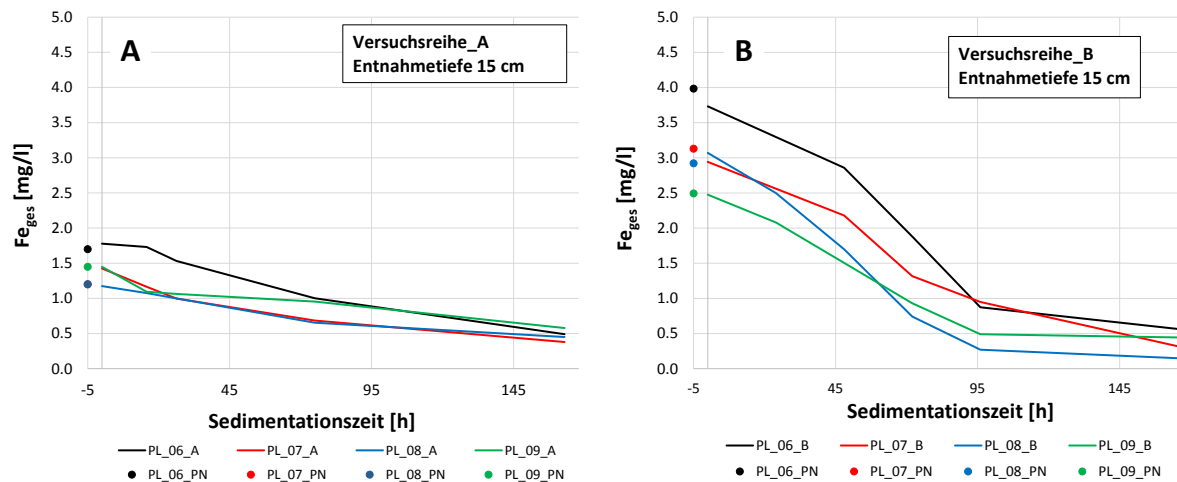


Abb. 28: Zeitliche Änderung der Fe_{ges} -Konzentration für die Versuchsreihen A und B

Ein ähnliches Verhalten war bezüglich der Fe_{ges} -Konzentration bei einer Entnahmetiefe von 30 cm zu beobachten (Abb. 29, rechts). Die Sedimentationskurven der MST PL6 bis PL9 sind in den ersten ca. 100 Stunden ebenfalls durch einen linearen Verlauf gekennzeichnet. Danach weichen die Sedimentationskurven ebenfalls vom linearen Verlauf ab und ändern sich im weiteren Sedimentationsprozess nur noch geringfügig.

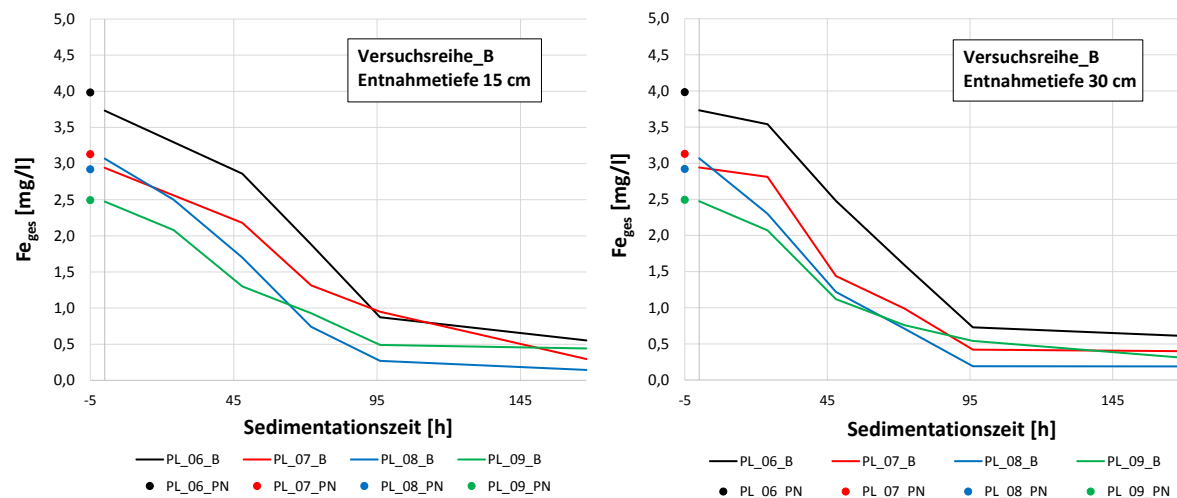


Abb. 29: Zeitliche Änderung der Fe_{ges} -Konzentration der Entnahmetiefen 15 cm und 30 cm

Zum besseren Vergleich ist in Abb. 29 zusätzlich Abb. 28 B dargestellt. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration in einer Tiefe von 30 cm schneller verläuft als die Konzentrationsabnahme in einer Entnahmetiefe von 15 cm.

