

**Abschlussbericht**  
zum Forschungsvorhaben  
**„Dimensionierung großtechnischer GAK-Filter durch  
Ermittlung der erzielbaren Feststoffbelastungen und  
Spülintervalle“**

**(„SOLIDUS“)**

**Az.: 17-04.02.01-3a/2018**

**Im Rahmen des Förderprogramms**  
**„Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ –**  
**Förderbereich 6:**  
**Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Abwasserbeseitigung**

**gerichtet an das**

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Aachen, den 31.03.2022

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wintgens  
Direktor des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft  
der RWTH Aachen

## Projektbearbeitung

		Bearbeiter/Bearbeiterinnen
	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wintgens Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 E-Mail: isa@isa.rwth-aachen.de <a href="http://www.isa.rwth-aachen.de">www.isa.rwth-aachen.de</a>	Swetlana Schölzel, M.Sc. <a href="mailto:schoelzel@isa.rwth-aachen.de">schoelzel@isa.rwth-aachen.de</a> Dr.-Ing. Laurence Palmowski <a href="mailto:palmowski@isa.rwth-aachen.de">palmowski@isa.rwth-aachen.de</a> Ben Reiser, M.Sc.
	Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH Stockkampstraße 10 40477 Düsseldorf Tel.: 0211 44991-0 <a href="http://www.hydro-ingenieure.de">www.hydro-ingenieure.de</a>	Dipl.-Ing. Soufiane Frindi <a href="mailto:Soufiane.Frindi@hydro-ingenieure.de">Soufiane.Frindi@hydro-ingenieure.de</a> Dipl.-Ing. Klaus Alt <a href="mailto:klaus.alt@hydro-ingenieure.de">klaus.alt@hydro-ingenieure.de</a>
	atd GmbH – Ingenieurgesellschaft für Abwasserwirtschaft und technische Dienstleistungen mbH Krefelder Straße 147 52070 Aachen Tel.: 0241 169 89 0 E-Mail: info@atdgmbh.de <a href="https://www.atdgmbh.de/">https://www.atdgmbh.de/</a>	Dr.-Ing. Frank Benstöm <a href="mailto:benstoem@atdgmbh.de">benstoem@atdgmbh.de</a>
<b>Autor:innenteam:</b> ISA: Swetlana Schölzel, M.Sc.; Ben Reiser, M.Sc.; Dr.-Ing. Laurence Palmowski, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil Thomas Wintgens HI: Dipl.-Ing. Soufiane Frindi, Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk, Dipl.-Ing. Klaus Alt atd: Dr.-Ing. Frank Benstöm		
<b>Zitiervorschlag:</b> SCHÖLZEL ET AL. (2022): Dimensionierung großtechnischer GAK-Filter durch Ermittlung der erzielbaren Feststoffbelastungen und Spülintervalle (SOLIDUS). Kurzbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.		

## Danksagungen

Besonderen Dank gilt den assoziierten Partnern, auf deren Anlagen die Untersuchungen durchgeführt wurden.

Kläranlage Bad Oeynhausen



Kläranlage Köln-Rodenkirchen



Kläranlage Gütersloh-Putzhagen



Kläranlage Obere Lutter



Für den wissenschaftlichen Austausch danken wir außerdem:

Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt (IWW Zentrum Wasser)

Johanna Neef, M.Sc. (KomS BW)

Dipl.-Ing. Marc Böhler (Eawag, das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs)

Dr.-Ing. Alessandro Meda (BHU Umwelttechnik GmbH)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch (Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft TU Berlin)

# Inhaltsverzeichnis

Projektbearbeitung.....	I
Danksagungen.....	I
Zusammenfassung.....	1
<b>1 Projektübersicht.....</b>	<b>2</b>
1.1 Veranlassung .....	2
1.2 Projektziele.....	3
<b>2 Stand des Wissens und der Technik zum Einsatz von granulierter Aktivkohle zur Abwasserbehandlung .....</b>	<b>4</b>
2.1 Grundlagen der Abwasserfiltration.....	4
2.1.1 Spülung von diskontinuierlich betriebenen Raumfiltern .....	5
2.1.2 Druckverlauf in Raumfiltern.....	7
2.2 Grundlagen der Aktivkohlefiltration .....	10
2.2.1 Aktivkohle als Filtermaterial .....	10
2.2.2 Bauweisen und Dimensionierung von GAK-Filtern.....	11
2.2.3 Spülung von diskontinuierlich betriebenen GAK-Filtern.....	13
2.2.4 Mögliche Einflussfaktoren auf die Spülintervalllänge.....	17
2.2.5 Druckverlauf in GAK-Filtern .....	22
<b>3 Material und Methoden .....</b>	<b>25</b>
3.1 Vorstellung der untersuchten großtechnischen GAK-Filter .....	25
3.1.1 KA Bad Oeynhausen .....	26
3.1.2 KA Gütersloh-Putzhagen .....	28
3.1.3 KA Obere Lutter.....	30
3.1.4 KA Köln-Rodenkirchen.....	32
3.1.5 KA Düren Merken .....	34
3.2 Ermittlung der Korngrößenverteilung im Filterbett.....	34
3.3 Messung des Druckverlaufs im Filterbett .....	36

3.4	Untersuchung der Feststoffbelastung .....	37
<b>4</b>	<b>Versuchsergebnisse .....</b>	<b>41</b>
4.1	KA Bad Oeynhausen .....	41
4.1.1	Kornverteilung im Filterbett .....	41
4.1.2	Druckverlauf im Filterbett .....	44
4.1.3	Ermittlung der maximalen Filtrationsintervalllänge .....	49
4.1.4	Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung .....	53
4.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	56
4.2	KA Gütersloh-Putzhagen .....	58
4.2.1	Kornverteilung im Filterbett .....	58
4.2.2	Druckverlauf im Filterbett .....	60
4.2.3	Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung .....	63
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	65
4.3	KA Obere Lutter .....	67
4.3.1	Kornverteilung im Filterbett .....	67
4.3.2	Druckverlauf im Filterbett .....	68
4.3.3	Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung .....	72
4.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	74
4.4	KA Köln-Rodenkirchen .....	75
4.4.1	Kornverteilung im Filterbett .....	75
4.4.2	Druckverlauf im Filterbett .....	78
4.4.3	Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung .....	82
4.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	85
4.5	Düren Marken.....	87
4.6	Zusammenfassende Ergebnisse .....	89
<b>5</b>	<b>Empfehlungen zur Planung und zum Betrieb von GAK-Filtern .....</b>	<b>92</b>
5.1	Bemessung von granulierten Aktivkohlefiltern .....	92

5.1.1 Vergleich der Forschungsergebnisse mit dem DWA-A 203 (2019) .....	93
5.1.2 Empfehlung zur Dimensionierung von GAK-Filtern .....	97
5.1.3 Bemessungsbeispiel.....	99
5.1.4 Kostenbetrachtung.....	100
5.2 Empfehlungen zum Betrieb von GAK-Filtern .....	109
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>111</b>
<b>7 Verzeichnisse .....</b>	<b>114</b>
7.1 Verzeichnis der Abkürzungen.....	114
7.2 Verzeichnis der Tabellen .....	116
7.3 Verzeichnis der Abbildungen .....	118
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>126</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>131</b>
<b>Anhang A.1: Ergebnisse der Fragebögen KA BO .....</b>	<b>132</b>
<b>Anhang A.2: Ergebnisse der Fragebögen KA GT .....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang A.3: Ergebnisse der Fragebögen KA AOL.....</b>	<b>141</b>
<b>Anhang A.4: Ergebnisse der Fragebögen KA RKO.....</b>	<b>146</b>
<b>Anhang B.1: Druckdaten KA Bad Oeynhausen .....</b>	<b>151</b>
<b>Anhang B.2: Druckdaten KA Bad Oeynhausen – Ablauf FloFi.....</b>	<b>183</b>
<b>Anhang C: Druckdaten KA Gütersloh Putzhagen .....</b>	<b>193</b>
<b>Anhang D: Druckdaten KA Obere Lutter .....</b>	<b>198</b>
<b>Anhang E: Druckdaten KA Köln Rodenkirchen .....</b>	<b>199</b>

## Zusammenfassung

GAK-Filter werden zur Spurenstoffelimination eingesetzt und daher bislang über die Kontaktzeit und die Filtergeschwindigkeit dimensioniert. In diesem Zusammenhang fehlten jedoch Erkenntnisse über die hydraulische Leistungsfähigkeit in Bezug auf maximale Feststoffbelastungen der GAK-Filter sowie Empfehlungen zur Auslegung der Filterspülung. Die nach DWA-A 203 geltenden Bemessungsgrundsätze für konventionelle Raumfilter (z.B. maximale Feststoffraumbelastung zwischen zwei Rückspülungen) können aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der GAK nicht übertragen werden.

Um die Wissenslücke zur Dimensionierung von GAK-Filtern zu schließen, wurden im Rahmen des Projektes „SOLIDUS - Dimensionierung großtechnischer GAK-Filter durch Ermittlung der erzielbaren Feststoffbelastungen und Spülintervalle“ vier unterschiedliche großtechnische GAK-Filter auf vier Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen untersucht. Über einfache Druckmessungen im Filterbett, die Charakterisierung von Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filter und die Ermittlung der Kornverteilung im Filterbett wurde ein erster, belastbarer Bemessungsansatz hinsichtlich der maximalen Feststoffbelastung entwickelt. Die Angabe einer maximalen Feststoffflächenbelastung soll der Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit dienen. Daneben liefert sie eine Hilfestellung bei der Planung, ob eine GAK-Filtration unter Berücksichtigung der anlagenspezifischen Abwassereigenschaften mit oder ohne Vorfiltration betrieben werden kann.

Anhand der einfachen und kostengünstigen Messungen wurden neben der Entwicklung des Bemessungsansatzes, die Längen der Filtrationsintervalle zwei der untersuchten GAK-Filter deutlich verlängert. Mit der Entwicklung von Auslösekriterien für eine bedarfsgerechte Spülung, konnten Kläranlage durch die Verringerung der Spülhäufigkeit neben dem Personalbedarf, Betriebskosten einsparen. Durch längere Filtrationsintervalle wird insgesamt weniger Spülabwasser wieder in den Kläranlagenprozess gegeben, wodurch sich Einsparungen im Reinigungsprozess selbst ergaben (vornehmlich Energiekosten für Pumpen).

Sowohl der entwickelte Bemessungsansatz als auch die Empfehlungen zum Auslösen einer bedarfsgerechten Spülung lassen sich auf andere diskontinuierlich betriebene GAK-Filter übertragen. Dabei werden auch die unterschiedlichen hydraulischen Prozesse, die durch die unterschiedliche Strömungsrichtungen (aufwärts oder abwärts) gekennzeichnet sind, berücksichtigt.

# 1 Projektübersicht

## 1.1 Veranlassung

Aufgrund der verbesserten Analytik haben anthropogene Mikroschadstoffe im Wasser in den letzten zwei Jahrzehnten sukzessive an Beachtung gewonnen. Erste toxische Auswirkungen auf die aquatische Umwelt wurden festgestellt (Kidd et al., 2007; Länge et al., 2001; Fent et al., 2006; KOM-M.NRW, 2015a). Mikroschadstoffe finden Verwendung in der Industrie, der Landwirtschaft, in Haushalten, Baumaterialien und vielen anderen Bereichen und können beispielsweise über Erosion oder den Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen in die Gewässer eingetragen werden. Einen Haupteintragspfad dieser Stoffe in Gewässer stellen kommunale Kläranlagen (KA) dar, welche die Mikroschadstoffe mit den vorliegenden konventionellen Verfahren nicht hinreichend entfernen können (KOM-M.NRW, 2015a). Steigende Anforderungen an die Wasserqualität und die zunehmende Wasserknappheit erfordern bereits jetzt eine weitergehende Behandlung, eine sog. vierte Reinigungsstufe, von kommunalem Abwasser. Zwei Verfahren haben sich zur Entfernung von Mikroschadstoffen bislang als erfolgreich erwiesen: zum einen die Oxidation mit Ozon und zum anderen die Adsorption an Aktivkohle (granuliert oder pulverisiert). Aufgrund ihrer betriebsfreundlichen Anwendung werden granuliert Aktivkohlefilter (GAK-Filter) immer häufiger auf Kläranlagen zur Entfernung organischer Mikroschadstoffe eingesetzt (u.a. KA Obere Lutter als erste in Deutschland 2012 in Betrieb genommene GAK-Anlage (Alt et al. 2014, Alt und Barnscheidt, 2020), KA Bad Oeynhausen, KA Harsewinkel, KA Gütersloh-Putzhagen, KA Rietberg, ARA Neugut (CH), ARA Furt (CH)) (Alt, 2018; Alt und Zydroczyk, 2019). In Abbildung 1: Verfahren zur Mikroschadstoffelimination in Deutschland (in Betrieb und Planung/Bau) (Metzger et al., 2020) ist zu erkennen, dass auf etwa der Hälfte der Kläranlagen in Deutschland, die eine vierte Reinigungsstufe aufweisen, PAK zum Einsatz kommt, wobei die Anzahl der sich in der Planung bzw. im Bau befindlichen Anlagen zu PAK bzw. GAK annähernd gleich ist. Die Tatsache, dass die GAK-Filtration als betriebstaugliche und praktikable Technologie zur Mikroschadstoffentfernung zunehmend auf KA in Deutschland eingesetzt wird, zeigt die Notwendigkeit einer einheitlichen Bemessungsgrundlage.

Da granuliert Aktivkohle in erster Linie für die Adsorption von Mikroverunreinigungen und nicht für die Filtration von Abwasserinhaltsstoffen eingesetzt werden soll, beziehen sich bisherige Auslegungsgrößen hauptsächlich auf eine optimale Adsorptionsleistung. Nichtsdestotrotz muss die hydraulische Leistungsfähigkeit, die u. a. vom Feststoffeintrag und der Spülung beeinflusst wird, einer Aktivkohlefiltration gewährleistet sein. Hierzu gibt es jedoch noch offene Fragen, die es im Rahmen des Projektes SOLIDUS zu beantworten galt.

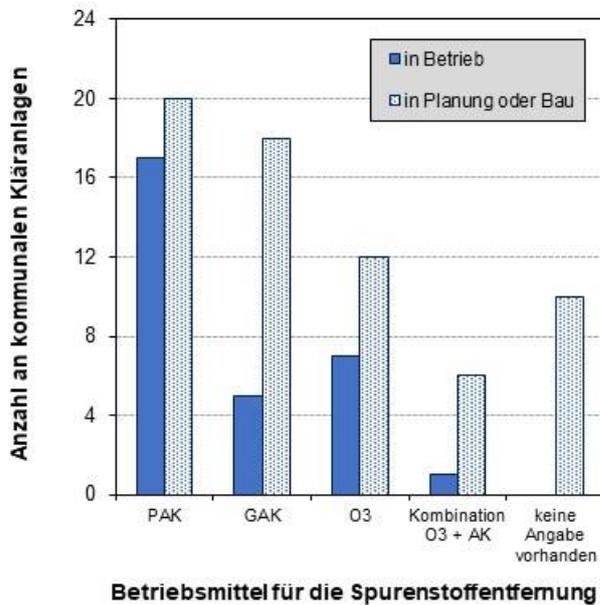


Abbildung 1: Verfahren zur Mikroschadstoffelimination in Deutschland (in Betrieb und Planung/Bau) (Metzger et al., 2020)

## 1.2 Projektziele

Die Untersuchungen im Forschungsvorhaben SOLIDUS basierten auf den folgenden zusammengefassten Zielen:

- Ermittlung der für den praktischen Betrieb erforderlichen Spülintervalle durch Untersuchung vier großtechnischer GAK-Filter in NRW
- Vergleich der in der Praxis bewährten Spülprogramme von GAK-Filtern
- Ermittlung der erzielbaren Feststoffraumbelastungen von auf- und abwärtsdurchströmten GAK-Filtern für relevante Lastfälle (Trocken- und Regenwetter) und Darstellung in einer normierten, auf andere Anlagen übertragbaren Form
- Abfrage, Zusammenstellung und Diskussion der betrieblichen Besonderheiten von GAK-Filtern mit den Betreibern großtechnischer GAK-Filter

## 2 Stand des Wissens und der Technik zum Einsatz von granulierter Aktivkohle zur Abwasserbehandlung

Einen Haupteintragspfad von Mikroschadstoffen in Gewässer stellen kommunale Kläranlagen dar, da die meisten Stoffe dort mit den bisherigen Verfahren nicht hinreichend entfernt werden können (KOM-M.NRW, 2015a). Nachgeschaltete Filtrationsverfahren in Kombination mit GAK bieten praktikable Lösungsansätze für die weitergehende Abwasserreinigung zur Entfernung organischer Mikroschadstoffe.

### 2.1 Grundlagen der Abwasserfiltration

Abwasserfiltrationsanlagen werden in Deutschland seit 1977 zur Entnahme von suspendierten Stoffen (z.B. an Partikel gebundener bzw. gefällter Phosphor, Stickstoff, BSB<sub>5</sub>, CSB) aus dem biologisch gereinigten Abwasser eingesetzt (Barjenbruch und Rolfs, 2007). Dabei wird zwischen Oberflächen- und Raumfiltern unterschieden. Bei der Oberflächenfiltration erfolgt der Rückhalt von Partikeln vornehmlich auf der Filteroberfläche oder im sich ausbildenden Filterkuchen. Dabei steigt der Durchströmungswiderstand (Druckverlust) mit zunehmender Höhe des Filterkuchens (Draxler und Siebenhofer, 2014). Bei der Raumfiltration durchströmt das gereinigte Abwasser ein poröses Bett, in dem die Partikel zurückgehalten werden (DIN EN 12255-16, 2019). Der Druckverlust im Raumfilter steigt mit zunehmender Verringerung der Porenräume (Fließwege) (Draxler und Siebenhofer, 2014). Bei Raumfiltern ist das Absetzen von Partikeln ausschließlich in der obersten Schicht des Filters unerwünscht, da auf diese Weise ein lokal sehr hoher Druckverlust hervorgerufen wird und die Tiefenwirkung des Filters verloren geht (Gimbel et al., 2008).

Raumfilter lassen sich je nach Verfahrensvariante weiter unterteilen:

- Unterscheidung nach der Filtergeschwindigkeit: Von hauptsächlicher Bedeutung für die Abwasserreinigung sind sogenannte Schnellfilter, die mit einer Filtergeschwindigkeit in der Größenordnung von ca. 10 m/h betrieben werden (Gimbel et al., 2008).
- Unterscheidung nach der Fließrichtung: Abwasserraumfilter können sowohl im Abwärtsstrom als auch im Aufwärtsstrom betrieben werden. Als Filtermaterialien eignen sich beispielsweise Quarzsand, Anthrazit oder Blähschiefer.
- Unterscheidung zwischen einer kontinuierlichen und diskontinuierlichen Filtration: Bei einem kontinuierlichen Filtrationsbetrieb wird das granulare Filtermaterial vom Boden des Bettes kontinuierlich mithilfe einer Pumpe aufwärts gefördert und anschließend gereinigt auf die Oberfläche des Bettes zurückgeführt, wodurch ein stetiger

Filtrationsprozess ermöglicht wird. Diskontinuierliche Filter sind hingegen periodisch zu spülen, wobei der Filtrationsprozess kurzzeitig unterbrochen wird.

- Unterscheidung nach der Bauart: Filter können zudem in offener Bauweise mit freiem Wasserspiegel oder geschlossener Bauweise (Druckfilter) errichtet werden. Im Gegensatz zu Filtern in offener Bauweise können geschlossene Druckfilter prinzipiell für beliebig hohe Filtergeschwindigkeiten ausgelegt werden, haben allerdings gleichzeitig den Nachteil, dass die obere Filterschicht nicht unmittelbar beobachtet und kontrolliert werden kann. (Grombach et al., 2000; DIN EN 12255- 16, 2019)

### **2.1.1 Spülung von diskontinuierlich betriebenen Raumfiltern**

Beim Betrieb diskontinuierlicher Filter sind regelmäßige Rückspülungen notwendig, um zurückgehaltene Feststoffe aus dem Filterbett zu entfernen und die hydraulische Funktionsfähigkeit des Filters wiederherzustellen. Die Spülung wird üblicherweise mit bereits gereinigtem Ablauf der Filtration durchgeführt. Neben dem Spülwasser kommt in der Regel auch Luft zur Auflockerung des Filterbettes zum Einsatz. Verschiedene Phasen der Spülung werden zu einem Spülprogramm zusammengefasst (DIN EN 12255-16, 2019).

Bei ausreichender Spülwassergeschwindigkeit erfolgt eine Expansion des Filterbettes und die auf die beladenen Filterschichten wirkenden Scherkräfte resultieren in der Ablösung der Feststoffe (Gimbel et al., 2008). Diese werden mit dem Spülwasserstrom abgeführt. Eine Filterspülung kann verschiedene Ziele haben. Neben dem Stoffaustrag sollen das Filtermaterial wieder aufgelockert sowie Verbackungen und Gaseinschlüsse beseitigt werden. Weitere Effekte der Filterspülung stellen die Schichtung des Filtermaterials sowie ein möglicher Feinkornaustrag dar. Eine Zusammenfassung dieser Ziele ist Tabelle 1 zu entnehmen. Spülwasser und -luft werden in der Regel über einen Düsenboden ins Filterbett geleitet. Das Spülwasser durchfließt den Filter generell im Aufwärtsstrom. Der Überstauraum des Filters sollte so gewählt werden, dass er die Niveaudifferenz zwischen Wasserspiegel und Filtermaterial (Filterüberstand) sowie das bei der Filterspülung expandierte Filterbett aufnehmen kann (Grombach et al., 2000).

Tabelle 1: Ziele einer Filterspülung (Vgl. (Bornemann et al., 2015))

Ziel	Erläuterung
Stoffaustrag	Entfernung von eingelagerten und/oder angelagerten Stoffen
Materialauflockerung	Auflockerung des Filtermaterials zur Wiederherstellung einer günstigen Lagerungsdichte und eines ausreichenden Kornzwischenraumvolumens für die Durchströmung
Beseitigung von Verbackungen	Verhinderung und Beseitigung von Verbackungen und Verklebungen des Filtermaterials
Entfernung von Gasen	Beseitigung von Gasen und Lufteinschlüssen, wie sie z.B. nach der Luftspülung bzw. kombinierten Luft-/Wasserspülung vorliegen
Schichtung	Ordnen der einzelnen Schichtungen in Mehrschichtfiltern, Glätten der Bettoberfläche nach Verwerfung oder Auskolkungen
Feinkornaustrag	Austragen von Feinkornanteilen (Unterkorn, Filtermaterialabrieb) bspw. im Rahmen einer Füllung oder Nachfüllung mit neuem Filtermaterial

Es gibt verschiedene Kriterien, nach denen eine Filterspülung ausgelöst werden kann. Die Wahl eines geeigneten Kriteriums ist ein entscheidender Faktor bei der Planung und dem Betrieb eines Filters. Mögliche Kriterien sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Betriebszeitraum zwischen zwei Rückspülungen kann als Spülintervall oder Filtrationsintervall bezeichnet werden. Oft werden auch verschiedene Kriterien gem. Tabelle 2 kombiniert verwendet. Sofern die Filter nicht mit einem konstanten Durchfluss betrieben werden, kann auch ein auf den aktuellen Durchfluss normiertes Druckkriterium verwendet werden.

Tabelle 2: Etablierte Kriterien zur Auslösung einer Filterspülung (Vgl. (DWA-A 203, 2019))

Kriterium	Beschreibung
Zeitkriterium	Erreichen eines vorgegebenen Zeitintervalls
Durchflusskriterium	Erreichen einer festgelegten Durchflussmenge
Druckkriterium	Überschreiten eines vorgegebenen Filterwiderstands in Abhängigkeit des Durchflusses
Konzentrationskriterium	Erreichen einer vorgegebenen Feststoffkonzentration im Filtrat

Beim Auslösen der Spülung nach dem Konzentrationskriterium kann ein Filtrationsintervall in drei unterschiedliche Phasen unterteilt werden (s. Abbildung 2, Metzger et al., 2011). Kurz

nach der Spülung, in der so genannten Einarbeitungsphase, kommt es zu einem Trübungs-Peak im Ablauf. Nach diesem Peak pendelt sich die Trübung auf einen konstanten Wert ein, welcher die Ablauftrübung in der Arbeitsphase darstellt. Ein erneuter Anstieg der Trübung stellt das Ende der Arbeitsphase ein und der Filter geht in die Verschlechterungsphase über. Um die geforderte Ablaufqualität des Abwassers einhalten zu können, wurde der Filter nach Eintreten der Verschlechterungsphase gespült.

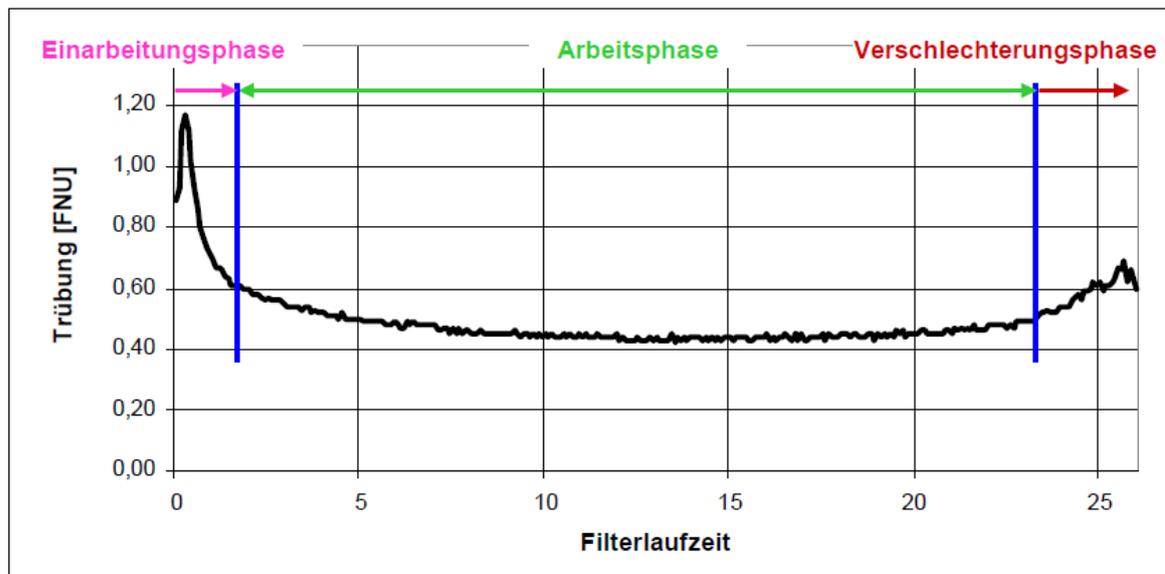


Abbildung 2: Zeitliche Unterteilung eines Filtrationsintervall hinsichtlich der Trübung (Metzger et al., 2011)

### 2.1.2 Druckverlauf in Raumfiltern

Bei abwärts durchströmten Filtern entwickelt sich mit zunehmender Filtrationszeit ein zunehmender Druckverlust, der unter anderem durch die abgelagerten Feststoffe im Filterbett, entsteht. Die Höhe des Druckverlustes ist u.a. abhängig von dem Filtrervolumenstrom bzw. der Filtergeschwindigkeit. Der Einfluss des Durchflusses sollte insbesondere bei einer Durchsatzsteigerung beachtet werden, da es in Folge dieser zu einem sprunghaften Anstieg des Druckverlustes kommen kann. (Grombach et al., 2000)

Bei abwärts durchströmten Raumfiltern in offener Bauweise gibt es zum Ausgleich des Druckverlustes zwei Möglichkeiten. Bei der Überstauregelung wird der zunehmende Druckverlust durch Anstieg des Wasserstandes im Überstauraum bis zur Erreichung eines maximalen Wertes ausgeglichen. Bei der Auslaufregelung kann hingegen während der gesamten Filterlaufzeit mit einem konstanten Wasserstand im Überstau gearbeitet werden. Mit zunehmender Belastung des Filters wird in diesem Fall eine Drosselarmatur (z.B. Klappe) im Ablauf des Filters sukzessive weiter geöffnet. (DWA-A 203, 2019)

Anhand der Entwicklung des Gesamtdruckverlustes lässt sich eine Aussage über den Prozess der Feststoffabscheidung im Raumfilter ableiten. Eine überwiegende Abscheidung der Feststoffe in der obersten Filterschicht resultiert in einem exponentiellen Anstieg des Druckverlustes (Abbildung 3 (a)). Dieser Flächenfiltrationseffekt ist vornehmlich dann zu beobachten, wenn das Filtermaterial der obersten Schicht eine zu geringe Korngröße besitzt oder die Filtergeschwindigkeit zu gering gewählt wurde. Bei einer optimalen Tiefenfiltration über das gesamte Filterbett ist der Anfangswiderstand zunächst proportional zum Filtrervolumenstrom und steigt dann mit zunehmender Belastung nahezu linear an (Abbildung 3 (b)). In der Regel bildet sich bei der Filtration von mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser eine Mischform dieser beiden Prozesse aus (Abbildung 3 (c)). Feststoffe werden zum Teil in der obersten Filterschicht und zum Teil in der Tiefe des Filterbettes zurückgehalten. Insbesondere bei geringen Filtergeschwindigkeit besteht die Gefahr, dass sich die Feststoffe vornehmlich in der obersten Schicht absetzen und einen exponentiellen Druckverlust verursachen. Bei höheren Filtergeschwindigkeiten können die Feststoffe tiefer in das Filterbett transportiert werden. Dabei ist die Wahl der Filtergeschwindigkeit für eine optimale Filtratausbeute bis zur Erreichung des filterabhängigen maximalen Druckverlustes von Bedeutung. (Cleasby und Baumann, 1974)

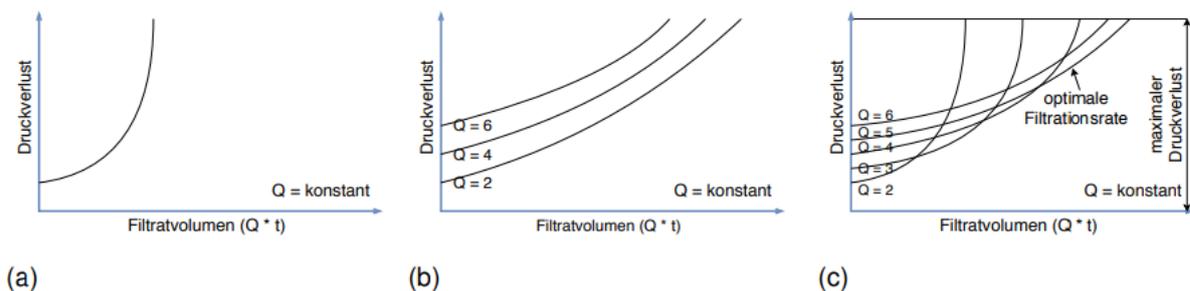


Abbildung 3: Qualitative Modelle der Druckverlustentwicklung in Raumfiltern (a) Druckverlust bei Oberflächenfiltration; b) Druckverlust bei optimal ablaufenden Raumfiltration; c) Druckverlust aus Mischform der Oberflächen- und Raumfiltration; Vgl. (Cleasby und Baumann, 1974))

Um erhöhte Druckverluste durch Flächenfiltrationseffekte zu vermeiden, ist ein möglichst geringer Feinstkornanteil des Filtermaterials anzustreben. Nach Möglichkeit sollte das Filtermaterial zudem ein enges Kornspektrum aufweisen. Zur Beurteilung hierfür kann der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  herangezogen werden. Dieser bildet den Quotienten aus der Siebweite bei 60- und 10-prozentigem Siebdurchgang des Filtermaterials. Für herkömmliche Filtermaterialien wird ein maximaler Ungleichförmigkeitsgrad von 1,5 empfohlen. (DWA-A 203, 2019)

Bei abwärts durchströmten Filtern können Druckmessungen im zeitlichen und räumlichen Verlauf der einzelnen Filterschichten in einem sogenannten Micheau-Diagramm veranschaulicht werden. Ein Beispiel einer solchen Darstellung für einen Einschichtfilter ist in Abbildung 4 zu sehen. Der vorhandene Wasserdruck wird ausgehend vom Wasserspiegel im  $45^\circ$  Winkel über die gesamte Filtertiefe als hydrostatische Drucklinie aufgetragen. Zu Beginn der Filtration lässt sich im zunächst noch unbelasteten Filter ein anfänglicher Widerstand des Filtermaterials erkennen. Mit der Zeit nimmt der Druck im Filterbett ab. Dieser Druckabfall kommt bei abwärts durchströmten Filtern dadurch zustande, dass sich eine Filterschicht zunehmend zusetzt, das Wasser jedoch unterhalb schwerkraftgetrieben abfließt. Auf diese Weise kann sich im Filterbett sogar ein Unterdruck aufbauen. Der Druckverlust steigt insbesondere in der Schicht an, in welcher der Filter zu diesem Zeitpunkt beladen wird. Der Ort der Feststoffablagerung im zeitlichen Verlauf lässt sich somit anhand der Krümmung der Kurven nachvollziehen. Aus Abbildung 4 lässt sich erkennen, dass die Ablagerung zunächst vornehmlich im oberen Bereich des Filters stattfindet und sich mit fortlaufender Filtrationszeit Feststoffe im tieferen Bereich ablagern. In Schichten, bei denen die Drucklinie parallel zum Anfangswiderstand bei  $t_0$  verläuft, findet keine oder eine nur geringfügige Ablagerung von Feststoffen statt. (Grombach et al., 2000)

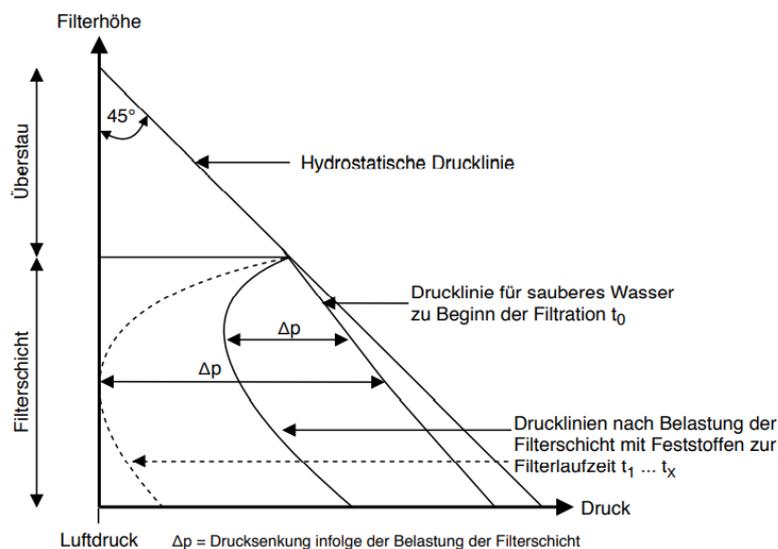


Abbildung 4: Aufbau eines Micheau-Diagramms für einen Einschichtfilter (Vgl. (Grombach et al., 2000))

Bei aufwärts durchströmten Filtern kommen die Feststoffe erst mit größeren Filterkörnern – die sich nach der Spülung unten absetzen – in Kontakt. Durch die Klassierung der Filterkörner kommt es zu größeren Porenquerschnitten im unteren Teil des Filters. Dies erlaubt es den

Feststoffen, weiter in das Filterbett einzudringen und ermöglicht so eine bessere raumfiltrierende Wirkung. Dennoch lagern sich die Feststoffe vermehrt in den tieferen Filterschichten ab. (Barjenbruch, 1997)

Die angelagerten Feststoffe führen zu einer Verminderung des Fließquerschnitts durch Porenverblockung (Altmann et al., 2016). Bei gleichbleibendem Durchfluss muss die kontinuierliche Verringerung des Fließquerschnitts durch eine Mehrleistung der Zulaufpumpe ausgeglichen werden. Laut Altmann et al. (2016) wird bei aufwärtsdurchströmten Filtern der maximale Druckanstieg limitiert: Bei zugesetztem Filterbett und nicht einsetzender Filterspülung könnte sonst eine zu hohe hydraulische Belastung auf den Filterboten wirken, die zu dessen Zerstörung führen könnte. Durch Partikelablagerungen erhöht sich die tatsächliche Fließgeschwindigkeit im Filterbett. Untersuchungen an aufwärts durchströmten GAK-Filtern von Altmann et al. (2016) zeigten, dass es bei ausreichend hoher Fließgeschwindigkeit zu einer Fluidisierung des Filterbettes kommt, sodass ein Teil der Feststoffe sich lösen und in den Ablauf gelangt. Hierdurch verringert sich die Fließgeschwindigkeit erneut und es kommt zum Absetzen des Filtermaterials.

## **2.2 Grundlagen der Aktivkohlefiltration**

### **2.2.1 Aktivkohle als Filtermaterial**

Aktivkohle ist ein kohlenstoffhaltiges Material, welches aufgrund seiner starken Porosität eine hohe spezifische innere Oberfläche von 500 – 1.500 m<sup>2</sup>/g aufweist (Çeçen und Aktaş, 2011). Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Aktivkohle eignet sich grundsätzlich jedes stark kohlenstoffhaltige Material, insbesondere werden Steinkohle und Braunkohle alternativ auch Kokosnussschalen, Holz oder Torf verwendet. Die Herstellung der Aktivkohle über eine thermische Aktivierung erfolgt durch eine Verkokung (Karbonisierungsprozess) des Ausgangsmaterials, wobei thermisch flüchtige Bestandteile entfernt werden. In einem zweiten Schritt wird durch einen selektiv gesteuerten Abbrand des Kohlenstoffs (Aktivierungsprozess) das Porensystem der Aktivkohle erzeugt. Nach DIN EN 12915-1 (2009) sollte der Massenanteil an Kohlenstoff bezogen auf die Trockensubstanz der Aktivkohle mindestens 75 % betragen. Als sonstige Nebenbestandteile werden Asche (bis zu 15 % Massenanteil), Wasser (bis zu 5 % Massenanteil) und bei Aktivierungstemperatur flüchtige Verunreinigungen genannt. (DIN EN 12915-1, 2009; DWA-Themenband, 2019; Bornemann et al., 2012)

Aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche eignet sich Aktivkohle sehr gut als Adsorptionsmittel, beispielsweise zur Mikroschadstoffentfernung im Bereich der Abwasserreinigung. Unter dem Begriff Adsorption wird der physikalische Prozess der Ablagerung von Stoffmolekülen (Adsorptiv) aus einer fluiden Phase an die Grenzfläche einer

festen Phase (Adsorbens) verstanden (DWA-Themenband, 2019). Zwischen den Adsorptiven in der fluiden Phase und den bereits an der Oberfläche angelagerten Stoffmolekülen stellt sich mit der Zeit ein sogenanntes Adsorptionsgleichgewicht ein. Die Adsorptionsleistung hängt insgesamt von der Konzentration des Stoffes, dessen chemisch-physikalischen Eigenschaften sowie der Charakteristik der eingesetzten Aktivkohle ab (Bornemann et al., 2012).

Je nach Korngröße kann zwischen Pulveraktivkohle (PAK) und granulierter Aktivkohle (GAK) unterschieden werden. PAK besitzt einen durchschnittlichen Korndurchmesser von weniger als 0,045 mm, bei GAK bewegt sich dieser üblicherweise von 0,5 bis 4,0 mm. Während PAK dem Abwasser zudosiert und in einem anschließenden Reinigungsschritt wieder abgetrennt wird, wird GAK als adsorptiv wirkendes Filtermaterial in einem Raumfilter eingesetzt. Für die weitergehende Abwasserreinigung haben sich bislang granuliert Aktivkohleprodukte mit unregelmäßiger Kornform etabliert. Die eingesetzte GAK sollte grundsätzlich eine gewisse mechanische Belastbarkeit besitzen, damit durch die Filterspülungen keine starke Abrasion stattfindet. (DWA-Themenband, 2019; DIN EN 12915-1, 2009)

### **2.2.2 Bauweisen und Dimensionierung von GAK-Filtern**

GAK-Filter werden bereits seit 1930 erfolgreich im Bereich der Trinkwasseraufbereitung eingesetzt (Çeçen und Aktas, 2011). Das primäre Aufbereitungsziel lag hier zunächst bei der Entfernung von Geruchs-, Geschmacks- und Farbstoffen. Heutzutage hat die Elimination organischer Mikroschadstoffe auch im Trinkwasserbereich zunehmend an Bedeutung gewonnen (DVGW W 239, 2011). Die ersten großtechnischen GAK-Filter im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung sind in Deutschland hingegen erst seit 2012 in Betrieb (Benstöm, 2017; Nahrstedt et al., 2014). Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Trink- und Abwasser können die Bemessungsansätze der Filter jedoch nicht vollständig übertragen werden.

In der kommunalen Abwasserreinigung erfolgt die Einbindung der GAK-Filter üblicherweise als diskontinuierlich betriebene Filter entweder direkt hinter der biologischen Stufe (Ablauf der Nachklärung (NK), Abbildung 5) oder alternativ im Ablauf einer weiteren Flockungsfiltrationsstufe (weiter als „FloFi“ bezeichnet) (Abbildung 6; KOM-M.NRW, 2015). Bei erstgenannter Verfahrensführung werden auch Feststoffe im maßgeblichen Umfang im Filter zurückgehalten. Eine zusätzliche dem GAK-Filter vorgeschaltete Filtrationsstufe gewährleistet einen weitgehenden Feststoffrückhalt, sodass der GAK-Filter mit einer deutlich geringeren Feststoffkonzentration beschickt wird. Der Einfluss von Feststoffen auf den Betrieb und die Adsorptionsleistung wird detailliert in Kapitel 2.2.3 behandelt.

Des Weiteren wird in einigen Forschungsprojekten auch der Einsatz von diskontinuierlich betriebenen GAK-Filtern als zusätzliche Stufe hinter einer vorhandenen Ozonung getestet, um potentielle Transformationsprodukte zurückzuhalten (z.B. ARA Bülach-Furt (CH) (Böhler et al., 2013) KA Köln Rodenkirchen, KA Paderborn). GAK-Filter können aber auch als kontinuierlich betriebene Filter in den Reinigungsprozess von Kläranlagen integriert werden (z.B. KA Rietberg (Rödel et al., 2019), KA Weißenburg (mit vorgeschalteter Ozonung) (Knollmann und Hübner, 2013)). In Luxemburg werden aktuell eine Vielzahl von Kläranlagen modernisiert, die eine vierte Reinigungsstufe als GAK Filter in Beton- oder Kesselausführung erhalten (Alt et al.; 2021 (Artikel derzeit in Vorbereitung)). Zudem kann granuliert Aktivkohle auch im Schwebebett eingesetzt werden (kein Filtrationseffekt). Diese Verfahrensvariante ist des Öfteren in der Schweiz zu finden (z.B. KA Luzern, KA LeLocle, KA Muri, KA Niederglatt).

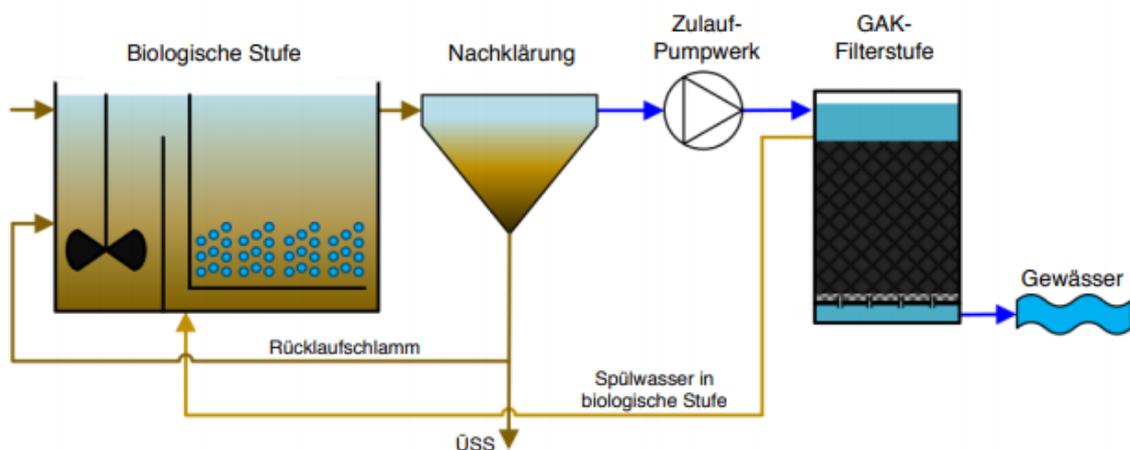


Abbildung 5: Fließschema zur Einbindung eines GAK-Filters in den Klärprozess im Ablauf einer NK (Vgl. (Rödel et al., 2019))

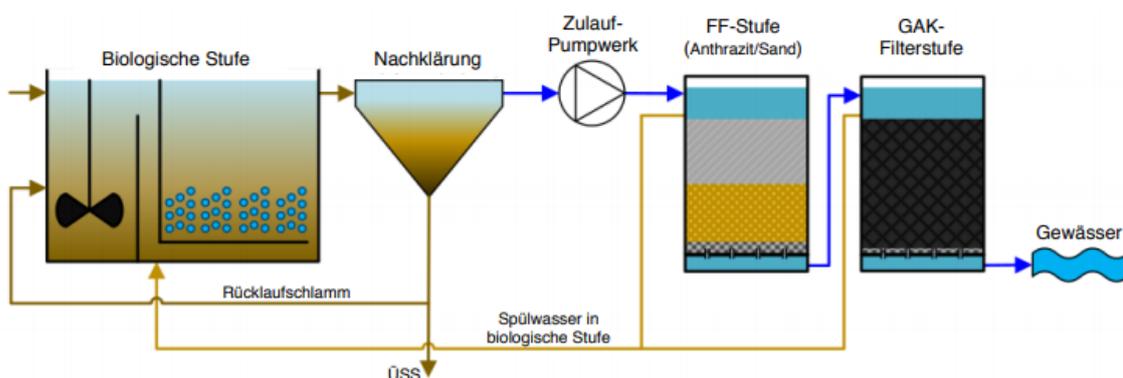


Abbildung 6: Fließschema zur Einbindung eines GAK-Filters in den Klärprozess im Ablauf einer Flockungsfiltration (FF) (Vgl. (Rödel et al., 2019))

Die Dimensionierung von GAK-Filtern richtet sich üblicherweise nach einem definierten Reinigungsziel hinsichtlich der Entfernung von Mikroschadstoffen. Für die Bemessung sind Kontaktzeit (bzw. Filtergeschwindigkeit) sowie die Filtergeometrie von Relevanz. Hierbei ist zu beachten, ob es sich um ein bestehendes Bauwerk einer Abwasserfiltration oder um ein neu zu errichtendes GAK-Filterbauwerk handelt. Bei bestehenden Bauwerken und somit vorgegebenen Filterfläche und Schütthöhe, wird der Zufluss so angepasst, dass eine bestimmte Kontaktzeit (Empty Bed Contact time (EBCT) = 10 – 30 min, meistens 20 min) nicht unterschritten wird. Häufig wird die Schütthöhe den hydraulischen Randbedingungen angepasst und variiert, bis die unter den vorhandenen baulichen Zwangspunkten eine optimale Kontaktzeit sichergestellt ist. Bei neu geplanten Bauwerken wird die Filtergeometrie anhand den anlagenspezifischen Abflussdaten ausgelegt. (DWA-M 285-2, 2021; Schweizer Konsenspapier, 2020)

Neben der Mikroschadstoffentfernung halten GAK-Filter unter anderem auch partikuläre Feststoffe zurück, die die hydraulische Leistungsfähigkeit im Laufe eines Spülintervalls verringern. Zur Wiederherstellung der hydraulischen Leistungsfähigkeit und damit zum Austrag der zurückgehaltenen Feststoffe aus dem Filterbett, muss der Filter, analog zu konventionellen Abwasserfiltern, in regelmäßigen Abständen gespült werden (s. auch Kapitel 2.1.1). Nachstehend werden die derzeit empfohlenen Dimensionierungsempfehlungen für GAK-Filter tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 3: Dimensionierungsempfehlungen für GAK-Filter nach Fundneider (2020), KOM.M-NRW (2015), Schweizer Konsenspapier (2020) und DWA-Themenband (2019)

Parameter	Einheit	Dimensionierungsempfehlung
Filtergeschwindigkeit	[m/h]	6 – 10
Filterbetthöhe	[m]	1 – 3
Filterfläche	[m <sup>2</sup> ]	5 – 40
Leerbettkontaktzeit (EBCT)	[min]	10 – 60
Wasserspülgeschwindigkeit	[m/h]	15 – 40
Luftspülgeschwindigkeit	[m/h]	35 – 70

### 2.2.3 Spülung von diskontinuierlich betriebenen GAK-Filtern

Zur Erhaltung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von diskontinuierlich betriebenen GAK-Filtern müssen diese in gewissen Abständen gespült werden. Aufgrund der im Vergleich zu konventionellem Filtermaterial (z.B. Sand, Hydroanthrazit) hohen Porosität ist GAK während

der Rückspülung empfindlich gegenüber Abrasion. Zur Begrenzung der Abrasion stellt insbesondere die Geschwindigkeit der Luftspülung einen entscheidenden Faktor dar. Gleichzeitig ist die Luftspülung zum Aufbruch von Verblockungen im Filter in der Regel unverzichtbar. (Benstöm et al., 2014)

Eine beispielhafte Anpassung eines Spülprogramms des GAK-Filters auf der KA Wuppertal – Buchenhofen (Bornemann et al., 2015) wird in Abbildung 7 dargestellt. Auf die einzelnen Spülintervalle der im Rahmen des Projektes untersuchten GAK-Filter wird in Kapitel 3.1 eingegangen.

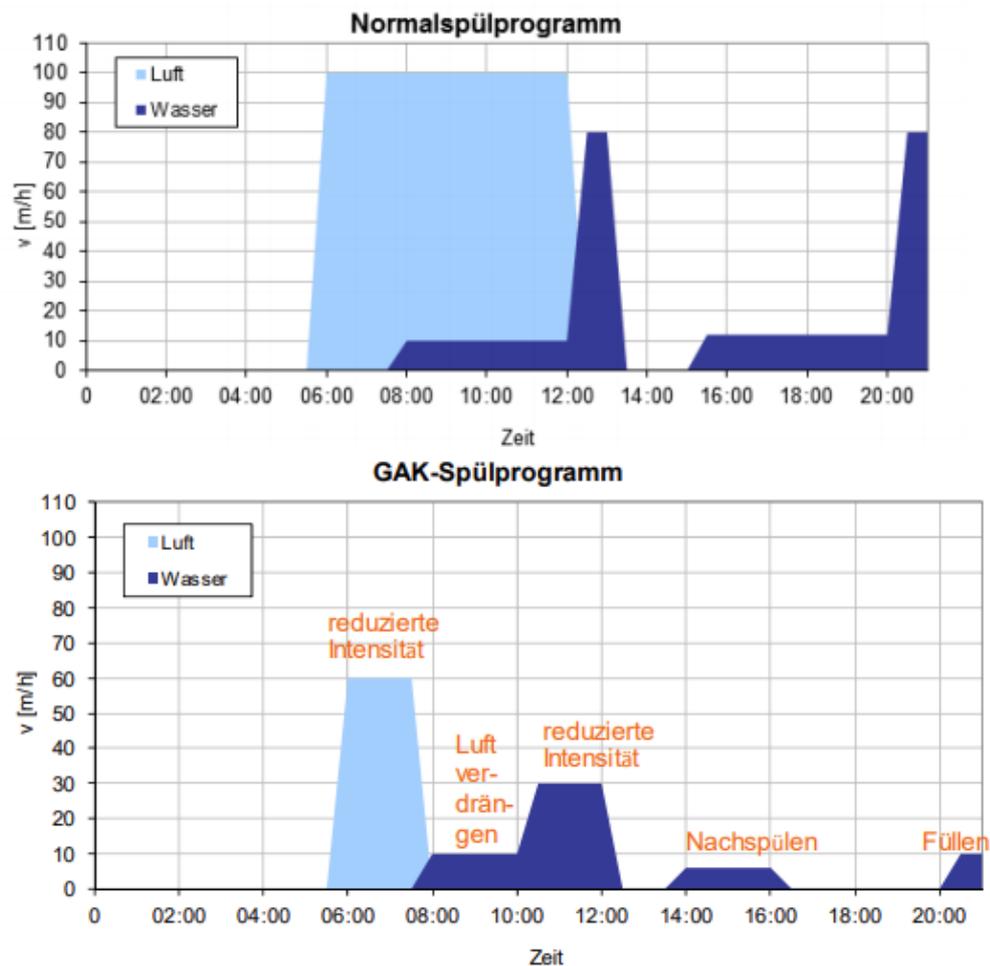


Abbildung 7: Angepasstes Spülprogramm (unten) für den GAK-Filter auf der KA Wuppertal-Buchenhofen im Vergleich zum Normalspülprogramm (oben) (Bornemann et al., 2015)

Während der Wasserspülung sollte stets eine Bettexpansion erfolgen. Die Filterbettausdehnung ist dabei abhängig von der Temperatur, der Spülwassergeschwindigkeit, der Viskosität des Wassers sowie der gewählten granulierten Aktivkohle. Herstellende Firmen von GAK-Produkten bieten in der Regel Kennlinien zur Bestimmung der prozentualen Expansion des Filterbettes in Abhängigkeit der Spülwassergeschwindigkeit und der

Wassertemperatur an. Typischerweise sollte eine Filterbettausdehnung von etwa 20 % den Austrag von 95 % der abgelagerten Feststoffe gewährleisten. Die Spülwassergeschwindigkeit sollte an saisonale Temperaturbedingungen angepasst werden. (Dabrowski et al., 2008; DWA-Themenband, 2019)

Es ist auf eine Gleichverteilung der Spülmedien über den gesamten Filterquerschnitt zu achten. Böhler et al. (2017) stellten einen Befall des GAK-Filters mit Tubifex-Würmern fest, welcher sich möglicherweise aufgrund einer ineffizienten Verteilung der Spülmedien und einer daraus resultierenden örtlichen Akkumulation von Feststoffen gebildet hatte. Aus diesem Grund ist eine Kontrolle des Spülbildes bei Filtern in offener Bauweise zu empfehlen. Hierzu gehört insbesondere die Prüfung eines gleichmäßigen Blasenbildes bei der Luftspülung (Bornemann et al., 2015).

Neben der Anpassung des Spülprogramms (z.B. Spülgeschwindigkeiten) ist auch die Dauer eines Spülintervalls von GAK-Filtern aus Sicht der Betriebswirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit von Interesse. Unnötig häufige Rückspülungen sollten zur Begrenzung von Abrasion grundsätzlich vermieden werden (KOM M-NRW, 2015). Gleichzeitig ist das Spülintervall so zu wählen, dass die hydraulische Funktionsfähigkeit des GAK-Filters zu jeder Zeit im Regelbetrieb (ausgenommen Niederschlagsereignisse bei Teilstrombehandlung) gewährleistet wird. Mögliche Kriterien können der Tabelle 2 aus Kapitel 2.1.1 entnommen werden. Fällt die Wahl auf ein Druck- oder Konzentrationskriterium, müssen entsprechende Messvorrichtungen am Filter installiert werden. Bei abwärts durchströmten Filtern in offener Bauweise kann alternativ auch die Messung des ansteigenden Wasserspiegels im Filterüberstau bei zunehmender Filterverblockung als Spülkriterium dienen. In diesem Fall muss eine entsprechende Höhenstandsmessung angebracht und ein anlagenspezifischer maximaler Wasserstand definiert werden. (DVGW W 239, 2011; DWA-Themenband, 2019)

Die mögliche Länge eines Spülintervalls richtet sich unter anderem neben der Größe der verwendeten GAK-Körnung nach der Beaufschlagung des Filters mit Feststoffen sowie der Ausbildung von Biofilmen am Filterkorn (DWA-Themenband, 2019), weshalb diese anlagenspezifisch unterschiedlich ausfallen kann. In Tabelle 4 ist eine Zusammenstellung von in bisherigen Projekten verwendeten Spülkriterien zur Auslösung der Spülung sowie die zugehörige Spülintervalllänge von GAK-Filtern dargestellt. Berücksichtigt werden nur großtechnische Untersuchungen. Halbtechnische Anlagen werden aufgrund der begrenzten Übertragbarkeit hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Zusammenstellung großtechnischer GAK-Filter und der spezifischen Spülkriterien

Kläranlage	Durchströmungsrichtung	Zulauf	Spülkriterium	Spülung
Bad Oeynhaus	↓	Ablauf FloFi	Verschlämmung / Filterüberstand	ca. 1x in 3 Wochen
Gütersloh-Putzhagen	↑	Ablauf FloFi	zeitgesteuert	alle 10 Tage
Obere Lutter	↑	Ablauf Festbettde-nitrifikation	gesteuert nach CSB im Ablauf	ca. 2x pro Woche
Köln Rodenkirchen	↑	Ablauf Trommelsieb	zeitgesteuert	2x pro Woche
Mannheim (Drei Filter F14, F15 und F16)	↓	F14: Ablauf PAK-Stufe F15: Ablauf NK (NK) + PAK-Stufe F16: Ablauf NK	Kombination aus Druck und Zeit	F14 /15 /16: spätestens alle 48 h
Wuppertal-Buchenhofen (Zwei Filter F1 und F2)	↓	F1: Ablauf FloFi F2: Ablauf NK	Kombination aus Druck, Klappenstellung und Zeit	F1: Spätestens 1x pro Woche F2: Spätestens 1x pro Tag
Furt, Bülach (CH)	↓	Ablauf NK	Kombination aus Druck und Zeit	Spätestens alle 48 h
Düren – Merken (Drei Filter F1, F2 und F3)	↓	F1 / F2 / F3: Ablauf NK	F1: Kombination aus durchflusskorrigiertem Druck und Zeit F2: durchflusskorrigierter Druck F3: durchflusskorrigierter Druck	F1: alle 21h F2: alle 6h F3: alle 8h

Anhand Tabelle 4 lässt sich erkennen, dass bei dem Betrieb großtechnischer GAK-Filter häufig eine Kombination aus Druck- und Zeitkriterium zur Auslösung der Spülung verwendet wurde. In diesem Fall gibt es neben einer zeitlichen Begrenzung mindestens ein weiteres Kriterium, welches eine Rückspülung auslösen kann. Bornemann et al. (2015) definieren für die KA Wuppertal – Buchenhofen als Spülkriterien sowohl eine maximale Filterlaufzeit als auch einen maximalen Differenzdruck. Unabhängig der Filtrationszeit soll eine Spülung der GAK bei 80-%iger Öffnung der Klappe in der Filtratleitung über einen Zeitraum von mind. 120 s bzw. einem Druckabfall von 50 mbar innerhalb von 60 s ausgelöst werden. Greift keines der beiden Spülkriterien, wird der Filter mit Beschickung mit Ablauf aus der NK spätestens alle 24 h bzw. der Filter mit Beschickung mit Ablauf aus dem FloFi alle 7 d ausgelöst (Bornemann et al., 2015). Auf der KA Mannheim wird ebenfalls die Kombination eines Druck- und Zeitkriteriums zur Filterspülung angewendet. Hier werden die Filter jedoch spätestens all 48 h gespült (ohne

Vorfiltration. Einige Filter werden nur nach Zeit gespült. Auf der KA Gütersloh Putzhagen wird der aufwärts durchströmte Filter (mit Vorfiltration) alle 10 Tage gespült. Auf der KA Köln Rodenkirchen (ebenfalls aufwärts durchströmte, jedoch ohne Vorfiltration) wird der Filter 2x pro Woche gespült. Ob die Spülintervall in beiden Fällen optimal eingestellt ist, konnte bisher nicht untersucht werden, da das hydraulische Maximum (z.B. Feststoffdurchbruch oder Maximaldruck) bisher nicht definiert war (s. dazu Untersuchungsergebnisse Kapitel 4.2 und 4.4). Insgesamt streut die Länge eines Spülintervalls in den erfassten Studien in einem breiten Spektrum von minimal 6 h bis zu maximal 21 Tagen. Da einige Filter jedoch nach einem Zeitkriterium gespült wurden, bedeutet dies nicht, dass aus hydraulischer Sicht keine längeren Laufzeiten möglich gewesen wären. Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die mögliche Länge eines Spülintervalls werden im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

## 2.2.4 Mögliche Einflussfaktoren auf die Spülintervalllänge

### Konzentration der Abfiltrierbaren Stoffe (AFS) im Filterzulauf

Entscheidend für die mögliche Länge eines Spülintervalls ist unter anderem die Beaufschlagung des Filters mit Feststoffen. Diese kann je nach Vorbehandlung des Abwassers deutlich variieren. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, werden in der Abwasserbehandlung GAK-Filter üblicherweise entweder direkt hinter der NK oder im Ablauf eines vorgeschalteten Filters angeordnet. Des Weiteren betrachten einige Forschungsprojekte die GAK-Filtration als zusätzliche Stufe hinter einer vorhandenen Ozonung. Der Feststoffgehalt aus der NK wird in der Ozonung allerdings nur geringfügig beeinflusst (Böhler et al., 2017). Eine zusätzliche Zugabe von Flockungsmitteln in den Zulauf des GAK-Filters erhöht hingegen die Feststoffkonzentration (Altmann et al., 2016; Telgmann et al., 2020). Nicht in allen Studien zu GAK-Filtern wird die Feststoffkonzentration im Zulauf des Filters quantitativ erfasst.

