

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der  
Ruhr-Universität Bochum

Herrenknecht AG, Schwanau

MSE-Filterpressen GmbH, Remchingen

GeneSys Elektronik GmbH, Offenburg

Gebrüder Förster GmbH, Schwanau

**Entwicklung einer innovativen Trennmethode für gebrauchte  
Bentonitsuspensionen  
zur ökonomisch vorteilhaften, ressourcenschonenden und  
umweltgerechten Entsorgung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az 29349/02 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Ivan Popovic, M.Sc. & Dr.-Ing. Britta Schöber

Bochum, März 2019

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der  
Ruhr-Universität Bochum

Herrenknecht AG, Schwanau

MSE-Filterpressen GmbH, Remchingen

GeneSys Elektronik GmbH, Offenburg

Gebrüder Förster GmbH, Schwanau

**Entwicklung einer innovativen Trennmethode für gebrauchte  
Bentonitsuspensionen  
zur ökonomisch vorteilhaften, ressourcenschonenden und  
umweltgerechten Entsorgung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az 29349/02 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Ivan Popovic, M.Sc. & Dr.-Ing. Britta Schöber

Bochum, März 2019

06/02

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>29349/02</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>399.693,00 €</b>
----	-----------------	---------	-----------	-------------	---------------------

**Antragstitel**      **Entwicklung einer innovativen Trennmethode für gebrauchte Bentonitsuspensionen zur ökonomisch vorteilhaften, ressourcenschonenden und umweltgerechten Entsorgung (2. Phase)**

**Stichworte**      Wasser, Gewässer, Entsorgung, Bau

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>30 Monate</b>	<b>23.09.2014</b>	<b>31.12.2018</b>	<b>2</b>

**Bewilligungsempfänger**    MSE Filterpressen  
Am Eisengraben 3  
75196 Remchingen

Tel.: 07232 3650-0

Fax:

Projektleitung

A. Kalteis

Bearbeiter

**Kooperationspartner**    *GeneSys Elektronik GmbH aus Offenburg, Förster GmbH aus Schwanau, Herrenknecht AG aus Schwanau und Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum.*

**Assoziierte Partner**

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Bentonite sind aufbereitete Tone aus natürlichen Vorkommen, die in Wasser dispergiert für den Spezialtiefbau von besonderer baupraktischer Bedeutung sind. Durch die vielseitige Verwendbarkeit entstehen auf diversen Baustellen große Mengen von gebrauchten Bentonitsuspensionen, die durch Aufladung mit Bodenpartikeln ihre bautechnisch relevanten Eigenschaften verlieren und in dieser Form nicht mehr verwendet werden können. Die anschließende Entsorgung der gebrauchten Bentonitsuspensionen erweist sich als schwierig, da diese stabil sind und sich nicht selbstständig entmischen.

Hier setzte die Idee eines geschlossenen Recyclingprozesses für Bentonitsuspensionen an: Ziel dieser Forschungsarbeit war und ist es, die aktuell bestehenden Separationsverfahren durch ein innovatives, neuartiges Verfahren zu optimieren oder zu ersetzen und in ein neu zu entwickelndes Aufbereitungssystem einzubinden. Synergie-Effekte mit den bestehenden Systemen leisten dabei einen positiven Beitrag zur Entlastung der vorrangigen Kosten und der Umwelt, indem die Ressourcen der Bentonitlagerstätten und Wasservorkommen geschont sowie Transportwege massiv reduziert werden.

Das Entwicklungsziel konzentrierte sich auf die Anwendung der Elektrokoagulationstechnik zur Trennung von Bentonitsuspensionen, die mit Bodenpartikeln bis an die Grenze der Tragfähigkeit aufgeladen sind. Hierbei wurden völlig neue Anforderungen an die Trenntechnik gestellt, da die Schwebstoffe, die in der kommunalen oder industriellen Abwasserreinigung zu separieren sind, in weitaus geringeren Konzentrationen anfallen und mit den Inhaltsstoffen von aufgeladenen Bentonitsuspensionen nicht vergleichbar sind.

## **Ergebnisse und Diskussion**

In der ersten Projektphase wurden an der Ruhr-Universität Bochum verschiedene Elektrolysezellen konstruiert und gebaut (Laborprototypen), die alle wesentlichen Systembestandteile für die Elektrokoagulation enthalten. Mithilfe dieser Zellen wurden zielorientiert die den Elektrolyseprozess beeinflussenden Eigenschaften, wie z.B. Leitfähigkeit, pH-Wert, Strömungsverhalten und Durchflussgeschwindigkeit der Suspension innerhalb der Elektrokoagulationszelle ebenso wie Ursprung, Menge und Eigenschaften der aufgeladenen Bodenpartikel als auch Elektrodenmaterial, -größe und -abstand, Varianz von Stromstärke und Spannung sowie Reinigungsmechanismen, in einzelnen Parameterstudien systematisch untersucht.

Die Betriebsparameter, bei denen die besten Ergebnisse der Laboruntersuchungen im Hinblick auf eine möglichst hohe Effektivität beim Trennprozess erreicht wurden, dienten als Grundlage für die Skalierung von Laborzellen (Vol. 2 l) auf einen Praxisprototyp (Vol. 300 l). Da Wasserstoff während der Elektrokoagulation entsteht, wurden bei der Konstruktion des Prototyps höchste Sicherheitsmaßnahmen eingesetzt.

Verschiedene Betriebsparameter der Elektrokoagulation, wie z.B. die Stromstärke, der Abstand zwischen Elektroden, die Versuchsdauer und das Reinigungsintervall der Anoden, wurden mit dem Praxisprototyp getestet. Es wurden sowohl eine standardisierte Altsuspension als auch Altsuspensionen von Baustellen untersucht. Nach jedem Elektrokoagulationsversuch wurde die Suspension in einer labormaßstäblichen Kammerfilterpresse entwässert, um die Auswirkung der Elektrokoagulation auf die Filtrationsleistung zu bestimmen. Als Referenzversuche wurden die Filtrationsversuche mit konventionellen und umweltschädlichen Konditionierungsmitteln durchgeführt, die auf den Baustellen für die Beschleunigung der Filtration eingesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Elektrokoagulation in der Lage ist, den Einsatz der Konditionierungsmittel zu reduzieren oder vollständig zu ersetzen. Bei der optimalen Kombination der Betriebsparameter blieben die Betriebskosten vergleichbar mit den Kosten von konventionellen Entwässerungsmethoden. Mittels Elektrokoagulation wurden der Suspension keine umweltschädlichen Stoffe zugegeben, was zum Einsparen von bis zum 0.2 m<sup>3</sup> Wasser pro 1 m<sup>3</sup> Altsuspension und zu einer besseren Qualität der Filtrationsprodukte führt. Das Filtratwasser kann für das Anmischen einer neuen Suspension wiederverwendet werden, was einen ersten Ansatz für einen Recyclingkreislauf bietet.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

World Tunnelling Congress 2017 in Bergen, Norwegen (Paper, Poster und Präsentation)

RuhrGeo Tag 2018 in Bochum (Paper und Präsentation)

Seminar „Ressourceneffizienz im Grundbau“ 2018 in Düsseldorf (Präsentation)

### **Fazit**

Dieses Projekt umfasst die erste umfassende Untersuchung der Anwendbarkeit der Elektrokoagulation bei gebrauchten Bentonitsuspensionen. Gesamtziel dieser Forschungsarbeit, die aktuell bestehenden Separationsverfahren durch ein innovatives, neuartiges Verfahren zu optimieren und in ein neu zu entwickelndes Aufbereitungssystem einzubinden, kann nur in mehreren Schritten erfolgen. Die gesteckten Teilziele der zweiten Phase wurden erreicht.

Bei der optimalen Kombination der Betriebsparameter ist es durch die Elektrokoagulation möglich, den Einsatz von Konditionierungsmitteln zu reduzieren und sogar zu vermeiden. Der Verzicht auf Konditionierungsmittel sorgte für ein chemikalienarmes Filtratwasser, was den Qualitätsanforderungen für das Anmischen neuer Bentonitsuspension erfüllte. Das würde zu einer signifikanten Reduzierung des Wasserverbrauchs auf der Baustelle führen. Des Weiteren sind die Filterkuchen auch chemikalienarm, sodass sie bei der Deponierung eine geringere Belastung für die Umwelt verursachen würden.

Weitere Forschungsarbeiten sind nötig, um technische Lösungen für die Aufbereitung des Bentonits nach der Trennung zu finden, so dass es zum erneuten Anmischen von frischen und qualitativ hochwertigen Suspensionen verwendet werden kann. Nicht zuletzt sollte das Potenzial der Wiederverwendung von Wasserstoff untersucht werden.

# Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt .....	iii
Inhaltsverzeichnis .....	v
Abbildungsverzeichnis .....	vii
Tabellenverzeichnis .....	ix
Abkürzungsverzeichnis .....	x
Formerverzeichnis .....	xi
Zusammenfassung .....	xii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Aufgabenstellung .....	3
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen der Elektrokoagulation .....	5
2.2 Elektrochemische Eigenschaften des Bentonits .....	6
2.3 Elektrokoagulation von Bentonitsuspensionen .....	7
2.4 Bewertung der Effektivität des Prozesses .....	8
<b>3 AP3 .....</b>	<b>10</b>
3.1 EK-Laborzellen und Parameterstudien im Labormaßstab .....	10
3.2 Standard-Altsuspension .....	11
3.3 Scale-up und Entwicklung der EK-Prototypzelle .....	13
3.3.1 Literaturrecherche zum Scale-up .....	13
3.3.2 Scale-up Vorschläge .....	14
3.4 Versuchsaufbau in der Phase II des Projektes .....	16
3.4.1 Elektrokoagulationscontainer .....	16
3.4.2 Laborkammerfilterpresse (LKFP) .....	21
<b>4 AP4 .....</b>	<b>23</b>
4.1 Versuchsdurchführung .....	23
4.1.1 Anmischen der Suspension / Vorbereitung .....	23
4.1.2 Elektrokoagulation .....	23
4.1.3 Filtration .....	24
4.2 Parameterstudien .....	26
4.2.1 Referenzversuche (Ref) .....	26
4.2.2 Validierungsversuche (ES1) .....	28
4.2.3 Versuchsdauer (ES5) .....	32
4.2.4 Versuche mit Baustelle-Altsuspension (ES7) .....	33
<b>5 AP5 .....</b>	<b>35</b>

5.1	Umweltaspekt.....	35
5.2	Ökonomischer Aspekt.....	38
5.2.1	Zeitaspekt.....	38
5.2.2	Vergleich der Betriebskosten - EK und KM.....	41
<b>6</b>	<b>AP6.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>Anhang A1.....</b>	<b>A-1</b>
<b>10</b>	<b>Anhang A2.....</b>	<b>A-4</b>
<b>11</b>	<b>Anhang A3.....</b>	<b>A-7</b>
<b>12</b>	<b>Anhang A4.....</b>	<b>A-19</b>
<b>13</b>	<b>Anhang A5: Entwurf einer Ökobilanz (Paya, 2016).....</b>	<b>A-25</b>
13.1	Hintergrund: Definition und Struktur einer Ökobilanz.....	A-25
13.2	Ökobilanz eines konventionellen Entwässerungsprozesses mit einer Kammerfilterpresse.....	A-28
13.3	Ökobilanz eines Entwässerungsprozesses mit einer EK-Zelle.....	A-35
13.4	Ergebnisse und Diskussion.....	A-39
13.4.1	Ergebnisse Umweltwirkungen.....	A-39
13.4.2	Diskussion.....	A-42
13.5	Daten Ökobilanz.....	A-44
13.5.1	Daten über die Kammerfilterpresse.....	A-44
13.5.2	Daten über die EK-Zelle.....	A-46
13.5.3	Daten zu Methode CML („baseline“.....)	A-50
13.6	Literatur Ökobilanz.....	A-53

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: EK als Unterstützung der bestehenden Trenntechnik (links) oder als stand-alone Trennmethode (rechts).....	2
Abbildung 2: Zusammensetzung eines Montmorillonitpartikels [Ime17].....	6
Abbildung 3: Ladungsverteilung eines Bentonitpartikels [PS16].....	6
Abbildung 4: Auswirkung der Elektrokoagulation auf Bentonitsuspensionen [PST+18].....	7
Abbildung 5: Rechts: koagulierte Bentonit und Bodenpartikel an der Anode; links: Destabilisierte Restsuspension.....	8
Abbildung 6: EK-Zellen A, B und C [Pay16].....	10
Abbildung 7: EK-Zelle B (links) und der komplette Versuchsaufbau (rechts) [PST+18].....	10
Abbildung 8: Sieblinien der verwendeten Bodenmaterialien.....	13
Abbildung 9: Vereinfachtes elektrisches Schema der EK-Prototypzelle [Glu15].....	15
Abbildung 10: Zusammenstellung Containereinhalt [MH17].....	16
Abbildung 11: Steuerraum.....	17
Abbildung 12: Inhalt des Steuerraums: oben-links: Rührwerk Hany; oben-rechts: Steuerungspult; unten-links: Pumpe; unten-rechts: Bedienungspult der Gleichstromquelle.....	17
Abbildung 13: EK-Prototypzelle.....	18
Abbildung 14: Komponenten der EK-Zelle [MH17].....	19
Abbildung 15: Querschnitt durch die EK-Prototypzelle [MH17].....	20
Abbildung 16: Abstreifsystem [MH17].....	20
Abbildung 17: Aufbau der Laborkammerfilterpresse [MSE17].....	21
Abbildung 18: Öffnung in der Mitte der Filterplatte der LKFP.....	22
Abbildung 19: links: Laborkammerfilterpresse (LKFP); rechts: Versuchsaufbau mit automatischem Filtratwasserabgabe-Messsystem.....	22
Abbildung 20: Filtrationsdurchführung (FD) 1 (FD1).....	25
Abbildung 21: Filtrationsdurchführung 2 (FD2) mit der Zugabe an koaguliertem Material von der EK-Prototypzelle (FD2a) oder Zugabe an Konditionierungsmittel (FD2b).....	25
Abbildung 22: Filtrationsdurchführung 3 (FD3) mit der Alterung der Suspension (FD3a) oder Änderung der Temperatur (FD3b).....	25
Abbildung 23: Referenzversuche mit verschiedenen Dichten der SAS (1.22 t/m <sup>3</sup> , 1.20 t/m <sup>3</sup> und 1.26 t/m <sup>3</sup> ), ohne Zugabe an KM.....	27
Abbildung 24: Referenzversuche mit Zugabe an KM.....	27
Abbildung 25: Einfluss der Restsuspensionsdichte auf die Filtration.....	29

---

Abbildung 26: Einfluss der Restsuspensionsdichte auf die Filtration, mit Zugabe vom koagulierten Material.....	30
Abbildung 27: Einfluss der Stromdichte auf die Filtration, verschiedene Stromdichten.....	30
Abbildung 28: Einfluss der Stromdichte auf die Filtration, gleiche Stromdichte.....	31
Abbildung 29: Einfluss der Versuchsdauer auf die Filtration.....	31
Abbildung 30: Einfluss der EK-Versuchsdauer auf die Filtration.....	33
Abbildung 31: Zunahme der Filtratwasserabgabe durch EK – Baustellensuspension .....	34
Abbildung 32: Ende der Filtration - Kriterium 80%.....	39
Abbildung 33: Totvolumen in der EK-Prototypzelle.....	43

---

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Versuchsprogramm im AP2 [PST+18].....	11
Tabelle 2:	Zusammensetzung der SAS .....	12
Tabelle 3:	Eigenschaften der SAS .....	12
Tabelle 4:	Scale-up Parameter .....	14
Tabelle 5:	Durchgeführte Versuchsreihen und Anzahl an Versuchen .....	26
Tabelle 6:	Liste der Validierungsversuche mit ihren Betriebsparametern .....	28
Tabelle 7:	Betriebsparameter ES7 .....	34
Tabelle 8:	Eigenschaften einer B1 4%ige Bentonitsuspension angemischt mit dem Filtratwasser.....	37
Tabelle 9:	Zeit und Menge an FW, Kriterium 80% .....	39
Tabelle 10:	Vergleich der Filtrationsfälle Ref_KM und Best-Komb bezogen auf das Volumen an Filtratwasser .....	39
Tabelle 11:	Vergleich der Filtrationsfälle Ref_KM und Best-Komb bezogen auf das gesamte Volumen an filtrierte Suspension (Volumen des Filtratwassers + Kammervolumen in der LKFP) .....	40
Tabelle 12:	Filtrationszeiten einer KFP .....	40
Tabelle 13:	Betriebskosten EK.....	41
Tabelle 14:	KM-Kosten von Beispielprojekten .....	41
Tabelle 15:	KM-Kosten pro m <sup>3</sup> Altsuspension, Beispielprojekt A.....	42

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

AG.....	Aktien Gesellschaft
EK.....	Elektrokoagulation
EKC.....	Elektrokoagulationscontainer
FD.....	Filtrationsdurchführung
GmbH.....	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
KFP.....	Kammerfilterpresse
KM.....	Konditionierungsmittel
LKFP.....	Laborkammerfilterpresse
RfFk.....	Restfeuchte des Filterkuchens
RfKM.....	Restfeuchte des koagulierten Materials
SAS.....	Standard-Altsuspension
VwVwS.....	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe
WGK.....	Wassergefährdungsklassen

---

## Formelverzeichnis

E	[ ]	Element
I	[A]	Stromstärke
U	[V]	Spannung
R	[ $\Omega$ ]	Widerstand
m	[g]	Masse
z	[-]	Valenz der Ionen
F	[96485 As/mol]	Faraday'sche Konstante
t	[s]	Zeit
M	[g/mol]	Molmasse
pH	[-]	potentia Hydrogenii
B <sub>kt</sub>	[%]	Prozentualer Anteil an koaguliertem Boden
B	[g]	Koalierte Bentonit- und Bodenpartikel
B <sub>0</sub>	[g]	Gesamtrockengewicht Bentonit- und Bodenpartikel
$\Delta\rho$	[%]	Verringerung der Dichte der Restsuspension
$\rho_r$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte der Restsuspension
$\rho_w$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser
$\rho_0$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Anfangsdichte der Suspension
$\Delta FW$	[%]	Prozentuale Erhöhung der Filtratwasserabgabe
FW <sub>r</sub>	[ml]	Filtratwasserabgabe der Restsuspension
FW <sub>0</sub>	[ml]	Filtratwasserabgabe der Suspension vor EK
FeCl <sub>3</sub>	[-]	Eisen(III)-Chlorid
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	[-]	Aluminiumsulfat
LF	[ $\mu$ S/cm]	Leitfähigkeit

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Elektrokoagulation als neues Trennverfahren für gebrauchte Bentonitsuspensionen. Die Elektrokoagulation ist eine elektrochemische Trennungsmethode, die im Bereich der Abwasserreinigung bereits erfolgreich umgesetzt wurde.

Dieses Projekt umfasst die erste umfassende Untersuchung der Anwendbarkeit der Elektrokoagulation bei gebrauchten Bentonitsuspensionen. In der ersten Phase wurden umfangreiche Laborversuche durchgeführt. Nach einer Recherche über Skalierungsparameter wurde auf Basis der Erkenntnisse der Laborversuche ein neuartiger kleinmaßstäblicher Praxisprototyp mit dem Zellenvolumen von 300 Litern konstruiert und gebaut. Da Wasserstoff als Nebenprodukt während Elektrokoagulation entsteht, wurden bei der Konstruktion des Prototyps höchste Sicherheitsmaßnahmen eingesetzt.

Nach Inbetriebnahme des Prototyps folgte eine 18-monatige Versuchsphase. Verschiedene Betriebsparameter der Elektrokoagulation, wie z.B. die Stromstärke, der Abstand zwischen Elektroden, die Versuchsdauer und das Reinigungsintervall der Anoden, wurden untersucht. Es wurden sowohl eine standardisierte Altsuspension als auch eine Altsuspension von einer Baustelle untersucht. Nach jedem Elektrokoagulationsversuch wurde die Suspension in einer labormaßstäblichen Kammerfilterpresse entwässert, um die Auswirkung der Elektrokoagulation auf die Filtrationsleistung zu bestimmen. Als Referenzversuche wurden die Filtrationsversuche mit konventionellen, umweltschädlichen Konditionierungsmitteln durchgeführt, die auf den Baustellen für die Beschleunigung der Filtration eingesetzt werden. Die Ergebnisse wurden mithilfe der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Effektivitätsparameter bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Elektrokoagulation in der Lage ist, den Einsatz der Konditionierungsmittel zu reduzieren oder vollständig zu ersetzen. Bei der optimalen Kombination der Betriebsparameter bleiben die Betriebskosten vergleichbar mit den Kosten von konventionellen Entwässerungsmethoden. Mittels Elektrokoagulation werden der Suspension keine umweltschädlichen Stoffe zugegeben, was zu Einsparungen von bis zum 0.2 m<sup>3</sup> Wasser pro 1 m<sup>3</sup> Altsuspension und zu einer besseren Qualität der Filtrationsprodukte führt. Das Filtratwasser kann für das Anmischen einer neuen Suspension wiederverwendet werden, was einen ersten Ansatz für einen Recyclingkreislauf bietet.

Weitere Vorhaben beinhalten die Weiterentwicklung des Prototyps, die Erweiterung der Ergebnisdatenbank mit neuen Altsuspensionen und die Wiederverwendung des Wasserstoffs.

Das Projekt wurde von den Kooperationspartnern Herrenknecht AG, MSE Filterpressen GmbH, GeneSys Elektronik GmbH, Gebrüder Forster GmbH und Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az. 29349/02 gefördert.

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Bentonitsuspensionen sind stabile Mischungen aus Wasser und feinen Tonpartikeln. In der Bautechnik, insbesondere im Spezialtief- und Tunnelbau, werden sie als Stütz-, Gleit- und Fördermittel verwendet. Nach der Verwendung werden die Suspensionen in einer Separationsanlage behandelt. Bodenpartikel, die größer als ca. 0,02 mm sind, werden aus der Suspension entfernt. Feinpartikel wie Tone und Schluffe verbleiben in der Suspension, was zu einer stetigen Erhöhung der Dichte führt. Damit verliert die Bentonitsuspension ihre bautechnisch relevanten Eigenschaften, weshalb sie gegen eine frische Suspension ausgetauscht werden muss. Eine ausgetauschte Suspension - sog. Altsuspension - wird entwässert und die abgetrennten Feststoffe werden deponiert werden. [PST<sup>+</sup>18]

Die Feintrennung bzw. Entwässerung der Altsuspension geschieht in Kammerfilterpressen und Zentrifugen, was ein investitions- und betriebskostenaufwändiges Separationsverfahren ist. Dazu werden chemische Zusatzstoffe, wie anorganische Metallsalze und organische Polymere, eingesetzt. Diese chemische Behandlung von Suspensionen ist aus ökologischer Sicht problematisch, weil die dabei eingesetzten Chemikalien, insbesondere die organischen Polymere, im Schlamm zurückbleiben und mit ihm entsorgt werden müssen [Pay16; Sto95]. Darüber hinaus besteht ein Risiko der Unter- oder Überdosierung der Suspension mit Chemikalien, was dazu führt, dass diese nicht nur in den Schlamm, sondern auch in das Wasser gelangen [Pay16]. Diese Chemikalien sind nicht biologisch abbaubar [SF97]. [PST<sup>+</sup>18]

Zur umweltfreundlichen Unterstützung des Entwässerungsprozesses kann auch im bestehenden Separationsverfahren die Elektrokoagulation eingesetzt werden. Das elektrochemische Trennverfahren zur Entfernung von Stoffen aus wässrigen Lösungen beruht darauf, dass Gleichstrom durch Elektroden (Kathoden und Anoden) in einer flüssigen Lösung eingesetzt wird. Wenn die Lösung eine Bentonitsuspension ist, koagulieren die Bentonitpartikel von der Suspension an den Anoden. Daraufhin wird die verbleibende Suspension (Restsuspension) destabilisiert, was die Filtrationszeit in den Kammerfilterpressen reduziert und dadurch den Entwässerungsprozess optimiert. [PST<sup>+</sup>18]

Im Bereich der Abwasserreinigung/-aufbereitung wurde die Elektrokoagulation bereits eingesetzt und gilt als eine umweltfreundliche und kostengünstige Trennmethode [HBM99]. Diesbezügliche Forschungen [Don94; Hol02; BPO<sup>+</sup>06; GGB08] verwendeten niedrige Konzentrationen von Bentonit, bis zu 0,1%, um die Schwebstoffe im Abwasser darzustellen. Diese Konzentrationen sind jedoch deutlich niedriger als im Spezialtief- und Tunnelbau. [PST<sup>+</sup>18]. Erst im Rahmen dieses Forschungsprojekts, in seiner ersten Phase, wurde die

Elektrokoagulation der Bentonitsuspensionen mit bautechnisch relevanten Konzentrationen untersucht.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist es, die Anwendbarkeit der Elektrokoagulation auf Bentonitsuspensionen durch eine umfangreiche Studie unter Verwendung verschiedener Parameter sowohl im Labor- als auch im Großmaßstab nachzuweisen. Diese Trennmethode soll den konventionellen Entwässerungsprozess verbessern, indem die Elektrokoagulationstechnik in die bereits bestehende Trenntechnik integriert wird oder sogar den konventionellen Trennungsprozess durch ein neues Aufbereitungssystem auf Basis der Elektrokoagulationsmethode ersetzen wird.

Die Zielstellung der zweiten Antragsphase ist die Überführung der Elektrokoagulationstechnik vom kleinen Labormaßstab in einen Maßstab, der die technischen Anforderungen der Tunnelvortriebs-Praxis erfüllt, wie z.B. große Durchflussmengen oder inhomogenes Bodenmaterial, das von feinkörnigem, "klebrigem" Ton über Sande bis hin zu grobkörnigen Kiesen in der Suspension reicht. Es werden dabei grundsätzlich zwei Einsatzfälle für die Elektrokoagulationstechnik unterschieden. Im ersten Fall werden spezielle Elektrokoagulationszellen an definierten Punkten innerhalb des Separationskreislaufs zur Unterstützung der bestehenden Trenntechnik eingesetzt, wie beispielweise bei der Kammerfilterpresse, der Hydrozyklone und dem Waschsieb. Das Optimierungspotential der Elektrokoagulationstechnik hinsichtlich der Effektivität der bestehenden Trenntechniken kann im Labor eigenständig untersucht werden. Im zweiten Fall wird die Elektrokoagulation als stand-alone Anlage die Trennung der verwendeten Suspension realisiert. Es gilt hierbei, den Anforderungen aus der Praxis bezüglich Verweildauer in der Zelle, Trennpotential in Abhängigkeit von der Einwirkzeit, erforderlicher Durchflussmenge usw. gerecht zu werden.

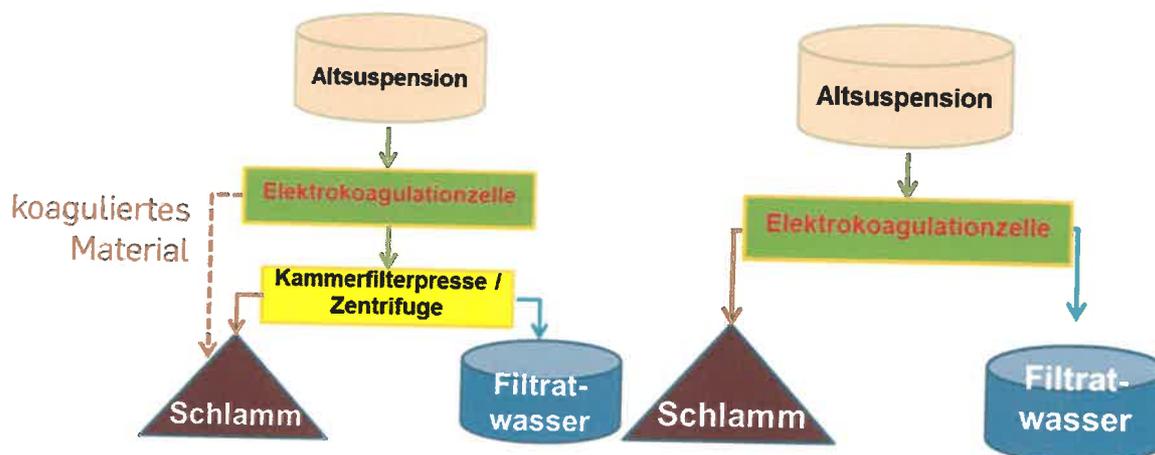


Abbildung 1: EK als Unterstützung der bestehenden Trenntechnik (links) oder als stand-alone Trennmethode (rechts)

In der zweiten Phase dieses Projektes erfolgten die Konstruktion und der Bau von praxistauglichen, kleinmaßstäblichen Praxisprototypen unter Berücksichtigung der wesentlichen Randbedingungen aus der Tunnelvortriebspraxis und der grundlegenden Erkenntnisse zur Elektrokoagulation aus der Projektphase 1.

Mithilfe der Praxisprototypen wurden anwendungsorientierte Laborversuche zum grundsätzlichen Nachweis der technischen Eignung des großmaßstäblichen Systems für die Vortriebsbaustelle und zur Untersuchung möglicher Optimierungspotentiale durchgeführt.

Begleitend zu den Versuchsreihen mit den Praxisprototypen wird eine Ökobilanzierung zur Bewertung der Auswirkungen des neu entwickelten Trennverfahrens auf die Umwelt durchgeführt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchsreihen fließen direkt in die Entwicklung und den Bau eines großmaßstäblichen Baustellen-Prototypen ein.

### 1.3 Aufgabenstellung

#### AP 3 Konstruktion kleinmaßstäblicher Praxisprototyp (HK / GeneSys / MSE / TLB)

Im diesem Arbeitspaket erfolgten die Entwicklung, die Konstruktion und der Bau eines Praxisprototyps. Die in AP 1 (Phase 1) gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen dienten als Grundlage für das Prototypen-Design. Hierbei ist in erster Linie ein empirisches Rechenmodell für die maßstäbliche Vergrößerung zu entwickeln. Der Aufbau sowie die Dimensionierung des Praxisprototypen im definierten Maßstab orientierte sich zudem an den in AP 2 (Phase 1) erarbeiteten Varianten zur Integration des Elektrokoagulationssystems im Separationsprozess (ausgeschleuster Bereich). Somit wurde der Einsatz der Praxisprototypen sowohl für Versuche im Labor als auch für den parallelen Betrieb in Bauvorhaben ermöglicht. Im Hinblick auf die Verifikation des sogenannten „Best practice“ wurden die jeweiligen Parameter-Einstellungen gezielt variiert

#### AP 4 Testphase kleinmaßstäblicher Praxisprototyp (TLB / Förster)

Im diesem Arbeitspaket erfolgte die Durchführung umfangreicher Testreihen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Prototyps unter variierenden Randbedingungen und Evaluierung des Optimierungspotentials des Trennverfahrens für den Einsatz auf der Baustelle.

Vorgehensweise:

#### a) Labor-Untersuchungen gemäß AP 1

- Verifikation des „Best practice“ und der Reproduzierbarkeit mit Bentonit-, Referenz- und Baustellen-Suspensionen
- Evaluation des empirischen Rechenmodells (ggf. Bestimmung von Korrektur-Faktoren)

#### b) Einsatz in Bauvorhaben

---

- Untersuchung der Varianten-Auswahl zur Integration des EK-Systems im Separationsprozess
- Untersuchung einer zusätzlichen Variante zur Prozesswasser-Aufbereitung

#### AP 5 Ökobilanzierung (TLB)

Die "Ökobilanz" beschreibt eine Methode zur Abschätzung der Auswirkungen des neu entwickelten Trennverfahrens mittels Elektrokoagulation auf die Umwelt unter Einbeziehung wirtschaftlicher und technischer Aspekte. Hierbei wurden die verschiedenen Stadien bei der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe Bentonit und Wasser bis zur Verwendung und Entsorgung als Stützmittel im maschinellen Tunnelvortrieb betrachtet.

Ein positiver Einfluss des neuen Trennverfahrens wird insbesondere bei folgenden Aspekten erwartet:

- Energieeinsparung durch Anwendung des neuen Trennverfahrens im Vergleich zur bestehenden Separationstechnik
- Optimierung der Effektivität der bestehenden Separationstechnik durch unterstützenden Einsatz der Elektrokoagulation
- Einsparung an eingesetzten Rohstoffen Bentonit und Wasser durch Wiederverwendung
- vollständiger Verzicht auf chemische Flockungsmittel
- vollständiger Verzicht auf hydraulische Bindemittel bei Eindickung des Deponieschlammes
- erhebliche Reduktion des Deponiebedarfs

#### AP 6 Designkonzeption großmaßstäblicher Baustellenprototyp (HK / MSE / GeneSys / TLB)

Ökologische und Ökonomische Effizienzberechnung für den Baustellenprototyp durch die gezielte Modellentwicklung aus empirisch ermittelten Designparametern einer EK-Zelle auf der Grundlage der Ergebnisse der Testreihen des kleinmaßstäblichen Praxisprototyps sowie den eruierten Skaleneffekten. Konzeption des Baustellenprototyps gemäß dem weiterentwickelten Rechenmodell für die maßstäbliche Vergrößerung.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Grundlagen der Elektrokoagulation

Das Prinzip der Elektrokoagulation (EK) basiert auf Redoxreaktionen, d.h. Oxidation an der Anode und Reduktion an der Kathode. Mindestanforderungen für diese Reaktionen sind eine Zelle mit einer wässrigen Lösung, zwei Elektroden (eine Anode und eine Kathode) und eine Stromquelle.

Die Kathode ist die negativ geladene Elektrode, die die Elektronen dem Elektrolyten zuführt und dadurch Reduktionsprozesse auslöst (Gleichung 1).



In der Gleichung stellt E ein Element (ein Atom, ein Ion oder ein Molekül) dar, das ein Elektron  $e^-$  gewinnt, wodurch seine Oxidationszahl reduziert wird.

Die Anode ist die positiv geladene Elektrode. Auf ihrer Oberfläche findet ein umgekehrter Prozess zur Reduktion statt, der Oxidation genannt wird. Das Element E verliert ein Elektron  $e^-$  und erhöht damit dessen Oxidationszustand (Gleichung 2).



Neben den elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden sind die Gesetze von Ohm und Faraday unerlässlich, um elektrochemische Prozesse zu verstehen und zu beschreiben. Das Ohm'sche Gesetz definiert das Verhältnis zwischen der Stromstärke  $I$  [A], der Spannung  $U$  [V] und dem Widerstand  $R$  [ $\Omega$ ] (siehe Gleichung 3):

$$I = \frac{U}{R} \quad (3)$$

Die Faraday'schen Gesetze der Elektrolyse beschreiben quantitativ den Zusammenhang zwischen Ladungsmenge und elektrochemischen Effekten. Das erste Gesetz besagt, dass die Masse einer an der Elektrode freigesetzten Substanz direkt proportional zur Menge an fließendem Strom ist. Das zweite Gesetz besagt, dass die Massen verschiedener Substanzen, die durch die gleiche Menge an Elektrizität freigesetzt werden, direkt proportional zu ihren elektrochemischen Äquivalentmassen  $M/zF$  sind. Beide Gesetze sind in der Gleichung 4 zusammengefasst.

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad (4)$$

wobei  $m$  [g] die Masse der an der Elektrode freigesetzten Substanz darstellt,  $M$  [g/mol] die Molmasse der Substanz ist,  $I$  [A] der elektrische Strom ist,  $t$  [s] die Zeit ist,  $z$  [-] die Valenz der Ionen der Substanz ist und  $F$  [96485 As/mol] die Faraday'sche Konstante ist. Mit dieser Gleichung kann die Menge der erzeugten Elektrolysegase und die Masse der gelösten Metallionen während des Elektrokoagulationsprozesses abgeschätzt werden. [PST+18]

## 2.2 Elektrochemische Eigenschaften des Bentonits

Bentonit besteht überwiegend (60 - 80 % der Masse) aus dem Tonmineral Montmorillonit [PS16]. Die Zusammensetzung eines Montmorillonitpartikels ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Schichtaufbau eines Montmorillonitplättchens besteht aus einer  $\text{AlO}_6$ -Oktaederschicht zwischen zwei  $\text{SiO}_4$ -Tetraederschichten [JL93]. Die Oberfläche des Montmorillonitpartikels ist negativ geladen [Las15; Olp63]. Die Ladung an den Ecken des Partikels ist pH-abhängig und kann sowohl negativ als auch positiv sein (Abbildung 3). [PST<sup>+</sup>18]

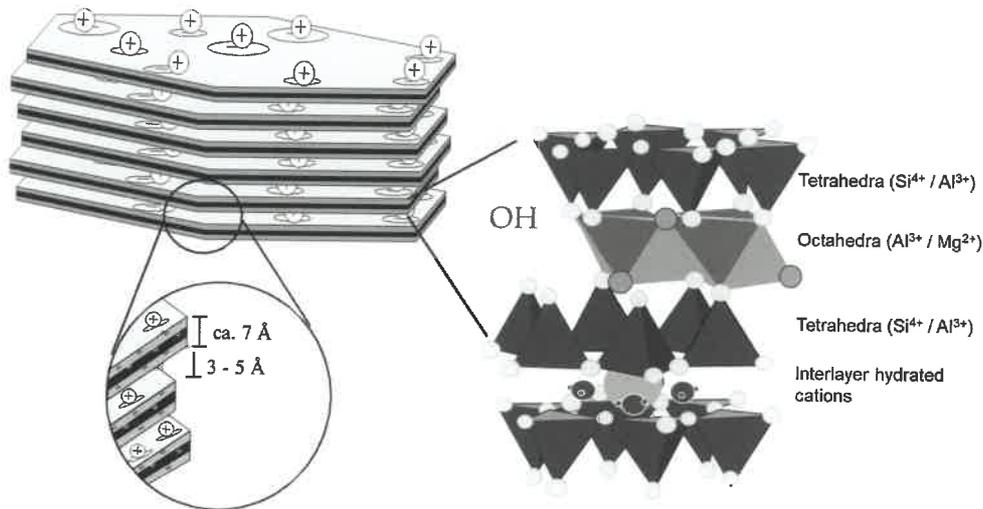


Abbildung 2: Zusammensetzung eines Montmorillonitpartikels [Ime17]

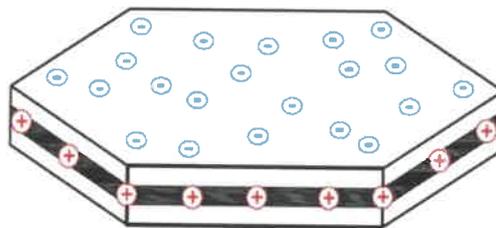
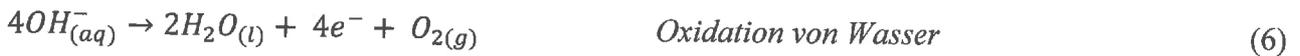


Abbildung 3: Ladungsverteilung eines Bentonitpartikels [PS16]

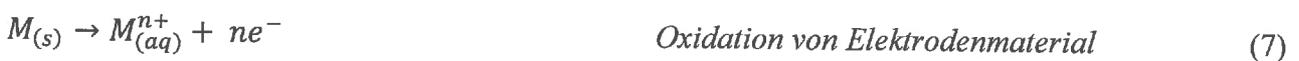
Im Wasser dispergierter Bentonit bildet eine kolloidale Suspension. Das Hauptmerkmal einer solcher Suspensionen ist ihre Stabilität, definiert als die Eigenschaft der Suspension, sich im Laufe der Zeit nicht bzw. so wenig wie möglich zu entmischen [Ste03]. Die Stabilität der kolloidalen Suspensionen resultiert aus der permanenten Brown'schen Bewegung [Let99] und den Abstoßungskräften zwischen den Plättchen, die zu einer gleichmäßigen Verteilung im Wasser führen [Olp63]. Die Stabilität einer Bentonitsuspension kann durch Sedimentations- oder Filtrationsversuche ermittelt werden. Letztere werden in der Regel auf Baustellen mit Hilfe einer API-Filterpresse nach API 13B-1, 2009 durchgeführt. [PST<sup>+</sup>18]

### 2.3 Elektrokoagulation von Bentonitsuspensionen

Die Elektrolyse von Wasser ist eine der zwei Hauptreaktionen bei der EK. Wassermoleküle durchlaufen Redoxreaktionen: Reduktion an der Kathode (siehe Gleichung 5) und Oxidation an der Anode (siehe Gleichung 6). Dadurch entsteht Wasserstoff an der Kathode und Sauerstoff an der Anode:



Die zweite Hauptreaktion ist die Auflösung der Anode durch Oxidation des Elektrodenmaterials. Diese Reaktion, bei der Metallionen entstehen, wird durch Gleichung 7 ausgedrückt:



wobei n für die Valenz eines Metalls M steht.

Der Koagulationsprozess mittels EK ist in Abbildung 4 skizziert. Da die Bentonitpartikel zum großen Teil aus dem Tonmineral Montmorillonit bestehen, das an mehr als 95% seiner Oberfläche eine negative Ladung trägt, stoßen sich die Bentonitpartikel in einer Suspension zuerst ab. Wegen dieses Abstoßens sind die Bentonitsuspensionen stabil und schwer zu entwässern. Aber, wenn der Gleichstrom angeschaltet wird, werden diese negative Partikel von der positiv geladenen Elektrode (Anode) angezogen. In unmittelbarer Nähe der Anode kommen sie in Kontakt mit Metallkationen, die die Partikel in der Suspension destabilisieren und koagulieren (Abbildung 4). Die Geschwindigkeit der Metallionenproduktion während des Prozesses und damit die Menge des Koagulationsmittels in der Lösung kann durch die Amperezahl nach dem Faraday'schen Gesetz gesteuert werden.

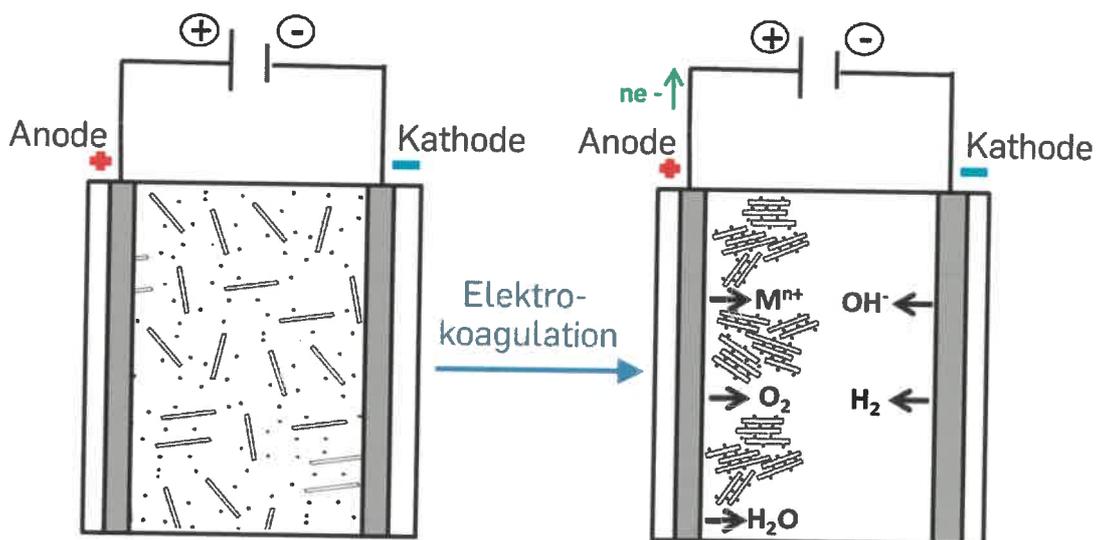


Abbildung 4: Auswirkung der Elektrokoagulation auf Bentonitsuspensionen [PST\*18]

## 2.4 Bewertung der Effektivität des Prozesses

Zusammenfassend lässt sich die Auswirkung der EK auf die Bentonitsuspensionen durch drei Haupteffekte beschreiben [PST<sup>+</sup>18]:

- Bentonitpartikel aus der Suspension koagulieren und agglomerieren auf der Anodenoberfläche. (Abbildung 5 links)
- Dichte der Restsuspension wird reduziert, wobei der Begriff "Restsuspension" eine Suspension definiert, die nach der Entfernung von koagulierten Partikeln entsteht.
- Restsuspension wird destabilisiert, d.h. die in der Suspension verbliebenen Partikel entmischen sich von selbst. Instabile Suspensionen können auch schneller filtriert werden. (Abbildung 5 rechts)



Abbildung 5: Rechts: koagulierte Bentonit und Bodenpartikel an der Anode; links: Destabilisierte Restsuspension

Diese Effekte werden mit Hilfe von im Rahmen dieses Projektes entwickelten Effektivitätsparametern bewertet, die bei [Pay16] und [PST<sup>+</sup>18] als folgend definiert wurden:

1) *Prozentualer Anteil an koagulierte Boden*  $B_{kt}$  (Gleichung 8) ist definiert als das Trockengewicht der koagulierten Bentonit- und Bodenpartikel  $B$  [g] im Verhältnis zum Gesamttrockengewicht der Partikeln in der Suspension  $B_0$  [g].

$$B_{kt} = \frac{B}{B_0} \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

2) *Verringerung der Dichte der Restsuspension*  $\Delta\rho$  beschreibt die Konvergenz der Dichte der Restsuspension  $\rho_r$  zu der Wasserdichte  $\rho_w$ , ausgedrückt durch die Gleichung 9

$$\Delta\rho = \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_w - \rho_0} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

wobei  $\rho_r$  [g/cm<sup>3</sup>] die Dichte der Restsuspension ist,  $\rho_0$  [g/cm<sup>3</sup>] die Dichte der Suspension vor der Elektrokoagulationsbehandlung und  $\rho_w$  [g/cm<sup>3</sup>] die Wasserdichte.