Die Geschwindigkeitszunahme in tieferen Bereichen ist durch die Bildung von Agglomeraten während des Sedimentationsprozesses zu erklären. Kommt es zum Zusammentreffen zweier Eisenhydroxidflocken agglomerieren diese, was zu einer Massezunahme und somit zu einer Beschleunigung der Sedimentationsgeschwindigkeit führt. Der beschriebene Zusammenhang wird durch Abb. 30 genauer verdeutlicht.

Abb. 30 stellt die prozentuale Abreicherung der Fe_{ges} -Konzentration in Abhängigkeit von der Sedimentationszeit für die Entnahmetiefen 15 cm und 30 cm dar. In jeder der vier Versuchssäulen wurde in einer Tiefe von 30 cm eine deutlich schnellere Konzentrationsabnahme beobachtet.

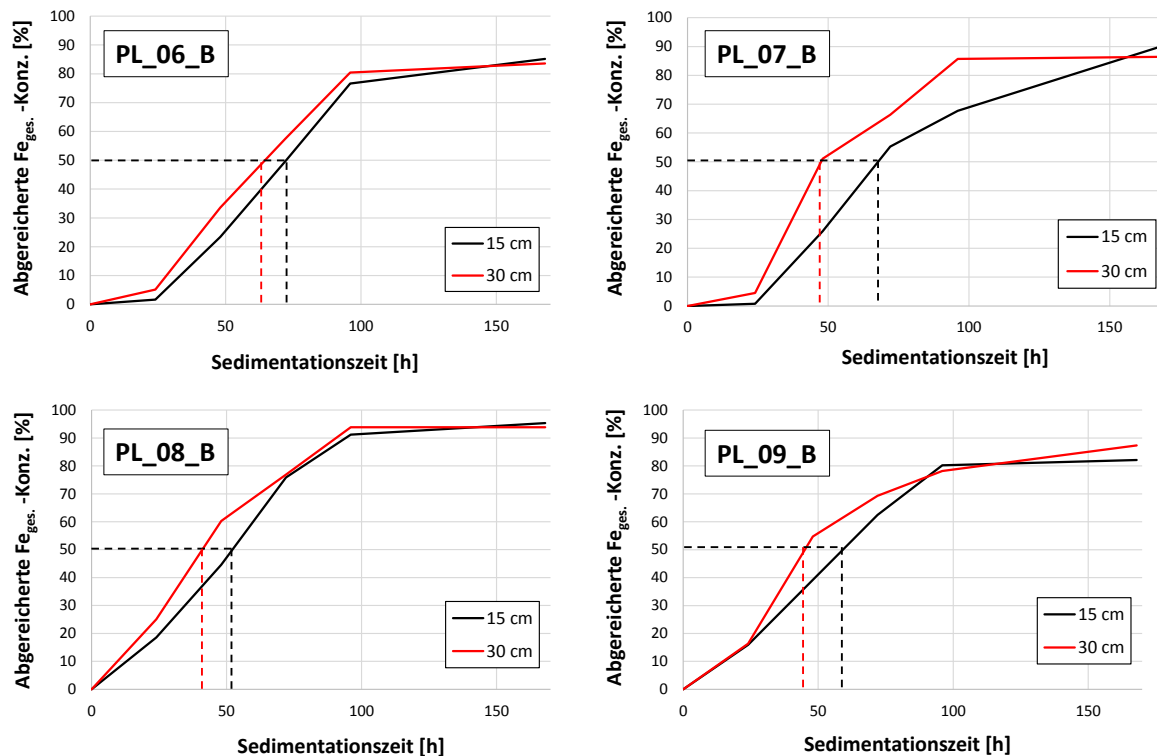


Abb. 30: Prozentuale Abreicherung der Fe_{ges} -Konzentration in einer Tiefe von 15 cm und 30 cm

Säule PL6_B zeigte in einer Tiefe von 30 cm bereits nach 64 h eine Verringerung der initialen Konzentration um 50 %. In einer Tiefe von 15 cm waren es dagegen 73 h. Tab. 6 stellt die Sedimentationszeiten der Proben PL6_B bis PL9_B gegenüber, die benötigt werden, um die initiale Fe_{ges} -Konzentration um die Hälfte zu senken.