Auf der Abwasserreinigungsanlage (ARA) Bülach-Furt wurden Versuche mit unterschiedlichen AFS-Konzentrationen durch eine Belebtschlamm dosierung im Zulauf von zwei GAK-Filtern (GAK 5 und GAK 6) von Böhler et al. (2020) durchgeführt. Dabei wurden beide GAK-Filter mit unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten betrieben (s. Tabelle 5). Beide Filter wurden in der ersten Versuchswoche mit ca. 18 mg<sub>AFS</sub>/l, in der zweiten Versuchswoche mit ca. 25 mg<sub>AFS</sub>/l beschickt. Der Feststoffrückhalt war mit 95 % in der zweiten Versuchswoche (höheren AFS-Zulauffracht) höher als in der ersten Versuchswoche mit ca. 91 %. Böhler et al. (2020) erklären sich den verbesserten Feststoffrückhalt mit der Ausbildung eines Filterkuchens durch die Schlammflocken an der Filteroberfläche, der zu einem verstärkten Partikelrückhalt durch

Oberflächenfiltration führte. Das Spülintervall von GAK 5 lag in beiden Versuchswochen bei ca. 0,6 Spülungen am Tag und wurde nicht merklich von der erhöhten Feststoffzulaufmenge beeinflusst. Bei GAK 6 mussten häufiger Spülungen durchgeführt werden: Insbesondere durch die erhöhte Feststoffmenge in der zweiten Versuchswoche mussten 3,4 anstatt 2,8 Rückspülungen am Tag ausgelöst werden. Neben der höheren Beaufschlagung mit Feststoffen, wurde in der zweiten Woche zudem die Filtergeschwindigkeit reduziert (Vgl. Tabelle 5) was zu einer Verkürzung der Spülintervalllänge führte. Bei geringeren Geschwindigkeiten werden Feststoffe eher an der Filteroberfläche zurückgehalten, wodurch es zur schnelleren Verblockung des Filters kommt (siehe auch Kapitel 2.1.2). Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass GAK-Filter in der Lage sind, zumindest kurzzeitig hohe Feststoffmengen zurückzuhalten.

Tabelle 5: Anzahl der täglichen Rückspülen, Filtergeschwindigkeiten und Leerbettkontaktzeiten bei erhöhter Feststoffmenge (Böhler et al., 2020)

Versuchswoche	Filter	Anzahl Rückspülungen [1/d]	Filtergeschwindigkeit [m/h]	EBCT [min]
1	Sandfilter 4	2	6,4	12,7
	GAK Filter 5	0,6	3,8	22,7
	GAK Filter 6	2,8	6,4	13,7
2	Sandfilter 4	2	5,5	14,7
	GAK Filter 5	0,6	3,3	26,1
	GAK Filter 6	3,4	5,5	15,7

Ein Vergleich des Einflusses einer Vorfiltration und damit geringere Feststoffbeaufschlagung auf die Filterstandzeit von GAK-Filtern zeigen die Beispiele der KA Gütersloh-Putzhagen (aufwärts durchströmter GAK-Filter) und KA Wuppertal-Buchenhofen (abwärts durchströmter GAK-Filter). In beiden Fällen wurde bei der Beschickung der GAK-Filtration mit dem Ablauf der NK ein Zeitkriterium für die Rückspülung auf 1 Spülung pro Tag gesetzt. Während Nahrstedt et al. (2016) in Gütersloh von zum Teil sehr hohen AFS-Konzentrationen im Ablauf der NK berichten, weswegen der Filterbetrieb sogar kurzzeitig zum präventiven Schutz der Filterdüsen unterbrochen werden musste, messen Bornemann et al. (2015) geringe AFS-Konzentrationen im Ablauf der NK (i.d.R. ca. 1 mg<sub>AFS</sub>/l), sodass die Filterspülung in ca. 80 % der Fälle ohne Erreichen eines hydraulischen Maximums (Maximaler Druckverlust) ausgelöst wurde. Aus Gründen der Betriebssicherheit wurde im Rahmen von weiteren Untersuchungen auf der KA Gütersloh Putzhagen der Zulauf der GAK über die vorhandene FloFi vorfiltriert. Das Filtrationsintervall der GAK-Stufe verlängerte sich dadurch auf 10 Tage, wobei es bei Rückspülung keine Anzeichen einer Verblockung gab (s. Kapitel 4.2). Bei dem GAK-Filter auf

der KA Wuppertal-Buchenhofen, konnte die Länge des Spülintervalls durch eine Vorfiltration des Zulaufs auf 7 d verlängert werden.

Insgesamt lässt sich aus bisherigen Forschungsvorhaben erkennen, dass Filter mit einer geringen Beaufschlagung von Feststoffen häufig nach Zeit gespült werden, ohne dass ein hydraulisches Maximum erreicht wird, sodass hier noch großes Potential zur Optimierung besteht. Bei Beaufschlagung mit hohen Feststofffrachten benötigen Filter häufig Rückspülungen mit Spülintervallen unter 24 h. Bei besonders hohen AFS-Konzentrationen kann sich die Dauer des Spülintervalls aufgrund des schnell ansteigenden Druckverlusts zum Teil auf wenige Stunden verkürzen (Benstöm et al., 2014). Grundsätzlich wird eine Feststoffkonzentration, die im Mittel unter  $20 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$  liegt, für den Zulauf von GAK-Filtern empfohlen (DWA-Themenband, 2019). Dies setzt eine gut funktionierende NK oder einen vorgeschalteten Filter voraus.

### GAK-Körnung

Benstöm et al. (2014) setzten insgesamt drei verschiedene granulierten Aktivkohlen mit unterschiedlicher Körnung auf der KA Düren-Merken ein. Im Gegensatz zur zweiten und dritten GAK wurde die erste GAK in Kombination mit einer zusätzlichen Sandschicht verwendet. Zur Berechnung des Filterbettvolumens als Bezugsgröße für die Feststoffraumbelastung wurde dennoch nur die Höhe der GAK-Schicht berücksichtigt. Die Berechnung einer Feststoffraumbelastung für jede eingesetzte GAK erfolgte auf Basis der Mediane der AFS-Konzentration der Zu- und Ablaufproben, des mittleren Durchsatzes sowie des Medians der Länge der Spülintervalle im jeweiligen Betriebszeitraum der entsprechenden GAK. Für die erste GAK mit einer Körnung von 1,4 – 2,5 mm haben Benstöm et al. (2014) eine mittlere Feststoffraumbelastung von  $1,8 \text{ kg}/\text{m}^3$  berechnet. Die mittleren Feststoffraumbelastungen der zweiten und dritten GAK mit feinerer Körnung (0,5 – 2,5 mm bzw. 1,0 – 2,4 mm) lagen mit  $0,5 \text{ kg}/\text{m}^3$  bzw.  $0,6 \text{ kg}/\text{m}^3$  nah beieinander und trotz eines erhöhten Druckkriteriums zur Auslösung der Spülung (s. Tabelle 4) und damit verlängerten Spülintervalls, deutlich unterhalb der Feststoffraumbelastung der gröberen GAK. Es wird vermutet, dass die Feststoffpartikel aus der NK zu einem verstärkten Flächenfiltrationsprozess aufgrund von Filterkuchenbildung bei den feinkörnigen Aktivkohlen geführt haben. Von diesem Effekt lassen sich die geringen Feststoffraumbelastungen der feineren Aktivkohlen sowie deren kürzere Spülintervalle von 6 h bzw. 7,8 h (Mittel) bis zur Erreichung des Druckkriteriums ableiten. Der Filter mit der gröberen Körnung zeigte eine mittlere Laufzeit von 21 h. Aus hydraulischer Sicht waren die zweite und dritte GAK auf der Kläranlage Düren-Merken nicht betriebsfähig. (Benstöm et al., 2014)

Telgmann et al. (2020) untersuchten ebenfalls den Einsatz von drei unterschiedlichen GAK-Körnungen mithilfe einer Pilotanlage. Eine verhältnismäßig grobe GAK mit einer Körnung von 2,4 – 4,7 mm wurde in Kombination mit einer zusätzlichen Sandschicht betrieben. Zwei weitere GAK wurden in Form eines Einschichtfilters genutzt. Im Filterbett der groben GAK mit Sandschicht konnte ein Feststoffrückhalt von durchschnittlich  $2,34 \text{ kg/m}^3$  je Spülintervall erreicht werden. Bei den Einschichtfiltern lag der Feststoffrückhalt bei der GAK mit einer Körnung von 0,6 – 2,4 mm bei lediglich  $0,27 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $0,38 \text{ kg/m}^3$  für den Filter mit der Körnung von 1,4 – 2,4 mm. Insgesamt konnten Telgmann et al. (2020) ebenfalls feststellen, dass die Wahl einer gröberen Körnung zu einer höheren Feststoffraumbelastung bis zum Erreichen des Spülkriteriums führt. Dies resultierte in signifikant längeren Spülintervallen beim Betrieb des Zweischichtfilters mit der gröberen GAK, welcher bis zu 5 Tagen ohne Spülung betrieben werden konnte (Vgl. 4 – 24 h bei der feineren Körnung). Somit besitzt die Wahl der Körnung der Aktivkohle neben der Beaufschlagung des GAK-Filters mit Feststoffen einen zentralen Einfluss auf die erreichbare Länge eines Spülintervalls. (Telgmann et al., 2020)

In beiden Studien wurde letztendlich die Verwendung der jeweils gröberen GAK für einen effizienten Filterbetrieb aus hydraulischer Sicht empfohlen. Diese Aussage lässt sich jedoch nicht für alle Anlagen verallgemeinern, da auch feinere GAK-Produkte mit vertretbaren Spülintervallen zum Einsatz kommen können, wenn eine entsprechend niedrige Beaufschlagung des Filters mit Feststoffen gewährleistet wird (siehe beispielsweise (Böhler et al., 2017; Bornemann et al., 2015)). Eine feinere GAK-Körnung bewirkt tendenziell eine schnellere Verblockung des Filters durch zurückgehaltene Feststoffe, besitzt aber zugleich eine größere spezifische äußere Oberfläche und damit grundsätzlich auch eine bessere Adsorptionskinetik (Sontheimer et al., 1985). Die Wahl der Korngröße ist daher immer im Hinblick auf die zu geforderte Adsorptionsleistung (Reinigungsziel) sowie der Betriebstauglichkeit häufigerer Spülungen abzuwägen (Bornemann et al., 2012).

#### Korngrößenverteilung im Filterbett

Bei der Spülung eines GAK-Filters findet eine Fluidisierung und Durchmischung des Filtermaterials statt. Im Anschluss daran erfolgt eine Klassierung der granulierten Aktivkohle. Die einzelnen Körner der GAK ordnen sich dabei entsprechend ihrer hydrodynamischen Eigenschaften im Filterbett an, wobei die Korngröße einen maßgeblichen Faktor darstellt. Unter der Annahme gleicher Dichte aller Körner ist grundsätzlich zu erwarten, dass sich feinere Körner vermehrt in der oberen Schicht und gröbere Körner vermehrt in der unteren Schicht des Filterbettes anordnen. (DWA-Themenband, 2019)

Bei aufwärts durchströmten Filtern entspricht die Klassierung von grob nach fein grundsätzlich der Filtrationsrichtung und es wird somit eine Tiefenfiltration begünstigt. Im Gegensatz dazu kann der vermehrte Anteil der feinkörnigen Fraktion in der oberen Filterschicht bei abwärts durchströmten Filtern einen möglichen Flächenfiltrationseffekt hervorrufen und somit zu einem erheblichen Druckverlust in der obersten Filterschicht führen. (Jekel und Ruhl, 2016)

Siebanalysen von Kornproben aus sechs verschiedenen Filtertiefen wurden ebenfalls auf der Kläranlage Münchehofe für die vorhandenen Auf- und Abstromfilter analysiert. Es konnte ebenfalls eine Klassierung des Filtermaterials mit einem erhöhten Anteil der feineren Fraktionen in den oberen Schichten und einem steigenden Anteil der gröberen Fraktionen mit zunehmender Filtertiefe beobachtet werden. Ein Vergleich des Ausgangsmaterials mit den Gesamtanteilen aus allen Filtertiefen am Ende des Betriebszeitraums (Gesamtuntersuchungszeitraum von 250 d) lässt darauf schließen, dass auch hier keine maßgebliche Abrasion des Filtermaterials stattgefunden hat. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die sehr feinen GAK-Partikel kleiner 0,63 mm zum größten Teil ausgespült wurden. (Jekel und Ruhl, 2016)

#### Biomassewachstums im und auf dem Filterbett

Neben der Belastung mit Feststoffen kann granuliert Aktivkohle während des Betriebes von Mikroorganismen besiedelt werden. Die Ausbildung eines Biofilms kann sowohl positive als auch negative Effekte zur Folge haben. Einerseits kann der Biofilm einen Beitrag zur Elimination biologisch abbaubarer Mikroschadstoffe leisten, andererseits kann er zu einer zusätzlichen Verblockung des Filterbettes und zur Notwendigkeit häufigerer Rückspülungen führen. Des Weiteren besteht die Gefahr der Ausbildung anaerober Zonen im Filterbett sowie eine Verschlechterung der Filtratqualität durch eine unerwünschte Freisetzung von Mikroorganismen. Somit sind Biofilme einerseits erwünscht, andererseits sollte insbesondere ein unkontrolliertes und exzessives mikrobielles Wachstum verhindert werden, um verkürzte Spülintervalle aufgrund des erhöhten Druckverlustes zu vermeiden. (Fundneider, 2020; DWA-Themenband, 2019; Gibert et al., 2013; Graese et al., 1987)

Das Biomassewachstum wird von diversen Faktoren beeinflusst. Hierzu gehören die Wasserqualität, insbesondere die Konzentration wachstumsfördernder Substanzen (z.B. Ammonium), die Art der granulierten Aktivkohle, hydraulische Bedingungen, die Wassertemperatur sowie die Intensität und Häufigkeit von Rückspülungen (Gibert et al., 2013).

Fundneider (2020) verglich die nötige Spülhäufigkeit bei Filtern mit vorgeschalteter Tuchfiltration und bei Filtern mit membranbasierter Feststoffabtrennung. Bei der Tuchfiltration musste ca. 1,2-mal pro Woche gespült werden, bei einer Mikro- und Ultrafiltration ca. 1-mal

alle zehn Wochen. Beide Verfahren bieten einen quasi-feststofffreien Zulauf, unterscheiden sich jedoch maßgeblich in der nötigen Rückspülhäufigkeit. Ein möglicher Grund hierfür ist der Rückhalt von Bakterien durch die Membran im Gegensatz zur Tuchfiltration, der die Bildung eines verblockenden Biofilms verringert. (Fundneider et al., 2020)

### **2.2.5 Druckverlauf in GAK-Filtern**

Oben genannte Ursachen können im Laufe eines Filtrationszyklus zu einem Anstieg der Druckdifferenz im Filterbett führen. Vor allem der Feststoffeintrag kann je nach Abwasserbeschaffenheit und -menge zu einer schnellen Änderung der Druckverhältnisse im Filterbett führen, sodass eine Verkürzung der Filterlaufzeit resultiert. Eine gezielte Messung des Druckverlaufs in unterschiedlichen Filterbetthöhen, ermöglicht neben der Steuerung einer Spülung eine Aussage darüber, in welcher Höhe der Filterschicht der überwiegende Partikelrückhalt stattfindet.

Eine entsprechende Betrachtung wurde von Jekel und Ruhl (2016) auf der Kläranlage Berlin-Münchehofe durchgeführt. Hierbei wurde der Unterschied zwischen dem Druckverlauf in einem aufwärts- und einem abwärts durchströmten Filter betrachtet (

Abbildung 8). Beim aufwärts durchströmten Filter konnte der größte Druckverlust in der untersten Filterschicht beobachtet werden. Insgesamt zeigte sich jedoch eine bessere Tiefenwirkung als beim abwärts durchströmten Filter. Bei diesem wurde ein erheblicher Druckverlust in der obersten Filterschicht festgestellt, der letztlich sogar zu einer Verblockung des gesamten Filters führte. Dieser hohe Druckverlust wird mit dem Feststoffrückhalt an der obersten (feinsten) Filterschicht erklärt. Die ansteigende Druckdifferenz bei aufwärts durchströmten GAK-Filtern wird zudem durch eine Verdrängerpumpe ausgeglichen, sodass ein Anstieg des Druckverlustes durch einen höheren Pumpendruck kompensiert werden kann. Dadurch kommt es selbst bei hohen Druckverlusten generell zu keiner Verblockung von aufwärts durchströmten Filtern. (Jekel und Ruhl, 2016).

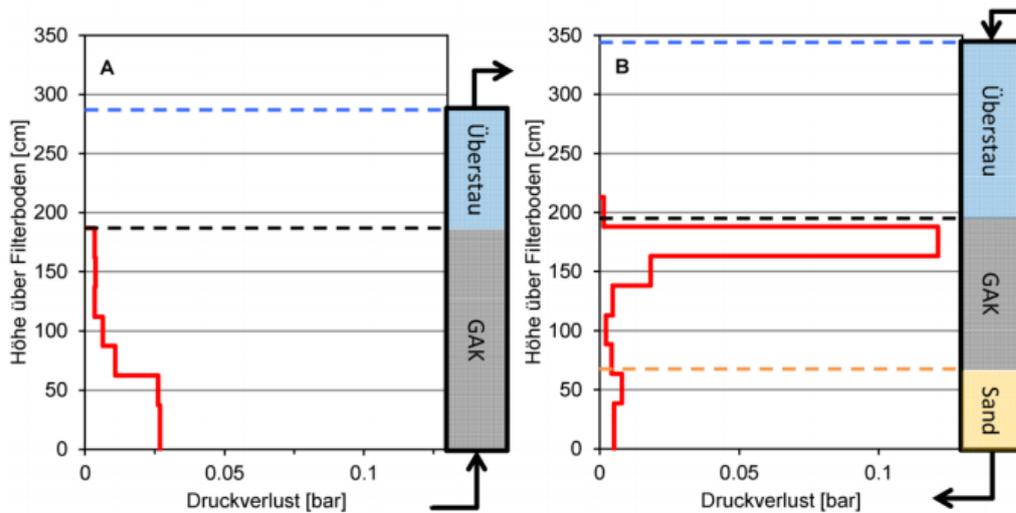


Abbildung 8: Verlauf des Druckverlustes im Filterbett eines aufwärts (A) und abwärts (B) durchströmten GAK-Filters (Pilotanlage) auf der Kläranlage Münchehofe (Jekel und Ruhl, 2016)

Telgmann et al. (2020) integrierten Drucksonden in vier verschiedenen Höhen im Filterbett und stellten die Ergebnisse für die GAK mit Körnung 1,4 – 2,4 mm (8 x 14 mesh) und 2,4 – 4,7 mm (4 x 8 mesh) für jeweils ein Spülintervall als Micheau-Diagramm dar (Abbildung 9). Es wird ersichtlich, dass bei der feineren GAK der Druckverlust ausschließlich in den oberen 30 cm des Filterbettes erfolgt (höchster Druckverlust), was auf eine Filtration nur in der obersten Filterschicht schließen lässt. Die gröbere GAK-Körnung inklusive der zusätzlichen Sandschicht zeigt hingegen eine deutliche bessere Tiefenwirkung. (Telgmann et al., 2020)

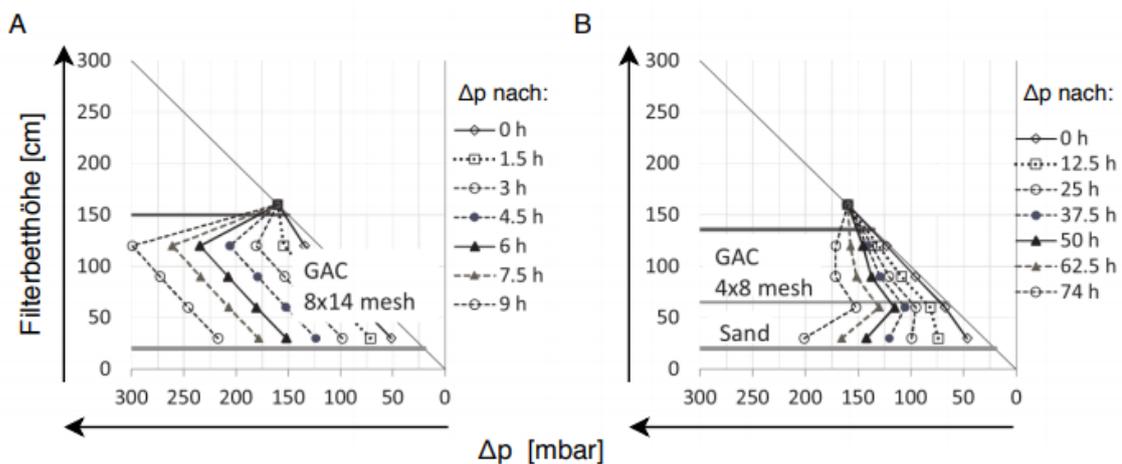


Abbildung 9: Druckverlust ( $\Delta p$ ) im Filterbett über das Filtrationsintervall (Micheau-Diagramm) für einen Filter (Pilotanlage) mit GAK der Körnung 1,4 – 2,4 mm (A) und GAK der Körnung 2,4 – 4,7 mm + Sand (B) (Vgl. (Telgmann et al., 2020))

Neben der Strömungsrichtung beeinflusst somit die Charakteristik der GAK die Druckverlustentwicklung. Prieto et al. (2013) testeten fünf verschiedene GAK-Produkte zum Einsatz in einer Trinkwasseranlage und stellten fest, dass der entscheidende Faktor in Bezug auf die Filtrationseffektivität in der Partikelgröße der GAK lag. Eine Aktivkohle mit feiner Körnung konnte zwar eine bessere Reduzierung der Trübung erreichen, entwickelte gleichzeitig aber einen deutlichen höheren Druckverlust als GAK-Produkte mit gröberer Körnung (Prieto et al., 2013). Zusätzlich zur Korngröße hängt der Druckverlust während der Filtration von der Form und Rauheit der Aktivkohle, der Filtergeschwindigkeit, der Filterbetttiefe und der Wassertemperatur ab (DIN EN 12915-1, 2009). Zudem lässt sich grundsätzlich davon ausgehen, dass eine gleichförmigere GAK zu geringen Druckverlusten führt (Graese et al., 1987). Umso breiter das Körnungsspektrum ist, desto eher können sich verhältnismäßig kleine Partikel in der obersten Schicht des Filterbettes anlagern und zu einem erhöhten Druckverlust führen. Aus diesem Grund sollte der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  einen Wert von 2,1 nicht übersteigen (DIN EN 12915-1, 2009). Während der Inbetriebnahmespülung des Filters sollte weiterhin darauf geachtet werden, dass der Feinstkornanteil aus der GAK-Schüttung ausgetragen wird (Benstöm et al., 2014).

### 3 Material und Methoden

Im Rahmen des Forschungsprojektes SOLIDUS wurden insgesamt vier großtechnisch betriebene GAK-Filter auf vier Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen untersucht (Bad Oeynhausen, Gütersloh-Putzhagen, Obere Lutter und Köln-Rodenkirchen). Zu den durchgeführten Untersuchungen gehörten die Messung der Druckverläufe und relevanter Betriebsparameter wie Durchfluss, Klappenöffnung und Trübung sowie die Bestimmung der Feststoffgehalten und der Kornverteilung im Filterbett (näheres hierzu siehe Kapitel 3.1.5).

#### 3.1 Vorstellung der untersuchten großtechnischen GAK-Filter

Einen ersten Überblick zu Filterkenndaten und den jeweiligen Untersuchungszeiträumen bietet nachstehende Abbildung. In nachfolgenden Kapiteln wird detailliert auf die einzelnen GAK-Filter eingegangen. Alle relevanten Betriebsparameter wurden anhand von Fragebögen erhoben. Die von den Betreibern beantworteten Fragebögen befinden sich in Anhang A.

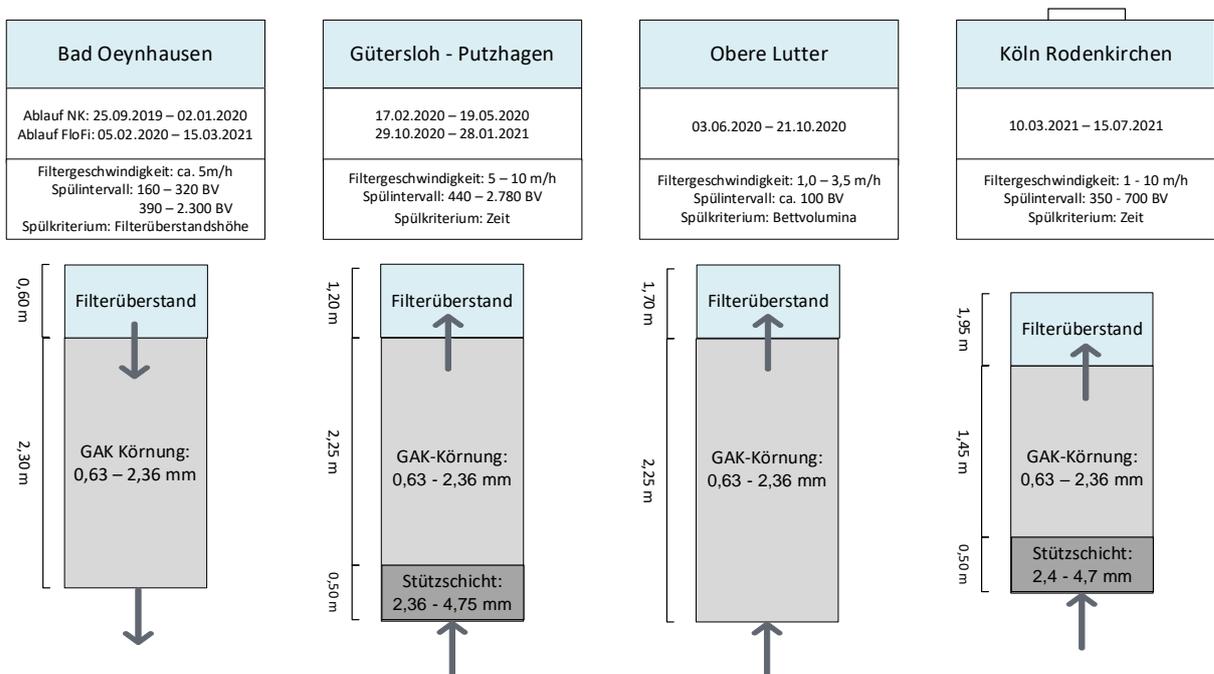


Abbildung 10: Übersicht der untersuchten GAK-Filter

Zusätzlich zu den im Rahmen von SOLIDUS untersuchten GAK-Filtern werden außerdem die Ergebnisse der Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Düren Merken berücksichtigt (Projekt „MIKROflock“, Bornemann et al. 2012).

### 3.1.1 KA Bad Oeynhausen

Die Stadtwerke Bad Oeynhausen betreiben die Kläranlage Bad Oeynhausen mit einer Ausbaugröße von 104.000 EW. Eine Besonderheit der Kläranlage Bad Oeynhausen ist im Zusammenhang mit dem ausgeprägten Kurbetrieb der Stadt zu sehen. Aufgrund des Spurenstoffeintrags aus Krankenhäusern und Rehabilitationseinrichtungen haben die Stadtwerke Bad Oeynhausen bereits eine Machbarkeitsstudie zur Erarbeitung und Bewertung unterschiedlicher Lösungskonzepte durch die Hydro-Ingenieure GmbH durchführen lassen. Für die Kläranlage Bad Oeynhausen stellt dabei im Hinblick auf die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit eine Umwidmung von drei der vorhandenen acht Filter in eine Adsorptionsstufe mit granulierter Aktivkohle (GAK) die Vorzugsvariante dar. Die verbleibenden fünf Filter sollen saniert und verfahrenstechnisch ertüchtigt werden. Ziel ist es, mit diesen künftig den Gesamtabwasserstrom filtrieren zu können. Dies bedingt für die sanierten Filter hohe Filtergeschwindigkeiten bis 17 m/h.

Da für die GAK-Filtration im Ablauf kommunaler Kläranlagen nur wenige Referenzanlagen zum Zeitpunkt der Machbarkeitsstudie zur Verfügung standen, wurden die im Rahmen der Machbarkeitsstudie favorisierte Vorzugsvariante großtechnisch unter realen Bedingungen im Jahre 2015 überprüft. Hierzu wurde eine Filterkammer (Filter 3) der FloFi umgerüstet und als nachgeschalteter granulierter Aktivkohlefilter betrieben (s. Abbildung 11). Des Weiteren wurde eine konventionelle Filterzelle (Filter 2) umgerüstet und optimiert. Ziel war es, im Rahmen des Versuchsbetriebs auch die Funktions- und Leistungsfähigkeit der umgerüsteten konventionellen Raumfilter in Kombination mit der nachfolgenden GAK-Filtration zu untersuchen und den Betrieb der verbleibenden fünf FloFi mit höherer Filtergeschwindigkeit als nach dem gültigen DWA Regelwerk nachzuweisen.

Die großtechnische Pilotierung konnte Auskunft darüber liefern, dass die Vorzugsvariante unter heutigen belastbaren Kriterien wie stabile Betriebssicherheit und ausreichende Wirtschaftlichkeit eine sehr gute Lösung darstellt, so dass die großtechnische Umsetzung mit dem Baubeginn von September 2020 gestartet wurde. Nach Abstimmung mit dem Betrieb der Kläranlage wurde die großtechnische Pilotierung bis Ende März 2021 weitergeführt.

Für die Untersuchungen im Rahmen von SOLIDUS wurde der einzelne Filter, welcher üblicherweise mit dem Ablauf der FloFi beschickt wird, untersucht. Im Zuge der Untersuchungen wurde der GAK-Filter zeitweise auch mit Ablauf der NK beschickt (s. 4.1). Der GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausen besitzt eine Filterfläche von 32 m<sup>2</sup> und das Filterbett hat eine Höhe von 2,30 m. Daraus ergibt sich insgesamt ein Filterbettvolumen von ca. 74 m<sup>3</sup>. Als Filtermaterial wurde die Aktivkohle Hydrarffin AR 8x30 der Firma Donau Carbon mit einer Körnung von 0,63 – 2,36 mm eingebaut. Der Filter wird als offener Schwerkrafftfilter

im Abwärtsstrom mit konstantem Durchfluss und einem konstanten Filterüberstau von 0,4 m betrieben. Zum Ausgleich des Druckverlustes mit zunehmender Filterbelastung wird nach dem Prinzip einer Auslaufregelung die Auslaufklappe am Filterboden während eines Filtrationsintervalls zunehmend geöffnet. Ist das Filtermaterial so verblockt, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit bei vollständig geöffneter Ablaufklappe nicht mehr gegeben ist, steigt der Wasserstand im Filterüberstand. Bei Erreichen von der kritischen Höhe von etwa 0,65 m wird der Filter automatisch ausgeschaltet und anschließend das Spülprogramm manuell vom Betrieb gestartet. Insgesamt ergeben sich so Spülintervalle von bis zu mehreren Wochen. Das Spülprogramm ist in Tabelle 6 dargestellt.

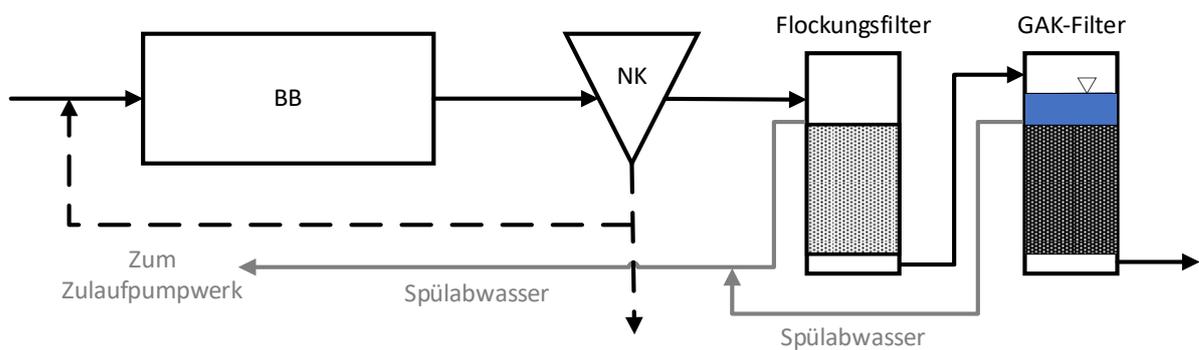


Abbildung 11: Fließschema des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausens



Abbildung 12: GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausens (Draufsicht)

Tabelle 6: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen

Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [min]
Ausspülzeit	-	13,6	1
Belüftungszeit	49,0	-	2
Vorspülzeit	-	12,0	1,5
Ausspülzeit	-	13,6	3
Nachspülzeit	-	13,6	3
Zeitbedarf gesamt (mit Berücksichtigung von Schieberlaufzeiten und Zeiten zum Anfiltrieren):			ca. 30 - 45

### 3.1.2 KA Gütersloh-Putzhagen

Die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen wird von der Stadt Gütersloh betrieben und umfasst eine Ausbaugröße von 150.600 EW. Nach der mechanisch-biologischen Behandlung inklusive vierstraßiger zweistufiger Kaskadendenitrifikation, und Sedimentation in insgesamt 16 Nachklärbecken (Gesamtfläche 11.600 m<sup>2</sup>) wird das Abwasser zur FloFi weitergeleitet. Die FloFi wurde im Jahr 1992 errichtet und beinhaltet insgesamt 9 aufwärts durchströmten BIOFOR-Filterzellen. In den 9 Filterzellen befinden sich jeweils 100 m<sup>3</sup> des Filtermaterials Liaperl® G 4-8 R (Fa. Cleanswater Ökotau GmbH) mit einem Kornband von 4 – 8 mm (effektive Korngröße von 4,5 mm). Die im Düsenboden verschraubten Luftpolsterdüsen haben eine Schlitzweite von ca. 2,3 mm. Im Jahr 2013 wurden zwei der neun Filterzellen zu einer GAK-Filtration nach Durchführung einer Machbarkeitsstudie umgebaut. Die zwei Filterzellen wurden parallel zur FloFi mit dem Ablauf der NK beschickt. Aufgrund des hohen Feststoffgehalts war die Standzeit der GAK-Filter sehr gering. Deswegen wurden 2016 eine neue Beschickungspumpe und Rohrleitung installiert, welche die GAK-Filter mit dem Ablauf der FloFi beschicken. Im Jahr 2021 wird noch eine Filterzelle als GAK-Filtration betrieben. Nach erfolgreicher Umsetzung und positiven Ergebnissen der großtechnischen Pilotierung hat sich die Stadt Gütersloh zum Neubau einer vierten Reinigungsstufe entschieden. Hierzu werden 12 GAK-Filtern in Kesselbauweise im Jahr 2021 realisiert

Der untersuchte GAK-Filter aus der Studie weist eine Oberfläche von 40 m<sup>2</sup> und eine Schütthöhe von insgesamt 2,75 m auf. Somit ergibt sich ein Volumen von 110 m<sup>3</sup> pro GAK-Filter. In den GAK-Filtern wurde eine Stüttschicht mit einer Körnung von 2,36 – 4,75 mm (Epibon; Hersteller Donau Carbons) in den unteren 50 cm verbaut, um die Filterdüsen (Schlitzweite 2,3 mm) zu schützen. Die restliche GAK (Hydraffin AR; Hersteller Donau Carbons) weist eine Körnung von 0,63 – 2,36 mm auf. Die Filter werden aufwärts durchströmt.

Aufgrund der Vorbehandlung mittels FloFi sind nur geringe AFS-Konzentrationen im Zulauf der GAK vorhanden. Der Filter wird ca. alle 10 Tage rückgespült.

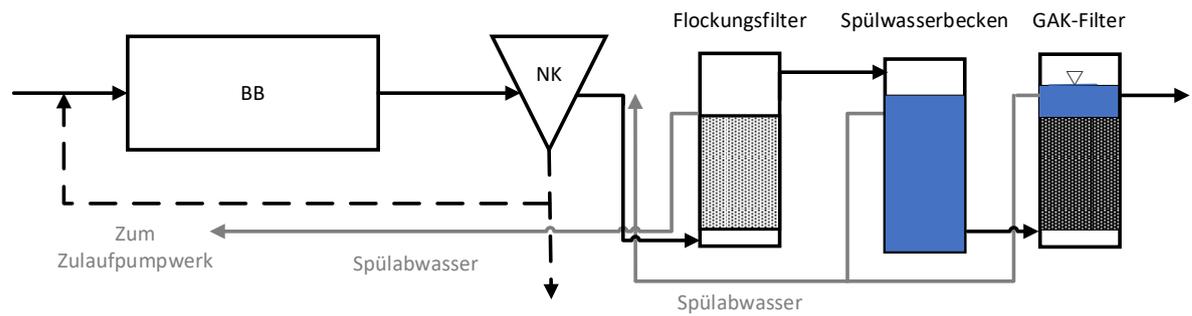


Abbildung 13: Fließschema des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen



Abbildung 14: GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen (Draufsicht)

Tabelle 7: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen

Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [min.]
Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
Absenken des Überstauspiegels	-	-	5
Aufbrechen der Filtermaterialschüttung (Luftspülung)	~ 40		10
Düsenboden entlüften			3
Filterniveau anheben			5
Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasser-Spülung)	-	-	-
Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	~ 27	20
Inbetriebnahme des Filters			10
Zeitbedarf insgesamt:			53

### 3.1.3 KA Obere Lutter

Das Verbandsklärwerk Obere Lutter wird durch den Abwasserverband Obere Lutter betrieben und hat eine Ausbaugröße von 380.000 EW. Neben der herkömmlichen mechanischen Abwasserreinigung mittels Rechen, Sandfang und Vorklärung umfasst die KA eine zweistufige biologische Behandlung mit Zwischenklärung, eine nachgeschaltete Festbettdenitrifikation in insgesamt acht Filtern (Fläche jeweils 37,5 m<sup>2</sup>, gefüllt mit Blähton). Nach der Festbettdenitrifikation wurde bis 2010/2011 das Abwasser zur FloFi weitergeleitet. Diese beinhaltet zehn BIOFOR-Filter mit einer Oberfläche von jeweils 40 m<sup>2</sup>. Der Ablauf der FloFi wird zu einem Schönungsteich mit einem Gesamtvolumen von 45.000 m<sup>3</sup> weitergeleitet.

Zur Reduktion des industriell geprägten CSB im Abwasser der KA Obere Lutter wurden in den Jahren 2012 bis 2014 sukzessiv sechs der BIOFOR-Filter zu GAK-Filtern umgerüstet. Mit der vorhandenen Filterfläche von 40 m<sup>2</sup> und einer Filterbetthöhe von 2,25 – 2,50 m (je nach Einfüllung der GAK) ergibt sich insgesamt ein Volumen von 90 bis 100 m<sup>3</sup> pro Filter. Im Rahmen des Projektes SOLIDUS wurde der Filter 5 untersucht (s. Abbildung 15). Die Aktivkohle (Poolkohle: Mischung aus Reaktivat und Frischkohle der Firma Chemviron) wurde im März eingebaut und der Filter nach einer intensiven Bewässerungsphase der Kohle Ende Mai 2020 als Einschichtfilter in Betrieb genommen. Bei der reaktivierten GAK handelt es sich um CYCLECARB 501 CSA (Firma Chemviron), welche auf 0,5 mm abgesiebt wurde. Um die geforderte Aktivkohlekennzahlen (in diesem Fall Iodzahl von mind. 900 mg/g) zu erreichen, wurde das Reaktivat mit der Frischkohle HPC MAXX 830 (0,6 – 2,36 mm) aufgefrischt. Die Beschickung der sechs GAK-Filter erfolgt auf Grundlage der CSB-Konzentration im Zulauf der Filtration. Bei höheren Konzentrationen werden Filter zugeschaltet, bei niedrigeren

Konzentrationen werden Filter nicht beschickt. Die Beschickung der aufwärts durchströmten Filter erfolgt im Freigefälle, welches sich durch den Höhenunterschied zwischen dem Ablauf der vorgeschalteten Festbettdenitrifikation und dem Zulauf der Filtration ergibt. Somit wird der Solldurchfluss maßgeblich durch die Filterverblockung geprägt. Das Auslösen der Spülung erfolgt üblicherweise nach Anstieg des CSB im Ablauf der GAK-Filtration (etwa alle 3 – 20 Tage, je nach Beschickung).

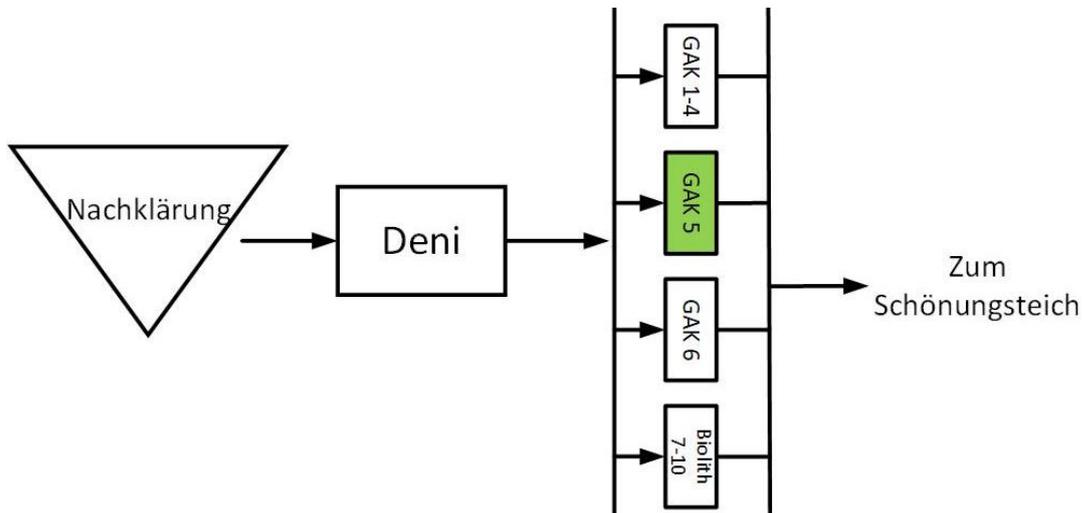


Abbildung 15: Fließschema der GAK-Filtration auf der KA Obere Lutter



Abbildung 16: GAK-Filter mit dahinterliegendem Schönungsteich auf der KA Obere Lutter (Draufsicht)

Tabelle 8: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter

Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [min.]
Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
Absenken des Überstauspiegels	-	-	4
Aufbrechen der Filtermaterialschüttung (Luftspülung)	~ 70		2
Düsenboden entlüften			0,5
Filterniveau anheben		23	2
Pause			1
Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasser-Spülung)	-	-	-
Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	6 - 20	30 - 60
Inbetriebnahme des Filters			1
Zeitbedarf insgesamt:			< 90

### 3.1.4 KA Köln-Rodenkirchen

Die Kläranlage Köln-Rodenkirchen unter der Leitung der Stadtentwässerungsbetriebe Köln (StEB) besitzt eine Ausbaugröße von 88.000 EW. Die Ausstattung der Kläranlage umfasst eine mechanische und eine biologische Stufe sowie eine aufwärts durchströmte Filtration mit sechs Filterzellen. Im Zulauf der Filtration befindet sich des Weiteren eine Siebtrommel mit einer Maschenweite von 1 mm, die einen weitgehenden Rückhalt von Störstoffen aus der NK gewährleistet. 2017 wurde eine Filterzelle zur GAK umgebaut und ihre Filterfläche dabei auf 26,3 m<sup>2</sup> reduziert. Diese wurde im Rahmen der Untersuchungen im Projekt SOLIDUS teilweise mit vorozoniertem Abwasser beschickt. Der Zulauf zur GAK wird dabei vom Ablauf Siebtrommel bzw. Ablauf Ozonung unter den Düsenboden geleitet und das GAK-Filterbett anschließend aufwärts durchströmt. Oberhalb des Filterbettes befindet sich eine Ablaufschwelle für das Filtrat. Als Filtermaterial dient das Aktivkohleprodukt AquaSorb 5000 der Jacobi Carbons GmbH mit einer Körnung von 0,6 – 2,4 mm. Die Filterbetthöhe ohne Stützschiicht beträgt 1,45 m. Des Weiteren dient das Aktivkohleprodukt Jacobi CS mit einer Körnung von 2,4 – 4,7 mm und einer Höhe von 0,5 m als Stützschiicht. Es ergibt sich somit ein Filterbettvolumen von ca. 54 m<sup>3</sup>. Der Filter wird abhängig vom Tages- und Nachtzufluss mit einem variablen Durchfluss betrieben, mit jedoch maximal 200 m<sup>3</sup>/h. Die Spülung des GAK-Filters erfolgt zeitlich gesteuert üblicherweise zweimal pro Woche. Die Spezifikation des Spülprogramms kann Tabelle 9 entnommen werden.

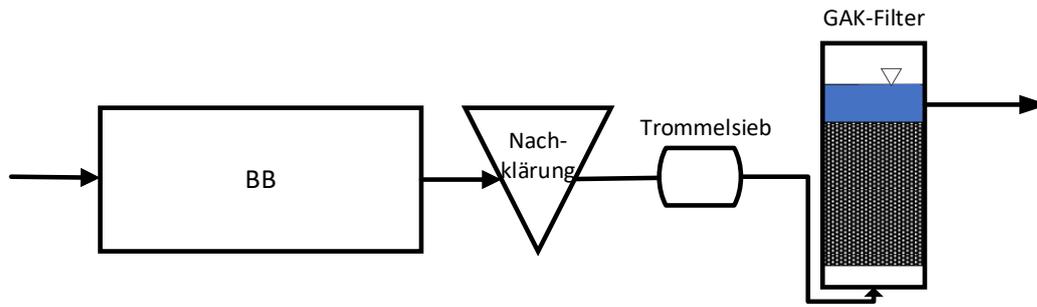


Abbildung 17: Fließschema des untersuchten GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen



Abbildung 18: GAK-Filter auf der KA Köln-Rodenkirchen (Draufsicht)

Tabelle 9: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen

Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [min.]
Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
Absenken des Überstauspiegels	-	-	3
Aufbrechen der Filtermaterialschtüttung (Luftspülung)	47		5
Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasser-Spülung)	-	-	-
Düsenboden entlüften			0,5
Filterniveau anheben		-	-
Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	10;19;15;8	10,5
Inbetriebnahme des Filters (Anfiltrieren mit Rohwasser)		1,9 - 8	30
Zeitbedarf insgesamt:			ca. 50 min

Um eventuelle Betriebsunterschiede zwischen dem GAK-Filter und dem konventionellen Abwasserfilter festzustellen, fanden zusätzlich zu den Untersuchungen des GAK-Filters parallel Untersuchungen am BIOFOR®-Filter mit dem Filtermaterial „Biolit“ auf der KA Köln Rodenkirchen statt (Druckmessung, Bestimmung der Feststoffbelastung). Der Filter weist eine Filterfläche von 40,9 m<sup>2</sup> auf. Mit der einer Filterbetthöhe von 2,65 m (inkl. Stützschiicht) ergibt sich damit ein Filterbettvolumen von rd. 108 m<sup>3</sup>.

### **3.1.5 KA Düren Merken**

Im Rahmen der abgeschlossener Forschungsvorhaben „MIKROFlock“ (Bornemann et al., 2012) und „GAK WVER“ (Benstöm et al., 2014) wurde eine bestehende Filterzelle auf der KA Düren Merken zur GAK-Filtration umgebaut und untersucht. Die daraus vorliegenden Ergebnisse wurden im Rahmen von SOLIDUS übernommen und in den Kontext der Untersuchungsergebnisse eingeordnet. Eigene erneute Untersuchungen des GAK-Filters fanden nicht statt, da die Filterzelle nach Ende der o.g. Forschungsvorhaben wieder zu einem konventionellen FloFi umgerüstet wurde. Im Zuge dieses Ergebnisberichtes wird nachstehend deshalb nur kurz auf die Randbedingungen des GAK – Filters auf der KA Düren Merken eingegangen. Alle weiteren Ergebnisse können Bornemann et al (2012) oder Benstöm et al. (2014) entnommen werden. Es wurde die Aktivkohle NRS GA der Firma Norit mit einer Körnung von 0,5 – 2,5 mm eingesetzt. Die Filterzettel besaß eine Fläche von 37,5 m<sup>2</sup>. Mit einer Filterbetthöhe von 1,5 m ergab sich somit ein Filtrervolumen von ca. 56 m<sup>3</sup>. Der Aktivkohlefilter war zusätzlich mit einer Stützschiicht bestehend aus 0,1 m Feinkies (Körnung: 3,15 – 5,6 mm) und 0,1 m Grobkies (Körnung: 5,6 – 8,0 mm) ausgestattet. Zur Auslösung der Spülung des GAK – Filters wurde ein Druckkriterium angewandt und zu diesem Zweck der Quotient aus dem Druckverlust und dem aktuellen Filtrervolumenstrom gebildet. Sobald dieser Quotient einen Wert von 0,5 bar\*h/m<sup>3</sup> überschritt, wurde eine Spülung eingeleitet. Das Druckkriterium wurde aufgrund des schnell ansteigenden Druckverlustes im Filtrationsbetrieb, der aus hohen AFS-Zulaufkonzentrationen resultierte, auf 0,7 bar\*h/m<sup>3</sup> erhöht. Die Filterspülung erfolgte mit einer Luftgeschwindigkeit von 56 m/h und einer maximalen Spülwassergeschwindigkeit von 50 m/h.

## **3.2 Ermittlung der Korngrößenverteilung im Filterbett**

Zur Untersuchung der Korngrößenverteilung im Filterbett wurden GAK-Proben aus verschiedenen Tiefen entnommen und anschließend im umweltanalytischen Labor des ISA einer Siebanalyse unterzogen. Die Entnahme des Filtermaterials erfolgte dabei mittels eines Nass- /Trockensaugers (Typ WD 3, Firma Kärcher). Das Probenahmesystem besteht aus einem Saugschlauch sowie einem zusätzlichen in der Länge erweiterbaren Kunststoffrohr

(1 bis 4 m) mit einem Innendurchmesser von 0,04 m. Auf jeder Kläranlage wurden Proben aus fünf verschiedenen Filtertiefen entnommen. Um das festgelegte Probenvolumen von 1 l zu erreichen, wurden Proben aus mehreren Sauglöchern zu einer Mischprobe zusammengefügt. Eine einzelne Probe hatte dabei eine Höhe von 5 cm. Damit die Probenhöhe geringgehalten werden konnte und dennoch ausreichend Material zur Verfügung stand, wurden mehrere Proben (3 – 5 Proben) aus derselben Höhe zu einer Mischprobe zusammengefügt. Die schematische Anordnung der Entnahmetiefen im Querschnitt sind für die untersuchten GAK-Filter in Abbildung 19 dargestellt.

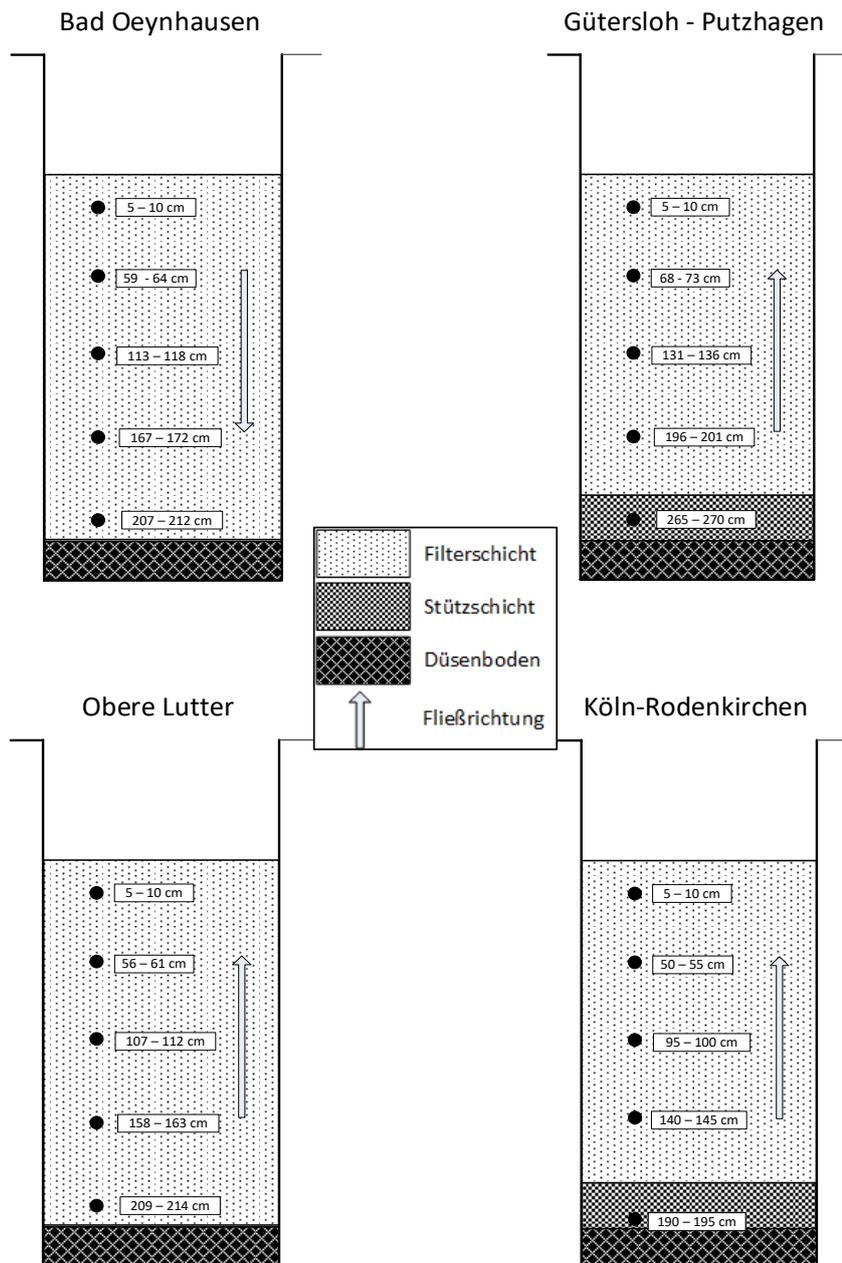


Abbildung 19: Probenahmetiefen der unterschiedlichen GAK-Filter

Im umweltanalytischen Labor des ISA wurden die Proben zunächst bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz (mind. 24 h) getrocknet. Anschließend erfolgte die Siebanalyse mithilfe eines Rüttelsiebes. Die acht Siebböden umfassen die Maschenweiten 2,5 mm, 2,0 mm, 1,4 mm, 1,25 mm, 1,0 mm, 0,8 mm, 0,5 mm und 0,0 mm. Zunächst wurde das Gesamtgewicht der einzelnen Aktivkohleproben bestimmt und anschließend auf das obere, größte Sieb des Siebturms gegeben. Während der Siebung wurde die Probe entsprechend der Korngröße klassiert. Die Bestimmung der Aktivkohlemasse der einzelnen Siebfraktionen erfolgte aus der Differenz des Gesamtgewichts der einzelnen Siebe (Sieb + Aktivkohle) und des jeweiligen Leergewichtes der Siebe.