3) *Verringerung der Stabilität der Restsuspension*  $\Delta FW$  ist definiert als prozentuale Erhöhung der Filtratwasserabgabe nach der EK. Die Filtratwasserabgabe wurde mit der API-Filterpresse ermittelt und nach DIN 4127:2014-02 gemessen. Die Filtrationszeit betrug 7,5

Minuten. Dieser Parameter ist der einzige Effektivitätsparameter, der Werte von über 100 % erreichen kann (Gleichung 10):

$$\Delta FW = \frac{FW_r - FW_0}{FW_0} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

In der Gleichung 10 steht  $FW_r$  [ml] für die Filterwasserabgabe der Restsuspension und  $FW_0$  [ml] für die Filterwasserabgabe der Suspension vor der Elektrokoagulationsbehandlung.

Die obengenannten Parameter wurden für die Bewertung der Laborversuche entwickelt und für die Versuche im Großmaßstab (Kapitel 4, AP4) weiterverwendet. Da es jedoch in der zweiten Phase des Projekts eine Kammerfilterpresse im Labormaßstab (Kapitel 3.4.2) gab, konnte die Filtrationsleistung bzw. die Verringerung der Stabilität der Restsuspension noch genauer analysiert werden.

Die Filtration in der labormaßstäblichen Kammerfilterpresse dauerte zwei bis vier Stunden unter dem Filtrationsdruck von 14-15 bar. Die Messungen der Filtratwasserabgabe wurden im Sekundentakt dokumentiert. Damit war es möglich, die Zunahme der Filtratwasserabgabe bis zum Ende der Filtration jederzeit zu bestimmen und mit den Referenzversuchen zu vergleichen. Für die Analyse der Filtratwasserabgabe mit der labormaßstäblichen Kammerfilterpresse wurden folgende Parameter in diesem Bericht verwendet:

$T(x)$  – Filtratwasserabgabe in der x. Minute des Filtrationsversuchs

$FW$  Abgabe – endgültige Filtratwasserabgabe (nach zwei bzw. vier Stunden)

Neben diesen Parametern wurde unter anderem auf die Restfeuchte des koagulierten Materials an den Anoden ( $RfKM$ ) und die Restfeuchte des Filterkuchens ( $RfFk$ ) eingegangen.

### 3 AP3

#### 3.1 EK-Laborzellen und Parameterstudien im Labormaßstab

In der ersten Phase des Projektes wurden drei EK-Laborzellen entwickelt. Die Zellen sind so konzipiert, dass die grundlegenden Betriebsparameter der EK im Labormaßstab untersucht werden können. Jede Zelle bietet unterschiedliche Elektrodenoberflächen. Die Anzahl Elektroden, ihr Material und ihre Abstände in der Zelle sind verstellbar

Die drei Zellen A, B und C (Abbildung 6) wurden aus Acrylglas gebaut. Alle drei haben eine Kapazität von 2 Liter Suspension und verfügen über Schlitze, in denen die Elektroden parallel zueinander in exakten Abständen von 0,5 cm bis zu 6,5 cm mit einer Schrittweite von 1 cm platziert werden können. Die Zellen können sowohl im Ruhe-Zustand als auch unter der kontinuierlichen Strömung der Suspension betrieben werden.

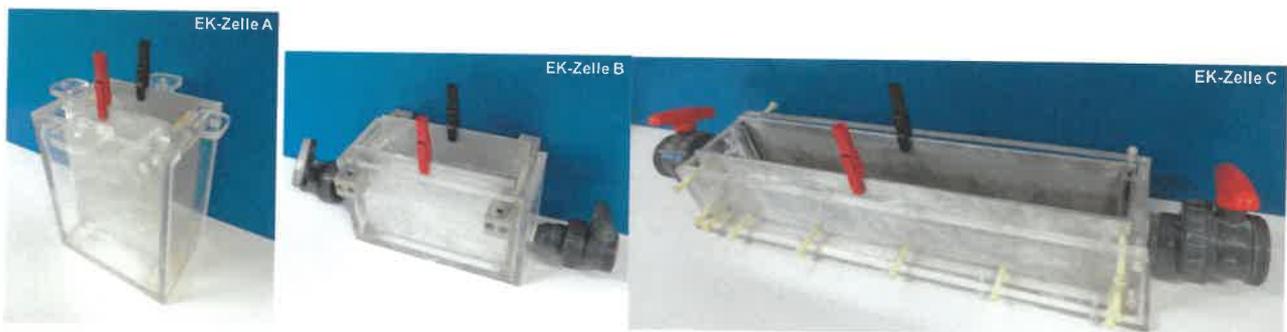


Abbildung 6: EK-Zellen A, B und C [Pay16]

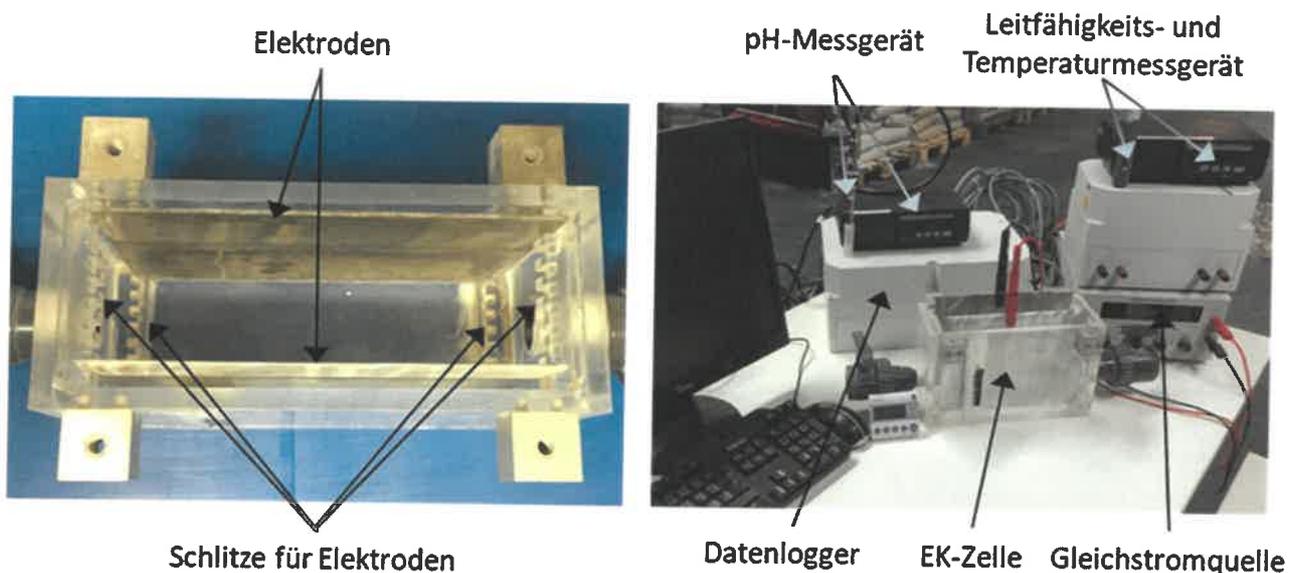


Abbildung 7: EK-Zelle B (links) und der komplette Versuchsaufbau (rechts) [PST<sup>+</sup>18]

Die Elektroden bestehen aus Metallplatten, die mit ihrer Form den Wänden der Zelle folgen. In Bezug auf das Elektrodenmaterial wurden Aluminium, Stahl, Edelstahl, Messing und Kupfer untersucht, da diese Materialien die am häufigsten verwendeten Materialien in der EK-

Literatur sind. Eine Gleichstromquelle mit einer Leistung von 5 A und 65 V ist mit den Elektroden verbunden. Der vollständige Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 1 zeigt die durchgeführten Parameterstudien mit den Laborzellen. Die Betriebsparameter, die zur höchsten Effektivität der EK geführt haben, bildeten die Grundlagen zur Skalierung. (Kapitel 3.3).

**Tabelle 1: Versuchsprogramm im AP2 [PST\*18]**

<b>Versuchsprogramm</b>	
<b>Einfluss des Aufbauparameters der EK-Zelle</b>	<b>Einfluss der Betriebsart der EK-Zelle</b>
Geometrie	Strömungszustand
Elektrodenoberfläche	Ruhe-Zustand
Elektrodenmaterial	Turbulente kontinuierliche Strömung
Elektrodenabstand	Laminare kontinuierliche Strömung
Stromstärke	Verweildauer
Anzahl an Elektroden	Mechanische Reinigung der Elektroden
Elektrische Schaltung der Elektroden	Elektrische Reinigung der Elektroden
<b>Einfluss der Bentoniteigenschaften</b>	<b>Wirkung der EK auf die Stabilität der Bentonitsuspension</b>
Konzentration Bentonit W	Absetzversuch
Aufladung	

Die Versuche in der ersten Phase des Projektes wurden mit einer 2.5%igen Bentonitsuspension Typ W ohne Aufladung (Zugabe kleiner Bodenpartikel) durchgeführt. In dieser Phase wurde, vor dem Bau des EK-Prototyps und den Versuchen im Großmaßstab, eine aufgeladene Bentonitsuspension entwickelt. Mit dieser Suspension wurde zuerst ein Großteil des Versuchsprogramms im Labormaßstab wiederholt, um die Ergebnisse der ersten Phase zu validieren. Danach diente die Suspension als eine Standard-Altsuspension bei den Versuchen im Großmaßstab.

### **3.2 Standard-Altsuspension**

Altsuspensionen von Baustellen können deutlich unterschiedliche Parameter aufweisen. Zunächst einmal hängt die Zusammensetzung der Altsuspension von der Bodenbeschaffenheit ab. So kann es nicht nur von Baustelle zu Baustelle, sondern auch bei gleichem Tunnelprojekt unterschiedlich sein, wenn die Tunnelbohrmaschine während eines Vortriebs

durch verschiedene Bodenschichten gefahren wird. Allen diesen Suspensionen ist gemeinsam, dass sie mit kleinen Bodenpartikeln beladen sind und eine Dichte von meist  $>1.20 \text{ t/m}^3$  aufweisen. Zum Vergleich, die Dichte einer neuen Suspension beträgt  $1,02 - 1,05$ .

Um die Betriebsparameter der EK mit einer aufgeladenen Bentonitsuspension zu testen, wurde eine repräsentative Suspension für Altsuspensionen von Baustellen entworfen. Die Suspensionsdichte beträgt  $1,25 \text{ t/m}^3$ . Die Sieblinie wurde so konzipiert, dass sie der Altsuspension von einer Baustelle A in Deutschland ähnelt, wo gerade eine Metrolinie gebaut wurde. Um die Partikelgrößenverteilungskurve aus dieser Suspension und der gewählten Dichte von  $1,25 \text{ t/m}^3$  zu simulieren, wurde eine Suspension mit B1-Bentonit, aufgeladen mit feinen Partikeln erstellt. Feine Partikel werden mit einer Kaolintonart namens Kaolin W und Quarzmehlarten M500 und M300 dargestellt. Datenblätter zu den oben genannten Produkten befinden sich in Anhang A1 (Kapitel 9). Diese im Labor hergestellte Altsuspension wurde als Standard-Altsuspension (SAS) bezeichnet. Ihre Zusammensetzung ist in Tabelle 2 und ihre Eigenschaften sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Sieblinie von Kaolin W, M500, M300 und der Suspension von der Baustelle A sind in Abbildung 8 dargestellt.

**Tabelle 2: Zusammensetzung der SAS**

Material	Gewicht (g/l)	Volume (cm <sup>3</sup> /l)
Bentonit	40,0	17,4
Kaolin	60,0	23,1
M 500	200,0	75,5
M 300	120,0	45,3
Wasser	838,8	838,8
<b>Dichte</b>	<b>1,259</b>	

**Tabelle 3: Eigenschaften der SAS**

Eigenschaften der SAS		
Marschzeit (s)	$t_{m1000}$	$t_{m15000}$
Filtratwasserabgabe (mg)	18,4	
Filterkuchendicke (mm)	2,2	
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,259	
Leitfähigkeit ( $\mu\text{S/cm}$ )	1270	
pH-Wert	<b>9</b>	

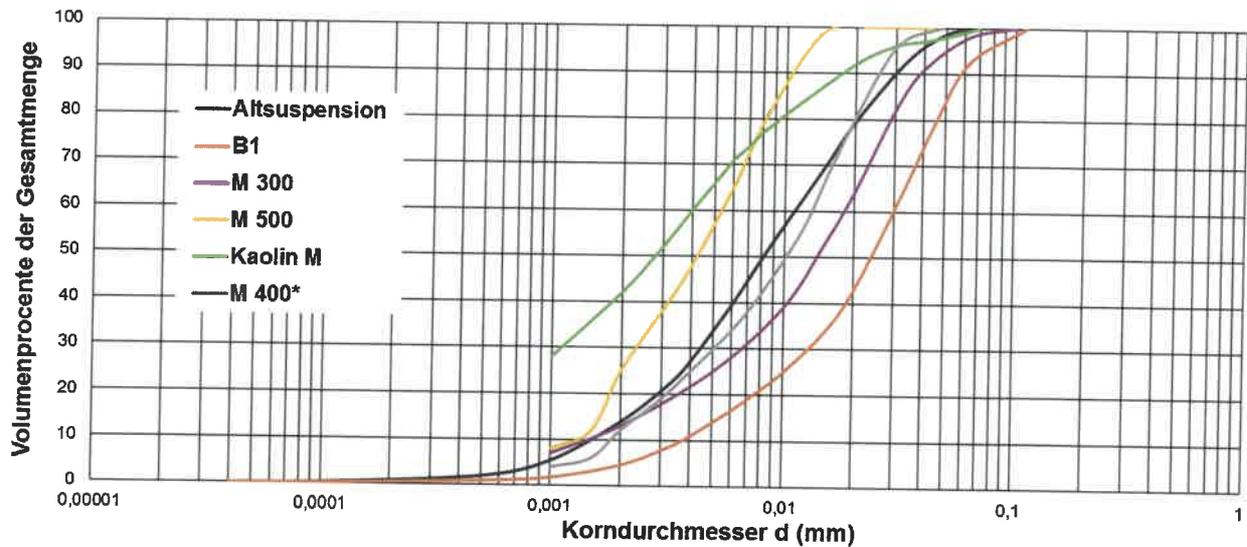


Abbildung 8: Sieblinien der verwendeten Bodenmaterialien

### 3.3 Scale-up und Entwicklung der EK-Prototypzelle

#### 3.3.1 Literaturrecherche zum Scale-up

Vor dem Bau des Prototyps erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche über die Parameter, die bei der Vergrößerung des Maßstabs einer EK-Zelle betrachtet sein müssen. Laut [Wal93] und [Hol02; HBM99] sind diese Parameter Stromstärke, Elektrodenoberfläche, und Stromdichte.

Die Stromstärke bestimmt die Geschwindigkeit der Reaktion, d.h. die Menge an aufgelösten Metallkationen aus der Anode und die Menge an entstehendem Wasserstoff. Die Elektrodenoberfläche stellt die verfügbare Reaktionsstelle dar. Bei der Erweiterung einer elektrochemischen Zelle können die Werte der obengenannten Faktoren von  $10^{-10} \text{ m}^2$  bis über  $10^3 \text{ m}^2$  und von  $10^{-9} \text{ A}$  bis über  $10^4 \text{ A}$  [Wal93] betragen. [Pay15]

Der Parameter Stromdichte entspricht dem Verhältnis von Stromstärke zur Elektrodenoberfläche. Die Stromdichte ist ein Indikator für die Geschwindigkeit der Reaktion bezogen auf die verfügbare Reaktionsstelle [Hol02]. Nach einer detaillierten Literaturrecherche von Holt liegen die berichteten Werte der Stromdichte bei EK zwischen  $0,001$  und  $200 \text{ mA/cm}^2$  [Hol02]. Die am häufigsten berichteten Werte liegen im Bereich zwischen  $1$  und  $15 \text{ mA/cm}^2$  [HBM99]. [Pay15]

### 3.3.2 Scale-up Vorschläge

Nach der Durchführung aller Versuchsreihen wurde die folgende Kombination der Betriebsparameter als Grundlage für das Scale-Up vorgeschlagen:

- EK-Zelle                                    B / C
- Stromstärke                                2 A / 2 A
- Stromdichte:                                94 A/m<sup>2</sup> / 72 A/m<sup>2</sup>
- Elektrodenmaterial:                        Aluminium
- Betriebsart:                                 Ruhe-Zustand
- Versuchsdauer:                             30 min
- Reinigung:                                 Mechanisch
- Elektrodenanordnung:                    4 Elektroden in Parallelschaltung

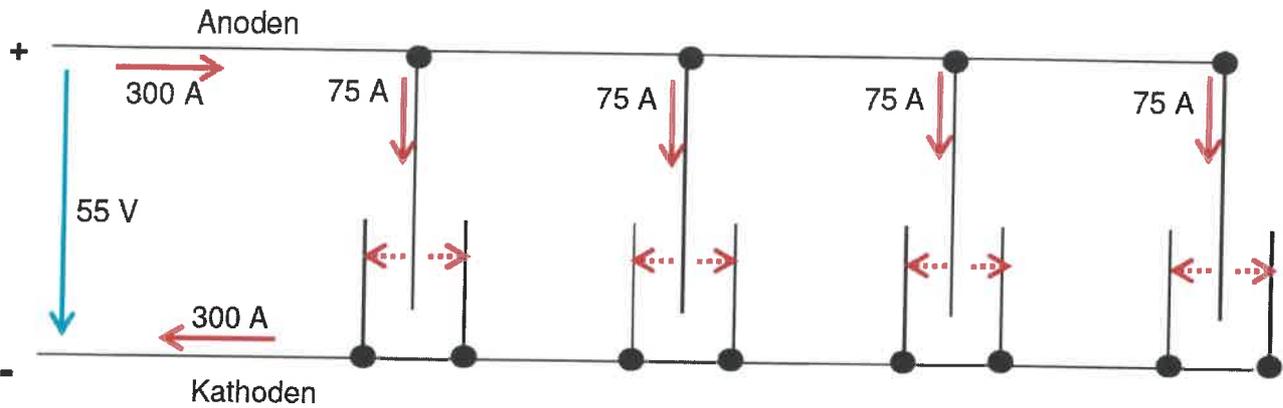
Mit diesen Parametern wurden mit der Laborzelle folgende Ergebnisse erreicht: 50% des Bentonits hat koaguliert (Bkt), die Dichte der Restsuspension ( $\Delta\rho$ ) wurde um 80% reduziert und die Suspension wurde destabilisiert, was sich durch eine 100%ige Zunahme der Filtratwasserabgabe ( $\Delta FW$ ) innerhalb von 7.5 Minuten gezeigt hat. Entwicklung der EK-Prototypzelle

Im Anschluss an die Untersuchung der optimalen Betriebsparameter im Labormaßstab und der Feststellung der Scale-up Parameter wurde eine größere EK-Zelle gebaut. Diese Zelle wurde als EK-Prototypzelle bezeichnet.

Die Grundlagen für das Scale-up zu einer größeren EK-Zelle waren die Zell- und Betriebsparameter der EK-Laborzelle B. Die Skalierung erfolgte durch Vergrößerung der Elektrodenoberfläche, des Volumens der Zelle und der verfügbaren Stromstärke. Das elektrische Schema ist in Abbildung 9 dargestellt.

**Tabelle 4: Scale-up Parameter**

Parameter	EK-Laborzelle B		EK-Prototypzelle	
Elektrodenoberfläche (1 Elektrodenpaar) (cm <sup>2</sup> )	212		18600	
Volumen der Zelle (cm <sup>3</sup> )	2000 (2l)		300 000 (300l)	
Elektrodenoberfläche zu Behältervolumen (cm <sup>2</sup> / cm <sup>3</sup> )	0,106		0,106	
Stromstärke (A)	1	2	150	300
Stromdichte (mA/cm <sup>2</sup> )	4,7	9,4	4,7	9,4
Stromdichte (mA/cm <sup>3</sup> ) (A/l)	0,5	1,0	0,5	1,0



**Abbildung 9: Vereinfachtes elektrisches Schema der EK-Prototypzelle [Glu15]**

Leichte Unterschiede zwischen der EK-Laborzelle B und der EK-Prototypzelle traten aus konstruktiven und sicherheitstechnischen Gründen auf. Die größten Designunterschiede sind:

- Die Elektroden sind vollständig mit einer Suspension bedeckt.
- Die Elektroden sind rund geformt und die Zelle ist mit automatischen Reinigungsmechanismen ausgestattet.

Der erste Unterschied resultierte aus den erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen, da die Erzeugung von Wasserstoff ausreichte, um eine explosive Atmosphäre zu erzeugen. Anstatt die Atmosphäre in der Zelle zu inertisieren, wurde das System so konzipiert, dass alle möglichen Zündquellen vermieden werden konnten. Erreicht wurde dies durch die Vermeidung des Kontakts von Elektroden und anderen spannungsführenden Teilen mit explosionsgefährdeter Atmosphäre in der Zelle, indem die Elektroden während des Experiments mit Suspension bedeckt wurden.

Der zweite Unterschied ergab sich aus der Absicht, das koagulierte Material während der Experimente von der Elektrodenoberfläche abkratzen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Abstreifsystem in die Zelle integriert. Die Anoden wurden rund geformt mit einer Hohlwelle, die von Außerhalb der Zelle mithilfe eines Getriebemotors gedreht werden kann. Während der Rotation kratzten Abstreifer das koagulierte Material von der Oberfläche der Anoden ab.

Die EK-Prototypzelle zusammen mit kompletter Ausstattung zum sicheren Betrieb des EK-Prozesses befindet sich in einem speziell dafür gefertigten Versuchscontainer. Weitere Details über den endgültigen Versuchsaufbau sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

### 3.4 Versuchsaufbau in der Phase II des Projektes

Der vollständige Versuchsaufbau besteht aus einem Elektrokoagulationscontainer (EKC) und einer Laborkammerfilterpresse (LKFP). Der Bau der Anlage erfolgte in Kooperation mit Partnern dieses Projektes. Die Herrenknecht AG aus Schwanau und die GeneSys Elektronik GmbH aus Offenburg übernahmen den Bau des EKC. Die Firma MSE-Filterpressen aus Remchingen lieferte die LKFP, eine labormaßstäbliche Kammerfilterpresse. Die beiden Komponenten des Versuchsaufbaus werden in folgenden Abschnitten näher beschrieben.

#### 3.4.1 Elektrokoagulationscontainer

Die komplette Ausrüstung für den sicheren und funktionalen EK-Prozess wurde in einen standardmäßigen Baustellecontainer integriert. Er wurde vor dem Labor des Lehrstuhls für Tunnelbau und Baumanagement der Ruhr-Universität Bochum gestellt, wo alle in diesem Bericht vorgestellten Experimente durchgeführt wurden.

Die Abmessungen des Containers betragen ohne Schornstein 6,06 m x 2,44 m x 2,59 m (LxBxH) bzw. 4,30 m Höhe inklusive Schornstein. Der EKC ist durch eine geschweißte Stahlwand in zwei Räume unterteilt. Der erste Raum ist ein Steuerraum, in dem die Suspension vorbereitet und der gesamte Prozess gesteuert wird. Im zweiten Raum, der als EK-Raum bezeichnet wird, befindet sich die EK-Zelle mit einem Gesamtvolumen von 320 Litern. Die Konstruktionszeichnung des Containers ist in Abbildung 10 dargestellt.

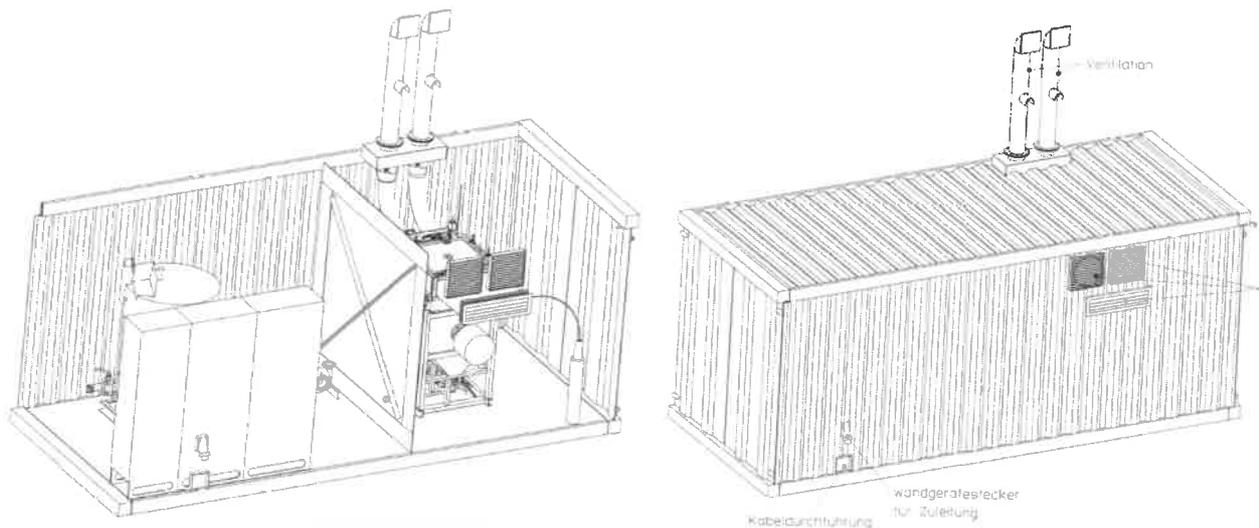


Abbildung 10: Zusammenstellung Containereinhalt [MH17]

#### Steuerraum

Der Steuerraum (Abbildung 11) besteht aus einem Rührwerk mit einem Volumen von 800 Litern, einer Pumpe, einem Schaltschrank mit Bedienpult für allgemeine EKC-Funktionen und einer Gleichstromquelle mit 300 A und 55 V mit angeschlossenen Touchscreen für die Steuerung des EK-Prozesses (Abbildung 12). Neben dieser Hauptausrüstung gibt es eine

Dräger-Steuerbox für Wasserstoffsensoren, eine Klimaanlage für den Schrank, eine Beleuchtung und Leitungen, die das Rührwerk mit der Pumpe und der EK-Zelle im EK-Raum verbinden.

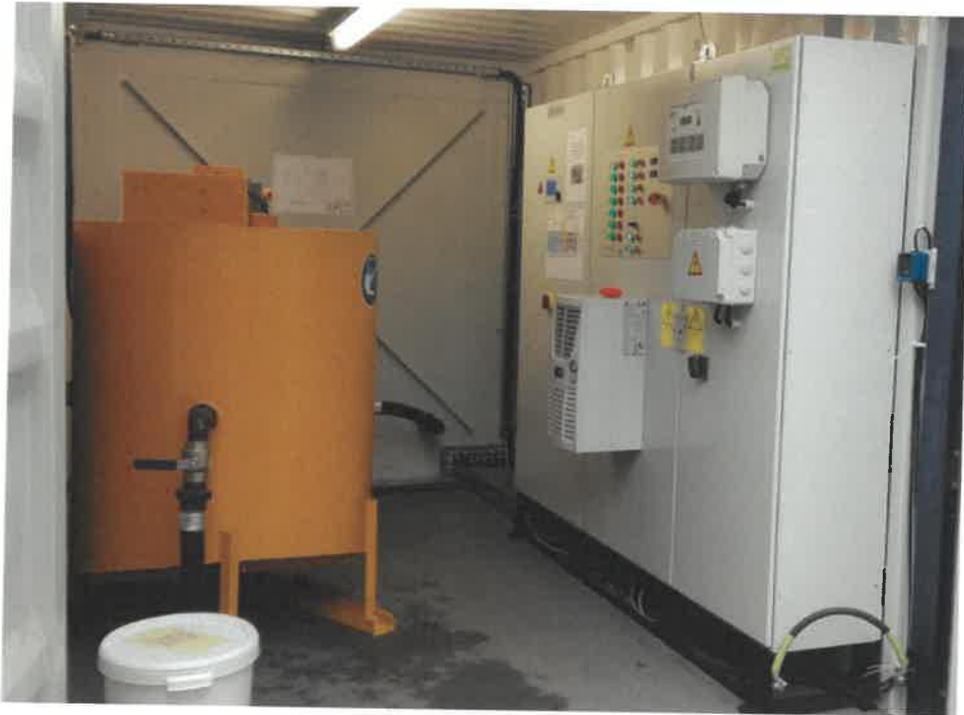


Abbildung 11: Steuerraum

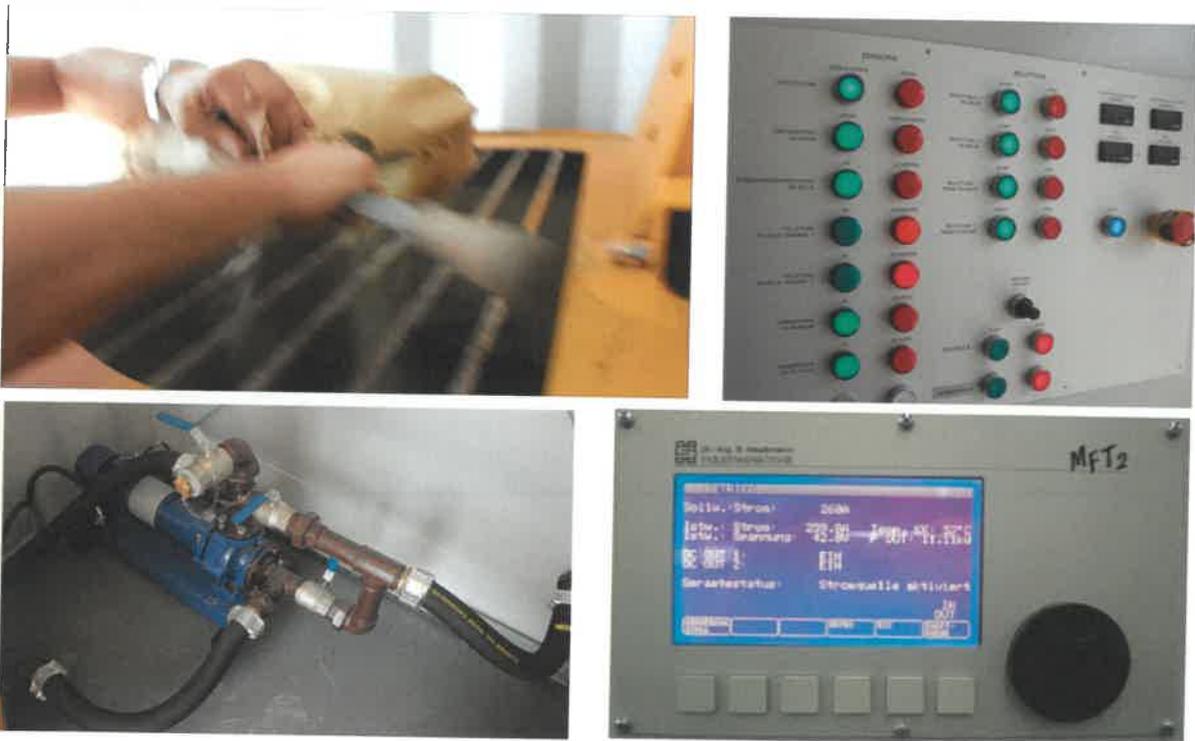


Abbildung 12: Inhalt des Steuerraums: oben-links: Rührwerk Hany; oben-rechts: Steuerungspult; unten-links: Pumpe; unten-rechts: Bedienungspult der Gleichstromquelle

## EK-Raum

Das Hauptgerät im EK-Raum ist die EK-Zelle 320. Neben der EK-Zelle ist der Raum mit einem Wasserstoffsensoren, der Ventilation, den Türsensoren, einer Normal- und einer Notbeleuchtung, einer Steuerbirne für die Pumpe und einem kleinen Drucktank ausgestattet

## EK-Prototypzelle

Die Zelle besteht aus zwei baugleichen Kammern mit je einem Füllvolumen von 160 Litern. In jeder Kammer befinden sich 2 Anoden und 4 Kathoden, wobei jeweils eine Anode zwischen zwei Kathoden angeordnet ist (Abbildung 13). Die Elektroden sind kreisförmig mit einem Durchmesser von 70 cm. Jede Kammer verfügt über fünf Entnahmestellen (Kugelhähne in Abbildung 13 rechts). Diese Entnahmestellen ermöglichen die Analyse der Suspension in verschiedenen Höhen der Zelle. Die Komponenten der EK-Prototypzelle sind in Abbildung 14 dargestellt.

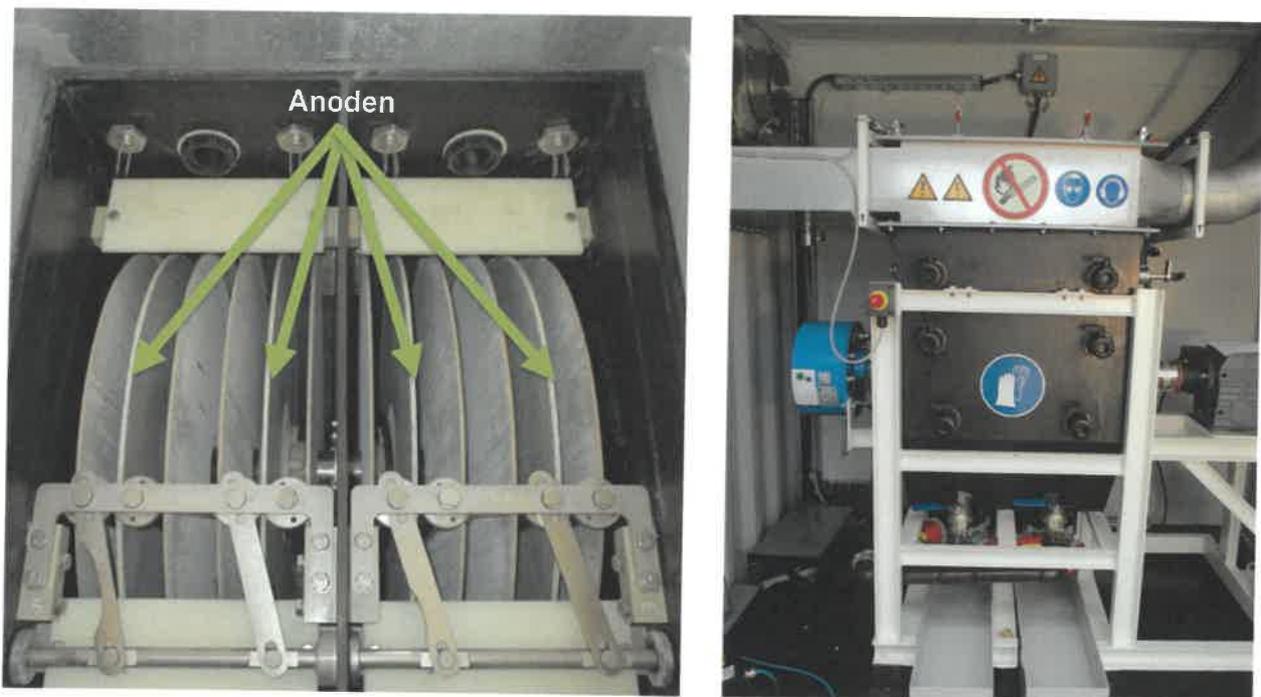
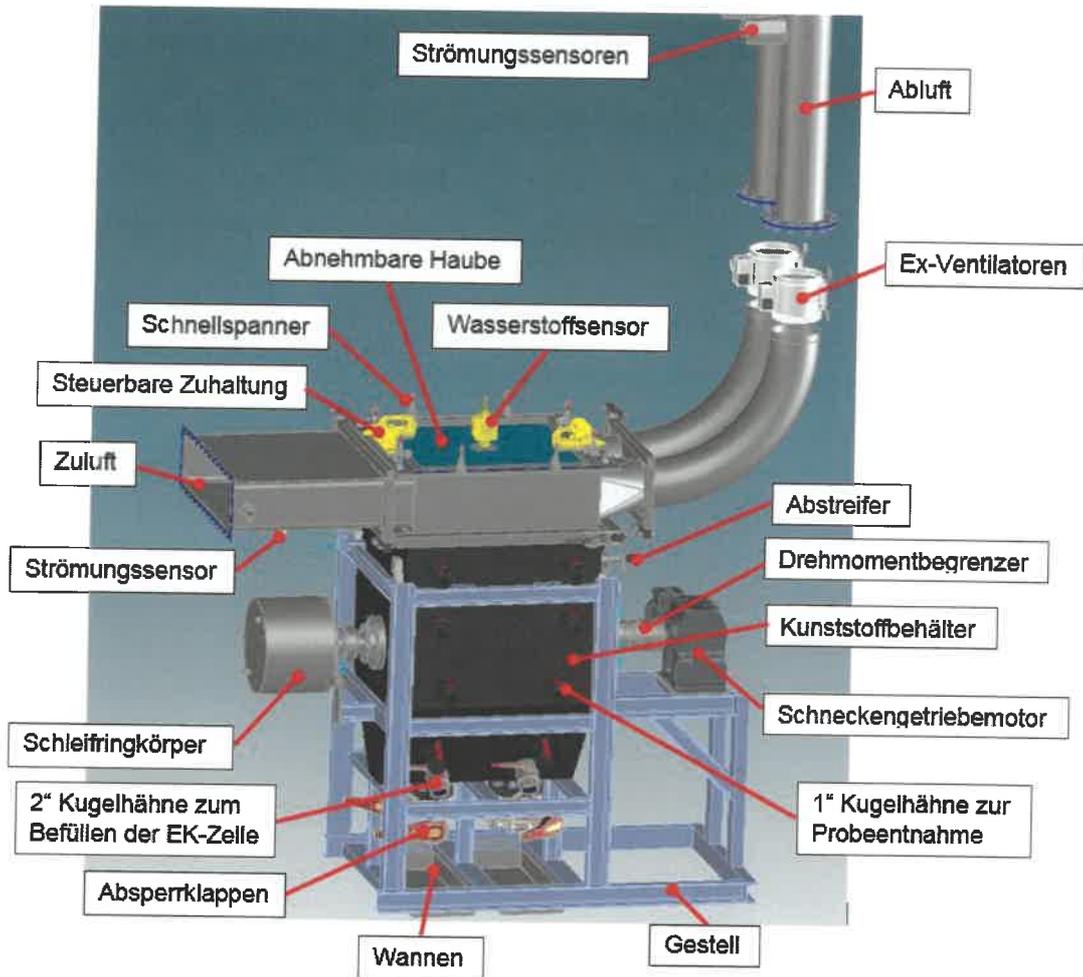


Abbildung 13: EK-Prototypzelle



**Abbildung 14: Komponenten der EK-Zelle [MH17]**

Eine Hohlwelle in der Zelle geht durch die Mitte der Elektroden (Abbildung 15). Anoden sind an ihr befestigt und werden über sie mit Strom versorgt. Die Welle ist außen an einem Getriebemotor befestigt, der die Welle, und damit auch die Anoden, drehen kann. Abstreifer, die im unteren Teil der Zelle installiert sind (Abbildung 16), streifen das koagulierte Material von den Anoden während der Rotation ab und reinigen damit die Oberfläche der Anoden.

Kathoden hingegen sind nicht an der Welle befestigt und drehen sich nicht. Stattdessen werden sie auf die Schlitze in der Zelle gelegt, die in Abständen von 4,5, 5,5 und 6,5 cm von beiden Seiten jeder Anode aufgebaut sind. Die Änderung des Elektrodenabstands erfolgt durch Anheben der Kathode und Platzieren dieser in einem anderen Schlitz. Um das zu ermöglichen, besitzen die Kathoden im Teil direkt unter der Welle eine Aussparung.