Tab. 6: Benötigte Sedimentationszeit t_{Sed} zur Verringerung der initialen Fe_{ges} -Konz. um 50 %

Säule	t_{Sed} [h]	
	15 cm	30 cm
PL6_B	73	64
PL7_B	72	47
PL8_B	51	44
PL9_B	57	45

5.2 Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten

Die Ermittlung der Sedimentationsgeschwindigkeiten erfolgte mit dem numerischen Modellcode MOHID.

Ausgehend von den im Kapitel 5.1 vorgestellten Ergebnissen der Absetzversuche wird im Folgenden mit Hilfe eines hydrodynamischen Modells auf Grundlage von MOHID die Sedimentationsgeschwindigkeit der Eisenhydroxidflocken abgeschätzt.

Zur detaillierten Beschreibung der Strömungsverhältnisse, Stofftransportprozesse, einschließlich der Bewertung der Hydrochemie eines Wasserkörpers, kommen dreidimensionale Hydrodynamikmodelle zum Einsatz. MOHID (**M**odelo **H**idrodinâmico) ist ein solches Modellierungsprogramm, mit dem derartige Prozesse abgebildet und beschrieben werden können. Durch die Verwendung von MOHID können:

- der Energieaustausch zwischen Wasserkörper und Atmosphäre durch Strahlung, Lufttemperatur, Windeinfluss, Niederschlag, Verdunstung und damit die Schichtung des Wasserkörpers,
- die Wirkung von Zu- und Abflüssen aus angeschlossenen Oberflächengewässern (Vorfluter/ Überleiter etc.) oder des Grundwassers auf die Beschaffenheit des Sees und die seeinternen Strömungen,
- die wind- und dichteinduzierten Strömungen im Wasserkörper einschließlich der Sekundärströmungen,
- der Partikeltransport von Schweb- und Feststoffen basierend auf der Strömungssituation

berechnet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird ausschließlich der vierte Gliederungspunkt, der Partikeltransport von Schweb- und Feststoffen, untersucht.

Die Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit kohäsiver Sedimente ist sehr komplex. In der Literatur sind sehr unterschiedliche Modellansätze zu finden. Häufig wird das von EINSTEIN & KRONE (1962) [U1] auf Basis von Versuchen in einer Rinne und in METHA (1986) [U4] beschriebene Modell nach folgender Gleichung verwendet (Gl. 1).

$$w_s = K \cdot c^m \quad \text{Gl. 1}$$

In Gl. 1 beschreibt w_s die Sedimentationsgeschwindigkeit im Schwerfeld in m/s, K ist eine empirisch ermittelte Konstante in $\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s})$ die die Mineralogie der Partikel beschreibt, m ist ein dimensionsloser Exponent, der von der Partikelform und der Partikelgröße abhängt, und c ist die Partikelkonzentration in kg/m^3 .

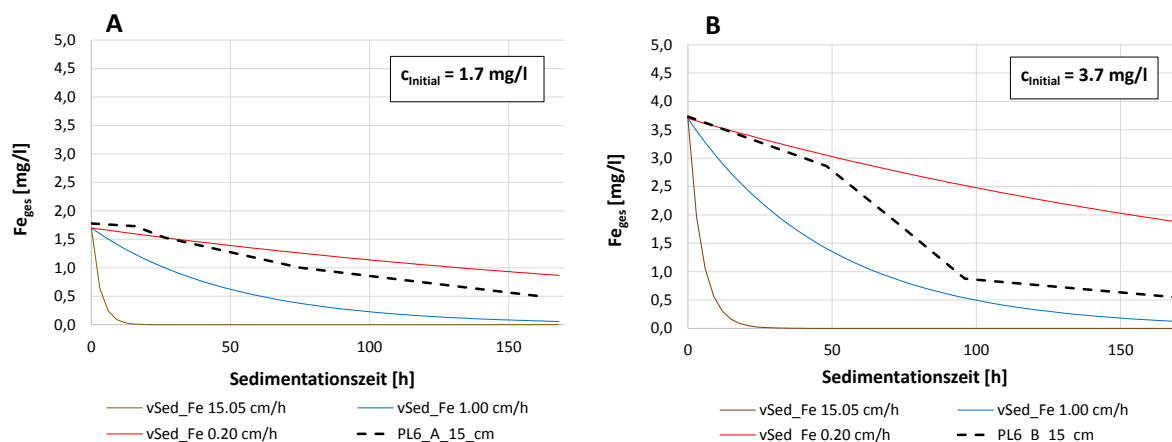
Für die empirische Konstante K und den Exponenten m liegen für EHF keine Daten vor. Eine Erhebung war im Projektverlauf nicht möglich, weshalb zur modellgestützten Abschätzung der Sedimentationsgeschwindigkeit vom einfachsten Fall, einer konstanten Geschwindigkeit ausgegangen wird. Damit wird auch eine direkte Übertragung auf das bereits entwickelte Seemodell des Kahnsdorfer See möglich.