Für die GAK-Filter konnte mithilfe dieser Angaben eine Analyse der Korngrößenverteilung über die verschiedenen Tiefen des Filterbettes durchgeführt werden. Die Probenahme erfolgte bei allen Kläranlagen zu Beginn und zum Ende des Untersuchungszeitraums, sodass eine mögliche Abrasion und/oder einen Verlust der GAK durch die mechanische Beanspruchung bei den regelmäßigen Spülungen hätte festgestellt werden können.

### **3.3 Messung des Druckverlaufs im Filterbett**

Mittels fünf Tauchsonden wurde der Druckverlauf im Filterbett in fünf unterschiedlichen Tiefen gemessen. Hierzu wurde eine mobile Druckmesslanze genutzt. Die Anordnung der Drucksonden in den jeweiligen GAK-Filtern ist in Abbildung 20 dargestellt. Bei einer Druckmessung kann grundsätzlich entweder der Relativdruck oder der Absolutdruck erfasst werden. Der Relativdruck berechnet sich aus dem Absolutdruck abzüglich des vorherrschenden atmosphärischen Drucks (Luftdruck). Wird der Absolutdruck gemessen, muss zur Berechnung des Relativdrucks zeitgleich der Luftdruck erfasst werden. Ein negativer Relativdruck im Filterbett bedeutet, dass an dieser Stelle ein Absolutdruck unterhalb des atmosphärischen Drucks vorliegt (Unterdruck). Für die Druckmessung wurden zunächst Relativdrucksonden der Firma Huba Control AG des Typs 712 mit einem Messbereich von - 0,02 bis 1 bar verwendet. Ein Unterdruck unterhalb von 0,02 bar konnte mit diesen Sonden nicht erfasst werden. Im Laufe der Untersuchungen wurde jedoch festgestellt, dass sich im Filterbett auf der KA Bad Oeynhausen (abwärts durchströmt) ein Unterdruck einstellt, woraufhin seitens der Kläranlage Absolutdrucksonden desselben Typs verbaut wurden. Verfahrensbedingt entsteht im Filterbett der aufwärtsdurchströmten GAK-Filter kein Unterdruck, weshalb auf den KA Gütersloh-Putzhagen, KA Obere Lutter und KA Köln-Rodenkirchen weiterhin die Sonden mit Relativdruckmessung zum Einsatz kamen.

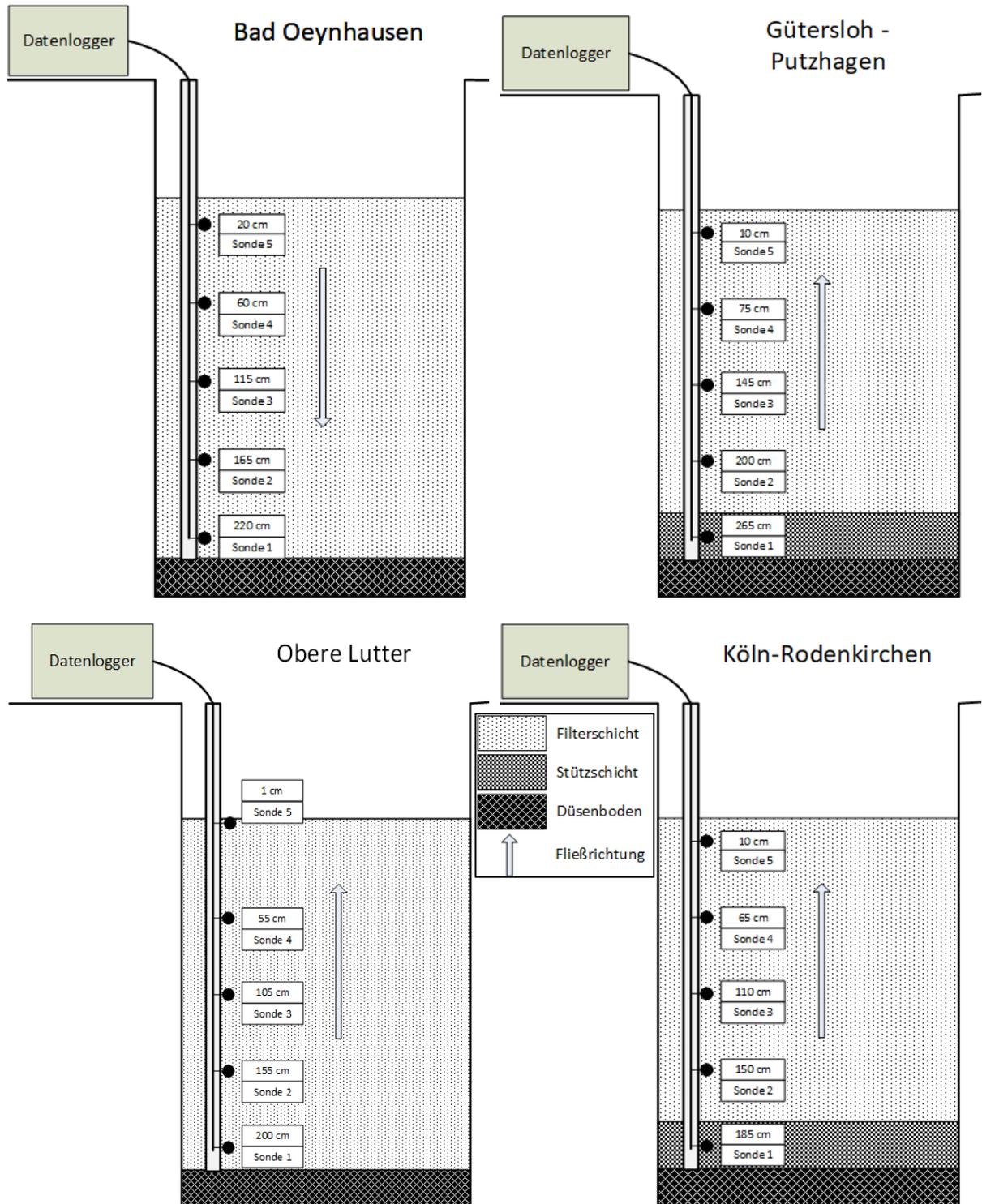


Abbildung 20: Tiefe der Drucksonden in den unterschiedlichen GAK-Filtern

### 3.4 Untersuchung der Feststoffbelastung

Eine wesentliche Bemessungsgröße für Raumfilter ist die Feststoffbelastung. Diese bezieht sich auf den Summenparameter der abfiltrierbaren Stoffe (AFS). Der AFS fasst alle Sink-,

Schweb- und Schwimmstoffe organischer und anorganischer Herkunft zusammen und ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung der Feststofffracht in der Abwasseranalytik (DIN 38409 Teil 2, 1987). Die Feststoffraumbelastung eines Filters bezeichnet die zurückgehaltene Menge an abfiltrierbaren Stoffen im Bezugszeitraum zwischen zwei Rückspülungen bezogen auf das Volumen des Filtermaterials (Benstöm et al., 2014). Sie steht somit im direkten Zusammenhang zur Feststoffraumbelastung eines Filters. Üblicherweise werden konventionelle Raumfilter mit einer Feststoffraumbelastung von 2 – 3 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>Filtermaterial</sub> je Spülzyklus bemessen, wobei ein Spülzyklus von 1-mal pro 24 h angesetzt wird (DWA-A 203, 2019). Die Feststoffflächenbelastung eines Filters bezeichnet die zurückgehaltene Menge an abfiltrierbaren Stoffen im Bezugszeitraum zwischen zwei Rückspülungen bezogen auf die Fläche des Filtermaterials und wird üblicherweise bei Oberflächenfilter (z.B. Tuchfilter) als Bemessungsgröße verwendet (DWA-A 203, 2019).

Auf allen vier Kläranlagen wurden während der untersuchten Betriebszeiträume Abwasserproben im Zu- und Ablauf der GAK-Filter zur Bestimmung der AFS-Konzentration genommen. Die Probenahme erfolgte dabei üblicherweise zwischen zwei Filtrationsintervallen (außer auf der KA Obere Lutter, s. Kapitel 3.1.3). Betrug die Länge eines Filtrationsintervalls mehr als eine Woche, wurden mehrere Wochenmischproben zur Bestimmung der maximalen Feststoffraumbelastung hinzugezogen. Die Abwasserproben wurden anschließend per Express-Versand an das umweltanalytische Labor des ISA geschickt, wo die Bestimmung des AFS nach DIN EN 872 (2005) durchgeführt wurde. Bei diesem Verfahren wird eine Probe in einem Vakuumfiltrationsgerät über einen Glasfaserfilter filtriert. Anschließend erfolgt die Trocknung des Filters bei 105 (± 2) °C bis zur Gewichtskonstanz. Die Bestimmung der auf dem Filter zurückgehaltenen Trockensubstanz (TS) erfolgt durch Wägung. Das Verfahren besitzt eine Bestimmungsgrenze von 2 mg<sub>AFS</sub>/l bei 1 l filtriertem Probenvolumen. Dies bedeutet, dass AFS-Konzentrationen von 0 bis 2 mg/l nicht exakt bestimmt werden können. Lag das Probenvolumen bei < 1 l, so erhöhte sich die Bestimmungsgrenze (BG) auf bis zu 2,2 mg<sub>AFS</sub>/l.

Über die Feststoffbilanz und die durchgesetzte Wassermenge  $\Sigma Q$  wird unter Berücksichtigung des Filtervolumens bzw. der Filterfläche die Feststoffraumbelastung ( $B_R$ ) bzw. die Feststoffflächenbelastung ( $B_A$ ) pro Filtrationsintervall wie folgt ermittelt:

$$B_R = \frac{(c_{AFS,zu} - c_{AFS,ab}) * \Sigma Q}{V_{Filter}} \text{ [kg}_{TS}\text{/(m}^3_{GAK} * \text{Spülzyklus)}]$$

$$B_A = \frac{(c_{AFS,zu} - c_{AFS,ab}) * \Sigma Q}{A_{Filter}} \text{ [kg}_{TS}/(\text{m}^2_{GAK} * \text{Spülzyklus})]$$

Bei der Berechnung der Feststoffbelastung wurde dabei wie folgt vorgegangen:

- Fall 1:  $c_{AFS,zu} > BG$ ,  $c_{AFS,ab} < BG$ : für den Mindestrückhalt wurde  $c_{AFS,ab} = 2 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$  angenommen, für den Maximalrückhalt  $c_{AFS,ab} = 0 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$ ; für  $c_{AFS,zu}$  wurde der real gemessene Wert angesetzt.
- Fall 2:  $c_{AFS,zu} < BG$ ,  $c_{AFS,ab} < BG$ : für den Mindestrückhalt wurde  $c_{AFS,zu} = 0 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$  und  $c_{AFS,ab} = 0 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$  angenommen (=  $0 \text{ kg}_{TS}/\text{m}^3$  bzw.  $\text{kg}_{TS}/\text{m}^2$  GAK), für den Maximalrückhalt wurde  $c_{AFS,zu} = 2 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$  und  $c_{AFS,ab} = 0 \text{ mg}_{AFS}/\text{l}$  angenommen.
- Fall 3:  $c_{AFS,zu} > BG$ ,  $c_{AFS,ab} > BG$ : für  $c_{AFS,zu}$  und  $c_{AFS,ab}$  wurde jeweils der real gemessene Wert angesetzt.

Die daraus resultierende minimale bzw. maximale Feststoffbelastung werden im Kapitel 4 in den folgenden Diagrammen als Whisker dargestellt. Der Mittelwert der beiden Fälle stellt jeweils den Datenpunkt dar. Datenpunkte ohne Whisker stellen die mit gemessenen Werten ermittelte Feststoffbelastung (Fall 3) dar (s. Abbildung 21).

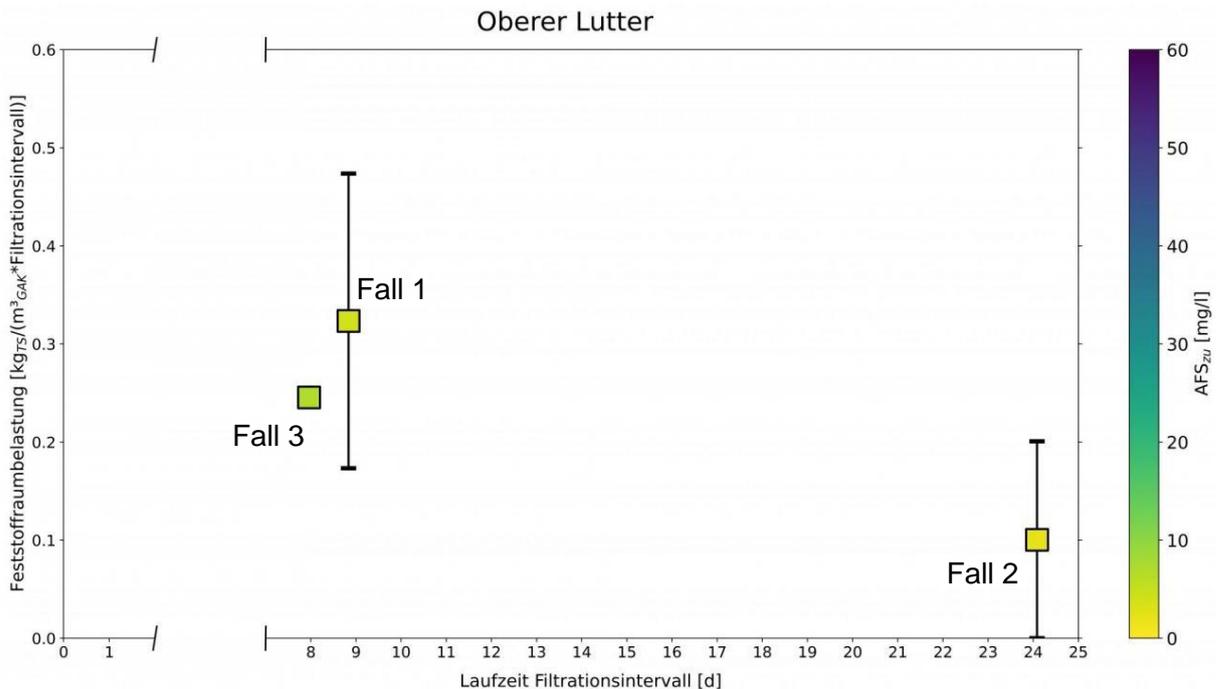


Abbildung 21: Erläuterung der grafischen Darstellung der Feststoffbelastung

Außerdem sind Box-Whisker-Diagrammen wie folgt zu lesen: Die Box spannt sich vom 1. Quartil bis zum 3. Quartil auf und erfasst somit 50 % der Werte. Der Median ist als dunkler

Querstrich dargestellt, der Mittelwert als Kreuz. Die Whisker außerhalb der Boxen spannen sich nach oben bis zum Maximum und nach unten bis zum Minimum (s. Abbildung 22).

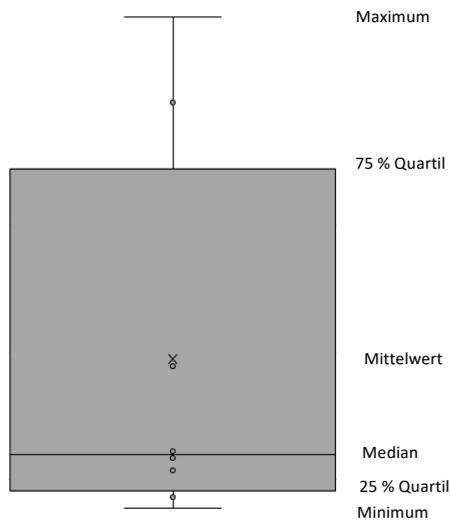


Abbildung 22: Leseschlüssel für Boxplots

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 KA Bad Oeynhausen

Der Untersuchungszeitraum des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen teilt sich in die zwei nachstehenden Zeiträume auf:

- 25.09.2019 bis 10.01.2020: Beschickung mit Ablauf NK, Filtrationsintervalle 3 – 6 Tage, mittlere Filtergeschwindigkeit  $v_f = 4 - 6$  m/h
- 06.02.2021 bis 21.09.2021: Beschickung mit Ablauf FloFi, Filtrationsintervalle 7 – 59 Tage, mittlere Filtergeschwindigkeit  $v_f = 3,8 - 5,6$  m/h

Nachstehend wird auf beide Zeiträume im Detail eingegangen.

#### 4.1.1 Kornverteilung im Filterbett

Wie bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben, klassieren sich GAK-Körner im Zuge der Rückspülung nach Größe und Dichte. Unter der Annahme der homogenen Dichte der Aktivkohle im Filterbett klassieren sich die Partikel nach ihrem Durchmesser, weshalb sich im unteren Teil des Filterbettes gröbere und im oberen Teil feinere Partikel wiederfinden. Diese Annahme kann mit den Ergebnissen der Siebanalysen in fünf unterschiedlichen Höhen im GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausen (Abbildung 23) bestätigt werden. Die Fraktion mit feinkörnigem Material ( $< 1$  mm) nimmt in 5 – 10 cm Tiefe einen Massenanteil von etwa 30 % ein, wohingegen der Massenanteil in der Tiefe von 207 – 212 cm bei etwa 17 % liegt. Gleichzeitig liegt der Anteil der gröberen GAK-Körner (2,0 – 2,5 mm) in der untersten Probenahmetiefe bei ca. 20 % und in der obersten bei nur ca. 5 %. Somit entsprechen die Ergebnisse der Siebanalyse den erwarteten Ergebnissen in Einklang mit der Literatur (Jekel und Ruhl, 2016). Die beschriebene Klassierung von fein nach grob in Strömungsrichtung bei abwärts durchströmten GAK-Filtern – wie hier vorliegend – hat zur Folge, dass Feststoffe vorwiegend an der Filteroberfläche zurückgehalten werden und nicht weiter ins Filterbett eindringen können. Dieser Effekt kann durch die sogenannte Filterkuchenbildung im Laufe des anhaltenden Filtrationsprozesses verstärkt werden. Näheres zu dieser Thematik wird in Kapitel 2 erörtert.

Abbildung 24 zeigt die Probenahme im März 2021. Auffällig ist, dass eine Klassierung des Korn nach Größe über die Tiefe nicht mehr ersichtlich ist. Eine wenig bis nicht vorhandene Klassierung lässt auf fehlerhaft Spüleinstellungen schließen. Dies wird durch die Beschaffenheit der Filteroberfläche bestätigt (Abbildung 26). Im Zuge der Probenahme im zweiten Untersuchungszeitraum konnte außerdem festgestellt werden, dass sich die Filterbetthöhe um etwa 20 cm im Vergleich zum ersten Untersuchungszeitraum – September

2019 – verringert hat ( $\cong$  ca. 6 m<sup>3</sup> Verlust). Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des langjährigen Einsatzes der Aktivkohle (2017 – 2021) die Differenz der Filterbetthöhe nicht aus dem Auswaschen des Feinkorns resultiert. Somit bleiben die Unterschiede der Verteilung zunächst unerklärbar.

Im Zuge des zweiten Untersuchungszeitraums war insbesondere die Beschaffenheit der Filteroberfläche auffällig. Diese wies teilweise Erhöhungen der GAK (zum Teil bis zu 50 cm) auf, welche wohlmöglich aus der Kombination langer Filtrationsintervalle und einer Spülung, die nicht zur ausreichenden Durchmischung des Filterbettes beitrug, resultierten (s. Abbildung 26, zum Vergleich Filteroberfläche im August 2019 s. Abbildung 25). Bedingt durch diese Kombination scheint es zur Bildung von Anhäufungen der Aktivkohle im Filter gekommen zu sein, sodass sich daraus eine Reduktion der Filterbetthöhe an Stellen außerhalb der Anhäufungen ergeben könnte. Zudem konnte während der Spülung bei der Probenahme im März 2021 Kohleabtrieb festgestellt werden, welcher wohlmöglich zu dem oben beschriebenen Verlust des Filterbettes mit beigetragen hat. Auf die Aktivkohleanhäufungen und die Filterspülung wird ausführlich in Kapitel 4.1.3 eingegangen.

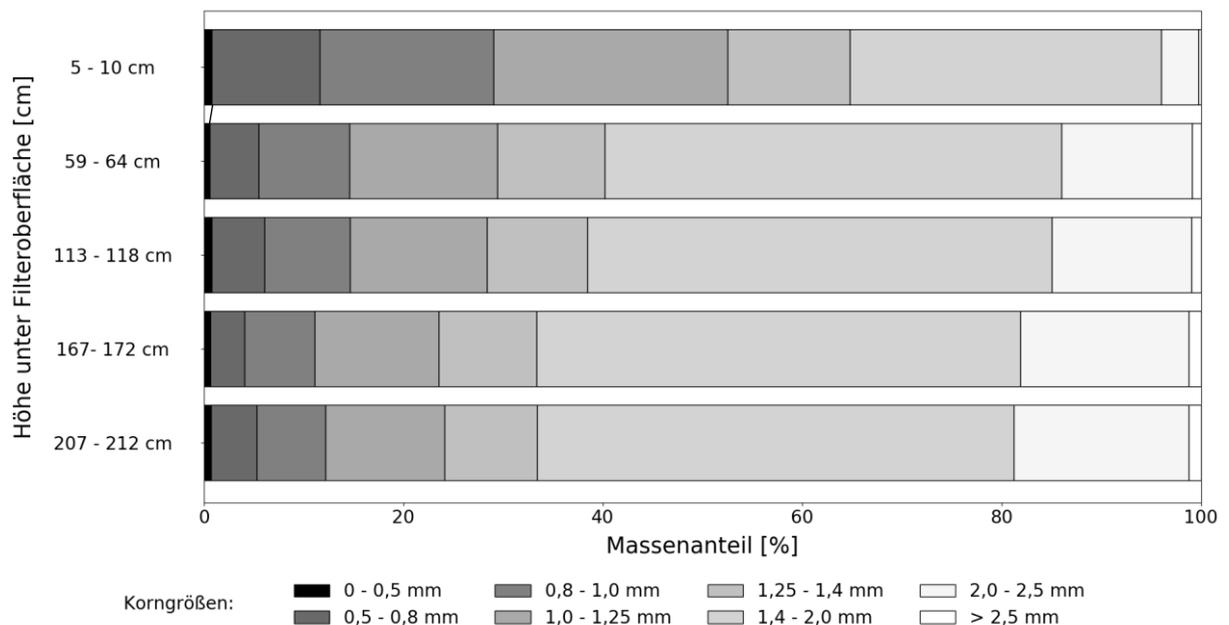


Abbildung 23: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 24.09.2019

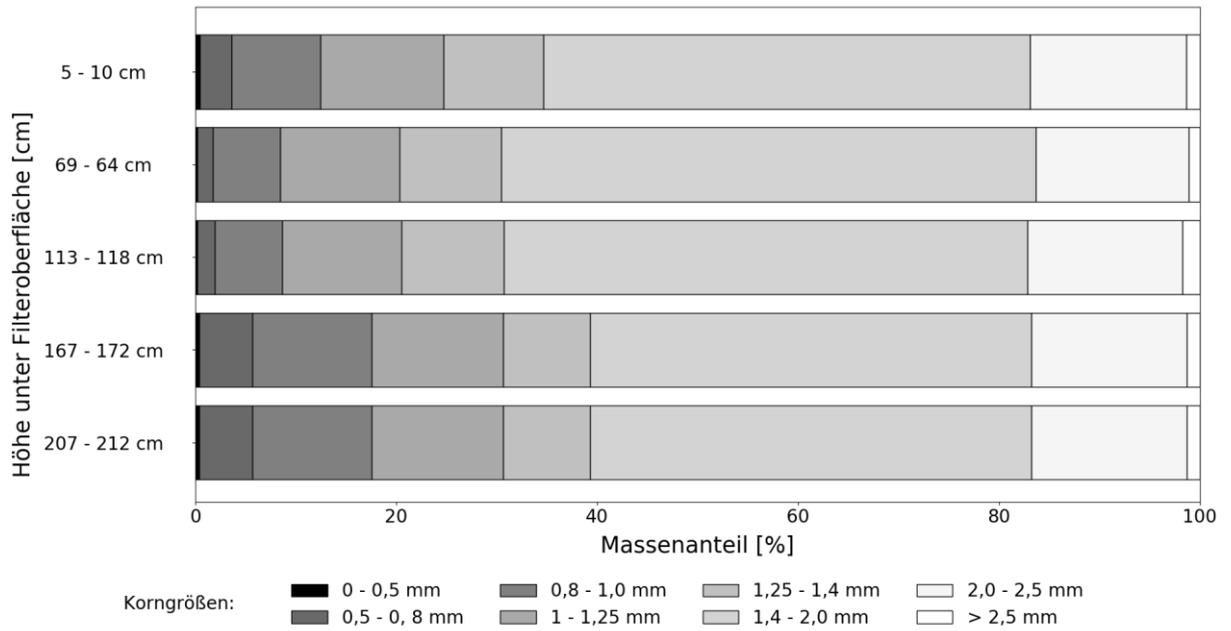


Abbildung 24: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 23.02.2021



Abbildung 25: Beschaffenheit der Filteroberfläche (August 2019)



Abbildung 26: Beschaffenheit der Filteroberfläche (März 2021)

### 4.1.2 Druckverlauf im Filterbett

Nachstehend werden exemplarisch die Druckverhältnisse jeweils für ein Filtrationsintervall pro Betriebsweise erläutert. Alle weiteren Diagramme können dem Anhang B entnommen werden.

#### Beschickung mit Ablauf NK

Im Zeitraum vom 24.09.2019 bis zum 10.01.2020 wurde der GAK-Filter mit Ablauf NK beschickt. In diesem Zeitraum konnten insgesamt 22 Filtrationsintervalle untersucht werden, von denen 16 für die Bestimmung des maximalen Filtrationsintervalls und neun zur Bewertung der Feststoffbelastung zugrunde gelegt werden konnten (s. Kapitel 4.1.3 und 4.1.4). Den restlichen Filtrationsintervallen oblagen allgemeine Betriebsstörungen oder Untersuchungsfehlern, so dass diese aus der Auswertung ausgeschlossen wurden. Die Beschreibung der Druckverläufe im Filterbett erfolgt nachstehend beispielhaft für das Filtrationsintervall vom 04.12. – 09.12.2019. Hierbei sind die Messungen der Absolutdrucksonden dargestellt (Vgl. Kapitel 3.3).

Abbildung 27 ist, wie nachstehend aufgelistet, zu interpretieren:

- Sonde 1: Drucksonde, die sich am tiefsten im Filterbett befindet, ca. 2,20 m unterhalb der GAK-Oberfläche
- Sonde 5: Drucksonde, die sich am höchsten im Filterbett befindet, ca. 0,2 m unterhalb der GAK-Oberfläche. Es ist davon auszugehen, dass sich die Sonde am Ende des Filtrationszyklus nicht mehr vollständig im Filterbett befand und somit lediglich den hydrostatischen Druck aufzeichnete.
- Überstauhöhe: liegt im Normalbetrieb bei 0,4 m und wird in mbar dargestellt (0,4 m  $\cong$  40 mbar)
- Durchfluss: Üblicherweise wird der Filter kontinuierlich beschickt, bei diesem Filtrationsintervall mit  $Q_{\text{soll}} = 193 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $\cong 6 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Klappenstellung: Die Öffnung der Ablaufklappe wird automatisch nach  $Q_{\text{soll}}$  geregelt (dargestellt als Öffnungsgrad in %)

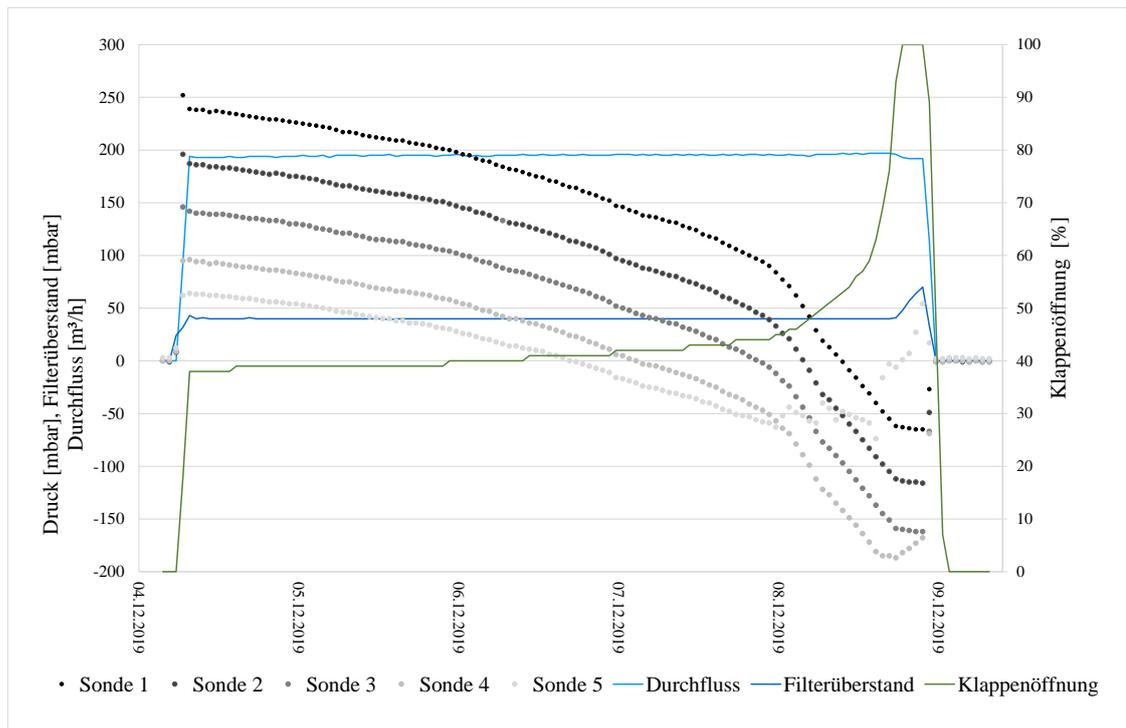


Abbildung 27: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 04.12-09.12.2019

Zusammenfassend zeigt Abbildung 27, dass der Druck in allen Sonden mit Laufzeit des Filtrationsintervalls bis in den Unterdruckbereich von bis zu ca. -190 mbar abnimmt. Die Druckabnahme resultiert hierbei aus der Zunahme des Filterwiderstandes bei zunehmender Feststoffbelastung des Filters und ist nach Bornemann et al. (2012) sowie Grombach et al. (2000) charakteristisch für abwärts durchströmte Raumfilter. Dies spiegelt sich zudem in der Klappenstellung des Ablaufs wider: Mit Fortschreiten der Filtrationszeit werden Fließwege auf und im GAK-Filter verblockt, sodass das  $Q_{\text{soll}}$  von 193 m<sup>3</sup>/h mit einer Klappenöffnung von 40% nicht auf Dauer abgeleitet werden kann. Daraus resultiert, dass mit zunehmender Verblockung die Ablaufklappe immer weiter geöffnet wird, bis diese schließlich bei 100 % zum Ende des Filtrationsintervalls liegt. Kann  $Q_{\text{soll}}$  nicht abgeleitet werden, steigt der Höhenstand des Filterüberstaus an, bis dieser die maximale Einstauhöhe von 0,6 m erreicht. Wird dieser Zustand erreicht, wird der Filter automatisch außer Betrieb genommen und schlussendlich gespült. Die Bildung eines Unterdruckes wird bei schwerkraftgetriebenen, abwärts durchströmten Filtern durch den Höhenunterschied zwischen Wasserstand im Filterüberstand und Auslauf Filter begünstigt (Sogwirkung).

Mit fortschreitender Filterlaufzeit sinkt der Druck an allen Sonden und es können Unterdrücke an allen Sonden festgestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die höher liegenden Sonden schneller in den Unterdruckbereich abfallen. Laut Grombach et al. (2000) bedeutet ein

stärkerer Druckabfall in bestimmten Höhen, dass sich hier primär die Feststoffe absetzen. In diesem Fall lässt sich darauf schließen, dass Feststoffe primär im oberen Bereich des Filters abgeschieden werden (Oberflächenfiltration). Die beschriebene zeitliche Entwicklung der Druckverhältnisse in einem Filterbett lassen sich anhand von Filterwiderstandsdiagrammen (Micheau-Diagramme) darstellen (Vgl. Kapitel 2.1.2). Das Micheau-Diagramm in Abbildung 28 veranschaulicht den Druckverlauf über die Filtrationszeit (Start = 0 h, Ende = 104 h) und Betttiefe. Zu erkennen ist, dass der gemessene Druck in der obersten Sonde 5 zu Beginn ungefähr dem hydrostatischen Druck entspricht und mit zunehmender Zeit abnimmt. Der Druck in den darunterliegenden Sonden (Sonde 4 bis Sonde 1) fällt aufgrund des Filterwiderstandes, welcher durch die Schüttung erzeugt wird, geringer aus als der hydrostatische Druck. Hier nimmt ebenfalls der Druck mit Filtrationszeit ab. Auffällig ist, dass der Druck zwischen GAK-Oberfläche und der Sonde 5 nicht parallel zur 0 h-Linie verläuft. Die an den restlichen vier Tiefen aufgenommenen Drücke kennzeichnen sich bis 80 h durch einen annähernd parallelen Verlauf zur 0 h-Drucklinie. Von 80 h bis 104 h wird auch zwischen Sonde 5 und Sonde 4 ein nicht-paralleler Verlauf ersichtlich. Wie bereits in Kapitel 2 erörtert, weist ein zur 0 h-Linie parallel verlaufender Druck darauf hin, dass sich in diesen Tiefen keine Feststoffe abgelagert haben. Der Druckverlauf in Abbildung 28 deutet auf eine Oberflächenfiltration hin, wobei die filtrationsrelevante Schicht in etwa die obersten 65 cm (Höhe Sonde 4) zu sein scheint.

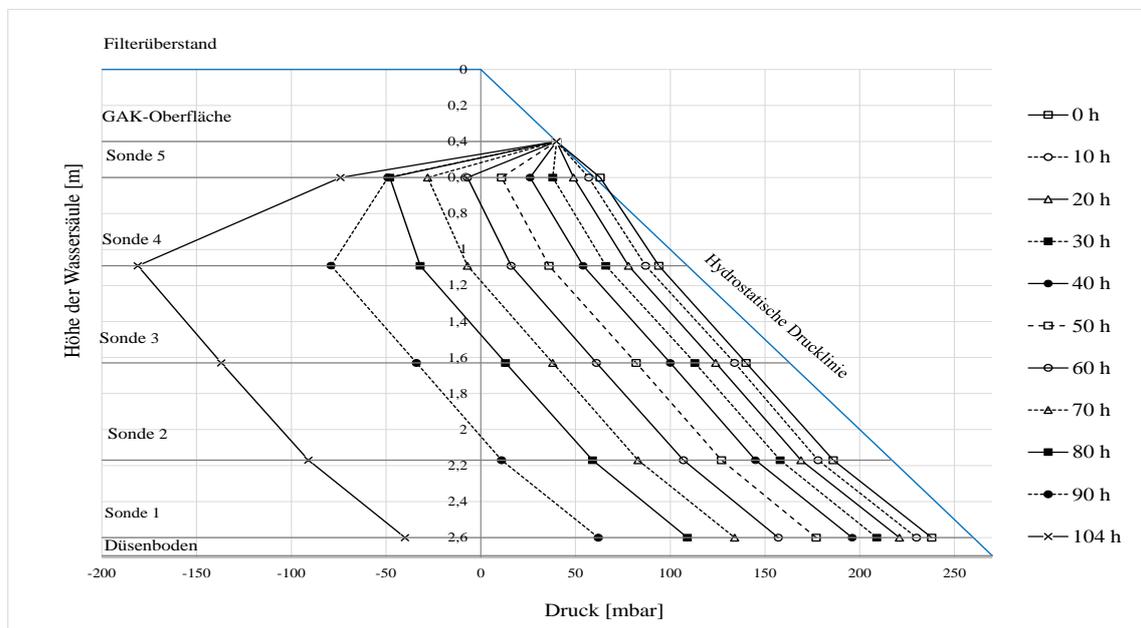


Abbildung 28: Druckverlauf für den Filtrationszyklus vom 04.12.-09.12.2019 über die Zeit und die Filterbetthöhe (Micheau-Diagramm)

### Beschickung mit Ablauf Flockungsfiltration

Ab Februar 2020 erfolgte die Beschickung des GAK-Filters mit Ablauf FloFi. Bedingt durch derzeitige Sanierungsmaßnahmen auf der KA Bad Oeynhausen konnten nicht alle Filtrationsintervalle in die Auswertung mit eingebunden werden (s. Anhang B). Insgesamt konnten in dem Zeitraum acht Filtrationsintervalle ausgewertet werden. Während bei der Beschickung mit Ablauf NK hauptsächlich betriebliche/labortechnische Störungen zur Verringerung der Anzahl an auswertbaren Intervallen führte, resultiert die Anzahl von acht Filtrationsintervalle hier vor allem aus den deutlich längeren Filterlaufzeiten durch die Beschickung mit vorfiltriertem Abwasser (s. Kapitel 4.1.3).

Abbildung 29 veranschaulicht beispielhaft das Filtrationsintervall vom 06.06.2020 – 16.06.2020. Alle weiteren Diagramme können dem Anhang B entnommen werden.

Analog zu den Druckverläufen im Filterbett bei Beschickung mit Ablauf NK kann in Abbildung 29 eine Druckabnahme mit Zunahme der Filtrationslaufzeit beobachtet werden. Es bleibt jedoch anzumerken, dass sich Sonde 5 (eigentlich 0,2 m unterhalb der GAK-Oberfläche) ab Mitte Dezember 2019 nicht dauerhaft im Filterbett befand und somit teilweise lediglich den hydrostatischen Druck messen konnte (Stagnierender Druck bei 60 mbar = 0,6 m Wassersäule). Dies lässt sich mit den Unebenheiten im Filterbett (s. Kapitel 4.1.1) erklären. Die fest installierte Höhenstandsmessung misst im Vergleich den Filterüberstand im GAK-Filter, bezogen auf die Wasseroberfläche und nicht auf die GAK-Oberfläche, sodass sich hier keine Änderungen in den Messergebnissen ergaben und die Werte des Überstandes bei 0,4 m bzw. 40 mbar gleichblieben. Auf Grund dieser Unstimmigkeit wird der Eindruck erweckt, dass die Sonde 5 mit 60 mbar einen höheren Filterüberstand als die Höhenstandssonde mit 40 mbar misst.

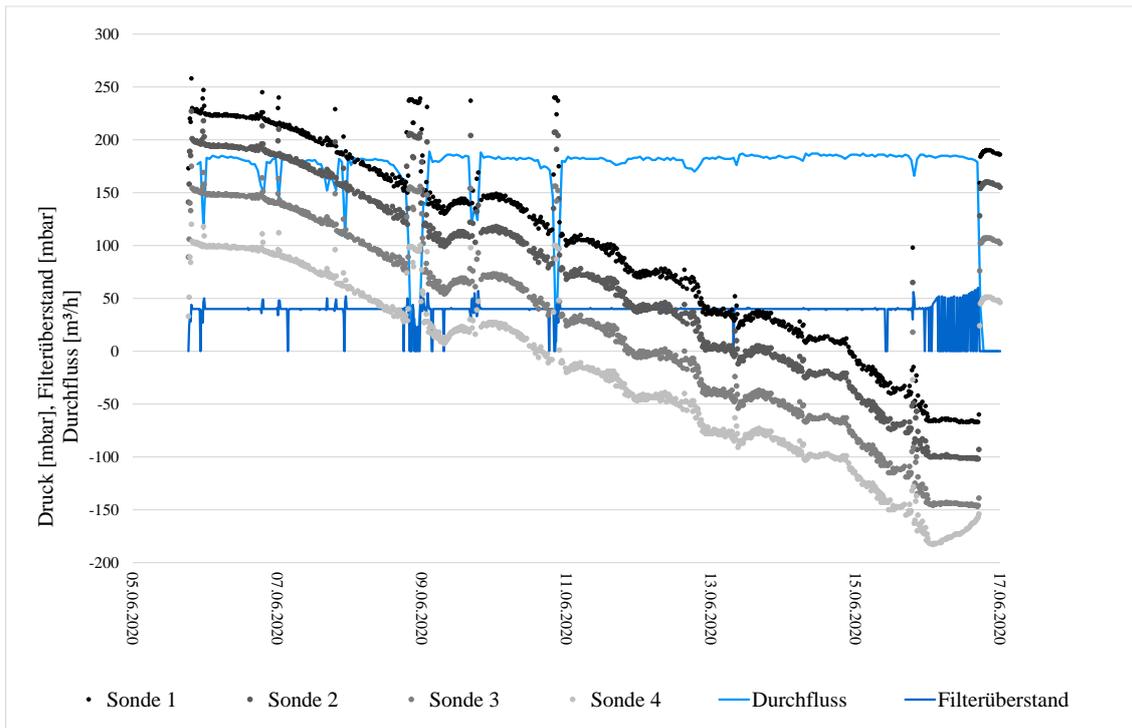


Abbildung 29: Druckverlauf im Filterbett für das Filtrationsintervall vom 06.06. – 16.06.2020

In Abbildung 30 ist das Micheau-Diagramm für das Filtrationsintervall vom 06.06. – 16.06.2020 dargestellt. Hierbei wird auf die Darstellung von Sonde 5 verzichtet, da vermutet wird, dass sich die Sonde über dem Filterbett befindet und somit lediglich den hydrostatischen Druck misst.

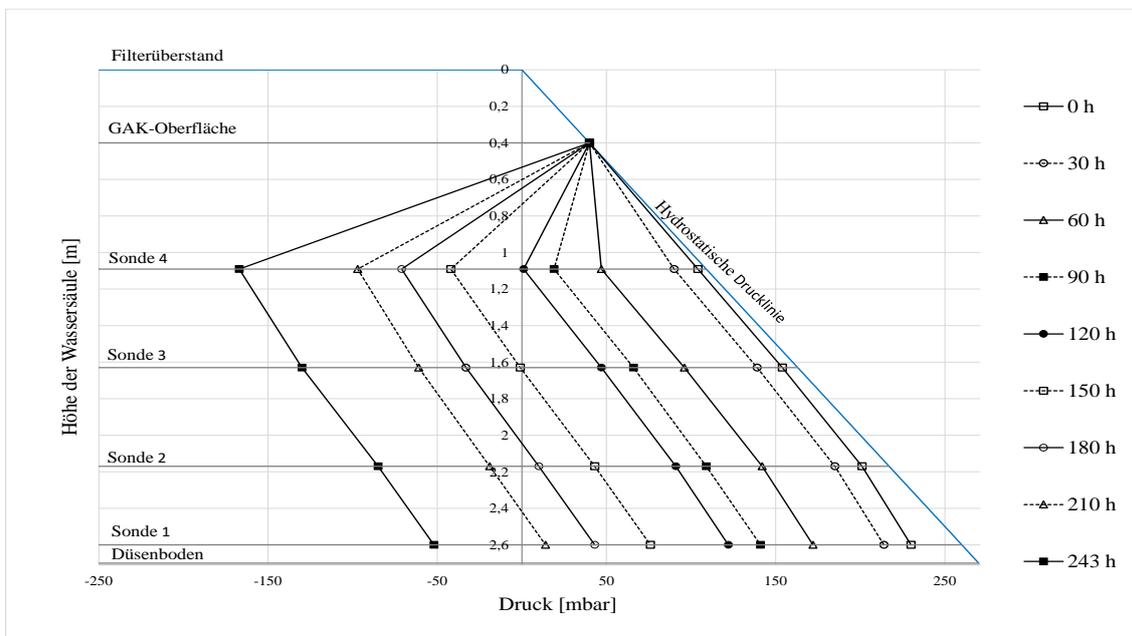


Abbildung 30: Druckverlauf für den Filtrationszyklus vom 06.06. – 16.06.2020 über die Zeit und die Filterbetthöhe (Micheau-Diagramm)

### 4.1.3 Ermittlung der maximalen Filtrationsintervalllänge

Die Spülung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen wird anhand des Anstiegs des Filterüberstandes um 30 cm bei gleichzeitig 100 %-iger Öffnung der Auslaufklappe ausgelöst. Durch die zuvor genannten unterschiedlichen Betriebsweisen mit Beschickung Ablauf NK und mit Ablauf FloFi und die daraus resultierenden unterschiedlichen Feststoffgehalte im Zulauf (s. Kapitel 4.1.4) ergeben sich die in folgenden Diagrammen (Abbildung 31 und Abbildung 32) dargestellten Filterlaufzeiten bzw. die durchgesetzten Bettvolumina zwischen zwei Spülungen. Im Mittel erreicht der GAK-Filter bei Beschickung mit Ablauf NK eine Laufzeit pro Filtrationsintervall von 98 h bzw. 230 BV. Bei der Beschickung mit vorfiltriertem Abwasser wird eine Laufzeit von 473 h bzw. 970 BV pro Filtrationsintervall erreicht.

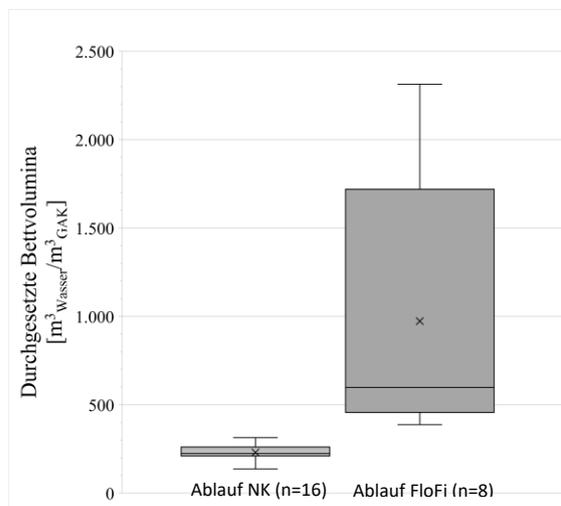


Abbildung 31: Durchgesetzte Bettvolumina pro Filtrationsintervall

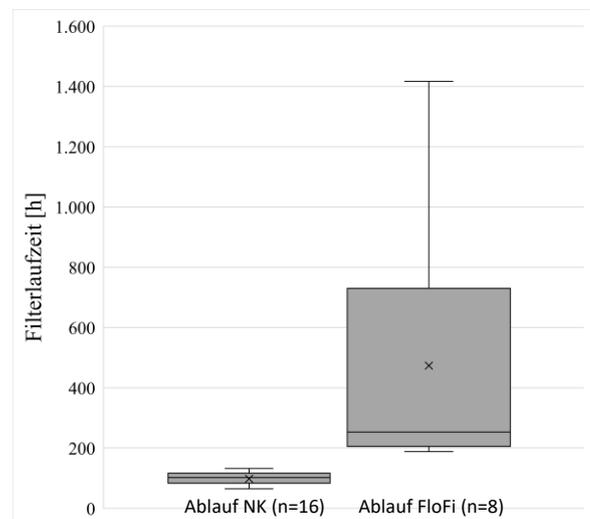


Abbildung 32: Filterlaufzeit pro Filtrationsintervall

Durch das o.g. Auslösekriterium der Spülung wird theoretisch die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters ausgenutzt, jedoch entsteht dabei durch die schwerkraftgetriebene Filtration ein Unterdruck, welcher vor dem Projekt SOLIDUS nicht detektiert wurde. Durch den Höhenunterschied zwischen Filterüberstand und Ablauf Filter sowie durch die oberflächliche Verblockung des Filterbettes entsteht ein Sog, der als Unterdruck messbar ist. Die Folgen solcher Unterdrücke in Schüttungen sind nachstehend stichpunktartig zusammengefasst:

- Mit abnehmendem Druck nimmt die Gaslöslichkeit im fluiden Medium ab (Henry-Gesetz)
- Dadurch strippt das im Abwasser gelöste Gas (z.B. CO<sub>2</sub>) aus dem Wasser aus und liegt ungelöst im Filterbett vor
- Ausgestrippte Gasblasen haben im Filterbett denselben Effekt wie eingelagerte Feststoffe. Der Filter ist verblockt, obwohl die Aufnahmekapazität hinsichtlich der Feststoffe noch nicht erschöpft ist.
- Die ungelösten Gasblasen können die Fließwege zwischen den GAK-Körnern blockieren, was eine Verringerung des Fließquerschnittes zur Folge hat (Scardina und Edwards, 2004)
- Durch die Verringerung des Fließquerschnittes erhöhen sich die effektiven Filtergeschwindigkeiten, sodass es zu einer kürzeren Kontaktzeit und damit zu einer potentiell schlechteren Adsorption von Mikroschadstoffen kommen könnte (im Rahmen von SOLIDUS nicht gemessen)

Aufgrund des großtechnischen Versuchsaufbaus konnten diese Ausgasungen nicht quantitativ erfasst werden. Eine visuelle Erfassung der Ausgasungen konnte jedoch durch eine Umstellung der Spülung bzw. des Auslösekriteriums der Spülung erfolgen. Im ersten Versuch wurde die Spülung des Filters wie üblich, nach Erreichen des Höhenstandskriteriums ausgelöst. Im zweiten Versuch wurde der Filter gespült, sobald die oberste Sonde (Sonde 5), als diese sich noch im Filterbett befand, einen Unterdruck gemessen hat. In beiden Fällen wurde das Filterbett nicht wie üblich mit einer Luftspülung aufgebrochen (s. Tabelle 6), sondern mit Wasser gespült. Das Ergebnis der Wasserspülung beider Versuche ist in den nachstehenden Abbildungen zu sehen. In der linken Abbildung ist ein deutlicher Austrag von Ausgasungen zu erkennen. Die Wasserspülung ähnelt dabei einer Luftspülung. Bei der durch das Druckkriterium ausgelösten Wasserspülung (Unterdruck in Sonde 5 gemessen) ist aufgewirbelter Schlamm, jedoch keine Ausgasungen, im Filterüberstand zu erkennen (rechtes Bild).



Abbildung 33: Wasserspülung ausgelöst nach Höhenstand



Abbildung 34: Wasserspülung ausgelöst nach Druck

Die linienförmige Ausprägung der Ausgasungen in Abbildung 33 lässt dabei die These zu, dass sich im Filterbett präferierte Fließwege aufgrund von zum einen angelagerten Gasbläschen und zum anderen aufgrund einer unzureichenden Filterspülung ergeben haben. Die derzeit eingestellte Spülung führte nicht zum gewünschten Effekt einer ausreichenden Bettexpansion und damit zum Aufbruch des gesamten Filtermaterials. Dies wird besonders durch den Vergleich der Beschaffenheit der Filteroberfläche vor und nach einer (Luft-) Spülung ersichtlich (s. Abbildung 35 und Abbildung 36). Es ist zu erkennen, dass die in Abbildung 35 dargestellten Erhöhungen nach der Luftspülung in Abbildung 36 immer noch zu sehen sind, wenn auch weniger stark ausgeprägt. Das Filterbett wurde nicht ausreichend aufgebrochen und durchmischt. Somit wurden eventuell entstandene präferierte Fließwege nicht aufgelöst, was nachteilig für den Adsorptionsprozess sein könnte.



Abbildung 35: Filteroberfläche vor Luftspülung



Abbildung 36: Filteroberfläche nach Luftspülung

In den Abbildung 35 sowie Abbildungen 37 und 38 ist außerdem ein Algent Teppich deutlich zu erkennen, der sich über die gesamte Filteroberfläche erstreckt. Neben den zuvor erwähnten Ausgasungen führte die Biomasse aus Algen ebenfalls zu einer Verblockung des Filters. Diese Biomasse wirkt als eine Art Filterkuchen, der einerseits einen zusätzlichen Filterwiderstand verursacht. Zum anderen hält dieser Filterkuchen die eingetragenen Feststoffe überwiegend an der Filteroberfläche zurück, sodass diese größtenteils nicht tiefer ins Filterbett eindringen können (s. auch Kapitel 2.2.5). Es wird vermutet, dass sich der „Algent Teppich“ mit zunehmender Filterlaufzeit immer weiter ausprägt. Außerdem ist zu vermuten, dass bei feststoffarmen Zuläufen und der daraus resultierenden selteneren Rückspülungen diese biologischen Effekte eine größere Rolle bei der Verblockung des Filters spielen als die eingetragenen Feststoffe. Wie bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben, konnten ähnliche Beobachtungen hinsichtlich biologischer Aufwuchseffekte ebenfalls in den Untersuchungen von Fundneider (2020) aufgezeigt werden.



Abbildungen 37 und 38: Algent Teppich auf Filteroberfläche bei Beschickung mit Ablauf FloFi

#### 4.1.4 Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung

##### Beschickung mit Ablauf NK

Zur Ermittlung der Feststoffbelastungen wurden im Zeitraum vom 25.09.2019 bis 10.01.2020 zeitproportionale Mischproben zwischen zwei Spülungen genommen. Aufgrund der variierenden Filterlaufzeiten ergaben sich daraus Mischproben aus einer Filterlaufzeit von 136 h bis 314 h. Insgesamt konnten zur Ermittlung der Feststoffbelastungen neun Spülzyklen ausgewertet werden. Die AFS-Zu- und Ablaufkonzentrationen sind in Tabelle 10 dargestellt. Die Betrachtung der Zulaufkonzentrationen lässt auf eine gut funktionierende NK schließen. Fünf von neun Werten liegen unter  $5 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$  und lediglich ein Messwert liegt über  $10 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ . Die Betrachtung der AFS-Ablaufwerte zeigt, dass 7 von 8 Werten unterhalb der BG von  $2 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$  lagen, was auf eine gute Feststoffabscheidung des GAK-Filters hinweist.

Tabelle 10: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration (bei Beschickung mit Ablauf NK) (Bestimmungsgrenze (BG) von 2 mg<sub>AFS/l</sub>)

Datum Filtrationsintervall		AFS <sub>Zulauf</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf</sub> [mg/l]
von	bis		
09.10.2019	15.10.2019	2,9	< 1,9
15.10.2019	18.10.2019	< 2,0	< 1,9
18.10.2019	23.10.2019	2,8	< 2,0
04.11.2019	08.11.2019	9,5	< 2,0
19.11.2019	22.11.2019	< 2,0	< 2,0
22.11.2019	25.11.2019	12,0	< 2,0
26.11.2019	29.11.2019	9,0	2,4
04.12.2019	09.12.2019	6,8	< 2,0

### Beschickung mit Ablauf FloFi

Aufgrund der langen Filtrationszeiten (im Mittel 473 h) wurden im Untersuchungszeitraum bei Beschickung mit Ablauf FloFi vom 06.02.2020 bis 21.09.2021 keine Mischproben zwischen zwei Spülungen, sondern 14 Stichproben im Zu- und Ablauf der GAK hinsichtlich der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) untersucht (s. Tabelle 11). Im Zulauf der GAK-Filtration lagen 11 von 14 Werten unterhalb der BG. Im Vergleich hierzu lagen im Ablauf der GAK-Filtration 12 der 14 Messwerte unterhalb der BG. Aufgrund des variierenden Probenvolumens lag die BG bei bis zu 2,2 mg<sub>AFS/l</sub> (s. Kapitel 3.4).

Tabelle 11: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration (bei Beschickung mit Ablauf FloFi)

Datum Stichprobe	AFS <sub>Zulauf</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf</sub> [mg/l]
14.01.2021	3,7	< 2,1
20.01.2021	< 2,1	< 2,0
21.01.2021	< 2,0	< 2,0
26.01.2021	< 2,2	2,5
27.01.2021	< 2,2	< 2,1
03.02.2021	< 2,0	2,4
05.02.2021	5,8	< 2,1
09.02.2021	< 2,1	< 2,2
11.02.2021	2,7	< 2,2
16.02.2021	< 2,0	< 1,9
19.02.2021	< 1,9	< 2,0
01.03.2021	< 2,0	< 1,9
03.03.2021	< 2,0	3,4

Darauf aufbauend wurde die Feststoffbelastung, bezogen auf das Filtervolumen ( $74 \text{ m}^3$ ) als auch auf die Filterfläche ( $32 \text{ m}^2$ ), berechnet. Die Abbildung 399 und Abbildung 4040 stellen die Feststoffbelastung bezogen auf jeweils das Volumen (Abbildung 39) und die Filterfläche (Abbildung 40) in Abhängigkeit der Laufzeit pro Filtrationsintervall dar. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Filtrationszeit und damit zunehmendem Filterdurchsatz sich die Feststoffbelastung erhöht (Vgl. dazu Formel in Kapitel 2.2.4). Die Feststoffbelastung variiert von  $0,2$  bis  $2,4 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  (Raumbelastung) je Spülzyklus bzw.  $0,4$  und  $5,5 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{GAK}}$  (Flächenbelastung) je Spülzyklus.

Im Vergleich zu den empfohlenen Feststoffraumbelastungen für konventionelles Filtermaterial von  $2 - 3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je Spülzyklus (DWA-A 203, 2019) fallen die auf der KA Bad Oeynhausen ermittelten Belastungen zum Teil deutlich unter den theoretischen Wert. Dies kann zum einen mit der feineren Körnung und damit mit einer schlechteren raumfiltrierenden Wirkung der GAK zusammenhängen. Zum anderen können jedoch zuvor erwähnte Ausgasungen und Algen einen erheblichen Einfluss auf die Feststoffbelastung haben, da diese zum Verblocken des Filters und damit zu einer verminderten Feststoffaufnahme des Filters führen.

In Abbildung 39 und Abbildung 400 wird zudem die Feststoffzulaufkonzentration zur GAK-Filtration als Farbskala dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass bei Beschickung mit vorfiltriertem Abwasser viele Werte unterhalb der BG lagen, konnte hier kein Zusammenhang zwischen Länge des Filtrationsintervalls und eingetragenen Feststoffen ermittelt werden. Für den Zeitraum mit Beschickung mit Ablauf NK konnten zwar variierende Feststoffzulaufkonzentration festgestellt werden, jedoch konnte hier ebenfalls kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Feststoffkonzentration im Zulauf der GAK und der maximalen Filterbelastung festgestellt werden. Eine leichte Tendenz, dass die Feststoffraum- bzw. -flächenbelastung mit zunehmender AFS-Zulaufkonzentration ansteigt, ist jedoch zu erkennen. Insgesamt ist anzunehmen, dass neben dem Feststoffeintrag weitere Faktoren (Algen, Ausgasungen) die maximale Feststoffbelastung stark beeinflussen.