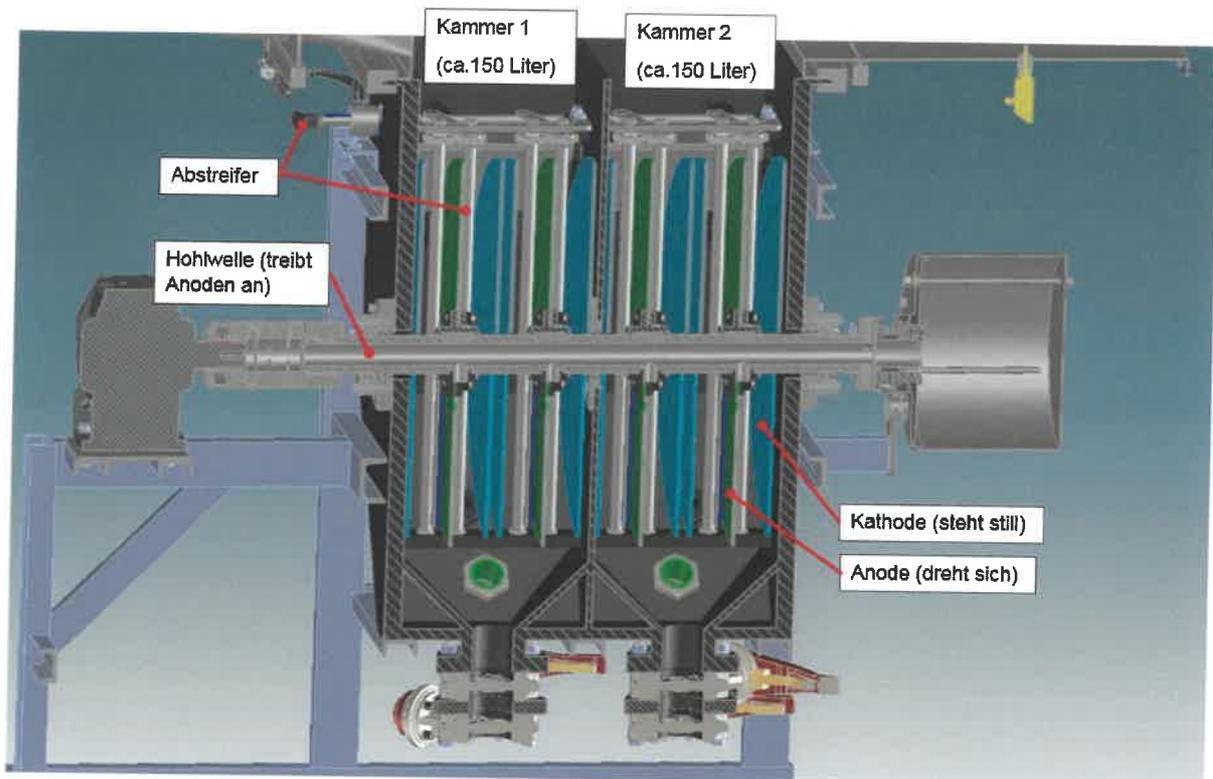


Abbildung 15: Querschnitt durch die EK-Prototypzelle [MH17]

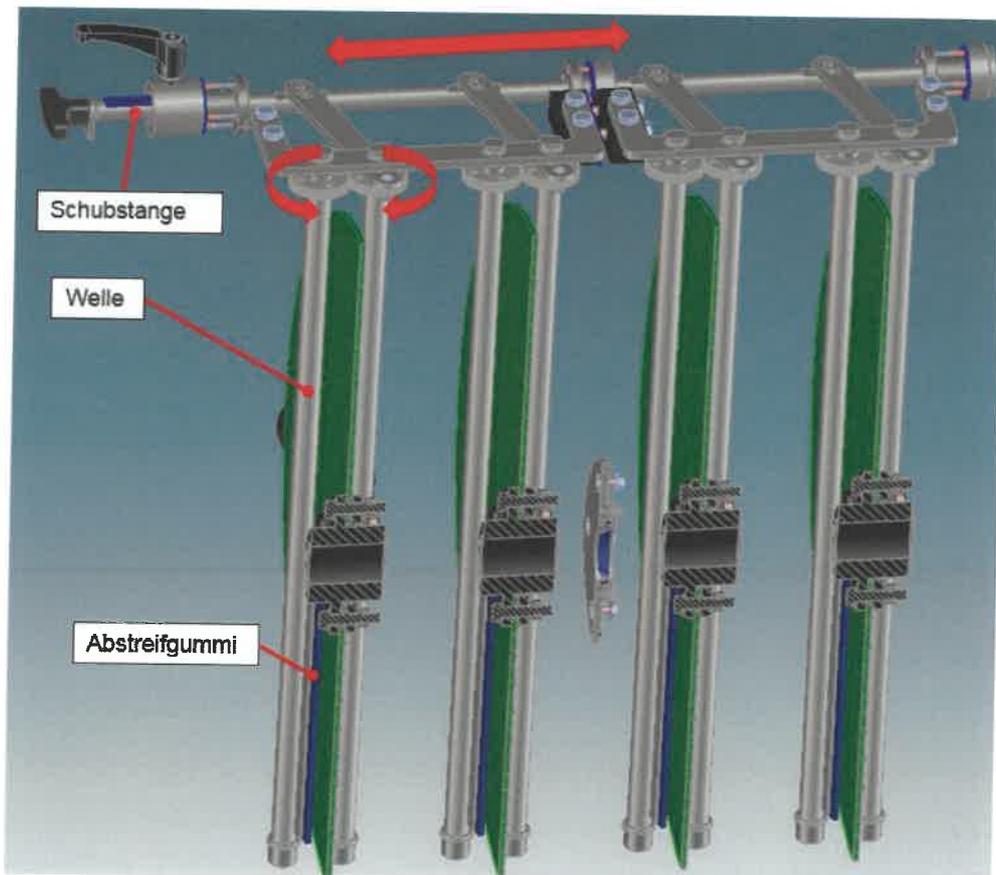


Abbildung 16: Abstreifsystem [MH17]

### Betriebsparameter der EK-Prototypzelle

Das Design der Zelle ermöglicht eine umfassende Parameterstudie mit folgenden Betriebsparametern:

- Stromstärke kann zwischen 1 und 300 A variiert werden
- Drehzahl bzw. Reinigungsintervall der Anoden liegt zwischen 0 und  $0,45 \text{ min}^{-1}$
- Elektrodenabstand kann zwischen 4,5, 5,5 und 6,5 cm eingestellt werden
- Es gibt keine technische Begrenzung für die Dauer des EK-Versuchs

### 3.4.2 Laborkammerfilterpresse (LKFP)

Der Aufbau der LKFP ist in Abbildung 17 dargestellt. Die LKFP besteht aus zehn Kammern mit einem Gesamtvolumen von 8 Litern und einer Filterfläche von  $0,92 \text{ m}^2$ .

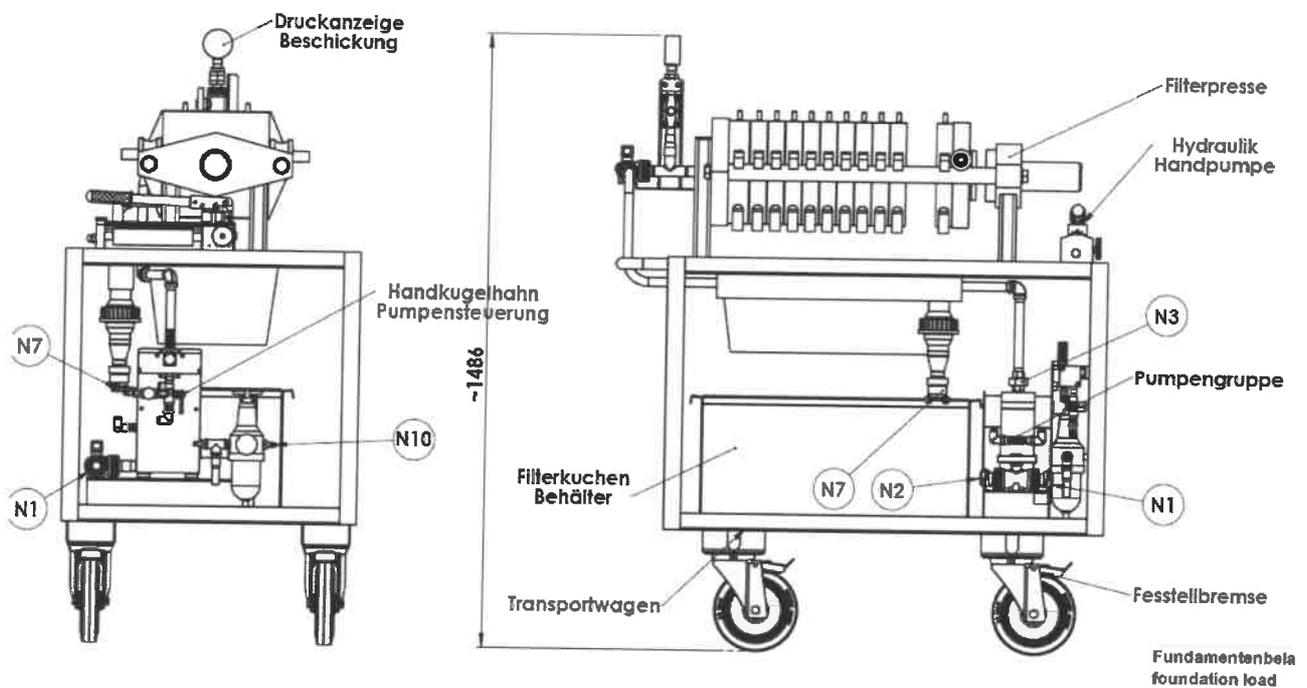


Abbildung 17: Aufbau der Laborkammerfilterpresse [MSE17]

Das Prinzip der Presse beruht darauf, dass beim Zusammenpressen der Filterplatten zwischen ihnen zehn Kammern mit jeweils einem Volumen von 0,8 Litern entstehen. Die Suspension fließt durch eine Öffnung in der Mitte (Abbildung 18) und füllt die Kammern, die durch eine Hydraulikanlage mit bis zu 500 bar zusammengedrückt werden. Der Schließdruck versichert, dass der Filtrationsdruck (bis 15 bar) die Kammern nicht auseinandertreiben kann und die Presse dicht bleibt.



**Abbildung 18: Öffnung in der Mitte der Filterplatte der LKFP**

Die LKFP (Abbildung 19 links) ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der EK auf die Filtration der Suspension. An der Auslassstelle des Filtratwassers ist ein kurzes Rohr angebracht, das das Filtratwasser zu einem Eimer auf einer Waage ableitet (Abbildung 19 rechts). Die Waage ist an einen Laptop angeschlossen, auf dem die Software PCE verwendet wird, um die Messwerte der Waage im Intervall von einer Messung pro Sekunde zu speichern. Die LKFP ist über Rohre mit der Druckquelle verbunden.



**Abbildung 19: links: Laborkammerfilterpresse (LKFP); rechts: Versuchsaufbau mit automatischem Filtratwasserabgabe-Messsystem**

Die Betriebsparameter der LKFP wie z.B. das Material des Filtertuchs, der Filtrationsdruck und die Anzahl an Kammer wurden bei jedem Versuch gleich gehalten. Die Filtrationsversuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Auswirkungen der EK auf die Filtrationsleistung zu bestimmen. Das war nur dann möglich, wenn die Betriebsparameter der Filtration bei jedem Versuch gleich gehalten waren.

## 4 AP4

### 4.1 Versuchsdurchführung

#### 4.1.1 Anmischen der Suspension / Vorbereitung

Die Suspension wurde immer mindestens einen Tag und höchstens eine Woche vor dem EK-Versuch vorbereitet. In der Regel wurden 550 l Suspension angemischt - 3 x 160 l für drei Experimente und 70 l als Reserve oder für ein Referenz-Filtrationsexperiment. Obwohl das Rührwerk im EKC ein Gesamtvolumen von 800 l besitzt, hatte das Mischen der Mengen größer als 600 l einen deutlich negativen Einfluss auf die Suspensionsqualität.

Zunächst wurden die erforderlichen Mengen an Wasser, Bentonit, Kaolin und Quarzmehl berechnet, abhängig von der geplanten Anzahl der durchzuführenden Experimente. Anschließend wurde die berechnete Wassermenge in den Rührer gegossen, gefolgt von der schrittweisen Zugabe von Bentonitpartikeln unter gleichzeitiger Vermischung. Nach dem Mischen wurde die Suspension mindestens vier Stunden lang quellen gelassen, bevor sie mit Kaolin- und Quarzmehlparkeln gefüllt wurde. Diese Partikel wurden der Suspension auf die gleiche Weise zugegeben, wie zuvor der Bentonit dem Wasser. Die Suspension wurde anschließend mindestens bis zum nächsten Tag quellen gelassen. Dieser Schritt gilt nicht für die Experimente aus Abschnitt 4.2.4, da es sich hierbei um eine gebrauchte Suspension von einer Tunnelbaustelle handelt.

Da beide Kammern der EK-Prototypzelle baugleich sind, wurden die Experimente in der Regel in jeweils einer Kammer durchgeführt. Die andere Kammer wurde vor dem Experiment mit Wasser gefüllt, da sich alle Elektroden während der EK unter der Suspension bzw. unter dem Wasserstand befinden müssen. Vor dem Pumpen der Suspension in die Kammer wurde sie ca. 10 Minuten lang erneut angerührt, um sie zu homogenisieren.

#### 4.1.2 Elektrokoagulation

Die Durchführung des EK-Versuchs erfolgte in folgenden Schritten:

- Zuerst wurde die Suspension in die EK-Prototypzelle gepumpt.
- Nach Freigabe aller Sicherheitsmechanismen wurde die Gleichstromquelle angemacht, gewünschte Stromstärke eingestellt und der Versuch gestartet.
- Der Strom wurde nach Ablauf der geplanten Versuchsdauer ausgeschaltet und die Proben wurden aus fünf Entnahmestellen entzogen. Folgend wurden sie auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Dichte analysiert.

- Die Suspension wurde aus der Zelle abgepumpt und das Filtrationsexperiment (Kapitel 4.1.3) konnte gestartet werden. Nach jedem EK-Versuch gab es genug Restsuspension für 3 Filtrationsversuche.
- Aus jeder Anode wurden Proben des koagulierten Materials entnommen, um deren Restfeuchte zu bestimmen. Danach wurde das gesamte koagulierte Material von der Anode abgekratzt, getrocknet und gewogen.

### 4.1.3 Filtration

Die Durchführung des Filtrationsversuches erfolgte in folgenden Schritten:

- Ein Eimer mit der Suspension wurde neben die LKFP gestellt und mit der LKFP durch ein Rohr verbunden.
- Die Druckleitung wurde angeschlossen und der Versuch wurde mit 7 bar gestartet.
- 3 Minuten nach dem Start des Versuchs wurde der Druck auf 14 bar verdoppelt
- Nach Erreichen der geplanten Filtrationszeit wurde die Druckversorgung zugelehrt und das Ablassventil geöffnet
- Nachdem der Druck in der Kammer gesunken war, wurden zwei Filterkuchen gesammelt, um ihre Restfeuchte zu messen
- Das gesammelte Filtratwasser wurde analysiert.

#### Varianten der Filtrationsdurchführung

Das Standardverfahren war die Filtration der Suspension direkt nach der EK ohne weitere Anpassung der Suspensionsparameter (Abbildung 20). Auf diese Weise kann ein direkter Zusammenhang zwischen den EK-Betriebsparametern und der Filtrationsleistung bestimmt werden.

Die Suspensionsparameter wurden jedoch bei einigen Experimenten beeinflusst. So wurde beispielsweise das koagulierte Material aus den Anoden "zurück" in die verbleibende Suspension gegeben, um alles in der LKFP zu filtrieren. Des Weiteren wurden Konditionierungsmittel (KM) in Form von Koagulanten und Flockulanten der Suspension vor der Filtration zugesetzt, um die Auswirkung der Kombination von EK und KM auf die Filtration der Suspension zu bestimmen. Diese beiden Fälle sind direkte (materialspezifische) Einflüsse (Abbildung 21), wobei die Temperaturanpassung oder Alterung der Suspension als indirekte (nicht materialspezifische) Einflüsse definiert werden können (Abbildung 22).

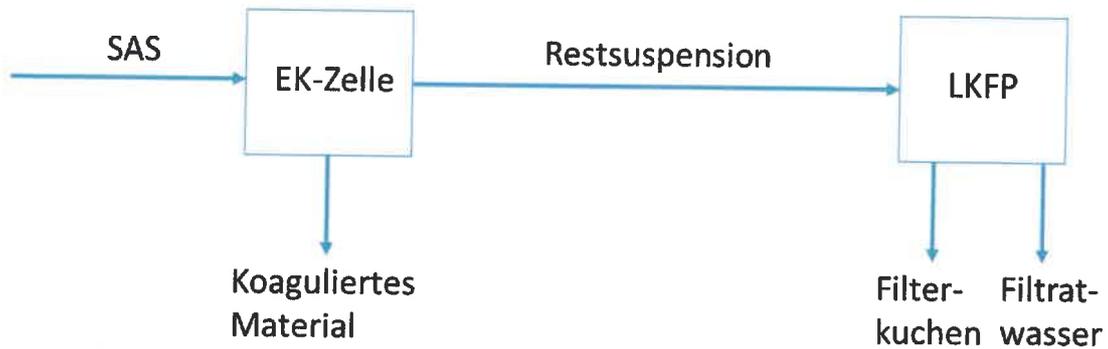


Abbildung 20: Filtrationsdurchführung (FD) 1 (FD1)

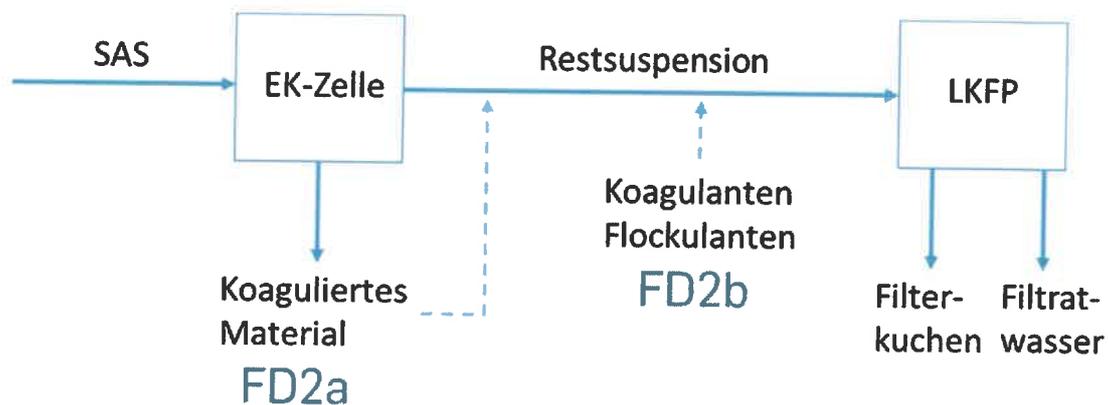


Abbildung 21: Filtrationsdurchführung 2 (FD2) mit der Zugabe an koagulierte Material von der EK-Prototypzelle (FD2a) oder Zugabe an Konditionierungsmittel (FD2b)

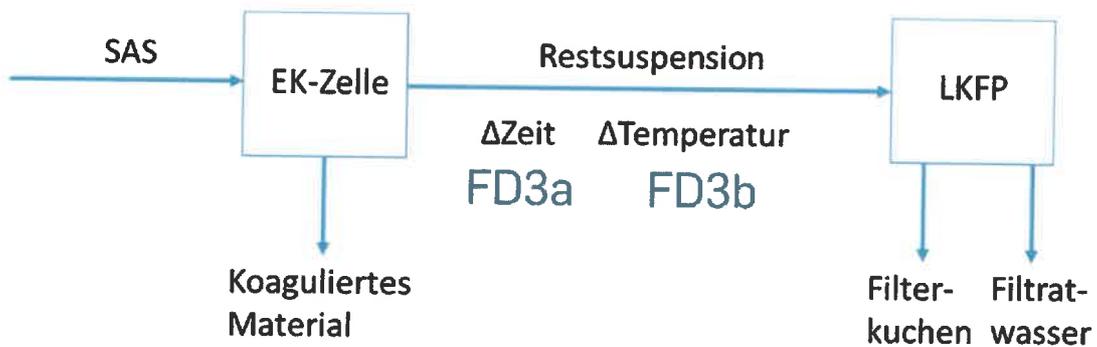


Abbildung 22: Filtrationsdurchführung 3 (FD3) mit der Alterung der Suspension (FD3a) oder Änderung der Temperatur (FD3b)

## 4.2 Parameterstudien

Die Tabelle 5 stellt die Liste aller durchgeführten Versuchsreihen und den Anzahl an Versuchen dar. Die Versuchsreihen Ref, ES1, ES5 und eine Zusammenfassung der ES7 sind in folgenden Kapiteln dargestellt. Die Ergebnisse anderer Versuchsreihen können dem Anhang A3 (Kapitel 11) entnommen werden.

Tabelle 5: Durchgeführte Versuchsreihen und Anzahl an Versuchen

Versuchsreihen				
Versuchsreihe	Code	Suspension	Anzahl an EK-Versuche	Anzahl an LKFP-Versuche
Validierungsversuche	ES1	SAS	17	36
Stromstärke	ES2	SAS	3	3
Abstand zwischen Elektroden	ES3	SAS	6	6
Reinigungsintervall	ES4	SAS	4	4
Versuchsdauer	ES5	SAS	4	4
Fine-Tuning	ES6	SAS	6	6
Versuche mit Baustelle- Altsuspension	ES7	Altsuspension aus Baustelle	7	34
Suspensionsdichte	ES8	SAS, verschiedene Dichte	3	3
Referenzversuche mit LKFP	Ref	SAS/ Altsuspension aus Baustelle	-	13
		$\Sigma$	50	109

### 4.2.1 Referenzversuche (Ref)

Referenzversuche sind die Filtrationsversuche, bei denen die Suspension vorher nicht elektrokoagulierte wurde. Sie dienen als Vergleichsbasis; die Ergebnisse der Filtrationskurven nach EK-Versuchen werden miteinander und mit Referenzversuchen verglichen. Die Referenzversuche wurden sowohl mit als auch ohne Zugabe von KM durchgeführt. Obwohl KM umweltschädlich sind, werden sie vorwiegend auf den Baustellen für die Verbesserung der Filtrationsleistung eingesetzt. Um eine praxisrelevante Bewertung durchführen zu können, musste die Filtration nach der EK mit den Referenzversuchen sowohl mit KM als auch ohne KM verglichen werden.

Die Referenzversuche sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt. In den Diagrammen entspricht die Abszisse der Filtrationszeit und die Ordinate der Filtratwasserabgabe.

Abbildung 23 stellt die Versuche mit SAS und verschiedenen Dichten und Abbildung 24 mit KM dar. Bei den Versuchen mit KM wurde Eisen(III)-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) als Koagulant und anionisches Polyacrylamid als Flockulant verwendet. Das Datenblatt der oben genannten Produkte ist dem Anhang A2 (Kapitel 10) zu entnehmen.

Da für die Filtration in der LKFP 40 I Altsuspension notwendig waren, wurde die Suspension bei den Versuchen mit KM mit 40 ml  $\text{FeCl}_3$  und 8g Polymeren (gelöst in 4 l Leitungswasser) konditioniert. Die Dichte der Suspension vor der Konditionierung war  $1.26 \text{ t/m}^3$ .

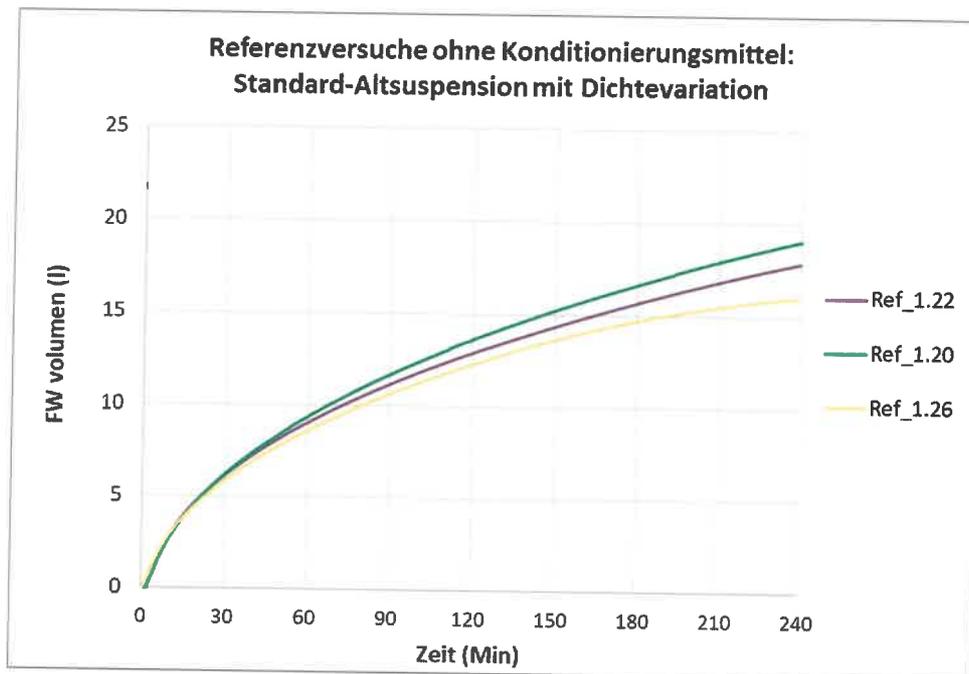


Abbildung 23: Referenzversuche mit verschiedenen Dichten der SAS ( $1.22 \text{ t/m}^3$ ,  $1.20 \text{ t/m}^3$  und  $1.26 \text{ t/m}^3$ ), ohne Zugabe an KM

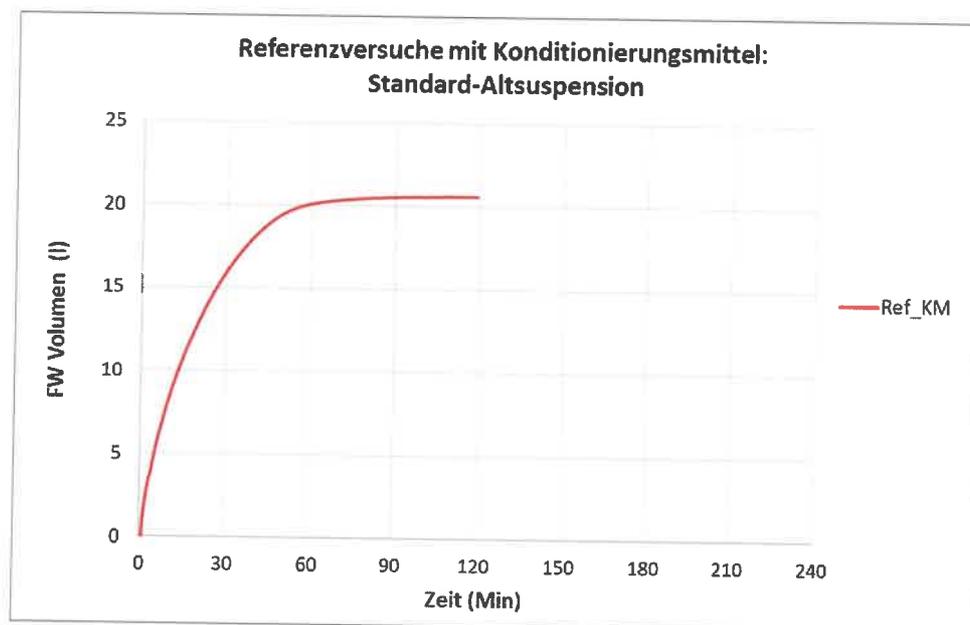


Abbildung 24: Referenzversuche mit Zugabe an KM

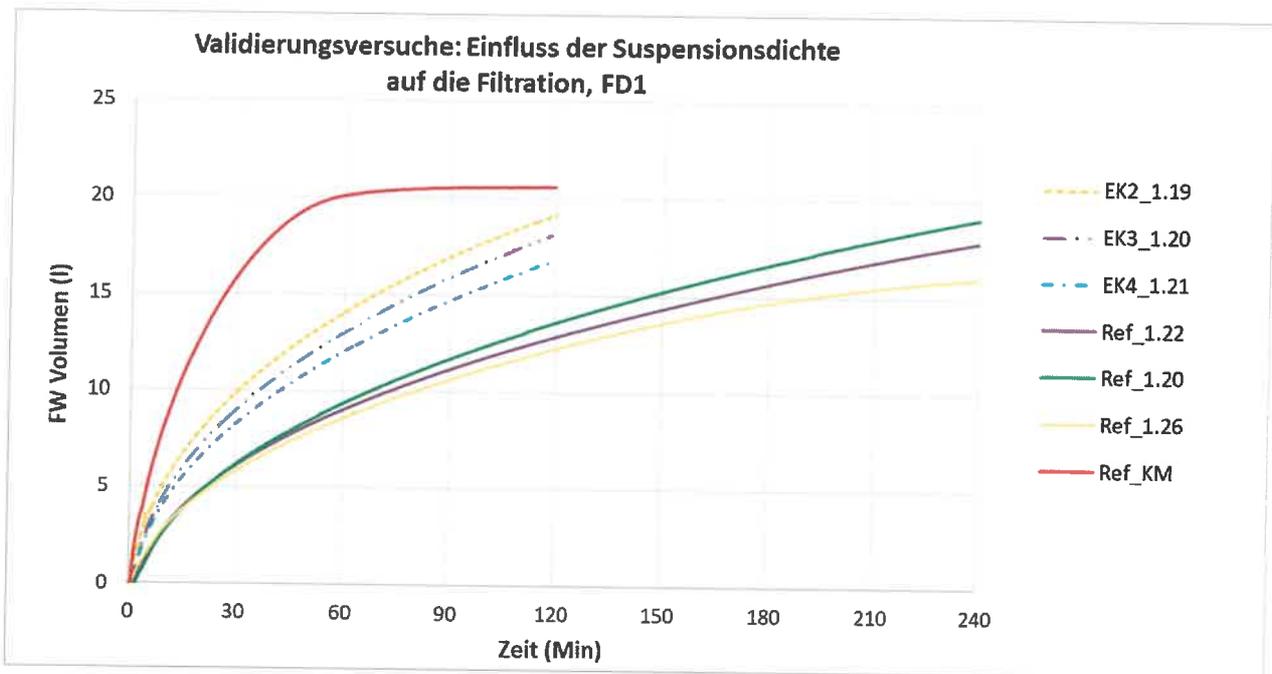
### 4.2.2 Validierungsversuche (ES1)

Das Ziel der ersten Versuchsreihe war festzustellen, ob die Betriebsparameter im EK-Prototypzelle vergleichbare Auswirkung auf die SAS aufweisen, wie es in der EK-Laborzelle der Fall war. Die Betriebsparameter dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Liste der Validierungsversuche mit ihren Betriebsparametern

Validierungsversuche (ES1): EK-Betriebsparameter						
Code	Abstand zw. Elektroden (cm)	Versuchsdauer (Min)	Stromstärke (A)	Stromdichte(A/l)	Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	Kammer
ES1_EK1	4,5	30	142,4	0,89	0,45	1
ES1_EK2	4,5	30	120,0	0,75	0,2	1
ES1_EK3	4,5	30	128,0	0,80	0	2
ES1_EK4	4,5	30	120,0	0,75	0	2
ES1_EK5	4,5	30	80,8	0,51	0	2
ES1_EK6	4,5	30	20,6	0,13	0	1
ES1_EK7	4,5	60	86,4	0,54	0	2
ES1_EK8	4,5	30	124,8	0,78	0	2
ES1_EK9	6,5	30	62,4	0,39	0	2
ES1_EK10	6,5	30	70,4	0,44	0,45	2
ES1_EK11	6,5	30	52,8	0,33	0	2
ES1_EK12	4,5	30	42,8	0,27	0	1
ES1_EK13	4,5	60	100,8	0,63	0	1
ES1_EK14	4,5	30	120,0	0,75	0	1
ES1_EK15	4,5	30	113,6	0,71	0	1
ES1_EK16	4,5	30	104,0	0,65	0	1
ES1_EK17	4,5	45	113,6	0,71	0	1

Die erste Fragenstellung war: Entsteht die Zunahme der Filtratwasserabgabe nur durch eine reduzierte Dichte der Restsuspension, oder ist die Suspension tatsächlich destabilisiert, weshalb sie schneller entwässert werden kann? Hierzu dient der Vergleich der Linien EK2, EK3 und EK4 mit der Linie Ref\_1.20, der verdeutlicht, dass die Restsuspension viel schneller filtriert werden konnte als die (nicht-elektrokoagulierte) SAS mit gleicher Dichte (Abbildung 25). Die EK-Versuche 2, 3 und 4 haben die Suspension jedoch nicht so stark destabilisiert wie die Zugabe von KM.



**Abbildung 25: Einfluss der Restsuspensionsdichte auf die Filtration**

Daraus folgte die nächste Forschungsfrage: Kann das koagulierte Material von den Anoden in die Restsuspension rückgegeben werden, um alles zusammen zu filtrieren (FD2a)?

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 26 dargestellt. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Rückgabe des koagulierten Materials in die Restsuspension die anschließende Filtration negativ beeinflusst hat. Nach 30-minütigen EK Versuchen (EK10 – EK12) war die Verbesserung der Filtration durch EK nur noch minimal. Wohingegen nach einem 60-minütigen EK-Versuch (EK13) die Beschleunigung der Filtration nach Rückgabe des koagulierten Materials immer noch bemerkbar war.

Um die Effekten der Rückgabe des koagulierten Materials weiter zu untersuchen, wurde die Restsuspension vom Versuch EK13 noch einmal filtriert, dieses Mal ohne Rückgabe des koagulierten Materials (FD1). Die Restsuspension ohne Zugabe des koagulierten Materials zeigte eine deutlich höhere Zunahme der Filtratwasserabgabe zu jedem beobachteten Zeitpunkt. Die Filtratwasserabgabe dieser Filtration war in ersten 30 Minuten fast identisch zu der Filtratwasserabgabe des Referenzversuchs mit KM. Nach 30 Minuten verlangsamte sich die Filtratwasserabgabe des Referenzexperimentes mit KM und nach 60 Minuten kam fast kein Wasser mehr heraus, während die Filtration EK13-FD1 noch weiterging. Der Grund dafür ist die Verringerung der Dichte der Restsuspension, die dazu führt, dass mehr Filtratwasser pro Filtrationszyklus abgegeben wird, bzw. dass pro Filtrationszyklus mehr Suspension behandelt werden muss, bevor die minimale Restfeuchte des Filterkuchens (ca. 25%) erreicht wird.

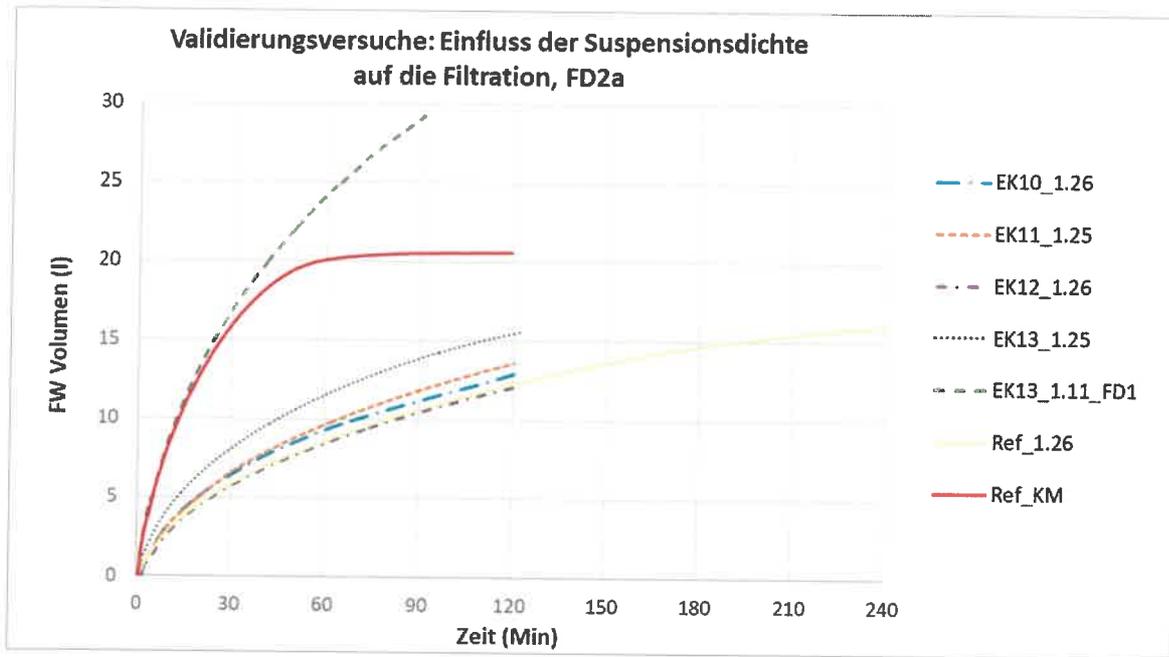


Abbildung 26: Einfluss der Restsuspensionsdichte auf die Filtration, mit Zugabe vom koagulierten Material

Der nächste Schwerpunkt lag auf dem Einfluss der Stromdichte auf die Filtration. In Abbildung 27 sind die Filtrationskurven in zwei Gruppen unterteilt: 0.65 – 0.80 A/l (orangene Linien) und 0.39 – 0.51 A/l (blaue Linien). Die Dauer aller EK-Versuche betrug 30 Minuten. Aus dem Diagramm geht hervor, dass mit steigender Stromdichte die Filtration stärker beschleunigt wird. Niedrige Stromdichten sind nicht zu empfehlen.

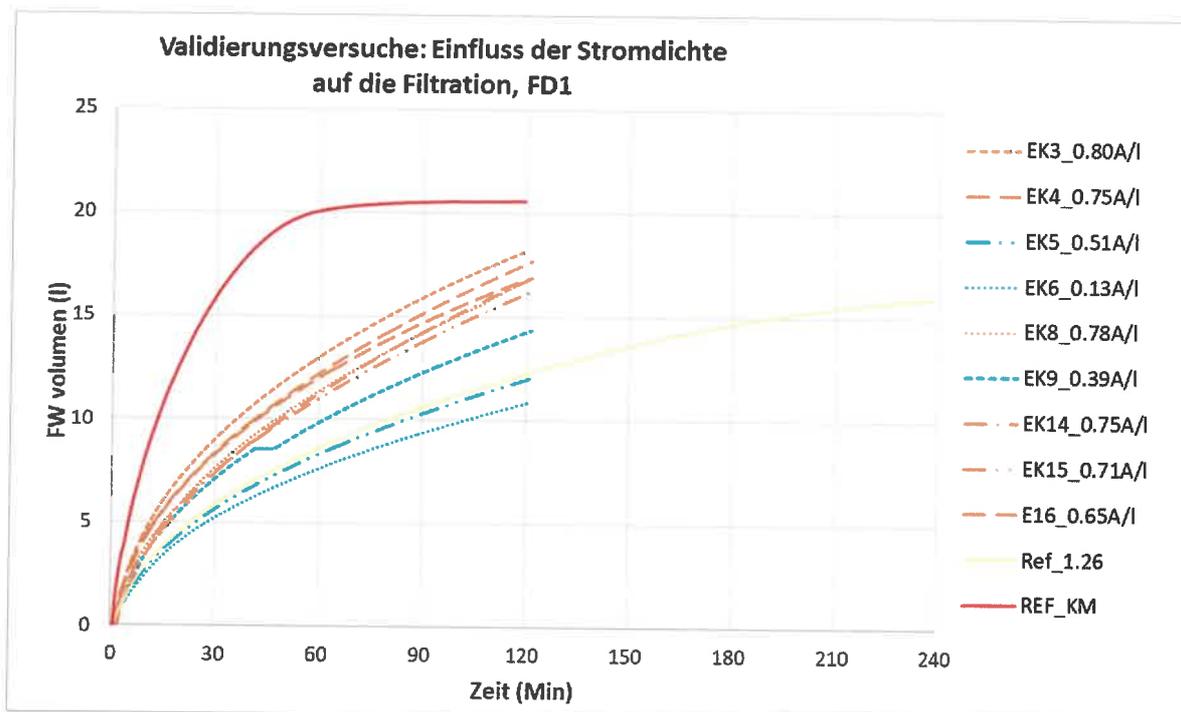


Abbildung 27: Einfluss der Stromdichte auf die Filtration, verschiedene Stromdichten

Abbildung 28 stellt die Filtrationskurven nach drei EK-Versuchen mit gleichen Stromdichten dar. Obwohl diese EK-Versuche unterschiedliche Betriebsparameter besaßen (Tabelle 6), sind die Filtrationskurven sehr ähnlich. Dies hebt die Stromdichte als einen der wichtigsten Betriebsparameter hervor.

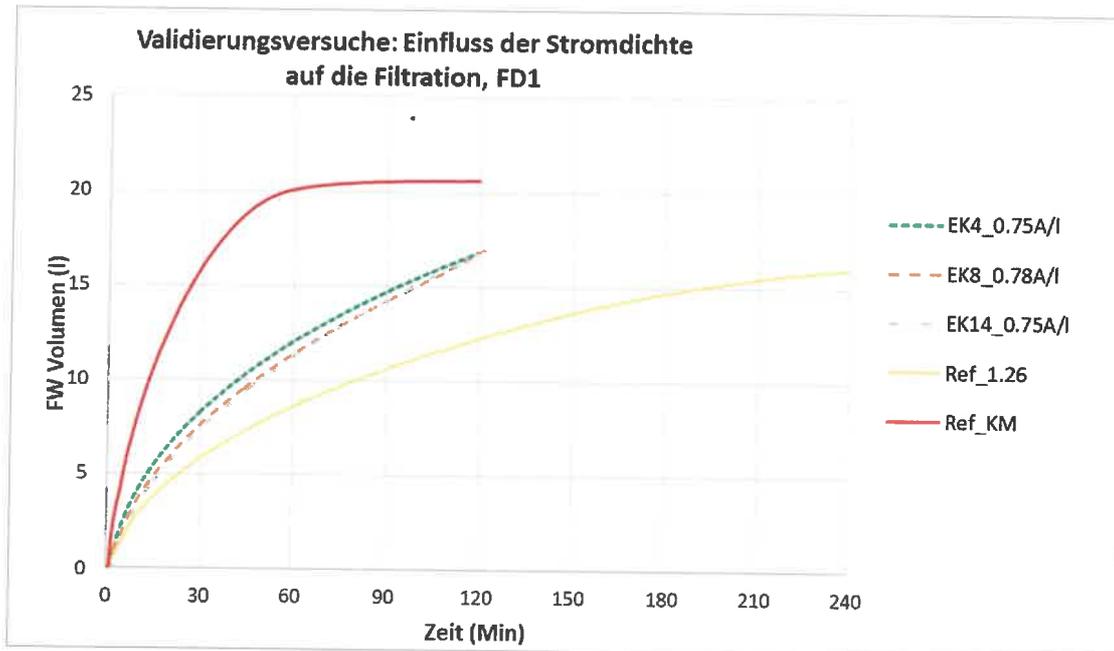


Abbildung 28: Einfluss der Stromdichte auf die Filtration, gleiche Stromdichte

Abbildung 29 stellt den Einfluss der Versuchsdauer dar. EK-Versuche 5, 7, 15 und 17 wurden mit der gleichen Stromdichte durchgeführt, wobei EK17 15 Minuten und EK7 30 Minuten länger dauerten als EK15 und EK5. Der positive Einfluss der Versuchsdauer auf die Filtration ist eindeutig erkennbar.

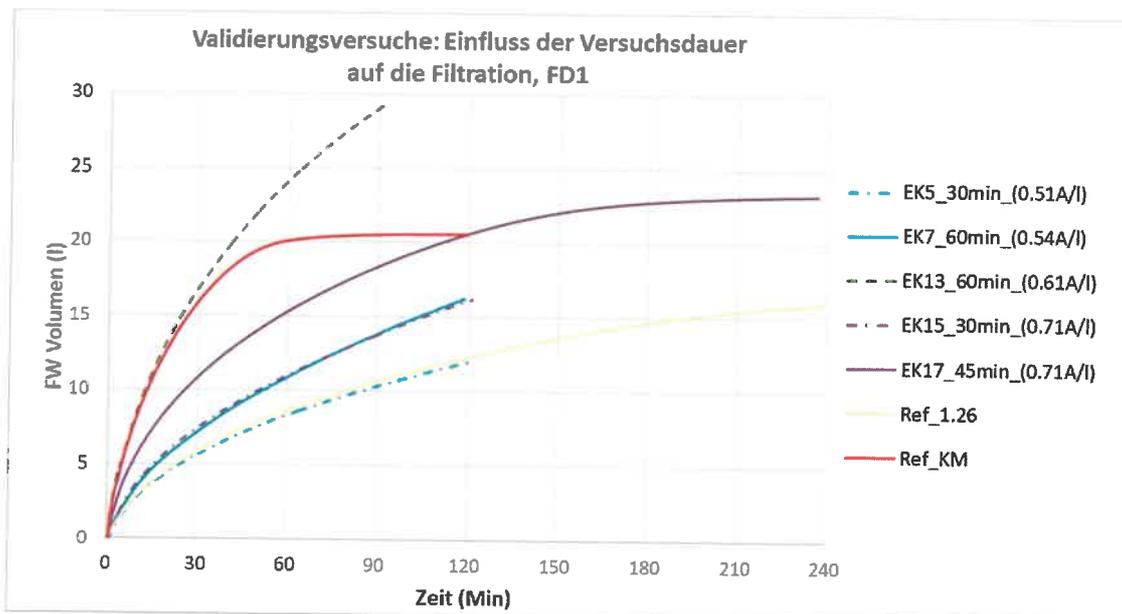


Abbildung 29: Einfluss der Versuchsdauer auf die Filtration

## Zusammenfassung Validierungsversuche

Diese Versuchsreihe lieferte mehrere aufschlussreiche Erkenntnisse. Die wichtigste von ihnen ist der Einfluss der Stromdichte auf die Ergebnisse: Eine höhere Stromdichte verbessert die EK-Leistung. Dies steht im Zusammenhang mit der Literatur und den Laborergebnissen.