Für die Abschätzung der Sedimentationsgeschwindigkeit wurden für jede Versuchsreihe zunächst 6 Modellrechnungen durchgeführt, bei denen jeweils die Sedimentationsgeschwindigkeit variiert wurde. Tab. 7 stellt die durchgeführten Modellrechnungen gegenüber.

Tab. 7: Gegenüberstellung der Modellrechnungen bei konstanter Temperatur von 15 °C

Szenario	V _{sed}	Konzentration
	[cm/h]	[mg/L]
1	15,0	3,7
2	1,00	
3	0,20	
4	15,0	1,4
5	1,00	
6	0,20	

Abb. 31 A und Abb. 31 B zeigen den Vergleich der Berechnungsergebnisse (Entnahmetiefe von 15 cm) mit den in Tab. 7 dargestellten Parametern und die experimentell bestimmten Daten für beide Versuchsreihen. Sowohl für die Daten der ersten Versuchsreihe (Abb. 31 A) als auch für die Daten der zweiten Versuchsreihe (Abb. 31 B) wurden die experimentell ermittelten Ergebnisse durch die Berechnungen für keine Sedimentationsgeschwindigkeit gut wiedergegeben. Auf eine Darstellung der Sedimentationskurven bei einer Entnahmetiefe von 30 cm wurde im Rahmen dieser Untersuchungen verzichtet. Die Berechnungsergebnisse in MOHID zeigten, dass die Konzentrationsabnahme in beiden Entnahmetiefen (15 cm und 30 cm) gleich schnell erfolgt. Dieses Resultat konnte in durchgeführten Absetzversuchen ebenfalls bestätigt werden (siehe Abb. 29 und Abb. 30).

**Abb. 31:** Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Daten der Versuchsreihe A und B

Die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration wird von den berechneten Daten der Sedimentationsgeschwindigkeiten 15,05 cm/h und 1,0 cm/h deutlich überschätzt, wohingegen die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration bei einer Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,20 cm/h unterschätzt wird.

Anhand der in Abb. 31 dargestellten Ergebnisse kann geschlossen werden, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit für beide Versuchsreihen zwischen 0,20 cm/h und 0,60 cm/h liegt.

Aus diesem Grund wurden die Modellrechnungen für beide Versuchsreihen wiederholt. Für jeden Säulenversuch wurde, entsprechend seiner initialen Fe_{ges} -Konzentration, ein separates Szenario erstellt. Angesetzt wurden die Sedimentationsgeschwindigkeiten 0,20 cm/h, 0,30 cm/h, 0,40 cm/h, 0,50 cm/h und 0,60 cm/h. Tab. 8 enthält eine Übersicht der durchgeführten Modellrechnungen mit den festgelegten Parametern.

Tab. 8: Durchgeführte Modellrechnungen bei konstanter Temperatur von 15 °C

Szenario	PN /MST	v_{Sed}	Konz.	Szenario	PN /MST	v_{Sed}	Konz.
		[cm/h]	[mg/l]			[cm/h]	[mg/l]
1	PN1 / PL6	0,20	1,8	21	PN2 / PL6	0,20	3,7
2		0,30		22		0,30	
3		0,40		23		0,40	
4		0,50		24		0,50	
5		0,60		25		0,60	
6	PN1 / PL7	0,20	1,4	26	PN2 / PL7	0,20	2,9
7		0,30		27		0,30	
8		0,40		28		0,40	
8		0,50		29		0,50	
8		0,60		30		0,60	
11	PN1 / PL8	0,20	1,2	31	PN2 / PL8	0,20	3,1
12		0,30		32		0,30	
13		0,40		33		0,40	
14		0,50		34		0,50	
15		0,60		35		0,60	
16	PN1 / PL9	0,20	1,1	36	PN2 / PL9	0,20	2,5
17		0,30		37		0,30	
18		0,40		38		0,40	
19		0,50		39		0,50	
20		0,60		40		0,60	