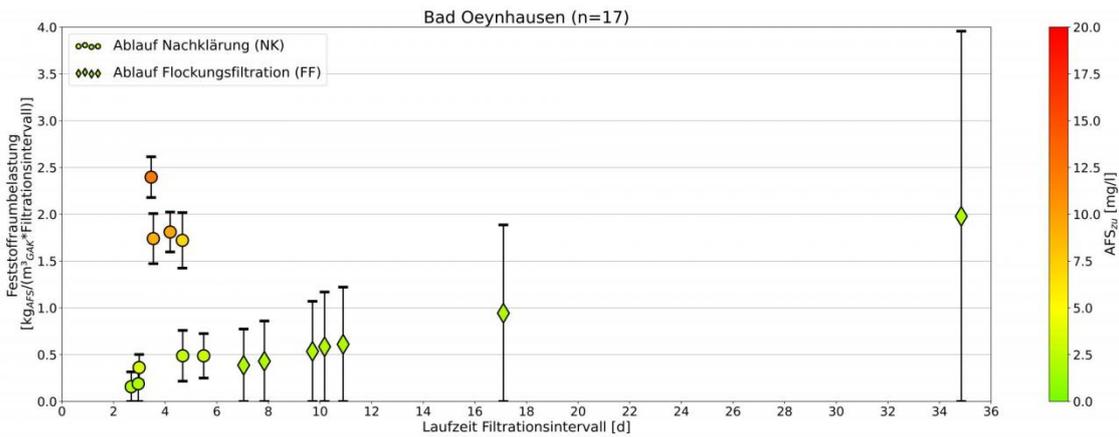


Abbildung 39: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen

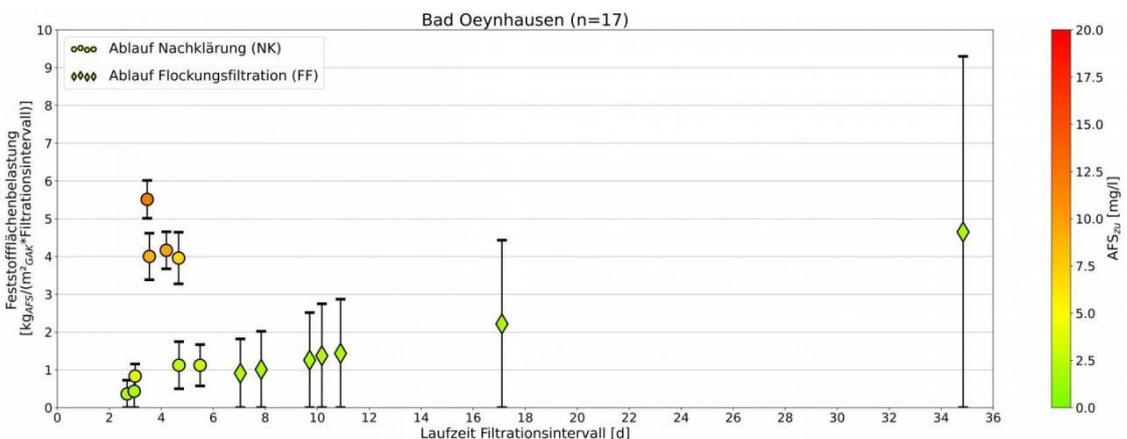


Abbildung 40: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen

#### 4.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse zu den Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen wie folgt auflisten:

- Die Hausmethode der Probenahme mittels Sauger eignet sich gut zur Ermittlung von Korngrößen in unterschiedlichen Filterbettiefen. Zur Beurteilung einer mechanischen Abrasion der GAK-Körner ist diese Methode nicht geeignet, da eine leichte Abrasion der Körner durch die Probenahme selbst nicht ausgeschlossen werden kann.
- Aufgrund des eingestellten Kriteriums zum Auslösen der Spülung (Anstieg des Filterüberstandes bei gleichzeitig 100 %-iger Öffnung der Auslaufklappe) wurde die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters ausgenutzt (vollständiges Verblocken des Filters).

- Aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen Filterüberstand und Auslauf Filter kommt es bei dem schwerkraftgetriebenen, abwärts durchströmten Filter der KA Bad Oeynhausen in den unteren Filterschichten zu einem Unterdruck von bis zu -180 mbar.
- Diese Unterdrücke führen zu Ausgasungen im Filterbett und können damit zur (Teil-) Verblockung der Filter führen. Zudem können sich durch ungelöst vorliegenden Gasblasen zwischen den GAK-Körnern bevorzugte Fließwege bilden, die aufgrund erhöhter Filtergeschwindigkeiten zu einer schlechteren Adsorptionsleistung der GAK führen können.
- Eingetragene Feststoffe lagern sich vorwiegend an der Oberfläche bzw. in der obersten Schicht der GAK-Filtration ab (hier maximal 0,6 m Filtrationstiefe). Ein ausgeprägtes Algenwachstum auf der Filteroberfläche kann diesen Prozess verstärken.
- Die maximal ermittelte Feststoffraumbelastung bzw. Feststoffflächenbelastung je Spülzyklus liegt bei 0,2 bis 2,4  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  bzw. 0,4 bis 5,5  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{GAK}}$ .
- Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Feststoffkonzentration im Zulauf der GAK-Filtration und der maximalen Feststoffbelastung (Länge der Filtrationsintervalle) konnte nicht festgestellt werden. Bei Beschickung mit Ablauf NK ist jedoch ein leichter Zusammenhang zwischen zunehmender Feststoffbelastung und zunehmender AFS-Zulaufkonzentration zu erkennen.
- Die Filterlaufzeiten erhöhten sich im Mittel von 98 h (ca. 4 d) bei Beschickung mit Ablauf NK auf 473 h (ca. 20 d) bei der Beschickung mit vorfiltriertem Abwasser.

## 4.2 KA Gütersloh-Putzhagen

Der Untersuchungszeitraum des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen teilt sich in die zwei nachstehenden Zeiträume auf:

- 17.02.2020 bis 13.05.2020: Filtrationsintervalle 10 – 21 Tage, Filtergeschwindigkeit  $v_f = \text{ca. } 5 \text{ m/h}$
- 29.10.2020 bis 27.01.2021: Filtrationsintervalle  $> 21$  Tage, Filtergeschwindigkeiten  $v_f = 7,2 - 9,3 \text{ m/h}$

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf die beiden Untersuchungszeiträume detailliert eingegangen.

### 4.2.1 Kornverteilung im Filterbett

Die Korngrößenverteilungen im GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen zeigen eine deutliche Klassierung der Aktivkohle nach Korngröße über die Tiefe des Filters (Abbildung 41 und Abbildung 42) in Einklang mit den Ergebnissen aus der Literatur (Jekel und Ruhl, 2016). Hierbei wird ersichtlich, dass die unterste Probenahmestelle (264 – 269 cm, auf Höhe Düsenboden) mit einem Massenanteil von ca. 60 % deutlich von der Stützschiicht ( $> 2,5 \text{ mm}$ ) geprägt ist. 5 – 10 cm unterhalb der GAK-Oberfläche sind vornehmlich GAK-Körner mit einem Durchmesser  $< 1 \text{ mm}$  zu finden (Massenanteil ca. 85 %). Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Siebanalysen, dass eine 100 %-ige Klassierung des Filterbettes nicht ermöglicht wird, da GAK-Körner  $> 2,5 \text{ mm}$  (Stützschiicht) im oberen Bereich des Filters erfasst wurden (Massenanteil ca. 20 %). Mit Zunahme der Tiefe nimmt der Anteil der feineren Kornfraktion deutlich ab bzw. der Anteil der größeren Kornfraktion deutlich zu. Dieser Effekt trägt maßgeblich zur guten raumfiltrierenden Wirkung von aufwärts durchströmten Abwasserfiltern bei (siehe Kapitel 2.1.1; Barjenbruch et al., 1993). Somit kommen die eingetragenen Feststoffe mittels dieser Verteilung zunächst mit der gröbereren GAK in Kontakt. Der damit einhergehende größere Zwischenraum wird – im Vergleich zu kleineren Zwischenräumen bei feinkörnigerer GAK – nicht oder weniger schnell durch Feststoffe verblockt, sodass die Feststoffe weiter ins Filterbett eindringen können. Somit bildet sich kein Filterkuchen aus (Jekel und Ruhl, 2016). Es ist anzumerken, dass die dritte Probenahmetiefe aufgrund eines Probenahmefehlers bei den beiden Probenahmen nicht identisch ist (Vgl. 161 – 166 cm (21.01.20) bzw. 131 – 136 cm (28.01.21)).

Der Vergleich der Abbildung 41 (Probenahme Januar 2020) und Abbildung 42 (Probenahme Januar 2021) lässt aufgrund des fehlerbehafteten Probenahmeverfahrens keine eindeutige Aussage bezüglich einer möglichen Kornabrasion zu. Die Filterbetthöhe war in beiden

Untersuchungszeiträumen mit 2,70 m identisch, sodass davon auszugehen ist, dass es zu keinem Verlust von Kohle durch eine fehlerhafte Betriebs- oder Spülweise kam.

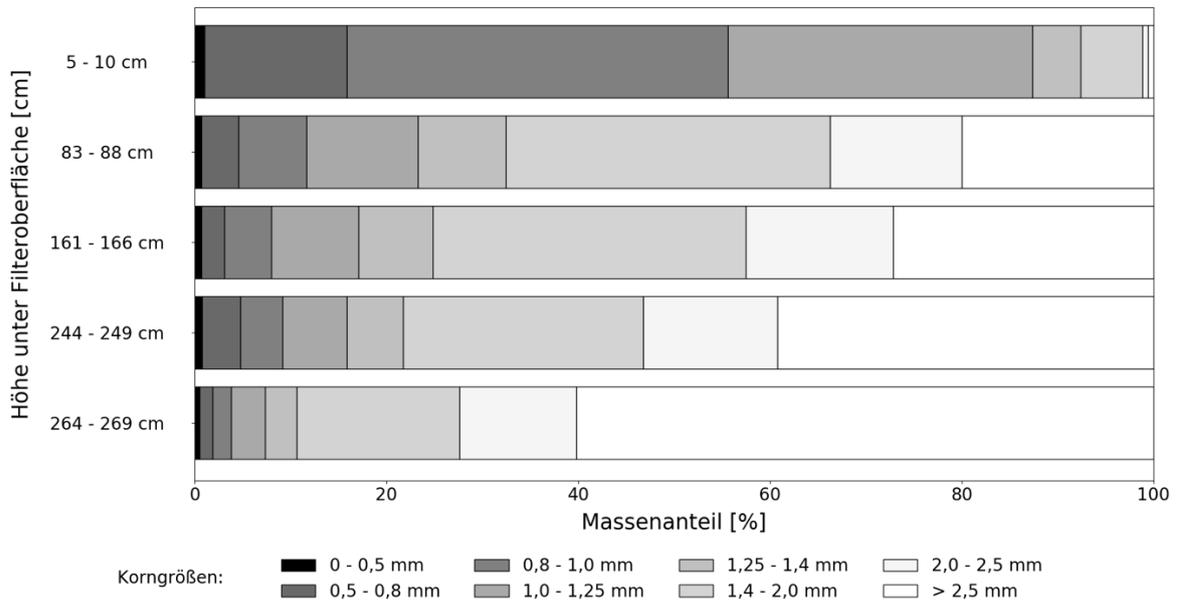


Abbildung 41: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 21.01.2020

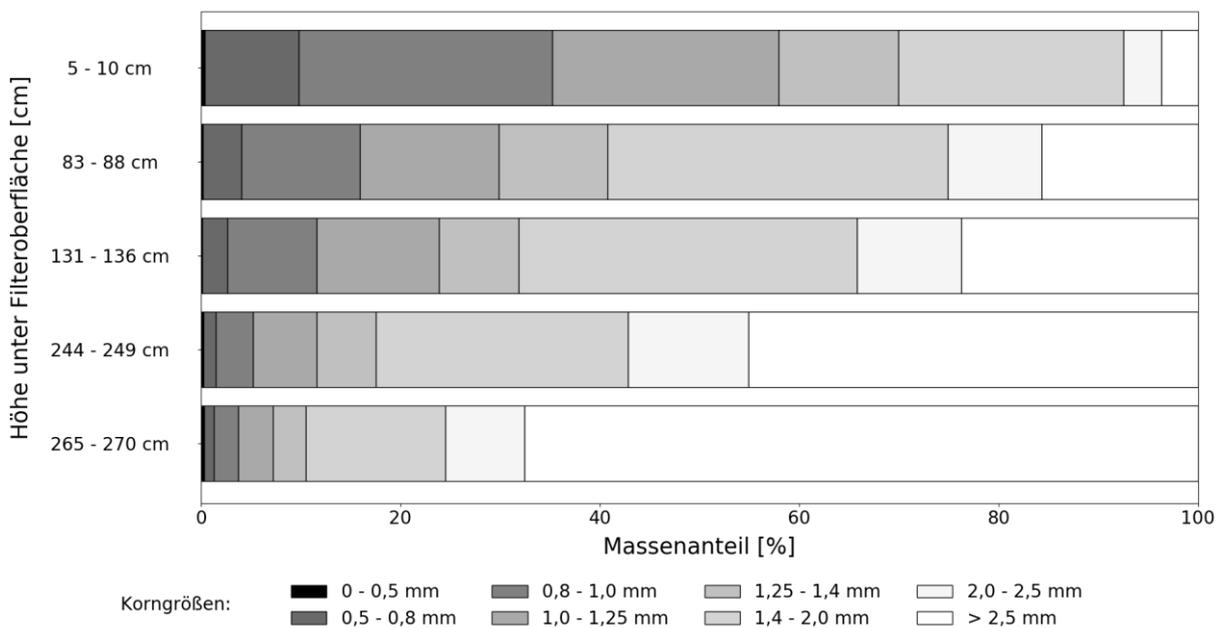


Abbildung 42 Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 28.01.2021

### 4.2.2 Druckverlauf im Filterbett

Wie bei abwärts durchströmten Filtern nimmt bei aufwärts durchströmten Filtern der Filterwiderstand aufgrund der zunehmenden Ablagerungen von Feststoffen mit fortschreitender Filtrationszeit zu. In aufwärts durchströmten Filtern, wie auf der KA Gütersloh-Putzhagen vorliegend, wird mit steigender Filterlaufzeit mehr Druck benötigt, um den Solldurchfluss durch das Filterbett zu erhalten, sodass insgesamt ein Druckanstieg und kein Druckabfall zu verzeichnen ist. Beim GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen wird der Solldurchfluss über eine Beschickungspumpe reguliert. Im gesamten Untersuchungszeitraum wurden 8 Filtrationsintervalle im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIDUS untersucht. Abbildung 43 veranschaulicht die Druckverhältnisse in unterschiedlichen Filterbettstiefen für das Filtrationsintervall vom 17.02.2020 – 27.02.2020. Dabei befindet sich Sonde 1 in Bodennähe, während Sonde 5 oben ist. Ferner werden die Messergebnisse der Trübung im Ablauf des GAK-Filters (Sonde im Filterüberstand) sowie der Durchfluss in Abbildung 43 dargestellt. Die Abbildungen der weiteren Filtrationsintervalle sind dem Anhang C zu entnehmen.

Nach einer Filterlaufzeit von 10 Tagen konnten nachstehende Beobachtungen zusammenfassend festgehalten werden:

- Ein Druckanstieg ist lediglich in der untersten Sonde 1 auf Höhe von 2,65 m unterhalb der GAK-Oberfläche zu erkennen ( $\Delta P$  von ca. 20 mbar).
- Alle weiteren Sonden zeigen keinerlei Druckdifferenz an.
- Tagsüber wird der GAK-Filter mit einem konstanten Durchfluss beschickt, woraus sich eine Filtergeschwindigkeit von  $v_f = 5$  m/h ergibt. In den Nachtstunden wird der Filter zur Sicherstellung einer ausreichenden Spülwasserbevorratung teilweise nicht beschickt.
- Die Trübung im Ablauf nimmt nach der Spülung am 17.02. zunächst deutlich ab, erreicht etwa am 23.02. einen Tiefpunkt und nimmt danach wieder zu. Sie bewegt sich jedoch immer noch in einem sehr niedrigen Bereich von  $< 1$  TE/F.

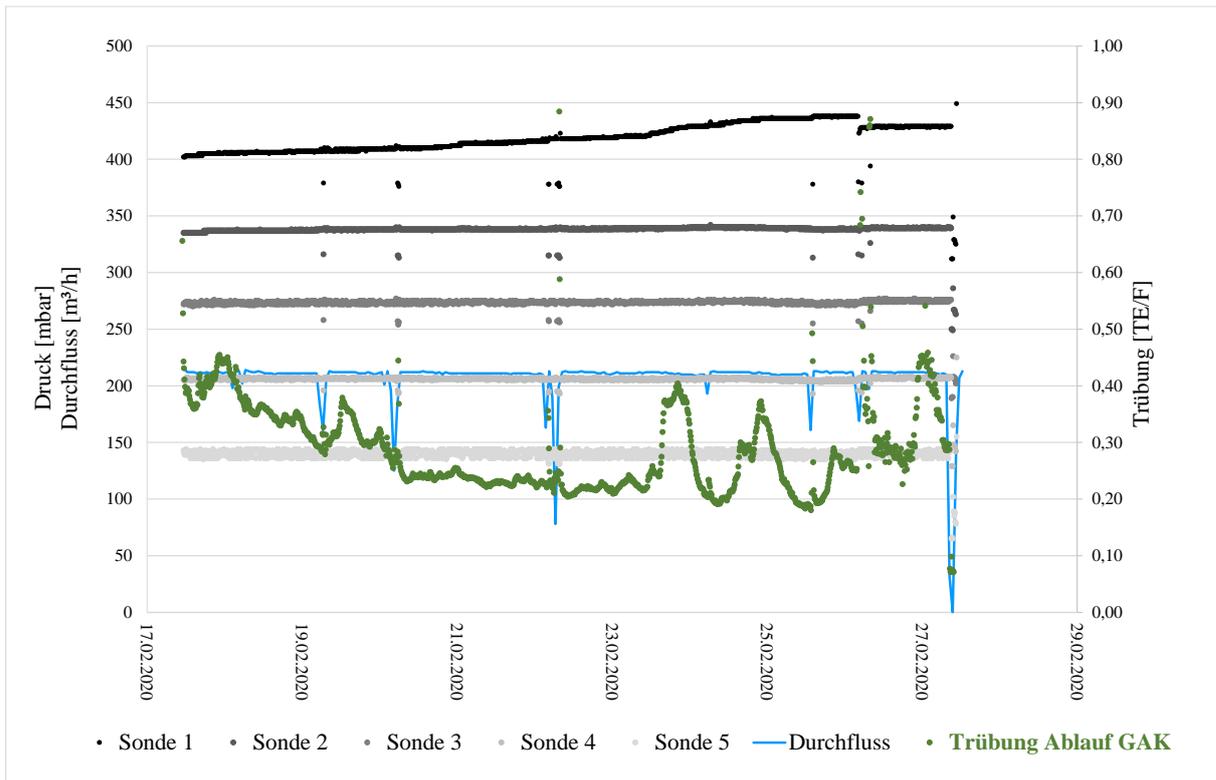


Abbildung 43: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 17.02. – 27.02.2020

Der Trübungsverlauf in Abbildung 43 ist charakteristisch für ein Filtrationsintervall, welches sich nach Metzger et al. (2011) in eine Einarbeitungs-, Arbeits- und Verschlechterungsphase unterteilt (Vgl. Kapitel 2.1.1). Beim Eintreten der sogenannten Verschlechterungsphase kann ein Auslösen der Filterspülung erfolgen.

Bedingt durch die verhältnismäßig geringe Trübung im Ablauf der GAK nach einem Filtrationsintervall von 10 Tagen und den zeitgleich nicht signifikanten Anstieg des Drucks wurde im Rahmen des Projektes SOLIDUS die Dauer der Filtrationsintervalle deutlich erhöht. Nachstehende Abbildung 44 zeigt die Druck- und Trübungsverhältnisse des Filtrationsintervalls vom 17.12.2020 bis 27.01.2021. Hierbei ist anzumerken, dass die Filtergeschwindigkeit bei ca. 7,5 m/h lag und sich der höhere Durchsatz in einem höheren Anfangsdruck von 420 mbar in der untersten Sonde bemerkbar machte (Vgl. 400 mbar bei  $v_f = 5$  m/h). Nach 41 Tagen Filterlaufzeit konnten zusammenfassend nachstehende Beobachtungen gemacht werden:

- Der höchste Druckanstieg wurde in der untersten Sonde 5 verzeichnet ( $\Delta P = 20$  mbar). Der Druckanstieg stagniert jedoch nach etwa 5 Tagen bei dem Wert von 440 mbar.
- Sonde 4 und 3 lassen ebenfalls einen Druckanstieg erkennen, jedoch fällt dieser geringer als der von Sonde 5 gemessenen Druckanstieg ( $\Delta P_{\text{Sonde 4}} = 15$  mbar,

- $\Delta P_{\text{Sonde3}} = 5 \text{ mbar}$ ). Auch hier erreicht der Druckanstieg nach etwa 5 Tagen Filtrationsbetrieb ein Plateau und steigt nicht weiter an.
- Die Trübung nimmt nach der Spülung zunächst ab. Nach etwa 9 Tagen Filtrationsbetrieb erreicht diese einen Tiefpunkt und nimmt danach wieder zu. Die Streuung der Trübung nimmt dabei ebenfalls zu (s. auch Anhang C).

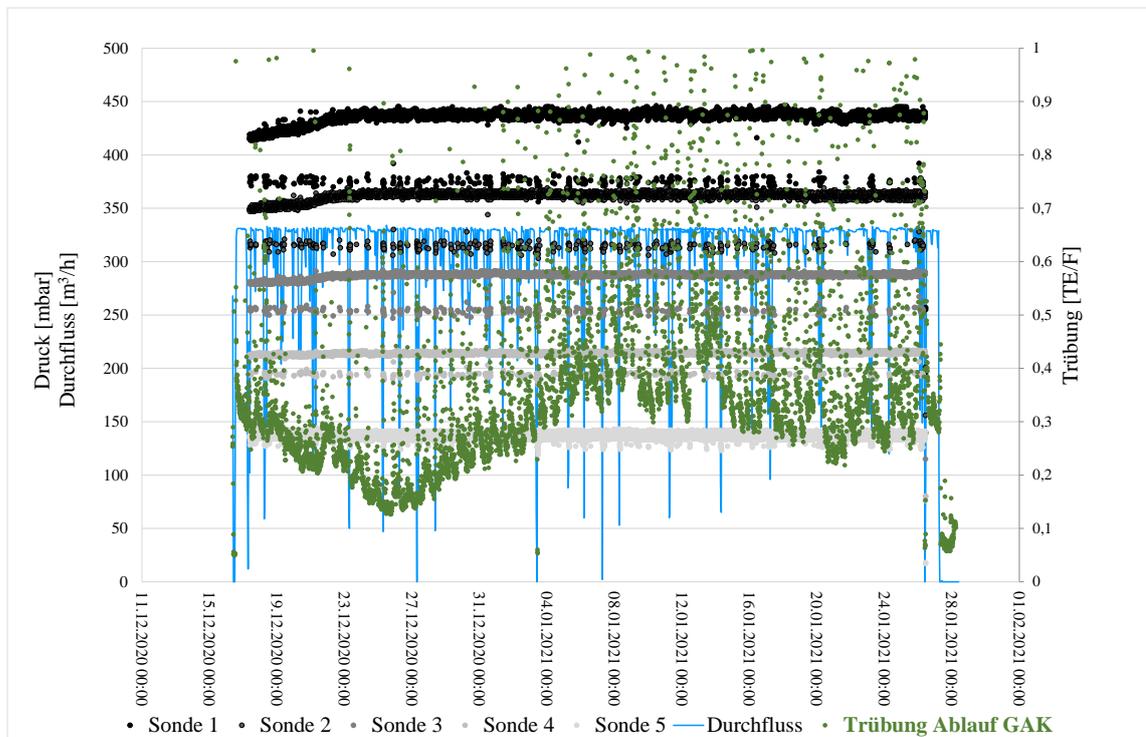


Abbildung 44: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 16.12.2020 – 28.01.2021

Sowohl der Verlauf der gemessenen Drücke als auch der Trübung im Ablauf der GAK lassen darauf schließen, dass es während der Filtration zu einer Teil-Fluidisierung des Filterbettes und damit zu einer Umlagerung der GAK-Körner mit resultierendem Teilaustrag der Feststoffe in den Ablauf der GAK kam (Vgl. Kapitel 2.2; Altmann et al. (2016)). Der GAK-Filter zeigt deshalb auch nach diesem langen Filtrationsintervall keine hydraulische Verblockung, wie sie bei den Untersuchungen des abwärts durchströmten GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen deutlich zu beobachten war (vollständige Verblockung des Filterbettes, Filtration nicht mehr möglich). Nach 6 Wochen Betrieb konnte der GAK-Filter mit dem gewohnten Spülprogramm gespült werden. Stärkere Verblockungen wurden vom Betriebspersonal dabei nicht beobachtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen auf der KA Gütersloh-Putzhagen zeigen, dass je nach gewünschter Ablauflaufqualität Filterlaufzeiten  $> 41 \text{ d}$  möglich sind. Eine bedarfsgerechte Spülung der Filtration könnte zukünftig anhand der Trübung im Ablauf der GAK erfolgen (Überschreitung von definierten Trübungswerten bei Feststoffdurchbruch).

### 4.2.3 Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung

Zur Bestimmung des Feststoffrückhalts wurden zeitproportionale Mischproben zwischen zwei Spülungen genommen. Bei Filtrationslängen von mehreren Wochen wurden mehrere Wochenmischproben pro Filtrationsintervall entnommen (z.B. bei einem Filtrationsintervall von drei Wochen wurden drei Wochenmischproben entnommen). Insgesamt konnten in dem Untersuchungszeitraum von insgesamt 24 Wochen für 16 Wochen AFS-Werte im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration auf der KA Gütersloh-Putzhagen ermittelt werden (s. Tabelle 12). Von den 16 Werten lagen hierbei 15 Werte im Zulauf und 14 Werte im Ablauf unter der BG. Für die restlichen 8 Wochen des Untersuchungszeitraumes konnten keine Proben zur Bestimmung der AFS-Konzentrationen genommen werden. Für diese Intervalle wurde auf Grundlage der restlichen Analysen angenommen, dass sowohl die Zulauf- als auch die Ablaufkonzentration bei  $< 2 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$  lag (in Tabelle hell orange markiert).

Tabelle 12: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration

Datum Filtrationsintervall		Datum Probenahme		AFS <sub>Zulauf</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf</sub> [mg/l]
von	bis	von	bis		
17.02.2020	27.02.2020	17.02.2020	27.02.2020	< 2,0	< 2,0
27.02.2020	19.03.2020	27.02.2020	05.03.2020	< 2,0	< 2,0
		05.03.2020	12.03.2020	4,0	3,7
		12.03.2020	19.03.2020	< 2,0	4,1
19.03.2020	02.04.2020	19.03.2020	26.03.2020	< 2,0	< 2,0
		26.03.2020	02.04.2020	< 2,0	< 2,0
02.04.2020	23.04.2020	Keine Probenahme		< 2,0	< 2,0
		Keine Probenahme		< 2,0	< 2,0
		Keine Probenahme		< 2,0	< 2,0
23.04.2020	13.05.2020	Keine Probenahme		< 2,0	< 2,0
		30.04.2020	07.05.2020	< 2,0	< 2,0
		07.05.2020	13.05.2020	< 2,0	< 2,0
29.10.2020	19.11.2020	29.10.2020	05.11.2020	< 2,0	< 2,0
		05.11.2020	12.11.2020	< 3,4	< 3,4
		12.11.2020	19.11.2020	< 2,1	< 2,1
19.11.2020	16.12.2020	19.11.2020	26.11.2020	< 2,4	< 2,2
		26.11.2020	03.12.2020	< 2,0	< 2,1
		03.12.2020	10.12.2020	< 2,1	< 2,2
		Keine Proben		< 2,0	< 2,0
16.12.2020	27.01.2021	Keine Proben		< 2,0	< 2,0
		Keine Proben		< 2,0	< 2,0
		Keine Proben		< 2,0	< 2,0
		13.01.2021	20.01.2021	< 2,1	< 2,1
		20.01.2021	27.01.2021	< 2,2	< 2,1

Auf dieser Hypothese aufbauend wurde sowohl die Feststoffraumbelastung als auch die Feststoffflächenbelastung berechnet. In den nachstehenden Abbildung 45 und Abbildung 46 wird die Feststoffbelastung (jeweils auf das Filtervolumen bzw. die Filterfläche bezogen) in Abhängigkeit der Laufzeit und AFS-Konzentration im Zulauf zur GAK pro Filtrationsintervall dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass sowohl die Konzentrationen im Zulauf als auch im Ablauf des GAK-Filters fast immer unter BG lag, sind die ermittelten Feststoffbelastungen mit hohen Unsicherheiten behaftet und streuen deshalb in einem großen Bereich. Die ermittelte Feststoffbelastung variiert von 0,55 bis 3,7 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> je Filtrationsintervall. Vier von sieben ermittelten Werten liegen unterhalb der empfohlenen Feststoffraumbelastungen für konventionelles Filtermaterial von 2 – 3 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>Filtermaterial</sub> je Filtrationsintervall (DWA-A 203, 2019). Zwei weitere Werte liegen innerhalb des empfohlenen Bereichs. Das Filtrationsintervall mit der längsten Laufzeit von fast 42 d liegt mit 3,7 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> oberhalb der Empfehlung. Aufgrund der besseren räumlichen Ausnutzung des gesamten Filterbettes erreicht der aufwärts durchströmte GAK-Filter höhere Feststoffbelastungen als der abwärts durchströmte Filter auf der KA Bad Oeynhausen (Vgl. Kapitel 4.1.4). Die Feststoffflächenbelastung lag mit 1,21 und 8,07 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus ebenfalls über der ermittelten Flächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen. Aufgrund der Tatsache, dass 94 % der Werte für die AFS-Konzentrationen im Zulauf zum GAK-Filter unterhalb der BG lagen, konnte kein Zusammenhang zwischen Länge des Filtrationsintervalls und eingetragenen Feststoffen ermittelt werden.

Ferner ist anzumerken, dass der GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen ausschließlich nach Zeit gespült wurde und nicht nach hydraulischer Verblockung. Eine hydraulische Verblockung konnte im gesamten Untersuchungszeitraum kein einziges Mal nachgewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass der Filter aus hydraulischer Sicht und unter Beachtung der gewünschten Ablaufqualität länger als 41 d ohne Spülung betrieben werden kann.

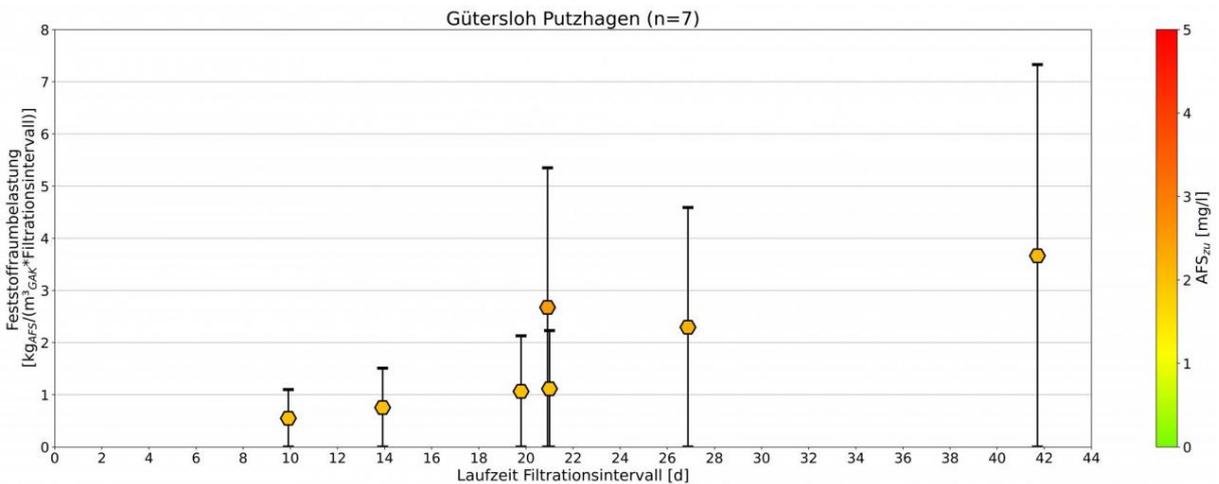


Abbildung 45: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen

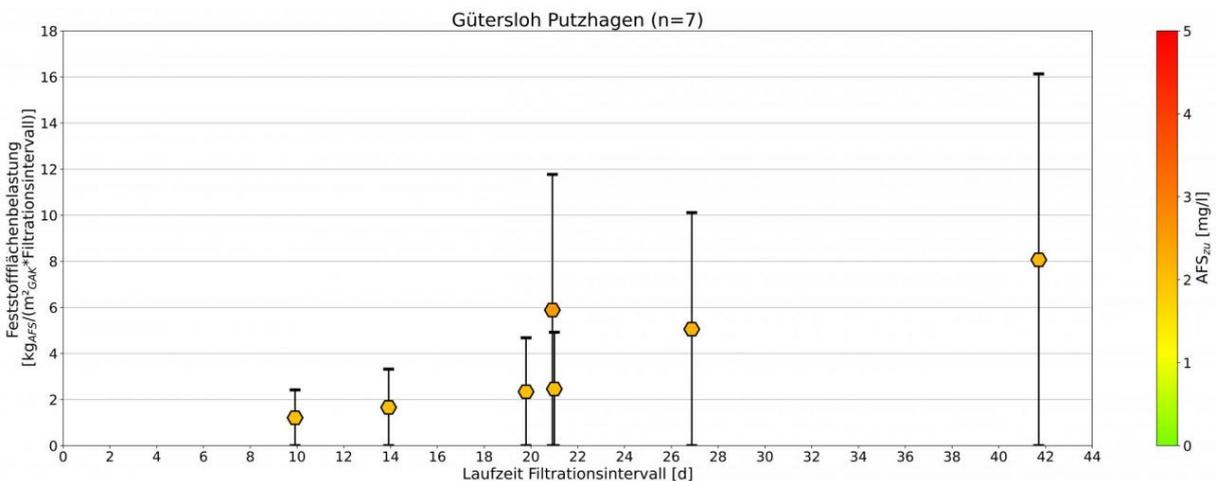


Abbildung 46: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen

#### 4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Hausmethode der Probenahme mittels Sauger eignet sich gut zur Ermittlung von Korngrößen in unterschiedlichen Filterbettiefen. Zur Beurteilung einer mechanischen Abrasion der GAK-Körner ist diese Methode nicht geeignet, da zumindest eine leichte Abrasion der Körner durch die Probenahme selbst nicht ausgeschlossen werden kann.
- Der Verlauf der Drücke im Filterbett als auch der Trübung lassen darauf schließen, dass das GAK-Filterbett im Betrieb (teil-) fluidisiert wird und es so immer mal wieder zu einem Feststoffaustrag kommt. Dadurch erfährt der aufwärts durchströmte Filter keine hydraulische Verblockung, aber eine Verschlechterung der Filtratqualität, was sich im Verlauf der Trübung widerspiegelt.

- Es ergeben sich rechnerische Feststoffraumbelastungen bzw. Feststoffflächenbelastungen von 0,55 bis 3,7 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> bzw. 1,21 und 8,07 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus, wobei ein Maximum hier nicht erreicht wurde, da es im gesamten Untersuchungszeitraum zu keinerlei hydraulischen Verblockungen während der Filtrationsintervalle kam. Aufgrund der Tatsache, dass fast alle AFS-Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, sind die ermittelten Feststoffbelastungen jedoch als Richtwerte und nicht als Absolutwerte zu verstehen.
- Ein Zusammenhang zwischen der Feststoffkonzentration im Zulauf der GAK-Filtration und der maximalen Feststoffbelastung (Länge der Filtrationsintervalle) konnte aufgrund der geringen AFS-Konzentration im Zulauf zur GAK nicht ermittelt werden. Weitere Einflussfaktoren auf die hydraulische Verblockung des aufwärts durchströmten GAK-Filters konnten nicht ermittelt werden, da insgesamt keine hydraulische Verblockung festgestellt werden konnte.
- Aufgrund der Tatsache, dass keine hydraulische Verblockung festgestellt werden konnte, ist zu vermuten, dass die Laufzeit der Filtrationsintervalle je nach geforderter Ablaufqualität mehr als 41 d betragen kann. Bei Verlängerung der Filtrationsintervalle sind sowohl die Ablaufwerte (z.B. CSB, P) als auch die Trübung im Ablauf des GAK-Filters zu beobachten.

### 4.3 KA Obere Lutter

Die Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter liefern im nachstehenden Zeitraum:

- 03.06.2020 bis 21.10.2020: Filtrationsintervalle 5 – 24 Tage (ca. alle 100 BV), Filtergeschwindigkeit  $v_f = 1,0 - 3,5$  m/h,  $v_{f,mittel} = 1,5$  m/h

#### 4.3.1 Kornverteilung im Filterbett

Die Ergebnisse der Siebanalysen zeigen, dass sich die GAK-Körner nach Größe klassieren. Die Fraktion mit feinkörnigem Material ( $< 1$  mm) nimmt in der Probenahmetiefe von 5 – 10 cm unterhalb der GAK-Oberfläche einen Massenanteil von etwa 55 % ein, wohingegen der Massenanteil in der Tiefe von 209 – 214 cm bei etwa 35 % liegt (Abbildung 47). Insgesamt zeigt sich bis auf der obersten Tiefe (5 – 10 cm) keine Klassierung der Körner nach Größe. Obwohl es sich auf der KA Bad Oeynhausen ebenfalls um einen Einschichtfilter handelt, konnte dort zumindest bei der ersten Probenahme eine eindeutige Klassierung festgestellt werden (s. Abbildung 23). Eine wenig bis nicht vorhandene Klassierung lässt auf fehlerhaft Spüleinstellungen schließen. Eine unzureichende Spülung kann zu dauerhaften Verblockungen des Filtermaterials und damit zu einer Einstellung des Filterbetriebs bzw. Austausch des Filtermaterials führen (s. Kapitel 4.3.2). Bei Vergleich der Abbildung 47 (Probenahme im Juni 2020) und Abbildung 48 (Probenahme im Oktober 2020) kann festgestellt werden, dass keine eindeutigen Schlüsse zur Abrasion der GAK-Körnung gezogen werden können. Die Korngrößenverteilungen bleiben annähernd gleich. Mögliche Differenzen können ein Resultat des fehlerbehafteten Probenahmeverfahrens sein.

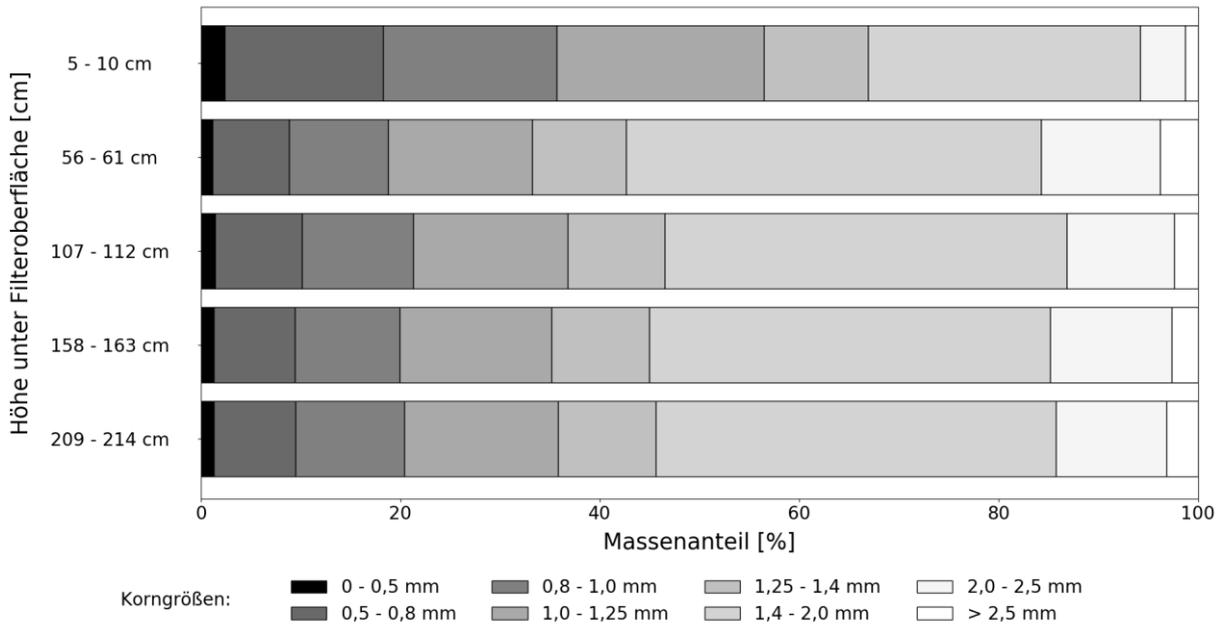


Abbildung 47: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 09.06.2020

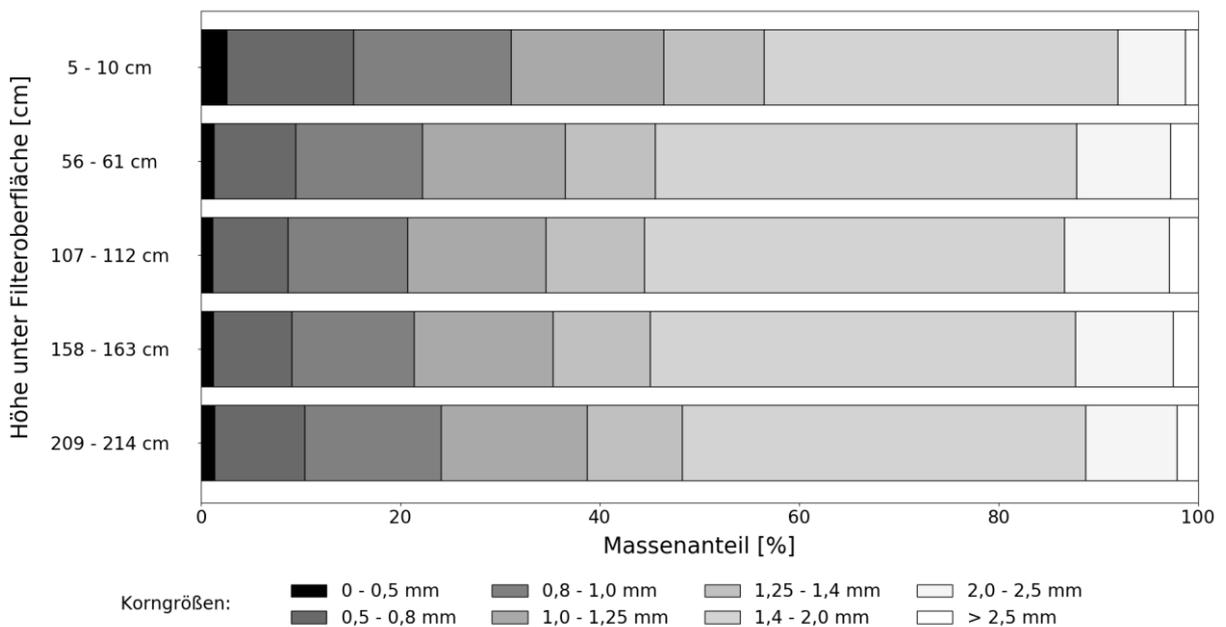


Abbildung 48: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Tiefen, Probenahme am 29.10.2021

### 4.3.2 Druckverlauf im Filterbett

In nachstehender Abbildung 49 werden der Druckverlauf, die Trübung sowie der Durchfluss im Filterbett für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Ein Detailauszug eines Filtrationsintervalls (03.07.20 – 14.07.20) ist in Abbildung 50 zu finden. Insgesamt wurden 13

Filtrationsintervalle im Rahmen von SOLIDUS untersucht, deren Detaildarstellung im Anhang D zu finden ist. Aufgrund des Filtermanagements der KA Obere Lutter befindet sich der untersuchte GAK-Filter 5 nicht dauerhaft im Betrieb und wird je nach CSB-Konzentration im Zulauf der Filtration zu- oder abgeschaltet. Damit ergibt sich ein diskontinuierlicher Betrieb bzw. eine diskontinuierliche Beschickung. Der Solldurchfluss wird dabei nicht über eine vorgeschaltete Pumpe reguliert, sondern die Filtration im Freigefälle abläuft (s. Kapitel 3.1.3). Somit wird der Durchfluss maßgeblich durch den Grad der Verblockung des Filterbettes bestimmt.

Bezogen auf die Abbildungen Abbildung 49 und Abbildung 50 lassen sich nachstehende Beobachtungen zusammenfassend festhalten:

- Spülungen sind anhand kurzzeitiger Anstiege von Druck und Trübung erkennbar und kennzeichnen damit den Beginn / das Ende eines Filtrationsintervalls
- Ein Druckanstieg ist nur in den Zeiten, in denen der GAK-Filter durchflossen wird, zu erkennen. Befindet sich der Filter nicht in Betrieb ( $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ ), fällt der Druck in allen Sonden auf den Ruhedruck zurück.
- Bei vier Sonden (Sonde 1, 2, 3 und 5) ist kein Druckanstieg zwischen zwei Spülungen erkennbar.
- Sonde 4 (ca. 55 cm unterhalb der GAK-Oberfläche) zeigt nach den Filterspülungen einen stetigen Druckanstieg.
- Aufgrund des zu weit eingestellten Messbereichs der Trübungssonde kann keine aussagekräftige Einschätzung zum Anstieg der Trübung innerhalb eines Filtrationsintervalls getroffen werden.

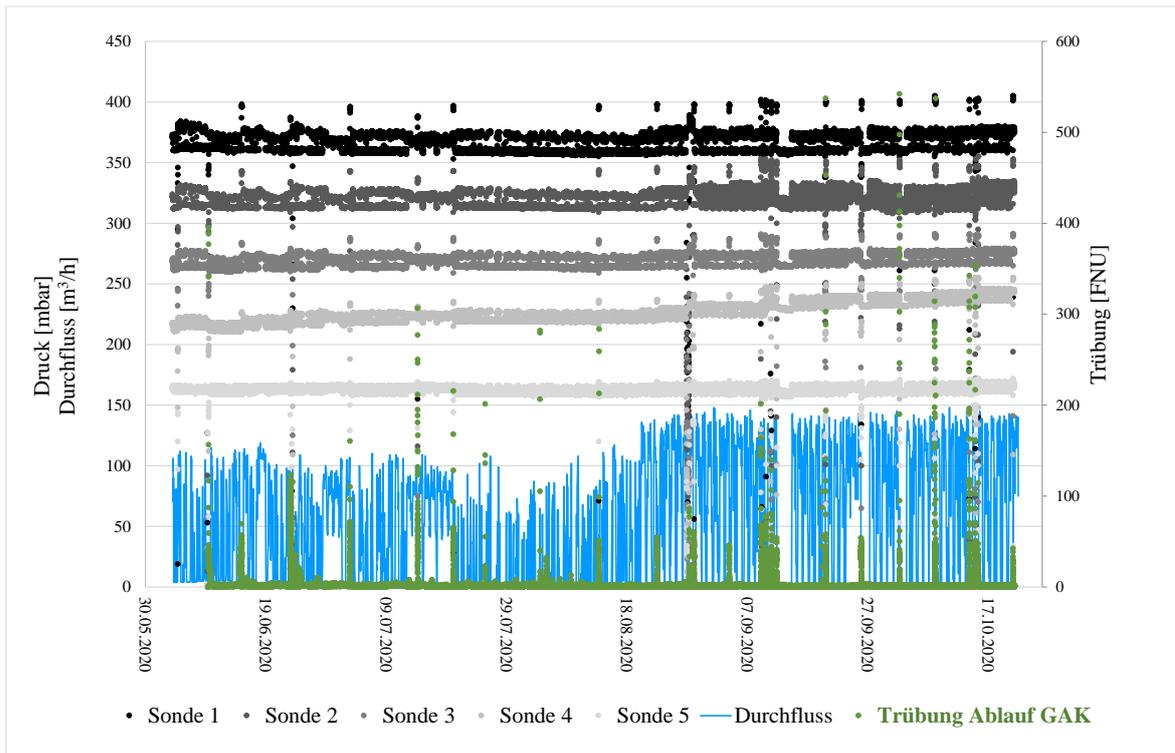


Abbildung 49: Druckverlauf im Filterbett für den gesamten Untersuchungszeitraum

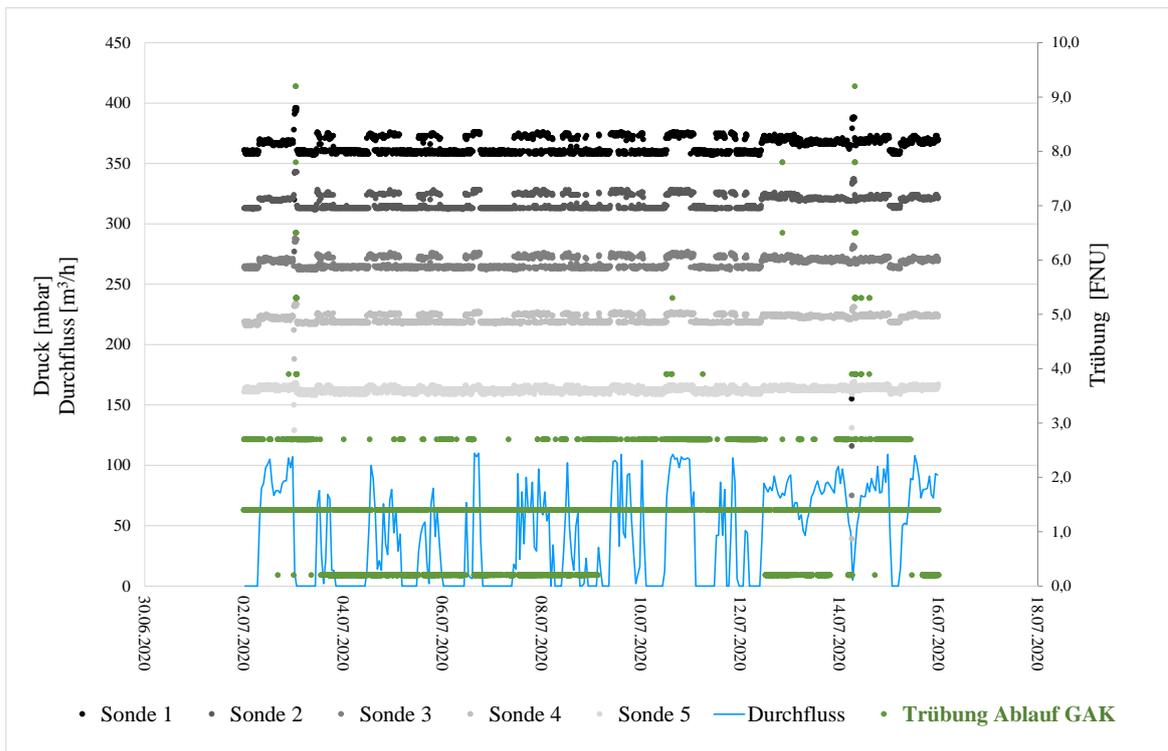


Abbildung 50: Druckverlauf im Filterbett für das Filtrationsintervall vom 03.07.2020 bis 14.07.2020

Der Verlauf der Sonde 4 lässt darauf schließen, dass das Filterbett im Bereich von 55 cm unterhalb der GAK-Oberfläche Verblockungen aufweist, die bei einer Spülung nicht oder nur teilweise aufgebrochen werden. Diese Tatsache machte sich später auch im Filterbetrieb bemerkbar. Nach der Spülung wird der Solldurchfluss bereits nach einem Durchsatz etwa 40 BV nicht mehr erreicht, sodass der GAK-Filter in Spülung gehen muss (Spülung im Normalfall ca. alle 100 BV). Das Phänomen war im Rahmen der SOLIDUS-Untersuchungen, die ein paar Wochen nach Inbetriebnahme des Filters stattfanden, erst nicht so stark erkennbar, zeichnete sich mit zunehmender Betriebszeit jedoch immer stärker ab. Zunächst wurde seitens der herstellenden Firma der eingesetzten GAK vermutet, dass sich eine Schicht mit feineren Körnern in besagter Tiefe abgelagert hat, die durch die Spülung nicht ausgetragen wird. Jedoch lassen weder die Ergebnisse der Siebanalysen der Probenahme im Juni 2020 noch der im Oktober 2020 auf solch eine Ablagerung schließen. Seitens des Betriebspersonals der KA Obere Lutter wird vermutet, dass im Filterbett befindliche Feststoffe durch die Spülung zwar vom unteren Bereich nach oben getragen werden, die Spülgeschwindigkeit bzw. die Spülwassermenge jedoch nicht ausreicht, um das Material vollständig auszutragen und sich somit in der Tiefe um ca. 55 cm unterhalb der GAK-Oberfläche Ablagerungen bilden. Seitens der GAK-herstellenden Firma liefen zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch Untersuchungen, die eine genaue Aussage zu dem Grund der Verblockung zulassen könnten. Diese waren jedoch noch nicht abgeschlossen.

Wie in Kapitel 3.1.3 bereits erörtert, wurde seitens des Betriebspersonals der KA Obere Lutter in vorangegangenen Untersuchungen festgestellt, dass sich die CSB-Konzentration im Ablauf der GAK-Filtration verschlechtert, sobald ca. 100 BV nach der Spülung durchgesetzt wurden. Daraufhin wurde das Spülkriterium zum Auslösen der Filtration auf die zuvor ermittelten 100 BV festgelegt. Eine hydraulische Verblockung wurde bei diesen vorherigen Untersuchungen zunächst nicht festgestellt und wurde erst mit Austausch der GAK und zunehmender Betriebszeit des Filters 5 festgestellt. Eine Vermutung, weshalb sich der CSB-Ablaufwert mit Zunahme der Filtrationszeit verschlechtert, könnte ein eventueller Feststoffaustrag durch Teilfluidisierung des Filterbettes sein, ähnlich wie er im Zuge der Untersuchungen auf der KA Gütersloh-Putzhagen beobachtet wurde. Hierzu konnte die Trübungsmessung im Ablauf des im Rahmen von SOLIDUS untersuchten Filter 5 auf der KA Obere Lutter aufgrund des weiten Messbereichs keine zuverlässigen Ergebnisse liefern. Insgesamt wurden die Längen der Filtrationsintervalle aus betrieblichen Gründen im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht erhöht und das Filtermanagement nicht geändert.

### 4.3.3 Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung

Zur Bestimmung des Feststoffrückhalts wurden zeitproportionale Mischproben im Zu- und Ablauf der Filtration genommen. Die Probenahme deckte dabei aus betrieblichen Gründen (Schichtbetrieb durch die COVID19-Pandemie und automatische Spülung der Filtration in der Nacht) nicht den gesamten Zeitraum eines Filtrationsintervalls ab. Insgesamt konnten in dem Untersuchungszeitraum AFS-Werte von 8 Filtrationsintervallen ermittelt werden (s. Tabelle 13). Es zeigt sich, dass die Werte im Zulauf zur Filtration (Ablauf Festbettdenitrifikation) von  $< 2,2$  bis  $19 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$  liegen. Im Ablauf liegen 4 von 8 Werten unterhalb der BG.

Tabelle 13: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration

Datum Filtrationsintervall		Datum Probenahme		AFS <sub>Zulauf</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf</sub> [mg/l]
von	bis	von	bis		
15.06.2020	23.06.2020	15.06.2020	18.06.2020	6,9	4,8
23.06.2020	03.07.2020	25.06.2020	29.06.2020	7,2	8,5
14.07.2020	20.07.2020	18.07.2020	21.07.2020	7,0	< 2,2
20.07.2020	13.08.2020	05.08.2020	11.08.2020	< 2,2	< 2,2
13.08.2020	23.08.2020	14.08.2020	20.08.2020	14,0	< 2,2
11.09.2020	19.09.2020	11.09.2020	16.09.2020	4,1	< 2,6
25.09.2020	02.10.2020	29.09.2020	05.10.2020	19,0	7,2
02.10.2020	08.10.2020	29.09.2020	05.10.2020	19,0	7,2

Da die Probenahme betriebsbedingt nicht über die gesamte Länge eines Filtrationsintervalls stattfand, wurde zur Bestimmung der Feststoffbelastung angenommen, dass die ermittelte Zu- bzw. Ablaufkonzentration der AFS für das gesamte jeweilige Filtrationsintervall gilt. Eine Auswertung der Längen der Probenahme und Filtrationsintervalle ergab jedoch, dass der Probenahmezeitraum zum Teil nur 30 % des Zeitraumes der Filtrationsintervalle abdeckte (s. Anhang D), sodass hier mit Abweichungen zwischen berechneter und tatsächlicher Feststoffbelastung zu rechnen ist, die im Rahmen dieser Auswertung jedoch nicht berücksichtigt werden konnten.