Ein weiteres bemerkenswertes Resultat ist die optimale Versuchsdauer mit SAS nicht bei 30 Minuten liegt wie bei der nicht aufgeladenen Bentonitsuspension, die in der ersten Phase des Projektes untersucht wurde. Dies lässt sich durch eine höhere Feststoffkonzentration in SAS erklären, die eine höhere Menge an Metallkationen zur Destabilisierung und Koagulation erfordert. Die optimale EK-Dauer wird im Kapitel 4.2.3 weiter untersucht.

Die dritte Erkenntnis besteht darin, dass die Rückgabe des koagulierten Materials zu der Restsuspension, um das Gemisch zusammen zu filtern, die Vorteile der EK-Behandlung in Bezug auf die Filtrationsleistung erheblich reduziert. Ein erstes Ziel dieser Idee war es, zu untersuchen, ob das gesamte Material aus der EK-Prototypzelle in der LKFP entwässert werden kann, anstatt eine Zwei-Phasen-Trennung durchzuführen. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass eine zweiphasige Trennung bevorzugt werden sollte. Die Restfeuchte des koagulierten Materials ist keineswegs so hoch, dass es einer weiteren Entwässerung bedarf.

### 4.2.3 Versuchsdauer (ES5)

Die Betriebsparameter dieser Versuchsreihe sind im Anhang A3 (Kapitel 11) dargestellt. Die Verlängerung der EK-Versuchsdauer bis zu einem bestimmten Grenzpunkt verbesserte die Ergebnisse. Die Menge an koaguliertem Bentonit erreichte nach 45 Minuten ihr Maximum (Anhang A3). Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass der Spannungsabfall über dem koagulierten Material auf der Anode ab einer bestimmten Dicke fast die gesamte Spannung in der Zelle verbraucht hat und die Partikel nicht mehr von der Anodenoberfläche angezogen wurden.

Die Filtrationsergebnisse zeigten eine weitere Destabilisierung der Suspension bis zur 60. Minute des EK-Versuchs. Die Filtrationskurven von 60 und 90 Minuten waren nahezu identisch, was darauf hinweist, dass die Suspension zwischen der 60. und 90. Minute nicht weiter destabilisiert wird. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Aluminiumionen nach 60 Minuten nicht mehr mit der Suspension in Berührung kommen, sondern im koagulierten Material an den Anoden festsitzen geblieben sind.

Der „Best-Komb“ Versuch war ein 60-minütiger Versuch, bei dem nur die Restsuspension aus den oberen 2/3 der Zelle filtriert wurde. Der Grund dafür war, dass die Suspension in unterem Teil der Zelle an den elektrochemischen Reaktionen wenig oder gar nicht teilnimmt,

welches bei der Analyse der Proben aus Entnahmestellen festgestellt wurde. Dies könnte bei der Weiterentwicklung des Prototyps durch die Anpassung der Form der Elektroden an der Form der Zelle behoben werden (Kapitel 6).

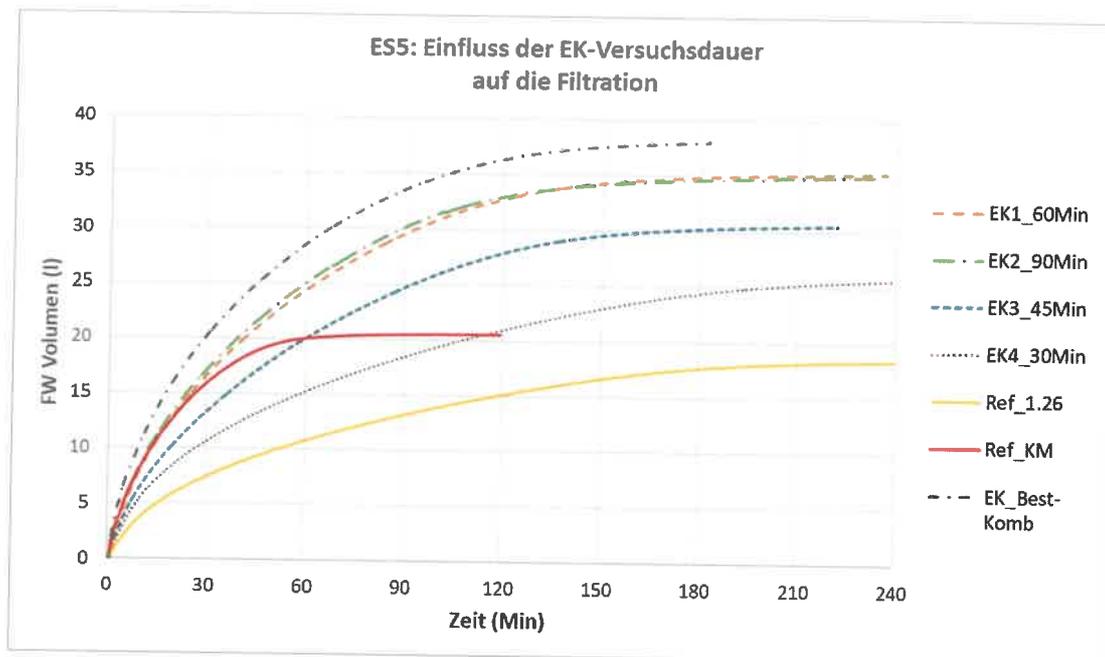


Abbildung 30: Einfluss der EK-Versuchsdauer auf die Filtration

#### 4.2.4 Versuche mit Baustelle-Altsuspension (ES7)

Um die EK-Versuche mit SAS zu validieren, wurde eine Altsuspension von einer Tunnelbaustelle getestet. Nach geologischem Profil durchquerte die Tunnelbohrmaschine damals den aus Ton bestehenden Boden im oberen Viertel und den darunterliegenden Sand. Bereichsweise gab es Zwischenlagerungen aus Torf. Nach den Informationen der Baustelle passten die Daten im geologischen Profil sehr gut zum tatsächlichen Boden.

Neben der Altsuspension wurden auch die KM, mit denen die Suspension auf der Baustelle konditioniert wurde, bereitgestellt. Die Informationen über die Art und Weise, wie die Suspension konditioniert wird, sowie über die Menge der verwendeten KM wurden erhoben. Bei den Filtrationsversuchen mit der LKFP wurde das Konditionierungsverhältnis gleich gehalten wie bei der Filtration mit der Kammerfilterpresse (KFP) auf der Baustelle.

Dabei geht es hier um die gleichen KM und das gleiche Konditionierungsverhältnis wie bei den Filtrationsversuchen mit SAS: 40 ml  $\text{FeCl}_3$  und 8 g Polymeren (gelöst in 4 l Leitungswasser) pro 40 l Altsuspension. Die Möglichkeit, in Kombination mit der EK an KM zu sparen anstatt auf sie komplett zu verzichten, wurde ebenfalls untersucht. Diese Versuche sind mit Ref\_h/EK\_h gekennzeichnet, wobei h für die halbierte Menge an KM steht (20 ml  $\text{FeCl}_3$  und 4 g Polymeren, gelöst in 4 l Leitungswasser), v für die volle Menge an KM und o für Filtrationsversuche ohne KM.

In Abbildung 31 sind die Filtrationsversuche nach der EK mit dazugehörigen Referenzversuchen dargestellt. Der blaue Pfeil zeigt, jeweils im Vergleich zu dem Referenzversuch mit der gleichen Menge an KM, die Zunahme der Filtratwasserabgabe durch die EK.

Diese Ergebnisse führen zu zwei Erkenntnissen:

- Das Zusammenwirken von EK und KM ist möglich.
- Der Einsatz von EK ermöglicht das Sparen an KM.

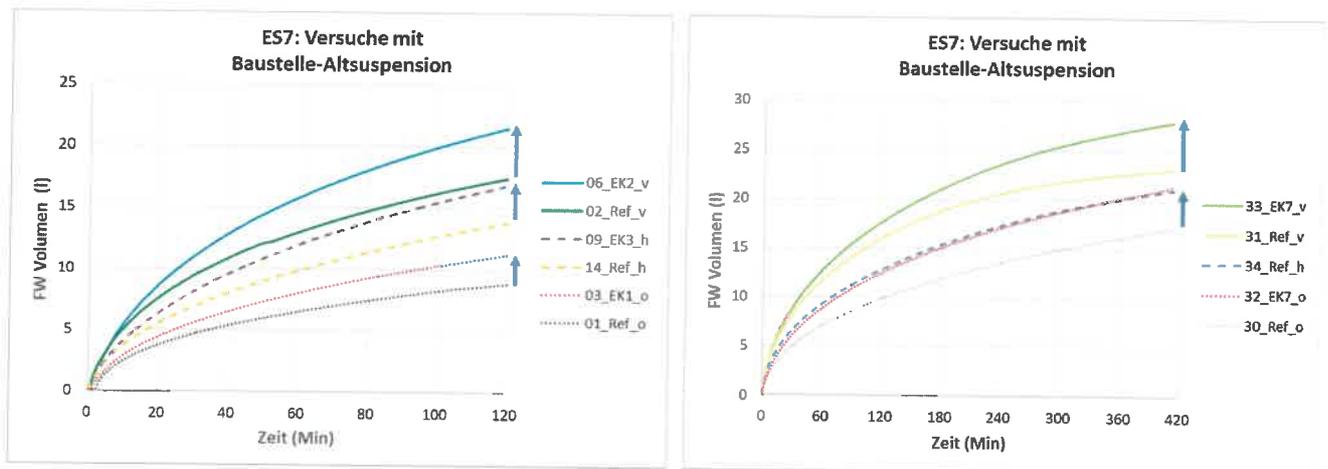


Abbildung 31: Zunahme der Filtratwasserabgabe durch EK – Baustellensuspension

Insgesamt wurden 7 EK-Versuche (Tabelle 7) und 34 Filtrationsversuche durchgeführt. Weitere Ergebnisse sind dem Anhang A4 (Kapitel 0) zu entnehmen.

Tabelle 7: Betriebsparameter ES7

Baustelle Versuche (ES7): EK-Betriebsparameter						
Code	Abstand zw. Elektroden (cm)	Versuchsdauer (Min)	Stromstärke (A)	Stromdichte (A/l)	Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	Kammer
ES_E1	4,5	30	137,1	0,86	0	1
ES_E2	4,5	30	157,5	0,98	0	1
ES_E3	4,5	30	126,4	0,79	0	2
ES_E4	6,5	30	121,5	0,76	0	1
ES_E5	4,5	45	150,3	0,94	0	1
ES_E6	4,5	20	156,5	0,98	0	1
ES_E7	4,5	30	156,6	0,98	0	2

## 5 AP5

Der Entwurf einer Ökobilanz für die EK von Bentonitsuspensionen wurde in der Dissertation von Paya (2016) erarbeitet. Dies ist im Anhang A5 (Kapitel 13) zu finden. In folgenden Abschnitten wird es auf den Umweltaspekt und den Ökonomischen Aspekt der Verzicht auf KM eingegangen.

### 5.1 Umweltaspekt

Aus ökologischer Sicht sind der Einsatz von Konditionierungsmitteln und deren ökologische Auswirkungen umstritten. Die Koagulantien sind meistens Metallsäure, und Flockulantien sind meistens Polyelektrolyte oder Polyacrylamide. [Bid97] analysierte die Abwasserbehandlung und suchte nach Spuren von Koagulieremitteln auf Basis von Fe und Al in der Abwasserbehandlung. Die Ergebnisse zeigten, dass diese Koagulantien nur einen geringen Einfluss auf die Schwermetallkonzentrationen im Zentrat- oder Filtratwasser und im Klärschlamm haben [Pay16].

Die ökologischen Auswirkungen von Flockulantien sind jedoch zweifelhaft. Sie werden durch den Schlamm und bei nicht optimaler Dosierung auch durch Filtratwasser in die Umwelt abgegeben [Sto95]. Flockungsmittel sind in der Regel schwer biologisch abbaubar [Pay16].

Zum Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Stoffen ist es erforderlich, dass die in die Umwelt freigesetzten Stoffe und Gemische aufgrund ihrer wassergefährdenden Eigenschaften klassifiziert werden. Die Einstufung erfolgt auf Grundlage der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen [nAwSV17]: Es gibt drei Wassergefährdungsklassen (WGK) [UBA18]:

- schwach wassergefährdend (WGK 1)
- deutlich wassergefährdend (WGK 2)
- stark wassergefährdend (WGK 3)

Nach [LM92] wurden die meisten Inhaltsstoffe von kationischen und anionischen Flockulantien (Polyacrylamiden) als WGK 1 oder 2 klassifiziert. In der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) werden kationische Polyacrylamide in WGK 2 bis 3, je nach ihrer Ionenstärke, eingestuft. Anionische und nichtionische Polyacrylamide werden WGK 2 zugeteilt [Pay16].

Die Ergebnisse der AP4 (Kapitel 4) zeigen, dass die EK einen ähnlichen Einfluss wie der Einsatz von KM auf die Destabilisierung und Koagulierung der Suspension haben kann. Dabei ist die EK auf Grund der folgenden drei Aspekte umweltfreundlicher als die konventionelle Konditionierungsmethode:

- 1) Koagulanten werden in-situ in reiner Form als Metallkationen produziert (Gleichung 11). Nebenstoffe, wie Chloride oder Sulfate, werden der Suspension nicht hinzugefügt, was bei herkömmlichen Koagulanten, wie Eisen(III)-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) oder Aluminiumsulfat  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , der Fall ist (Gleichung 12 und Gleichung 13).



- 2) Flockulanten werden während der EK weder umgesetzt noch produziert. D.h., es werden keine wassergefährdenden Stoffe eingesetzt.
- 3) Durch Verzicht auf die KM wird der Wasserverbrauch auf der Baustelle wesentlich reduziert. Dieser Punkt wird in den folgenden Absätzen erklärt.

Da die Flockulanten zuerst in Wasser gelöst sein müssen und in Form einer Lösung der Suspension zugegeben werden, entsteht durch Verzicht auf die Flockulanten eine Verringerung des Wasserverbrauchs auf der Baustelle. Für die Konditionierung der Baustelle-Altsuspension von Kapitel 4.2.4 waren  $0,1 \text{ m}^3$  Wasser pro  $1 \text{ m}^3$  Altsuspension notwendig. Laut Experten kann dieser Bedarf bis  $0,2 \text{ m}^3$  Wasser pro  $1 \text{ m}^3$  Altsuspension betragen, abhängig von dem anstehenden Boden, der Dichte der Altsuspension und der Konzentration der Flockungsmittellösung.

Darüber hinaus, da die Flockungsmittellösung der Suspension vor der Filtration zugegeben wird, muss folgend alles zusammen filtriert werden. Das heißt, dass die Zugabe der Flockungsmittellösung die gesamte Menge an zu filtrierender Flüssigkeit vergrößert.

Künftig entstehen ebenso positive Umweltaspekte bzgl. des Wasserverbrauchs. Nach der Filtration mit KM wird das Filtratwasser, je nach dessen Eigenschaften und den örtlichen Abwassersatzungen, entweder direkt in das Abwasser geleitet oder zuerst aufbereitet, bevor es abgeleitet werden darf. Nach der Filtration mit der EK kann das Filtratwasser, auf Grund von der Verringerung des Chemikalieneinsatzes, insbesondere wegen des Verzichtes auf Flockulanten, für das Anmischen einer neuen Bentonitsuspension wiederverwendet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8: Eigenschaften einer B1 4%ige Bentonitsuspension angemischt mit dem Filtratwasser**

Wasser	pH	LF [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Marsch- zeit (s)	Filtrat- wasser (ml)	Fließgrenze ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	Dichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Filtrat- wasser Probe 1	10.70	1899	$t_{1000}=38$ $t_{1500}=71$	10,1	16	1,025
Filtrat- wasser Probe 2	10.58	1782	$t_{1000}=38$ $t_{1500}=72$	10,1	16	1,025
Filtrat- wasser Probe 3	10.39	1677	$t_{1000}=38$ $t_{1500}=71$	10,1	16	1,026
Filtrat- wasser Probe 4	10.39	1646	$t_{1000}=38$ $t_{1500}=72$	9,7	16	1,025
Leitungs- wasser	7.22	323	$t_{1000}=38$ $t_{1500}=71$	9,6	16	1,025

Die etwas erhöhten pH- und Leitfähigkeit-Werte vom Filtratwasser im Vergleich zum Leitungswasser deuten darauf hin, dass ein Teil der während des EK-Prozesses entstehenden Aluminiumionen, im Filtratwasser landet. Dennoch wurden die Eigenschaften der neuangemischten Suspension dadurch nicht wesentlich beeinflusst. Der einzige Unterschied entstand bei der Filtratwasserabgabe (gemessen mittels API-Filterpresse), wo es eine Zunahme der Filtratwasserabgabe von 9,6 zu 10,1 ml gab. Dieser leichte Anstieg ist durch den Destabilisierungseffekt der Aluminiumionen zu erklären. Da die Filtratwasserabgabe einer B1-4%igen Bentonitsuspension, laut Angaben der Hersteller,  $12 \text{ ml} \pm 30 \%$  betragen soll, ist dieser leichte Anstieg der Filtratwasserabgabe unproblematisch. Darüber hinaus reicht das Volumen vom Filtratwasser nicht vollkommend aus, um nur damit eine ausreichende Menge an neuer Bentonitsuspension anmischen zu können. Da ein Teil des Wassers von der Altsuspension in Form von Filterkuchen entsorgt wird, muss dieser Teil durch Frischwasser ersetzt werden. Das verdünnt die Konzentration der Aluminiumionen bzw. neutralisiert den pH-Wert und verringert die Leitfähigkeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die EK nicht nur den Einsatz von wassergefährdenden Stoffen verhindern kann, sondern auch den Wasserverbrauch wesentlich reduziert. Es ist auch zu bemerken, dass der Verzicht auf KM nicht nur die Qualität des Filtratwassers verbessert, sondern auch die Filterkuchen von Chemikalien entlastet. Nach der Filtration werden die Filterkuchen deponiert. Mit niedrigerer Belastung an Chemikalien wird auch an dieser Stelle der Umwelt geschont.

## 5.2 Ökonomischer Aspekt

### 5.2.1 Zeitaspekt

Die Ergebnisse vom AP4 (Kapitel 4) zeigen in den meisten Fällen eine klare Zunahme der Filtratwasserabgabe nach der EK im Vergleich zu der Filtration ohne KM, sowie bei bestimmten EK-Betriebsparametern auch im Vergleich zu der Filtration mit KM.

Eine höhere Filtratwasserabgabe deutet nicht immer darauf hin, dass ein Filtrationsvorgang schneller abgeschlossen wird. Wenn zwei Suspensionen mit unterschiedlicher Dichte nach einer bestimmten Filtrationszeit die gleiche Filtratwasserabgabe aufweisen, bedeutet das, dass der Filterkuchen von der Suspension mit niedrigerer Dichte eine höhere Restfeuchte besitzt.

Es gibt 2 Kriterien, die bestimmen, wann der Filtrationsvorgang beendet sein soll:

- 1) Bei Erreichen von 80-90% der gesamten Menge an Filtratwasser
- 2) Bei Erreichen des maximalen Filtrationsdrucks

Das zweite Kriterium kann für die Filtration mit der LKFP nicht eingesetzt werden, da der maximale Filtrationsdruck sehr früh erreicht wird (nach ca. 5 Minuten). Deshalb wird das Kriterium 1 für die weitere Analyse verwendet.

Im folgenden Beispiel (Abbildung 32) wird die Versuchsreihe „Versuchsdauer“ betrachtet. Die Punkte in Abbildung 32 stellen die Zeit dar, zu der 80% der gesamten Menge an Filtratwasser erreicht wurde. Im Vergleich zum Referenzversuch ohne KM, befindet sich die Filtrationsleistung nach der EK in einem deutlich verbesserten Zustand: zum einen wird die Filtrationszeit verkürzt, zum anderen wird mehr Filtratwasser pro Filtrationszyklus gewonnen.

Verglichen mit dem Referenzversuch mit KM: Mehr Filtratwasser wird pro Zyklus gewonnen, wohingegen die Filtration verlängert wird. Die Menge an Filtratwasser und die Filtrationsdauer, berechnet mit dem Kriterium 80%, sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Zwei Fälle aus Tabelle 9 sind weiter analysiert worden: Referenz-Filtration mit der KM, die mehr den Praxisgegebenheiten entspricht als die Filtration ohne die KM, und Filtration mit der besten Einstellung der Betriebsparameter (Best-Komb). In Tabelle 10 sind diese zwei Fälle bzgl. des Volumens des Filtratwasser und der Filtrationszeit verglichen. Aus Tabelle 9 geht hervor, dass die EK einen Anstieg des Volumens des Filtratwasser um 85% und eine Verlängerung des Filtrationsvorgangs um 120% verursacht.

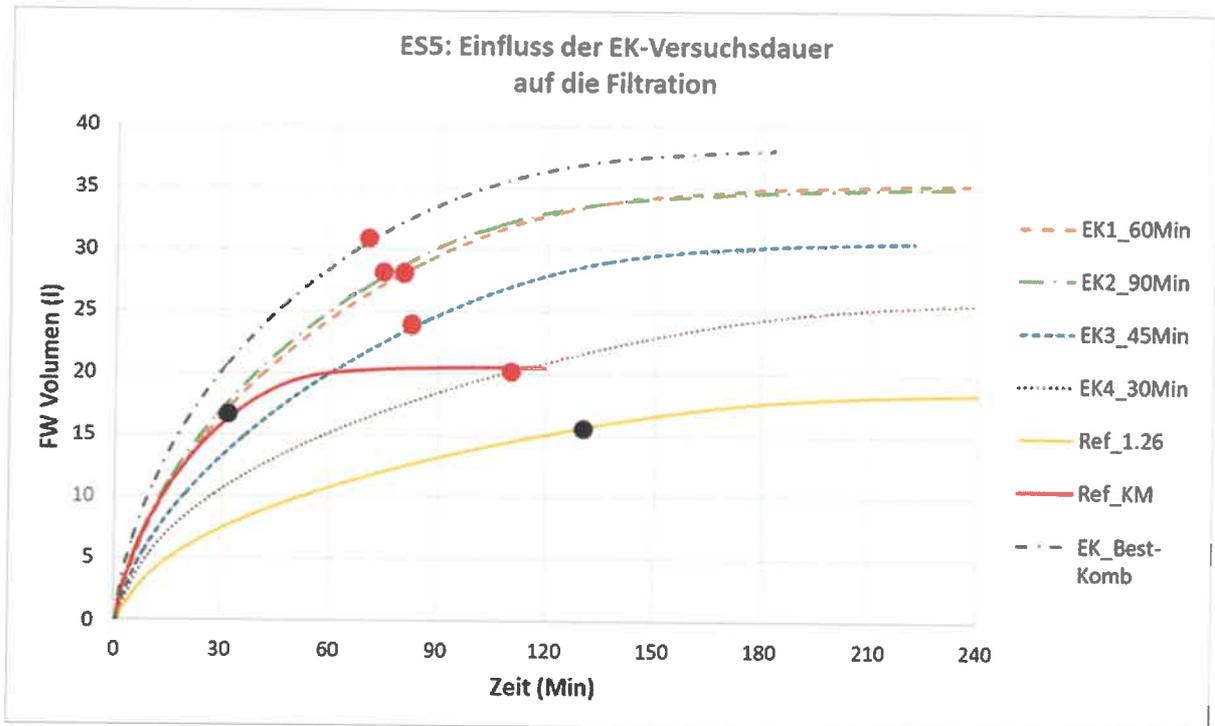


Abbildung 32: Ende der Filtration - Kriterium 80%

Tabelle 9: Zeit und Menge an FW, Kriterium 80%

	Ref Ohne KM	Ref KM	30 min	45 min	60 min	90 min	Best-Komb
Zeit (min)	130	31,4	114,8	84,9	79,5	75,9	69,3
FW (l)	15,2	16,4	20,6	24,0	28,0	28,0	30,4

Tabelle 10: Vergleich der Filtrationsfälle Ref\_KM und Best-Komb bezogen auf das Volumen an Filtratwasser

	Ref KM	Best-Komb.	Unterschied
Zeit (min)	31,4	69,3	+120%
FW (l)	16,4	30,4	+85%

In Tabelle 11 sind die gleichen Fälle in Bezug auf das gesamte Volumen an filtrierter Suspension verglichen. Dieses Volumen wird als Summe aus dem Volumen des Filtratwassers und dem Volumen der Kammer der LKFP (8 Litern) berechnet. Daraus lässt sich erschließen, wie viel Suspension in einem Filtrationsvorgang behandelt wurde. Im Vergleich zur

Referenz-Filtration mit KM werden 57% mehr Suspension pro Filtrationszyklus behandelt. Dabei dauert der Filtrationsvorgang nach wie vor 120 % länger.

**Tabelle 11: Vergleich der Filtrationsfälle Ref\_KM und Best-Komb bezogen auf das gesamte Volumen an filtrierte Suspension (Volumen des Filtratwassers + Kammervolumen in der LKFP)**

	<b>Ref KM</b>	<b>Best-Komb.</b>	<b>Unterschied</b>
Zeit (min)	31,4	69,3	+120%
FW (l)	24,4	38,4	+57%

Der Filtrationsvorgang stellt nur einen der Schritte des Filtrationszykluses dar. Die Daten aus der Spalte „Zeiten mit KM“ in Tabelle 12 sind tatsächliche Filtrationszeiten von einer Baustelle. Wenn die Suspension mit der KM konditioniert wird, dauert der Filtrationsvorgang in einer KFP 32 Minuten, gleich wie der Referenzversuch mit der KM in der LKFP. Der vollständige Filtrationszyklus dauert 54 Minuten.

Unter der Annahme, dass die EK denselben Einfluss auf den Filtrationsvorgang in der KFP verursacht, wie es in der LKFP der Fall war, wird der Filtrationsvorgang um 120% verlängert. Der gesamte Zyklus dauert dabei nur 70% länger und es werden 57% mehr Altsuspension behandelt als in dem Fall „Zeiten mit KM“.

**Tabelle 12: Filtrationszeiten einer KFP**

<b>Beschreibung</b>	<b>Zeiten mit KM [min]</b>	<b>Zeiten mit EK [min]</b>	<b>Unterschied [%]</b>
Verschluss Zylinder	2	2	0
Erstbefüllung FKP	4	4	0
Filtrationsvorgang	32	70	120
Filterkuchen zusammenpressen	9	9	0
Kompensation Druckabfall	2	2	0
Filterkuchen Auslass	5	5	0
<b>Total Zyklus</b>	<b>54</b>	<b>92</b>	<b>+70%</b>

### 5.2.2 Vergleich der Betriebskosten - EK und KM

Aufgrund der eingebauten Stromdaten-Messsysteme im EKC können die Betriebskosten der EK genau berechnet werden. Für die Versuchsreihe „Versuchsdauer“ ist der Stromverbrauch der EK-Zelle *ohne Nebenverbraucher (Ventilation, Beleuchtung, Sensoren ...)* in Tabelle 13 dargestellt. Bei der Berechnung der Kosten wurde ein Industrie-Strompreis von 0,17 €/kWh angenommen.

Tabelle 13: Betriebskosten EK

Stromverbrauch – EK-Zelle			
Versuch	Verbrauch [kWh/160 l]	Verbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ]	Kosten [€/m <sup>3</sup> ]
30 Min	3,0	18,5	3,1
45 Min	5,1	31,9	5,4
60 Min	5,8	36,5	6,2
90 Min	7,5	47,6	7,9
Best-Komb	5,7	35,4	6,0

Die Betriebskosten von herkömmlichen Konditionierungen mittels die KM bestehen im Wesentlichen aus Kosten für die Koagulant, die Flockulant, das Wasser für die Flockungsmittellösung und die Pumpe zum Anmischen der Flockungsmittellösung. Diese Daten sind während des Vortriebs oft nicht ausreichend detailliert dokumentiert, sodass die Gesamtkosten für die KM erst nach dem Projekt berechnet werden. Dabei fließen ausschließlich die Kosten von Koagulant und Flockulant ohne Wasser- und Stromkosten mit ein. Die KM-Kosten von drei abgeschlossenen Vortrieben in Deutschland sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: KM-Kosten von Beispielprojekten

Flockmittelverbrauch – Beispielprojekte				
Projekt	Boden	Verbrauch [kg/m <sup>3</sup> ]	Verbrauch [€/kg]	Kosten [€/m <sup>3</sup> Aushub]
Beispielprojekt A	Mergel	4	2	8
Beispielprojekt B	Sand / Kies	0,3	3,1	0,9
Beispielprojekt C	Mergel	2,6	3,25	8,5

Da die Kosten in Tabelle 14 pro  $\text{m}^3$  Aushub und die Betriebskosten der EK pro  $\text{m}^3$  Altsuspension berechnet sind, können diese Summen nicht direkt miteinander verglichen werden. Das gesamte Volumen der Altsuspension in Beispielprojekten ist nicht bekannt. Deshalb wird in Tabelle 15 eine Sensitivitätsanalyse der KM-Kosten pro  $\text{m}^3$  Altsuspension durchgeführt, mit zwei Variablen: der Dichte der Altsuspension bei Ausschleusen vom Kreislauf und dem Dispergierungsgrad des Bodens. Die Annahmen waren, dass die Korndichte des Bodens  $2.65 \text{ t/m}^3$  und die Anfangsdichte der Suspension  $1.03 \text{ t/m}^3$  betragen. Die KM-Kosten pro  $\text{m}^3$  Aushub wurden vom Beispielprojekt A genommen.

**Tabelle 15: KM-Kosten pro  $\text{m}^3$  Altsuspension, Beispielprojekt A**

<b>KM-Kosten pro <math>\text{m}^3</math> Altsuspension [<math>\text{€/m}^3</math> Altsuspension], Beispielprojekt A</b>				
<b>Dispergierungsgrad / Dichte</b>	<b>1,3</b>	<b>1,25</b>	<b>1,2</b>	<b>1,15</b>
<b>0,1</b>	13,3	10,9	8,4	5,9
<b>0,2</b>	6,7	5,4	4,2	3,0
<b>0,3</b>	4,4	3,6	2,8	2,0
<b>0,4</b>	3,3	2,7	2,1	1,5

Die Erfahrungswerte für diese Variablen sind: Dichte  $1,25\text{-}1,3 \text{ t/m}^3$  und Dispergierungsgrad  $0,2\text{-}0,3$ . Daraus erfolgt, dass die KM-Kosten von  $3,6$  bis  $6,7 \text{ €/m}^3$  Altsuspension betragen, was in der Größenordnung von den Betriebskosten der EK steht.

Das größte ökonomische Potential der EK liegt jedoch in der Reduzierung des Wasserverbrauchs auf der Baustelle. Laut Berger (2018) wurden in 2017 durchschnittlich  $2 \text{ €/m}^3$  in Deutschland von der Industrie für Wasser bezahlt, und die Entsorgungskosten betragen  $0,5 \text{ €/m}^3$ . Da beim Verzicht auf KM das Frischwasser für das Anmischen der Flockungsmittellösung gespart wird und das Filtratwasser für das Anmischen neuer Bentonitsuspension benutzt werden kann, entsteht an dieser Stelle ein enormes Einsparungspotential.

Darüber hinaus entsteht durch chemikalienarmen Filterkuchen weiteres Einsparungspotential. Je nach Zusammensetzung und Festigkeit werden Filterkuchen verschiedenen Deponieklassen (1 bis 4) zugeordnet. Falls die Filterkuchen wegen der verringerten Belastung an Chemikalien in eine niedrigere Deponiekategorie zugeordnet werden, könnten die Deponierungskosten und Transportwege erheblich reduziert werden.

Nicht zuletzt wurde Wasserstoff, der bei den EK-Experimenten als Nebenprodukt entsteht, in dieser Phase der Forschung nur als ein Sicherheitsrisiko betrachtet. Der produzierte Wasserstoff könnte jedoch mithilfe der Brennstoffzellen in den Energiekreislauf der EK-Anlage eingebunden werden, um folglich den Gesamtenergieverbrauch der Anlage zu reduzieren.

## 6 AP6

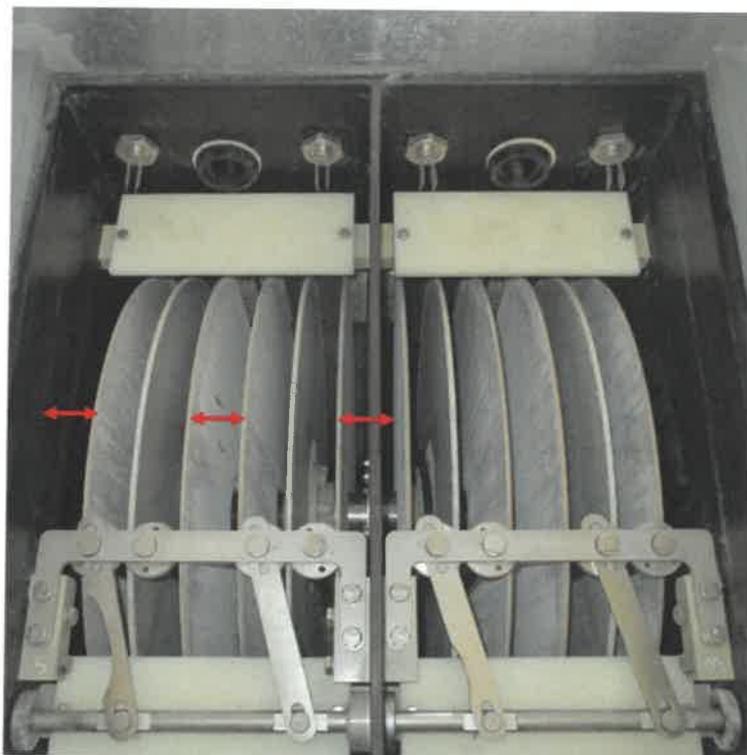
Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und der Erfahrung mit der EK-Prototypzelle werden folgende Vorschläge für den Bau eines neuen oder Weiterentwicklung des bestehenden Prototyps eingereicht:

### **Anpassung der Form der Elektroden an die Form der Zelle**

Die EK-Prototypzelle ist rechteckig und die Elektroden kreisförmig. Durch die Messung der Eigenschaften der Restsuspension von fünf Entnahmestellen wurde es festgestellt, dass die meisten elektrochemischen Prozesse in der Mitte der Zelle stattfinden, wo die Elektroden so breit wie die Zelle sind. Die Elektroden sollten bei der nächsten Entwicklungsphase der Form der EK-Zelle folgen.

### **Vermeidung des Totvolumens**

Bei den Versuchen wurde es beobachtet, dass die Suspension, die sich zwischen zwei Kathoden und zwischen einer Kathode und der Wand der Zelle (Abbildung 33) befindet, an der elektrochemischen Reaktionen nicht teilnimmt, da in diesem Bereich kein Strom geflossen ist. Das soll bei der Weiterentwicklung vermieden werden. Ein Lösungsvorschlag wäre die Elektroden in einer Anordnung von Kathode-Anode-Kathode-Anode-...-Kathode einzubauen und darüber hinaus die äußere Kathode so nah wie möglich an die Zellenwand zu montieren.



**Abbildung 33: Totvolumen in der EK-Prototypzelle**

### **Vergrößerung der Elektrodenoberfläche**

Die Vergrößerung der Elektrodenoberfläche verringert die Spannungen und ermöglicht dadurch, höhere Stromstärke zu erreichen. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass die niedrigen Spannungen die Betriebskosten der EK verringern würden.

### **Änderung des Abstreifmechanismus**

Eine der Forschungsideen war, die Anodenoberfläche während des Versuchs vom koagulierten Material zu befreien, um neue Ablagerungen zu ermöglichen. Jedoch zeigten die Ergebnisse der Versuchsreihe „Reinigungsintervall“, dass der aktuelle Abstreifmechanismus die EK-Leistung nicht verbessert hat. Darüber hinaus muss das koagulierte Material folgend filtriert werden, da es nach dem Abstreifen in der Restsuspension bleibt. Der Abstreifmechanismus sollte so umgebaut werden, dass er in der Lage ist, das gesamte koagulierte Material nach dem Versuch von den Anoden zu entfernen und anschließend zu sammeln. Eine weitere Recherche über mögliche mechanische Reinigungsmöglichkeiten während der EK wäre auch wünschenswert, aber nur falls das Material schon während des Versuchs von der Suspension entfernt werden kann, ohne das Sicherheitsniveau der Anlage zu beeinflussen.

Bei dem aktuellen EK-Prototyp könnten mit einer Umbau-Maßnahme die ersten drei Verbesserungsvorschläge eingesetzt werden. Anstatt 6 kreisförmige Elektroden in Anordnung Kathode-Anode-Kathode-Kathode-Anode-Kathode, könnten 7 Elektroden in Anordnung Kathode-Anode-Kathode-Anode-Kathode-Anode-Kathode in die Zelle eingebaut werden. Die Elektroden sollten der Form der Zelle folgen und der Abstand der äußersten Kathode zur Zellenwand sollte so gering wie möglich gehalten werden. Diese Maßnahme vergrößert gleichzeitig die Elektrodenoberfläche.

## 7 Fazit

Das Ziel der zweiten Phase des vorliegenden Forschungsprojektes war es, die Auswirkungen der Elektrokoagulation auf die Altbentonitsuspensionen im größerem Maßstab zu untersuchen. In erster Linie wurden Laborversuche mit Altbentonitsuspensionen durchgeführt, um auf Grundlage dieser Ergebnisse und der Ergebnisse der Phase 1, einen Prototyp im größeren Maßstab herzustellen. Auf Grund der Wasserstoffbildung während des Versuchs, mussten beachtliche Sicherheitsmaßnahmen installiert werden.

Die Experimente haben bestätigt, dass die Elektrokoagulation erfolgreich Altsuspensionen koagulieren und destabilisieren kann. Dies betrifft sowohl die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Standard-Altsuspension als auch die Altsuspensionen von Baustellen.

Die Parameterstudie hat verdeutlicht, dass die Effektivität der Elektrokoagulation abhängig ist von:

- Der Versuchsdauer
- Der Stromstärke
- Dem Abstand zwischen den Elektroden
- Dem Reinigungsintervall der Anoden

Die besten Ergebnisse wurden mit folgenden Betriebseinstellungen erzielt:

- Versuchsdauer: 60 min
- Max. einstellbare Stromstärke
- Abstand zwischen den Elektroden: 4,5 cm
- Keine Reinigung während des Versuchs
- Das untere Drittel der Restsuspension in der Zelle wird nicht filtriert.

Bei der optimalen Kombination der Betriebsparameter ist es durch die Elektrokoagulation möglich, den Einsatz von Konditionierungsmitteln zu reduzieren oder vollständig zu ersetzen. Die Versuche mit der Altsuspension von der Baustelle haben bestätigt, dass die Elektrokoagulation mit der Verwendung von Konditionierungsmitteln kombiniert werden kann, um einerseits den Einsatz der Konditionierungsmittel zu reduzieren oder andererseits die Filtration noch weiter zu beschleunigen.

Aus ökologischer Sicht ist es jedoch ratsam, die Verwendung von Konditionierungsmitteln zu unterlassen. Der Austausch von Konditionierungsmitteln durch neue Technologien wäre aus mehreren Beweggründen ökologisch vorteilhaft. Bei Verzicht auf Flockungsmittellösung können pro 1 m<sup>3</sup> Altsuspension bis zum 0,2 m<sup>3</sup> Wasser gespart werden. Darüber hinaus sind Flockulanten grundsätzlich als wassergefährdende Stoffe einzuordnen. Ein verminderter Einsatz sorgt für ein chemikalienarmes Filtratwasser, was den Qualitätsanforderungen

für das Anmischen einer neuen Bentonitsuspension erfüllen würde; dies würde zu einer signifikanten Reduzierung des Wasserverbrauches auf der Baustelle führen und einen ersten Ansatz für einen Recyclingkreislauf bieten. Des Weiteren wären die Filterkuchen chemikalienarm, sodass sie bei der Deponierung eine geringere Belastung für die Umwelt verursachen würden.

Gemäß den gewonnenen Informationen von Baustellen sowie den aktuellen Ergebnissen und Berechnungen, liegen die Betriebskosten der Elektrokoagulation vergleichbar mit Kosten von konventionellen Entwässerungsmethoden unter Einsatz von Konditionierungsmitteln. Für eine weitreichendere und genauere Wirtschaftlichkeitsberechnung sind weitere Daten von der Baustelle notwendig.

Dieses Projekt ist die erste umfassende Untersuchung der Elektrokoagulation von gebrauchten Bentonitsuspensionen. Ein logischer Fortgang dieser Arbeit wäre es, weitere Suspensionen von Baustellen zu analysieren und die Ergebnisdatenbank zu erweitern. Es ist möglich, dass verschiedene Suspensionen eine leicht veränderte (unterschiedliche) Kombination der optimalen Betriebsparameter erfordern. Nach der Erweiterung der Ergebnisbandbreite könnte ein Baustellenprototyp gebaut werden. In der Zwischenzeit könnte die Leistung des aktuellen Prototyps durch kleine Anpassungen der Form, Größe und Anzahl der Elektroden verbessert werden.

Die ökonomischen und ökologischen Aspekte sollten weiter untersucht werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Gewinnung der Daten von Baustellen sowohl über die Mengen der eingesetzten Suspension als auch über den Strom- und Wasserverbrauch für die Feintrennung pro Projekt und über die Investitionskosten der gesamten Feintrennung-Ausrüstung. Darüber hinaus sollten die durch konventionelle Konditionierung gewonnenen Filterkuchen mit denen der Elektrokoagulation verglichen werden. Aufgrund der geringeren Belastung von Chemikalien könnten die nach der Elektrokoagulation gewonnenen Filterkuchen möglicherweise in eine kostengünstigere Depositionsklasse fallen als die Kuchen aus der konventionellen Konditionierung; dadurch ließe sich nicht nur die ökologische Belastung senken, sondern auch erheblich Geld einsparen.

Nicht zuletzt sollte das Potenzial der Wiederverwendung von Wasserstoff untersucht werden. Er ist der Kraftstoff der Zukunft und wird während der Elektrokoagulation als Nebenprodukt produziert. Die erzeugte Menge kann unproblematisch berechnet werden. Es muss erforscht werden, ab welchem Betrag es möglich wäre, den Wasserstoff zu nutzen.