Abb. 32 stellt die Ergebnisse der Modellrechnungen für die Säule PL6_A und PL6_B gegenüber. Aus Abb. 32 geht hervor, dass die Messergebnisse der Säule PL6_A am besten wiedergegeben werden können, wenn dem Modell eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,40 cm/h (blaue Kurve in Abb. 32 A) zugrunde gelegt wird. Der berechnete und gemessene Kurvenverlauf stimmen, wie die Vergrößerung zeigt, gut überein.

Demgegenüber stehen die Ergebnisse der Säule PL6_B. Anhand Abb. 32 B und Abb. 34 wird deutlich, dass die Abnahme der Fe_{ges} -Konzentration den Geschwindigkeitsbereich von 0,2 bis 0,6 cm/h abdeckt. Die Ableitung von Sedimentationsgeschwindigkeiten bezüglich der durchgeführten Sedimentationsversuche von Versuchsreihe B gestaltet sich somit schwieriger.

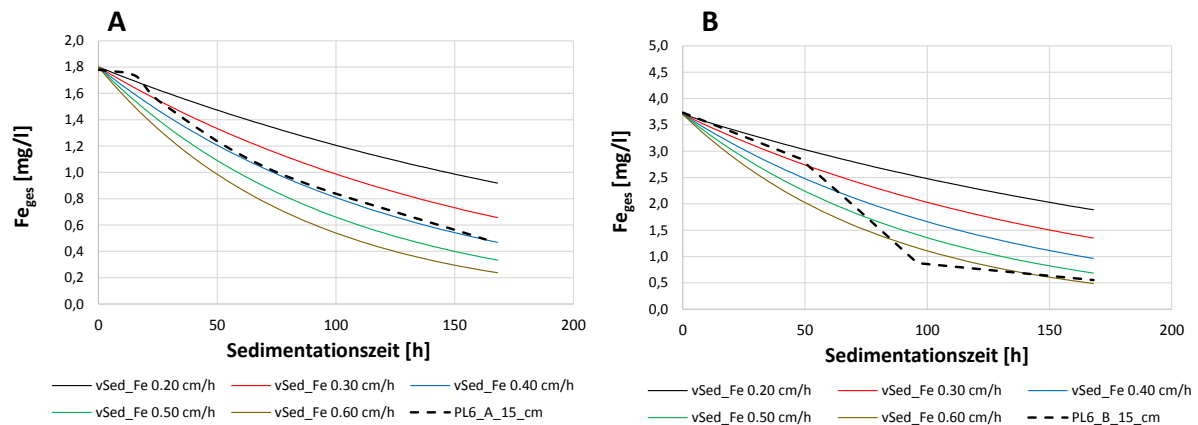


Abb. 32: Vergleich der modellierten und gemessenen Daten der Säule PL6_A und PL6_B für die Sedimentationsgeschwindigkeiten von 0,20 cm/h bis 0,60 cm/h

Bei höheren Fe-Startkonzentrationen ist die Annahme einer konstanten Sedimentationsgeschwindigkeit nicht mehr korrekt. Voraussichtlich spielt die Bildung von Eisenhydroxid-flocken (EHF) eine wichtige Rolle. Die Kinetik der Bildung und des Wachstums von EHF ist komplex und war nicht Teil der Aufgabenstellung, weshalb aus den Ergebnissen eine konstante Sedimentationsgeschwindigkeit abgeleitet wird, die im Mittel das Abreinigungsverhalten des Parameters Fe_{ges} beschreibt.