Die ermittelte Feststoffraumbelastung für den GAK-Filter 5 auf der KA Obere Lutter lag von  $0,10$  bis  $1,47 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  je Spülzyklus (Abbildung 51). Obwohl die Filtrationsintervalle des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter deutlich länger sind (5 – 24 d) als die typischen Filtrationsintervalle von konventionellen Abwasserfiltern (max. 24 h), liegt die ermittelte Feststoffraumbelastung deutlich unter der empfohlenen Feststoffraumbelastung für konventionelles Filtermaterial von  $2 - 3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je Spülzyklus (DWA-A 203, 2019). Aufgrund des Beschickungsmanagements der Filtration auf der KA Obere Lutter erfährt der untersuchte GAK-Filter immer wieder Stillstandzeiten und wird generell mit einer

verhältnismäßig geringen Filtergeschwindigkeit betrieben (ca. 1,5 m/h, übliche Filtergeschwindigkeit 5 – 9 m/h (DWA-M 285-2, 2021)). Diese Tatsache führt zu geringeren durchgesetzten Wassermengen pro Filtrationsintervall und damit auch insgesamt zu geringeren Feststoffbelastungen. Die Feststoffflächenbelastung lag zwischen 0,24 und 3,52 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus (Abbildung 52). Bei Betrachtung der AFS-Zulaufkonzentration ist eine Tendenz zur Zunahme der Feststoffraum- bzw. -flächenbelastung mit zunehmender AFS-Konzentration erkennbar. Es ist jedoch anzumerken, dass die Spülung des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter ausschließlich in Abhängigkeit der durchgesetzten Bettvolumina und nicht nach hydraulischer Verblockung ausgelöst wurde. Unter Berücksichtigung der gewünschten Ablaufqualität (z.B. Einhaltung eines bestimmten CSB-Ablaufwertes) wäre eine Verlängerung der Filtrationsintervalle aus hydraulischer Sicht denkbar.

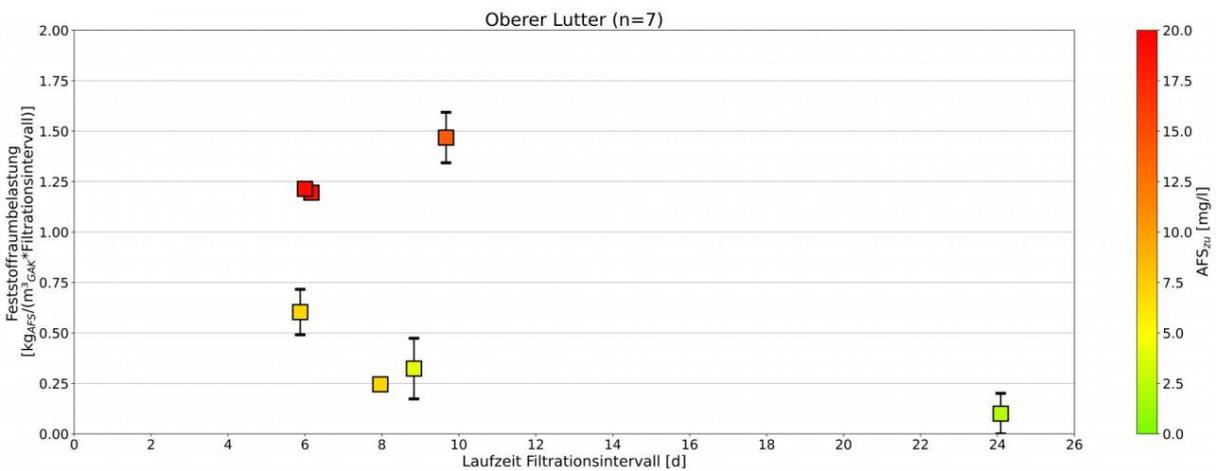


Abbildung 51: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter

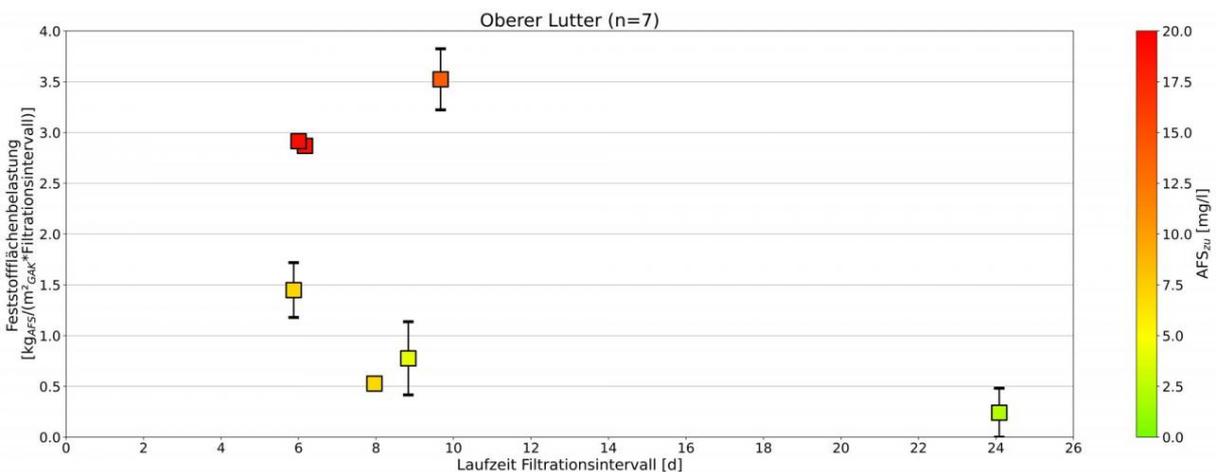


Abbildung 52: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter

#### 4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Hausmethode der Probenahme mittels Sauger eignet sich gut zur Ermittlung von Korngrößen in unterschiedlichen Filterbettstiefen. Zur Beurteilung einer mechanischen Abrasion der GAK-Körner ist diese Methode nicht geeignet, da zumindest eine leichte Abrasion der Körner durch die Probenahme selbst nicht ausgeschlossen werden
- Der Verlauf der Drücke von vier Sonden (Sonde 1, 2, 3 und 5) lässt darauf schließen, dass der aufwärts durchströmte Filter keine hydraulische Verblockung innerhalb eines Filtrationsintervalls erfährt.
- Der Verlauf der Sonde 4 lässt darauf schließen, dass sich auf Höhe von 55 cm unterhalb der GAK-Oberfläche Verblockungen befinden, die auch nach der Filterspülung nicht oder nur teilweise ausgetragen werden. Die Gründe für die hydraulischen Verblockungen konnten im Rahmen von SOLIDUS nicht identifiziert werden. Untersuchungen dazu seitens der Aktivkohleherstellenden Firma liefen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch.
- Es ergeben sich Feststoffraumbelastungen bzw. Feststoffflächenbelastungen von 0,10 bis 1,47 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> bzw. 0,24 und 3,52 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus. Diese Werte stellen aus hydraulischer Sicht keine Maximalwerte dar, da die Spülung des GAK-Filters anhand durchgesetzter Bettvolumina (indirekt nach CSB-Ablaufkonzentration) und nicht nach hydraulischer Verblockung ausgelöst wird.
- Es ist zu vermuten, dass die Laufzeit der Filtrationsintervalle, je nach geforderter Ablaufqualität, verlängert werden können. Zur Einordnung der Ablaufwerte eignet sich eine Trübungsmessung im Ablauf des GAK-Filters. Die Einstellung eines schmalen Messbereichs der Sonde ist jedoch zu beachten.

#### 4.4 KA Köln-Rodenkirchen

Der Untersuchungszeitraum des GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen beläuft sich auf nachstehenden Zeitraum:

- 10.03.2021 bis 15.04.2021: Filtrationsintervall 3 – 6 Tage (ca. alle 350 – 700 BV), Filtergeschwindigkeit  $v_f = 1 – 10$  m/h,  $v_{f,mittel} = 6,8$  m/h
- 19.05.2021 bis 15.07.2021: Untersuchung als BAK-Filter (vorgeschaltete Ozonung), Betriebsbedingungen identischen zu reinem GAK-Betrieb

Neben dem GAK-Filter wurde vergleichend ein BIOFOR-Filter (Filtermaterial Biolit) auf der KA-Rodenkirchen in folgendem Zeitraum untersucht:

- 10.03.2021 bis 15.07.2021: Filtrationsintervalle 4 – 6 Tage (ca. alle 130 – 270 BV), mittlere Filtergeschwindigkeit  $v_{f,mittel} = 5,3$  m/h

Aufgrund von Umbauarbeiten an der vierten Reinigungsstufe wurde die Filtration (GAK und Referenz) in einem Zeitraum vom 15.04.2021 – 18.05.2021 nicht betrieben, sodass für diesen Zeitraum keine Mess- und Analytikdaten vorliegen.

##### 4.4.1 Kornverteilung im Filterbett

Zur Ermittlung der Kornverteilung im Filterbett wurden zwei Probenahmen (04.02.2021 und 03.09.2021) vorgenommen. Bei der ersten Probenahme fiel auf, dass sich gröbere GAK auf der GAK-Oberfläche im vorderen Bereich des Filters, wo der Zulauf liegt, befand. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Saugprobenahme für den Zulauf- und für den Ablaufbereich durchzuführen, da vermutet wurde, dass sich im Zulaufbereich Stützsicht auf der Filteroberfläche befand. Die Korngrößenverteilung des Zulaufbereichs ist in Abbildung 53 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich ein hoher Anteil der groben Kornfraktion  $> 2,5$  mm in den oberen Filterschichten befindet. Ca. 50 % der ersten 5 cm bestehen aus Grobkorn, danach sinkt der Anteil an grober Kornfraktion etwas ab. Trotz dieses hohen Anteils an Grobkorn in den oberen Filterschichten ist der Anteil an Grobkorn in der untersten Probenahestelle am höchsten mit ca. 65 %. Im Vergleich hierzu ist in Abbildung 54 die Korngrößenverteilung im Bereich des Ablaufs dargestellt. Hier ist eine deutliche Klassierung der Kornfraktionen von fein nach grob über die Filterbetthöhe zu erkennen. Der Anteil der Kornfraktion  $> 2,5$  mm liegt bei der obersten Probenahestelle unter 10 % und nimmt kontinuierlich über die Filterbetttiefe zu. Diese Klassierung lässt sich im Bereich des Filterzulaufs nicht erkennen.

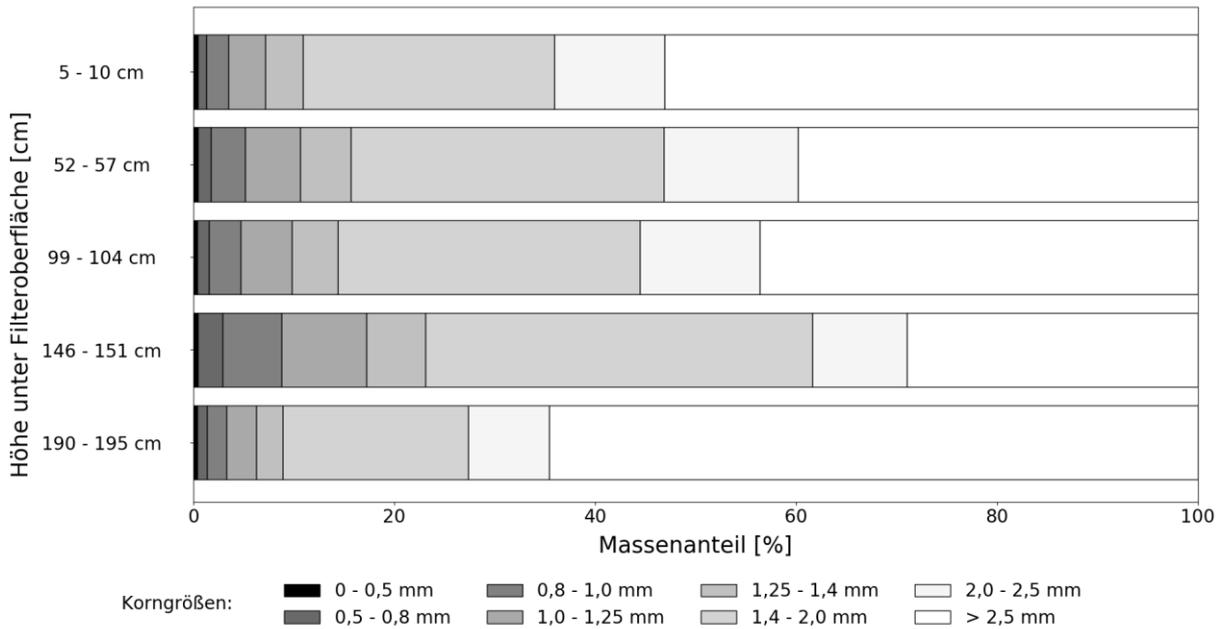


Abbildung 53: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen im Bereich des Filterzulaufs, Probenahme am 04.02.2021

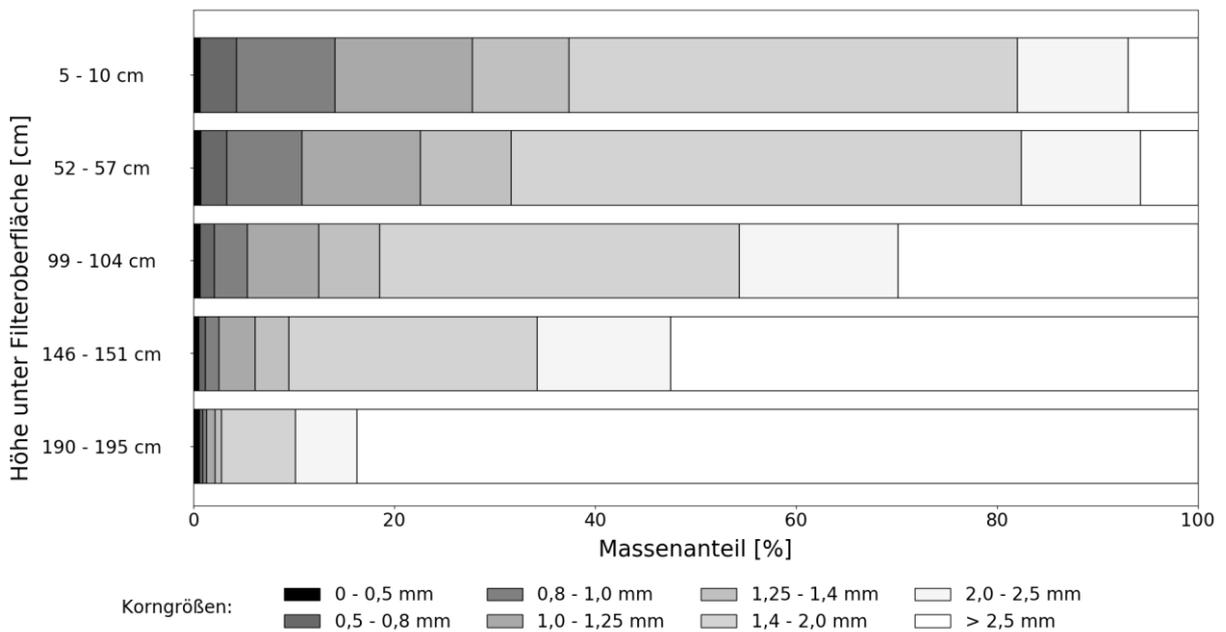


Abbildung 54: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen im Bereich des Filterablaufs, Probenahme am 04.02.2021

Aus den Erkenntnissen der Probenahme und der Siebanalysen wurde gefolgert, dass ein Anteil der Stützsicht aufgewirbelt wird und somit in höhere Filterschichten gelangt. Es wurde beobachtet, dass das zulaufende Wasser aufgrund der großen Fallhöhe zwischen dem Ablauf des Ozonreaktors (kein Eintrag von Ozon in dem Untersuchungszeitraum März / April) und dem Zulauf zur GAK-Filtration einen zu hohen Luftmitriss aufwies. Diese Luft entwich dann

beim Durchströmen des GAK-Filters im Zulaufbereich, was zu Aufwirbelungen des Filterbettes im Filtrationsbetrieb führte. Diese Fluidisierung führte dazu, dass Stüttschicht aus dem unteren Bereich in obere Filterschichten gelangte. Als Folge dessen ist anzunehmen, dass der GAK-Filter ungleichmäßig durchströmt wird und somit nicht das ganze Filterbett zur Adsorption genutzt wird. Ebenfalls ist anzunehmen, dass es zu lokalen Feststoffausträgen durch die Fluidisierung des Filterbettes kommen kann. Dies wurde jedoch nicht näher untersucht.

Aufgrund dieser Beobachtungen des fluiden Filterbettes im Betrieb wurde im April und Mai eine Entlüftungsleitung zwischen Ablauf Ozonreaktor und Zulauf GAK-Filtration errichtet. Durch das Entweichen der mitgerissenen Luft über die Entlüftungsleitung wurde der Zulaufbereich hydraulisch beruhigt. Nach dem Umbau war keine Aufwirbelungen des Filterbettes mehr zu erkennen, weshalb die Probenahme nicht mehr in den Zu- und Ablaufbereich unterteilt war. Diese optischen Beobachtungen konnten auch messtechnisch im Zuge der zweiten Probenahme zur Bestimmung der Korngrößen am 03.09.2021 nachgewiesen werden (Abbildung 55).

Die Korngrößenverteilung zeigt, dass die bauliche Maßnahme zu einer deutlichen Klassierung der Korngrößen führte. Der Anteil an der größten GAK-Fraktion liegt in der obersten Probenahmeschicht unter 1 % und steigt kontinuierlich über die Filterbetttiefe an. Es zeigt sich, dass die Klassierung ebenfalls besser ist als im Ablaufbereich des Filters bei der ersten Probenahme, bei der der Anteil grober Kornfraktion noch über 10 % betrug. Eine Aussage zur Abrasion der GAK-Körner kann aufgrund des ungenauen Probenahmeverfahrens nicht getroffen werden.

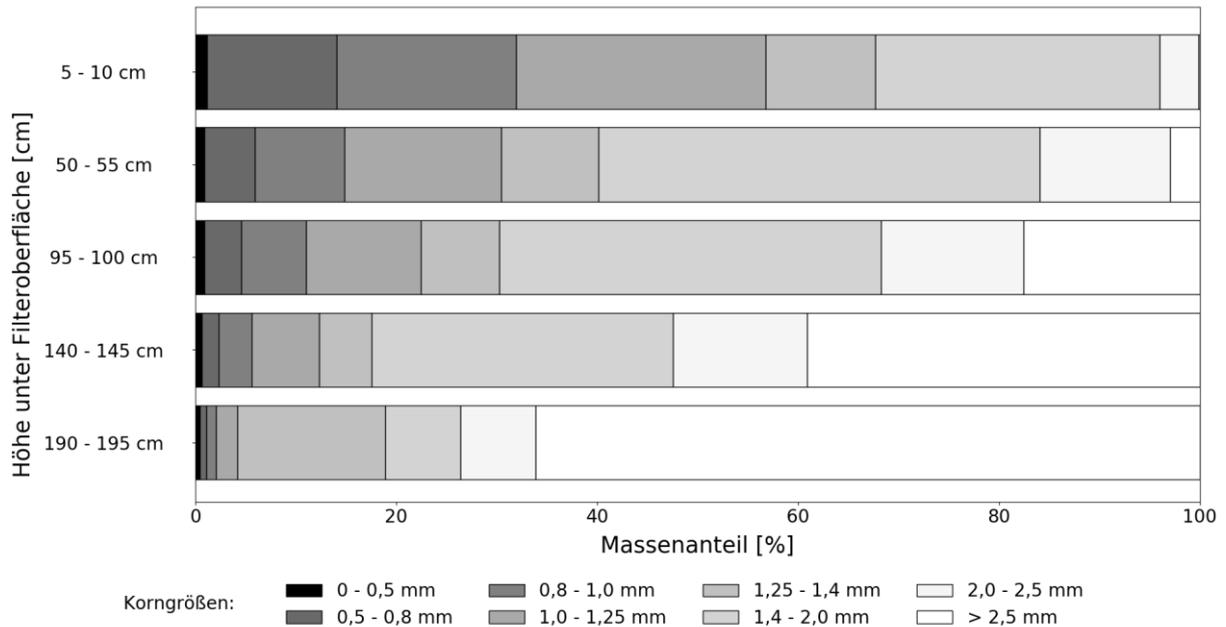


Abbildung 55: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 03.09.2021

#### 4.4.2 Druckverlauf im Filterbett

Bei den Untersuchungen auf der KA Köln-Rodenkirchen wurde neben dem GAK-Filter ebenfalls ein BIOFOR-Flockungsfilter zum Vergleich untersucht. Zu diesem Zweck wurden zusätzlich zwei Drucksonden im BIOFOR-Filter in den Höhen 10 cm und 124 cm unter der Filteroberfläche installiert. Darüber hinaus standen Daten von zwei unter den Düsenboden der beiden Filter installierten Drucksonden der Auswertung zur Verfügung. Im Referenzfilter wurde der Feststoffgehalt im Ablauf mittels einer TS-Sonde kontinuierlich aufgezeichnet. Ebenfalls konnte ab dem 23.06.2021 der TS-Gehalt im Ablauf des GAK-Filters dem Prozessleitsystem der StEB Köln entnommen werden. Der Solldurchfluss des GAK-Filters wird, wie bei der KA Obere Lutter, nicht über eine vorgeschaltete Pumpe reguliert, d.h. die Filtration läuft im Freigefälle ab (s. Kapitel 3.1.4). Somit wird der Durchfluss maßgeblich durch den Grad der Verblockung des Filterbettes bestimmt. Verblockungen konnten jedoch im gesamten Untersuchungszeitraum nicht beobachtet werden.

Insgesamt wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIDUS 12 Filtrationsintervalle des GAK-Filters und 12 des Referenzfilters untersucht. In Abbildung 56 ist beispielhaft der Druckverlauf der Sonden im Filterbett sowie der Sonden unterhalb des Düsenbodens im GAK-Filter für den Zeitraum vom 10.03.2021 – 15.04.2021 dargestellt. Hierbei werden insgesamt sechs Filtrationsintervalle erfasst. Das Ende eines einzelnen Filtrationsintervalls wird durch den Druckabfall während einer Spülung gekennzeichnet. Die Abbildungen der Untersuchungen ab Mai 2021 sind dem Anhang E zu entnehmen.

Bezogen auf die Abbildung 56 lassen sich nachstehende Beobachtungen zu den Druckverhältnissen in der GAK-Filtration zusammenfassend festhalten:

- Eine Spülung ist anhand eines kurzzeitigen Druckabfalls erkennbar und kennzeichnet damit den Beginn / das Ende eines Filtrationsintervalls.
- Die Beschickung des GAK-Filters erfolgt in Abhängigkeit des Tagesganges, sodass der Durchfluss und damit auch der Druck tagesgangbedingte Schwankungen aufzeigt (ca. 30mbar Differenz).
- Mit Zunahme der Filtrationszeit ist ein leichter Druckanstieg in den untersten Sonden 1 und 2 (ca. 185 und 150 cm unterhalb der GAK-Oberfläche) sowie in der Sonde unterhalb des Düsenbodens zu beobachten (ca. 10 mbar).
- Bei drei Sonden (Sonde 3, 4 und 5) ist kein Druckanstieg zwischen zwei Spülungen erkennbar.

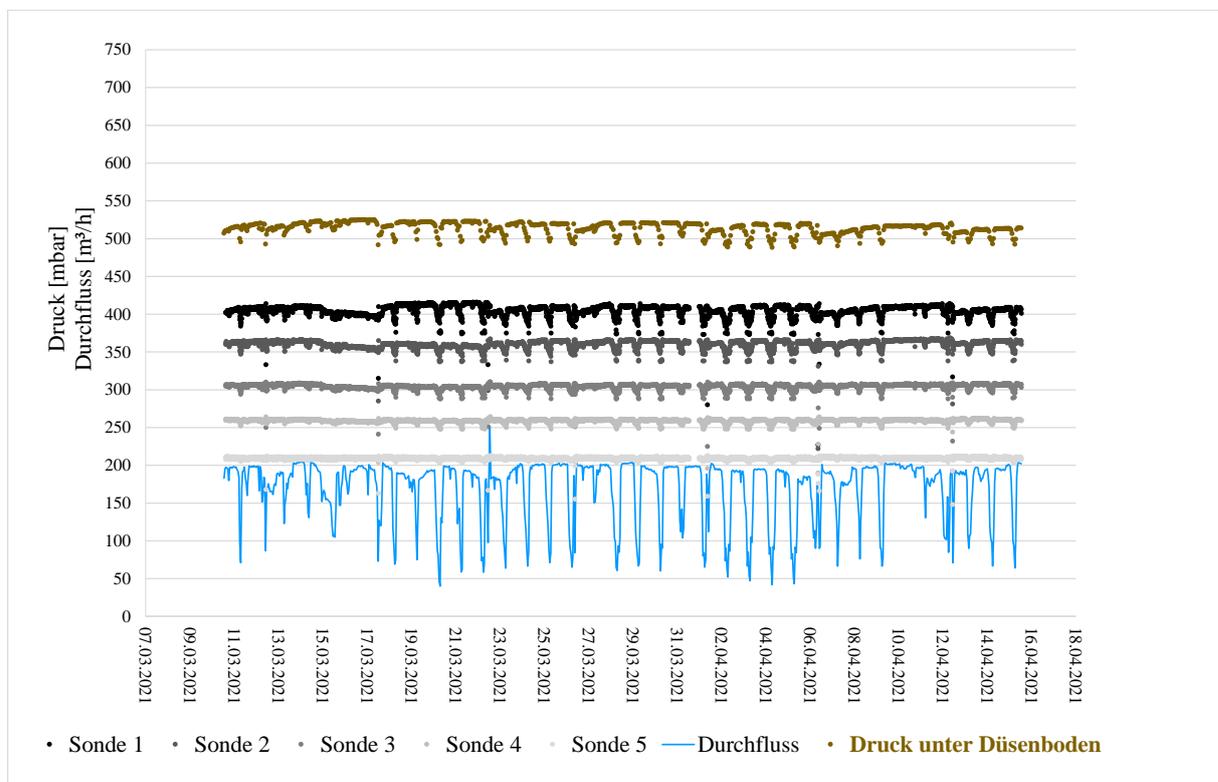


Abbildung 56: Druckverlauf im GAK-Filter für den Zeitraum vom 10.03.2021 bis 15.04.2021

Der Verlauf der gemessenen Drücke unterhalb des Düsenbodens des GAK-Filters (minimaler Druckanstieg bzw. Stagnation des Druckes) lässt darauf schließen, dass es während des Filtrationsbetriebes zu einer Teil-Fluidisierung des Filterbettes und damit zu einer Umlagerung der GAK-Körner mit resultierendem Teilaustrag der Feststoffe in den Ablauf der GAK kommt (Vgl. Kapitel 2.2; Altmann et al. (2016)). Laut Beobachtungen des Betriebs war dieser Teilaustrag in Form von unregelmäßigen „Schlammwolken“ im Filterüberstand optisch zu

erkennen. Da die TS-Messungen jedoch keine Erhöhungen der Messwerte im Filtrationsbetrieb aufwiesen (s. Anhang E), wird vermutet, dass sich die ausgewirbelten Feststoffe im Filterüberstand wieder überwiegend absetzen, somit an der GAK-Oberfläche verbleiben und nicht mit dem Ablauf ausgetragen werden. Entsprechende Ablagerungen konnten auf der Filteroberfläche vor der Spülung seitens des Betriebspersonals beobachtet werden. Aufgrund der Teilausträge von Feststoffen aus dem Filterbett zeigt der GAK-Filter bei zeitlich definiertem Ende eines Filtrationsintervalls nach 3 – 6 Tagen keinerlei hydraulische Verblockung. Die Ergebnisse der Untersuchungen auf der KA Köln-Rodenkirchen zeigen, dass Filtrationsintervalle > 3 – 6 Tage möglich sind. Bei Erhöhung der Filtrationsintervalllängen sind jedoch die Ablaufwerte (z.B. CSB, P, Trübung) zu beachten.

Analog zu den Druckverläufen im GAK-Filter sind die Druckverläufe des Referenzfilters für denselben Zeitraum in Abbildung 57 dargestellt. Hier sind ebenfalls sechs Filtrationsintervalle dargestellt. Die Abbildungen der Untersuchungen ab Mai 2021 sind dem Anhang E zu entnehmen. Bezogen auf die Abbildung 57 lassen sich nachstehende Beobachtungen zu den Druckverhältnissen im Referenzfilter zusammenfassend festhalten:

- Eine Spülung ist anhand eines kurzzeitigen Druckanstiegs bzw. -anfalls erkennbar und kennzeichnet damit den Beginn / das Ende eines Filtrationsintervalls.
- Die Beschickung des Referenzfilters erfolgt, analog zum GAK-Filter, in Abhängigkeit des Tagesganges, sodass der Durchfluss und damit auch der Druck tagesgangbedingte Schwankungen aufzeigt (ca. 50 mbar Differenz).
- Mit Zunahme der Filtrationszeit ist ein erheblicher Druckanstieg unter dem Düsenbodens messbar. Dieser beträgt zwischen 70 und 130 mbar innerhalb eines Filtrationsintervalls.
- Der Druck fällt nach jeder Spülung auf den Ausgangswert von ca. 540 mbar zurück.
- In den Sonden im Filterbett ist mit Zunahme der Filtrationszeit kein Druckanstieg zu beobachten.
- Die tagesgangbedingten Druckschwankungen sind in den Sonden im Filterbett kaum bis nicht zu vernehmen.
- Die TS-Messung im Ablauf des Referenzfilters zeigt innerhalb eines Filtrationsintervalls annähernd konstante Werte (0,2 – 0,5 mg<sub>TS</sub>/l). Der TS-Gehalt im Ablauf steigt während der Filterspülungen an.

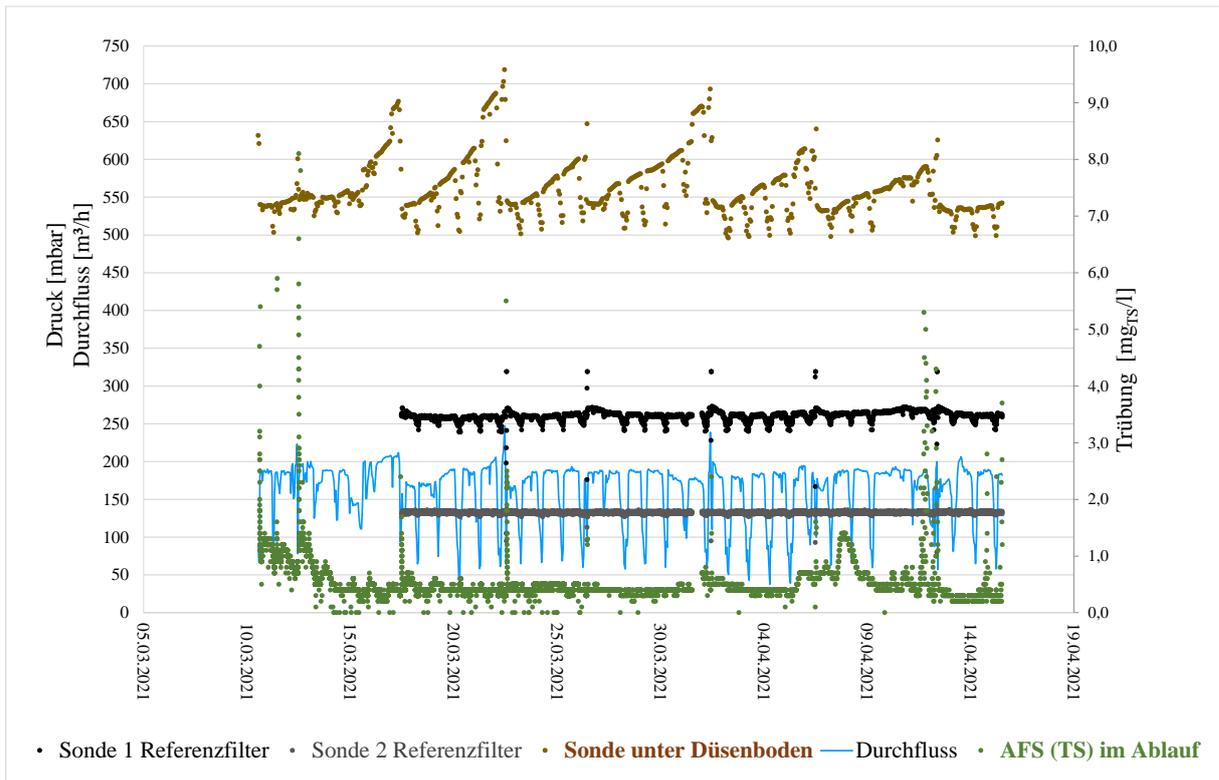


Abbildung 57: Druckverlauf im Referenzfilter für den Zeitraum vom 10.03.2021 bis 15.04.2021

Der Verlauf der gemessenen Drücke unterhalb des Düsenbodens des Referenzfilters lässt darauf schließen, dass es mit zunehmender Filtrationslaufzeit zu einer zunehmenden Verblockung des Filterbettes kommt. Anhand des gemessenen Druckanstieges konnte eine Fluidisierung des Filtermaterials im Filtrationsbetrieb und damit ein Teilaustrag von Feststoffen ausgeschlossen werden. Die Feststoffe werden vornehmlich im Filterbett zurückgehalten und führen so zu einer zunehmenden Verblockung und damit zu einer geringeren hydraulischen Leistungsfähigkeit des Referenzfilters. Zudem konnten im Filtrationsbetrieb, anders als beim GAK-Filter, keine Schlamm aufwirbelungen seitens des Betriebspersonals beobachtet werden. Anhand des zweiten dargestellten Filtrationsintervalls ist zu erkennen, dass der Druck beim Auslösen der Spülung bei etwa 720 mbar liegt. Damit liegt der Druck nur knapp unterhalb des vorgegebenen Abschalt drucks des BIOFOR-Referenzfilters von 730 mbar (Schutz vor Rückstau und Überlauf in der Filtration). Auch wenn es bei einzelnen Filtrationsintervallen zu geringeren Druckanstiegen kam, kann eine Erhöhung der Länge der Filtrationsintervalle aus Gründen der Betriebssicherheit nicht empfohlen werden.

#### 4.4.3 Ermittlung der maximalen Feststoffbelastung

Zur Bestimmung des Feststoffrückhalts wurden zeitproportionale Mischproben zwischen zwei Spülungen genommen. Insgesamt konnten in dem Untersuchungszeitraum für insgesamt 12 Filtrationsintervalle AFS-Werte sowohl im Zu- und Ablauf des GAK-Filters als auch des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen ermittelt werden (s. Tabelle 14). Die Ablaufwerte der beiden Filter zeigen, dass diese im Mittel einen annähernd identischen Feststoffrückhalt aufweisen ( $c_{AFS,Ablauf\ GAK} = 3,3\text{ mg/l}$ ;  $c_{AFS,Ablauf\ Ref} = 3,0\text{ mg/l}$ ). Werden jedoch die einzelnen Filtrationsintervalle betrachtet, ist auffällig, dass einzelne AFS-Ablaufkonzentrationen über den AFS-Zulaufkonzentrationen lagen (in Tabelle rot markiert). Dies spricht für eine Fluidisierung des Filterbettes im Filtrationsbetrieb und einen daraus einhergehenden Teilaustrag von Feststoffen (s. auch Kapitel 4.4.2).

Tabelle 14: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration und des Referenzfilters

Datum Filtrationsintervall		AFS <sub>Zulauf,GAK,Ref</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf,GAK</sub> [mg/l]	AFS <sub>Ablauf,Ref</sub> [mg/l]
von	bis			
12.03.2021	17.03.2021	4,5	5,7	4,5
17.03.2021	22.03.2021	8,7	3,7	4,1
22.03.2021	26.03.2021	< 2,25	< 2	< 2,2
26.03.2021	01.04.2021	5,4	3,3	3,8
01.04.2021	06.04.2021	3,4	3	3,3
06.04.2021	12.04.2021	4,2	3,8	2,9
28.05.2021	02.06.2021	2,8	2,9	< 2,5
02.06.2021	08.06.2021	5,2	< 2,1	< 2,1
08.06.2021	14.06.2021	2,9	4,5	< 2,2
18.06.2021	22.06.2021	4,5	4,5	2,3
06.07.2021	09.07.2021	8,2	< 2,2	3,8
10.07.2021	12.07.2021	3,9	< 2	< 2

Unter Berücksichtigung der Zu- und Ablaufwerte wurde die Feststoffraumbelastung als auch die Feststoffflächenbelastung sowohl für den GAK- als auch den Referenzfilter berechnet. In den nachstehenden Abbildung 59 und Abbildung 60 wird die Feststoffbelastung (jeweils auf das Filtervolumen bzw. die Filterfläche bezogen) in Abhängigkeit der Laufzeit und AFS-Konzentration im Zulauf zur Filtration (GAK und Referenz) pro Filtrationsintervall dargestellt. Zunächst ist auffällig, dass die ermittelten Feststoffbelastungen für den Referenzfilter unterhalb der Feststoffbelastungen des GAK-Filters liegen. Dies resultiert aus dem höheren Filtervolumen bzw. der höheren Filterfläche des Referenzfilters, auf die die Feststoffbelastung bezogen wird (s. auch Kapitel 3.1.4 und 3.4). Außerdem ist zu erkennen, dass der GAK-Filter

teilweise negative Feststoffbelastungen aufweist. Diese resultieren aus der zuvor in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Teilfluidisierung des Filterbettes und des daraus resultierenden Feststoffaustrags im Filterbetrieb. Eine negative Feststoffbelastung wurde für den Referenzfilter nicht beobachtet. Diese Tatsache und die Verläufe der Drücke weisen darauf hin, dass es zu keinem Feststoffaustrag im Filterbetrieb kommt (s. auch Kapitel 4.4.2). Insgesamt bewegt sich die Feststoffraumbelastung für den GAK-Filter in einem Bereich von -1,1 bis 2,3  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  und für den Referenzfilter von 0,03 bis 1,3  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je Filtrationsintervall. Es liegen insgesamt drei von 12 Werten für den GAK und keiner der 12 Werte für den Referenzfilter im empfohlenen Bereich der Feststoffraumbelastung für konventionelles Filtermaterial von 2 – 3  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je Filtrationsintervall (DWA-A 203, 2019). Letzteres ist vermutlich auf die Alterung und damit die verringerte Feststoffaufnahme des Filtermaterials zurückzuführen (Filtermaterial seit ca. 28 Jahren in Betrieb). Die Feststoffflächenbelastung liegt für den GAK-Filter in einem Bereich von -1,5 bis 3,7  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{GAK}}$  und für den Referenzfilter von 0,06 bis 2,9  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{Filtermaterial}}$  je Filtrationsintervall.

Im Zuge der Untersuchungen eines auf der KA Köln-Rodenkirchen parallel ablaufenden Forschungsvorhabens wurde ab Mai 2021 (Betrieb als BAK mit vorgeschalteter Ozonung) festgestellt, dass sich die AFS-Konzentration nach der Ozonung im Vergleich zum Zulauf deutlich erhöhte. Die Auswertung der AFS-Werte lag zum Zeitpunkt von SOLIDUS noch nicht vor, kann aber qualitativ der nachstehenden Abbildung 59 entnommen werden. Diese zeigt die Filterpapiere nach der Bestimmung der AFS im Zulauf zur Ozonung (Probenahmestelle „F“) und im Ablauf der Ozonung (Probenahmestelle „B“). Eine deutliche Zunahme der Verfärbung und damit der Feststoffkonzentration im Ablauf der Ozonung ist zu erkennen. Es wird vermutet, dass die sauerstoffreichen Bedingungen im Ozonreaktor zur Bildung von Biomasse (Algen o.Ä.) im Ozonreaktor führen. Da sich die Probenahme im Rahmen von SOLIDUS ab Mai jedoch nur auf den Zulauf zur Ozonung (bis April 2021 kein Eintrag von Ozon) und nicht auf den Ablauf der Ozonung bezog, konnte der Anstieg der Feststoffkonzentration bei der Ermittlung der Feststoffraum- und der Feststoffflächenbelastung für den GAK-Filter nicht berücksichtigt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese in einem höheren Bereich liegt, als ermittelt. Da der Referenzfilter nicht mit vorozoniertem Wasser beschickt wurde, gilt dies nicht für die ermittelte Feststoffbelastung des Referenzfilters.

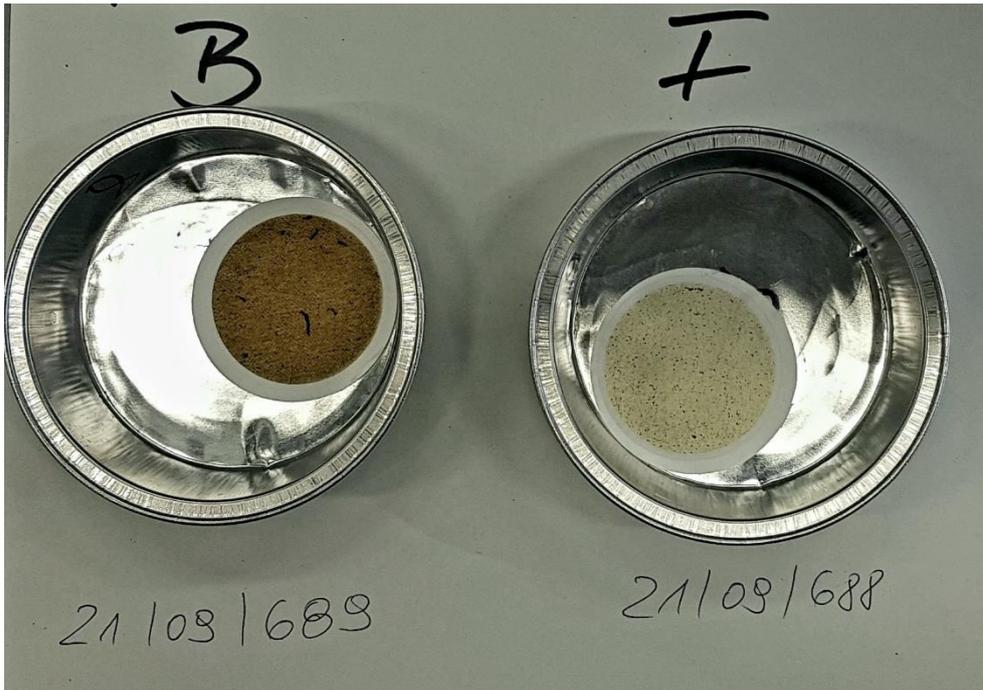


Abbildung 58: Foto der Filterpapiere nach Bestimmung der AFS, B = Ablauf Ozonung, F = Zulauf Ozonung (Zulauf GAK) (Foto: Labor StEB Köln)

Abschließend ist zu sagen, dass bei Betrachtung der AFS-Zulaufkonzentration eine leichte Tendenz zur Zunahme der Feststoffraum- bzw. -flächenbelastung mit zunehmender Konzentration für beide Filter erkennbar ist. Für beide Filter konnte kein Zusammenhang zwischen Länge des Filtrationsintervalls und der errechneten Feststoffbelastung ermittelt werden.

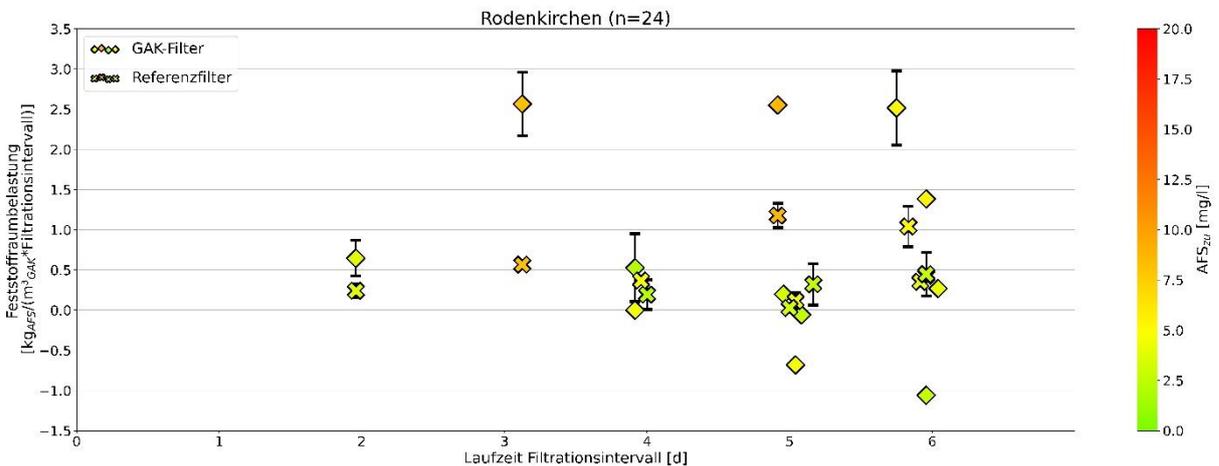


Abbildung 59: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK- und des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen

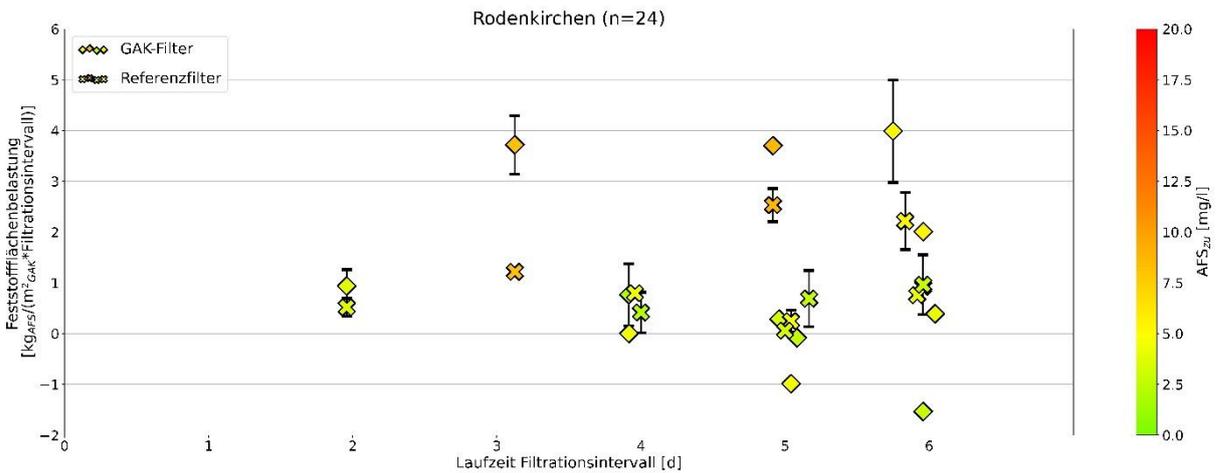


Abbildung 60: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK- und des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen

#### 4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Hausmethode der Probenahme mittels Sauger eignet sich gut zur Ermittlung von Korngrößen in unterschiedlichen Filterbettiefen. Zur Beurteilung einer mechanischen Abrasion der GAK-Körner ist diese Methode nicht geeignet, da zumindest eine leichte Abrasion der Körner durch die Probenahme selbst nicht ausgeschlossen werden kann.
- Der Verlauf der Drücke unterhalb des Düsenbodens des GAK-Filters lassen darauf schließen, dass das GAK-Filterbett im Filtrationsbetrieb (teil-) fluidisiert wird und es so immer mal wieder zu einem Feststoffaustrag kommt. Dadurch erfährt der aufwärts durchströmte Filter keine hydraulische Verblockung, aber eine mögliche Verschlechterung der Filtratqualität, was sich in den Ergebnissen der Feststoffbelastungen widerspiegelt (teilweise negative Werte).
- Der Verlauf der Drücke unterhalb des Düsenbodens des Referenzfilters lassen darauf schließen, dass es zu keiner (Teil-)Fluidisierung im Filtrationsbetrieb kommt. Somit konnten auch keine Feststoffausträge anhand von negativen Feststoffbelastungen festgestellt werden. Damit erfährt der Referenzfilter in Abhängigkeit der Filtrationszeit eine zunehmende hydraulische Verblockung.
- Für den GAK-Filter ergeben sich Feststoffraumbelastungen bzw. Feststoffflächenbelastungen von -1,1 bis 2,3 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> bzw. -1,5 bis 3,7 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Filtrationsintervall, wobei ein Maximum hier nicht erreicht wurde, da es im gesamten Untersuchungszeitraum zu keinerlei hydraulischen Verblockungen während des Filtrationsbetriebes kam.

- Eine Erhöhung der Feststoffkonzentration nach der Ozonung (Beschickung des GAK-Filters mit vorozoniertem Wasser ab Mai 2021) wurde im Rahmen eines parallel ablaufenden Forschungsprojektes auf der KA Köln-Rodenkirchen festgestellt. Dieser Anstieg ist wahrscheinlich auf die Bildung von Biomasse in dem sauerstoffreichen Milieu im Ozonreaktor zurückzuführen. Eine veränderte Feststoffkonzentration konnte im Rahmen von SOLIDUS nicht berücksichtigt werden. Es ist daher zu vermuten, dass die o.g. Feststoffbelastung für die GAK-Filtration in der Realität höher ausfällt.
- Es ist zu vermuten, dass die Laufzeit der Filtrationsintervalle für den GAK-Filter je nach geforderter Ablaufqualität mehr als 3 – 5 d betragen kann. Bei Verlängerung der Filtrationsintervalle sind sowohl die Ablaufwerte (z.B. CSB, P) als auch die Trübung im Ablauf des GAK-Filters zu beobachten.
- Für den Referenzfilter ergeben sich Feststoffraumbelastungen bzw. Feststoffflächenbelastungen von 0,03 bis 1,3  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  bzw. 0,06 bis 2,9  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{Filtermaterial}}$  je Filtrationsintervall. Damit liegt die Feststoffraumbelastung deutlich unter dem Bereich der empfohlenen Feststoffraumbelastung für konventionelles Filtermaterial von 2 – 3  $\text{kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je Filtrationsintervall (DWA-A 203, 2019). Dies ist auf die Alterung und damit Abrasion und die einhergehende Verschlechterung des Filtermaterials hinsichtlich des Feststoffrückhalts zurückzuführen.
- Da der Referenzfilter eine hydraulische Verblockung erfährt und der Druck bei einigen Filtrationsintervallen vor Auslösung der Spülung nah an dem vorgegebenen Abschaltdruck (Schutz vor Rückstau und Überlauf in der Filtration) lag, ist eine Erhöhung der Länge der Filtrationsintervalle aus Gründen der Betriebssicherheit nicht zu empfehlen.

#### 4.5 Düren Marken

Auf Grundlage der Ergebnisse der Forschungsvorhaben „MIKROFlock“ (Bornemann et al., 2012) und „GAK WVER“ (Benstöm et al., 2014) wurde die im Zuge der Projekte ermittelte Feststoffbelastung grafisch neu aufbereitet (Abbildung 62 und Abbildung 63). In Abbildung 61 sind die AFS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die AFS-Konzentration im Zulauf zum Teil Werte von 56 mg<sub>AFS</sub>/l annehmen. Im Mittel beträgt die Zulaufkonzentration etwa 30 mg<sub>AFS</sub>/l und liegt damit deutlich über der im DWA-A 203 empfohlenen Bemessungsgröße von 20 mg<sub>AFS</sub>/l (DWA-A 203, 2019). Generell ist aus der Darstellung auch zu erkennen, dass der GAK-Filter eine gute Abscheideleistung gegenüber Feststoffen aufweist. Mit einer mittleren AFS-Ablaufkonzentration von 5 mg<sub>AFS</sub>/l werden etwa 85 % der eingetragenen Feststoffe zurückgehalten. Aufgrund der zum Teil sehr hohen Zulaufkonzentrationen musste der Filter im Durchschnitt alle 6 Stunden gespült werden und war aufgrund dessen aus betrieblicher Sicht nicht dauerhaft zu betreiben (Spülwasserbevorratung nicht ausreichend). Aufgrund dessen wurde die Filterzelle nach Beendigung der o.g. Forschungsvorhaben wieder von GAK auf konventionelles Filtermaterial umgerüstet.

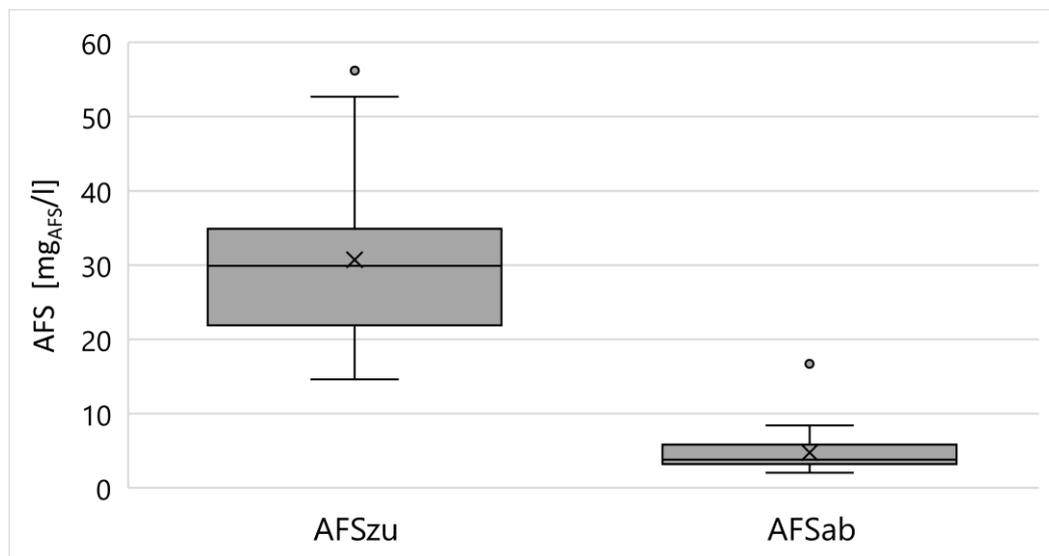


Abbildung 61: AFS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken

Nachstehende Abbildung 62 und Abbildung 63 stellen die Feststoffraum- bzw. die Feststoffflächenbelastung dar. Die ermittelte Feststoffraumbelastung variiert von 0,11 bis 1,46 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus und liegt damit unterhalb der empfohlenen Feststoffraumbelastungen für konventionelles Filtermaterial von 2 – 3 kg<sub>TS</sub>/m<sup>3</sup><sub>Filtermaterial</sub> je Spülzyklus (DWA-A 203, 2019). Die Feststoffflächenbelastung lag bei 0,16 bis 2,19 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Spülzyklus. Generell ist eine Abhängigkeit zwischen der AFS-Zulaufkonzentration und der

ermittelten Feststoffbelastung zu erkennen. Mit Zunahme der AFS-Konzentration im Zulauf der GAK nimmt die Feststoffraum- bzw. die Feststoffflächenbelastung zu. Aufgrund der zum Teil sehr hohen Feststoffkonzentrationen im Zulauf des GAK-Filters ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Ergebnisse aus Düren-Merken nicht repräsentativ sind. Sie dienen hier lediglich zur Einordnung der Forschungsergebnisse aus dem Projekt SOLIDUS.

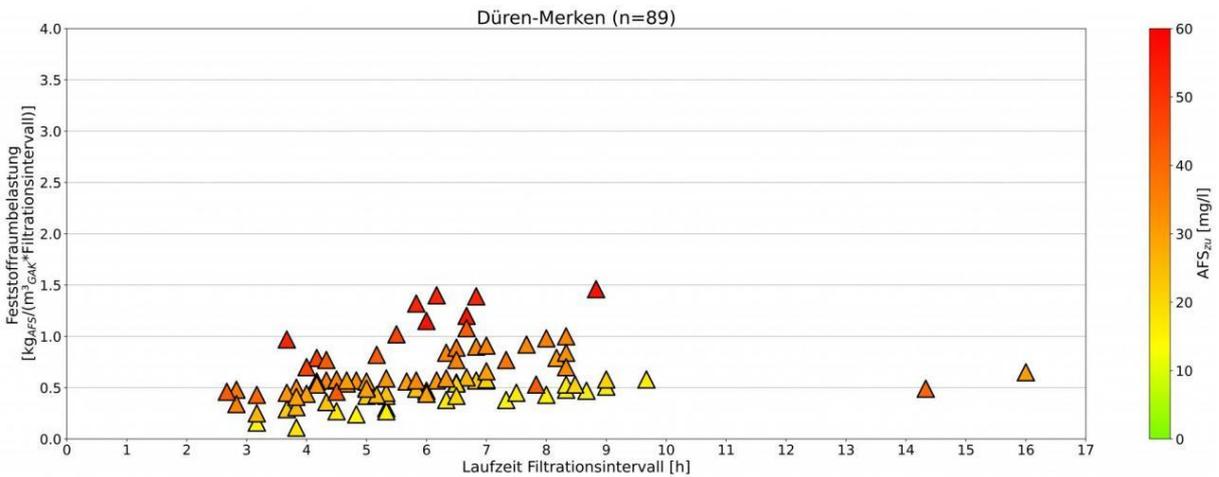


Abbildung 62: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken

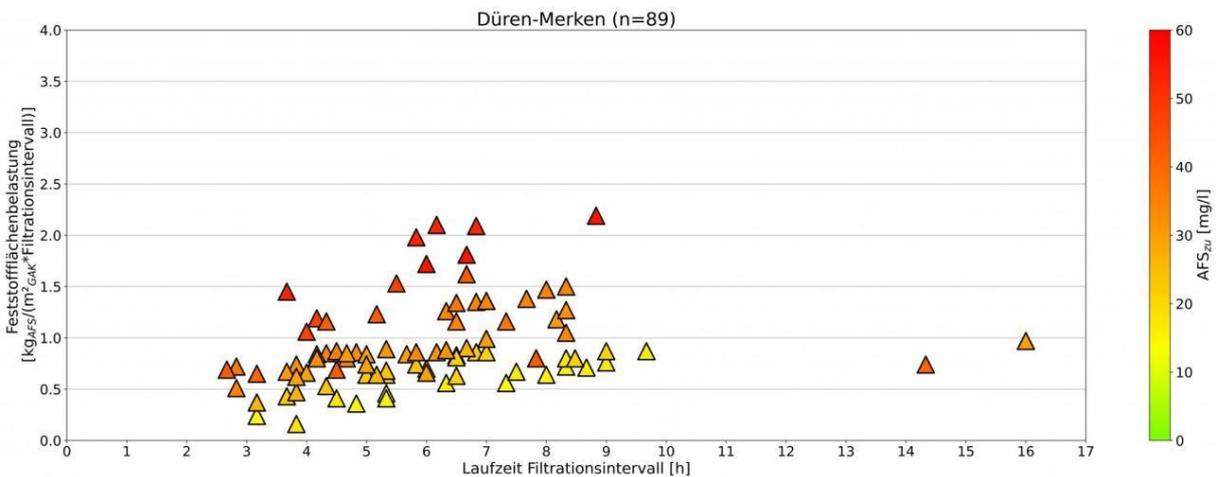


Abbildung 63: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken

## 4.6 Zusammenfassende Ergebnisse

Insgesamt wurden vier großtechnische GAK-Filter im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIDUS untersucht. Dabei war ein Filter abwärts durchströmt (KA Bad Oeynhausen) und drei Filter aufwärts durchströmt (KA Gütersloh Putzhagen, KA Obere Lutter, KA Köln-Rodenkirchen). Alle Filter wiesen unterschiedliche Spezifikationen hinsichtlich der Vorbehandlung des Abwassers, Filterbettauflaufbau, Filtergeschwindigkeit etc. auf. Nachstehende Tabelle 15 stellt diese zusammenfassend dar.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Spezifikationen der untersuchten GAK-Filter

GAK-Filter	Filtrationsrichtung	Beschickung mit	Beschickungsmenge	$v_f$ [m/h]	A-Kohle	Körnung [mesh]	Spülkriterium
Bad Oeynhausen	↓	Ablauf NK	Kontinuierlich ca. 190 m <sup>3</sup> /h	ca. 5,0	Donau Carbon Hydraffin AR	8 x 30	Filterüberstand
Bad Oeynhausen		Ablauf FloFi				8 x 30	
Gütersloh-Putzhagen	↑	Ablauf FloFi	Kontinuierlich ca. 210 m <sup>3</sup> /h	ca. 5,0	Donau Carbon Hydraffin AR	8 x 30	Zeit
Obere Lutter	↑	Ablauf Festbettdeni	Diskontinuierlich (in Abhängigkeit der CSB-Konzentration), bis 130 m <sup>3</sup> /h	bis zu 3,5	Chemviron CYCLE CARB 501	8 x 30	Bettvolumen
Köln Rodenkirchen	↑	Ablauf NK + Trommelsieb (+ Ozonung)	Diskontinuierlich (in Abhängigkeit der CSB-Konzentration), bis 205 m <sup>3</sup> /h	bis zu 10	Jacobi Aquasorb 5000	8 x 30	Zeit

Insgesamt zeigen die Untersuchungen ein unterschiedliches hydraulisches Verhalten von auf- und abwärts durchströmten Filtern. Die parallelen Untersuchungen des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen lieferten außerdem das Ergebnis, dass aufwärts durchströmte GAK-Filter und konventionelle Abwasserfilter ebenfalls ein unterschiedliches hydraulisches Verhalten aufweisen. Die Unterschiede können wie folgt zusammengefasst werden.