## 8 Literaturverzeichnis

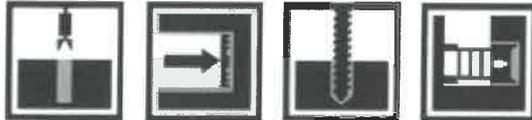
- [nAPI09] American Petroleum Institute (2009), 'API 13B-1 2009-03: Recommended Practice for Field Testing of Water-Based Drilling Fluids, 4th Edition', Washington: API publishing services, 91 S
- [BPO<sup>+</sup>06] Bebeselea, A.; Pop, A.; Orha, C.; Danielescu, C.; Manea, F.; Burtica, G. (2006): Electrocoagulation application on organic load and suspended solids removal from wastewater. In: *The 13th Symposium on Analytical and Environmental Problems*, S. 101–105.
- [Ber18] Berger, S. H. (2018): Untersuchung der energetischen Effizienz einer Elektrokoagulationszelle sowie Abschätzung der Betriebskosten der Elektrokoagulation im Vergleich zu den klassischen Verfahren der Separationstechnologie im maschinellen Tunnelbau“. Masterarbeit. Beuth Hochschule für Technik, Berlin. Master-Fernstudiengang Energie- und Ressourceneffizienz.
- [Bid97] Bidder, H. (1997): Quantifizierung des Eintrags von Spurenelementen aus Fällungs- und Flockungsmitteln. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* (44 (7)).
- [Ime17] Imerys (2017): Online verfügbar unter: <https://www.imerys.com>
- [nAwSV17] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz / Bundesamt für Justiz (2017): Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).
- [Don94] Donini, J. C. (1994): The operating cost of electrocoagulation. In: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* (72).
- [GGB08] Ghernaout, D.; Ghernaout, B.; Boucherit, A. (2008): Effect of pH on Electrocoagulation of Bentonite Suspensions in Batch Using Iron Electrodes. In: *Journal of dispersion science and technology* (29), S. 1272–1275.
- [Hol02] Holt, P. (2002): Electrocoagulation: unravelling and synthesizing the mechanisms behind a water treatment process. PhD. University of Sydney, Sydney. Department of Chemical Engineering.
- [HBM99] Holt, P.; Barton, G. W.; Mitchell, C. (1999): Electrocoagulation as a wastewater treatment. In: *The Third Annual Australian Environmental Engineering*.
- [JL93] Jasmund, K.; Lagaly, G. (1993): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Darmstadt: Steinkopf Verlag.
-

- 
- [Las15] Laske, S. (Hg.) (2015): Polymer nanoclay composites. First Edition. Amsterdam, Boston, Heidelberg, Waltham, MA: Elsevier William Andrew is an Imprint of Elsevier (Micro & nano technologies series).
- [Let99] Letterman, R. D. (1999): Water quality and treatment: a handbook of community water supplies. 5th edition. New York: McGraw-Hill.
- [LM92] Loll, U.; Melse, A. (1992): Auswahl und Einsatz von organischen Flockungshilfsmitteln - Polyelektrolyten - bei der Klärschlammmentwässerung. ATV Arbeitsbericht: Stabilisation, Entseuchung, Eindickung, Entwässerung und Konditionierung von Schlämmen, einschließlich der Kompositierung von Schlämmen und festen Abfällen. In: *KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall* (39 (4)), S. 569–580.
- [MH17] Meyer, A; Herrenknecht AG (2017) a: Zusammenstellung Containereinhalt, Projektinternes Dokument (unveröffentlicht)
- [MH17] Meyer, A; Herrenknecht AG (2017) b: Systembeschreibung Prototyp Elektrokoagulation, Projektinternes Dokument (unveröffentlicht)
- [MSE17] MSE Filterpressen (2017): Bauzeichnung LKFP, Projektinternes Dokument (unveröffentlicht)
- [Glu15] J, Glück.; Konstruktive Entwicklung eines kleinmaßstäblichen Prototypen im Rahmen eines DBU- geförderten Forschungsprojektes zur Aufbereitung von Bentonit- Suspensionen mit dem Elektrokoagulationsverfahren. Offenburg, Hochschule Offenburg. 2015
- [Pay15] Payá Silvestre, S. (2015): Grundlagen zum Scale-up, Projektinternes Dokument (unveröffentlicht)
- [Pay16] Payá Silvestre, S. (2016): Elektrokoagulation zur Trennung von gebrauchten Bentonitsuspensionen im Tunnelbau. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb.
- [PST+18] Popovic, I.; Schoesser, B.; Thewes, M.; Edelman, T. (2018): Neue Trennmethode für gebrauchte Bentonitsuspensionen auf Basis der Elektrokoagulation. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen. Bochum.
- [PS16] Praetorius, S.; Schoesser, B. (2016): Bentonithandbuch. Ringspaltschmierung für den Rohrvortrieb. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- [SF97] Schuhmann, H.; Friedrich, C. (1997): Umweltverträglichkeit von Chemikalien zur Abwasserbehandlung. Berlin: Umweltbundesamt, Inst. für Wasser-, Boden- und Lufthygiene.
-

- 
- [Ste03] Stein, Dietrich (2003): Grabenloser Leitungsbau. Berlin: Ernst.
- [Sto95] Stowa (1995): Untersuchung der Umweltgefährdung von Polyelektrolyten in Kläranlagen. In: *Forschungsbericht*.
- [UBA18] Umweltbundesamt (2018): Wassergefährdende Stoffe. Hg. v. UBA. Online verfügbar unter <https://webrigoletto.uba.de/rigoletto/public/language.do;jsessionid=10DCF2FE635F4F8AABEA49BFA1C82DCE?language=native>.
- [Olp63] van Olphen, H. (1963): An Introduction to Clay Colloid Chemistry: For Clay Technologists, Geologists, and Soil Scientists. Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- [Wal93] Walsh, F. C. (1993): A first course in electrochemical engineering. Romsey: Electrochemical Consultancy.
-



## 9 Anhang A1



### Aktiv-Bentonit IBECO B1

Beschreibung / Anwendung	Description / Application	Description / Application
IBECO B1 ist ein aktivierter Natrium-Bentonit für den Baubereich. Aufgrund seiner sehr guten rheologischen Eigenschaften und Robustheit ist IBECO B1 universell einsetzbar, insbesondere für Stützflüssigkeiten bei Schlitzwänden, Schildvortrieben, Bohrarbeiten und Rohrvortrieben.	IBECO B1 is an activated sodium bentonite for civil engineering. Due to its excellent rheological properties and robustness, IBECO B1 is universally applicable, especially as slurry for diaphragm walls, shield tunneling, drilling operations and pipe jacking.	IBECO B1 est une bentonite de sodium activé pour le secteur de la construction. Grâce à ses excellentes propriétés rhéologiques et robustesse IBECO B1 est universellement applicable, en particulier comme boue pour les parois moulées, les tunneliers, les forages et les fonçages.

Technische Durchschnittswerte	Technical average values	Valeurs techniques moyennes		
Wassergehalt	Water content	Teneur en eau	11 ± 3	%
Komdichte	Specific density	Poids spécifique	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Schüttdichte	Bulk density	Densité apparente tassée	800 ± 100	g/l
Siebrückstand auf 0,063 mm	Screen residue on 0,063 mm	Refus au tamis 0,063 mm	20 ± 5	%
Suspension bei 50 kg/m <sup>2</sup> , nach 24 Stunden	Slurry at 50 kg/m <sup>2</sup> , after 24 hours	Boue à 50 kg/m <sup>2</sup> , après 24 heures		
Suspensionsdichte	Slurry density	Densité de Gel	1,028	t/m <sup>3</sup>
Marsh-Viskosität	Marsh viscosity	Viscosité Marsh	40	s/l
Fließgrenze (Kugel)	Liquid limit (ball)	Rigidité (billes)	30 (6)	N/m <sup>2</sup>
Filtratwasserabgabe	Filtrate volume	Volume de Filtrat	12	ml

Anmerkungen	Remarks	Remarques
Die oben genannten Werte verstehen sich als typische Durchschnittswerte und wurden unter Laborbedingungen ermittelt. Da es sich bei diesem Produkt um einen natürlichen Rohstoff handelt, sind die Messwerte als Richtwerte zu betrachten, die gewissen Schwankungen unterliegen. Jegliche Verwendung des Produktes liegt vollständig in der Verantwortung des Anwenders.	The values listed above were determined under laboratory conditions. Since this product is a natural raw material, the measured values are indicative and subject to variations. Any use of this product is entirely in the responsibility of the user.	Les valeurs ci-dessus ont été déterminées dans des conditions de laboratoire. Ce produit étant une matière première naturelle, les valeurs mesurées doivent être considérées comme indicatives car soumises à certaines fluctuations. Toute utilisation de ce produit est entièrement à la charge de l'utilisateur.

IMERYS Metalcasting Germany GmbH – Ruhrorter Straße 72 – D – 68219 Mannheim  
Tel. +49 621 / 8 04 27-0 – Fax +49 621 / 8 04 27-50

JLEO/MSPE 2016-07-28

Facer Lohrheim GmbH  
 Schaumburger Straße 33  
 D-65558 Lohrheim  
 Tel.: +49 (0) 6430 9142 - 0  
 Fax: +49 (0) 6430 914250  
 www.eloh.de info@eloh.de  
 Steuer-Nr.: 04023270355  
 USt-ID-Nr.: DE 814522300

## **ERBSLÖH Kaolin W**

*ERBSLÖH Kaolin W* ist ein puderfeines Kaolin. Durch die gründliche Reinigung und anschließende Mahltrocknung können Sie sich auf die Qualität verlassen. Verwenden Sie Kaolin *W* dort, wo es Ihnen auf Feinheit, Trockenheit und schnelle Verfügbarkeit Ihres Füllstoffes ankommt.

*ERBSLÖH Kaolin W* ist das Kaolin, das von unseren Kunden am häufigsten verwendet wird. Die cremefarbene Tönung von *ERBSLÖH Kaolin W* ist ideal für viele technische Anwendungen. Für Ihre neuen Ideen hier einige „alte“ Anwendungen:

Reifen und Gummierzeugnisse  
 Papier und Kartonagen  
 Tapeten  
 Klebstoffe  
 Kunststoffe  
 Farben und Lacke  
 Pflanzenpflege- und -schutzmittel  
 Kosmetika

### **Chemische Analyse**

SiO <sub>2</sub>	51,0 - 59,0	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,0 - 36,0	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50 - 5,00	%
K <sub>2</sub> O	4,00 - 7,00	%
TiO <sub>2</sub>	0,05 - 0,15	%
CaO	0,02 - 3,50	%
MgO	0,40 - 1,20	%
Na <sub>2</sub> O	0,05 - 0,15	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05 - 0,25	%
BaO	0,05 - 0,20	%
Glühverlust	6,0 - 9,50	%



Mineralische Rohstoffe. Klassiert • Getrocknet • Germanien



Product Data Sheet



**SILVERBOND®**

**Features and benefits**

SILVERBOND® crystalline silica is produced from high purity quartz feed stock for manufacturing and formulation of applications which require structurally sound, chemically pure or non-reactive fine mineral fillers.

Completely inert and pH neutral. SILVERBOND® will not alter or initiate when incorporated in catalysed or multi-component chemicals systems, and will not degrade when employed in extreme temperatures or harsh environments. SILVERBOND® offers formulators a low surface area, minimal oil absorption option to achieve high loading in coatings and cementitious systems and stiffening in elastomeric and high performance epoxy. Chemically pure SILVERBOND® also serves as an excellent non-conductor in electrical assemblies and potting compounds, and non-combustible filler in thermal insulating.

All SILVERBOND® grades are processed with adherence to ISO and internal quality assurance programs. The result is chemical purity and consistently uniform particle size distributions for predictable results supported by reliable services.

		M300	M400	M500		Method
control sieve	>100 µm				%	Alpine
	> 63 µm				%	Alpine
	> 40 µm	1,8	0,1	0,012	%	Alpine
D <sub>10</sub>		3	3	2	µm	Malvern MS2000
D <sub>50</sub>		17	12	4	µm	Malvern MS2000
D <sub>90</sub>		40	26	10	µm	Malvern MS2000
density		2,65	2,65	2,65	kg/dm³	
bulk density		0,85	0,7	0,65	kg/dm³	
specific surface		4000	6500	12000	cm²/g	Blaine
oil absorption		19	20	23	g/100 g	
hardness		7	7	7	Mohs	
pH		7	7	7		
loss on ignition		0,12	0,12	0,3	%	
colour	L*	92	93	94		Minolta CM-3610d
	a*	0,58	0,58	0,46		D <sub>65</sub> /10°
	b*	2,73	3,0	2,78		
refractive index		1,55	1,55	1,55		

SiO <sub>2</sub>	99,4	99,4	99,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	0,3	0,4
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,07	0,03

*19.7.15*

**Euroquarz GmbH** ©2013 by Euroquarz GmbH

Südwall 15;

46282 Dorsten;

Telefon: +49 2362 2005 0;

Telefax: +49 2362 2005 99;

Email: [post@euroquarz.de](mailto:post@euroquarz.de)

Würeschnitzer Str. 2;

01936 Laufnitz;

Telefon: +49 35205 527 0;

Telefax: +49 35205 - 527 12;

Email: [owo@euroquarz.de](mailto:owo@euroquarz.de)

## 10 Anhang A2

### Datenblatt FeCl<sub>3</sub> flüssig

technische Information

Seite 1 / 1

#### Beschreibung:

Das Material liegt in Form einer konzentrierten, dunkelbraunen, klaren Eisen-III-Chloridlösung vor. Es wird in der Brauchwasseraufbereitung, in der Abwasserbehandlung und zur Reinigung industrieller Abwässer als Fällungs- und Flockungshilfsmittel eingesetzt und als Ätzmittel bei der Platinen- oder Formätzteilherstellung. EISEN(III)CHLORID-Lösung 40% enthält rezepturgemäß keine organischen Chlorverbindungen und liefert insofern keinen Beitrag zu entsprechenden Parametern in mit Eisen(III)chlorid aufbereitetem Wasser. Das o.g. Produkt erfüllt die Anforderungen gemäß Anhang 40 Punkt 2.7.3 der Abwasserverwaltungsvorschrift. Darüber hinaus erfüllt EISEN(III)CHLORID-Lösung 40% die Anforderungen der DIN EN 888 Eisen(III)chlorid zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch einschließlich der lebensmittelrechtlichen Vorschriften, insbesondere des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes (LMBG) und der Trinkwasserverordnung (TrinkwV).

Chem. Formel                      FeCl<sub>3</sub>(+H<sub>2</sub>O)

#### Chemische Zusammensetzung:

Wirksubstanz	ca. 2,5 mol Fe/k
Fe <sub>ges</sub>	13,8 ± 0,2 %
	138 g Eisen pro kg
	200 g Eisen pro l
Dichte	1,43 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität (20°C)	10 mPas
Viskosität (0°C)	24 mPas
pH	<1
Beginn der Kristallisation	- 13°C

#### Lieferform

flüssig in Gefahrgutkanistern/-flaschen

#### Transport und Lagerung

Das Sicherheitsdatenblatt informiert über weitere Produkteigenschaften, enthält Hinweise zur Gefahreinstufung sowie den zu beachtenden Vorschriften und beschreibt die erforderlichen Maßnahmen beim Umgang mit dem Produkt zum Schutz des Menschen und der Umwelt.

**Kemira**Where water  
meets chemistry™Technical Data Sheet  
Ref. PS-D0372-EN

1 (2)

05.2017

## SUPERFLOC® PWG series Dry PAMs

### Dry Anionic Polyelectrolyte

The Kemira Superfloc PWG series are highly effective flocculants which meet CEN 1407:2008 & CEN 1410:2008 regulation requirements. They are designed for rapid settling & clarification in the drinking water industry. They show exceptional performance in liquid-solid separations in a wide range of conditions.

#### Applications

These products may be beneficial in any liquid-solid separation process.

They are especially recommended for:

- Dissolved air flotation
- Filtration
- Gravity settling
- Mechanical dewatering
- Phosphorus removal.

#### Benefits

- Dry product minimizes storage requirements
- Economical to use - effective at very low dosage levels, resulting in reduced handling and storage costs
- Works over a wide range of conditions – the range of charges deal effectively with differing conditions of water
- Fast settling rates - achieve high solids removal efficiencies
- Easily soluble in water.
- Effective over a wide range of pH; does not alter the system pH.

- Eliminates or reduces use of inorganic salts

#### Health and Safety

Before handling these materials read the corresponding Kemira Material Safety Data Sheets (SDS) for safety and health data.

For chemical inventory regulatory control listing information, see the SDS.

#### Handling and Storage

Solutions are no more corrosive than water and recommended materials of construction include stainless steel, fibreglass, plastic, and glass or epoxy-lined vessels. Do not use iron, copper or aluminium.

The shelf life of these products is 24 months when stored in unopened packages in a dry atmosphere at temperatures no higher than 40°C/104°F.

Spilled polymer is very slippery and should be absorbed onto an inert material and collected prior to thoroughly flushing with water.

#### Product Addition

Stock solutions can be prepared up to 0.5 % concentration via an automated make-up unit or on a batch basis. Solutions should be aged 30-60 minutes for maximum effectiveness. High quality make up water should be used.

Secondary dilution water should be added to the stock solution prior to the addition point at a ratio up to 10:1. Centrifugal pumps should be avoided for polymer transfer.

Kemira Oyj  
P.O.Box 330 (Porkkalankatu 3)  
FI-00101 Helsinki  
Finland  
www.kemira.com

Europe, Middle-East and Africa  
Tel +358 10 5811  
North America  
Tel +1 770 438 1542

South America  
Tel +55 11 2189 4900  
Asia-Pacific  
Tel +86 21 6037 5099

# Kemira

Where water  
meets chemistry™

Technical Data Sheet  
Ref. PS-D0372-EN

2 (2)

05.2017

## Delivery

The Superfloc PWG series products are typically available in 25 kg & 750 kg moisture-resistant bags. Other pack sizes may be available on request.

## Regulatory Approvals

These products may conform to certain regulatory requirements. Please contact your Kemira sales representative for more details, or refer to the appropriate regulatory information sheet.

## Product Properties – Anionic

	A-100PWG	A-110PWG	A-120PWG	A-130PWG	A-150PWG
Chemical Type	Anionic Polyacrylamide				
Appearance	Off-white, Granular Powder				
Relative Charge	Low	Low	Medium	Medium	High
Molecular weight	High	High	High	High	High
Bulk Density (kg/litre)	0.78	0.80	0.82	0.83	0.87
pH of 0.5% solution (25°C)	7 - 9	7 - 9	7 - 9	7 - 9	7 - 9
Viscosity @ 25°C (cp / mPa.sec)					
0.10%	100	150	180	200	240
0.25%	250	350	400	450	500
0.50%	500	700	800	900	1000

## Product Properties – Cationic

	C-492PWG
Chemical Type	Cationic Polyacrylamide
Appearance	Off-white, Granular Powder
Relative Charge	Very Low
Molecular weight	High
Bulk Density (kg/litre)	0.75
pH of 0.5% solution (25°C)	3 - 5
Viscosity @ 25°C (cp / mPa.sec)	
0.10%	80
0.25%	200
0.50%	450
1.00%	1000

## Product Properties – Nonionic

	N-100PWG	N-300PWG
Chemical Type	Polyacrylamide	
Appearance	Off-white, Granular Powder	
Relative Charge	V Low Anionic	None
Molecular weight	High	High
Bulk Density (kg/litre)	0.72	0.72
pH of 0.5% solution (25°C)	4 - 7	4 - 7
Viscosity @ 25°C (cp / mPa.sec)		
0.10%	25	10
0.25%	70	30
0.50%	150	100
1.00%	400	300

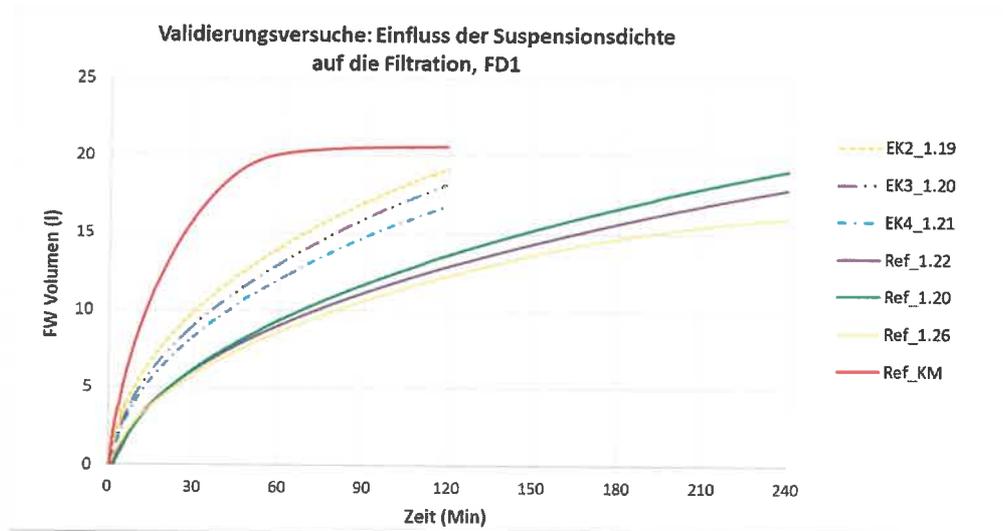
Kemira Oyj  
P.O. Box 330 (Porkkalanranta 3)  
FI-00101 Helsinki  
Finland  
www.kemira.com

Europe, Middle-East and Africa  
Tel +358 10 8611  
North America  
Tel +1 770 436 1542

South America  
Tel +55 11 2189 4900  
Asia-Pacific  
Tel +86 21 6037 5998

## 11 Anhang A3

### ES1: Validierungsversuche

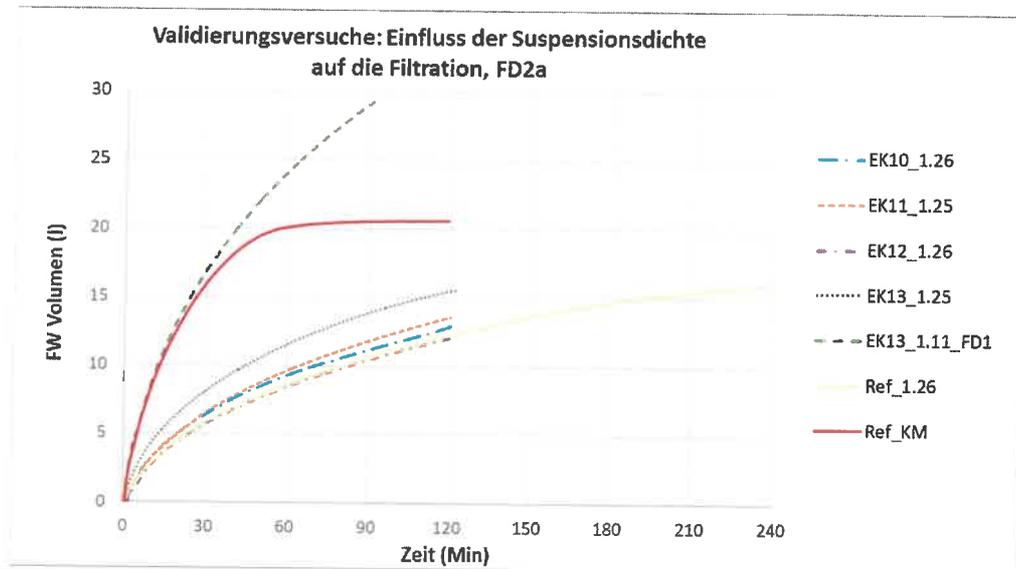


#### Versuchsparameter ES1

	EK2	EK3	EK4
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30
Stromstärke (A)	120	128	120
Stromdichte (A/l)	0,75	0,8	0,75
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0,20	0	0

#### Bewertungsparameter ES1

	EK2	EK3	EK4
$\Delta p$ (%)	24,9	25,4	22
$\Delta FW$ API (%)	63,7	64,4	64,1
Bkt (%)	-	24,5	19,1
RfkM (%)	-	-	47,55
FW Abgabe (l)	19,2	18,1	16,8
RfFk (%)	31,8	31,8	31,7
Vol 30 Min (l)	9,9	9,0	8,3
Vol 60 Min (l)	14,0	13,0	12,0
Zeit 16 l (Min)	79,2	91,0	107,5

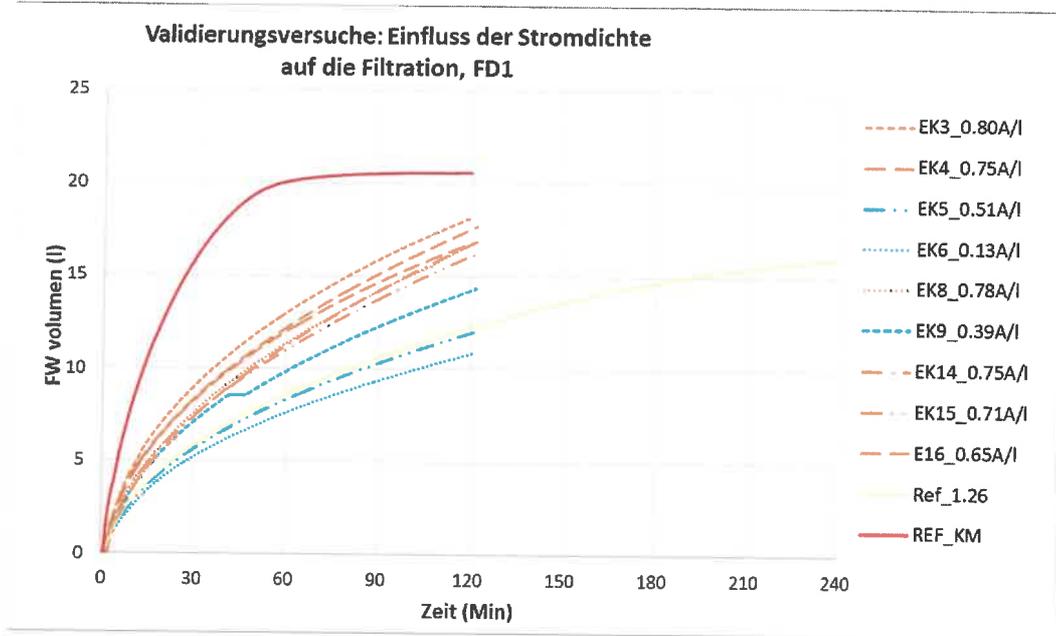


### Versuchsparameter ES1

	EK10	EK11	EK12	EK13
Abstand Elektroden (cm)	6,5	6,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30	60
Stromstärke (A)	70,4	52,8	42,8	100,8
Stromdichte (A/l)	0,44	0,33	0,27	0,63
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0,45	0	0	0,2*

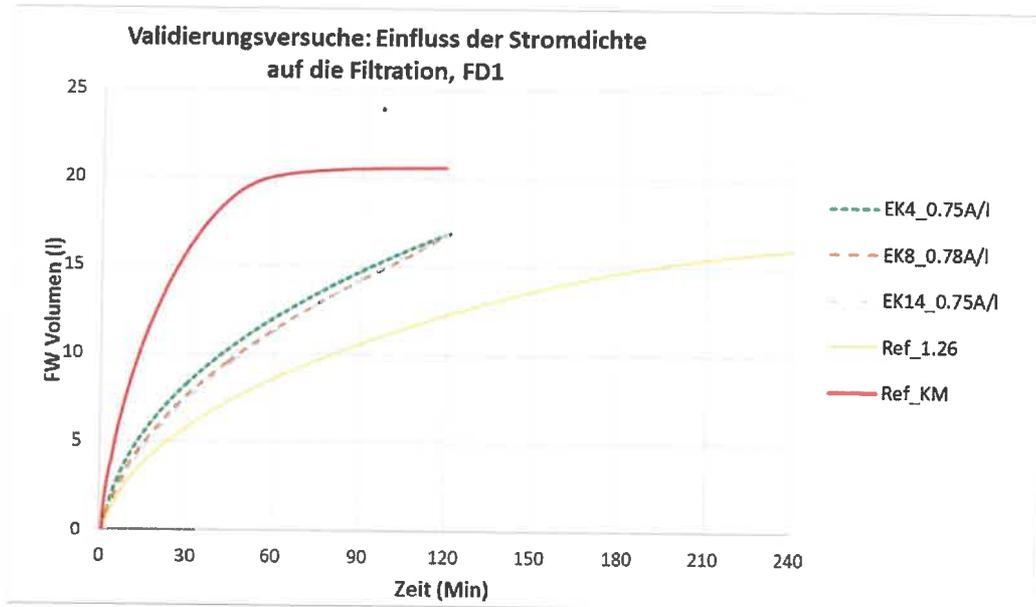
### Bewertungsparameter ES1

	EK10	EK11	EK12	EK13	EK13_FD1
$\Delta p$ (%)	2	1,6	0,8	1,6	49
$\Delta FW$ API (%)	-10,9	-1,9	-1,5	31,6	198,2
Bkt (%)	-	-	-	-	-
RfkM (%)	-	-	-	-	-
FW Abgabe (l)	12,9	13,6	12,1	15,5	29,2
RfFk (%)	31,9	32,3	32,8	28,5	38,8
Vol 30 Min (l)	6,4	6,6	5,7	8,1	16,9
Vol 60 Min (l)	9,3	9,7	8,5	11,5	24,1
Zeit 16 l (Min)	-	-	-	-	27,3



Versuchsp parameter ES1									
	EK3	EK4	EK5	EK6	EK8	EK9	EK14	EK15	EK16
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	6,5	4,5	4,5	4,5
Versuchs-dauer (min)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Stromstärke (A)	128	120	80,8	20,6	124,8	62,4	120	113,6	104
Stromdichte (A/l)	0,8	0,75	0,51	0,13	0,78	0,39	0,75	0,71	0,65
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bewertungsparameter ES1									
	EK3	EK4	EK5	EK6	EK8	EK9	EK14	EK15	EK16
$\Delta p$ (%)	25,4	22	25,2	7,7	30,2	28,9	30,9	26,1	28
$\Delta FW$ API (%)	64,4	64,1	79,5	0,9	86,5	38,6	109,7	96,5	89,4
Bkt (%)	24,5	19,1	13,9	0,7	20,8	9,3	19,3	17	16,1
RfkM (%)	-	47,6	48,0	43,9	48,7	47,9	43,9	43,3	-
FW Abgabe (l)	18,1	16,8	12,0	10,8	16,8	14,3	16,8	16,1	17,6
RfFk (%)	31,8	31,7	35,0	33,5	34,9	34,2	32,3	32,9	33,3
Vol 30 Min (l)	9,0	8,3	5,6	5,2	7,6	7,1	7,4	7,4	8,4
Vol 60 Min (l)	13,0	12,0	8,3	7,6	11,4	9,8	11,2	11,0	12,2
Zeit 16 l (Min)	91,0	107,5	-	-	111,1	-	110,4	118,0	100,0

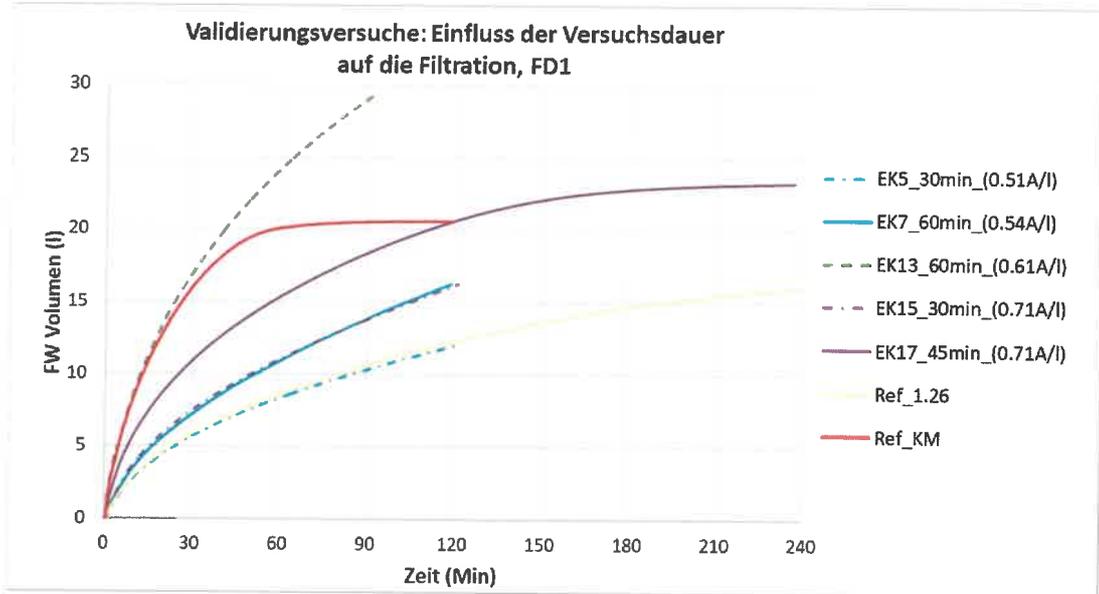


### Versuchsparameter ES1

	EK4	EK8	EK14
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30
Stromstärke (A)	120	124,8	120
Stromdichte (A/l)	0,75	0,78	0,75
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0

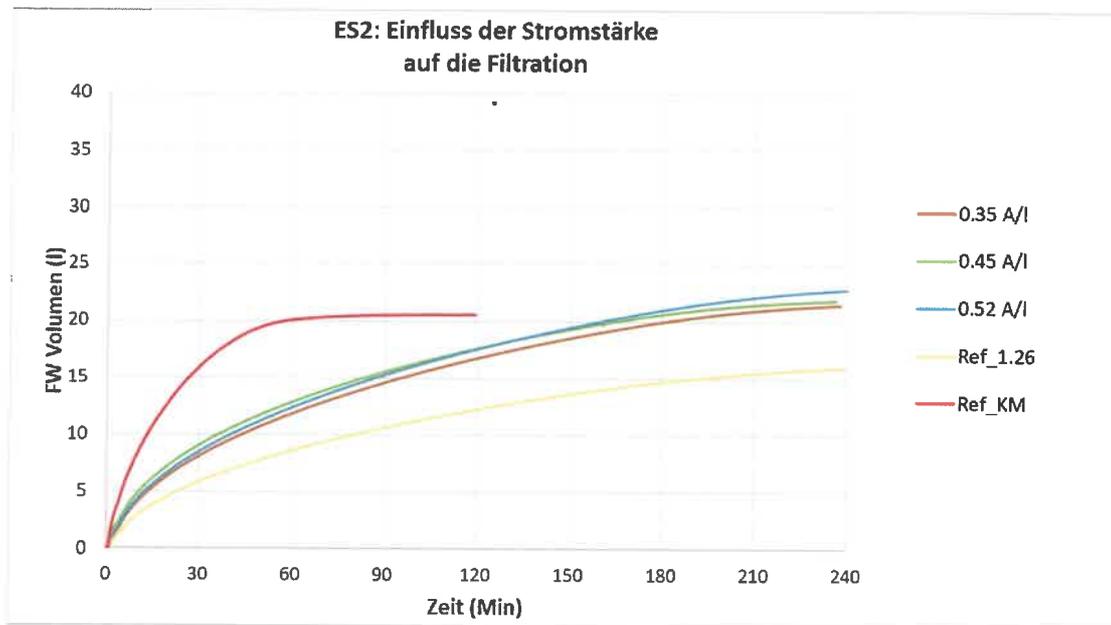
### Bewertungsparameter ES1

	EK4	EK8	EK14
$\Delta\rho$ (%):	22	30,2	30,9
$\Delta FW$ API (%)	64,1	86,5	109,7
Bkt (%)	19,1	20,8	19,3
RfkM (%):	47,6	48,7	43,9
FW Abgabe (l)	16,8	16,8	16,8
RfFk (%):	31,7	34,9	32,3
Vol 30 Min (l)	8,3	7,6	7,4
Vol 60 Min (l)	12,0	11,4	11,2
Zeit 16 l (Min)	107,5	111,1	110,4



Versuchsparameter ES1					
	EK5	EK7	EK13	EK15	EK17
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	60	60	30	45
Stromstärke (A)	80,8	86,4	100,8	113,6	113,6
Stromdichte (A/l)	0,51	0,54	0,63	0,71	0,71
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0.2*	0	0

Bewertungsparameter ES1					
	EK5	EK7	EK13	EK15	EK17
$\Delta p$ (%)	25,2	35,3	49	26,1	26,7
$\Delta FW$ API (%)	79,5	114,2	198,2	96,5	46,8
Bkt (%)	13,9	21,1	-	17	-
RfkM (%)	48,0	49,5	-	43,3	-
FW Abgabe (l)	12,0	16,2	29,2	16,1	20,6
RfFk (%)	35,0	36,1	38,8	32,9	28,7
Vol 30 Min (l)	5,6	7,2	16,9	7,4	10,9
Vol 60 Min (l)	8,3	10,9	24,1	11,0	15,3
Zeit 16 l (Min)	-	115,7	27,3	118,0	65,9

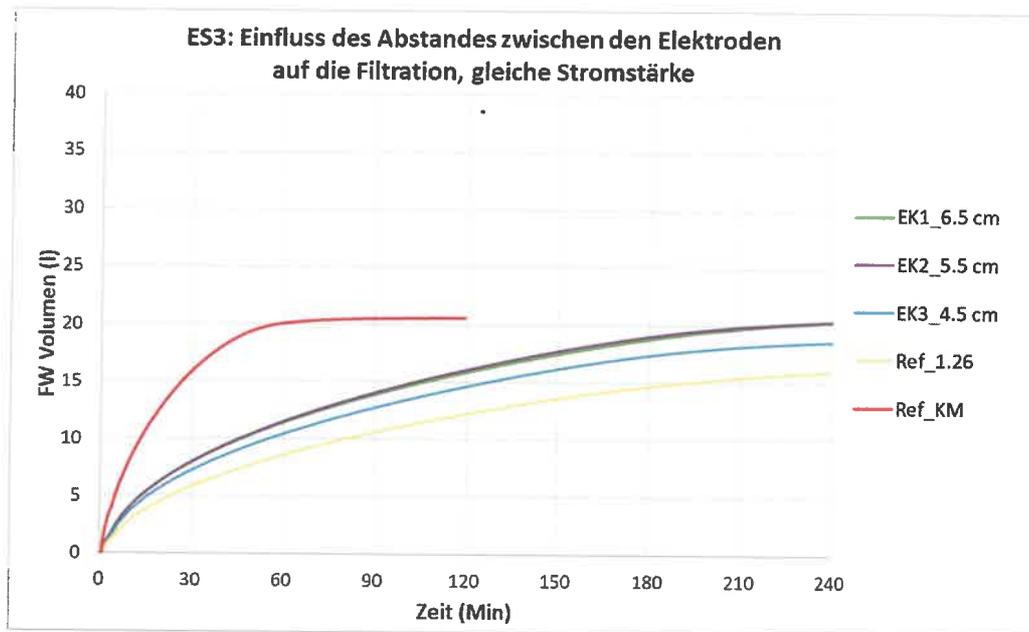
**ES2: Versuchsreihe „Stromstärke „****Versuchsparameter ES2**

	<b>EK1</b>	<b>EK2</b>	<b>EK3</b>
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30
Stromstärke (A)	56	72	83
Stromdichte (A/l)	0,35	0,45	0,52
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0

**Bewertungsparameter ES2**

	<b>EK4</b>	<b>EK8</b>	<b>EK14</b>
$\Delta p$ (%)	14,5	19,18	16,7
$\Delta FW$ API (%)	21,5	21,85	22,8
Bkt (%)	10,5	11,19	15,0
RfkM (%)	46,8	46,63	46,7
FW Abgabe (l)	21,5	21,85	22,8
RfFk (%)	26,6	26,41	27,3

### ES3: Versuchsreihe „Abstand zwischen den Elektroden“



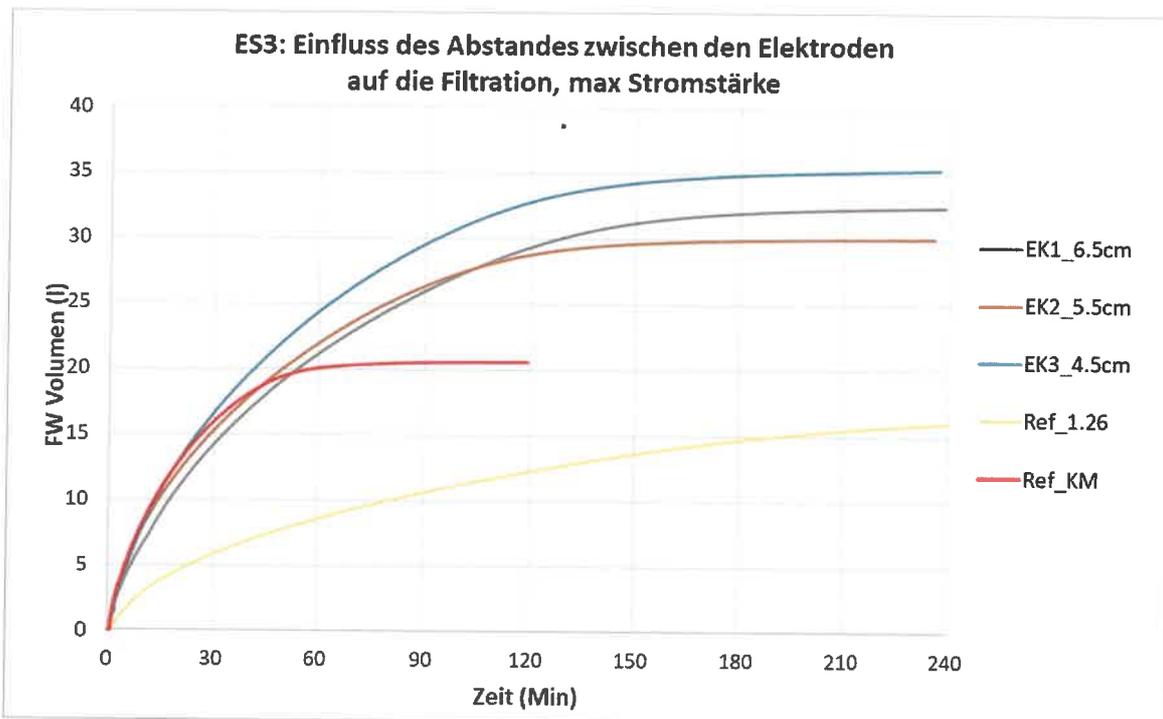
#### Versuchsparameter ES3

	EK1	EK2	EK3
Abstand Elektroden (cm)	6,5	5,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30
Stromstärke (A)	93	93	93
Stromdichte (A/l)	0,58	0,58	0,58
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0

#### Bewertungsparameter ES3

	EK1	EK2	EK3
$\Delta p$ (%)	18,7	22,8	30,7
$\Delta FW$ API (%)	16,5	32,7	62,9
Bkt (%)	17,4	20,6	19,0
RfKM (%)	46,8	45,5	44,3
FW Abgabe (l)	20,4	20,4	18,6
RfFk (%)	25,9	26,7	25,5

### ES3: Versuchsreihe „Abstand zwischen den Elektroden „



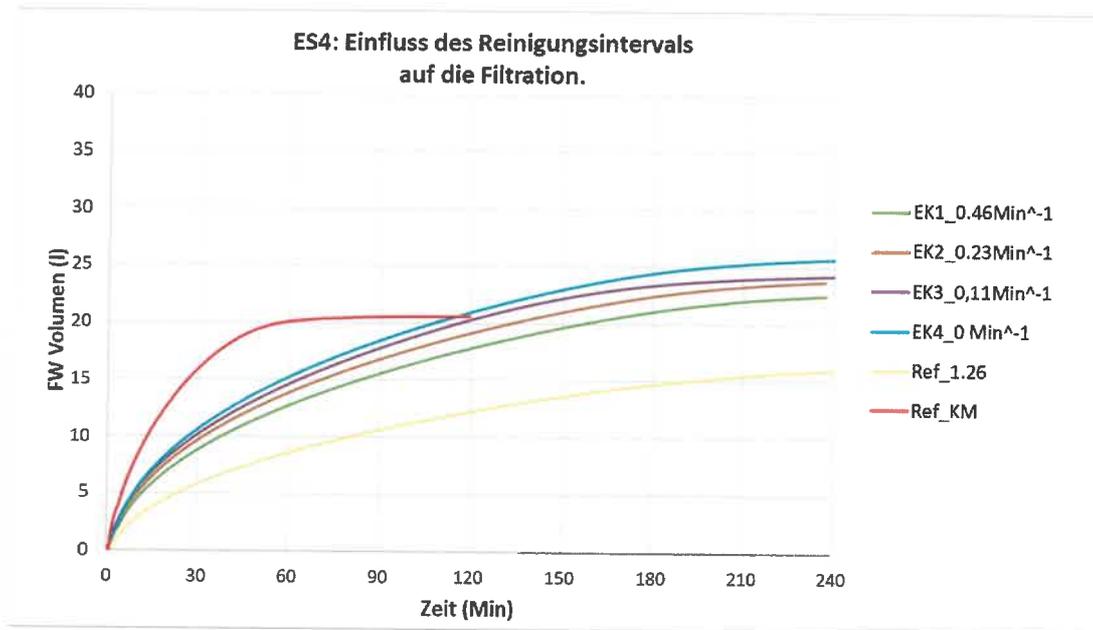
#### Versuchsparameter ES3

	EK1	EK2	EK3
Abstand Elektroden (cm)	6,5	5,5	4,5
Versuchsdauer (min)	60	60	60
Stromstärke (A)	85	96	110
Stromdichte (A/l)	0,53	0,60	0,69
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0