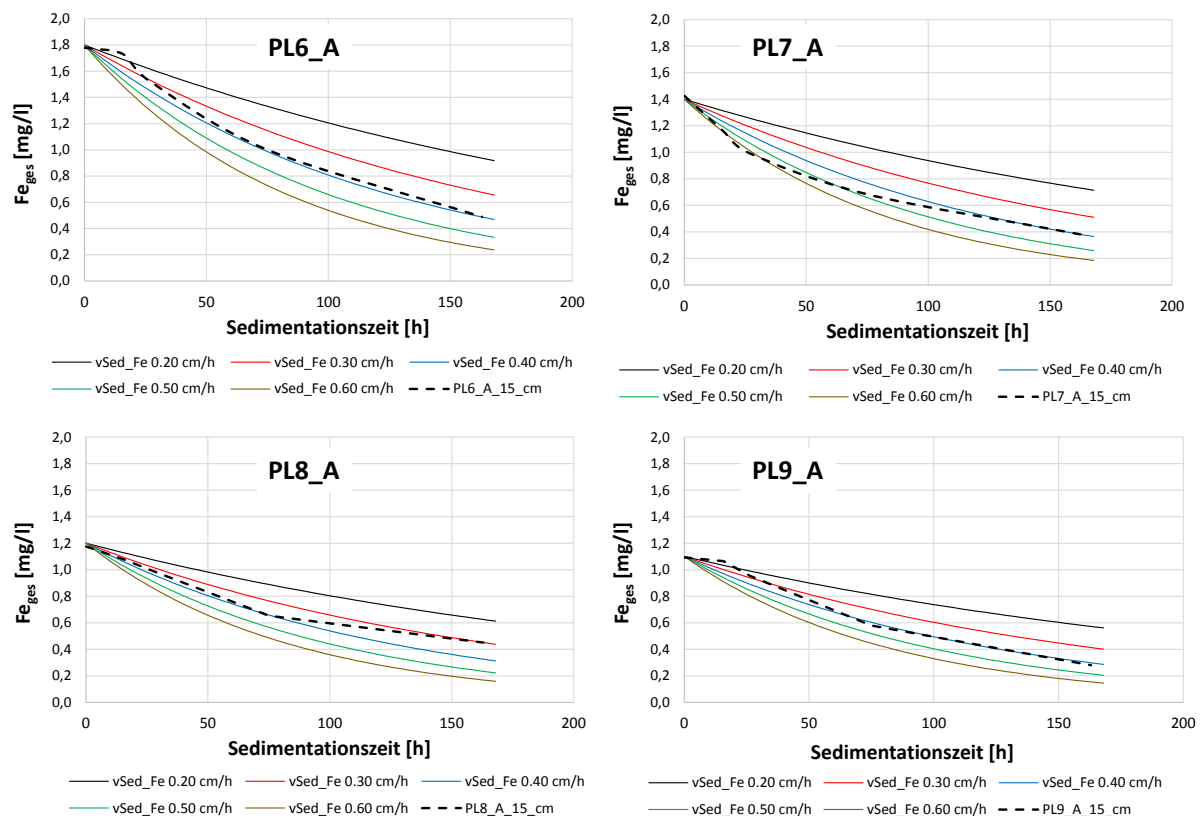


Abb. 33: Vergleich der gemessenen und berechneten Konzentrationsentwicklung PN1

Abb. 33 und Abb. 34 enthalten die Ergebnisse der Säulen PL6 bis PL9 für beide Versuchsreihen. Alle gemessenen Kurven von **Versuchsreihe A** zeigen einen ähnlichen Verlauf und können bei einer **Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,40 cm/h** gut wiedergegeben werden.

Da die Sedimentationsgeschwindigkeit gemäß Gl. 1 linear mit zunehmender Partikelkonzentration steigt wird in Rahmen von **Versuchsreihe B** eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h angesetzt. Wie Abb. 34 zeigt, können die gemessenen Kurven ausreichend genau mit einer konstanten Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 cm/h (braune Kurve in Abb. 32 B sowie Abb. 34) abgebildet werden. Eine Ausnahme bildet der Versuch mit dem Wasser von PL8. Nach einer **Sedimentationszeit von ca. 50 h** erhöht sich die Abreinigungsrate. Die Sedimentationsgeschwindigkeit beträgt dann etwa 1,0 cm/h. Diese Abweichung im Absetzverhalten ist tolerierbar.