### Abwärts durchströmter GAK-Filter:

- Der Feststoffrückhalt beim untersuchten abwärts durchströmten Filter erfolgt maßgeblich an der Filteroberfläche (in der oberen Schicht des Filterbettes).
- Es konnte eine hydraulische Verblockung des Filterbettes festgestellt und damit eine Ermittlung einer maximalen Länge der Filtrationsintervalle bestimmt werden.
- Die Länge eines Filtrationsintervalls ist abhängig von den eingetragenen Feststoffen (Beschickung mit Ablauf NK:  $c_{AFS,Zu,mittel} = 6 \text{ mg/l}$ ,  $Länge_{Filtrationsintervall} = 3 - 5 \text{ d}$ ; Beschickung mit Ablauf FloFi:  $c_{AFS,Zu,mittel} < 2 \text{ mg/l}$ ,  $Länge_{Filtrationsintervall} = 7 - 60 \text{ d}$ ).

- Bei Beschickung mit nicht vorfiltriertem Abwasser aus dem Ablauf der NK ist zu vermuten, dass Feststoffe den maßgeblichen Einfluss auf die Verblockung des Filterbettes haben.
- Bei Beschickung mit vorfiltriertem Abwasser aus dem Ablauf der FloFi ist zu vermuten, dass andere Einflüsse wie Aufwuchs von Biomasse auf und in dem Filter (z.B. Algen) den maßgeblichen Einfluss auf die Verblockung des Filterbettes haben.
- Aufgrund des entstehenden Unterdrucks im Filtrationsbetrieb wird im Abwasser gelöstes Gas ausgestrippt (mit abnehmenden Druck nimmt die Löslichkeit von Gasen in Wasser ab). Es ist zu vermuten, dass die Gasblasen Poren und damit Fließwege im Filterbett blockieren. Dies trägt ebenfalls zu einer hydraulischen Verblockung des Filters bei.
- Zudem ist zu vermuten, dass es aufgrund des aus den Ausgasungen reduzierten Fließquerschnittes zu lokal höheren Filtergeschwindigkeiten in den präferierten Fließwegen im Filterbett kommen kann. Höhere Filtergeschwindigkeiten führen zu einer schlechteren Adsorptionsleistung gegenüber Spurenstoffen. Da die Spurenstoffanalytik jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIDUS war, kann hierzu keine quantitative Aussage getroffen werden.

Aufwärts durchströmter GAK-Filter:

- Der Feststoffrückhalt erfolgt über das gesamte Filterbett.
- Eine hydraulische Verblockung konnte bei allen drei untersuchten GAK-Filtern bis zum Auslösen der Spülung nach vorgegebener Zeit (KA Gütersloh Putzhagen, KA Köln-Rodenkirchen) bzw. nach vorgegebener durchgesetzter Wassermenge (KA Obere Lutter) nicht festgestellt werden (kein Anstieg des gemessenen Druckes). Somit konnte die maximale Länge für die Filtrationsintervalle im Rahmen der Untersuchungen in SOLIDUS nicht ermittelt werden.
- Damit konnte auch kein Zusammenhang zwischen eingetragenen Feststoffen im Zulauf zu den GAK-Filtern und einer hydraulischen Verblockung bzw. der maximalen Länge der Filtrationsintervalle ermittelt werden.
- Im Filtrationsbetrieb konnte eine (Teil-) Fluidisierung des Filterbettes der GAK-Filter und ein daraus einhergehender Feststoffaustrag optisch beobachten (Aufwirbelung von Schlamm) und gemessen werden (erhöhter TS im Ablauf der Filter).
- Aufgrund der Teilausträge von Feststoffen findet keine hydraulische Verblockung der GAK-Filter statt. In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten (z.B. Vorbehandlung des

Abwassers, Vordruck) können aufwärts durchströmte GAK-Filter aus hydraulischer Sicht deutlich längere Filtrationsintervalle aufweisen, als derzeit Stand der Technik ist (zum Teil 42 d ohne Rückspülung).

- Aufgrund der ungleichmäßigen und unregelmäßigen Feststoffausträge ist weiterhin zu vermuten, dass sich im Filterbett von aufwärts durchströmten GAK-Filtern ebenfalls präferierte Fließwege bilden, die zu einer schlechteren Adsorptionsleistung gegenüber Spurenstoffen führen (s.o. „Abwärts durchströmte GAK-Filter“). Da die Spurenstoffanalytik jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIDUS war, kann hierzu keine quantitative Aussage getroffen werden.

#### Referenzfilter auf der KA Köln-Rodenkirchen

- Eine hydraulische Verblockung konnte durch den Druckanstieg unterhalb des Düsenbodens des Referenzfilters mit konventionellem Filtermaterial messbar nachgewiesen werden. Das zulaufende Abwasser entsprach dabei dem Zulauf des parallel betriebenen GAK-Filters (Ablauf NK).
- Die TS-Messung im Ablauf des Referenzfilters zeigte keinen Feststoffaustrag im Ablauf des Filters während des Filtrationsbetriebes.
- Eine Verlängerung der Länge der Filtrationsintervalle kann nicht empfohlen werden, da der gemessene Druck bei einigen Filtrationsintervallen beim Auslösen der Spülung nah am Abschaltdruck lag.

## 5 Empfehlungen zur Planung und zum Betrieb von GAK-Filtern

Zur Bemessung von Raumfiltern mit konventionellem Filtermaterial wird das DWA-A 203 herangezogen. Das Arbeitsblatt befasst sich mit der weitergehenden Abwasserreinigung zur Elimination partikulärer Inhaltsstoffe und beschreibt den Stand der Technik der Abwasserraumfiltration. Die Basis zur Bemessung ist daher neben der Filtergeschwindigkeit die Feststoffraumbelastung. Da GAK-Filter jedoch in erster Linie auf die Adsorption von Spurenstoffen und nicht auf den Rückhalt von Feststoffen ausgelegt werden, kann das DWA-A 203 nicht uneingeschränkt für deren Bemessung verwendet werden. Zudem weist granuliertes Aktivkohle unterschiedliche Spezifikationen gegenüber konventionellem Filtermaterial auf, aus denen hydraulische Unterschiede im Betrieb hinsichtlich der Beschickung und der Spülung resultieren (z.B. unregelmäßigeres, inhomogeneres Korn, geringere Dichte). Um jedoch einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb von GAK-Filtern zu gewährleisten, ist eine Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit in Anlehnung an das DWA-A 203 erforderlich.

### 5.1 Bemessung von granulierten Aktivkohlefiltern

GAK-Filtern werden auf die Adsorption von Spurenstoffen und nicht wie konventionelle Raumfilter auf den Rückhalt von partikulären Stoffen ausgelegt. Demnach sind für GAK-Filter andere Bemessungsgrößen als die Feststoffraumbelastung relevant. Hierzu zählt vor allem die hydraulische Filterkontaktzeit, die für einen optimalen und wirtschaftlichen Betrieb zwischen 20 und 30 min liegen soll (Konsenspapier Schweiz, 2020; DWA-M 285-2, 2021). Außerdem sind die Filterbetthöhe und die Filtergeschwindigkeit weitere wichtige Größen. Diese werden durch die Kontaktzeit und die Filterfläche beeinflusst. Die Filterbetthöhe sollte optimalerweise in einem Bereich von 1,5 – 2,5 m liegen. Das Konsenspapier zur Planung und Auslegung von GAK-Filtern (2020) weist dabei darauf hin, dass es aufgrund der Eigenschaft der GAK-Körnung eine Tendenz zur Oberflächenfiltration bei abwärts durchströmten GAK-Filtern bei Beschickung mit feststoffbelastetem Abwasser kommen kann (Vgl. Kapitel 4.1). Hier empfehlen sich geringere Filterbetthöhen. Aus der Kontaktzeit und der Filterbetthöhe ergeben sich die Filtergeschwindigkeiten, die 9 m/h pro Stunde nicht überschreiten sollten (DWA-M 285-2, 2021). Bei aufwärts durchströmten Filtern ist bei der Wahl der Filtergeschwindigkeit auf die Fluidisierung des Filterbettes zu achten (Vgl. Kapitel 4.2 und 4.4). Zu beachten sind bei GAK-Filtern außerdem die Standzeiten. Diese ergeben sich aus einem definierten, einzuhaltenden Ablaufwert hinsichtlich Spurenstoffe (z.B. 80 % Elimination von ausgewählten Leitsubstanzen). Wird dieser nicht mehr eingehalten, wird die GAK

ausgetauscht. Je nach organischer Hintergrundbelastung des Abwassers (DOC) werden hierbei zwischen 20.000 und 30.000 BV erreicht (Konsenspapier Schweiz, 2020).

Auch wenn GAK-Filter in erster Linie auf die Adsorption organischer Spurenstoffe ausgelegt werden, muss ein sicherer und praxistauglicher Betrieb gewährleistet sein. Hierbei haben vor allem die Feststoffe im Zulauf zur Filtration einen maßgeblichen Einfluss. Ist der Feststoffgehalt im Abwasser zu hoch, ist ein GAK-Filter aufgrund von zu häufigen Spülungen nicht mehr betreibbar (z.B. KA Düren Merken, Spülung im Mittel alle 6 h, Vgl. Kapitel 4.6). Um die hydraulische Leistungsfähigkeit einer GAK-Filtration bereits bei der Planung zu berücksichtigen, ist diesbezüglich die Entwicklung einer Bemessungsgröße hinsichtlich der maximalen Feststoffbelastung notwendig. Im Rahmen des Forschungsprojektes SOLIDUS wurde solch ein Bemessungsparameter entwickelt. Die Herleitung wird nachstehend erläutert.

### 5.1.1 Vergleich der Forschungsergebnisse mit dem DWA-A 203 (2019)

Die Basis für die Bemessung von konventionellen Raumfiltern für den weitergehenden Rückhalt partikulärer Stoffe beruht auf der Filtergeschwindigkeit und der Feststoffraumbelastung. Die Feststoffraumbelastung ist der Quotient aus eingetragene Feststofffracht, bezogen auf 24 h, (Feststoffkonzentration \* durchgesetzte Wassermenge) und dem Filtervolumen (Vgl. Kapitel 3.4). Wichtig ist zu beachten, dass sich die Feststoffraumbelastung dabei auf eine maximale Länge eines Filtrationsintervalls (Filtrationsbetrieb zwischen zwei Spülungen) von 24 h bezieht. Die Bemessungskonzentration der Feststoffe liegt hierbei bei  $20 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ . Hierbei wird eine Nachfällung zur Entfernung von Phosphor im Überstand der Raumfilter berücksichtigt. (DWA-A 203, 2020)

#### Vergleich der Feststoffkonzentrationen im Zulauf der GAK-Filter

Nachstehende Abbildung 64 zeigt die ermittelten Feststoffkonzentrationen im Zulauf der im Rahmen von SOLIDUS untersuchten GAK-Filter sowie im Zulauf des GAK-Filters auf der KA Düren Merken. Ist dem GAK-Filter eine Vorfiltration vorgeschaltet (KA BO FloFi, KA GT), reduziert sich der Feststoffgehalt im Zulauf erheblich ( $C_{\text{AFS,Zu}} < 2 \text{ mg/l}$ ). Bei der Beschickung mit Ablauf Nachklärung (KA BO NK, KA KRO) bzw. mit dem Ablauf der Festbettdenitrifikation (KA AOL) liegen die Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Mittel zwischen 4,5 und  $10 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ . Die ermittelten Konzentrationen liegen damit deutlich unter der Bemessungskonzentration, die im DWA-A 203 angesetzt wird ( $20 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ ). Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass keine Fällung und Flockung zur Elimination von Phosphor im Filterüberstand der untersuchten GAK-Filter durchgeführt wurde. Daraus resultiert eine geringere Konzentration an partikulären Stoffen.

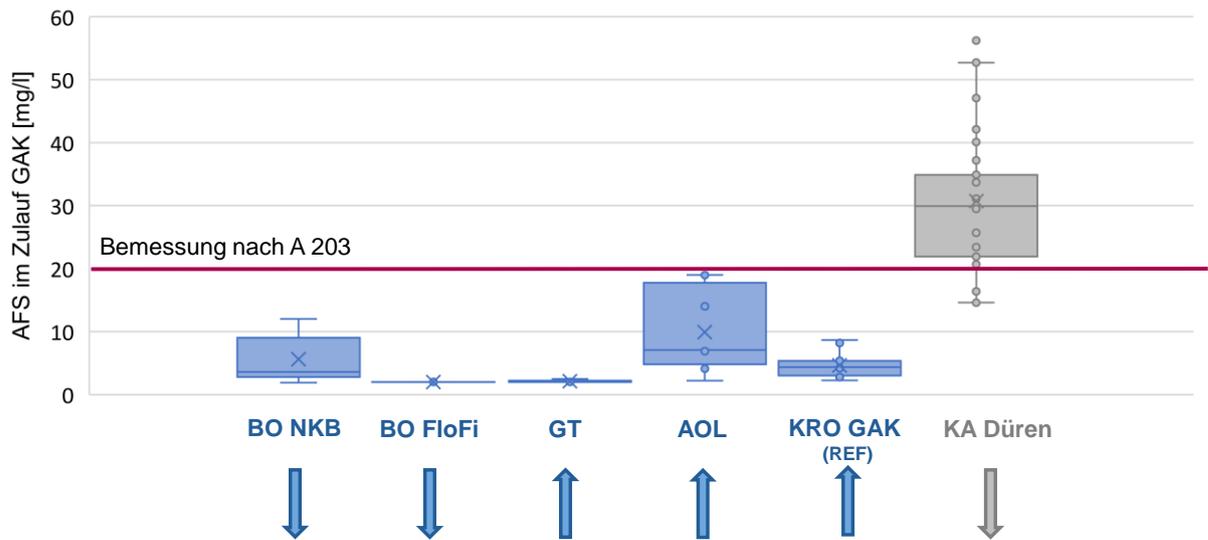


Abbildung 64: Feststoffkonzentrationen im Zulauf zu den untersuchten GAK-Filtern

#### Vergleich der Filtrationsintervalllängen der GAK-Filter

Nachstehende Abbildung 65 zeigt die ermittelten Filtrationsintervalllängen der untersuchten GAK-Filter sowie des Referenzfilters auf der KA Köln Rodenkirchen und des GAK-Filters auf der KA Düren Marken. Die Filtrationsintervalllängen der untersuchten GAK-Filter variieren je nach Kriterium zum Auslösen der Spülung. Bei den aufwärts durchströmten Filtern wird die Filterspülung durch Zeit bzw. durchgesetzte Wassermenge ausgelöst. Für den GAK- und den Referenzfilter auf der KA Rodenkirchen ergeben sich so Filtrationsintervalle von 3 – 5 Tage. Auf der KA Obere Lutter variieren die Filtrationsintervalllängen zwischen 6 und 24 d. Die Spülung des GAK-Filters auf der KA Gütersloh Putzhagen wurde zu Beginn des Forschungsvorhabens SOLIDUS alle 10 Tage ausgelöst. Im Laufe des Projektes wurde die Länge des Filtrationsintervalls auf 42 d erhöht. Bei allen untersuchten aufwärts durchströmten GAK-Filtern gab es beim Auslösen der Spülung keine Anzeichen einer hydraulischen Verblockung. Eine Verblockung des Filterbettes des Referenzfilters konnte im Rahmen der Untersuchungen festgestellt werden. Unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit kann hier vereinfacht angenommen werden, dass die maximale Filtrationsintervalllänge erreicht wurde.

Der abwärts durchströmten Filter auf der KA Bad Oeynhausen wurden nach Anstieg der Filterüberstandshöhe, als Resultat der hydraulischen Verblockung des Filterbettes, gespült. Daraus ergaben sich bei Beschickung mit Ablauf NK Filtrationsintervalle von 3 – 5 d. Bei Beschickung mit Ablauf FloFi wurden Filtrationsintervalllängen von 7 – 42 d erreicht. Der im Rahmen des Forschungsprojektes „MIKROFlock“ untersuchte abwärts durchströmte GAK-

Filter auf der KA Düren Marken musste aufgrund der hohen Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Mittel alle 6h gespült werden und war damit nicht tauglich für den dauerhaften Betrieb. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die ermittelten Filtrationsintervalle der untersuchten GAK-Filter (ausgenommen KA Düren Marken) und des Referenzfilterfilters auf der KA Köln Rodenkirchen deutlich über dem Filtrationsintervall von 24 h, welches im DWA-A 203 zur Bemessung von konventionellen Raumfiltern angesetzt wird, liegt.

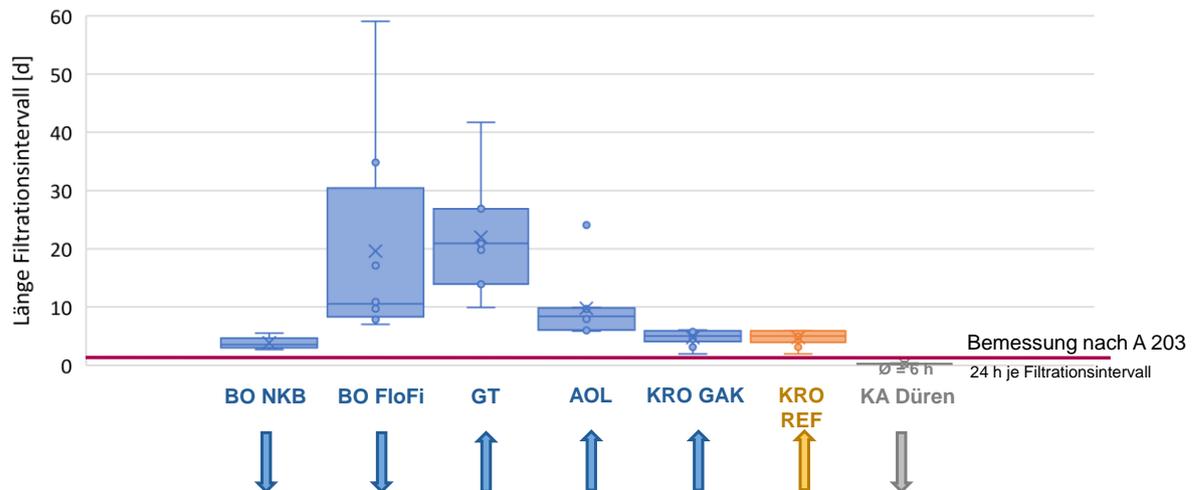


Abbildung 65: Länge der Filtrationsintervall der untersuchten GAK-Filter

### Vergleich der Feststoffraumbelastungen der GAK-Filter

Nachstehende Abbildung 66 zeigt die ermittelten Feststoffraumbelastung der untersuchten GAK-Filter sowie des Referenzfilters auf der KA Köln Rodenkirchen und des GAK-Filters auf der KA Düren Marken. Für die aufwärts durchströmten GAK-Filter konnte eine Raumbelastung zwischen  $-1,0$  und  $3,7 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  je Filtrationsintervall ermittelt werden. Eine negative Raumbelastung kann aus der (Teil-) Fluidisierung des Filterbettes im Filtrationsbetrieb resultieren. Bei den Untersuchungen des GAK-Filters auf der KA Gütersloh konnte eine zunehmende Feststoffraumbelastung bei zunehmender Länge des Filtrationsintervalls festgestellt werden. Für den GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausen konnte sowohl bei Beschickung mit Ablauf NK als auch bei Beschickung mit Ablauf FloFi eine Raumbelastung von im Mittel  $1,0 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  je Filtrationsintervall berechnet werden.

Die ermittelte Feststoffraumbelastung der GAK-Filter liegt damit deutlich unter der vom DWA-A 203 empfohlenen Feststoffraumbelastung für konventionelle Raumfilter von  $2 - 3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  je 24h-Filtrationsintervall. Zu vermuten wäre, dass diese aus der unterschiedlichen Beschaffenheit der Aktivkohle (unregelmäßiges, inhomogeneres Korn) und

damit einer schlechteren raumfiltrierenden Wirkung resultiert. Beim Vergleich der Feststoffraumbelastungen des GAK-Filters und des Referenzfilters auf der KA Rodenkirchen zeigt jedoch, dass der GAK-Filter im Mittel sogar eine höhere Feststoffraumbelastung und damit eine bessere Feststoffabscheidung zeigt. Auffällig ist außerdem, dass die Feststoffraumbelastung des Referenzfilters auf der KA Rodenkirchen mit  $0,5 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  je Filtrationsintervall ebenfalls deutlich unter den Empfehlungen des DWA-A 203 liegt. Unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit können die Längen der Filtrationsintervalle des Referenzfilters jedoch nicht weiter erhöht werden, sodass die ermittelte Raumbelastung mit  $0,5 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$  je Filtrationsintervall das Maximum darstellt. Eine Begründung der verhältnismäßig geringen Feststoffraumbelastung könnte die Alterung (eventuelle Abrasion und Verdichtung der Filterpackung) und die daraus resultierende Verschlechterung der Feststoffabscheidung des eingesetzten Filtermaterials im Referenzfilter sein (seit 1994 ohne Austausch in Betrieb). Zu beachten ist ebenfalls, dass sich die empfohlene Feststoffraumbelastung von  $2 - 3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{Filtermaterial}}$  auf ein Filtrationsintervall von 24h bezieht. Die Filtrationsintervalle der untersuchten GAK-Filter lagen mit zum Teil 42 Tagen deutlich über diesem Wert.

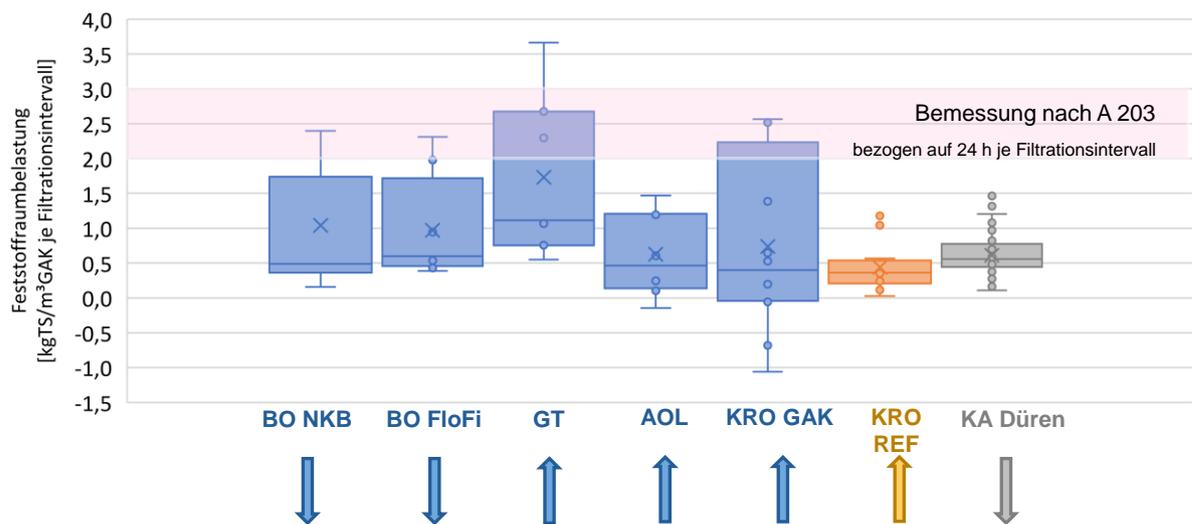


Abbildung 66: Feststoffraumbelastung der untersuchten GAK-Filter

Ein Vergleich der ermittelten Forschungsergebnisse mit dem DWA-A 203 zeigen, dass eine Übertragung der Dimensionierungsempfehlungen aus dem Arbeitsblatt auf die Bemessung von GAK-Filtern nicht uneingeschränkt möglich ist.

### 5.1.2 Empfehlung zur Dimensionierung von GAK-Filtern

Auch wenn das primäre Ziel einer GAK-Filtration auf der Spurenstoffelimination liegt und die GAK-Filter daher auch auf diese Zielgröße ausgelegt werden, erfolgt eine parallel ablaufende Feststoffabscheidung. Eingetragene Feststoffe führen zur Verblockung des Filterbettes, aus der sich die Notwendigkeit einer regelmäßigen Filterspülung ergibt. Wie die Untersuchungen des GAK-Filter auf der KA Düren Merken gezeigt haben, können zu hohe Feststoffkonzentrationen im Zulauf dazu führen, dass granulierten Aktivkohlefilter nicht sicher und wirtschaftlich betrieben werden können. Damit haben partikuläre Stoffe im Zulauf zur GAK-Filtration nicht nur einen maßgeblichen Einfluss auf den Betrieb, sondern auch bei der Entscheidung, ob eine Kläranlage mit einer GAK-Filtration ausgerüstet werden kann oder ob ein anderes Verfahren zur Spurenstoffelimination, wie beispielsweise Ozonung, bevorzugt wird. Eine potentielle Betriebstauglichkeit von GAK-Filtern unter Berücksichtigung der Feststoffkonzentration im Zulauf sollte daher bereits im Zuge der Planung überprüft werden. Aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens SOLIDUS konnte ein erster Bemessungsansatz zur hydraulischen Überprüfung hergeleitet werden, der nachstehend im Detail erläutert wird.

Wie in Kapitel 5.1.1 erläutert zeigen die Untersuchungsergebnisse der GAK-Filter erwartungsgemäß deutliche Abweichungen zu den Empfehlungen des DWA-A 203. Aufgrund der Feststellung, dass beim abwärts durchströmten GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausen die Feststoffabscheidung eher an der Filteroberfläche bzw. in der oberen Schicht stattfindet, kann die Feststoffraumbelastung unter Bezug des gesamten Filtervolumens nicht als Dimensionierungsgröße herangezogen werden. Die untersuchten aufwärts durchströmten GAK-Filter zeigten wiederum eine raumfiltrierende Wirkung. Um diese zwei unterschiedlichen Filtrationsmechanismen auf eine Bemessungsgröße zu beziehen, wird die Feststoffflächenbelastung herangezogen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelte Feststoffflächenbelastung der GAK-Filter ist der nachstehenden Abbildung 67 zu entnehmen. Aufgrund der Tatsache, dass der GAK-Filter auf der KA Düren Merken mit einem mittleren Filtrationsintervall von 6h nicht betriebstauglich war, wird dieser bei der Herleitung eines ersten Bemessungsansatzes nicht weiter berücksichtigt. Insgesamt lag die ermittelte Feststoffflächenbelastung bei den untersuchten GAK-Filtern im Mittel zwischen 1,1 und 3,8 kg<sub>TS</sub>/m<sup>2</sup><sub>GAK</sub> je Filtrationsintervall. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die maximale Filtrationsintervalllänge nur bei den abwärts durchströmten GAK-Filtern erreicht wurde. Außerdem ist zu beachten, dass die Filtrationsintervalllängen insgesamt sehr hohen Variationen (3 – 42 d) unterlagen, sodass sich die ermittelte Feststoffflächenbelastung nicht auf ein einheitliches Filtrationsintervall bezieht.

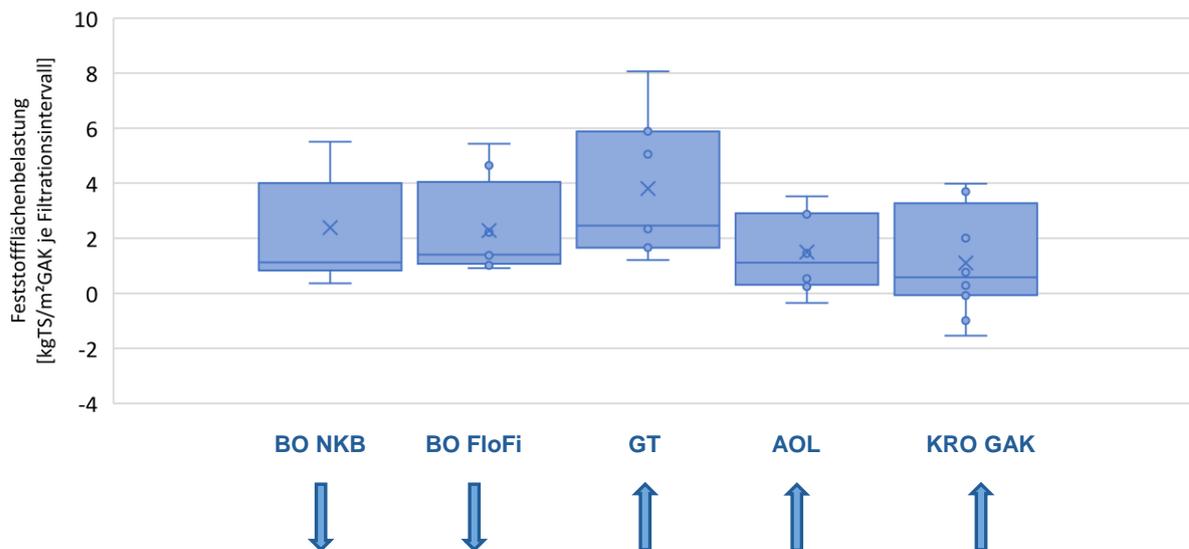


Abbildung 67: Feststoffflächenbelastung der untersuchten GAK-Filter

Für eine wirtschaftliche Dimensionierung ist jedoch eine einheitliche Bezugsgröße hinsichtlich der Filtrationsintervalllänge notwendig. In Anlehnung an das DWA-A 203 wurde daher definiert, dass GAK-Filter im Regelbetrieb mindestens 24 h ohne Spülung betreibbar sein müssen (Ausnahmen bei z.B. Regenwetterzufluss). Weiterhin wurde zur Definition einer maximalen Feststoffflächenbelastung nur die ermittelte mittlere Flächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen berücksichtigt, da dieser als einziger Filter eine hydraulische Verblockung beim Auslösen der Spülung aufwies und damit eine maximale Länge eines Filtrationsintervalls erreicht war. Nachstehende Abbildung 68 zeigt unterstützend die Herleitung der maximalen Feststoffflächenbelastung. Die Feststoffflächenbelastung zur Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von GAK-Filtern beträgt damit

$$B_A \leq 2,3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{GAK}} \text{ je Filtrationsintervall}$$

wobei die Länge eines Filtrationsintervalls im Regelbetrieb mindestens 24 h sein muss. Die Anwendung des Bemessungswertes wird nachstehend im Kapitel 5.1.3 anhand eines fiktiven Bemessungsbeispiels erörtert.

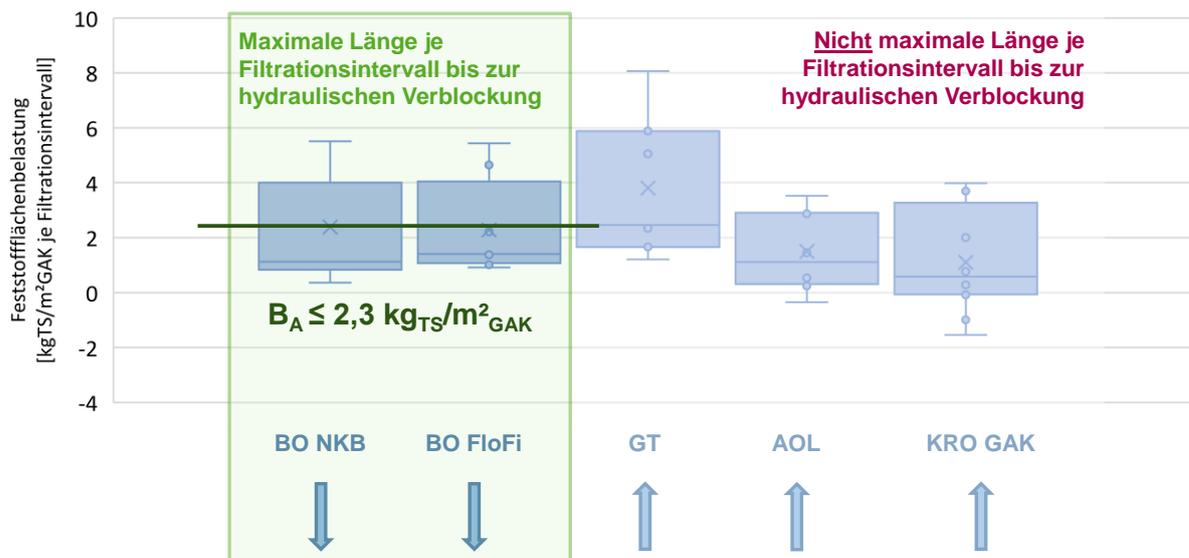


Abbildung 68: Herleitung der Feststoffflächenbelastung

### 5.1.3 Bemessungsbeispiel

Nachstehend wird die Anwendung der zuvor ermittelten Feststoffflächenbelastung anhand eines fiktiven Bemessungsbeispiels für einen abwärts durchströmten GAK-Filter mit konstanter Überstauhöhe verdeutlicht. Dabei werden drei Fälle mit unterschiedlichen mittleren Feststoffkonzentrationen im Zulauf betrachtet. Zu beachten ist, dass sich die Berechnung auf eine Filterzelle bezieht. Die Auslegung der GAK-Filtration erfolgt in erster Linie immer auf die Adsorption von Spurenstoffen. Die aktuellen Empfehlungen zur Dimensionierung u.a. aus dem DWA-A 285 sind dabei zu beachten (z.B.  $EBCT_{\min} = 20 \text{ min}$ ,  $v_f < 9 \text{ m/h}$ ). Die Feststoffflächenbelastung dient lediglich der hydraulischen Überprüfung von GAK-Filtern. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 erwähnt, sollte ein GAK-Filter aus wirtschaftlichen und betrieblichen Gründen im Regelbetrieb mindestens 24 h ohne Spülung betreibbar sein, weshalb sich die nachstehende Rechnung zur hydraulischen Überprüfung auf ein Zeitintervall von 24 h bezieht.

#### Hydraulische Randbedingungen im Bemessungsbeispiel

Bemessungswassermenge  $Q_{\text{Dim}} = 60 \text{ l/s} \hat{=} Q_{\text{Dim},24\text{h}} = 5.200 \text{ m}^3/24\text{h}$

Fläche GAK-Filter  $A_{\text{GAK}} = 25 \text{ m}^2$

Maximale Feststoffflächenbelastung  $B_{A,\max} \leq 2,3 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^2_{\text{GAK}}$  je Filtrationsintervall

Tabelle 16: Bemessungsbeispiel mit unterschiedlichen AFS-Konzentrationen zum Zulauf der GAK-Filtration

$C_{\text{AFS,Zu}}$	2 mg/l	10 mg/l	15 mg/l
Feststofffracht in 24 h	$0,002 \text{ kg/m}^3 * 5.200 \text{ m}^3 =$ 10,4 kg / 24h	$0,01 \text{ kg/m}^3 * 5.200 \text{ m}^3 =$ 52 kg / 24h	$0,015 \text{ kg/m}^3 * 5.200 \text{ m}^3 =$ 78 kg / 24h
Feststoffflächen- belastung $B_A$	$10,4 \text{ kg} / 25 \text{ m}^2 =$ $0,42 \text{ kg}_{\text{AFS}} / \text{m}^2_{\text{GAK}} \text{ je } 24\text{h}$	$52 \text{ kg} / 25 \text{ m}^2 =$ $2,08 \text{ kg}_{\text{AFS}} / \text{m}^2_{\text{GAK}} \text{ je } 24\text{h}$	$78 \text{ kg} / 25 \text{ m}^2 =$ $3,12 \text{ kg}_{\text{AFS}} / \text{m}^2_{\text{GAK}} \text{ je } 24\text{h}$
$B_A \leq B_{A,\text{max}}$	<b>0,42 ≤ 2,3</b>	<b>2,08 ≤ 2,3</b>	<b>3,12 ≥ 2,3</b>

Tabelle 16 zeigt, dass eine GAK-Filterzelle, die im Regelfall eine mittlere Feststoffkonzentration von 2 bzw. 10 mg/l im Zulauf erfährt, theoretisch 24 h ohne Filterspülung betrieben werden kann. Liegt die mittlere Feststoffkonzentration hingegen bei 15 mg/l im Zulauf zum GAK-Filter, ist es wahrscheinlich, dass der Filter häufiger als einmal in 24 h gespült werden muss. Damit wäre aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht eine GAK-Filtration für diesen Bemessungsfall ohne weitere Vorbehandlung des Abwassers nicht zu empfehlen.

Abschließend ist zu betonen, dass die Betrachtung der Feststoffflächenbelastung lediglich für die Dimensionierung erforderlich ist. Ein anlagenspezifisches Kriterium zur Auslösung einer bedarfsgerechten Spülung (z.B. Druck, Trübung, Filterüberstand) sollte im Rahmen der Inbetriebnahme erfolgen. Die Reduzierung von Spülungen hat neben den betrieblichen Vorteilen (Personalentlastung) außerdem wirtschaftliche Vorteile, die im nachstehenden Kapitel verdeutlicht werden.

#### 5.1.4 Kostenbetrachtung

Ein weiterer Aspekt, welcher die Notwendigkeit einer bedarfsgerechten Spülung unterstreicht, sind die anfallenden Betriebskosten. Um diesen Aspekt genauer zu beleuchten, wurden auf Basis einer fiktiven Kläranlage und verschiedener möglicher Szenarien die anfallenden Betriebskosten ermittelt und ein wirtschaftlicher Vergleich getroffen. Die drei festgelegten Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der AFS-Konzentration im Zulauf der GAK-Filtration der fiktiven Kläranlage.

In einem ersten Schritt wurden Randbedingungen für die fiktive Kläranlage festgelegt, um eine wirtschaftliche Bewertung der Szenarien durchführen zu können. Hierzu zählen insbesondere

die Gesamtzulaufmenge der fiktiven Kläranlage sowie die potentielle Teilstrommenge zur GAK-Filtration (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Hydraulische Bemessungsparameter der fiktiven Kläranlage

Zulauf Kläranlage gesamt			
Angeschlossene Einwohner	E	150.000	E
Einwohnergleichwerte	EW	80.000	EW
Zulauf KA	$Q_{\max}$	670	l/s
Maximaler Trockenwetterabfluss	$Q_{T,h,\max}$	250	l/s
Jahresabwassermenge mittel	JAM	6.470.000	m <sup>3</sup> /a
Teilstrom zur GAK-Filtration			
Maximaler Zufluss zur GAK-Filtration	$Q_{D\min}$	250	l/s
Mittlerer Zufluss zur GAK-Filtration	$Q_{T,h,\text{mittel}}$	193	l/s
		695	m <sup>3</sup> /h
		6.086.448	m <sup>3</sup> /a
		94,1	% der JAM
Minimaler Zufluss zur GAK-Filtration	$Q_{T,h,\min}$	81	l/s

Im zweiten Schritt wurden die AFS-Konzentrationen im Zulauf der GAK-Filtration für die drei zu vergleichenden Szenarien definiert. Szenario 1 ( $C_{\text{AFS},\text{zu}} = 2 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ ) und Szenario 2 ( $C_{\text{AFS},\text{zu}} = 4,5 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ ) basieren auf Erfahrungswerten, die im Projekt gesammelt werden konnten. Das dritte Szenario wurde auf Basis der Annahme einer erhöhten mittleren AFS-Konzentration im Zulauf der GAK-Filtration festgelegt. Für die jeweiligen Szenarien und AFS-Konzentrationen wurden in diesem Zusammenhang notwendige Spülintervalle mittels der im Projekt gewonnenen Erfahrungen abgeschätzt (s. Tabelle 17).

Tabelle 18: AFS-Konzentrationen und abgeschätzte Rückspülhäufigkeiten der drei gewählten Szenarien

	Mittlere AFS-Konzentration im Zulauf zur GAK-Filtration [ $\text{mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ ]	Abgeschätzte notwendige Rückspülhäufigkeit
Szenario 1	2,0	1x/Woche
Szenario 2	4,5	2x/Woche
Szenario 3	10,0	7x/Woche

Hier bleibt anzumerken, dass im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht die Adsorptionsleistung der GAK untersucht wurde, sondern lediglich die hydraulische Kapazität der GAK-Filter in Bezug auf Feststoffbelastung des Filters. Die Häufigkeit der Spülvorgänge variiert in der Realität in Zusammenhang mit der AFS-Fracht und weiteren Einflussfaktoren, wie z.B. der biologische Aufwuchs im und auf dem GAK-Filter, und kann sich daher von den nachfolgenden Berechnungen unterscheiden. Im dritten Schritt wurden die GAK-Filterzellen sowie die notwendige Spülabwassermenge bemessen. Die wesentlichen verfahrenstechnischen Bemessungsgrundlagen für die GAK-Filtration werden nachfolgend zusammengefasst (s. Tabelle 19).

Tabelle 19: Bemessung und Auslegung der GAK-Filtration und der Spülwassermengen

Bemessungsgrundlage der GAK-Filter			
Maximaler Zufluss zum GAK-Filter	$Q_{\max}$	250,0	l/s
		900,0	m <sup>3</sup> /h
Gewählte Filtergeschwindigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit)	$V_{\max}$	7,50	m/h
Daraus resultierende erforderliche Gesamtfilterfläche	$A_{\text{erf.}}$	120,0	m <sup>2</sup>
Gewählte Abmessungen und Anzahl der GAK-Filter			
Gewählte Anzahl der Filterzellen (n-1)	n-1	5	–
Gewählte Anzahl der Filterzellen	n	6	–
Gewählte Länge einer Filterzelle	L	7,00	m
Gewählte Breite einer Filterzelle	B	3,50	m
Gewählte Filterbetthöhe (ohne Stützschiicht)	H	2,25	m
Resultierende Größen			
Filterfläche je Filterzelle	$A_{\text{Filterzelle}}$	24,50	m <sup>2</sup>
Filterfläche Gesamt für n-1 Filterzellen	$A_{\text{Gesamt,n-1}}$	122,5 > 120,0 ✓	m <sup>2</sup>
Filterfläche Gesamt für n Filterzellen	$A_{\text{Gesamt,n}}$	147,0	m <sup>2</sup>
Filterbettvolumen je Filterzelle	$V_{\text{Filterzelle}}$	55,1	m <sup>3</sup>
Filterbettvolumen Gesamt	$V_{\text{Gesamt}}$	330,8	m <sup>3</sup>
minimale Leerbettkontaktzeit EBCT	$EBCT_{\min}$	0,3	h
Spülwassermenge			
maximale Wasserspülgeschwindigkeit	$V_{\text{WS}}$	25 – 30	m/h
	$V_{\text{WS,gewählt}}$	27	m/h
Dauer je Wasserspülung	$t_{\text{Spül, Filterzelle}}$	20	min
Erforderliche Spülwassermenge je Wasserspülung	$V_{\text{WS, Filterzelle}}$	221	m <sup>3</sup>
	$V_{\text{WS, Gesamt}}$	1.323	m <sup>3</sup>
Spezifische Spülwassermenge Gesamtfilter		9	m <sup>3</sup> Spülwasser/(m <sup>2</sup> Filterfläche * d)

Auf Basis der berechneten Zulaufwassermengen zur GAK-Filtration sowie den gängigen Dimensionierungsgrößen (Filtergeschwindigkeit von 7,5 m/h) wurde der Bedarf von insgesamt

6 Filterzellen mit jeweils 24,5 m<sup>2</sup> Oberfläche ermittelt, wovon eine Filterzelle zum Rückspülen oder zur Wartung außer Betrieb genommen werden kann (n-1)-Regel. Das Filterbett besteht aus einer GAK-Schicht von 2,25 m. Durch obenstehende Dimensionierung ergibt sich eine Kontaktzeit von 0,3 h. Das Spülprogramm für eine Filterzelle dauert rd. 20 Minuten mit einer maximalen Wasserspülgeschwindigkeit von 27 m/h. Die erforderliche Spülwassermenge für eine Filterspülung beträgt 221 m<sup>3</sup> bzw. 1.323 m<sup>3</sup> für die Spülung der insgesamt 6 Filter.

Im vierten Schritt wurden die Betriebskosten ermittelt. Für die Betriebskosten der drei unterschiedlichen Szenarien wurden die Kosten für Personal, Energie und für die granulierten Aktivkohle abgeschätzt. Die Kosten für Instandhaltung und Wartung wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

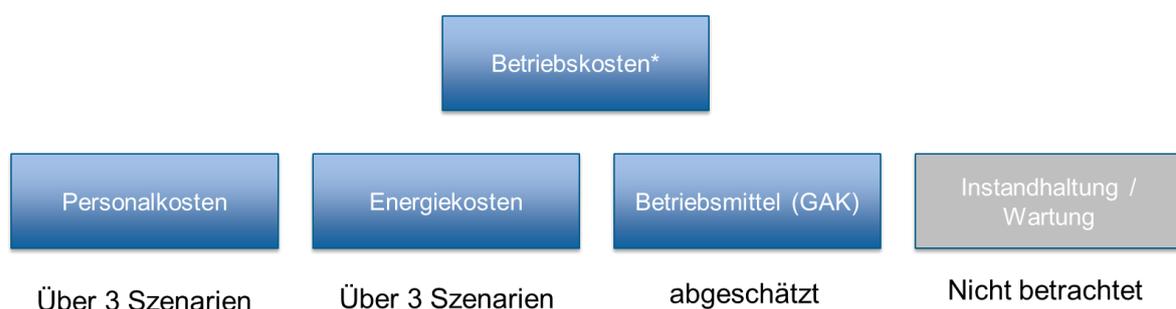


Abbildung 69: Betriebskostenbetrachtung der GAK-Filtration; \* Kosten für Instandhaltung und Wartung nicht berücksichtigt

Bei der Berechnung der Personalkosten wurden nachstehende Rahmenbedingungen angenommen und nach den Angaben der Kläranlagenbetreiber als plausibel eingestuft:

- Kosten Betriebspersonal 40,00 €/h
- Personalaufwand pro Spülvorgang und Filterzelle (manueller Betrieb) 0,5 h

Aus diesen Annahmen und den Annahmen zu den notwendigen Rückspülhäufigkeiten (s. Tabelle 18) wurden in Tabelle 20 die jährlichen Personalkosten für das Rückspülen der GAK-Filter für die einzelnen Szenarien berechnet.

Tabelle 20: Berechnete Personalkosten für die Rückspülungen für die einzelnen Szenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Rückspülhäufigkeit	1x/Woche	2x/Woche	7x/Woche
Personalkosten je Rückspülung einer Filterzelle [€/a]	1.040	2.080	7.280
Personalkosten je Rückspülung aller Filterzellen [€/a]	6.240	12.480	43.680

Für die gewählten Szenarien und die oben beschriebenen Rahmenbedingungen ergeben sich Personalkosten zwischen 6.240 €/a und 43.680 €/a. Bei häufigeren Rückspülungen steigt der Aufwand des Personals auf der Kläranlage und somit auch die Personalkosten.

Die Kosten für Energie beinhalten im Wesentlichen die Kosten für die Spülung der GAK-Filterzellen und die Rückführung der anfallenden Spülabwassermenge in den Zulauf der biologischen Reinigungsstufe sowie die Energiekosten für das Anheben der internen Spülabwassermenge im Zulauf der GAK-Filtration. In Abbildung 70 sind die einzelnen Pumpwerke und die hydraulischen Annahmen dargestellt.

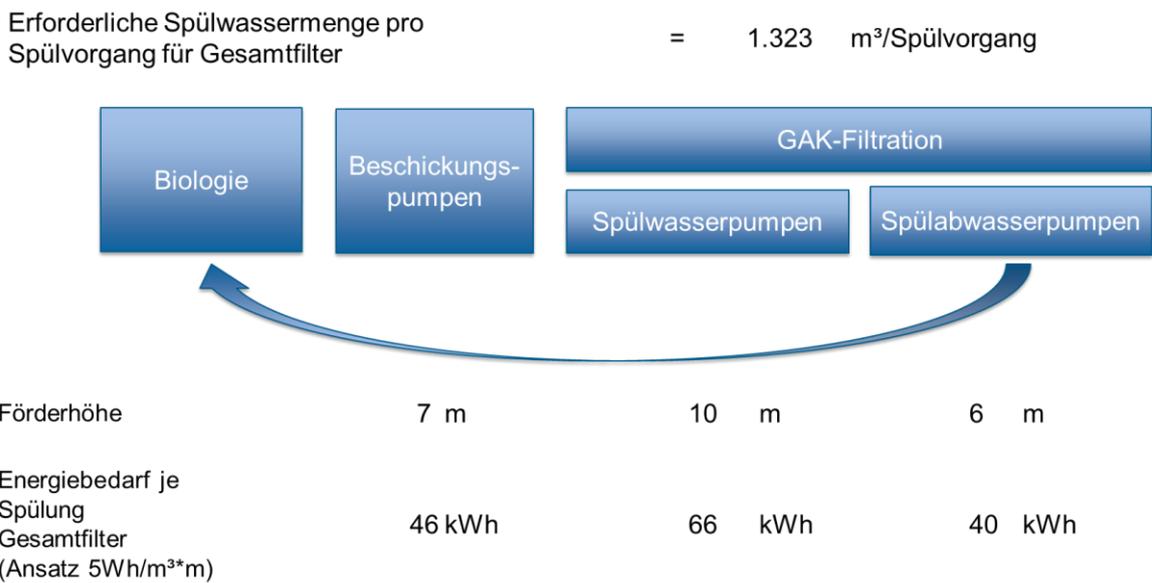


Abbildung 70: Gesamtenergiebedarf für die Spülung der GAK-Filtration und das Rückführen der Spülabwässer

Bei der Abschätzung der Energiekosten wurden nachstehende Rahmenbedingungen angesetzt. Dabei wurde ein spezifischer Stromverbrauch für Pumpwerke in Anlehnung an DWA-A 216 gewählt und ein spezifischer Strompreis prognostiziert.

Strompreis	0,25 €/kWh
spezifischer Stromverbrauch für Pumpwerke	5 Wh/m <sup>3</sup> *m

Mittels der gewählten Szenarien und der oben beschriebenen Rahmenbedingungen ergeben sich Energiekosten zwischen 2.054 €/a und 14.378 €/a (siehe Tabelle 21). Wie auch bei den Personalkosten steigt der Energiebedarf und somit auch die einzusetzenden Energiekosten mit zunehmender Häufigkeit der Spülintervalle.

Tabelle 21: Energiekosten der einzelnen Szenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Kosten Energie [€/kWh]	0,25		
Spülwassermenge pro Woche gesamt [m <sup>3</sup> /Woche]	1.323	2.646	9.261
Energiekosten pro Woche [€/Woche]	38	76	266
Energiekosten pro Jahr [€/a]	2.054	4.108	14.378

In Abbildung 71 werden die Personal- und Energiekosten vergleichend dargestellt.

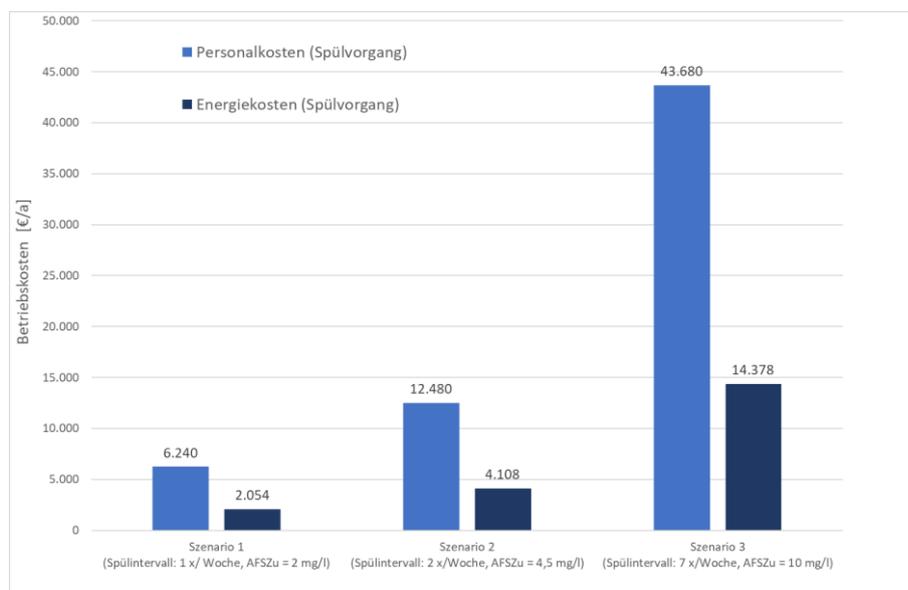


Abbildung 71: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Personal- und Energiekosten der einzelnen Szenarien

Bei Betrachtung von Abbildung 71 fällt auf, dass die Energiekosten bei allen Szenarien geringer ausfallen als die Personalkosten.

Zusätzlich zu den Personal- und Energiekosten zählen ebenfalls die Kosten für das Auffüllen des Filtermaterials, das aufgrund der Rückspülungen verloren wurde, zu den Betriebskosten von GAK-Filtern. Bei der Abschätzung der Kosten für das Auffüllen des GAK-Filtermaterials wurden die in Tabelle 22 dargestellten Rahmenbedingungen angesetzt. Die angesetzten Werte wurden nach Abstimmung mit Kläranlagenbetreibern und Herstellern auf Plausibilität überprüft und verifiziert. Benstöm (2014) konnte jährliche Massenverluste aufgrund von Abrasion bei täglicher Spülung in einem Bereich von 0,1 – 2,0 % quantifizieren. Die Abrasion resultiert primär aus den bei der Luftspülung entstehenden Scherkräften. In folgender

Rechnung wird der Wert von 2,0 % Massenverlust bei täglicher Spülung gewählt (0,29% bei 1xSpülung /Woche; 0,57% 2xSpülung/Woche).

Tabelle 22: Annahmen zur Berechnung der Kosten zum Auffüllen bzw. Austausch der GAK

Kosten GAK	2 €/kg
Dichte GAK	350 kg/m <sup>3</sup>
Annahme: maximal durchsetzbare BV bis zum Austausch (ohne GAK-Verluste) gem. schweizer Konsenspapier (Böhler et al., 2020)	25.000 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>GAK</sub>
Annahme: Abrasion durch Spülung	2 % Massenverlust pro Jahr bei täglicher Spülung

Auf Basis dieser Annahmen berechnen sich die GAK-Kosten wie in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Berechnung der jährlichen Kosten zum Austausch der GAK

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Prozentualer jährlicher GAK-Verlust durch Spülung [%]	0,29	0,57	2
Durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK <sup>1)</sup> [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>GAK</sub> ]	24.930	24.860	24.500
Jährlich durchgesetzte Bettvolumina [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>GAK</sub> ]	18.402		
Austauschintervall [1/a]	0,738	0,740	0,751
Kosten pro GAK-Austausch [€]	231.525		
Jährliche Kosten GAK-Austausch [€/a]	170.909	171.400	173.899
<sup>1)</sup> Die durchsetzbaren BV bis zum Austausch der GAK berechnen sich über die Annahme von 25.000 BV gem. schweizer Konsenspapier (Böhler et al., 2020) sowie die jährlichen GAK-Verluste  $BV = BV_{\max} * (1 - \text{Massenverlust})$			

Auf Basis der gewählten Szenarien sowie der gewählten Rahmenbedingungen ergeben sich Kosten zwischen 170.909 und 173.899 €/a für den Austausch des GAK-Filtermaterials. Es zeigt sich, dass die Mehrkosten durch die potentiellen Verluste an GAK durch Abrasion sehr gering ausfallen. Gemäß der Annahme von Verlusten im Bereich von 2 %/a ergeben sich Reduzierungen der Bettvolumina um maximal 500 BV (Szenario 3). Die jährlichen Kosten für GAK steigen mit zunehmender Häufigkeit der Spülintervalle (1, 2 bzw. 7mal je Woche) nur geringfügig. In Tabelle 24 sowie Abbildung 72 werden die Personal-, Energie- und GAK-Kosten vergleichend dargestellt.