#### Bewertungsparameter ES3

	EK1	EK2	EK3
$\Delta p$ (%)	41,3	31,0	38,1
$\Delta FW$ API (%)	89,6	100,0	105,7
Bkt (%)	27,4	30,7	27,9
RfKM (%)	50,1	47,9	49,6
FW Abgabe (l)	32,5	30,1	35,3
RfFk (%)	27,1	27,0	24,7

### ES4: Versuchsreihe „Einfluss des Reinigungsintervalls“



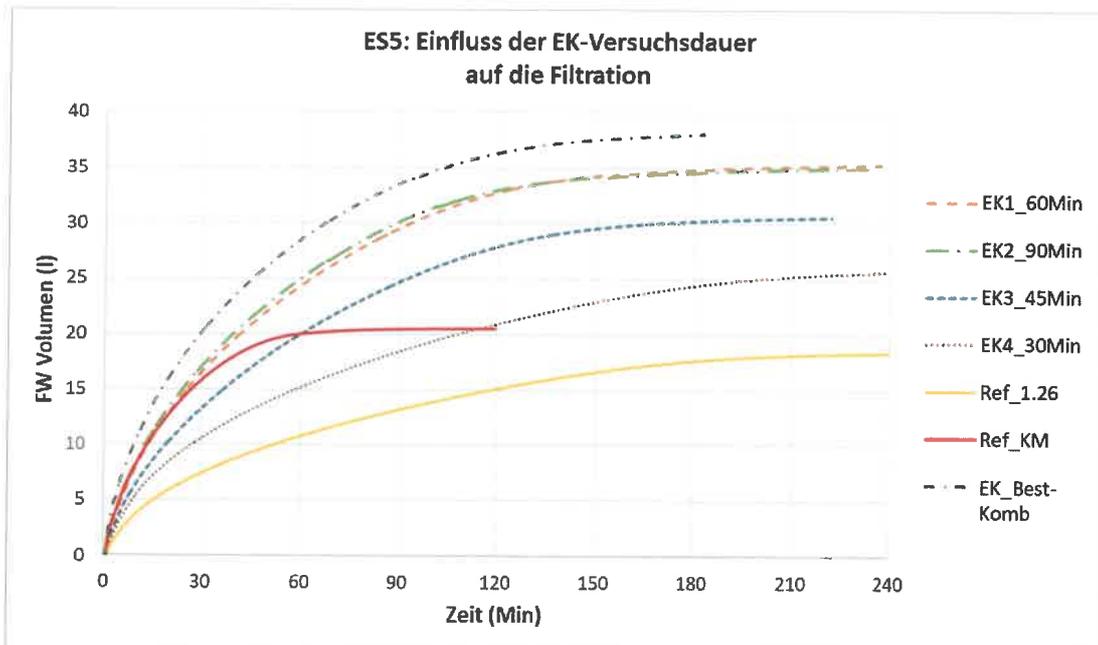
#### Versuchsparameter ES4

	EK1	EK2	EK3	EK4
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30	30
Stromstärke (A)	82	93	105	111
Stromdichte (A/l)	0,51	0,58	0,65	0,70
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0,46	0,23	0,11	0

#### Bewertungsparameter ES4

	EK1	EK2	EK3	Ek4
$\Delta p$ (%)	17,4	21,6	22,5	25,1
$\Delta FW$ API (%)	20,6	29,7	37,7	34,1
Bkt (%)	5,3	9,2	11,2	18,8
RfkM (%)	46,5	48,5	45,7	48
FW Abgabe (l)	22,5	23,7	24,3	25,7
RfFk (%)	26,1	26,2	26,1	25,1

### ES5: Versuchsreihe „Einfluss der Versuchsdauer“



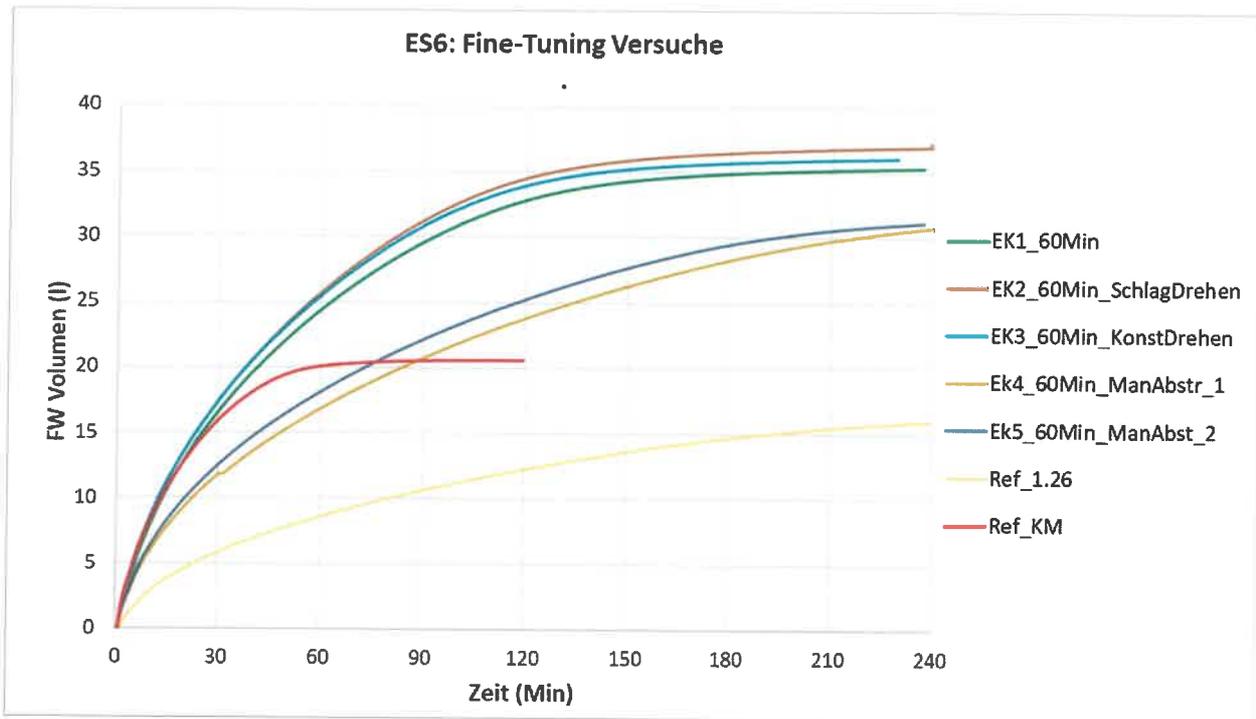
#### Versuchsparameter ES5

	EK1	EK2	EK3	EK4
Abstand EI (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	60	90	45	30
Stromstärke (A)	110	94	128	111
Amperestunde (Ah)	110	141	96	56
Amperestunde-Stromdichte (Ah/l)	0,69	0,88	0,60	0,35
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0	0

#### Bewertungsparameter ES5

	EK1	EK2	EK3	EK4
$\Delta p$ (%):	41,3	48,0	41,0	25,1
$\Delta FW$ API (%)	105,7	160,1	111,2	34,1
Bkt (%)	27,9	24,6	26,2	18,8
RfKM (%):	50,1	52,7	51,8	48,0
FW Abgabe (l)	35,3	35,0	30,6	25,7
RfFk (%):	27,4	27,6	26,9	25,1

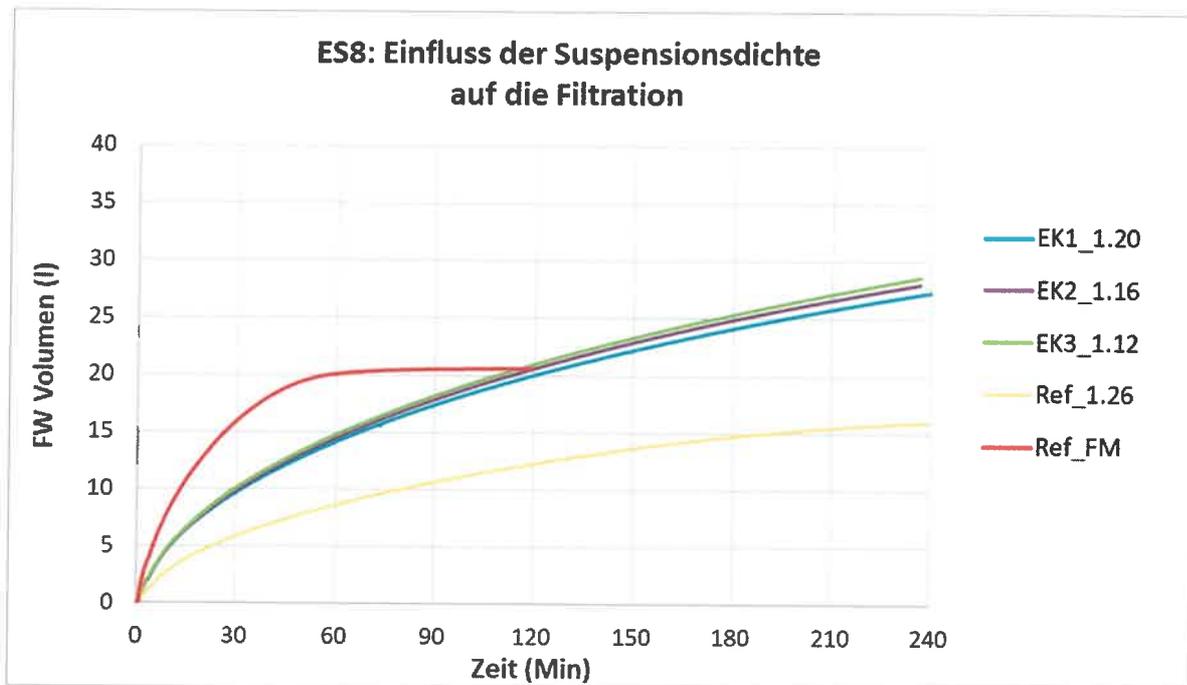
**ES6: Versuchsreihe „Fine-tuning“ Versuche**



Versuchsparameter ES6					
	EK1	EK2 (SD)	EK3 (KD)	EK15 (MA1)	EK17 (MA2)
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	60	60	60	60	60
Stromstärke (A)	110,3	119,1	118,9	96,1	95,0
Stromdichte (A/l)	0,69	0,74	0,74	0,60	0,59

Bewertungsparameter ES6					
	EK5	EK7	EK13	EK15	EK17
$\Delta p$ (%)	41	45	40	29	32
$\Delta FW$ API (%)	106	147	111	62	89
Bkt (%)	27,9	25,8	28,3	21,3	18,7
RfK (%)	50,08	52,09	44,79	45,49	46,83
FW Abgabe (l)	35	36,5	35,3	-	-
RfFk (%)	27,42	27,76	27,69	-	-

## ES8: Versuchsreihe „Suspensionsdichte“



### Versuchsparameter ES8

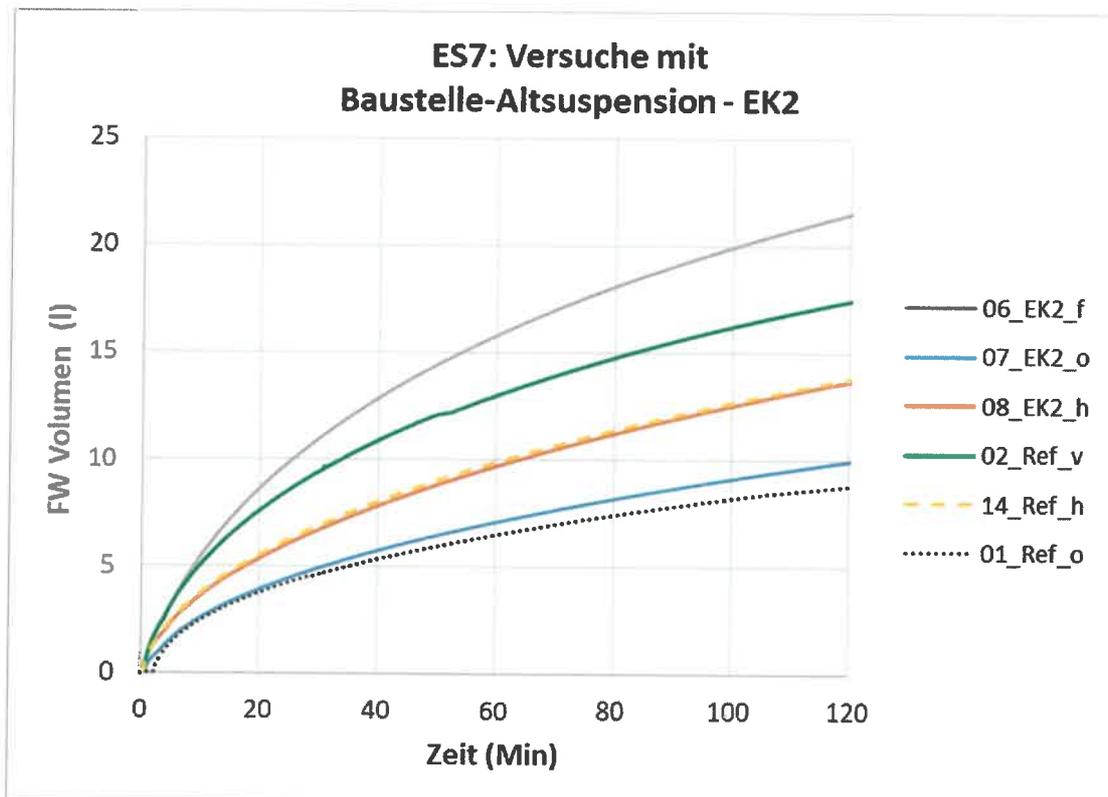
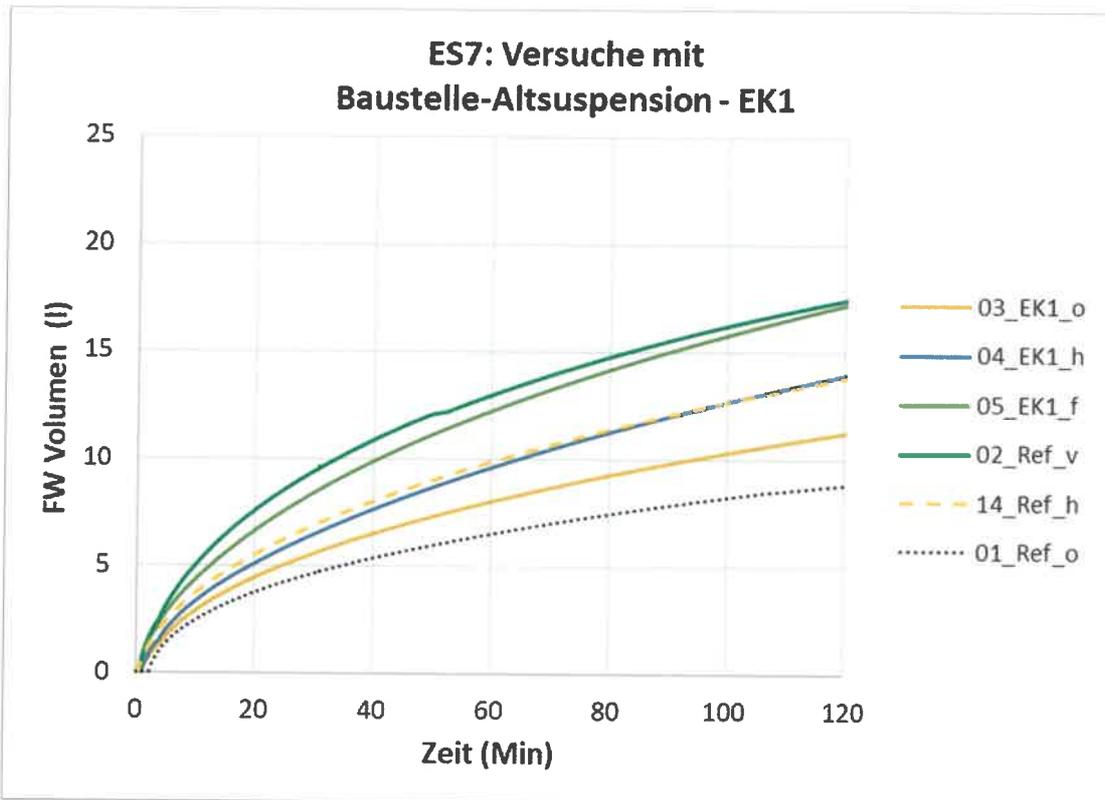
	EK1	EK2	EK3
Abstand Elektroden (cm)	4,5	4,5	4,5
Versuchsdauer (min)	30	30	30
Stromstärke (A)	98	95	100
Stromdichte (A/l)	0,61	0,59	0,63
Reinigungsintervall (Min <sup>-1</sup> )	0	0	0

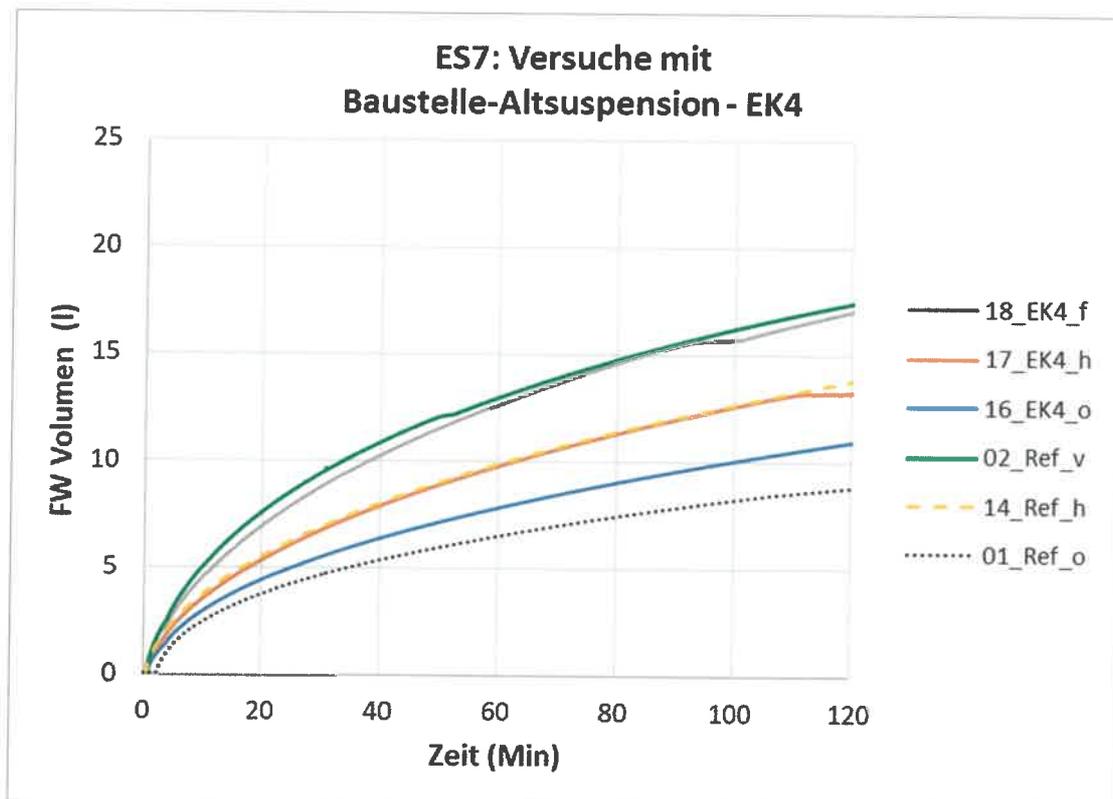
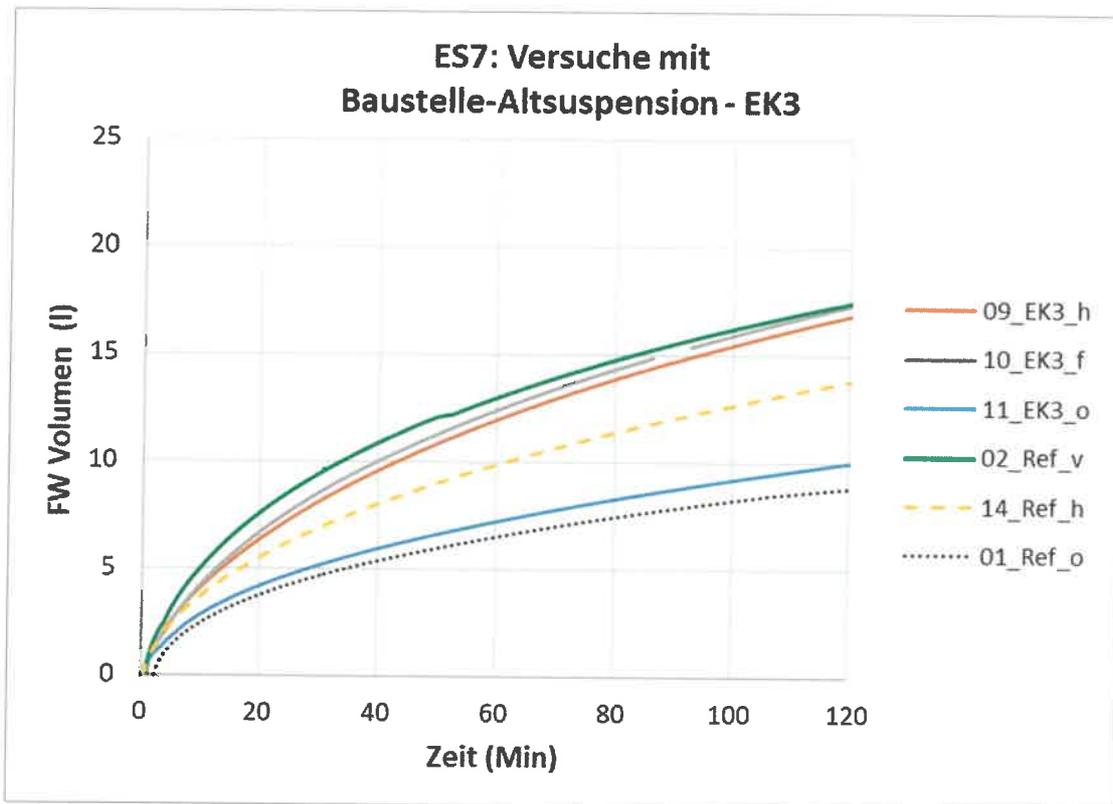
### Bewertungsparameter ES8

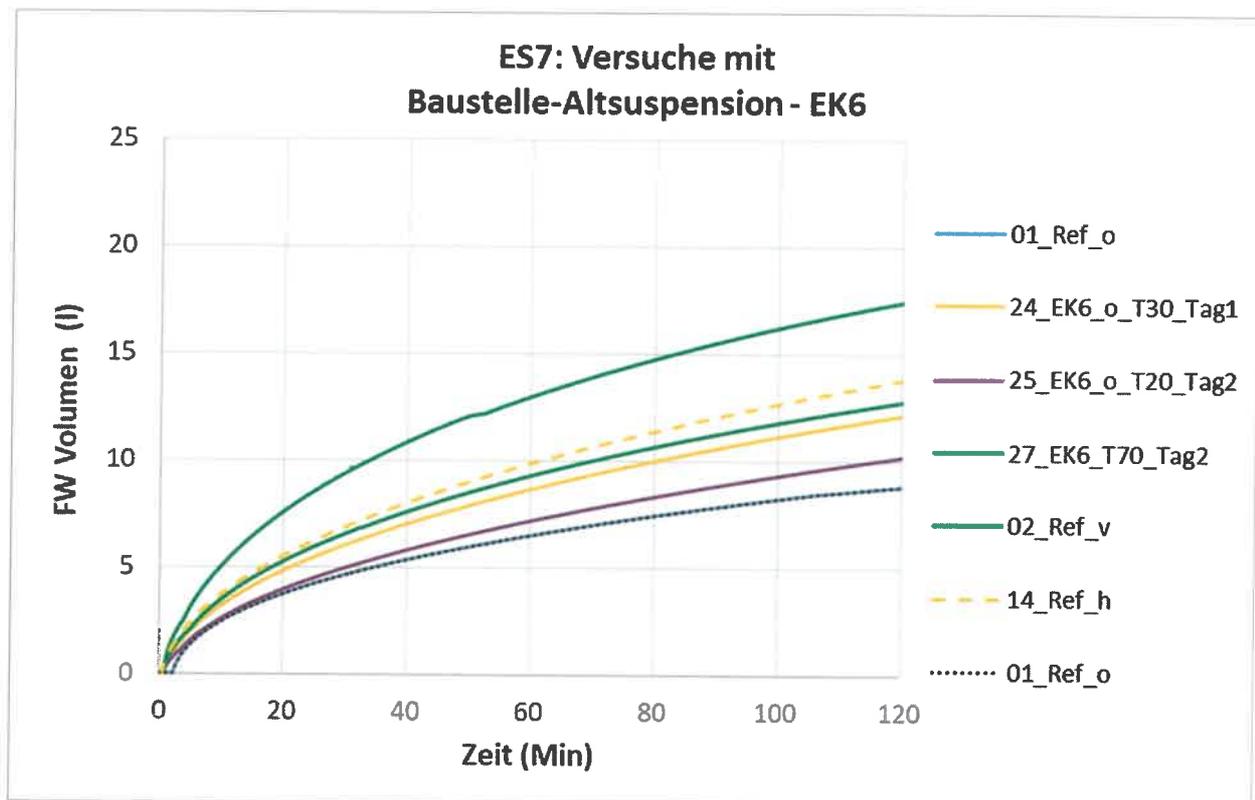
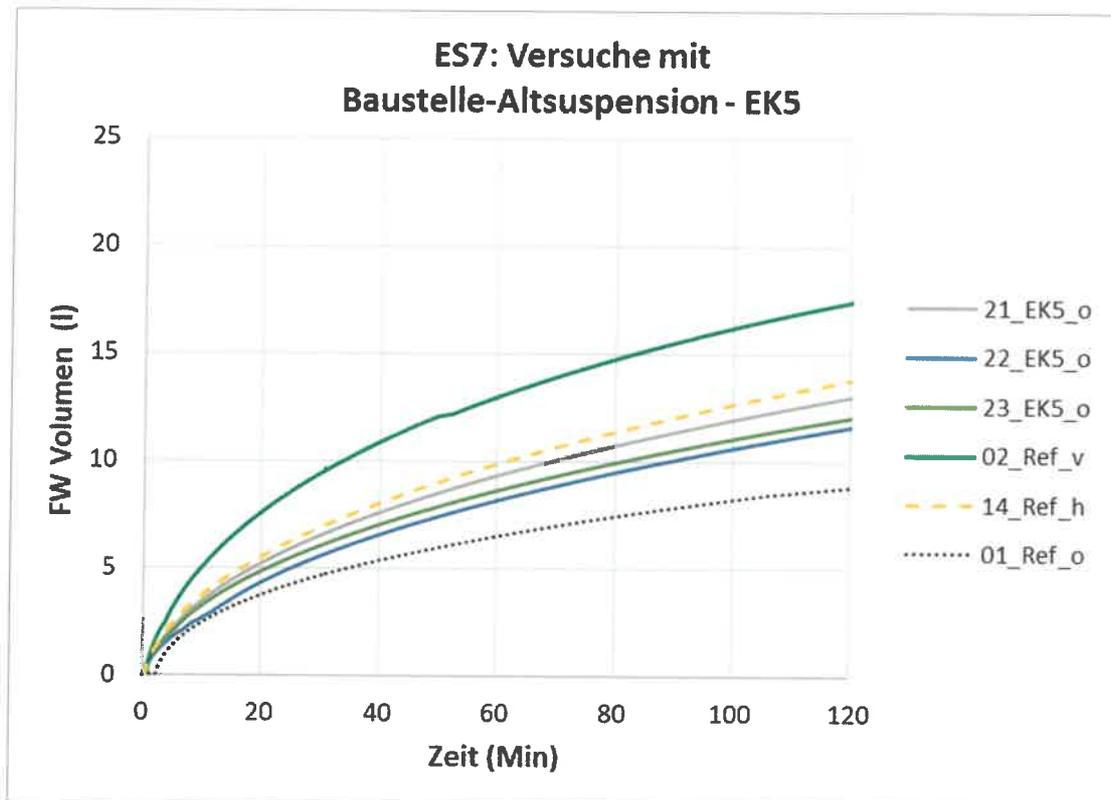
	EK1	EK2	EK3
$\Delta p$ (%)	27	22,1	24,8
$\Delta FW$ API (%)	-	40,9	66,1
Bkt (%)	11,7	13,9	15,1
RfkM (%)	49,8	55,4	63,6
FW Abgabe (l)	27,7	28,06	28,7
RfFk (%)	30,8	38,7	47,6

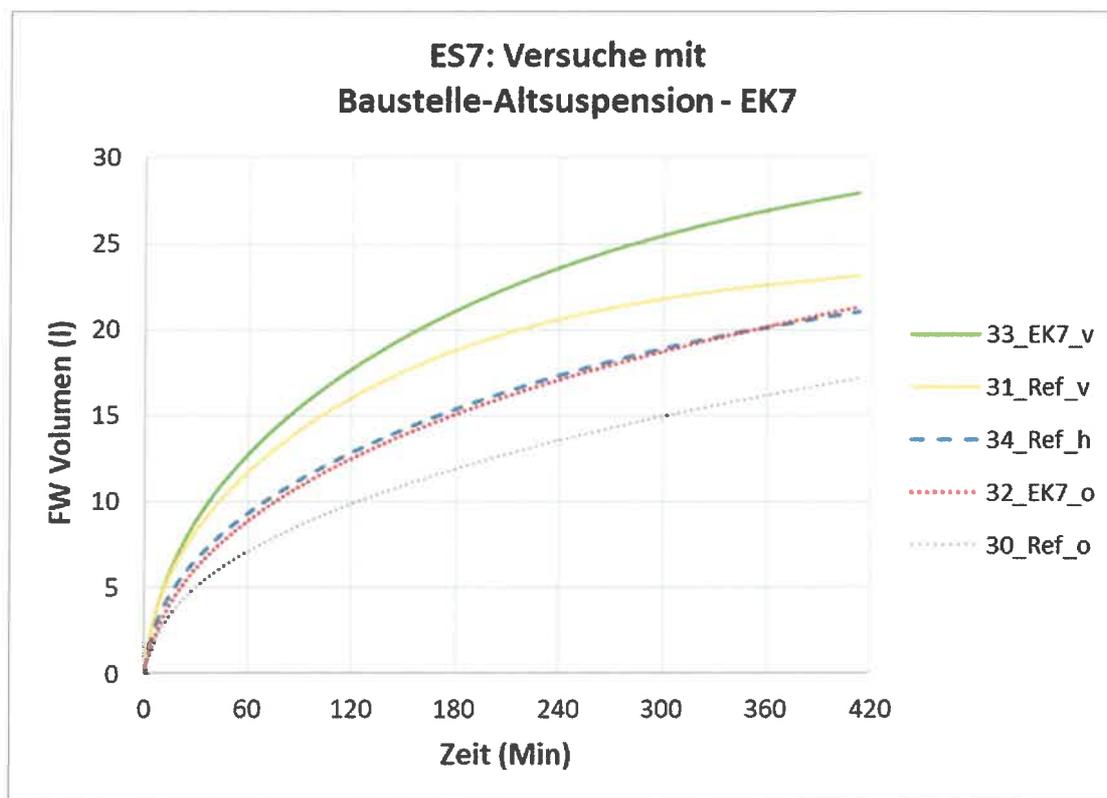
## 12 Anhang A4

### ES7: Versuchsreihe „Baustelle-Suspension“









	Restfeuchte (%)		Eff. Parameter		
	RfkM (koag. Material)	RfFk (Filterkuchen):	Bkt (%)	$\Delta\rho$ (%)	$\Delta FW$ API (%)
01_Ref_o	-	50,13	-	-	-
02_Ref_f	-	39,13	-	-	-
03_EK1_o_0,86	57,56	51,09	20,42	25,56	6,82
04_EK1_h	-	57,84	-	34,38	31,82
05_EK1_f	-	52,36	-	33,81	69,32
06_EK2_f_0,98	55,99	47,00	22,09	35,63	88,64
07_EK2_o	-	59,24	-	28,37	2,27
08_EK2_h	-	57,93	-	32,09	35,23
09_EK3_h_0,79	63,30	53,71	16,02	32,09	51,14
10_EK3_f	-	48,57	-	25,79	63,07
11_EK3_o	-	62,94	-	22,64	3,98
12_Ref_f_10d	-	43,34	-	-	-
13_Ref_o_10d	-	53,23	-	-	-
14_Ref_h_1	-	49,25	-	-	-
16_EK4_o_6.5_0,76	64,13	54,88	11,66	23,80	14,13
17_EK4_h_6.5	-	51,19	-	17,26	30,43
18_EK4_f_6.5	-	43,80	-	23,51	67,93
19_Ref_Wsr_1.15	-	55,86	-	-	-
20_Ref_Wsr_1.12	-	62,93	-	-	-
21_EK5_o_Dnh	42,70	71,58	-	49,55	15,35
22_EK5_o_Tnh	-	69,33	-	44,18	8,91
23_EK5_o_Wam	-	69,85	-	44,78	15,35
24_EK6_o_T30	65,20	54,36	-	19,30	8,12
25_EK6_o_Klt	-	68,26	-	13,45	1,02
26_EK6_T32	-	59,35	-	14,33	10,66
27_EK6_T70	-	57,35	-	15,50	14,72
28_Ref_D113	-	64,07	-	-	-
29_Ref_D1112	-	47,46	-	-	-
30_Ref_o_Lang	-	33,11	-	-	-
31_Ref_f_Lang	-	31,57	-	-	-
32_EK7_o_Lang	58,11	265,81	-	33,52	18,85
33_EK7_f_Lang	-	35,62	-	28,41	63,35
34_Ref_h_Lang	-	32,02	-	-	-

**ES7: Effektivitätsparameter, alle Versuche**

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	Re
01 Ref o	7,8	0,0	49,5	-19,9	-34,5	-47,7	-58,8	-9,2	-34,0	45,6	-49,9	-10,2	-44,8	-3,0	-34,2	-35,5	-17,7	-34,4	-49,1	-19,8	-29,2	-30,9	-22,0	-25,4	-25,9	-11,2	-39,7	-30,2	-25,1	64,0	-9,2	-44,6	-28,1	-49,4	-30,4
02 Ref f	15,5	97,8	0,0	58,4	29,6	3,5	-18,5	79,7	30,6	5,7	-0,9	77,7	9,1	92,0	30,2	27,7	62,7	29,7	0,6	58,6	40,1	36,7	54,3	47,6	46,6	75,7	19,2	38,1	48,1	-28,8	79,7	9,5	42,3	0,1	37,6
03 EK1 o,0,86	9,8	24,9	-36,9	0,0	-18,2	-34,7	-48,6	13,4	-17,6	-33,3	-27,4	12,1	-31,1	21,2	-17,8	-19,4	2,7	-18,1	-2,6	0,1	-11,6	-13,7	-2,6	-6,9	-7,5	10,9	-24,8	-12,8	-6,5	-55,1	13,4	-30,9	-10,2	-36,8	-13,1
04 EK1 h	12,0	52,7	-22,8	22,3	0,0	-20,1	-37,1	38,7	0,8	-18,5	-23,5	37,1	-15,8	48,1	0,5	-1,5	25,6	0,1	-22,3	22,4	8,1	5,5	19,1	13,9	13,1	85,6	-8,0	6,6	14,3	-45,0	38,7	-15,5	9,8	-22,8	6,2
05 EK1 f	15,0	91,2	-3,4	53,1	25,2	0,0	-21,2	73,7	26,2	2,1	-4,2	71,7	5,5	85,5	25,9	23,4	57,3	25,3	-2,7	53,3	35,4	32,1	49,2	42,6	41,7	69,8	15,2	33,5	43,2	-31,2	73,7	5,9	37,5	-3,3	33,0
06 EK2 f,0,98	19,0	34,7	22,7	94,4	59,0	27,0	0,0	100,5	60,2	29,6	21,6	119,0	33,9	135,5	59,8	56,6	98,7	59,1	23,5	94,6	71,9	67,7	89,4	81,1	79,9	115,5	46,3	69,5	81,8	-12,6	100,5	34,4	74,6	22,8	68,9
07 EK2 o	8,6	10,1	-44,4	-11,8	-27,9	-42,6	-54,7	0,0	-27,4	-41,2	-44,9	-1,1	-39,3	6,8	-27,5	-29,0	-9,4	-27,8	-44,0	-11,8	-22,0	-24,0	-14,1	-17,9	-18,4	-2,3	-33,7	-23,2	-17,6	60,4	0,0	-39,1	-20,8	-44,3	-23,4
08 EK2 h	11,9	51,5	-23,4	21,3	-0,8	-20,7	-37,6	37,7	0,0	-19,1	-24,1	36,1	-16,4	47,0	-0,3	-2,2	24,7	-0,7	-22,9	21,5	7,3	4,7	18,2	13,0	12,3	34,5	-8,7	5,8	13,5	-45,3	37,7	-16,1	9,0	-23,4	5,4
09 EK3 h,0,79	14,7	87,2	-5,4	49,9	22,6	-2,1	-22,9	70,1	23,6	0,0	-6,2	68,2	3,3	81,7	23,3	20,8	54,0	22,7	-4,7	50,1	32,6	29,3	46,1	39,7	38,8	66,3	12,8	30,7	40,2	-32,6	70,1	3,7	34,7	-5,3	30,3
10 EK3 f	15,7	99,6	0,9	59,9	30,7	4,4	-17,8	81,3	31,7	6,6	0,0	79,3	10,1	93,7	81,4	28,8	64,2	30,9	1,6	60,0	41,4	37,9	55,7	48,9	47,9	77,2	20,3	39,4	49,5	-28,1	81,3	10,5	43,6	1,0	38,9
11 EK3 o	8,7	11,4	-43,7	-10,8	-27,1	-41,8	-54,1	1,2	-26,5	-40,5	-44,2	0,0	-36,6	8,0	-26,7	-28,1	-8,4	-27,0	-43,3	-10,7	-21,1	-23,1	-13,1	-16,9	-17,5	-1,1	-32,9	-22,3	-16,6	-53,9	1,2	-38,3	-19,9	-43,7	-22,5
12 Ref f,10d	14,2	81,3	-8,4	45,1	18,7	-5,2	-25,3	64,7	19,6	-3,2	-9,2	62,8	0,0	75,9	19,3	17,0	49,1	18,8	-7,8	45,3	28,4	25,2	41,4	35,2	34,3	60,9	9,2	26,5	35,7	-34,8	64,7	0,4	30,4	-8,3	26,1
13 Ref o,10d	8,1	3,1	-47,9	-17,5	-32,5	-46,1	-57,5	-6,4	-32,0	-45,0	-48,4	-7,4	-43,1	0,0	-32,2	-33,5	-15,2	-32,4	-47,6	-17,4	-27,0	-28,8	-19,6	-23,1	-23,6	-8,5	-37,9	-25,0	-22,8	-62,3	-6,4	-42,9	-25,9	-47,9	-28,3
14 Ref h,1	11,9	51,9	-23,2	21,7	-0,5	-20,5	-37,4	38,0	0,3	-18,9	-23,9	36,4	-16,2	47,4	0,0	-2,0	25,0	-0,4	-22,7	21,8	7,6	4,9	18,5	13,3	12,6	34,9	-8,5	6,1	13,8	-43,3	38,0	-15,9	9,3	-23,2	5,7
15 Ref h,2	12,2	55,0	-21,7	24,1	1,5	-18,9	-36,2	40,8	2,3	-17,2	-22,4	39,2	-14,5	50,4	2,0	0,0	27,5	1,6	-21,2	24,2	9,8	7,0	20,9	15,6	14,8	37,6	-6,6	8,2	16,0	-44,2	40,8	-14,2	11,5	-21,6	7,8
16 EK4 o,6,5,0,76	9,5	21,6	38,6	-2,7	-20,4	-36,4	-49,9	10,4	-19,8	-35,1	-39,1	9,2	-32,9	17,9	-20,0	-21,6	0,0	-20,3	-38,2	-2,6	-13,9	-16,0	-5,2	-9,3	-9,9	7,9	-26,7	-15,1	-9,0	-58,2	10,4	-32,7	-12,6	-38,5	-15,4
17 EK4 h,6,5	12,0	52,6	-22,9	22,2	-0,1	-20,2	-37,2	38,6	0,7	-18,5	-23,6	37,0	-15,8	48,0	0,4	-1,6	25,5	0,0	-22,4	22,3	8,0	5,4	19,0	13,8	13,0	35,4	-8,1	6,5	14,2	-45,1	38,6	-15,5	9,7	-22,8	6,1
18 EK4 f,6,5	15,4	96,6	-0,6	57,4	28,7	2,8	-19,0	78,6	29,7	5,0	-1,5	76,5	8,4	90,7	29,4	26,8	61,7	28,8	0,0	57,6	39,2	35,8	53,3	46,6	45,7	74,5	18,4	37,2	47,2	-29,2	78,6	8,8	41,4	-0,6	36,7
19 Ref Wsr,1,15	9,8	24,7	-36,9	-0,1	-18,3	-34,8	-48,6	13,3	-17,7	-33,4	-37,5	12,0	-31,2	21,0	-17,9	-19,5	2,6	-18,2	-36,5	0,0	-11,7	-13,8	-2,7	-6,9	-7,6	10,8	-24,8	-12,9	-6,6	-53,1	13,3	-30,9	-10,3	-36,9	-43,2
20 Ref Wsr,1,12	11,1	41,2	-28,6	13,1	-7,5	-26,2	-41,8	28,3	-6,8	-24,6	-29,3	26,8	-22,1	37,0	-7,1	-8,9	16,2	-7,4	-28,2	13,2	0,0	-2,5	10,1	5,3	4,6	25,4	-14,9	-1,4	5,7	-49,2	28,3	-21,8	1,6	-28,6	-1,8
21 EK5 o, Dnh,0,94	11,4	44,8	-26,8	15,9	-5,2	-24,3	-40,4	31,5	-4,5	-22,7	-27,5	30,0	-20,1	40,5	-4,7	-6,6	19,1	-5,1	-26,3	16,1	2,5	0,0	12,9	8,0	7,3	28,5	-12,8	1,1	8,4	-47,9	31,5	-19,8	4,1	-26,8	0,7
22 EK5 o, Tnh	10,1	28,2	-35,2	2,7	-16,0	-33,0	-47,2	16,5	-15,4	-31,5	-35,8	15,1	-29,3	24,4	-15,6	-17,3	5,5	-16,0	-34,8	2,8	-9,2	-11,5	0,0	-4,4	-5,0	13,8	-22,8	-10,5	-4,0	-51,9	16,5	-29,0	-7,8	-35,2	-10,8
23 EK5 o, Warm	10,5	34,1	-32,7	7,4	-12,2	-29,9	-44,8	21,8	-11,5	-28,4	-32,8	20,4	-26,0	30,1	-11,8	-13,5	10,3	-12,1	-31,8	7,5	-5,1	-7,4	4,6	0,0	-0,7	19,0	-19,2	-6,4	0,4	-51,7	21,8	-25,8	-3,6	-32,2	-6,7
24 EK6 o, T30,0,97	10,6	34,9	-31,8	8,1	-11,6	-29,4	-44,4	22,6	-10,9	-27,9	-32,4	21,2	-25,5	30,9	-11,2	-12,9	11,0	-11,5	-31,3	8,2	-4,4	-6,8	5,3	0,7	0,0	19,8	-18,7	-5,8	1,1	-51,4	22,6	-25,3	-2,9	-31,7	-6,1
25 EK6 o, Klt	8,8	12,6	-43,1	-9,8	-26,2	-41,1	-53,6	2,3	-25,7	-39,9	-43,6	1,1	-37,9	9,3	-25,9	-27,3	-7,3	-26,2	-42,7	-9,7	-20,2	-22,2	-12,1	-16,0	-16,5	0,0	-32,1	-21,4	-15,7	-59,5	2,3	-37,5	-19,0	-43,0	-21,7
26 EK6 T32	19,0	65,9	-16,1	32,9	8,7	-13,2	-31,6	50,8	9,5	-11,4	-16,9	49,0	-8,4	61,0	9,2	7,1	36,5	8,8	-15,6	33,0	17,5	14,6	29,5	23,8	23,0	47,3	0,0	15,9	24,3	-40,3	50,8	-8,1	19,4	-16,1	15,4
27 EK6 T70	11,2	43,2	-27,6	14,7	-6,2	-25,1	-41,0	30,1	-5,5	-23,5	-28,2	28,6	-21,0	39,0	-5,7	-7,6	17,8	-6,1	-27,1	14,8	1,4	-1,1	11,7	6,9	6,1	27,2	-13,7	0,0	7,3	-48,4	30,1	-20,7	3,0	-27,5	-0,4
28 Ref D113	10,5	33,5	-32,5	6,9	-12,5	-30,2	-45,0	21,3	-11,9	-28,7	-33,1	19,9	-26,3	29,6	-12,1	-13,8	9,9	-12,5	-32,1	7,1	-5,4	-7,8	4,2	-0,4	-1,0	18,6	-19,5	-6,8	0,0	-31,9	21,3	-26,1	-3,9	-32,5	-7,1
29 Ref D1112	21,8	37,7	40,4	122,5	82,0	45,3	14,5	157,4	83,3	48,4	39,2	89,5	33,3	169,3	82,9	79,3	128,5	83,1	41,3	122,7	96,7	91,9	116,7	107,2	105,9	146,3	67,4	95,9	108,0	0,0	152,4	53,8	99,8	40,5	93,3
30 Ref o, Lang	8,6	10,1	-44,4	-11,8	-27,9	-42,6	-54,7	0,0	-27,4	-41,2	-44,9	-1,1	-39,3	6,8	-27,5	-29,0	-9,4	-27,8	-44,0	-11,8	-22,0	-24,0	-14,1	-17,9	-18,4	-2,3	-33,7	-23,2	-17,6	60,4	0,0	-39,1	-20,8	-44,3	-23,4
31 Ref f, Lang	14,2	80,6	-8,7	44,6	18,3	-5,5	-25,6	64,1	19,2	-3,5	-9,2	62,2	-0,4	75,2	18,9	16,5	48,6	18,4	-8,1	44,8	27,9	24,8	40,9	34,7	33,8	60,4	8,8	26,1	35,2	-30,0	64,1	0,0	29,9	-8,6	25,6
32 EK7 o, Lang,0,91	10,9	39,0	-29,7	11,3	-8,9	-27,3	-42,7	26,3	-8,2	-25,7	-30,4	24,9	-23,3	34,9	-8,5	-10,3	14,4	-8,9	-29,3	11,5	-1,5	-4,0	8,5	3,7	3,0	23,4	-16,2	-2,9	4,1	-50,0	26,3	-23,0	0,0	-29,7	-3,3
33 EK7 f, Lang	15,5	97,7	-0,1	58,3	29,5	3,4	-18,5	79,6	30,5	5,6	-1,0	77,5	9,1	91,8	30,1	27,6	62,6	29,6	0,6	58,5	40,0	36,6	54,2	47,5	46,5	75,5	19,1	38,0	48,0	-28,8	79,6	9,5	42,2	0,0	37,3
34 Ref h, Lang	11,3	43,8	-27,3	15,1	-5,8	-24,8	-40,8	30,6	-5,1	-23,2	-28,0	29,1	-20,7	39,5	-5,4	-7,2	18,3	-5,8	-26,9	15,2	1,8	-0,7	12,1	7,2	6,5	27,5	-13,4	0,4	7,6	-48,3	30,6	-20,4	3,4	-27,3	0,0

ES7: Vergleich der Filtratwasserabgabe aller Filtrationsversuche (t=90 min)

## 13 Anhang A5: Entwurf einer Ökobilanz (Paya, 2016)

Im diesem Kapitel soll eine vereinfachte Ökobilanz von unterschiedlichen Entwässerungsprozessen für gebrauchte Bentonitsuspensionen entworfen werden. Derartige Bilanzen dienen dazu, die mit einem Produkt oder Verfahren verknüpften Umweltlasten ganzheitlich zu erfassen und zu quantifizieren. Eine „ganzheitliche“ Betrachtung bedeutet die Berücksichtigung aller vor- und nachgeschalteten Prozessschritte (auch Lebenswegabschnitte genannt). Hierbei ist das Ziel, die Umweltlasten von zwei unterschiedlichen Entwässerungsprozessen für Bentonitsuspensionen miteinander zu vergleichen.