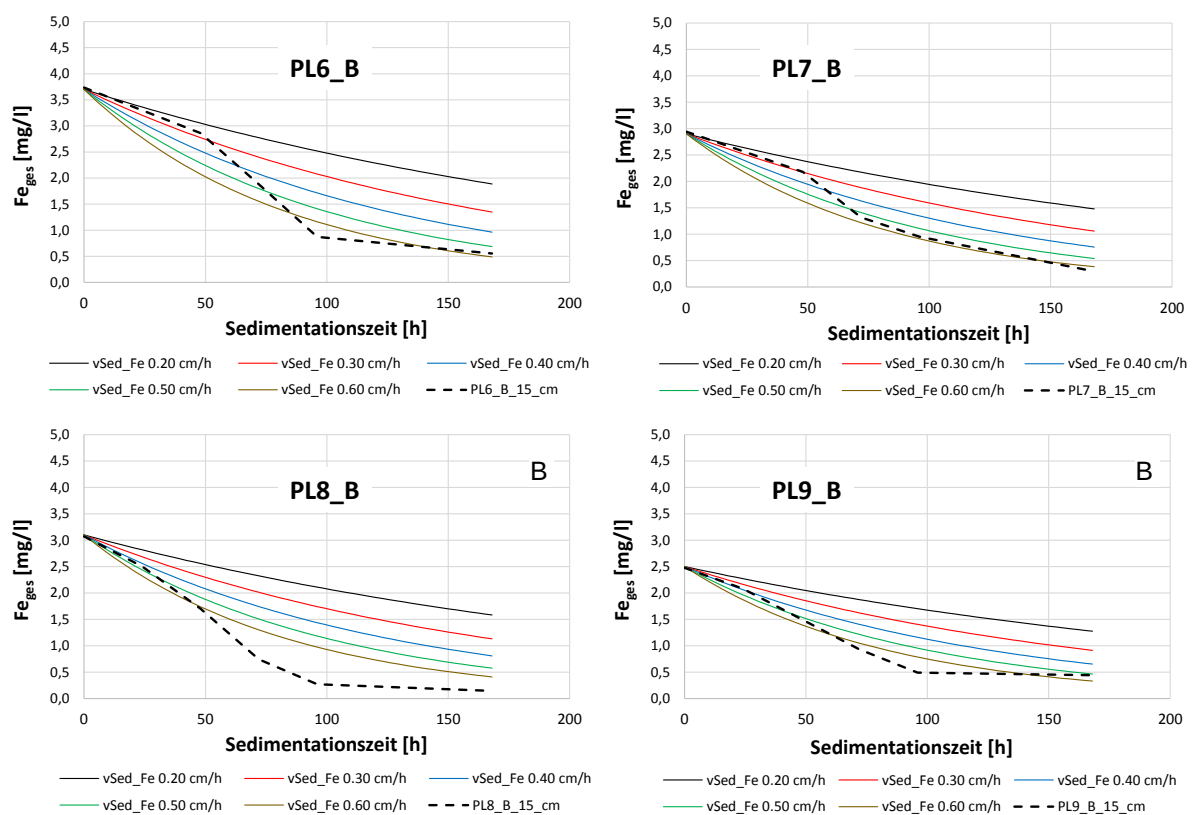


Abb. 34: Vergleich der gemessenen und berechneten Konzentrationsentwicklung PN2

6 Schlussfolgerung und Empfehlungen

Generell konnten die Versuche genutzt werden, um das Absetzverhalten von Eisenhydroxiden aus der Pleiße zu beschreiben. Die bestimmten Sedimentationsgeschwindigkeiten sind im Vergleich zu technischen Anlagen sehr niedrig (2-3 Größenordnungen).

Die Ergebnisse der Absetzversuche zeigten, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit der Eisenhydroxidflocken von der Fe_{ges} -Konzentration abhängt. Für **Eisen-Konzentrationen $< 1,8 \text{ mg/l}$** (Versuchsreihe A) konnte eine **Sedimentationsgeschwindigkeit von $0,40 \text{ cm/h}$** abgeleitet werden. Für **Eisen-Konzentrationen im Bereich von $2,5$ bis $3,7 \text{ mg/l}$** wurde eine um den Faktor 1,5 höhere **Sedimentationsgeschwindigkeit von $0,6 \text{ cm/h}$** aus den Versuchen mit Hilfe des numerischen Modells bestimmt.