Tabelle 24: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Betriebskosten der einzelnen Szenarien

Szenario 1		
Betriebskosten Personal	6.240	€/a
Betriebskosten Energie	2.054	€/a
Betriebskosten GAK	170.421	€/a
Gesamtkosten Szenario 1	178.715	€/a
Szenario 2		
Betriebskosten Personal	12.480	€/a
Betriebskosten Energie	4.108	€/a
Betriebskosten GAK	171.449	€/a
Gesamtkosten Szenario 2	188.037	€/a
Szenario 3		
Betriebskosten Personal	43.680	€/a
Betriebskosten Energie	14.378	€/a
Betriebskosten GAK	173.899	€/a
Gesamtkosten Szenario 2	231.956	€/a

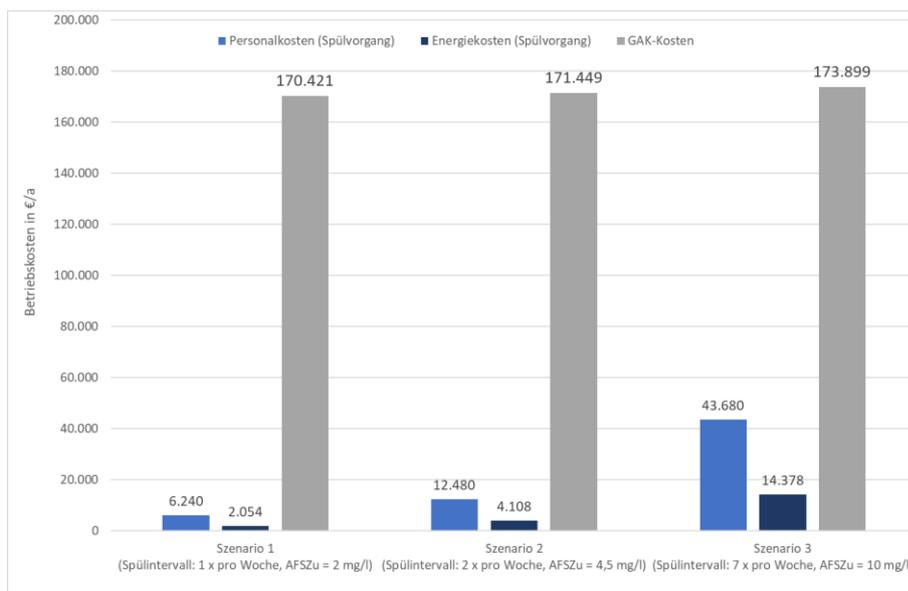


Abbildung 72: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Personal-, Energie- und GAK-Kosten der einzelnen Szenarien

Tabelle 24 und veranschaulichen den Einfluss einer bedarfsgerechten Spülung einer GAK-Filtration in Bezug auf die AFS-Zulaufkonzentration zum Filter. Mit zunehmender Häufigkeit der Filterspülung steigen die Kosten für Personal und Energie signifikant an, wenngleich die Kosten für den Austausch der GAK weiterhin überwiegen. Somit wurde auf Basis der verschiedenen Szenarien für eine fiktive Kläranlage aufgezeigt, dass bei bedarfsgerechter

Spülung einer GAK-Filtration und gutem Rückhalt von AFS in den vorgeschalteten Verfahrensstufen merklich Betriebskosten eingespart werden. Bei der fiktiven Kläranlage konnten Einsparungen der GAK-Betriebskosten zwischen täglicher und wöchentlicher Spülung im Bereich von rd. 53.000 € aufgezeigt werden.

## 5.2 Empfehlungen zum Betrieb von GAK-Filtern

Folgende betriebliche Empfehlungen lassen sich aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens SOLIDUS zusammenfassend ableiten:

- Zwar erfolgt die hydraulische Bemessung von GAK-Filtern auf einem Filtrationsintervall von 24 h, die tatsächliche Länge eines Filtrationsintervalls variiert jedoch u.a. je nach Feststoffkonzentrationen im Zulauf, der Ausbildung einer biologisch aktiven Schicht im und auf dem Filter und der Durchströmungsrichtung. Die Praxis hat gezeigt, dass Filtrationsintervalle von mehreren Tagen bis zu mehreren Wochen möglich sind.
- Das Auslösen einer bedarfsgerechten Spülung kann bei abwärts durchströmten Filtern nach Filterüberstand bzw. nach Druck im oberen Filterbettbereich erfolgen. Bei Auslösung nach Filterüberstand ist die maximale, anlagenspezifische Höhe zu beachten, um einen Rückstau bzw. ein Überlaufen der Filtrationsanlage zu vermeiden.
- Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist es von Vorteil, wenn die Ausbildung eines Unterdruckes vermieden wird. Dieser resultiert bei abwärts durchströmten Filtern aus der Sogwirkung, die durch den Höhenunterschied zwischen Zulauf und Ablauf der Filtration entsteht und sich von oben ausgehend nach unten durch das Filterbett bewegt. Die Spülung kann anhand einer Drucksonde im oberen Filterbettbereich ausgelöst werden. Hierbei ist zu beachten, dass es bedingt durch die Spülung zu Ungleichmäßigkeiten der Filteroberfläche kommen kann, weshalb die Sonde nicht zu hoch angesetzt werden sollte. Die Sonde sollte ca. 20 – 50 cm unterhalb der Filteroberfläche angebracht sein.
- Aufwärts durchströmte Filter weisen selbst bei hohen Filtrationsintervalllängen von mehreren Wochen bei geringen Feststoffkonzentrationen im Zulauf ( $< 5\text{mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ ) keine hydraulische Verblockung auf, sofern es während der Spülung zu einem vollständigen Aufbrechen des Filterbettes kommt. Im Filterbetrieb erfolgt jedoch eine Teilfluidisierung des Filterbettes, aus der ein Feststoffaustrag resultiert. Dieser Feststoffaustrag ist anhand eines punktuellen Anstiegs der Trübung im Ablauf des GAK-Filters feststellbar. Unter Berücksichtigung der Ablaufwerte kann die Spülung von aufwärts durchströmten Filtern anhand einer Trübung im Ablauf erfolgen. Hierbei ist zu beachten, dass es aufgrund des punktuellen Feststoffaustrags zu einem kurzzeitigen Anstieg der Trübung im Ablauf kommen kann. Der gewählte Wert zum Auslösen der Spülung sollte daher einen geglätteten Wert abbilden, der kurzzeitige Ausreißer nicht berücksichtigt (Beachten des Trends).

- Der Einfluss der Teilfluidisierung bei aufwärts durchströmten Filtern auf die Adsorption wurde im Rahmen von SOLIDUS nicht untersucht. Die Ablaufkonzentration der Spurenstoffe ist bei der Anpassung der Filtrationsintervalllänge in jedem Fall zu beachten.
- Es ist zu empfehlen, den Filter in regelmäßigen Abständen (z.B. alle 2 – 3 Monate) abzulassen und die Filteroberfläche zu begutachten (vor und nach der Spülung). Starke Unregelmäßigkeiten auf der Filteroberfläche lassen darauf schließen, dass die Spülung fehlerhaft eingestellt ist und keine optimale Durchmischung des Filterbettes erfolgt. Die Spülung sollte daraufhin optimiert werden (z.B. höhere Luftgeschwindigkeiten sowie mehrere, kürzere, aufeinanderfolgende Spülstöße von 2 bis 3 min mit Luft).
- Bei der Einstellung der Spülgeschwindigkeit (Luft, Wasser) sollte generell die vorhandene Höhe des Filterüberstandes beachtet werden, um einen Austrag von Aktivkohle während der Spülung zu vermeiden. Bei der Planung sollte ein ausreichendes Freibord gewählt werden (zwischen 1,2 – 1,8 m)
- Die Durchführung einer Siebanalyse mit Aktivkohleproben aus unterschiedlichen Filterbetthöhen liefert gute Anhaltspunkte über die Klassierung und damit über die Wirksamkeit der Spülung. Selbst Einschichtfilter sollten aufgrund des Kornspektrums (z.B. 8x30mesh) eine gewisse Kornklassierung nach Größe aufweisen (gröberes Korn unten, feineres Korn oben). Die Probenahme sowie die Siebanalysen weisen jedoch einen hohen Aufwand auf und sollten von einem externen Labor durchgeführt werden. Die Durchführung ist erst dann zu empfehlen, wenn bereits ein merkbares Problem im Filterbetrieb aufgetreten ist (z.B. Verblockung des Filterbettes, stark ungleichmäßiges Filterbett).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

GAK-Filter werden zur Spurenstoffelimination eingesetzt und wurden daher bislang über die Kontaktzeit und die Filtergeschwindigkeit dimensioniert. In diesem Zusammenhang fehlten jedoch Erkenntnisse über die hydraulische Leistungsfähigkeit in Bezug auf maximale Feststoffbelastungen der GAK-Filter sowie Empfehlungen zur Auslegung der Filterspülung. Die nach DWA-A 203 geltenden Bemessungsgrundsätze für konventionelle Raumfilter (z.B. maximale Feststoffraumbelastung zwischen zwei Rückspülungen) können aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften zwischen konventionellen Filtermaterialien und GAK nicht übertragen werden. Im Projekt „SOLIDUS“ wurden zu diesem Zweck vier großtechnische GAK-Filter auf vier Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen untersucht.

In Bad Oeynhausen wurde ein abwärts durchströmter GAK-Filter sowohl mit einer Beschickung mit Ablauf Nachklärung als auch mit Ablauf Flockungsfilter untersucht. Hiermit konnte der Betrieb mit einem feststoffarmen Zulauf (Vorbehandlung mit FloFi, im Mittel  $c_{AFS, zu} < 2 \text{ mg}_{AFS/l}$  (Bestimmungsgrenze)) mit dem Betrieb mit höheren Feststoffkonzentrationen im Zulauf (im Mittel  $c_{AFS, zu} = 6 \text{ mg}_{AFS/l}$ ) direkt verglichen werden. Es zeigte sich, dass eine Vorbehandlung des Abwassers die maximale Länge des Filtrationsintervalls um ein Vielfaches verlängern kann (ca. 470 h im Gegensatz zu 100 h bei Beschickung mit Ablauf Nachklärung). Im Verlauf eines Filtrationsintervalls zeigten die Drucksonden einen konstanten ansteigenden Druckverlust bis in den Unterdruckbereich. Es konnte belegt werden, dass diese Unterdrücke zu Ausgasungen im Filterbett führen, die potentiell Fließwege blockieren können und dadurch für die Adsorption hinderlich wirken können. Somit wird für zukünftige Planungen **abwärts durchströmter GAK-Filter empfohlen, eine Drucksonde im oberen Bereich des Filterbettes zu verbauen. Für den Betrieb ist es ratsam, die Spülung nach Unterdruck auszulösen.** Der Vergleich von Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf sowie die optische Sichtung von Filterkuchen ermöglichten eindeutige Aussagen zum Feststoffrückhalt des Filters. Die Betrachtung der Mischeau-Diagramme zeigte dabei, dass lediglich die oberen ca. 60 cm zum Feststoffrückhalt beitragen und es somit aufgrund der Kornklassierung keine vollständige Raumfiltration vorlag. Die Beschickung mit Ablauf FloFi und die daraus resultierende Verlängerung der Filtrationszyklen führten beim GAK-Filter zur Etablierung eines Biofilms in Form eines dichten Algenteppecs auf der GAK-Oberfläche, der die Bildung eines Filterkuchens verstärkte sowie die Druckverluste erhöhte.

Die Untersuchungen der drei aufwärts durchströmten GAK-Filter zeigten – im Gegensatz zu dem abwärts durchströmten Filter in Bad Oeynhausen – deutlich geringere Druckverluste innerhalb einzelner Spülzyklen. Bei zwei der aufwärts durchströmten Filter (Köln-

Rodenkirchen und Gütersloh Putzhagen) war selbst bei zum Teil sehr hohen Filtrationsintervallen von mehreren Wochen keine hydraulische Verblockung festzustellen. Der GAK-Filter in Gütersloh-Putzhagen zeigte hierbei einen leichten Trübungsanstieg im Ablauf der GAK-Filtration in den jeweiligen Filtrationsintervallen. Hier wird vermutet, dass es zu einer Teilfluidisierung des Filterbettes kam, wodurch Feststoffe aus dem Filterbett während des Filterbetriebs zum Teil ausgetragen und somit von der Trübungssonde detektiert wurden. Aufgrund der Messungen der Drucksonden wurde empfohlen, die Filtrationsintervalle zu verlängern. Somit konnten auf der KA Gütersloh-Putzhagen die Filtrationsintervalle von anfänglich ca. 10 d auf 42 d verlängert werden, ohne dass sich irreversible Verblockungen im Filterbett bildeten. Diese Verlängerung ist also aus hydraulischer Sicht möglich, wenn auch die Ablaufqualität über eine Trübungssonde überwacht werden sollte.

Der GAK-Filter auf der KA Obere Lutter wies mit der Zeit eine zunehmende Verblockung des Filterbettes auf ca. 65cm Höhe auf. Die nicht vorhandene Klassierung des Filterkorns lässt darauf schließen, dass die Einstellung der Spülung (z.B. Luft- oder Wassergeschwindigkeit) nicht optimal war, sodass das Filterbett während der Spülung nicht vollständig aufgebrochen werden konnte. Dadurch konnte der Solldurchfluss auf Dauer nicht erzielt werden, sodass der Filter bereits nach 40 BV wieder gespült werden musste (Spülung i.d.R. nach ca. 100 BV). Insgesamt wurden die Filtrationsintervalle in Rahmen des Projektes SOLIDUS nicht erhöht, da die Spülung sich nach der Ablaufkonzentration an CSB richtet und die Spülungen die Ablaufqualität verbessern. Die Trübungssonde zeigte in diesem Fall keine belastbaren Ergebnisse, da der Messbereich zu weit eingestellt war.

Auf der KA Köln-Rodenkirchen wurde neben dem GAK-Filter ein BIOFOR-Filter mit Filtermaterial Biolit als Referenz untersucht. Im Vergleich beider Filter zeigte sich, dass beim Referenzfilter innerhalb eines Filtrationsintervalls deutlich höhere Druckverluste als beim GAK-Filter zu verzeichnen waren. Der GAK-Filter weist im Filtrationsbetrieb – ähnlich wie der GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen – eine Teilfluidisierung des Filterbettes und einen daraus resultierenden Feststoffaustrag auf. Dies spiegelt sich in der Analyse der AFS-Zu- und Ablaufkonzentrationen wider, wo für einige Filtrationsintervalle höhere AFS-Konzentrationen im Ablauf als im Zulauf festgestellt wurden. Somit findet hier nur teilweise eine Einlagerung von Feststoffen statt. Die Filtrationsintervalle wurden auf der KA nicht verlängert. Bei der Untersuchung des Filterbettes konnte optisch festgestellt werden, dass sich im Bereich des Filterzulaufs (vorne im Filterbett) gröbere GAK-Körner von der Stützsicht auf der Filteroberfläche befanden. Dies konnte durch vergleichende Siebanalysen der GAK im Bereich des Zu- und Ablaufs (vorne und hinten im Filterbett) bestätigt werden. Durch einen Lufteintrag im Bereich des Filterzulaufs kam es zu hohen Turbulenzen und einer Aufwirbelung des

Filterbettes. Dies bedingte womöglich eine ungleichmäßige Durchströmung sowie präferierte Fließwege im Filterbett, die sich vermutlich negativ auf die Adsorptionseigenschaften des Filters auswirken. Durch die Ergebnisse der Siebanalysen wurde dieser Effekt verdeutlicht und bauliche Maßnahmen (Installation einer Abluftleitung) zur Behebung des Problems durchgeführt. Eine zweite Siebanalyse, die nach dem Umbau stattfand, zeigte, dass das Problem behoben wurde.

Bei der Berechnung maximaler Feststoffbelastungen, die für die Dimensionierung von GAK-Filtern erforderlich ist, wurde ebenfalls der GAK-Filter auf der KA Düren-Merken berücksichtigt, welcher sich durch hohe Feststoffkonzentrationen im Zulauf kennzeichnet. Die Gesamtbetrachtung aller Filter zeigt, dass es bei aufwärtsdurchströmten Filtern zu einer besseren raumfiltrierenden Feststoffabscheidung kommt. Hier ist jedoch zu beachten, dass es zu Feststoffdurchbrüchen kommen kann. In abwärts durchströmten Filtern kommt es hingegen zu einer eher oberflächlichen Filtration und die maximale Länge eines Filtrationsintervalls wird durch eine hydraulische Verblockung limitiert. Bei der Berechnung maximaler Feststoffraum- und -flächenbelastungen muss beachtet werden, dass bei den aufwärts durchströmten Filtern keine hydraulische Belastungsgrenze erreicht wurde. Ebenfalls lagen viele AFS-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze, sodass die Zahlenwerte für Feststoffraum- und -flächenbelastungen mit Unsicherheiten verbunden sind. Insgesamt wird empfohlen, die Feststoffflächenbelastung für GAK-Filter mit einem Rechenwert von

$$B_A \leq 2,3 \text{ kg}_{TS}/\text{m}^2_{\text{GAK}} \text{ je Filtrationsintervall}$$

anzusetzen. Ein Bemessungsbeispiel zeigt dabei die praktische Anwendung des Rechenwertes. Zum Auslösen einer bedarfsgerechten Spülung sollte bei aufwärts durchströmten Filtern die Ablaufqualität durch den Einbau geeigneter Trübungssonden überwacht werden. Bei abwärts durchströmten GAK-Filtern sollte neben einer Sonde zur Erfassung der Filterüberstandshöhe eine Drucksonde im oberen Bereich des Filterbettes verbaut werden und dadurch die Bildung von Unterdrücken vermieden werden. Die Berechnung der Betriebskosten bei einer bedarfsgerechten Anpassung der Filtrationsintervalllängen für eine Beispielkläranlage, zeigten eine deutliche Einsparung der Kosten von bis zu 53.000€/a.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	-
AOL	Abwasserverband Obere Lutter	-
ARA	Abwasserreinigungsanlage	-
B <sub>A</sub>	Feststoffflächenbelastung	kg/m <sup>2</sup>
B <sub>R</sub>	Feststoffraumbelastung	kg/m <sup>3</sup>
BAK	Biologisch aktivierte Aktivkohle	-
BG	Bestimmungsgrenze	-
BIOFOR	Biological fixed oxygen reactor	-
BO	Bad Oeynhausen	-
BSB5	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	mg/l
BV	Bettvolumina	-
c	Stoffkonzentration	mg/l
CH	Schweiz	-
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
DIN	Deutsches Institut für Normung	-
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff	-
DVWG	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.	-
DWA	DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	-
EBCT	Empty bed contact time	h
EW	Einwohner	-
FloFi	Flockungsfiltration	-

FNU	Formazine Nephelometric Units – Streulichtmessung (Winkel 90°) gemäß Norm ISO 7027	FNU
GAK	Granulierte Aktivkohle	-
GT	Gütersloh-Putzhagen	-
ISA	Institut für Siedlungsabwasserwirtschaft	-
KA	Kläranlage	-
KOM-M NRW	Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW	-
KRO	Köln-Rodenkirchen	-
NK	Nachklärung	-
P	Phosphor	
PAK	Pulverisierte Aktivkohle	-
Q	Durchfluss	-
Q <sub>soll</sub>	Soll - Durchfluss	-
StEB	Stadtentwässerungsbetriebe	-
TE/F	Trübungseinheit/Formazin – deutsche Einheit, die in der Wasseraufbereitung verwendet wird	TE/F
TS	Feststoffgehalt (Total Solids)	-
v <sub>f</sub>	Filtergeschwindigkeit	m/h
ΔP	Druckdifferenz	mbar

## 7.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Ziele einer Filterspülung (Vgl. (Bornemann et al., 2015)).....	6
Tabelle 2: Etablierte Kriterien zur Auslösung einer Filterspülung (Vgl. (DWA-A 203, 2019)) ..	6
Tabelle 3: Dimensionierungsempfehlungen für GAK-Filter nach Fundneider (2020), KOM.M-NRW (2015), Schweizer Konsenspapier (2020) und DWA-Themenband (2019).....	13
Tabelle 4: Zusammenstellung großtechnischer GAK-Filter und der spezifischen Spülkriterien .....	16
Tabelle 5: Anzahl der täglichen Rückspülen, Filtergeschwindigkeiten und Leerbettkontaktzeiten bei erhöhter Feststofffracht (Böhler et al., 2020) .....	18
Tabelle 6: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen .....	28
Tabelle 7: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen.....	30
Tabelle 8: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter .....	32
Tabelle 9: Spülprogramm des GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen .....	33
Tabelle 10: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration (bei Beschickung mit Ablauf NK) (Bestimmungsgrenze (BG) von 2 mg <sub>AFS/l</sub> ) .....	54
Tabelle 11: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration (bei Beschickung mit Ablauf FloFi).....	54
Tabelle 12: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration .....	63
Tabelle 13: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration .....	72
Tabelle 14: Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der GAK-Filtration und des Referenzfilters.....	82
Tabelle 15: Zusammenfassung der Spezifikationen der untersuchten GAK-Filter .....	89
Tabelle 16: Bemessungsbeispiel mit unterschiedlichen AFS-Konzentrationen zum Zulauf der GAK-Filtration .....	100
Tabelle 17: Hydraulische Bemessungsparameter der fiktiven Kläranlage .....	101
Tabelle 18: AFS-Konzentrationen und abgeschätzte Rückspülhäufigkeiten der drei gewählten Szenarien .....	101
Tabelle 19: Bemessung und Auslegung der GAK-Filtration und der Spülwassermengen...	102

Tabelle 20: Berechnete Personalkosten für die Rückspülungen für die einzelnen Szenarien ..... 103

Tabelle 21: Energiekosten der einzelnen Szenarien ..... 105

Tabelle 22: Annahmen zur Berechnung der Kosten zum Auffüllen bzw. Austausch der GAK ..... 106

Tabelle 23: Berechnung der jährlichen Kosten zum Austausch der GAK ..... 106

Tabelle 24: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Betriebskosten der einzelnen Szenarien ..... 107

### 7.3 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Verfahren zur Mikroschadstoffelimination in Deutschland (in Betrieb und Planung/Bau) (Metzger et al., 2020) .....	3
Abbildung 2: Zeitliche Unterteilung eines Filtrationsintervall hinsichtlich der Trübung (Metzger et al., 2011).....	7
Abbildung 3: Qualitative Modelle der Druckverlustentwicklung in Raumfiltern (a) Druckverlust bei Oberflächenfiltration; b) Druckverlust bei optimal ablaufenden Raumfiltration; c) Druckverlust aus Mischform der Oberflächen- und Raumfiltration; Vgl. (Cleasby und Baumann, 1974)) .....	8
Abbildung 4: Aufbau eines Micheau-Diagramms für einen Einschichtfilter (Vgl. (Grombach et al., 2000)) .....	9
Abbildung 5: Fließschema zur Einbindung eines GAK-Filters in den Klärprozess im Ablauf einer NK (Vgl. (Rödel et al., 2019)) .....	12
Abbildung 6: Fließschema zur Einbindung eines GAK-Filters in den Klärprozess im Ablauf einer Flockungsfiltration (FF) (Vgl. (Rödel et al., 2019)).....	12
Abbildung 7: Angepasstes Spülprogramm (unten) für den GAK-Filter auf der KA Wuppertal-Buchenhofen im Vergleich zum Normalspülprogramm (oben) (Bornemann et al., 2015) .....	14
Abbildung 8: Verlauf des Druckverlustes im Filterbett eines aufwärts (A) und abwärts (B) durchströmten GAK-Filters (Pilotanlage) auf der Kläranlage Münchehofe (Jekel und Ruhl, 2016) .....	23
Abbildung 9: Druckverlust ( $\Delta p$ ) im Filterbett über das Filtrationsintervall (Micheau-Diagramm) für einen Filter (Pilotanlage) mit GAK der Körnung 1,4 – 2,4 mm (A) und GAK der Körnung 2,4 – 4,7 mm + Sand (B) (Vgl. (Telgmann et al., 2020)).....	23
Abbildung 10: Übersicht der untersuchten GAK-Filter .....	25
Abbildung 11: Fließschema des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen.....	27
Abbildung 12: GAK-Filter auf der KA Bad Oeynhausen (Draufsicht) .....	27
Abbildung 13: Fließschema des GAK-Filters auf der KA Gütersloh-Putzhagen.....	29
Abbildung 14: GAK-Filter auf der KA Gütersloh-Putzhagen (Draufsicht) .....	29
Abbildung 15: Fließschema der GAK-Filtration auf der KA Obere Lutter .....	31

---

Abbildung 16: GAK-Filter mit dahinterliegendem Schönungsteich auf der KA Obere Lutter (Draufsicht).....	31
Abbildung 17: Fließschema des untersuchten GAK-Filters auf der KA Köln-Rodenkirchen..	33
Abbildung 18: GAK-Filter auf der KA Köln-Rodenkirchen (Draufsicht) .....	33
Abbildung 19: Probenahmetiefen der unterschiedlichen GAK-Filter.....	35
Abbildung 20: Tiefe der Drucksonden in den unterschiedlichen GAK-Filtern.....	37
Abbildung 21: Erläuterung der grafischen Darstellung der Feststoffbelastung .....	39
Abbildung 22: Leseschlüssel für Boxplots .....	40
Abbildung 23: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 24.09.2019.....	42
Abbildung 24: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 23.02.2021.....	43
Abbildung 25: Beschaffenheit der Filteroberfläche (August 2019).....	43
Abbildung 26: Beschaffenheit der Filteroberfläche (März 2021) .....	43
Abbildung 27: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 04.12-09.12.2019 ....	45
Abbildung 28: Druckverlauf für den Filtrationszyklus vom 04.12.-09.12.2019 über die Zeit und die Filterbetthöhe (Micheau-Diagramm).....	46
Abbildung 29: Druckverlauf im Filterbett für das Filtrationsintervall vom 06.06. – 16.06.2020 .....	48
Abbildung 30: Druckverlauf für den Filtrationszyklus vom 06.06. – 16.06.2020 über die Zeit und die Filterbetthöhe (Micheau-Diagramm).....	48
Abbildung 31: Durchgesetzte Bettvolumina pro Filtrationsintervall .....	49
Abbildung 32: Filterlaufzeit pro Filtrationsintervall .....	49
Abbildung 33: Wasserspülung ausgelöst nach Höhenstand.....	51
Abbildung 34: Wasserspülung ausgelöst nach Druck .....	51
Abbildung 35: Filteroberfläche vor Luftspülung .....	52
Abbildung 36: Filteroberfläche nach Luftspülung.....	52
Abbildungen 37 und 38: Algenteppich auf Filteroberfläche bei Beschickung mit Ablauf FloFi .....	53

Abbildung 39: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen ..... 56

Abbildung 40: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Bad Oeynhausen ..... 56

Abbildung 41: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 21.01.2020..... 59

Abbildung 42 Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 28.01.2021..... 59

Abbildung 43: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 17.02. – 27.02.2020. 61

Abbildung 44: Druckverlauf im Filterbett für den Filtrationszyklus vom 16.12.2020 – 28.01.2021 ..... 62

Abbildung 45: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Gütersloh- Putzhagen ..... 65

Abbildung 46: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Gütersloh- Putzhagen ..... 65

Abbildung 47: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 09.06.2020..... 68

Abbildung 48: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Tiefen, Probenahme am 29.10.2021 ..... 68

Abbildung 49: Druckverlauf im Filterbett für den gesamten Untersuchungszeitraum..... 70

Abbildung 50: Druckverlauf im Filterbett für das Filtrationsintervall vom 03.07.2020 bis 14.07.2020..... 70

Abbildung 51: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter . 73

Abbildung 52: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Obere Lutter ..... 73

Abbildung 53: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen im Bereich des Filterzulaufs, Probenahme am 04.02.2021..... 76

Abbildung 54: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen im Bereich des Filterablaufs, Probenahme am 04.02.2021 ..... 76

Abbildung 55: Korngrößenverteilung in unterschiedlichen Filterbettiefen, Probenahme am 03.09.2021..... 78

Abbildung 56: Druckverlauf im GAK-Filter für den Zeitraum vom 10.03.2021 bis 15.04.2021 ..... 79

Abbildung 57: Druckverlauf im Referenzfilter für den Zeitraum vom 10.03.2021 bis 15.04.2021 ..... 81

Abbildung 58: Foto der Filterpapiere nach Bestimmung der AFS, B = Ablauf Ozonung, F = Zulauf Ozonung (Zulauf GAK) (Foto: Labor StEB Köln) ..... 84

Abbildung 59: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK- und des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen ..... 84

Abbildung 60: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK- und des Referenzfilters auf der KA Köln-Rodenkirchen..... 85

Abbildung 61: AFS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken ..... 87

Abbildung 62: Ermittelte Feststoffraumbelastung des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken ..... 88

Abbildung 63: Ermittelte Feststoffflächenbelastung des GAK-Filters auf der KA Düren-Merken ..... 88

Abbildung 64: Feststoffkonzentrationen im Zulauf zu den untersuchten GAK-Filtern ..... 94

Abbildung 65: Länge der Filtrationsintervall der untersuchten GAK-Filter..... 95

Abbildung 66: Feststoffraumbelastung der untersuchten GAK-Filter ..... 96

Abbildung 67: Feststoffflächenbelastung der untersuchten GAK-Filter..... 98

Abbildung 68: Herleitung der Feststoffflächenbelastung ..... 99

Abbildung 69: Betriebskostenbetrachtung der GAK-Filtration; \* Kosten für Instandhaltung und Wartung nicht berücksichtigt ..... 103

Abbildung 70: Gesamtenergiebedarf für die Spülung der GAK-Filtration und das Rückführen der Spülabwässer ..... 104

Abbildung 71: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Personal- und Energiekosten der einzelnen Szenarien ..... 105

Abbildung 72: Vergleichende Betrachtung der jährlichen Personal-, Energie- und GAK-Kosten der einzelnen Szenarien ..... 107

Abbildung 72: Gesamtdarstellung der Druckdaten in Bad Oeynhausen (ISA-Sonden)..... 151

---

Abbildung 73: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.09 - 28.09 (ISA-Sonden) .....	152
Abbildung 74: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.09 - 30.09 (ISA-Sonden) .....	152
Abbildung 75: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen 30.09 - 05.10 (ISA-Sonden) .....	153
Abbildung 76: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.09 - 06.10 (ISA-Sonden) .....	153
Abbildung 77: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.10 - 09.10 (ISA-Sonden) .....	154
Abbildung 78: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 06.10 - 10.10 (ISA-Sonden) .....	154
Abbildung 79: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.10 - 14.10 (ISA-Sonden) .....	155
Abbildung 80: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.10 - 15.10 (ISA-Sonden) .....	155
Abbildung 81: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 15.10 - 18.10 (ISA-Sonden) .....	156
Abbildung 82: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 15.10 - 18.10 (ISA-Sonden) .....	156
Abbildung 83: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 18.10 - 22.10 (ISA-Sonden) .....	157
Abbildung 84: Druckdiagramm Bad Oeynhausen 18.10 - 22.10 (ISA-Sonden) .....	157
Abbildung 85: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 23.10 - 28.10 (ISA-Sonden) .....	158
Abbildung 86: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.10 - 28.10 (ISA-Sonden) .....	158
Abbildung 87: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 28.10 - 02.11 (ISA-Sonden) .....	159
Abbildung 88: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 28.10 - 04.11 (ISA-Sonden) .....	159
Abbildung 89: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 04.11 - 08.11 (ISA-Sonden) .....	160
Abbildung 90: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.11 - 11.11 (ISA-Sonden) .....	160
Abbildung 91: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 11.11 - 15.11 (ISA-Sonden) .....	161
Abbildung 92: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 11.11 - 16.11 (ISA-Sonden) .....	161
Abbildung 93: Micheau Diagramm Bad Oeynhausen vom 16.11 - 19.11 (ISA-Sonden) .....	162
Abbildung 94: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.11 - 18.11 (ISA-Sonden) .....	162
Abbildung 95: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (ISA-Sonden) .....	163
Abbildung 96: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 18.11 - 22.11 (ISA-Sonden) .....	163
Abbildung 97: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 25.11 (ISA-Sonden) .....	164
Abbildung 98: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 26.11 (ISA-Sonden) .....	164
Abbildung 99: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 29.11 (ISA-Sonden) .....	165

---

Abbildung 100: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 30.11 (ISA-Sonden).....	165
Abbildung 101: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 03.12 (ISA-Sonden) ...	166
Abbildung 102: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 04.12 (ISA-Sonden).....	166
Abbildung 103: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 04.12 - 09.12 (ISA-Sonden) ...	167
Abbildung 104: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.12 - 09.12 (ISA-Sonden).....	167
Abbildung 105: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (ISA-Sonden) ...	168
Abbildung 106: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 14.12 (ISA-Sonden).....	168
Abbildung 107: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 19.12 (ISA-Sonden) ...	169
Abbildung 108: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 21.12 (ISA-Sonden).....	169
Abbildung 109: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 24.12 (ISA-Sonden) ...	170
Abbildung 110: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 24.12 (ISA-Sonden).....	170
Abbildung 111: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (ISA-Sonden) ...	171
Abbildung 112: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (ISA-Sonden).....	171
Abbildung 113: Gesamtdarstellung der Druckdaten in Bad Oeynhausen mit Beschickung Ablauf NK (Bad Oeynhausen (BO) -Sonden) .....	172
Abbildung 114: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (BO-Sonden)....	173
Abbildung 115: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (BO-Sonden) .....	173
Abbildung 116: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 25.11 (BO-Sonden)....	174
Abbildung 117: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 26.11 (BO-Sonden) .....	174
Abbildung 118: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 29.11 (BO-Sonden)....	175
Abbildung 119: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 30.11 (BO-Sonden) .....	175
Abbildung 120: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 03.12 (BO-Sonden)....	176
Abbildung 121: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 04.12 (BO-Sonden) .....	176
Abbildung 122: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (BO-Sonden)....	177
Abbildung 123: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (BO-Sonden) .....	177
Abbildung 124: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 20.12 (BO-Sonden)....	178
Abbildung 125: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 21.12 (BO-Sonden) .....	178

---

Abbildung 126: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 24.12 (BO-Sonden)....	179
Abbildung 127: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 25.12 (BO-Sonden) .....	179
Abbildung 128: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (BO-Sonden)....	180
Abbildung 129: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 30.12 (BO-Sonden) .....	180
Abbildung 130: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 30.12 - 04.01 (BO-Sonden)....	181
Abbildung 131: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.12 - 04.01 (BO-Sonden) .....	181
Abbildung 132: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.01 - 10.01 (BO-Sonden)....	182
Abbildung 133: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.01 - 10.01 (BO-Sonden) .....	182
Abbildung 134: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.02 - 12.03 (BO-Sonden)....	184
Abbildung 135: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 06.02 - 12.03 (BO-Sonden) .....	184
Abbildung 136: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.03 - 22.04 (BO-Sonden) .....	185
Abbildung 137: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.04 - 29.04 (BO-Sonden)....	186
Abbildung 138: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.04 - 29.04 (BO-Sonden) .....	186
Abbildung 139: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 29.04 - 09.05 (BO-Sonden)....	187
Abbildung 140: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 29.04 - 09.05 (BO-Sonden) .....	187
Abbildung 141: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 12.05 - 20.05 (BO-Sonden)....	188
Abbildung 142: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 12.05 - 20.05 (BO-Sonden) .....	188
Abbildung 143: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 20.05 - 26.05 (BO-Sonden)....	189
Abbildung 144: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 20.05 - 01.06 (BO-Sonden) .....	189
Abbildung 145: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 23.06 - 03.07 (BO-Sonden)....	190
Abbildung 146: Druckdiagramm Bad Oeynhausen 23.06 - 05.07 (BO-Sonden) .....	190
Abbildung 147: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 07.07 - 23.07 (BO-Sonden)....	191
Abbildung 148: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 07.07 - 24.07 (BO-Sonden) .....	191
Abbildung 149: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 24.07 - 07.08 (BO-Sonden)....	192
Abbildung 150: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 24.07 - 09.08 (BO-Sonden) .....	192
Abbildung 151: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 1. Untersuchungszeitraum.....	194
Abbildung 152: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 27.02 - 19.03 .....	194

Abbildung 153: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 19.03 - 02.04 .....	194
Abbildung 154: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 02.04 - 23.04 .....	195
Abbildung 155: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 23.04 - 14.05 .....	195
Abbildung 156: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 2. Untersuchungszeitraum.....	196
Abbildung 157: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 29.10 - 19.11 .....	197
Abbildung 158: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 19.11 - 16.12 .....	197
Abbildung 159: Druckdiagramm Obere Lutter vom 14.10 - 21.10.....	198
Abbildung 160: Druckdiagramm Köln Rodenkirchen ab Mai 2021 für den Referenzfilter ....	199
Abbildung 161: Druckdiagramm Köln Rodenkirchen ab Mai 2021 für den GAK-Filter .....	199

## 8 Literaturverzeichnis

- ALT, K. 2018: Umbau von Flockungsfiltrationsanlagen zu Aktivkohle-/Ozonanlagen Vortrag am 27.09.2018 an der Oswald-Schulze Stiftung, Münster.
- ALT, K., BARNSCHIEDT, I. 2020: Mikroschadstoffe aktuelle Planungsbeispiele aus der Praxis (Konzeption, Bemessung und Betrieb).
- ALT, K., ZYDROCYK, S. 2019: Einsatz von granulierter Aktivkohle zur Elimination von Spurenstoffen - heutige Projektkosten und aktuelle Entwicklungen Vortrag am 10.12.2019 an der eawag. Online verfügbar unter [https://www.mikroverunreinigungen.de/wp-content/uploads/Einsatz\\_von\\_granulierter\\_Aktivkohle\\_zur\\_Elimination\\_von\\_Spurenstoff\\_offen.pdf](https://www.mikroverunreinigungen.de/wp-content/uploads/Einsatz_von_granulierter_Aktivkohle_zur_Elimination_von_Spurenstoff_offen.pdf).
- ALTMANN, J., REHFELD, D., TRÄDER, K., SPERLICH, A., JEKEL, M. 2016: Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. *Water research*. 92, S. 131–139. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.051.
- BARJENBRUCH, M. 1997: Leistungsfähigkeit und Kosten von Filtern in der kommunalen Abwasserreinigung Universität Hannover Inst. f. Siedlungswasserwirtsch. u. Abfalltechn.
- BARJENBRUCH, M., ROLFS, T. 2007: About 20 Years of Operation Experience of Wastewater Filtration in Germany Filtech 2007 Conference, Wiesbaden.
- BENSTÖM, F. (2014): Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Dissertation an der RWTH Aachen.
- BENSTÖM, F., STEPKES, H., ROLFS, T., MONTAG, D., PINNEKAMP, J. 2014: Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Kurzbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/klaeranlage\\_abwasser/20140131-Abschlussbericht-WVER-GAK\\_end.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/klaeranlage_abwasser/20140131-Abschlussbericht-WVER-GAK_end.pdf).
- BÖHLER, M., JOSS, A., MCARDELL, C., MEIER, A. 2020: Konsenspapier zum Ergebnis des Workshops vom 9.12.2019 an der Eawag Hinweise zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Online verfügbar unter <https://micropoll.ch/Mediathek/hinweise-zur-planung-und-auslegung-von-diskontinuierlich-gespuelten-gak-filtern-zur-elimination-organischer-spurenstoffe-aus-kommunalem-abwasser-konsenspapier-zum-workshop-vom-9-12-2019-an-der-eawag/>.
- BÖHLER, M., BLUNSCHI, M., CZEKALSKI, N., FLEINER, J., KIENLE, C., LANGER, M., MCARDELL, C.S., TEICHLER 2017: Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung - ReTREAT, Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt (Bafu) im Rahmen eines Projektes der Technologieförderung, Eawag, Dübendorf. Online verfügbar unter <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A16638/datastream/PDF/>

B%C3%B6hler-2017-Biologische\_Nachbehandlung\_von\_kommunalem\_Abwasser-%28published\_version%29.pdf.

- BÖHLER, M., WITTMER, A., HEISELE, A., SALHI, L., GUNTEN, U. v., MCARDELL, C., LONGRÉE P., BECKM P 2013: *Berichterstattung - Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der Ara Neugut, Bafu, Bern*. Online verfügbar unter [https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A14928/datastream/PDF/B%C3%B6hler-2012-Berichterstattung-%28published\\_version%29.pdf](https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A14928/datastream/PDF/B%C3%B6hler-2012-Berichterstattung-%28published_version%29.pdf).
- BORNEMANN, C., ALT, K., BÖHM, F., HACHENBERG, M., KOLISCH, G., NAHRSTEDT, A., TAUDIEN, Y. 2015: *FilterAK+ Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)*.
- BORNEMANN, C., HACHENBERG, M., YÜCE, S., HERR, J., JAGEMANN, P., LYKO, S., BENSTÖM, F., MONTAG, D., PLATZ, S., WETT, M., BIEBERSDORF, N., KAUB, J. M., KOLISCH, G., OSTHOFF T, TAUDIEN, Y., ROLFS, T., STEPKES, H. 2012: *Abschlussbericht (Kurzfassung) zum Forschungsvorhaben Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock). Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*.
- BORNEMANN, C., HACHENBERG, M., KAZNER, C., HERR, J., JAGEMANN, P., LYKO, S., BENSTÖM, F., MONTAG, D., PLATZ, S., WETT, M., KAUB, J. M., KOLISCH, G., OSTHOFF T, ROLFS, T., STEPKES, H. 2012: *Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Abschlussbericht, Arge "Forschung Spurenstoff NRW" - MIKROFlock, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.* ([http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht\\_MikroFlock.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_MikroFlock.pdf)).
- CLEASBY, J., BAUMANN, E. R. 1974: *Wastewater Filtration Design Considerations*. United States Environmental Protection Agency (EPA).
- DABROWSKI, W., SPACZYŃSKA, M., MACKIE, R. I. 2008: *A Model to Predict Granular Activated Carbon Backwash Curves*. CLEAN – Soil, Air, Water. 36 (1), S. 103–110. DOI: 10.1002/clen.200600033.
- DIN 38409-2:1987-03 *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Flockung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H 2)*.
- DIN EN 12255-16:2019-06 - *Entwurf Kläranlagen - Teil 16: Abwasserfiltration; Deutsche und Englische Fassung prEN 12255-16:2019*.
- DIN EN 12915-1:2009-07: *Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Granulierte Aktivkohle - Teil 1: Frische granulierte Aktivkohle; Deutsche Fassung EN 12915-1:2009*.

- DIN EN 12915-1:2009-07 Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Granulierte Aktivkohle - Teil 1: Frische granulierte Aktivkohle; Deutsche Fassung EN 12915-1:2009.
- DIN EN 872:2005-04 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung suspendierter Stoffe - Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter; Deutsche Fassung EN 872:2005.
- DRAXLER, J., SIEBENHOFER, M. (2014): Verfahrenstechnik in Beispielen. Problemstellungen, Lösungsansätze, Rechenwege. 978-3-658-02739-1. Springer Verlag. ISBN 978-3-658-02739-1.
- DVW W 239 2011: Arbeitsblatt Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle.
- DWA-A 203 2019: Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung.
- DWA-M 285-2 2021: Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen - Teil 2: Einsatz von Aktivkohle - Verfahrensgrundsätze und Bemessung.
- DWA-THEMENBAND 2019: - Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung - Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte - Mai 2019.
- FENT, K., WESTON, A. A., CAMINADA, D. 2006: Ecotoxicology of human pharmaceuticals. Aquatic toxicology (Amsterdam, Netherlands). 76 (2), S. 122–159. DOI: 10.1016/j.aquatox.2005.09.009.
- FERHAN ÇEÇEN, Ö. A. 2011: Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: Integration of Adsorption and Biological Treatment, 388 pages, ISBN: 978-3-527-32471-2, Wiley-VCH.
- FUNDNEIDER, T. (2020): Filtration und Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Aufbereitung von kommunalem Abwasser – Phosphor- und Spurenstoffentfernung –, Verein zur Förderung des Institutes IWAR der Technischen Universität Darmstadt e. V. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/12020/>.
- GIBERT, O., LEFÈVRE, B., FERNÁNDEZ, M., BERNAT, X., PARAIRA, M., CALDERER, M., MARTÍNEZ-LLADÓ, X. 2013: Characterising biofilm development on granular activated carbon used for drinking water production. Water research. 47 (3), S. 1101–1110. DOI: 10.1016/j.watres.2012.11.026.
- GIMBEL, R., NAHRSTEDT, A., PANGLISCH, S. 2008: Filtration zur Partikelabtrennung bei der Wasserreinigung. Chemie Ingenieur Technik. 80 (1-2), S. 35–47. DOI: 10.1002/cite.200700165.
- GREASE, S., SNOEYINK, V. L., LEE, R. G. 1987: Granular activated carbon filter-adsorber systems. Journal American Water Works Association. 79 (12), S. 64–74.
- GROMBACH, P., HABERER, K., MERKL, G., TRÜEB, E. U. (2000): Handbuch der Wasserversorgungstechnik. ISBN 3-486-26394-3. 3. Aufl. Oldenbourg Industrieverlag München Wien.
- JEKEL, M., RUHL A. S., ALTMANN J., SPERLICH A., SCHALLER J., GNIRß R., MIEHE U., STAPF M., REMY C., MUTZ D. 2016: Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Bewertung, Barrieren und Risikokommunikation (ASKURIS). Universitätsverlag der TU Berlin, 182.

- KIDD, K. A., BLANCHFIELD, P. J., MILLS, K. H., PALACE, V. P., EVANS, R. E., LAZORCHAK, J. M., FLICK, R. W. 2007: Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104 (21), S. 8897–8901. DOI: 10.1073/pnas.0609568104.
- KNOLLMANN, J., HÜBNER, H. 2013: Variantenbetrachtung, Machbarkeitsstudie Ertüchtigung der Zentralkläranlage Rietberg zur Elimination von Spurenstoffen. Gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx\\_mmkresearchprojects/0052-01-05\\_Rietberg\\_Studie\\_Spurenstoffelimination\\_-\\_ZKA\\_Rietberg\\_2013-07-30\\_EA8.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/0052-01-05_Rietberg_Studie_Spurenstoffelimination_-_ZKA_Rietberg_2013-07-30_EA8.pdf).
- KOM-M NRW 2015a: Mikroschadstoffentfernung machbar? Zusammenstellung wesentlicher Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx\\_mmkresearchprojects/Machbarkeitsstudie\\_Ansicht.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/Machbarkeitsstudie_Ansicht.pdf).
- LÄNGE, R., HUTCHINSON, T. H., CROUDACE, C. P., SIEGMUND, F., SCHWEINFURTH, H., HAMPE, P., PANTER, G. H., SUMPTER, J. P. 2001: Effects of the synthetic estrogen 17 alpha-ethinylestradiol on the life-cycle of the fathead minnow (*Pimephales promelas*). *Environmental Toxicology and Chemistry*. 20 (6), S. 1216. DOI: 10.1897/1551-5028(2001)020<1216:eotsee>2.0.co;2.
- METZGER, S., RÖßLER, A., KAPP, H. 2011: Erweiterung kommunaler Kläranlagen durch eine adsorptive Stufe zur Elimination organischer Spurenstoffe. Abschlussbericht Teilprojekt 2B. Optimierung der Pulveraktivkohleabtrennung durch Filtration als Grundlage zur Anlagendimensionierung. Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- METZGER, S., BARJENBRUCH, M., BEIER, S., MIEHE, U., NAFO, I. 2020: Statusbericht „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland“. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. 10 (67), S. 769–780.
- NAHRSTEDT, A., BURBAUM, H., MAUER, C., ALT, K., SÜRDER, T., FRITZSCHE, J. 2014: Einsatz granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. 5 (61), S. 408–426.
- NAHRSTEDT, A., ROHN, A., ALT, K., WU, X., SCHLÖSSER, F., MERTEN, M., MÜLLER, M., GISKOW, R., SÜRDER T., SCHRÖDER, K-H., SCHWEINFORTH, R., LICHTENBERG, U., WÜRTH, O. 2016: Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx\\_mmkresearchprojects/Abschlussbericht\\_Putzhagen\\_01.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/Abschlussbericht_Putzhagen_01.pdf).
- PRIETO, J. C. G., PÉREZ GALENDE, P., CACHAZA SILVERIO, J. M., GARCÍA ROIG, M. 2013: A pilot plant study of the processes of filtration and adsorption of drinking water through granular activated carbons: a comparative study. *Water Supply*. 13 (1), S. 74–88. DOI: 10.2166/ws.2012.078.
- RÖDEL, S., GÜNTHER, F. W., REHBEIN, V., STEINLE, E., SCHATZ, R., ZECH, T., SENGL, M., EßLINGER, M., WEIß, K., KOPF, W., BUCHMEIER, G., SCHWAIGER, J., SCHADE, M.,

- MÜLLER, E., SCHÖBLER, I. 2019: Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen (Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe). Abschlussbericht gerichtet an das Bayerische Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter <https://athene-forschung.unibw.de/doc/128025/128025.pdf>.
- SCARDINA, P., EDWARDS, M. 2004: Air Binding of Granular Media Filters. *Journal of Environmental Engineering*. 130 (10).
- SONTHEIMER, H., FRICK, R., FETTIG, J., HÖRNER, G., HUBELE, C., ZIMMER, G. 1985: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. Karlsruhe, DVGW Forschungsstelle am Englet-Bunte-Inst. Univ. Karlsruhe, ISBN 3-922671-11-X.
- TELGEMANN, U., BOROWSKA, E., FELMEDEN, J., FRECHEN, F.-B. 2020: The locally resolved filtration process for removal of phosphorus and micropollutants with GAC. *Journal of Water Process Engineering*. 35, S. 101236. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101236.