Im Folgenden wird die Definition und die Struktur einer Ökobilanz vorgestellt. Anschließend wird der konventionelle Entwässerungsprozess durch die Kammerfilterpresse unter Zugabe von organischen polymerartigen Flockungsmitteln bilanziert. Zusätzlich wird der neuartige mit der Elektrokoagulation kombinierte Entwässerungsprozess mit EK-Zelle und Kammerfilterpresse bilanziert. Abschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen und diskutiert.

### 13.1 Hintergrund: Definition und Struktur einer Ökobilanz

Die DIN EN ISO 14040:2009 definiert die Ökobilanz als „eine Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“. Durch eine derartige Bilanz kann beurteilt werden, inwiefern ein Prozess umweltfreundlicher ist als andere bilanzierte Prozesse.

Eine mögliche Anwendung stellt die Entwicklung und Verbesserung von Produkten oder Prozessen dar. Im Bereich der Verfahrenstechnik werden Ökobilanzen zur Entwicklung von Konzepten für die Abwasseraufbereitung (Remy, 2010) von Entsorgungsoptionen (Kleineetal, 2007) sowie zum Vergleich von Wasserpumpen (Wagner et al., 2013; Schwarz et al., 2014) eingesetzt. Bauwerke wie z.B. Holzbauwerkwerke werden in gleicher Weise mit dem Ziel bilanziert, die Auswirkung von unterschiedlichen Ressourcen im Lebenszyklus von Gebäuden zu bestimmen (Hafner, o.J.).

Eine weitere Anwendung liegt in der ökologischen Verbesserung der Entwicklung von Entwässerungsprozessen für gebrauchte Bentonitsuspensionen. Dadurch können zwei unterschiedliche Entwässerungsprozesse – z.B. der konventionelle Prozess mit einer Kammerfilterpresse und ein neuartiger mit der Elektrokoagulation implementierter Prozess – unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen verglichen werden.

Eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040:2009 erfolgt durch die Durchführung der folgenden vier Schritte:

- Festlegung des Ziels und der Systemgrenzen

- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Außerdem sollte eine Ökobilanz nach DIN, die zur Veröffentlichung vorgesehen ist, von einem externen Gutachter geprüft werden (Klöpffer & Grahl, 2009). Ziel ist dabei zu prüfen, ob die angewendeten Methoden den Normen entsprechen, ob die Einschränkungen erkannt und berücksichtigt werden usw. Da es sich in dieser Arbeit um einen Entwurf handelt, wird auf einer kritischen Prüfung von Gutacher verzichtet.

Der erste Schritt umfasst die Festlegung des Ziels und der Systemgrenzen. Dabei werden das Produktsystem mit den entsprechenden Prozessmodulen, die Systemgrenzen sowie die funktionelle Einheit (abgekürzt FE) definiert (Klöpffer & Grahl, 2009). Das Produktsystem wird durch die Festlegung der entsprechenden Prozessmodule im Laufe aller Lebenswegabschnitte definiert. Häufig weisen die Produktsysteme sehr enge Grenzen auf; d. h. sie werden nicht in ihrer Gesamtheit betrachtet, sondern als begrenzte Systeme. Der Grund dafür ist der Mangel an erfassten Daten, die begrenzten Datenbanken oder sogar die Vereinfachung der Bilanzierung. Die Ökobilanz derartiger Produktsysteme stellt jedoch kein Problem bei ihrem Vergleich dar, wenn diese Einschränkungen erkannt und berücksichtigt werden (Klöpffer & Grahl, 2009). Unter Annahme von Methoden wie z. B. der Methode „Black-Box“ können prinzipiell auch große Lebenswegabschnitte, Stoff- und Energieflüsse oder Prozessmodule vernachlässigt werden, wenn diese beiden zu vergleichenden Produktsysteme identisch sind (Klöpffer & Grahl, 2009). Dies ist allerdings nur gültig, wenn die Ergebnisse nur qualitativ (und nicht quantitativ) miteinander verglichen werden.

Die funktionelle Einheit definiert die spezielle Funktion, die das Produktsystem erfüllen muss (Klöpffer & Grahl, 2009). Sie dient als Referenz-Einheit für Produktvergleiche; aus diesem Grund müssen sich alle betroffenen Input- und Outputflüsse auf sie beziehen.

Der Begriff Sachbilanz steht für die Zusammenstellung und Quantifizierung von Input- und Outputflüssen eines gegebenen Produktsystems (DIN EN ISO 14040:2009). Dabei ist die Modellierung der Input- und Outputflüsse von Bedeutung. Outputflüsse können beispielsweise als Abfall oder als nutzbares Produkt betrachtet werden; sie können innerhalb des Produktsystems weiterverwendet werden oder das Produktsystem verlassen (Klöpffer & Grahl, 2009).

Für die quantitative Bestimmung der Input- und Outputflüsse sind umfangreiche Daten erforderlich, z.B. die Materialaufteilung innerhalb der Anlage sowie die Betriebsdaten. Alle Daten müssen unbedingt im Bezug auf die FE umgerechnet werden.

Die Erfassung von zusätzlichen Daten ist bzgl. der Lebenswegabschnitte – Produktion bis Weiterverwendung, Aufbereitung und Entsorgung – ebenfalls erforderlich. Davon hängt ab,

wie ein Outputfluss modelliert wird und inwiefern er einen negativen oder positiven Einfluss im Produktsystem ausübt.

Bei der Sachbilanz ist zu berücksichtigen, welche Prozessmodule mehr als einen Outputfluss ergeben. Diese werden als „Multi-Output-Prozessmodule“ bezeichnet. Ein Output ist in der Regel das erwünschte Produkt, auf das sich die FE bezieht. Die restlichen Outputs stellen die Nebenprodukte (auch Koppelprodukte genannt) dar, die als nutzbare Produkte oder Abfälle bzw. Abwässer modelliert werden können. Dabei ist zu definieren, wie die Umweltwirkungen des Prozessmoduls den unterschiedlichen Outputflüssen zugeordnet werden. Dieses Problem wird in der Literatur als „Allokation“ bezeichnet (Klöpffer & Grahl, 2009).

Bei der Ökobilanz ist die Energie, die als Ware betrachtet wird, ein der zentralen Themen (Klöpffer & Grahl, 2009). Bezogen auf die Energie werden zwei Begriffe definiert: Primär- und Endenergie. Primärenergie ist die Energie zur Bereitstellung der Endenergie. Die Endenergie stellt den Energieverbrauch für die Prozessmodule in Form von Strom, Wärme usw. dar. Bei der Sachbilanz ist ausschließlich die Primärenergie des Produktsystems der geeignete Vergleichsmaßstab. Normalerweise stehen ausschließlich die Daten zur Endenergie in Form von Stromverbrauch zur Verfügung. Aus diesem Grund werden i.d.R. die Daten von Stromverbrauch in Daten von Primärenergie umgerechnet.

Nach den Gesetzen der Thermodynamik beträgt die elektrische Energie, z.B. bei einer Stromstärke von 1A, bei 230V und während 1h, 0,23Wh (entspricht 0,83MJ). Daraus ergibt sich das folgende Verhältnis:

$$1\text{kWh} = 0,36 \text{ MJ}$$

Bei der realen „Endenergiebedarf“ werden zusätzlich die Förderung und der Transport der Energie sowie der Wirkungsgrad der Anlage berücksichtigt. Für die Umrechnung von Endenergie (bzw. Verbrauch an elektrischer Energie) in Primärenergie empfehlen Klöpffer & Grahl (2009) das folgende Verhältnis:

$$1\text{kWh (Endenergie)} = 10 \text{ MJ (Primärenergie)}$$

Dies ist nur für den durchschnittlichen „Strommix“ in europäischen Ländern mit geringem Anteil an Wasserkraft, wie z.B. Deutschland gültig.

Bei der Wirkungsabschätzung werden die Umweltwirkungen der entsprechenden Stoff- und Energieflüsse aus der Sachbilanz mittels einer vorher festgelegten Methode bestimmt. Dafür werden normalerweise Daten aus Datenbanken verwendet, um die Umweltwirkungen der entsprechenden Stoff- und Energieflüsse aus der Sachbilanz zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Datenbank ELCD (auf Englisch „European Reference Life Cycle Database“) verwendet. Diese Datenbank enthält die Daten von der europäischen Kommission

für Ökobilanz – auf Englisch „European Platform on Life Cycle Assessment“– (openLCA Nexus, o.J.). Daten zu Transportdienstleistungen, Materialproduktion, Energiebereitstellung, Landnutzung und anderen Bereichen sind dazu enthalten. Die aktuelle Version wurde unter Beachtung der DIN EN ISO 14040:2009 und der DIN EN ISO14044:2006 entwickelt und ist in mehrere Softwarepakete wie z.B. „OpenLCA 1.4“ integriert.

Zusätzlich wird die Methode zur Beurteilung der Umweltwirkungen festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Methode CML („baseline“) verwendet. Diese wurde an der Universität Leiden (Niederlande) im Jahr 2001 entwickelt und wird sehr häufig eingesetzt (Acero et al., 2015). Bei anderen Methoden werden die Umweltwirkungen in Form eines Öko-Indikators angegeben. Im Gegensatz dazu ergibt die Methode CML die einzelnen Umweltwirkungen des Produktsystems. Dies ermöglicht eine klare Auswertung und Interpretierung der Ergebnisse: Aus diesem Grund wird sie in dieser Arbeit verwendet. Die dabei eingesetzten Wirkungskategorien, Indikatoren und Charakterisierungsfaktoren werden im Abschnitt 13.5 tabellarisch dargestellt. Die Betrachtung der Energie erfolgt separat durch den Einsatz der Methode des kumulativen Energieaufwands (abgekürzt KEA) (Acero et al., 2015). Dabei wird der primär-energetische Aufwand bewertet, der bei allen Lebenswegabschnitten eines Produktsystems entsteht.

Die Sachbilanz sowie die Wirkungsabschätzung werden in der Regel mit einer dafür speziell entwickelten Software durchgeführt. In dieser Arbeit wird das freie Softwarepaket „OpenLCA 1.4“ zur Festlegung der Sachbilanz und zur Herstellung der Wirkungsabschätzung verwendet. Außerdem muss berücksichtigt werden, wie die unterschiedlichen Prozessmodule und deren Input- und Outputflüsse modelliert werden, und ob die oben genannte Methode „Black-Box“ verwendet wird.

Bei der Auswertung erfolgt die Analyse der Umweltwirkungen und des KEA mithilfe der dafür festgestellten Indikatoren. Das Ziel ist, die Umweltwirkungen zu minimieren. In dieser Phase der Ökobilanz werden die Ergebnisse diskutiert und zusammengefasst.

### **13.2 Ökobilanz eines konventionellen Entwässerungsprozesses mit einer Kammerfilterpresse**

Im Folgenden wird der konventionelle Entwässerungsprozess von Bentonitsuspensionen grob bilanziert. Das entsprechende Produktsystem beschreibt die Entwässerung von gebrauchten Bentonitsuspensionen durch die Kammerfilterpresse unter Zugabe von organischen polymerartigen Flockungsmitteln. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die FE als Masse des entwässerten Schlammes wie folgt zu definieren:

FE = 1t entwässertes Schlamm

Das Produktsystem wird durch die Prozessmodule definiert, welche alle Lebenswegabschnitte darstellen müssen. Beim Entwässerungsprozess mit der Kammerfilterpresse sollen, neben dem Hauptprozess während der Nutzungsphase – Prozess „Entwässerung mit KFP“ –, auch die anderen Prozesse betrachtet werden. Diese sind die Prozesse während der Gewinnung und Produktion der Rohstoffe, der Herstellung von Zwischenprodukten und der Beseitigung bzw. der Verwertung sowie die eintretenden Transportprozesse.

- In dieser Arbeit werden Annahmen zu Systemgrenzen getroffen bzw. einige Lebenswegabschnitte vernachlässigt. Die Gründe hierfür sind wie folgt:
- Hier handelt es sich nur um einen Entwurf, um die erste richtungsweisende Ergebnisse zu ermöglichen.
- Der Entwurf sollte überschaubar bleiben.
- Der unvollständige Datenzugang bei Entwässerungsprozessen von Bentonitsuspension im Tunnelbau verhindert die ganzheitliche Betrachtung aller Lebenswegabschnitte. Trotz des Datenmangels wird ein Vielfaches an Daten anhand von Erfahrungsdaten geschätzt (siehe Kapitel 13.5).
- Die verwendete Datenbank ist begrenzt und erschwert die genaue Modellierung der Input- und Outputflüsse. 3

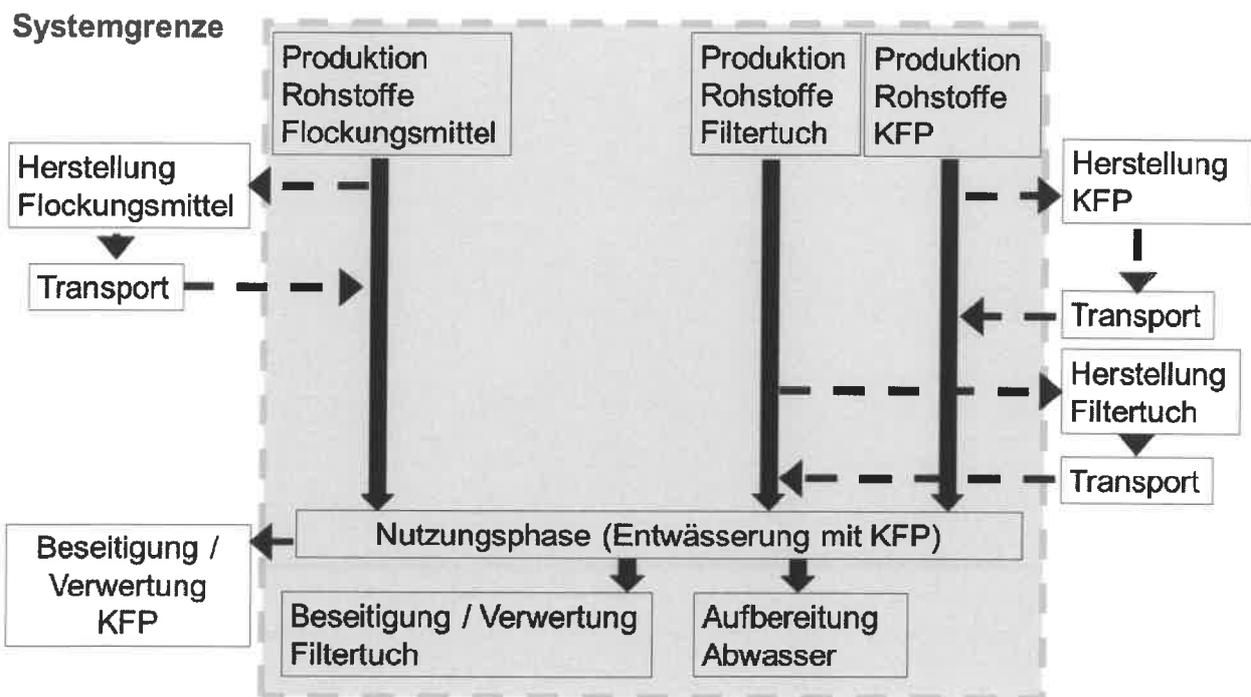


Abbildung 6.1: Skizze des Produktsystems „Entwässerung mit Kammerfilterpresse“, KFP: Kammerfilterpresse.

- Abb. 6.1 definiert das Produktsystem und seine Systemgrenzen. Wie oben erwähnt, werden der Entwässerungsprozess und seine Lebenswegabschnitte nur teilweise berücksichtigt. Insgesamt werden sechs Prozessmodule betrachtet:
- Produktion der Rohstoffe zur Konstruktion der Kammerfilterpresse. Hierbei werden ausschließlich die Rohstoffe der Einheit „Kammerfilterpresse“ betrachtet. Dabei werden die Druck- und Filterplatten, Filtertücher, das Hydraulikaggregat sowie die Verbindungsteile und die Brücke bilanziert (siehe [Abb. 2.13](#)). Rohstoffe für die Herstellung der Flockungsmittelstation, des Containers sowie der Speisepumpen von Bentonitsuspension und Hochdruckwasserpumpen zum Waschvorgang der Filtertücher werden nicht bilanziert. [Abb. 6.2](#) zeigt die Materialaufteilung einer Kammerfilterpresse laut des Herstellers MSE-Filterpressen. Hierbei wird das Filtertuch als Bauteil betrachtet. Im Kapitel 13.5 befinden sich die ausführlichen Daten der Kammerfilterpresse-Einheit.
- Produktion der Rohstoffe für die Flockungsmittel. Flockungsmittel sind meistens organische polymerartige Polyacrylamide (PAA). Diese Polyacrylamide sind miteinander verbundene Ketten von Acrylamiden, welche ihrerseits mittel der Hydrolyse von Acrylnitrile hergestellt werden (Cheremisinoff, 1997). Bei diesem Prozessmodul wird die Gewinnung und Herstellung des Rohstoffs Acrylnitrile bilanziert.
- Produktion der Rohstoffe für die Filtertücher. Dabei wird die Herstellung des hauptsächlichsten Bestandteils von Filtertüchern – des Kunststoffes Polypropylen (abgekürzt PP) – als Prozessmodul bilanziert. Bei diesem Prozessmodul wird das Filtertuch als Hilfsstoff anstatt als Bauteil betrachtet.
- Der Prozessmodul Entwässerung mit Kammerfilterpresse stellt die Nutzungsphase dar. Dabei werden die folgenden Teilprozesse betrachtet: Zugabe einer Flockungsmittel-Lösung, Filtration und Waschvorgang der Filtertücher mit Wasser.
- Das Prozessmodul Beseitigung oder Verwertung von Filtertüchern als Verschleißteil wird bilanziert.
- Das Prozessmodul Aufbereitung von Abwasser, das zur Herstellung der Flockungsmittel-Lösung und zum Waschvorgang der Filtertücher eingesetzt wird, wird ebenfalls bilanziert.

Die Transportprozesse treten beim Transport von Personen, Rohstoffen, Energieträger, Materialien, Produkte und Abfall und stellen meistens große Beiträge zur globalen Umweltwirkung eines Produktsystems dar (Klöpffer & Grahl, 2009). In dieser Arbeit werden sie vernachlässigt, da hierzu keine Daten zur Verfügung stehen. Dies ist aber keine Standard-Annahme für die Ökobilanzen. Diesbezüglich ist eine intensive Recherche erforderlich, um Transportdaten zu erheben und diese somit in Zukunft zu bilanzieren.

Abb. 6.3 stellt die Input- und Outputflüsse des Prozessmoduls „Entwässerung mit Kammerfilterpresse“ dar, die die Nutzungsphase entspricht. Dieses Prozessmodul gehört zum Produktsystem, das in Abb. 6.1 vorgestellt wurde. In Abb. 6.3 ist zu erkennen, dass das Prozessmodul aus mehreren Input- und Outputflüssen besteht. Zu den Inputflüssen zählen das Vorprodukt (Altsuspension), die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, das Wasser und die Energie zum Betrieb der Anlage.

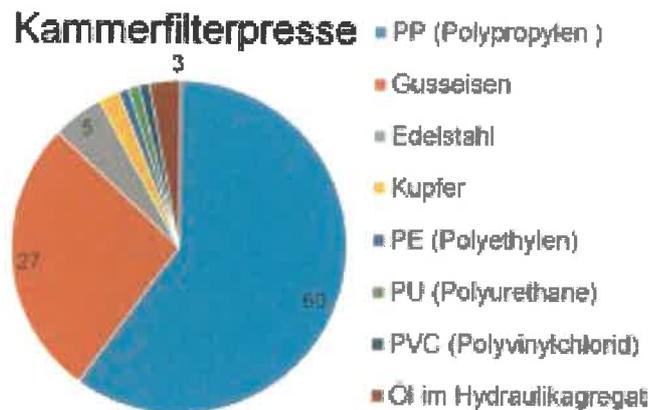


Abbildung 6.2: Massenaufteilung von Materialien einer Kammerfilterpresse in Prozent.

Das (erwünschte) Endprodukt stellt den entwässerten Schlamm dar. Zusätzlich ergibt das Prozessmodul noch drei Nebenprodukte: Filtratwasser, gebrauchtes Wasser und die beim Prozess auftretenden Verschleißteile (Filtertuch aus PP).



Abbildung 6.3: Festlegung des Prozessmoduls „Entwässerung mit Kammerfilterpresse“ mit Input- und Outputflüssen

Die Methode „Black-Box“ wird hier eingesetzt unter der Annahme, dass die konstanten Flüsse bei allen möglichen Entwässerungsprozessen von gebrauchten Bentonitsuspensionen vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass der Inputfluss „Altsuspension“ und der Outputfluss „Filtratwasser“ nicht bilanziert werden (Abb. 6.3). Dieser Entwurf zur Ökobilanz beruht auf der strengen Annahme, dass bei allen Entwässerungsprozessen die gleiche Menge an Altsuspension als Input fließt und die gleiche Menge an Filtratwasser und Schlamm als Output fließt. Dies bedeutet ebenfalls, dass die Leistung der Entwässerungsprozesse konstant ist und dass der Wassergehalt des entwässerten Schlamms sich nicht verändert. Das in Abb. 6.3 dargestellte Prozessmodul ist „Multi-Output“. Dabei ist die Allokation und die Modellierung der unterschiedlichen Outputflüsse festzulegen. Dies bestimmt, ob ihr Beitrag zur Ökobilanz größer oder kleiner ist. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Modellierung der Outputflüsse „gebrauchtes Wasser“ und „gebrauchtes Filtertuch“ analysiert. In dem oben vorgestellten Prozessmodul stellt das Wasser für die Herstellung der Flockungsmittel-Lösung und den Waschvorgang der Filtertücher einen Inputfluss dar. Das Wasser muss wiederum als Outputfluss „gebrauchtes Wasser“ bilanziert werden. Welchem Lebensweg das gebrauchte Wasser folgt, bedingt den Einfluss auf das Produktsystem. Es kann als nutzbares Produkt betrachtet werden, das im Produktsystem verbleibt, oder als Abwasser, das das Produktsystem verlässt. Wird das gebrauchte Wasser in der Anlage wiederverwendet, wird es als nutzbares Produkt betrachtet. Das Produktsystem wird dadurch positiv beeinflusst, da ein Recycling-Prozess („closed-loop recycling“) die Wiederverwendung (und Einsparung) des Rohstoffs Wasser ermöglicht und somit die Aufbereitung von Abwasser verringert. Dabei ist es erforderlich, die Allokation der Umweltwirkungen des Prozessmoduls zu den Outputflüssen (z.B. entwässerter Schlamm und Abwasser) zu definieren.

Das gebrauchte Wasser kann aber auch in die Kanalisation eingeleitet werden. In diesem Fall verlässt es als Abwasser das Produktsystem. Es wird nachfolgend in der Abwasserkläranlage aufbereitet und kann für andere Prozesse außerhalb des hier betrachteten Produktsystems verwendet werden. In diesem Fall muss die Aufbereitung des Abwassers im Produktsystem betrachtet werden, da die durch den Verbrauch auftretenden Umweltwirkungen zum Produktsystem gehören (Klöpffer & Grahl, 2009). Dadurch wird das Produktsystem negativ beeinflusst. Im Rahmen dieser Ökobilanz wird das Wasser als Abwasser betrachtet.

In ähnlicher Weise stellt sich die Modellierung des Filtertuchs aus PP als Inputfluss und wiederum als Outputfluss dar (Abb. 6.3). Der Outputfluss „gebrauchtes Filtertuch“ kann als nutzbares Produkt modelliert werden. Dabei ist ein zusätzlicher Nutzen zu erkennen. Dieser stellt die Einsparung von Rohstoff „PP“ durch die Verwertung des gebrauchten Filtertuchs (aus PP) dar. Die Modellierung dieses Outputflusses als nutzbares Produkt trägt positiv zum

Produktsystem bei. Der Outputfluss „gebrauchtes Filtertuch“ kann aber auch als Abfall betrachtet werden. In diesem Fall muss dessen Entsorgung im Produktsystem betrachtet werden, da die durch den Verbrauch auftretenden Umweltwirkungen zum Produktsystem gehören. Dadurch wird das Produktsystem negativ beeinflusst. Im Rahmen der hier vorgenommenen Ökobilanz wird das Filtertuch als Abfall betrachtet.

Tab. 6.1 stellt die Prozessmodule des hier modellierten Produktsystems mit allen Input- und Outputflüssen dar. Alle Prozessmodule haben mehrere Inputflüsse, aber nur einen Outputfluss.

<b>Herstellung der Rohstoffe – Kammerfilterpresse</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,081 kg PP (Polypropylen)	0,133 kg Kammerfilterpresse
0,044 kg Stahl	
0,004 kg Kupfer	
0,003 kg PE (Polyethylen)	
0,001 kg PVC (Polyvinylchlorid)	
<b>Herstellung der Rohstoffe – Filtertücher</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,001 kg PP	0,001 kg Filtertuch
<b>Herstellung der Rohstoffe – Flockungsmittel</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
2,30 kg Polyacrylnitril	2,30 kg Flockungsmittel
<b>Entwässerung mit Kammerfilterpresse</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,133 kg Kammerfilterpresse	1000 kg entwässerter Schlamm (FE)
0,001 kg Filtertuch	
0,001 kg Entsorgung Filtertuch	
2,30 kg Flockungsmittel	
704,36 kg Wasser	
704,36 kg Aufbereitung Abwasser	
246,2 MJ Primärenergie	

Tabelle 6.1: Input- und Outputflüsse der Prozessmodule, konventioneller Entwässerungsprozess mit einer Kammerfilterpresse

Damit kann das Problem der Allokation vermieden werden. Das Abwasser sowie der Abfall verlassen das Produktsystem und werden so modelliert, dass die auftretenden Umweltwirkungen als Inputfluss anstatt Outputfluss betrachtet werden (Ciroth & Winter, 2014; Winter, 2014). Diese Inputflüsse entsprechen dem Ressourcen- und Energiebedarf zur Abwasseraufbereitung bzw. Entsorgung von Abfall. Bei Tab. 6.1 sind alle Mengen auf die FE bezogen.

Für die Kalkulation werden folgende Betriebsdaten angenommen bzw. aus Erfahrungswerten geschätzt (Fa. MSE-Filterpressen, 13.02.2015), die weiteren Daten befinden sich in Kapitel 13.5:

- Feststoffleistung von 7 t Feststoff/h
- Durchsatz von ca. 57 m<sup>3</sup>/h
- Nutzungsdauer einer Kammerfilterpresse von 15 Jahren – unter Berücksichtigung eines Betriebsplans von 10 h pro Tag, 5 Tage pro Woche und 4 Wochen pro Monat
- Filtertuchwechsel: alle 6 Monate
- Flockungsmittel-Lösung mit einer Konzentration von 0,4%
- Flockungsmittel-Verbrauch: 0,28 kg Pulver pro 1 m<sup>3</sup> Altsuspension
- Wasserverbrauch für den Waschvorgang der Filtertücher: 350 l pro Kammer
- Waschvorgang: 1 Mal pro Woche
- Stromverbrauch: 3 kWh/m<sup>3</sup> Altsuspension.

Die Datenerfassung zum Stromverbrauch auf der Baustelle könnte relativ einfach sein.

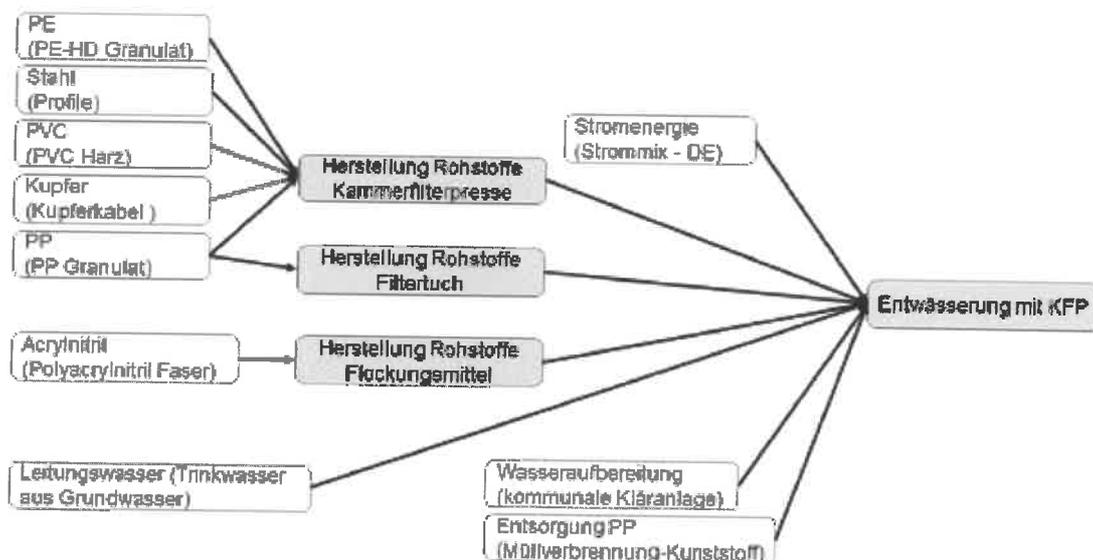


Abbildung 6.4: Graphische Darstellung des Produktsystems „Entwässerung mit Kammerfilterpresse“

Hierzu wäre die Zuordnung des Stromverbrauchs zu den einzelnen Maschinen, z.B. zu einer Kammerfilterpresse erforderlich. Dies ist jedoch in der Praxis nicht der Fall. Im Rahmen dieser Arbeit werden Daten eingesetzt, die dem Bereich der Klärschlamm-entwässerung mit einer Kammerfilterpresse stammen (Baum, 1998). Durch die von Klöpffer & Grahl (2009) vorgeschlagene Formel wird die Primärenergie aus dem Stromverbrauch umgerechnet (siehe Kapitel 13.5).

Abb. 6.4 ist eine graphische Darstellung des Produktsystems. Die grauen Kacheln stellen die Prozessmodule, die weißen Kacheln die Inputflüsse dar. Dabei sind alle oben genannten Annahmen und Berücksichtigungen zu erkennen. Zusätzlich zeigt Abb. 6.4 weitere Annahmen aufgrund des begrenzten Umfangs der Datenbank ELCD. So wird z.B. der Rohstoff

Gusseisen und Stahl zusammen als Stahl für Stahlprofile betrachtet. Wie oben erwähnt, werden die Outputflüsse „gebrauchtes Wasser“ und „gebrauchtes Filtertuch“ als Abwasser, das aufbereitet werden muss, bzw. als Abfall, der entsorgt werden muss, betrachtet. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in Abschnitt 13.4 dargestellt.

### 13.3 Ökobilanz eines Entwässerungsprozesses mit einer EK-Zelle

Das hier bilanzierte Produktsystem besteht aus dem Entwässerungsprozess von Bentonitsuspensionen, bei dem das konventionelle Verfahren mit der Kammerfilterpresse unter Zugabe von Flockungsmitteln mit dem Elektrokoagulationsverfahren unterstützt wird. Die Anwendung der EK-Zelle in der konventionellen Anlage der Feintrennung erfolgt nach dem Prinzip A und dem Einsatzort 3 (siehe Abschnitt 5.1 [Pay16]). Dabei wird die EK-Zelle zwischen dem Altsuspensionstank und der Kammerfilterpresse eingesetzt. Es handelt sich um eine vollständige zweistufige Feintrennung, die mit einem System zur Reinigung der Elektroden ausgestattet ist. Die in Abschnitt 5.2 [Pay16] dargestellten Laborergebnisse werden bei dieser Ökobilanz verwendet. In Abschnitt 5.2 [Pay16] wurde nachgewiesen, dass die Elektrokoagulation bei der Entwässerung von Altsuspensionen aus zwei Tunnelprojekten zur Einsparung von Flockungsmitteln beitragen kann. Zusätzlich wurde festgestellt, dass durch die Elektrokoagulation die Entwässerungsleistung zunehmen kann. Bei dieser Ökobilanz wird ausschließlich die Einsparung von Flockungsmitteln weiterverfolgt. Mithilfe der „Szenario 60 %“ und „Szenario 100 %“ wird der hier entwickelte Entwässerungsprozess unter Einsparung von 60 % bzw. 100% der üblichen eingesetzten Flockungsmittel modelliert. Es wird angenommen, dass die Effektivität des Entwässerungsprozesses immer gleich ist. Dies ist unabhängig davon, ob eine durch Elektrokoagulation destabilisierte Altsuspension oder eine übliche Altsuspension behandelt wird. Die Ökobilanz des Entwässerungsprozesses mit einer EK-Zelle wird mit dem konventionellen Prozess (siehe Abschnitt 6.2 [Pay16]) nachträglich verglichen. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, müssen sie sich auf die gleiche FE beziehen. D. h. die hier ausgewählte FE ist 1 t entwässerter Schlamm. Da bei der Ökobilanz in Abschnitt 6.2 [Pay16] die Methode „Black-Box“ eingesetzt wird, muss sie ebenso hier eingesetzt werden. Zusätzlich sollten die zu vergleichenden Produktsysteme unter den gleichen Randbedingungen bzw. Annahmen modelliert werden. Hierbei sollte eine baustellentaugliche EK-Zelle betrachtet werden. Da diese weder konstruiert noch in der Praxis eingesetzt wurde, werden alle Daten bzgl. der Bauteile, Leistung, Stromverbrauch abgeschätzt. In Kapitel 13.5 befindet sich ein Entwurf zu einer praxisnahen EK-Zelle sowie die abgeschätzten Daten und ihr Ursprung. Abb. 6.5 definiert das Produktsystem „Entwässerung mit EK-Zelle und KFP“ und dessen Systemgrenzen. Das hier dargestellte Produktsystem basiert auf jenem vom Entwässerungsprozess mit KFP (siehe Abb. 6.1). Im Vergleich dazu müssen die folgenden zusätzlichen Prozessmodule betrachtet werden:

- **Produktion der Rohstoffe zur Konstruktion der EK-Zelle.** Dabei werden die EK-Zelle selbst und das Reinigungssystem für die Elektroden aus PP, die Elektroden aus Al, die Schläuche und Ventile aus PVC, die Kabel aus Kupfer sowie die zusätzlichen Kleinteile wie Schrauben, Klemme usw. aus Stahl bilanziert. Ähnlich zu Abschnitt 6.2 werden hierbei die Rohstoffe für die Herstellung des eventuellen Containers sowie der Speisepumpen nicht bilanziert. Hierbei werden die Elektroden (Anoden) als Bauteil betrachtet. Im Anhang F befinden sich die ausführlichen Daten inklusiv der Materialaufteilung einer EK-Zelle.

- **Produktion der Rohstoffe für die Elektroden.** Dabei wird die Herstellung des hauptsächlichsten Bestandteils der Anoden (Al) als Prozessmodul bilanziert. Bei diesem Prozessmodul werden die Anoden als Hilfsstoff anstatt als Bauteil betrachtet.

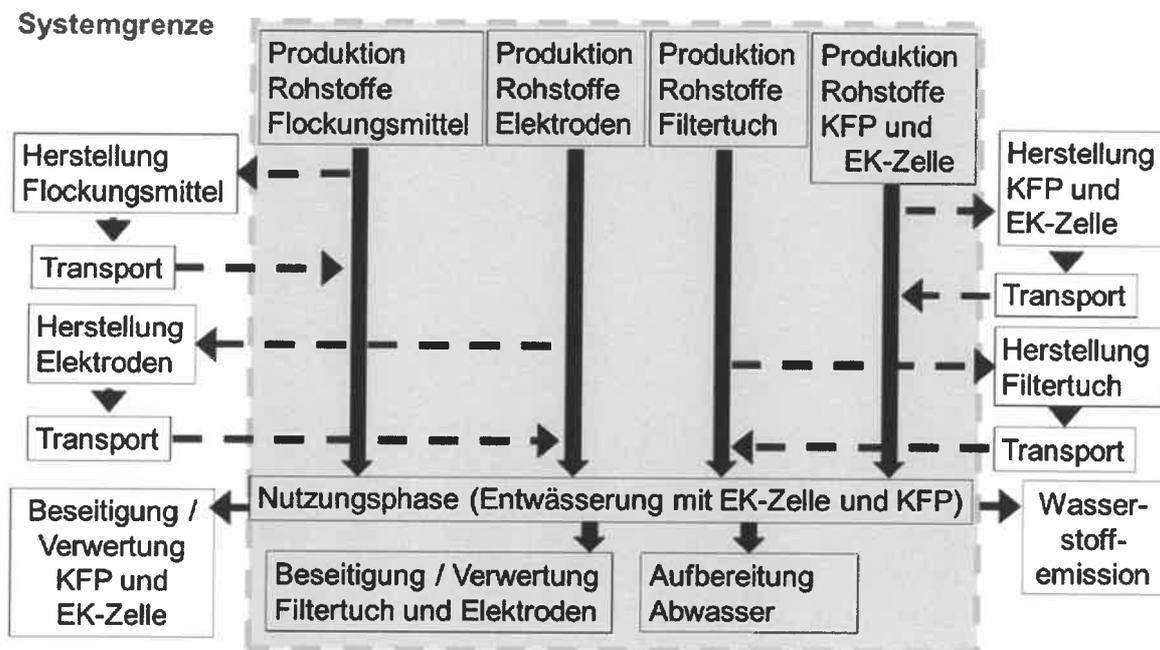


Abbildung 6.5: Festlegung des Prozessmoduls „Entwässerung mit EK-Zelle und KFP“ mit Input- und Outputflüssen

- Beim Prozessmodul **Entwässerung mit einer EK-Zelle** wird die Elektrokoagulation von Bentonitsuspensionen berücksichtigt. Dabei wird die Anode verbraucht, sodass sie nach einer bestimmten Zeit (beim Erreichen von 80% Massenverlust) ausgetauscht werden muss.