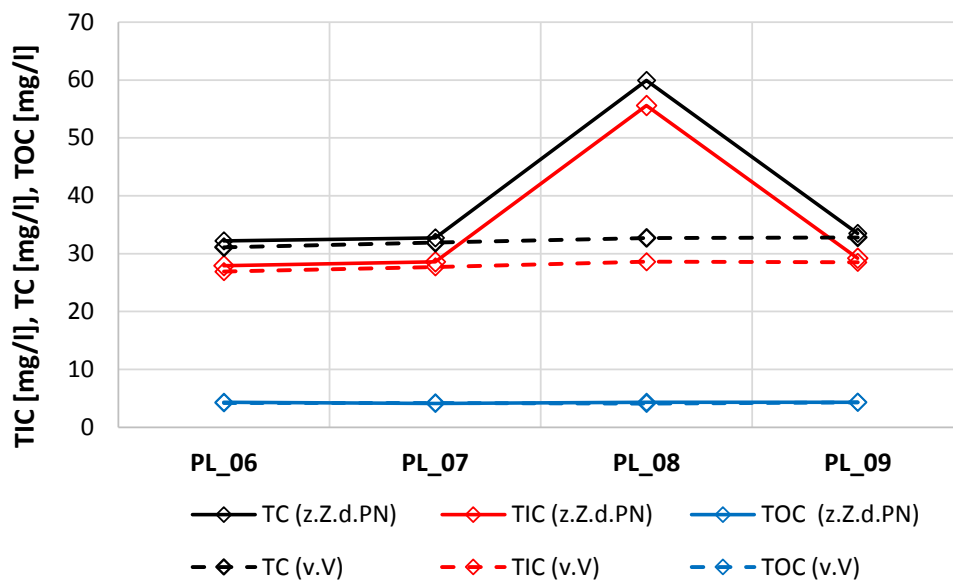
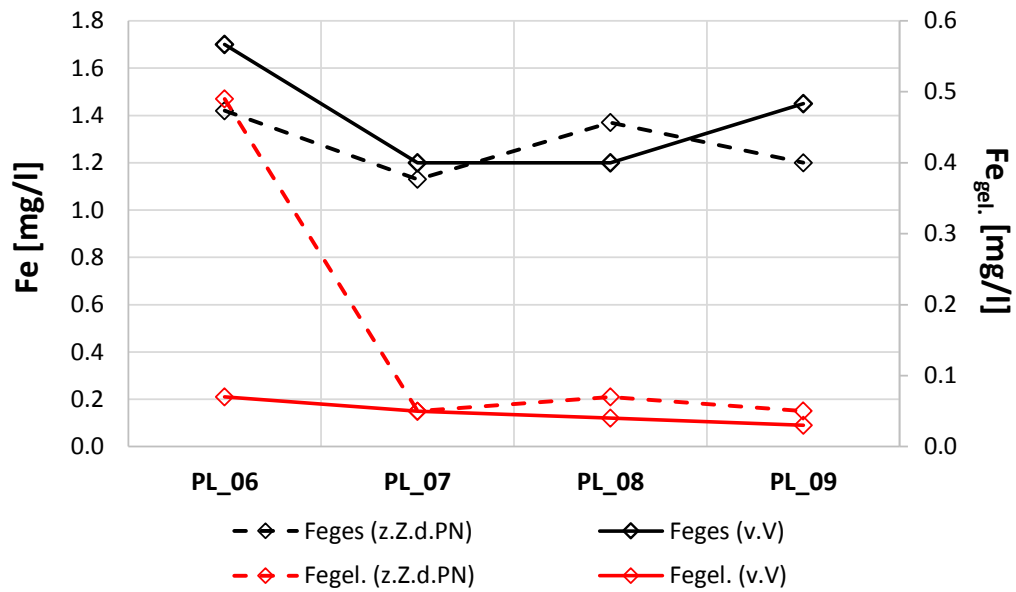
Weiterhin wurde beobachtet, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit in tieferen Gewässerlagen durch die Bildung von Agglomeraten beschleunigt wird, was beim Vergleich in den Versuchsreihen bei unterschiedlichen Entnahmetiefen (15 und 30 cm) gezeigt wurde.

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Sedimentationsgeschwindigkeit der EHF groß genug ist, um eine Fe_{ges} -Konzentration von max. $1,5 \text{ mg/l}$ nach einer definierten Aufenthaltszeit im Kahnsdorfer Sees zu erreichen, gilt es das bestehende Seemodell mit den Ergebnissen der Versuche zu erweitern.

Die im Rahmen dieser Untersuchung abgeleiteten und konzentrationsabhängigen Sedimentationsgeschwindigkeiten bilden dafür die Grundlage.

Anhang A

Vor-Ort-Parameter der Probenahme vom 21.03.2107



z.Z. d.PN ... Zum Zeitpunkt der Probenahme

v.V ... vor Versuchsbeginn