- Beim Prozessmodul **Beseitigung und Verwertung der Elektroden** werden die gebrauchten Al-Anoden als Material zur Wiederverwendung betrachtet. Ähnlich zur Ökobilanz in Kapitel 13.2 werden hierbei einige Lebenswegabschnitte vernachlässigt. Die folgenden Prozessmodule des Produktsystems liegen außerhalb der Systemgrenzen:

- Herstellung der EK-Zelle
- Beseitigung und Verwertung der EK-Zelle
- Herstellung von Elektroden
- Wasserstoffemissionen
- Sämtliche Transportprozesse

Im Folgenden wird die Modellierung des Outputflusses „Elektroden“ analysiert. In ähnlicher Weise wie bei der Modellierung des Filtertuchs (siehe Kapitel 13.2) kann die gebrauchte Anode auf zweierlei Weise modelliert werden. Sie kann einerseits als nutzbares Produkt modelliert werden. Dabei ist ein zusätzlicher Nutzen zu erkennen und dadurch wird das Produktsystem positiv beeinflusst. Die gebrauchte Anode kann aber auch als Abfall betrachtet werden. Dadurch wird das Produktsystem negativ beeinflusst. Bei dieser Ökobilanz werden die gebrauchten Elektroden als Material zur Wiederverwendung vorgesehen. Dabei wird die Herstellung der entsprechenden Menge an Aluminium dem Produktsystem gutgeschrieben.

Tab. 6.2 stellt die Prozessmodule des hier modellierten Produktsystems mit Input und Outputflüssen dar. Die Inputflüsse „Flockungsmittel“ und „Wasser“ sowie der Outputfluss „gebrauchtes Wasser“ werden für die zwei unterschiedlichen Szenarios definiert. Abb. 6.6 ist eine graphische Darstellung des Produktsystems. Die grauen Kacheln stellen die Prozessmodule dar, die weißen Kacheln die Inputflüsse dar. Im Vergleich zu Abb. 6.4 betrachtet das Produktsystem „Entwässerung mit EK-Zelle und Kammerfilterpresse“ weitere Prozessmodule bzgl. des Einsatzes einer EK-Zelle. Hierbei sind ebenfalls einige Annahmen zu erkennen, wie z.B. die Betrachtung vom Rohstoff Aluminium als auch Aluminiumblech. Dabei sind alle oben genannten Annahmen und Berücksichtigung zu erkennen. Zusätzlich zeigt Abb. 6.6 weitere Annahmen aufgrund des begrenzten Umfangs der Datenbank ELCD, z.B. die gemeinsame Betrachtung der Rohstoffen Gusseisen und Stahl zusammen als Stahl für Stahlprofile oder die gemeinsame Betrachtung der Rohstoffen PE und PU als PE. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in Kapitel 13.4 dargestellt.

<b>Herstellung der Rohstoffe – EK-Zelle</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,045 kg Al	
0,020 kg PP (Polypropylen)	0,089 kg EK-Zelle
0,014 kg Kupfer	
0,005 kg Stahl	
0,005 kg PVC (Polyvinylchlorid)	
<b>Herstellung der Rohstoffe – Elektroden (Anoden)</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,997 kg Al	0,997 kg Elektroden (Anoden)
<b>Entwässerung mit EK-Zelle</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,089 kg EK-Zelle	8,2 m <sup>3</sup> destabilisierte Suspension
0,997 kg Elektroden	
0,199 kg Entsorgung Elektroden	
1378,5 MJ Energie	
<b>Herstellung der Rohstoffe – Flockungsmittel</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,92 kg Polyacrylnitril (Szenario 60 %)	0,92 kg Flockungsmittel
0,00 kg Polyacrylnitril (Szenario 100 %)	0,00 kg Flockungsmittel
<b>Herstellung der Rohstoffe – Kammerfilterpresse</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,081 kg PP (Polypropylen)	0,133 kg Kammerfilterpresse
0,044 kg Stahl	
0,004 kg Kupfer	
0,003 kg PE (Polyethylen)	
0,001 kg PVC (Polyvinylchlorid)	
<b>Herstellung der Rohstoffe – Filtertücher</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,001 kg PP	0,001 kg Filtertuch
<b>Entwässerung mit Kammerfilterpresse</b>	
<b>Inputflüsse</b>	<b>Outputflüsse</b>
0,133 kg Kammerfilterpresse	1000 kg entwässerter Schlamm (FE)
0,001 kg Filtertuch	
0,001 kg Entsorgung Filtertuch	
8,2 m <sup>3</sup> destabilisierte Suspension	
0,92 kg Flockungsmittel (Szenario 60 %)	
0,00 kg Flockungsmittel (Szenario 100 %)	
359,74 kg Wasser (Szenario 60 %)	
130,00 kg Wasser (Szenario 100 %)	
130 kg Aufbereitung Abwasser	
246,1 MJ Energie	

Tabelle 6.2: Input- und Outputflüsse der Prozessmodule, Entwässerungsprozess mit einer EK-Zelle

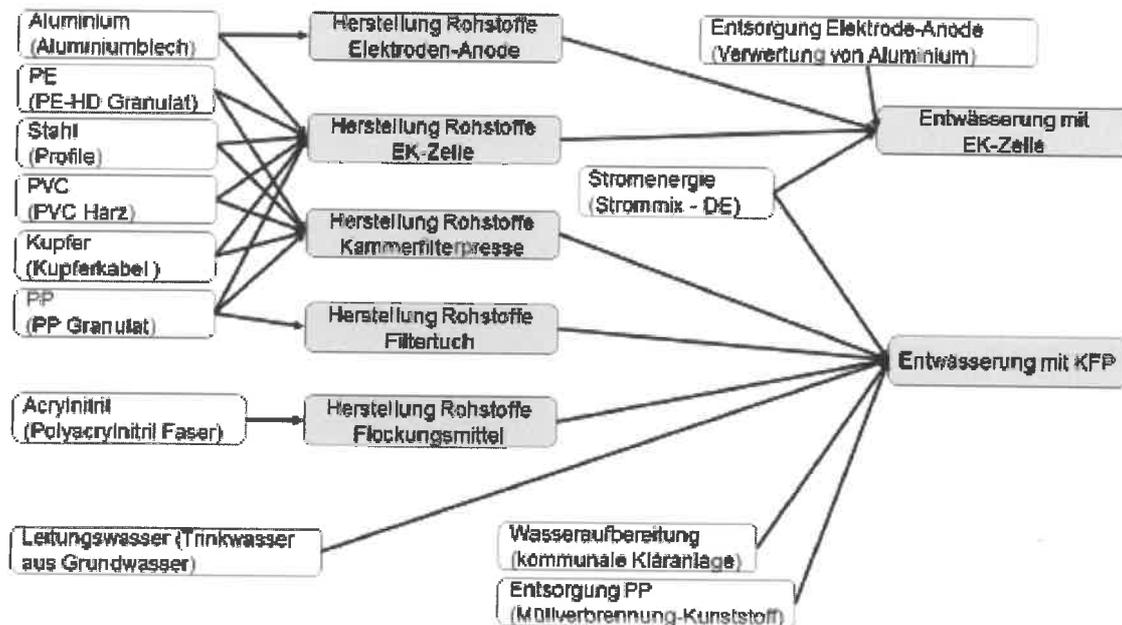


Abbildung 6.6: Graphische Darstellung des Produktsystems „Entwässerung mit EK-Zelle und Kammerfilterpresse“

## 13.4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Ökobilanzen dargestellt. Erstens werden die Ergebnisse bzgl. der Umweltwirkungen mit der Methode CML („baseline“) dargestellt. Zweitens sind die Ergebnisse bzgl. des kumulierten Energieaufwands zu analysieren.

### 13.4.1 Ergebnisse Umweltwirkungen

Die Ergebnisse der Ökobilanz bzgl. der Umweltwirkungen mit der Methode CML („baseline“) werden mithilfe der Analyse der Wirkungsabschätzungen dargestellt. Diese Analyse gibt einen Wert für jede Wirkungskategorie an. Eine erste Analyse der Ergebnisse zeigt, dass ausschließlich drei Prozesse sehr starke Umweltwirkungen hervorrufen. Diese sind:

1. Bereitstellung von elektrischer Energie
2. Produktion vom Rohstoff Polyacrylnitril für die Herstellung des Flockungsmittels  
Wasseraufbereitung

Die Prozesse 1 und 2 üben einen negativen Einfluss auf die folgenden Wirkungskategorien aus:

- Versauerungspotenzial
- Klimawandel – 100Jahre
- Ressourcenverbrauch

- Stratosphärischer Ozonabbau
- Photochemischer Smog
- Ökotoxizität (Boden)

Der Prozess der Wasseraufbereitung übt einen negativen Einfluss auf die folgenden Wirkungskategorien aus:

- Eutrophierung
- Ökotoxizität (Süßwasser)
- Toxische Gefährdung von Menschen
- Ökotoxizität (Meeresressourcen)

Tab. 6.3 stellt die Ergebnisse der Ökobilanz eines konventionellen Entwässerungsprozesses (abgekürzt als KPF) und eines Entwässerungsprozesses mit dem Elektrokoagulationsverfahren unter Einsparung von 60% bzw. 100% der üblichen Flockungsmittel (abgekürzt als EK KPF 60 bzw. EK KPF 100) dar.

Tab. 6.3 zeigt, dass der Einsatz der Elektrokoagulation eine Zunahme der Umweltwirkungen wie z.B. Klimawandel – 100Jahre – und stratosphärischer Ozonabbau auf das 4- bzw. 5-Fache hervorruft. Dies liegt an dem damit verbundenen erhöhten Rohstoffverbrauch und vor allem den Energieverbrauch, was durch den Einsatz zusätzlicher Apparaturen bedingt ist. Die Ökobilanz zeigt bei den Szenarios EK KPF 60 und 100 eine Verringerung der Eutrophierung, der Ökotoxizität (Süßwasser und Meeresressourcen) sowie die toxische Gefährdung von Menschen. Dieser Einfluss erfolgt durch die reduzierte Menge an Wasser (zur Herstellung von Flockungsmitteln), das nachträglich aufbereitet werden muss.

Im Vergleich zum Szenario EK KPF 60 zeigt EK KPF 100 eine Verringerung aller Umweltwirkungen. Die mit der Einsparung von Flockungsmitteln verbundene Einsparung von Wasser trägt dazu bei. Relevant dabei ist die Verringerung der Ökotoxizität (Süßwasser) sowie die toxische Gefährdung von Menschen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz der EK-Zelle im Rahmen der Feintrennung der Separationsanlage eine Zunahme der Umweltwirkungen bzgl. des Rohstoffverbrauchs und vor allem Energieverbrauchs mit sich bringt. Die Einsparung von Flockungsmitteln stellt eine Verringerung der Umweltwirkungen dar, da damit eine Verringerung des Rohstoffverbrauchs (bzgl. Polyacrylnitrile und Wasser) sowie ein verringerter Bedarf an Abwasseraufbereitung einhergeht.

Wirkungskategorien	Einheit	KFP	EK KPF 60	EK KPF 100
Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	1,31E-01	5,79E-01	5,60E-01
Klimawandel 100 Jahre	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	6,22E+01	3,28E+02	3,23E+02
Ressourcenverbrauch	kg Antimon-Äq.	3,84E-06	1,19E-05	1,10E-05
Eutrophierung	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	1,57E-01	1,21E-01	7,19E-02
Ökotoxizität (Süßwasser)	kg 1,4-DB-Äq.	2,98E+01	1,53E+01	5,63E+00
Toxische Gefährdung von Menschen	kg 1,4-DB-Äq.	5,88E+02	3,07E+02	1,15E+02
Ökotoxizität (Meeresressourcen)	kg 1,4-DB-Äq.	8,60E+04	7,38E+04	4,70E+04
Stratosphärischer Ozonabbau	kg CFC-11-Äq.	9,29E-06	5,70E-05	5,67E-05
Photochemischer Smog	kg Ethylen-Äq.	7,91E-03	3,29E-02	3,17E-02
Ökotoxizität (Boden)	kg 1,4-DB-Äq.	6,58E-04	3,19E-03	3,12E-03

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Ökobilanzen

#### 6.4.2 Ergebnisse des kumulierten Energieaufwands

Beiträge Energie (MJ)	KFP	EK KFP 60	EK KFP 100
Produktion Aluminiumblech	0,00E+00	5,05E+01	5,05E+01
Produktion Kupferkabel	5,47E-02	2,46E-01	2,46E-01
Produktion Leitungswasser	1,84E+00	9,38E-01	3,39E-01
Strom aus Strommix - DE	8,36E+02	5,51E+03	5,51E+03
Produktion Acrylnitril (Polyacrylonitrile Fasern)	3,14E+02	1,26E+02	0
Produktion PE-HD Granulat	2,34E-01	2,34E-01	2,34E-01
Produktion PE-LD Granulat	-1,84E+00	-2,56E+00	-2,56E+00
Produktion PP Granulat	6,17E+00	7,67E+00	7,67E+00
Produktion PVC Harz	6,04E-02	3,62E-01	3,62E-01
Produktion Stahl (Profile)	5,45E-01	6,06E-01	6,06E-01
Müllverbrennung Kunststoff PP	6,63E-04	6,63E-04	6,63E-04
Summe	1,156 E+03	5,697 E+03	5,570E+03

Tabelle 6.4: Ergebnisse zum kumulativen Energieaufwand

Im Folgenden werden die Ergebnisse des kumulierten Energieaufwands dargestellt. Tab. 6.4 zeigt den kumulierten Energieaufwand für jedes Prozessmodul und Produktsystem. Der größte Beitrag zum KEA stellt der Energieverbrauch (modelliert als Strom aus Strommix-DE) bei den drei Produktsystemen dar. Aufgrund des erhöhten Stromverbrauchs der Elektrokoagulation im Vergleich zum konventionellen Entwässerungsprozess ist der KEA für die

Produktsysteme EK KFP 60 und 100 deutlich größer. Zusätzlich hat die Produktion von Polyacrylonitrile einen großen Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand beim Produktsystem KFP. Die hier dargestellten Ergebnisse unterschätzen den tatsächlich auftretenden kumulierten Energieaufwand. Ein Grund dafür ist, dass sie sich auf Produktsysteme mit engen Systemgrenzen beziehen, bei denen die Transportprozesse nicht berücksichtigt wurden.

### 13.4.2 Diskussion

Die hier bilanzierten Produktsysteme weisen sehr enge Grenzen auf. Daher erzielen diese Ökobilanzen dementsprechend begrenzte Ergebnisse. Zur Erweiterung der Produktsysteme ist eine ausführliche Analyse über die auftretenden Flüsse und Prozessmodule sowie eine systematische Datenerhebung erforderlich. Dies ist gültig für die Entwässerungsprozesse mit Kammerfilterpresse, Zentrifuge und EK-Zelle. Die Recherche muss alle Lebenswegabschnitte umfassen; z.B. bei der Betrachtung der Anoden ist sowohl die Gewinnung des Elektrodenmaterials als auch die Produktion der Elektroden sowie ihre Entsorgung oder Recyclingprozesse zu berücksichtigen. Dies bedingt die Modellierung dieses Prozessmoduls und bestimmt, ob das Modul das Produktsystem positiv oder negativ beeinflusst. Besonders bei der Anwendung der Elektrokoagulation ist eine Datenerfassung bzgl. der Bauteile und der Materialaufteilung der EK-Zelle sowie eine Analyse über ihre Entsorgungswege oder Recyclingprozesse durchzuführen. Zusätzlich ist es unbedingt erforderlich, eine ausführliche Erfassung von Betriebsdaten zu realisieren, die entlang eines jeden Prozesses erfolgen sollte. Besonders relevant ist die Erfassung von Daten bzgl. des Energieverbrauchs. Diese sollte die Zuordnung des Energieverbrauchs für die unterschiedlichen Prozesse ermöglichen und somit die Berechnung der notwendigen Daten für die Ökobilanz, d.h. Daten bezogen auf die FE. Dies gilt ebenfalls für den Wasserverbrauch.

Zur Erweiterung des Produktsystems müssen zusätzliche Prozessmodule berücksichtigt werden. Die in dieser Arbeit nicht berücksichtigten Transportprozesse können einen großen Beitrag zur globalen Umweltwirkung eines Produktsystems darstellen (Klöpffer & Grahl, 2009). Dabei ist relevant, für jeden Transportprozess die Strecke und die Art des Verkehrsmittels zu bestimmen, um letztlich die Gasemissionen und den Energieverbrauch genau zu bilanzieren. Die Bilanzierung der Gasemissionen während der Elektrokoagulation, die in dieser Arbeit aufgrund der Aufwendigkeit der Modellierung nicht bilanziert wurden, können zur Erweiterung des Systems beitragen. Die Gasemissionen, insbesondere die Emissionen von Wasserstoff, können ebenfalls auf zweierlei Weise modelliert werden. Einerseits können die Wasserstoffemissionen als Emissionen in die Luft betrachtet werden. Dadurch wird die Bilanz negativ beeinflusst. Andererseits kann der Wasserstoff als Energieträger modelliert werden. Dabei wird er als nutzbares Produkt betrachtet, da eine gewisse Menge an Energie erzeugt wird. Er wird dann als ein Prozessmodul zur Bereitstellung von Energie

modelliert. In der Literatur wird empfohlen, die Bereitstellung von Energie durch eine Erweiterung der funktionellen Einheit zu betrachten (auch als Systemerweiterung bezeichnet) (Klöpffer & Grahl, 2009). Im Fall der hier vorgeschlagenen FE wäre die erweiterte FE: „1 t entwässerter Schlamm  $\times$  1 MJ“. Eine Alternative zur Erweiterung der FE ist der Abzug eines Bonus im Produktsystem mit dem zusätzlichen Nutzen der bereitgestellten Energie, d. h. der Aufwand zur Bereitstellung dieser Energie wird dem Produktsystem gutgeschrieben (Klöpffer & Grahl, 2009). Die Betrachtung der Wasserstoffemission als nutzbares Produkt setzt voraus, dass die EK-Zelle verfahrenstechnisch weiterentwickelt wird.

Es ist ebenfalls sinnvoll, weitere Alternativen zur Anwendung der Elektrokoagulation in der Feintrennung zu bilanzieren. In Abschnitt 5.1.4 [Pay16] wurde durch eine Nutzwertanalyse die Alternative mit dem höchsten Nutzwert bestimmt. Dies war die Anwendung der Elektrokoagulation nach dem Prinzip A und dem Einsatzort 4, d.h. die Elektrokoagulation in der Feintrennung. Bei der Bilanzierung dieser Alternative würde auf dem Einsatz einer zusätzlichen Apparatur (EK-Zelle) verzichtet. Damit könnten die Umweltwirkungen bzgl. des Ressourcen- und Energieverbrauch deutlich verringert werden.

In den vorliegenden Ökobilanzen wurde angenommen, dass die Effektivität der konventionellen Feintrennung von üblicher Altsuspension und durch Elektrokoagulation destabilisierte Suspension gleich ist. Gemäß dieser Annahme wurden die Flüsse Altsuspension, Schlamm und Filtratwasser vernachlässigt. Die Laborergebnisse in Abschnitt 5.2 [Pay16] zeigen, dass die Entwässerung durch eine Kammerfilterpresse von durch Elektrokoagulation destabilisierter Suspension effektiver ist. Aus diesem Grund ist es unbedingt erforderlich, die oben genannten Flüsse (inklusive die Parameter Feststoffgehalt und Wassergehalt der Schlamm) zu bilanzieren. Dafür sollten weitere Daten bzgl. der gemeinsamen Leistung der Elektrokoagulation mit der konventionellen Apparatur zur Feintrennung aus Laboruntersuchungen gewonnen werden. Es ist hierbei sinnvoll, diese Daten mittels einer Versuchsreihe im Praxis-Maßstab (anstatt im Labor-Maßstab) durchzuführen.

Mithilfe der Betrachtung weiterer Aspekte wie z. B. ökonomische sowie soziale Aspekte, die außerhalb des Untersuchungsrahmens einer Ökobilanz liegen, können die Entwässerungsprozesse mit und ohne Elektrokoagulation sowie die unterschiedlichen Alternativen zur Anwendung der Elektrokoagulation verglichen werden. Zur Erfassung von ökonomischen sowie sozialen Aspekten können auch andere Instrumente, wie z. B. die Ökoeffizienzbewertung nach DIN EN ISO 14045:2012, mit der Ökobilanz kombiniert werden. Diese Kombination ermöglicht den ökologischen und ökonomischen Vergleich zwischen den zwei oben genannten Entwässerungsprozessen.

## 13.5 Daten Ökobilanz

### 13.5.1 Daten über die Kammerfilterpresse

Die erforderlichen Daten für die Durchführung der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 werden im Folgenden tabellarisch dargestellt. Die Datensammlung fand im Rahmen der zweiten Phase des Forschungsprojektes statt. Zur Verfügung gestellt werden die Daten von der Fa. MSE Filterpressen (Fa. MSE-Filterpressen, 13.02.2015). Tab. F.1 und F.3 stellen die allgemeine Informationen und die Materialaufteilung einer Kammerfilterpresse Format 1500 KFP 1500-130-25KGA0-P-L-L vor, die in 40 Fuß Container verbaut ist.

Teil	Information
Kammerzahl	130 Stück
Kammertiefe	25 mm
Volumen pro Kammer	ca. 45 l
Plattengröße	1500 x 1500 mm
Plattenwerkstoff	PP
Filtertuchwerkstoff	PP
<b>Abmessung</b>	ca. 1500 x 1500 mm
Filtertuchwechsel	hängt vom Verschleißgrad ab (ca. alle 6 - 12 Monate)
Beschickungsdruck	max. 15 bar
Hydraulikaggregat	7,5 kW, 400 Volt, 50 Hz

Tabelle F.1: Information über die Kammerfilterpresse (Fa. MSE-Filterpressen, 13.02.2015)

Material	Aufteilung (%)	Aufteilung (kg)
PP (Polypropylen)	60	20100
Gusseisen	27	9045
Edelstahl	5	1675
Kupfer	2	670
PE (Polyethylen)	1	335
PU (Polyurethane)	1	335
PVC (Polyvinylchlorid)	1	335
Öl im Hydraulikaggregat	3	1005
<b>Kammerfilterpresse</b>	<b>100</b>	<b>33500</b>

Tabelle F.2: Materialaufteilung der Kammerfilterpresse (Fa. MSE-Filterpressen, 13.02.2015)

Im Folgenden werden die Input- und Outputflüsse der Prozessmodule mit ihren Mengen dargestellt und begründet:

## Kammerfilterpresse

- 1 Zyklus: 1 Stunde
- Feststoffleistung: 10 t Filterkuchen pro Zyklus
- Wassergehalt des Filterkuchens: 30 %
- Feststoffleistung: 7 t Feststoff pro Zyklus
- Annahme Dichte der Suspension:  $1,075 \text{ t/m}^3$
- Durchsatz:  $57,43 \text{ m}^3$  Altsuspension pro Zyklus
- Durchsatz:  $8,21 \text{ m}^3$  Altsuspension pro FE
- Dauer der Filtration pro FE: 0,14 h
- Annahme Betriebsstunden: 10 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche, 4 Wochen pro Monat
- Annahme Lebensdauer: 15 Jahre
- Aufteilung der Rohstoffe der Kammerfilterpresse (bezogen auf die FE)
  - Lebensdauer der Kammerfilterpresse: 36.000 h (Betriebsstunden) -In 36.000 h werden 252.000 t Schlamm entwässert -Aufteilung der Masse der Rohstoffe der Kammerfilterpresse auf die FE:
  - In 36.000 h werden 252.000 t Schlamm entwässert
  - Aufteilung der Masse der Rohstoffe der Kammerfilterpresse auf die FE: 33.500 kg Kammerfilterpresse / 252.000 t Schlamm = 0,133 kg
    - 0,081 kg PP
    - 0,043 kg Edelstahl und Gusseisen; (aufgrund des Datenmangels für Gusseisen werden beide als Edelstahl modelliert)
    - 0,004 kg Kupfer
    - 0,004 kg PE und PU; (aufgrund des Datenmangels für PE und PU werden beide als PE modelliert)
    - 0,001 kg PVC
    - Aufgrund des Datenmangels wird Öl im Hydraulikaggregat vernachlässigt.

## Filtertuchverbrauch

- Anhand der Daten in Tab. F.1 wird das Volumen der 260 Filtertücher aus PP (mit Abmessungen  $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$  und einer Dicke von 5 mm) berechnet:  $0,011 \text{ m}^3$
- Anhand der Dichte ( $0,9 \text{ g/cm}^3$ ) des Materials PP wird die Masse der 260 Filtertücher aus PP berechnet: 10,1 kg
- Annahme zur Häufigkeit der Filtertuchwechsel: Alle 6 Monate
- Filtertuchverbrauch:
  - 10,1 kg / 6 Monate
  - 0,001 kg / FE

### **Flockungsmittel-Verbrauch**

- Anhand der Daten in Tab. 2.3 [Pay16] wird der Flockungsmittelverbrauch zur Konditionierung von 1 m<sup>3</sup> Suspension eingeschätzt:
- 0,28 kg pro 1 m<sup>3</sup> Altsuspension
- Anhand der oben dargestellten Daten über Durchsatz und Feststoffleistung der Kammerfilterpresse folgt:
- ca. 2,30 kg Flockungsmittel / FE

### **Wasserverbrauch für die Herstellung der Flockungsmittel-Lösung**

- Annahme: 0,4 %-ige Flockungsmittel-Lösung
- Beim Einsatz von 2,30 kg Flockungsmitteln werden ca. 574 l Wasser eingesetzt.

### **Wasserverbrauch für den Waschvorgang der Filtertücher**

- Annahme: 350 l pro Kammer, d. h. 45.500 l für 130 Kammer
- Annahme zur Häufigkeit des Waschvorgangs: 1 Mal pro Woche
- Anhand der oben dargestellten Daten ergibt sich 45.500 l / 350 t Schlamm, d. h. 130 l / FE

### **Energieverbrauch**

- Annahme: 3 kWh / m<sup>3</sup> zu entwässerndem Klärschlamm (Baum, 1998)
- Stromverbrauch: 24,62 kWh / FE
- Umrechnung zu Primärenergie nach Klöpffer & Grahl (2009): 246,2 MJ / FE

## **13.5.2 Daten über die EK-Zelle**

Im Folgenden wird ein Vorschlag zum Aufbau einer baustellentauglichen EK-Zelle gemacht. Basis für diese Entwicklung sind ebenfalls die Kenntnisse aus den Laboruntersuchungen, insbesondere die Parameter aus der „Best Combination“. Ihre Abmessungen entsprechen dem Proportionalitätsverhältnis der EK-Zelle B; die Breite entspricht jedoch dem zweifachen Wert. Diese EK-Zelle sollte nach dem Prinzip A und Einsatzort 3 in der Anlage [Pay16] zur Feintrennung eingesetzt werden.

Abb. F.1 stellt den prinzipiellen Aufbau einer EK-Zelle dar; diese Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Diese besteht hauptsächlich aus dem Tank aus PP, dem Elektrodenpaket, dem Reinigungssystem der Elektroden und der Steuerungsstation. Der Tank ist quaderförmig (Höhe 1,8 m, Breite 2,3 m und Tiefe 2,2 m). Der untere Teil bildet einen Trichter. Das Elektrodenpaket besteht aus 28 Elektroden – 14 Anoden und 14 Kathoden – aus Aluminium, die im Abstand von 6 cm auseinander angeordnet sind. Die Elektroden haben die gleiche Höhe

und Breite wie der Tank und eine Dicke von 1 cm. Die EK-Zelle ist mit einem Reinigungssystem für die Elektroden ausgestattet. Dabei handelt es sich um eine Platte aus PP mit langen dünnen Schlitzten, die in Zeitintervallen nach unten geführt wird, um das angelagerte Material Richtung des Bodens des Tanks zu verschieben. Der untere Teil des Tanks in Form eines Trichters hat die Aufgabe, das sedimentierte bzw. an der Sohle des Tanks angesammelte Material zu beseitigen.

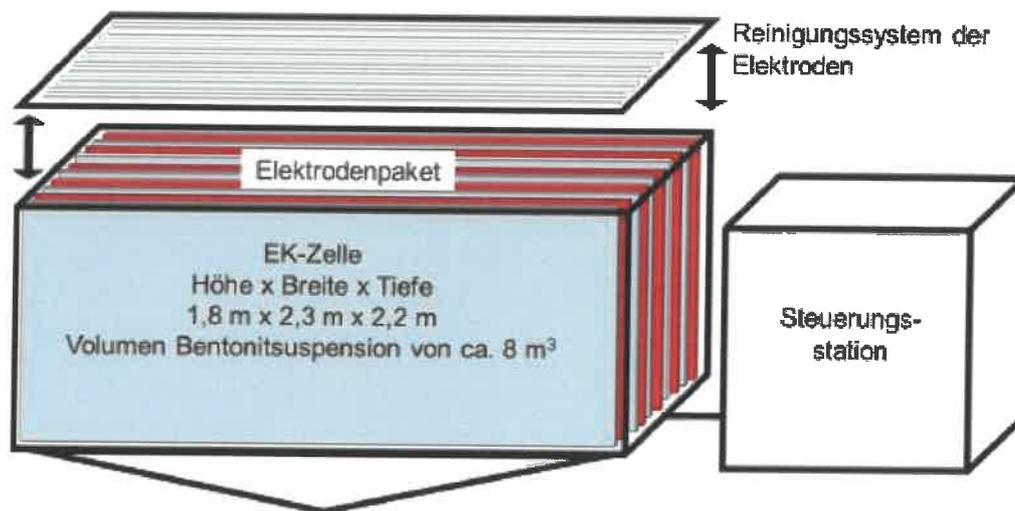


Abbildung F.1: Festlegung des Prozessmoduls „Entwässerung mit EK-Zelle und KFÜ“ mit Input- und Outputflüssen

Die ablaufenden Prozesse werden über eine gezielte Steuerungsstation gesteuert. Zusätzliche Teile wie der Deckel des Tanks, Schläuche, Schrauben, Klemmen usw. werden zur Vereinfachung der Skizze nicht in Abb. F.1 dargestellt.

Die Abmessungen der EK-Zelle ermöglichen den Aufbau der Anlage in Containerausführung, z. B. in einem 20-Fuß Container. Der Einbau von zwei EK-Zelle in einem derartigen Container wird in Abb. F.2 skizziert; diese Zeichnung ist nicht maßstäblich. Diese Modular Bauweise einer oder mehrerer EK-Zellen schützt die Anlage vor ungünstigen Wetterbedingungen und ermöglicht einer leichten und schnellen Montage und Demontage mit einem maximalen Schutz der Umwelt.

Eine derartige EK-Zelle hat ein gesamtes Volumen von ca. 9,1 m<sup>3</sup>, davon stellen ca. 1,1 m<sup>3</sup> die Elektroden und ca. 8 m<sup>3</sup> die Bentonitsuspension dar. Weitere Details bzgl. der Betriebsart der EK-Zelle werden in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben, da dafür Laboruntersuchungen erforderlich sind.

Im Folgenden werden die Input- und Outputflüsse der Prozessmodule mit ihren Mengen dargestellt und begründet:

## Materialaufteilung

-Tank aus PP-Platte mit einer Dicke von 5 cm. Bei der Berechnung wird der Teil des Trichters vernachlässigt.

-Vor- und Hinterplatte:  $2 \times 2,3 \times 1,8 \times 0,05 = 0,414 \text{ m}^3$

-Seitenplatte:  $2 \times 2,2 \times 1,8 \times 0,05 = 0,396 \text{ m}^3$

-Boden, Deckel und Platte des Reinigungssystems:  $3 \times 2,2 \times 2,3 \times 0,05 = 0,759 \text{ m}^3$

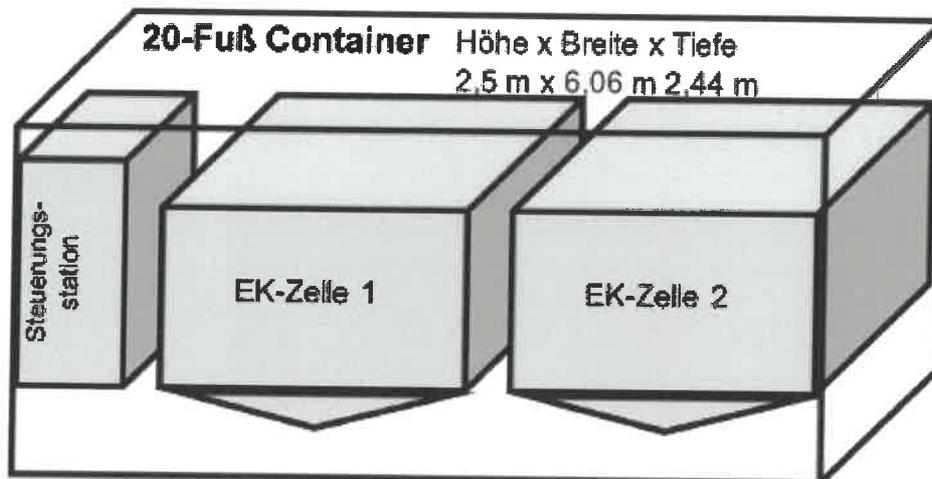


Abbildung F.2: Festlegung des Prozessmoduls „Entwässerung mit EK-Zelle und KFÜ“ mit Input- und Outputflüssen

-Volumen an PP:  $1,569 \text{ m}^3$

-Annahme Dichte von PP:  $0,95 \text{ t/m}^3$

-Masse an PP:  $1.412 \text{ kg}$

-28 Al-Elektroden mit einer Dicke von 1 cm

$-28 \times 2,3 \times 1,8 \times 0,01 = 1,16 \text{ m}^3$

-Annahme Dichte von Al:  $2,7 \text{ t/m}^3$

-Masse an Al:  $3.130 \text{ kg}$

-Kupferteile aus der elektrischen Anlage:  $1000 \text{ kg}$

-Schläuche, Rohre und Ventile aus PVC:  $350 \text{ kg}$

-Kleinteile aus Edelstahl (Schrauben, Klemmen usw.):  $350 \text{ kg}$

Material	Aufteilung (%)	Aufteilung (kg)
Al	50	3.130
PP	23	1.412
Kupfer	16	1.000
Edelstahl	6	350
PVC	6	350
EK-Zelle	100	6.242

Tabelle F.3: Materialaufteilung der Kammerfilterpresse

### Lebensdauer

-Annahme Lebensdauer: 15 Jahre (36.000 h – Betriebsstunden–)

### Leistung der EK-Zelle

- Annahme Dauer eines Zyklus der Elektrokoagulation: 30 min
- Volumen von Suspension zur Behandlung: 8,0 m<sup>3</sup> / Zyklus
- Volumen von Suspension zur Behandlung: 16,0 m<sup>3</sup> / h
- Dauer der Elektrokoagulation: 0,51 h / FE

### Anodenverbrauch - Austausch der Anode

- Masse einer Anode: 111,78 kg
- Annahme: Die Anode wird ausgetauscht, wenn sie 80 % ihrer Masse verloren hat.
- Laut des Faraday'schen Gesetzes:
- Verlust von 80 %: 89,42 kg
- Molare Masse von Al: 26,9815 g / mol
- Faraday'sche Konstante: 96.485 A s / mol
- Anzahl an Elementarladung von Al: 3
- Zeit zum Massenverlust von 80 % beträgt 804,6 h
- Zeitintervall zum Austausch der Anoden: 804,6 h
- Masse der ersetzten Anode: 0,0142 kg / FE
- Masse der ersetzten 14 Anoden: 0,199 kg / FE
- Masse der zu entsorgenden Anode: 0,071 kg / FE
- Masse der zu entsorgenden 14 Anoden: 0,997 kg / FE

### Energieverbrauch

- Aktive Elektrodenoberfläche einer Unterzelle (zwischen einer Anode und einer Kathode): 4,14 m<sup>2</sup>
- Annahme Stromdichte: 8 mA/cm<sup>2</sup> (80 A/m<sup>2</sup>)
- Erforderliche Stromstärke pro Unterzelle: 331,2 A
- Erforderliches Netzgerät: 400 A und 48 V
- Leistung einer Unterzelle: 19,2 kW

- Leistung EK-Zelle: 268,8 kW
- Stromverbrauch / FE: 137,85 kWh
- Umrechnung zu Primärenergie nach Klöpffer & Grahl (2009): 1378,5 MJ / FE

**Szenario 60 %**

- Üblicher Flockungsmittelverbrauch: 2,30 kg Flockungsmittel / FE
- Flockungsmittelverbrauch unter Einsparung von 60 %: 0,92 kg Flockungsmittel / FE
- Üblicher Wasserverbrauch: 574,36 l Wasser / FE
- Wasserverbrauch unter Einsparung von 60 %: 229,74 l Wasser / FE

**Szenario 100 %**

- Üblicher Flockungsmittelverbrauch: 2,30 kg Flockungsmittel / FE
- Flockungsmittelverbrauch unter Einsparung von 100 %: 0 kg Flockungsmittel / FE
- Üblicher Wasserverbrauch: 574,36 l Wasser / FE
- Wasserverbrauch unter Einsparung von 100 %: 0 l Wasser / FE

**13.5.3 Daten zu Methode CML („baseline“)**

Tab. F.4, F.5 und F.6 stellen die Wirkungskategorien zum Einsatz der Methode CML („baseline“) dar (Acero et al., 2015).

---

Wirkungskategorien		
Versauerungspotenzial	Definition	Verminderung des pH Wertes durch Versauerungseffekt künstlicher Emissionen
	Wirkungsindikator	Erhöhung des Säuregrades in Wasser und Bodensystemen
	Anmerkungen	Versauerungspotenzial von Stickstoff- und Schwefeloxiden
	Schadenskategorie	Verminderung der Qualität von Ökosystemen und der Artenvielfalt
	Einheit	kg SO <sub>2</sub> -Äq.
Klimawandel	Definition	Veränderung der globalen Temperatur durch Treibhausgase
	Wirkungsindikator	Störungen der globalen Temperatur und klimatischer Phänomene
	Anmerkungen	Treibhausgase und ihr Treibhauspotenzial, z. B. Methan, Schwefelhexafluorid usw.
	Schadenskategorie	Nutzpflanzen, Wälder, Korallenriffe, usw. (Artenvielfalt im Allgemeinen)
	Einheit	kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Ressourcenverbrauch	Definition	Verminderung der Verfügbarkeit abiotischer Ressourcen (endlich und regenerierbar) aufgrund untragbarer Nutzung
	Wirkungsindikator	Verminderung abiotischer Ressourcen
	Anmerkungen	Unterscheidung zwischen regenerierbaren und endlichen Ressourcen
	Schadenskategorie	Schaden an natürlichen Ressourcen und ein potenzieller Kollaps des Ökosystems
	Einheit (modellabhängig)	kg Antimon-Äq.: kg Mineralien, MJ fossiler Brennstoffe, m <sup>3</sup> Wasserverbrauch

Tabelle F.4: Wirkungskategorien für die Methode CML („baseline“), (Acero et al., 2015), Teil 1

Wirkungskategorien		
Toxische Schädigung von Organismen	Definition	Toxische Effekte von Chemikalien auf das Ökosystem, Verlust der Artenvielfalt und/oder Artensterben
	Wirkungsindikator	Verlust der Artenvielfalt und/oder Artensterben
	Anmerkungen	Toxikologische Reaktionen unterschiedlicher Arten Herkunft der Chemikalien im Ökosystem
	Schadenskategorie	Schädigung des Ökosystems und Artensterben
	Einheit (modellabhängig)	kg 1,4-DB -Aq. PDF („potentially disappeared fraction of species“) PAF („potentially affected fraction of species“)
Eutrophierung	Definition	Überdüngung an Nährstoffen in aquatischen Systemen
	Wirkungsindikator	Erhöhung der Stickstoff und Phosphorkonzentration Bildung von Biomasse (z. B. Algen)
	Anmerkungen	Transport der Nährstoffe (Luft, Wasser, Eintrag vom Land)
	Schadenskategorie	Schädigung der Qualität des Ökosystems
	Einheit (modellabhängig)	kg PO <sub>4</sub> 3 -Aq. kg N -Aq.
Toxische Gefährdung des Menschen	Definition	Toxische Effekte von Chemikalien auf den Menschen
	Wirkungsindikator	Krebs, Atemwegserkrankungen, andere nicht karzinogene Effekte und Effekte ionisierender Strahlung
	Anmerkungen	Toxikologische Reaktion der Menschen Herkunft der Chemikalien im menschlichen Körper
	Schadenskategorie	Menschliche Gesundheit
	Einheit (modellabhängig)	kg 1,4-DB -Aq. DALY („Disability-adjusted life year“)

Tabelle F.5: Wirkungskategorien für die Methode CML („baseline“), (Acero et al., 2015), Teil 2

Wirkungskategorien		
Stratosphärischer Ozonabbau	Definition	Abbau der stratosphärischen Ozonschicht aufgrund künstlicher Emission ozonabbauender Stoffe
	Wirkungsindikator	Erhöhung der ultravioletten UV-B Strahlung und Hauterkrankungen
	Berücksichtigungen	Atmosphärische Verweildauer der ozonabbauenden Stoffe
		EESC („Equivalent Effective Stratospheric Chlorine“)
	Schadenskategorie	Menschliche Gesundheit und die Qualität des Ökosystems
	Einheit	kg CFC-11 -Aq.
Photochemischer Smog (Sommersmog)	Definition	Smog, der durch Sonnenlicht, Hitze, NMVOC und NO <sub>x</sub> entsteht
	Wirkungsindikator	Erhöhung des Sommersmogs
	Anmerkungen	Meteorologie, die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und die Emission anderer Schadstoffe
	Schadenskategorie	Menschliche Gesundheit und die Qualität des Ökosystems
	Einheit (modellabhängig)	kg Ethylen -Aq. kg NMVOC kg gebildetes Ozon

Tabelle F.6: Wirkungskategorien für die Methode CML („baseline“), (Acero et al., 2015), Teil 3

### 13.6 Literatur Ökobilanz

Remy, C. (2010). Life cycle assessment of conventional and source-separation systems for urban wastewater management (Dissertation). Technische Universität Berlin, Clausthal-Zellerfeld.

Hafner, A. (o. J.). Environmental Properties of Timber Buildings in Life Cycle - From European Viewpoint. In World Conference on Timber Engineering 2014.

Kleine, A., Weber, V., Saling, P. & Weicht, R. (2007). Ökobilanz-Analyse zu Entsorgungsoptionen von pech-/teerhaltigem Strapenaufbruch [Forschungsbericht].

Schwarz, M., Röder, J. & Wagner, H. J. (2014). Ökobilanzen in der Pumpenindustrie. Treibhauspotenzial von zwei Abwasser-Tauchmotorpumpen. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61, 606–612.

Wagner, H. J., Röder, J., Schwarz, M. & Flach, M. (2013). Ökobilanzen in der Pumpenindustrie: Kumulierter Energieaufwand und Treibhauspotenzial einer Hocheffizienzpumpe. HLH, 7, 40–43.

Klöpffer, W. & Grahl, B. (2009). Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.

Deutsches Institut für Normung. (11.2009). DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (Norm Nr. 14040:2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Acero, A. P., Rodriguez, C. & Ciroth, A. (2015). LCIA Methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories [Internetdokument]. Zugriff am 24.02.2015 auf <http://www.openlca.org/lcia-methods>

Cheremisinoff, N. P. (1997). Handbook of engineering polymeric materials. New York: Marcel Dekker.

Ciroth, A. & Winter, S. (2014). openLCA 1.4 Overview and first steps [Internetdokument]. Zugriff am 24.02.2015 auf <http://www.openlca.org/learnmore>

Winter, S. (2014). openLCA 1.4 Case study [Internetdokument]. Zugriff am 24.02.2015 auf <http://www.openlca.org/learnmore>

Baum, F. (1998). Umweltschutz in der Praxis: Mit 187 Tabellen (3., verb. Aufl. Aufl.). München and Wien: Oldenburg.

Fa. MSE-Filterpressen. (13.02.2015). Information über Kammerfilterpresse: telefonisch und E-Mail [Persönliche Mitteilung].