## 9 Anhang

## Anhang A.1: Ergebnisse der Fragebögen KA BO

Steckbrief GAK-Filter								
<p>Der vorliegende Fragebogen dient dazu, die GAK-Filter im Hinblick auf Ihre Zulaufbelastung/ Spezifikation und Spülintervalle für das Projekt "SOLIDUS" zu erheben.</p> <p>Bitte füllen Sie den Punkt 4 "Spezifische Angaben zur Filterzelle" für jede einzelne Filterzelle aus.</p> <p><b>Wir bedanken uns für Ihre Mitarbeit! Ihre Daten werden selbstverständlich ausschließlich für das Forschungsprojekt SOLIDUS verwendet.</b></p> <p><u>Hinweis:</u> Falls keine Angaben gemacht werden können, bitten wir k.A. einzutragen</p>								
 								
<b>1. Allgemeines</b>								
Kläranlage	Bezeichnung	Bad Oeynhausen						
	Plz, Ort	32549 Bad Oeynhausen						
	Betreiber	Stadtwerke Bad Oeynhausen AöR						
Ansprechpartner für den Fragebogen vor Ort		Gunnar Beermann						
	Telefon	05731-139-300						
	Emailadresse	<a href="mailto:g.beermann@stadtwerke-badoeynhausen.de">g.beermann@stadtwerke-badoeynhausen.de</a>						
<b>2. Zulaufbelastung Kläranlage</b>								
Ausbaugröße (CSB)	Einwohner	79500	[E]					
	Einwohnergleichwerte		[EGW]					
	Einwohnerwerte		[EW]					
<b>3. Angaben zur GAK-Filtration</b>								
Allgemeines	Auslegung	Teilstrom	<u>Hinweis:</u> Vollstrom oder Teilstrom					
	Ist eine Vorbehandlung vorhanden?	Raumfiltration	<u>Hinweis:</u> z. B. SAND-Filter, Festbettdeni etc.					
	Filtrationsrichtung	abwärts	<u>Hinweis:</u> aufwärts oder abwärts durchströmter Filter					
	Zyklus	kontinuierlich	<u>Hinweis:</u> kontinuierlich oder diskontinuierlich					
	Filtereinheiten insg.	1	[Stk.]					
	Filterfläche je Filter	32,00	[m <sup>2</sup> ]					
	Höhe Filterbett	2,20	[m]					
	Höhe Filterüberstand	0,6	[m]					
			Anzahl der Beprobungen pro Jahr					
			2016    2017    2018					
Zulauffrachten Mittelwert	CSB (24h MP)	71,30	19,50	73,50	[kg/d]	175	22	150
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	1,04	0,28	1,10	[kg/d]	175	22	150
	AFS (24h MP)	-	-	-	[kg/d]	-	-	-
Zulauffrachten 85%-Perz.-W.	CSB (24h MP)	86,50	21,80	87,20	[kg/d]	175	22	150
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	1,29	0,31	1,33	[kg/d]	175	22	150
	AFS (24h MP)	-	-	-	[kg/d]	-	-	-
Ablaufrachten Mittelwert	CSB (24h MP)	54,00	16,30	55,20	[kg/d]	175	22	150
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	0,81	0,25	0,88	[kg/d]	175	22	150
	AFS (24h MP)	-	-	-	[kg/d]	-	-	-
Ablaufrachten 85%-Perz.-W.	CSB (24h MP)	67,30	18,30	68,10	[kg/d]	175	22	150
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	1,00	0,26	1,07	[kg/d]	175	22	150
	AFS (24h MP)	-	-	-	[kg/d]	-	-	-

Steckbrief GAK-Filter			
<b>4. Spezifische Angaben zur GAK-Filterzelle</b>			
minimaler Zufluss GAK	35,00	[l/s]	
mittlerer Zufluss GAK	40,00	[l/s]	
maximaler Zufluss GAK	44,00	[l/s]	
Inbetriebnahme	Datum Okt 15	durchgesetzte Bettvolumina [m³ Wasser/m² GAK]	zweiter Durchlauf Nov 2017 bis März 2021
Außerbetriebnahme	Jan 17	19700 MV	
Fällmittel	-		Hinweis: nur angeben, wenn Dosierstelle im Zulauf des GAK-Filters (sogenannte Nachfällung)
Flockungshilfs- mitteldosierung	-	[mg/l]	Hinweis: nur angeben, wenn Dosierstelle im Zulauf des GAK-Filters (sogenannte Nachfällung)
Wird der GAK-Filter mit einem konstanten Zufluss betrieben oder gibt es spezifische Betriebsarten?	konstanter Durchfluss Mo-Fr Betrieb		Hinweis: z.B. Mo - Fr Betrieb, Sa/So Betriebspause
eingesetzte Aktivkohle	Donau Carbon 0,6 - 2,36mm Hydradin AR 8x30		Hinweis: Bitte benennen Sie den Hersteller, Körnung und Produktnamen
Wird die Filtergeschwindigkeit an Jahreszeiten oder dem Alter der Aktivkohle angepasst?	nein		
Erfassen Sie regelmäßig die GAK-Filterbetthöhe? Wenn ja, beschreiben Sie bitte die Vorgehensweise	nur vor Regeneration und nach Regeneration, ansonsten bei Auffälligkeiten		Hinweis: verwendete Hilfsmittel, Wasserüberstand ablassen ja/nein, Häufigkeit der Untersuchungen
Filterbettaufbau	Filtermaterial	Körnung [mm]	Schichthöhe [m]
	Hyd. AR 8	0,6-2,36	2,35
			Hinweis: Die einzelnen Schichten der Reihe nach von unten aufwärts eintragen



Steckbrief GAK-Filter	
<b>7. Angaben zu Betriebsstörungen</b>	
Gab es im Betrieb Fälle, in denen das Spülprogramm nicht ausgelöst wurde (oder werden konnte) und es in Folge dessen durch das verblockte Filterbett zum „abheben“ des Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welchen Maßnahmen wurde eingeleitet?	
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es durch die Wasserspülung zum „abheben“ des verblockten Filter-Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein
Gab es im Betrieb Fälle, in denen die Luftspülung nicht zum Aufbrechen des Filtermaterials führte?	wurde nicht beobachtet
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welche Maßnahmen wurde eingeleitet ?	-
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es zur Verblockung der Filterkerzen kam (z.B. durch Algen oder Abtrieb aus der Nachklärung, die den Feinrechen passierten)?	nein
Welche im Abwasser enthaltene Störstoffe haben in der Vergangenheit zu Betriebsproblemen ihres Filters geführt?	nicht bekannt
Ist der Betrieb mit GAK einfacher/störanfälliger als mit konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	sind beide einfach und unauffällig im Regelbetrieb
Ist der Betrieb mit GAK störanfälliger als mit dem konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	nein, beides ist extrem unauffällig

<b>Steckbrief GAK-Filter</b>				
<p><b>8. Anmerkungen</b>                      Haben Sie Punkte/ Fragen/ Anregungen, die im Forschungsprojekt "SOLIDUS" angesprochen werden sollten, um einen einheitlichen Leitfaden für Betreiber / Planer zu erstellen? (bitte auch für Sie vielleicht Triviales oder Selbstverständliches angeben!)</p>				
Anmerkung 1	Ergänzungen Messtechnik Druck, Messungen Q etc			
Anmerkung 2	Erarbeiten Kriterien Filtermaterialwechsel			
Anmerkung 3	Auswirkungen $\theta$ auf Spülgeschwindigkeit			
Anmerkung 4	Minimierung der Leitparameter zur Kostenreduktion Analytik			
Anmerkung 5				
<p><b>9. Sonstiges</b></p> <p>Großeinleiter / besondere Betriebsaspekte:</p> <div style="background-color: #e0e0e0; height: 150px; width: 100%;"></div>				
<p><b>Kontakt für Rückfragen:</b></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%; vertical-align: top;">  </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> <p><b>Hydro-Ingenieure GmbH</b>                      Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                      Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p> </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;">  <p><b>ISA RWTH Aachen</b>                      Svetlana Schölzel                      Email: schoelzel@isa.rwth-aachen.de</p> </td> </tr> </table>			<p><b>Hydro-Ingenieure GmbH</b>                      Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                      Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p>	 <p><b>ISA RWTH Aachen</b>                      Svetlana Schölzel                      Email: schoelzel@isa.rwth-aachen.de</p>
	<p><b>Hydro-Ingenieure GmbH</b>                      Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                      Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p>	 <p><b>ISA RWTH Aachen</b>                      Svetlana Schölzel                      Email: schoelzel@isa.rwth-aachen.de</p>		



Steckbrief GAK-Filter					
<b>5. Angaben zum Spülprogramm des GAK-Filters</b>					
Typisches Spülintervall	ca. alle 900 Betriebsstunden/2700 BV (seit den Erkenntnissen aus dem Projekt)		<i>Hinweis:</i> beispielhaft ca. 1x pro Woche, bitte auch Intervall abschätzen, wenn Spülung nicht durch Zeit ausgelöst wird		
<p>Die Spülung wird manuell durchgeführt. Bei Bedarf wird die Spülung wiederholt.</p> <p>"Stoßluftspülung" (2-3 mal für ca. 3min)</p> <p>Wasserspülung mit 2 Spülpumpen bis das Spülwasserbecken auf ca. 80 5 steht. Bei Bedarf wird der Vorgang wiederholt.</p>	Spülprogramm des GAK-Filters	Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [Min.]
		Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
		Absenken des Überstauspiegels	-	-	5
		Aufbrechen der Filtermaterialschüttung (Luftspülung)	~ 40		10
		Düsenboden entlüften			3
		Filterniveau anheben			5
		Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasser-Spülung)	-	-	-
		Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	~ 27	20
		Inbetriebnahme des Filters			10
Zeitbedarf Spülprogramm gesamt				53	
Wodurch wird das Spülprogramm ausgelöst?	Zeit		<i>Hinweis:</i> Zeit, Differenzdruck, auf aktuellen Durchfluss nommierter Differenzdruck, durchgeflossene Wassermenge in m³... Bei mehreren Faktoren bitte priorisiert auflisten		
Ist eine Notspülprogramm/ Kurzspülprogramm vorhanden?	nein		<i>Hinweis:</i> z.B. für besondere Belastungssituationen		
Bennen Sie – sofern verwendet – die eingesetzten Hilfsmittel für den Vorgang der Filterspülung	Steuerung vor Ort mit Tablet		<i>Hinweis:</i> z.B. Siebe, Fernbedienung etc.		
Wird die Wasserspülgeschwindigkeit direkt auf den gewünschten Zufluss hoch- /runtergefahren oder erfolgt dies beispielsweise über eine Rampe?	direkt auf Sollwert				
<b>6. Angaben zu Drücken und Durchflüssen</b>					
Betriebsdruck bei ruhendem Fiterbetrieb (mit Wasserüberstau)	von	bis	[mbar]	<b>keine Messwerte, nur Anzeigen vor Ort</b>	
Betriebsdruck während der Filtration			[mbar]		
Betriebsdruck während der Luftspülung			[mbar]		
Betriebsdruck während der Wasserspülung					
Grenzwert Betriebsdruck bei dem Rückspülung der GAK Filterzelle ausgelöst wird			[mbar]		
Grenzwert Betriebsdruck bei dem GAK Filterzelle in Störung geht			[mbar]		
Grenzwert Durchfluss während der Filtration bei dem GAK Filterzelle in Störung geht	von	bis	[m³/h]		

Steckbrief GAK-Filter	
<b>7. Angaben zu Betriebsstörungen</b>	
Gab es im Betrieb Fälle, in denen das Spülprogramm nicht ausgelöst wurde (oder werden konnte) und es in Folge dessen durch das verblockte Filterbett zum „abheben“ des Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welchen Maßnahmen wurde eingeleitet?	Trübmessungen im Zulauf der GAK Filter
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es durch die Wasserspülung zum „abheben“ des verblockten Filter-Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	ja
Gab es im Betrieb Fälle, in denen die Luftspülung nicht zum Aufbrechen des Filtermaterials führte?	nein
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welche Maßnahmen wurde eingeleitet ?	Kunststoffteile in den Filterdüsen
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es zur Verblockung der Filterkerzen kam (z.B. durch Algen oder Abtrieb aus der Nachklärung, die den Feinrechen passierten)?	
Welche im Abwasser enthaltene Störstoffe haben in der Vergangenheit zu Betriebsproblemen ihres Filters geführt?	Feststoffe, Algen
Ist der Betrieb mit GAK einfacher/störunanfälliger als mit konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	nein
Ist der Betrieb mit GAK störanfälliger als mit dem konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	Filterbett kann abtreiben; das Bett wird schwerer

<b>Steckbrief GAK-Filter</b>	
<p><b>8. Anmerkungen</b></p> <p>Haben Sie Punkte/ Fragen/ Anregungen, die im Forschungsprojekt "SOLIDUS" angesprochen werden sollten, um einen einheitlichen Leitfaden für Betreiber / Planer zu erstellen? (bitte auch für Sie vielleicht Triviales oder Selbstverständliches angeben!)</p>	
Anmerkung 1	
Anmerkung 2	
Anmerkung 3	
Anmerkung 4	
Anmerkung 5	
<p><b>9. Sonstiges</b></p> <p>Großeinleiter / besondere Betriebsaspekte:</p>	
<p><b>Kontakt für Rückfragen:</b></p>	
	<p>Hydro-Ingenieure GmbH                  Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                  Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p>
 <p>ISA RWTH Aachen                  Svetlana Schölzel                  Email: schoetzel@isa.rwth-aachen.de</p>	





Steckbrief GAK-Filter				
<b>5. Angaben zum Spülprogramm des GAK-Filters</b>				
Typisches Spülintervall	je ~ 100 BV		<i>Hinweis:</i> beispielhaft ca. 1x pro Woche, bitte auch Intervall abschätzen, wenn Spülung nicht durch Zeit ausgelöst wird	
Spülprogramm des GAK-Filters	Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [Min.]
	Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
	Absenken des Überstauspiegels	-	-	4
	Aufbrechen der Filtermaterialschüttung (Luftspülung)	70	0	2
	Düsenboden entlüften	-	-	0,5
	Filterniveau anheben	-	23	2
	Pause	-	-	1
	Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasser-Spülung)	-	-	-
	Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	6 bis 20	30 bis 60
	Inbetriebnahme des Filters	-	-	1
Zeitbedarf Spülprogramm gesamt				< 90
Wodurch wird das Spülprogramm ausgelöst?	BV behandelt ; gg. Zeit (vor Wochenende)		<i>Hinweis:</i> Zeit, Differenzdruck, auf aktuellen Durchfluss nommierter Differenzdruck, durchgeflossene Wassermenge in m³... Bei mehreren Faktoren bitte priorisiert auflisten	
Ist eine Notspülprogramm/ Kurzspülprogramm vorhanden?	-		<i>Hinweis:</i> z.B. für besondere Belastungssituationen	
Bennenen Sie – sofern verwendet – die eingesetzten Hilfsmittel für den Vorgang der Filterspülung	Pumpenfernsteuerung / Sieb; Tablet für PLS-Eingriff		<i>Hinweis:</i> z.B. Siebe, Fernbedienung etc.	
Wird die Wasserspülgeschwindigkeit direkt auf den gewünschten Zufluss hoch- /runtergefahren oder erfolgt dies beispielsweise über eine Rampe?	direkt			
<b>6. Angaben zu Drücken und Durchflüssen</b>				
Betriebsdruck bei ruhendem Fiterbetrieb (mit Wasserüberstau)	von 500	bis 510	[mbar]	
Betriebsdruck während der Filtration	500	700	[mbar]	
Betriebsdruck während der Luftspülung	450	500	[mbar]	
Betriebsdruck während der Wasserspülung	530	590		
Grenzwert Betriebsdruck bei dem Rückspülung der GAK Filterzelle ausgelöst wird	-		[mbar]	
Grenzwert Betriebsdruck bei dem GAK Filterzelle in Störung geht	-		[mbar]	
Grenzwert Durchfluss während der Filtration bei dem GAK Filterzelle in Störung geht	von -	bis -	[m³/h]	

Steckbrief GAK-Filter	
<b>7. Angaben zu Betriebsstörungen</b>	
Gab es im Betrieb Fälle, in denen das Spülprogramm nicht ausgelöst wurde (oder werden konnte) und es in Folge dessen durch das verblockte Filterbett zum „abheben“ des Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein (siehe 5.2)
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welchen Maßnahmen wurde eingeleitet?	-
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es durch die Wasserspülung zum „abheben“ des verblockten Filter-Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein
Gab es im Betrieb Fälle, in denen die Luftspülung nicht zum Aufbrechen des Filtermaterials führte?	nein
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welche Maßnahmen wurde eingeleitet ?	-
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es zur Verblockung der Filterkerzen kam (z.B. durch Algen oder Abtrieb aus der Nachklärung, die den Feinrechen passierten)?	ggf. Einzelne
Welche im Abwasser enthaltene Störstoffe haben in der Vergangenheit zu Betriebsproblemen ihres Filters geführt?	ggf. Schnecken und Muscheln, Laub
Ist der Betrieb mit GAK einfacher/störunanfälliger als mit konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	zeitintensiver, da Spülung nicht voll automatisiert; zusätzlicher Austausch bei Reaktivierung
Ist der Betrieb mit GAK störanfälliger als mit dem konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	bei Feststoffabrieb im NKB

<b>Steckbrief GAK-Filter</b>	
<p><b>8. Anmerkungen</b></p> <p>Haben Sie Punkte/ Fragen/ Anregungen, die im Forschungsprojekt "SOLIDUS" angesprochen werden sollten, um einen einheitlichen Leitfaden für Betreiber / Planer zu erstellen? (bitte auch für Sie vielleicht Triviales oder Selbstverständliches angeben!)</p>	
Anmerkung 1	
Anmerkung 2	
Anmerkung 3	
Anmerkung 4	
Anmerkung 5	
<p><b>9. Sonstiges</b></p>	
<p>Großeinleiter / besondere Betriebsaspekte:</p>	<p>CP-Anlagen eines Sonderabfallunternehmens; Krankenhaus</p>
<p><b>Kontakt für Rückfragen:</b></p>	
	<p>Hydro-Ingenieure GmbH                  Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                  Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p>
	
<p>ISA RWTH Aachen                  Svetlana Schölzel                  Email: schoelzel@isa.rwth-aachen.de</p>	

## Anhang A.4: Ergebnisse der Fragebögen KA RKO

Steckbrief GAK-Filter								
<p>Der vorliegende Fragebogen dient dazu, die GAK-Filter im Hinblick auf Ihre Zulaufbelastung/ Spezifikation und Spülintervalle für das Projekt "SOLIDUS" zu erheben.</p> <p>Bitte füllen Sie den Punkt 4 "Spezifische Angaben zur Filterzelle" für jede einzelne Filterzelle aus.</p> <p><b>Wir bedanken uns für Ihre Mitarbeit! Ihre Daten werden selbstverständlich ausschließlich für das Forschungsprojekt SOLIDUS verwendet.</b></p> <p><u>Hinweis:</u> Falls keine Angaben gemacht werden können, bitten wir k.A. einzutragen</p>				 				
<b>1. Allgemeines</b>								
Kläranlage	Bezeichnung	Klärwerk Köln-Rodenkirchen						
	Plz, Ort	Unterer Weißer Weg, 50999 Köln ( Navi: Über Grüngürtelstr. 22, Ecke Auenweg )						
	Betreiber	Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR ( STEB Köln )						
Ansprechpartner für den Fragebogen vor Ort		Hans-Josef Stabel						
	Telefon	0221-221-308-19 0163-5385-194						
	Emailadresse	<a href="mailto:hans-josef.stabel@steb-koeln.de">hans-josef.stabel@steb-koeln.de</a>						
<b>2. Zulaufbelastung Kläranlage</b>								
Ausbaugröße (CSB)	Einwohner	61.000	[E]					
	Einwohnergleichwerte	27.000	[EGW]					
	Einwohnerwerte	88.000	[EW]					
<b>3. Angaben zur GAK-Filtration</b>								
Allgemeines	Auslegung	Teilstrom 1/3 *TW - 2h. Max	<u>Hinweis:</u> Vollstrom oder Teilstrom					
	Ist eine Vorbehandlung vorhanden?	Siebtrommel 1mm	<u>Hinweis:</u> z.B. SAND-Filter, Festbetten etc.					
	Filtrationsrichtung	aufwärts	<u>Hinweis:</u> aufwärts oder abwärts durchströmter Filter					
	Zyklus	kontinuierlich	<u>Hinweis:</u> kontinuierlich oder diskontinuierlich					
	Filtereinheiten insg.	1 (6)	[Stk.]					
	Filterfläche je Filter	26,30	[m²]					
	Höhe Filterbett (inkl. Stützs)	2,00	[m]					
	Höhe Filterüberstand	1,95	[m]					
						Anzahl der Beprobungen pro Jahr		
			2016	2017	2018	2016	2017	2018
Zulauffrachten Mittelwert	CSB (24h MP)				[kg/d]			
	P <sub>ges</sub> (24h MP)				[kg/d]			
	AFS (24h MP)				[kg/d]			
Zulauffrachten 85%-Perz.-W.	CSB (24h MP)				[kg/d]			
	P <sub>ges</sub> (24h MP)				[kg/d]			
	AFS (24h MP)				[kg/d]			
Ablauffrachten Mittelwert	CSB (24h MP)	320,00	349,00		[kg/d]	358	353	
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	4,90	3,90		[kg/d]	362	347	
	AFS (24h MP)	k.A.	k.A.	k.A.	[kg/d]	49	36	
Ablauffrachten 85%-Perz.-W.	CSB (24h MP)	502,00	531,00		[kg/d]			
	P <sub>ges</sub> (24h MP)	8,50	6,50		[kg/d]			
	AFS (24h MP)	k.A.	k.A.	k.A.	[kg/d]			

Steckbrief GAK-Filter			
<b>4. Spezifische Angaben zur GAK-Filterzelle</b>			
minimaler Zufluss GAK	14	[l/s]	
mittlerer Zufluss GAK	36	[l/s]	
maximaler Zufluss GAK	58	[l/s]	
			durchgesetzte Bettvolumina [m³ Wasser/m³ GAK]
Inbetriebnahme	Datum Mrz 17		< 2800
Zwischenstand	Nov 18		40.600
Fällmittel			Hinweis: nur angeben, wenn Dosierstelle im Zulauf des GAK-Filter (sogenannte Nachfällung)
Flockungshilfsmitteldosierung		[mg/l]	Hinweis: nur angeben, wenn Dosierstelle im Zulauf des GAK-Filter (sogenannte Nachfällung)
Wird der GAK-Filter mit einem konstanten Zufluss betrieben oder gibt es spezifische Betriebsarten?	konstant		Hinweis: z.B. Mo - Fr Betrieb, Sa/So Betriebspause
eingesetzte Aktivkohle	Jacobi Aquasorb 5000, 8*30 Mesh über Stützkohle Jacobi CS 4*8 Mesh		Hinweis: Bitte benennen Sie den Hersteller, Körnung und Produktnamen
Wird die Filtergeschwindigkeit an Jahreszeiten oder dem Alter der Aktivkohle angepasst?	nein		
Erfassen Sie regelmäßig die GAK-Filterbetthöhe? Wenn ja, beschreiben Sie bitte die Vorgehensweise	Unregelmäßig: Wasserüberstand ablassen, 2*/2a		Hinweis: verwendete Hilfsmittel, Wasserüberstand ablassen ja/nein, Häufigkeit der Untersuchungen
	Filtermaterial	Körnung [mm]	Schichthöhe [m]
Fällung 2016-10: 1,84m Nach Umbau 2017-08-14: 1,64m, 4.800 BV Letzte Probe AdOx 2018-11-05: 1,54 m, 40.600 BV	Jacobi Aquasorb	8*30 Mesh	(1,84)-1,64-1,54
	Jacobi CS	4*8 Mesh	0,5
Filterbettauflbau			Hinweis: Die einzelnen Schichten der Reihe nach von unten aufwärts eintragen

Steckbrief GAK-Filter				
<b>5. Angaben zum Spülprogramm des GAK-Filter</b>				
Typisches Spülintervall	2*/Woche		<i>Hinweis:</i> beispielhaft ca. 1x pro Woche, bitte auch Intervall abschätzen, wenn Spülung nicht durch Zeit ausgelöst wird	
max 150 " 1245 m3/h 1245 m3/h Spülprogramm des GAK-Filter Rampe 263-499-394-209 m3/h v-Wechsel: 30° v-Halten: 120° (Qmin-Qmax) = (14-58 l/s)	Zweck	Luftgeschwindigkeit [m/h]	Wassergeschwindigkeit [m/h]	Dauer [Min.]
	Unterbrechung des Zuflusses	-	-	0
	Absenken des Überstauspiegels	-	-	3
	Aufbau der Luftspülung	47	0	3
	Luftspülung	47	0	2
	Durchmischung der Medien bei hoher Turbulenz (Luft-Wasserspülung)	-	-	-
	Düsenboden entlüften	-	-	2
	Austragen der Feststoffe / Klassieren des Filtermediums (Wasserspülung)	-	v1:10 _ v2:19 _ v3:15 _ v4:8	10,5
	Inbetriebnahme des Filters (Anfiltrieren mit Rohwasser)	0	(1,9-8)	30
Zeitbedarf Spülprogramm gesamt				51,75
Wodurch wird das Spülprogramm ausgelöst?	Tag und Uhrzeit		<i>Hinweis:</i> Zeit, Differenzdruck, auf aktuellen Durchfluss nomierter Differenzdruck, durchgeflossene Wassermenge in m³... Bei mehreren Faktoren bitte priorisiert auflisten	
Ist eine Notspülprogramm/ Kurzspülprogramm vorhanden?	Manuell: Ja., automatisch: Nein		<i>Hinweis:</i> z. B. für besondere Belastungssituationen	
Bennen Sie – sofern verwendet – die eingesetzten Hilfsmittel für den Vorgang der Filterspülung	Beruhigungsgatter an der Ablaufkante des Filters		<i>Hinweis:</i> z. B. Siebe, Fernbedienung etc.	
Wird die Wasserspülgeschwindigkeit direkt auf den gewünschten Zufluss hoch- /runtergefahren oder erfolgt dies beispielsweise über eine Rampe?	Hoch: Taktung, Runter: Rampe (s. PDF)			
<b>6. Angaben zu Drücken und Durchflüssen</b>				
Betriebsdruck bei ruhendem Fiterbetrieb (mit Wasserüberstau)	von k.A.	bis k.A.	[mbar]	nomnell 484 mbar, s. 2017-11-07_SOLIDUS_Rücklauf_SIEB_GAK-Rodenkirchen.xlsx
Betriebsdruck während der Filtration	495	512	[mbar]	
Betriebsdruck während der Luftspülung	PDF: k.A. PLT ?	PDF: k.A. PLT ?	[mbar]	bei Bedarf PLT einsehen, zeitliche Auflösung 15min zu gering
Betriebsdruck während der Wasserspülung	527	570		
Grenzwert Betriebsdruck bei dem Rückspülung der GAK Filterzelle ausgelöst wird	570		[mbar]	
Grenzwert Betriebsdruck bei dem GAK Filterzelle in Störung geht	k.A.		[mbar]	
Grenzwert Durchfluss während der Filtration bei dem GAK Filterzelle in Störung geht	von k.A.	bis k.A.	[m³/h]	

Steckbrief GAK-Filter	
<b>7. Angaben zu Betriebsstörungen</b>	
Gab es im Betrieb Fälle, in denen das Spülprogramm nicht ausgelöst wurde (oder werden konnte) und es in Folge dessen durch das verblockte Filterbett zum „abheben“ des Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welchen Maßnahmen wurde eingeleitet?	nein
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es durch die Wasserspülung zum „abheben“ des verblockten Filter-Bettes (ähnlich eines „Sektorkens“ oder „Kolbens“) und damit zum Austrag von Filtermaterial kam?	nein
Gab es im Betrieb Fälle, in denen die Luftspülung nicht zum Aufbrechen des Filtermaterials führte?	nein
Gab es einen Grenzwert oder eine Abfolge von Maßnahmen im Leitsystem, der diese mögliche Betriebsstörung ausschloss? Welchen Wert hatte dieser, welche Maßnahmen wurde eingeleitet ?	nein
Gab es im Betrieb Fälle, in denen es zur Verblockung der Filterkerzen kam (z.B. durch Algen oder Abtrieb aus der Nachklärung, die den Feinrechen passierten)?	nein
Welche im Abwasser enthaltene Störstoffe haben in der Vergangenheit zu Betriebsproblemen ihres Filters geführt?	GAK: Keine Vor dem Betrieb GAK, Betrieb mit Biolit: erhöhte TS im Regenablauf
Ist der Betrieb mit GAK einfacher/störanfälliger als mit konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	Mit 0,4mm Spaltweit der Filterdüse: nicht betreibbar. Mit 2,5 mm Spaltweite der Filterdüse: Störanfälliger. Kein Verblockung bei Regenablauf mit erhöhter TS
Ist der Betrieb mit GAK störanfälliger als mit dem konventionellem Filtermaterial? Wenn ja, warum?	nein

<b>Steckbrief GAK-Filter</b>	
<p><b>8. Anmerkungen</b></p> <p>Haben Sie Punkte/ Fragen/ Anregungen, die im Forschungsprojekt "SOLIDUS" angesprochen werden sollten, um einen einheitlichen Leitfaden für Betreiber / Planer zu erstellen? (bitte auch für Sie vielleicht Triviales oder Selbstverständliches angeben!)</p>	
Anmerkung 1	<p>Für GAK Im Betrieb noch benötigt, oder mittlerweile obsolet:                      1) Beruhigungsgatter hinderlich beim Ausschwemmen "Floater"                      2) Druckentlastung beim Anfahren Spülluft zum Aufbau Luftpolster.                      2a) Kann bei FU-Betrieb als Anfahrrentlastung entfallen !                      2b) Gibt es ein Q_maxl für Aufbau Luftpolster ?</p>
Anmerkung 2	<p>Vergleichmäßigung Betaausdehnung, um Feststoffaufnahme Kapazität vollständig zu reaktivieren:                      1) Erfassung Q_erforderlich für Sollwert von z.B. 20% Betaausdehnung                      1a) Häufigkeit ?, 2b) bis zu welchen BV sinnvoll, wann ist für die Dichte der Kohle einen Endwert zu erwarten ?                      2) Nachjustierung Spülwassermenge(n)                      2a) Häufigkeit ?, 2b) f(Temp_Abwasser) hilfreich ?</p>
Anmerkung 3	<p>Variert die Kornverteilung über die Laufzeit und sollte eine Rampe daher angepaßt werden ?</p>
Anmerkung 4	<p>Prozedur Entleeren GAK, je nach Stützkorn Kohle oder Kies</p>
Anmerkung 5	
<p><b>9. Sonstiges</b></p>	
Großeinleiter / besondere Betriebsaspekte:	<p><b>In dem größeren der beiden Sammler im Zulauf des Klärwerkes:</b>                      Seit 2014 Hubwehr und Regenbecken im Nebenschluß.                      1) Hubwehr: Tagsüber 6 Schwallspülungen pro Tag                      2) Hubwehr: Regen bis 300 l/s werden durchgereicht, größere Regenmengen eingestaut.                      In 2018: 22 mal aktiv                      3) Regenbecken im Nebenschluß: In 2018: 5 mal aktiv</p> <p><b>Anmerkung zur Geometrie der Filteranlage Rodenkirchen:</b>                      1) Betriebsdruck: Wasserdruck 50 cm über Betonsohle der Einlaufkammer.                      2) Höhenlagen s. 2017-11-07_SOLIDUS_Rücklauf_StEB_GAK-Rodenkirchen.xlsx</p>
<p>Kontakt für Rückfragen:</p>	
	
<p><b>Hydro-Ingenieure</b>                  Dr.-Ing. Sarah Zydorczyk Tel.: 0211-44 991-18                  Email: sarah.zydorczyk@hydro-ingenieure.de</p>	<p><b>ISA RWTH Aachen</b>                  Svetlana Schölzel                  Email: schoelzel@isa.rwth-aachen.de</p>

## Anhang B.1: Druckdaten KA Bad Oeynhausen

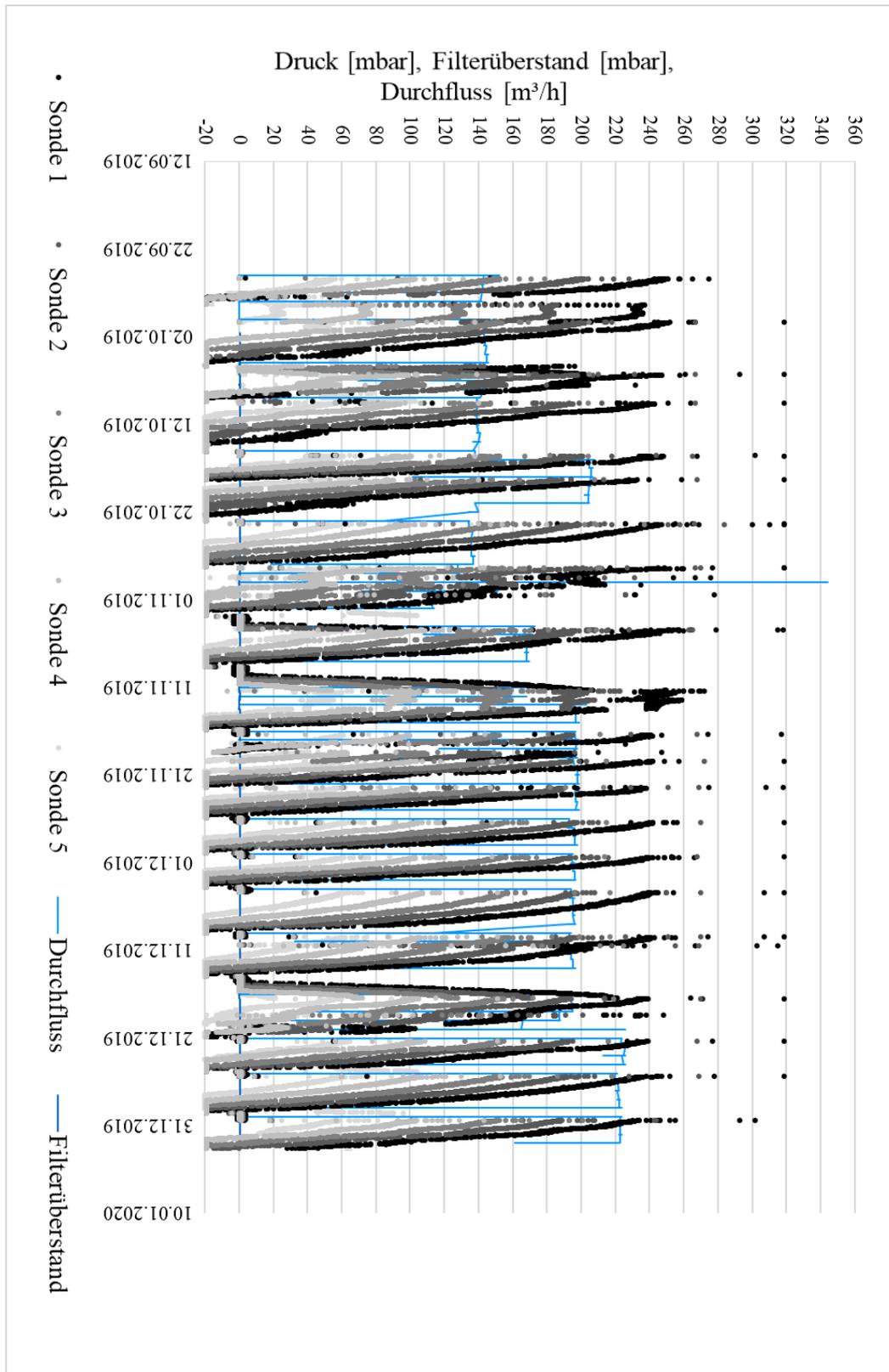


Abbildung 73: Gesamtdarstellung der Druckdaten in Bad Oeynhausen (ISA-Sonden)

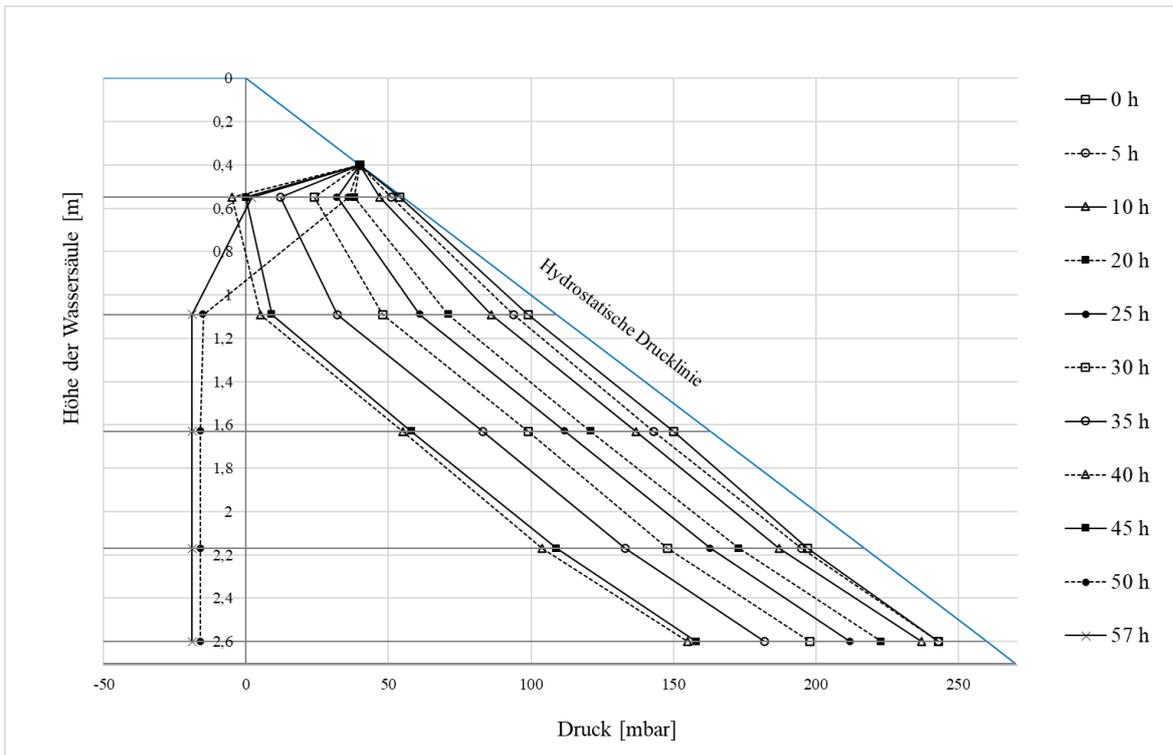


Abbildung 74: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.09 - 28.09 (ISA-Sonden)

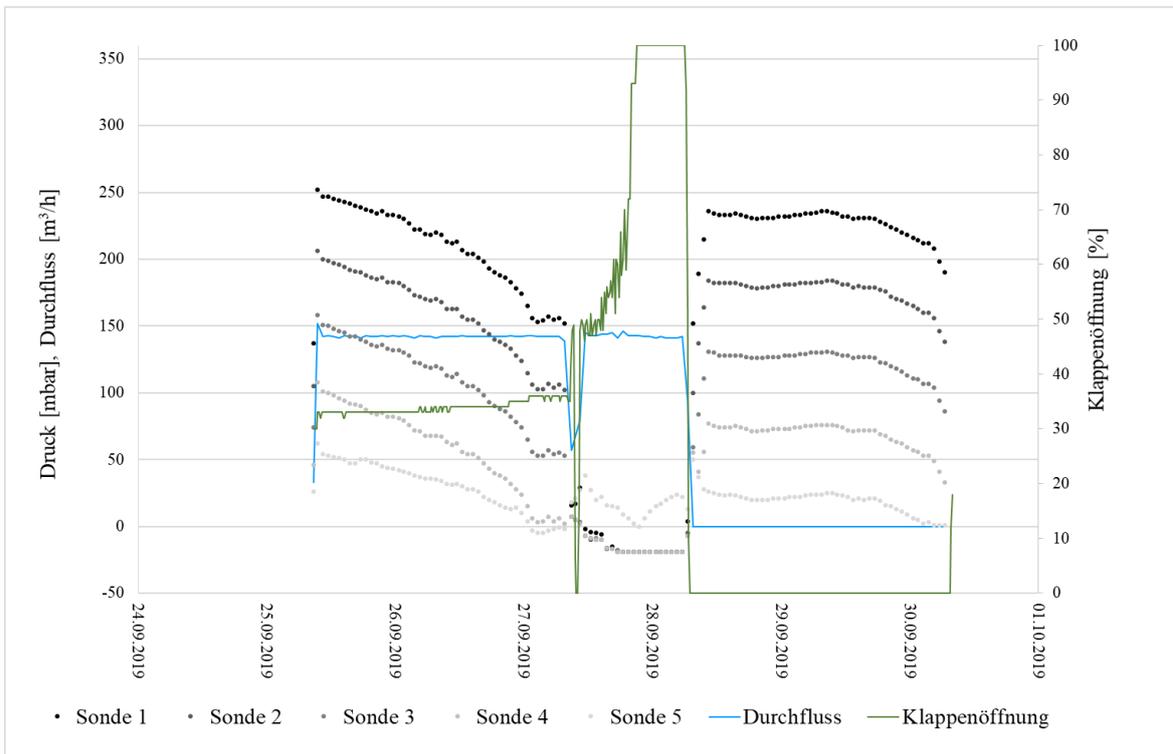


Abbildung 75: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.09 - 30.09 (ISA-Sonden)

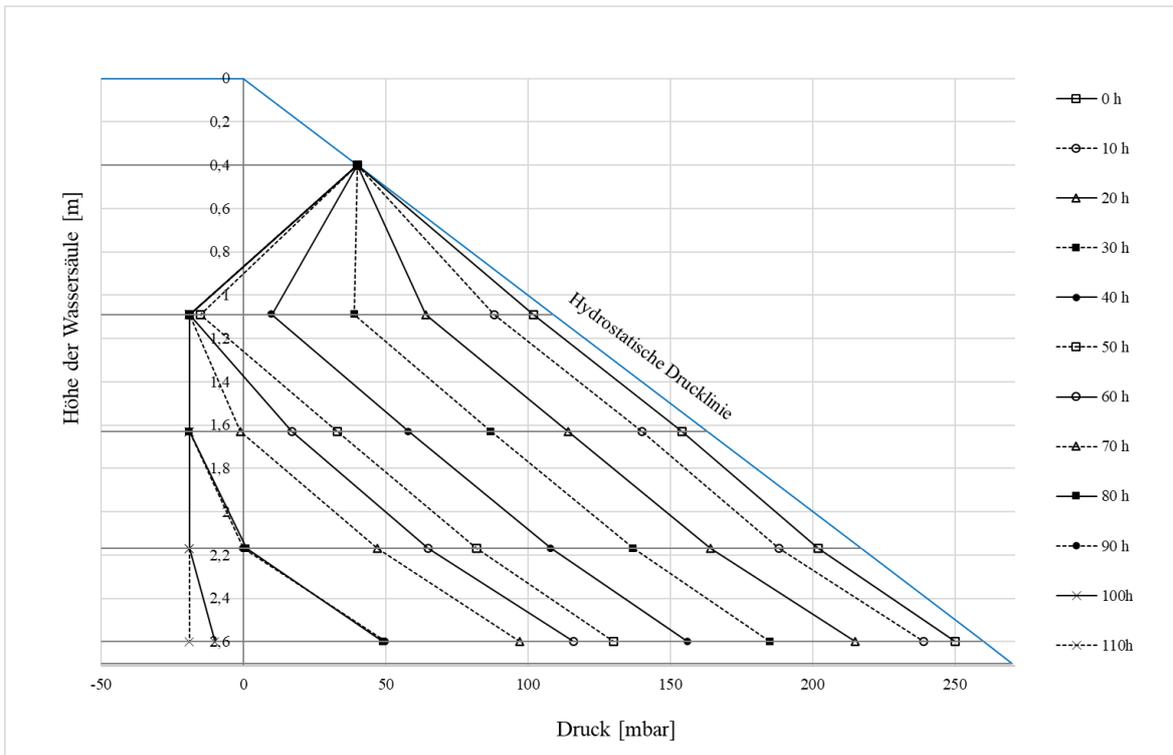


Abbildung 76: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen 30.09 - 05.10 (ISA-Sonden)

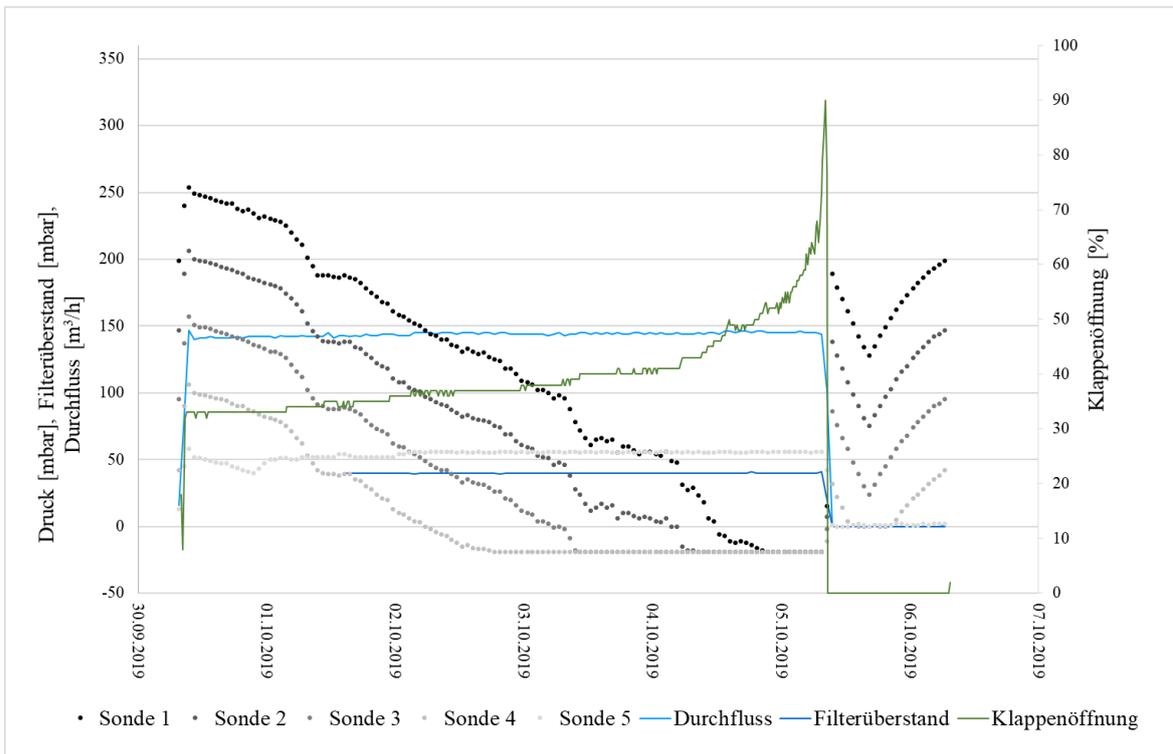


Abbildung 77: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.09 - 06.10 (ISA-Sonden)

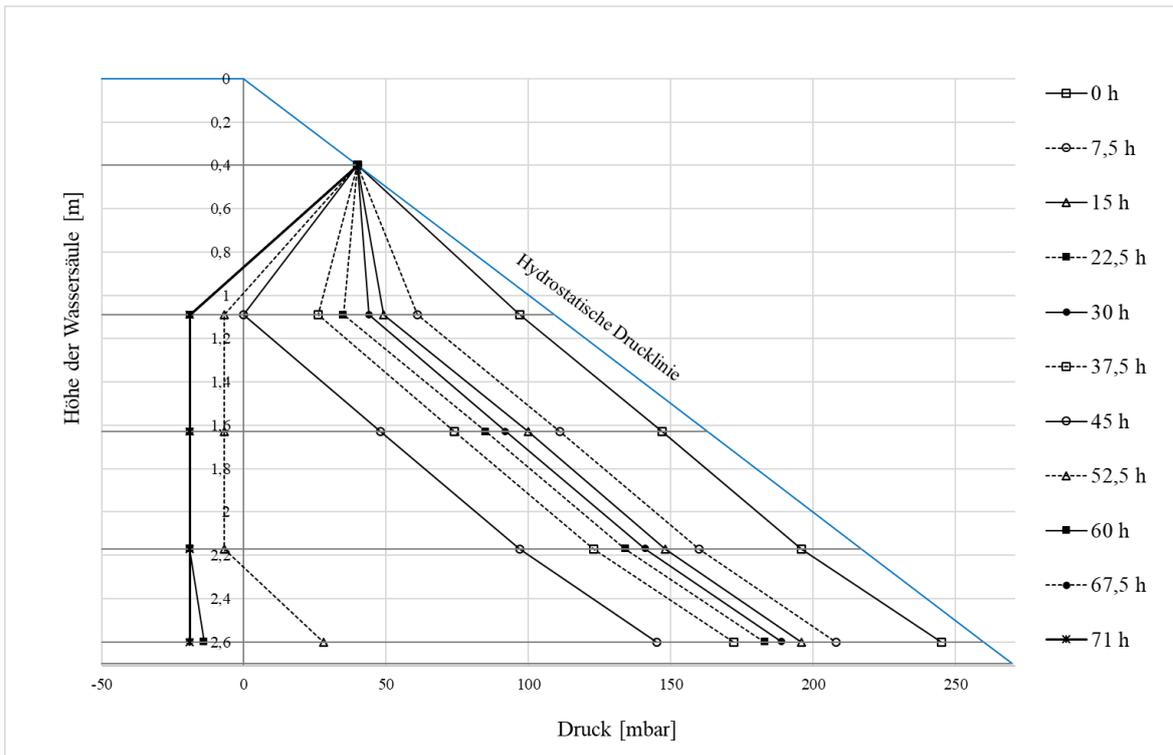


Abbildung 78: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.10 - 09.10 (ISA-Sonden)

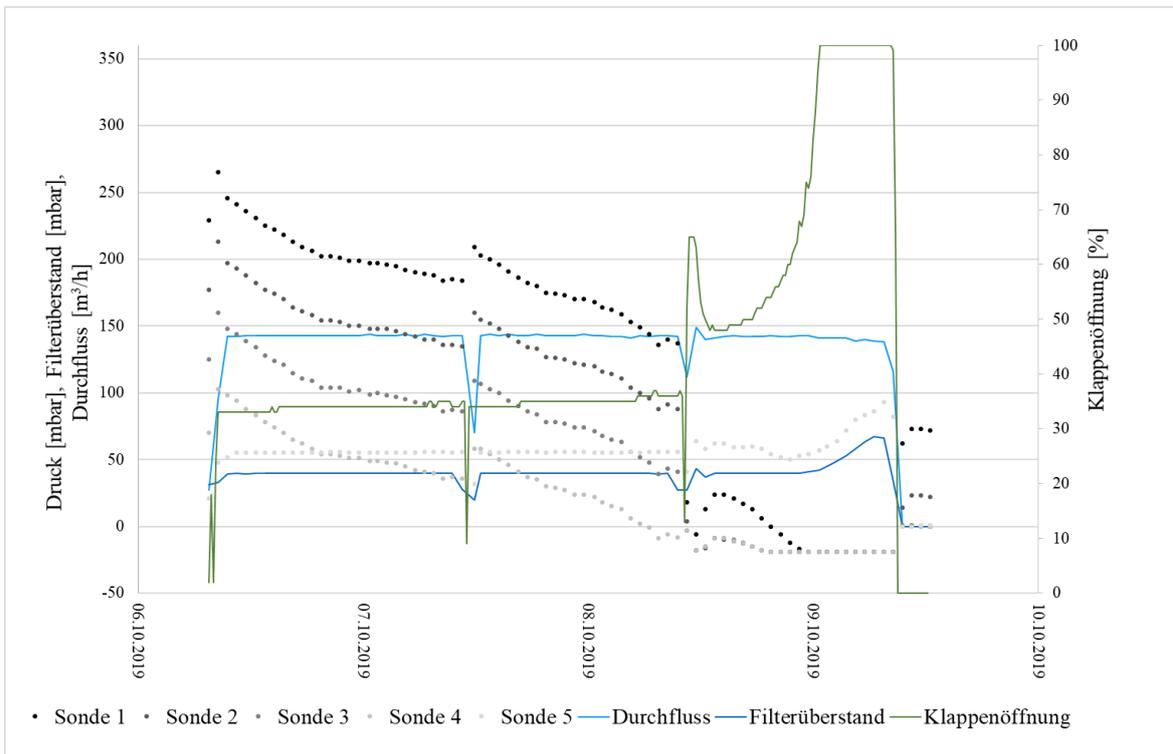


Abbildung 79: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 06.10 - 10.10 (ISA-Sonden)

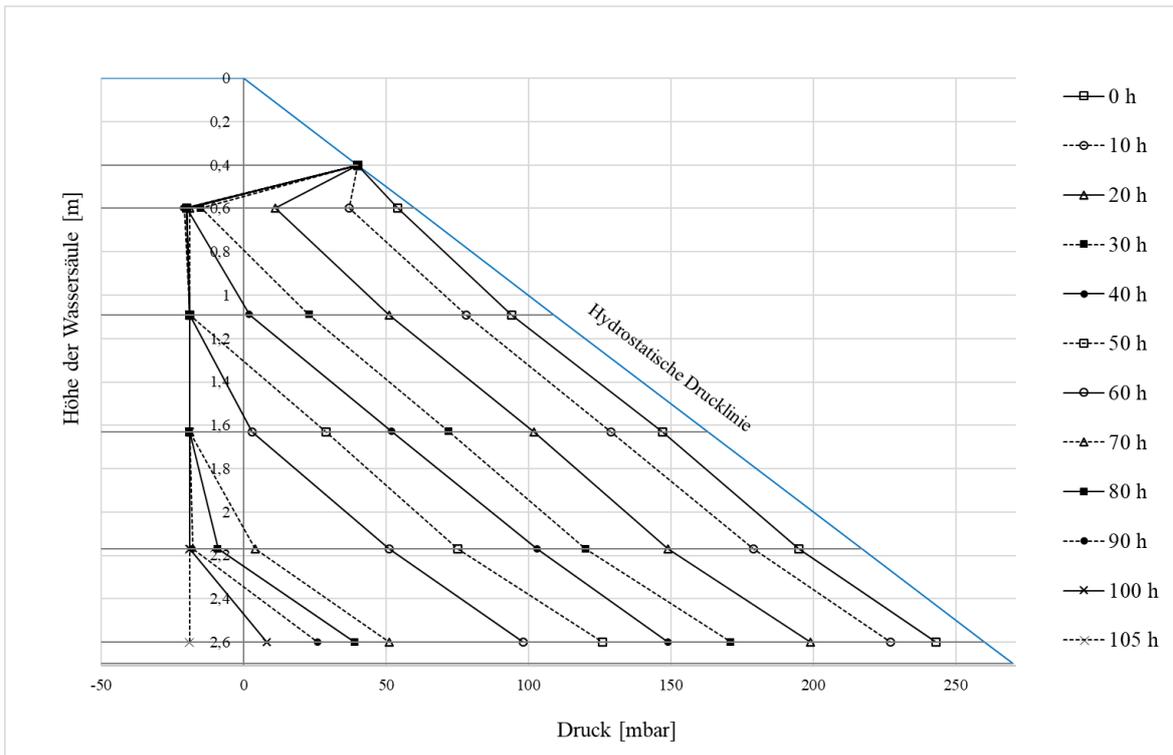


Abbildung 80: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.10 - 14.10 (ISA-Sonden)

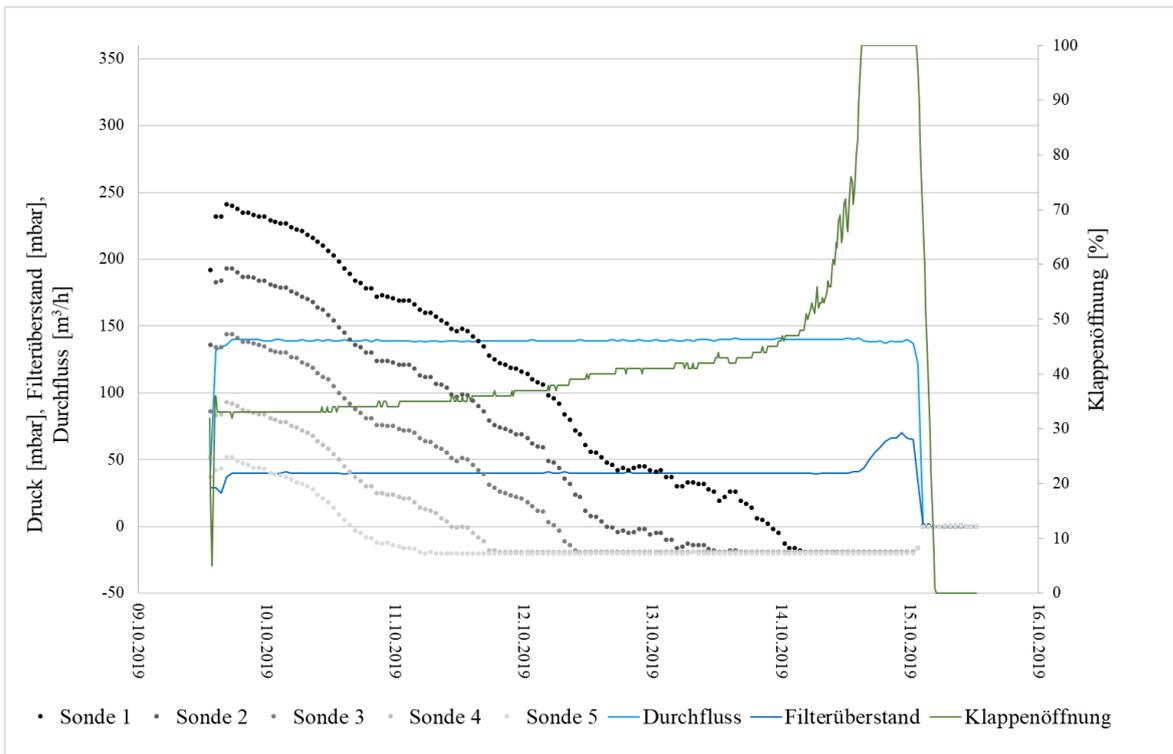


Abbildung 81: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.10 - 15.10 (ISA-Sonden)

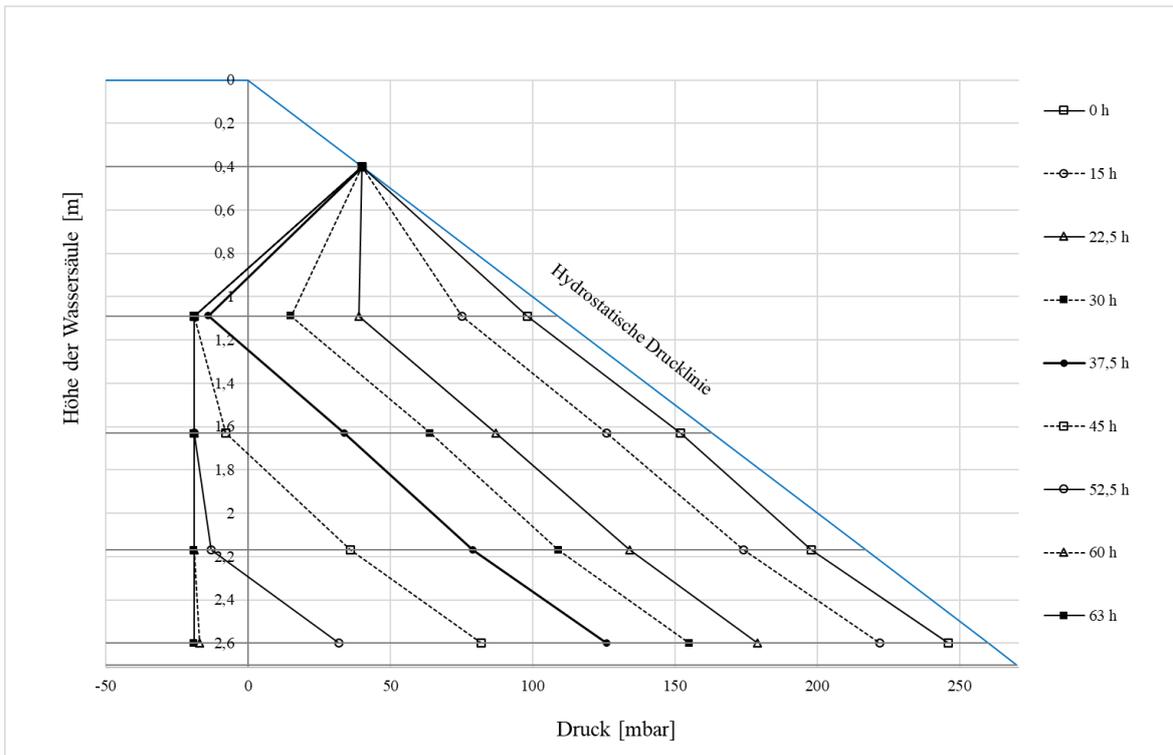


Abbildung 82: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 15.10 - 18.10 (ISA-Sonden)

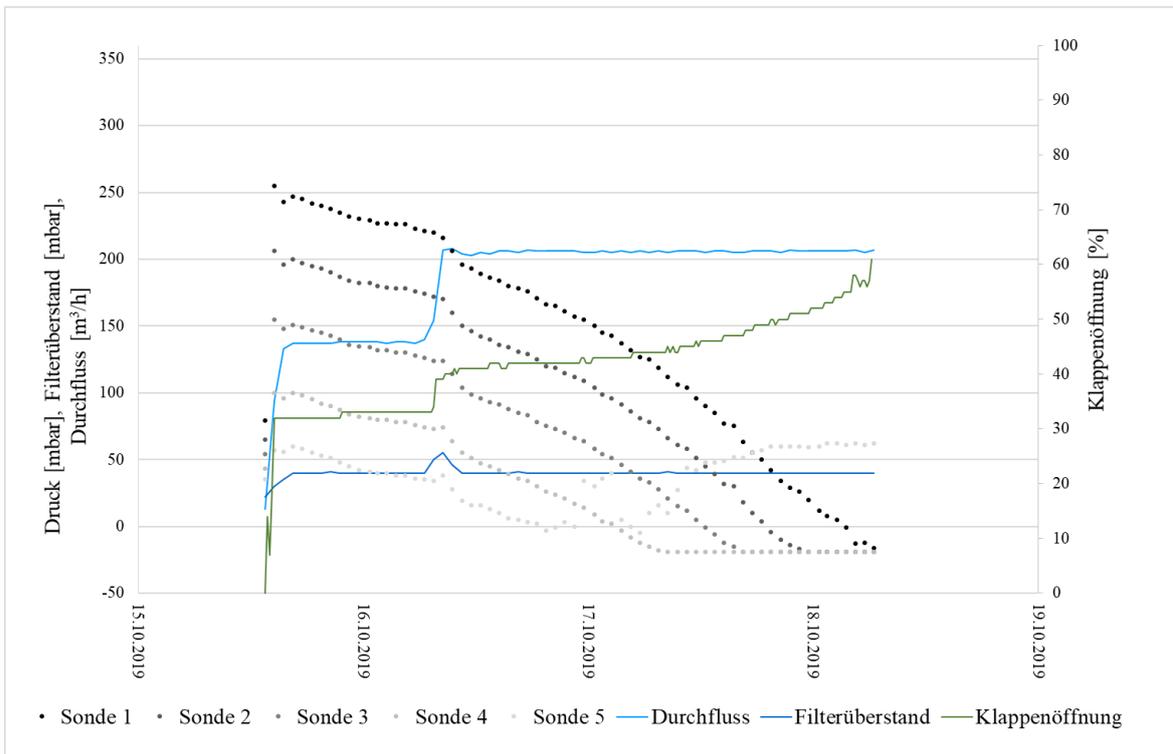


Abbildung 83: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 15.10 - 18.10 (ISA-Sonden)

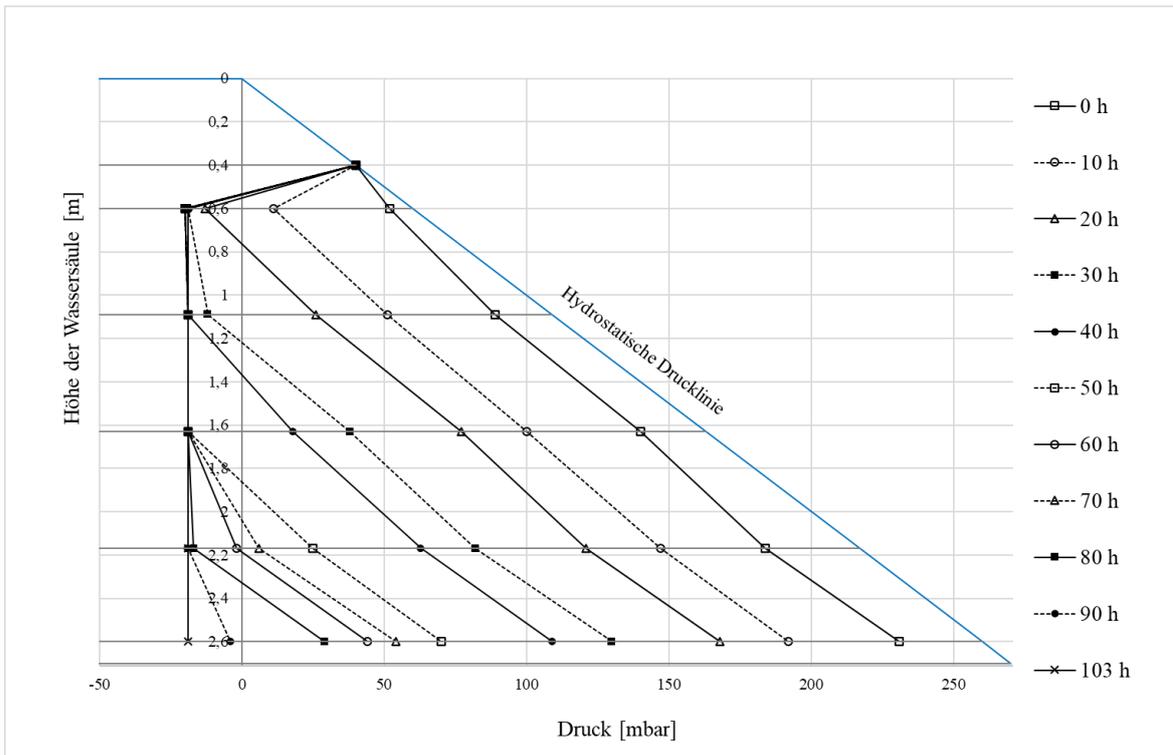


Abbildung 84: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 18.10 - 22.10 (ISA-Sonden)

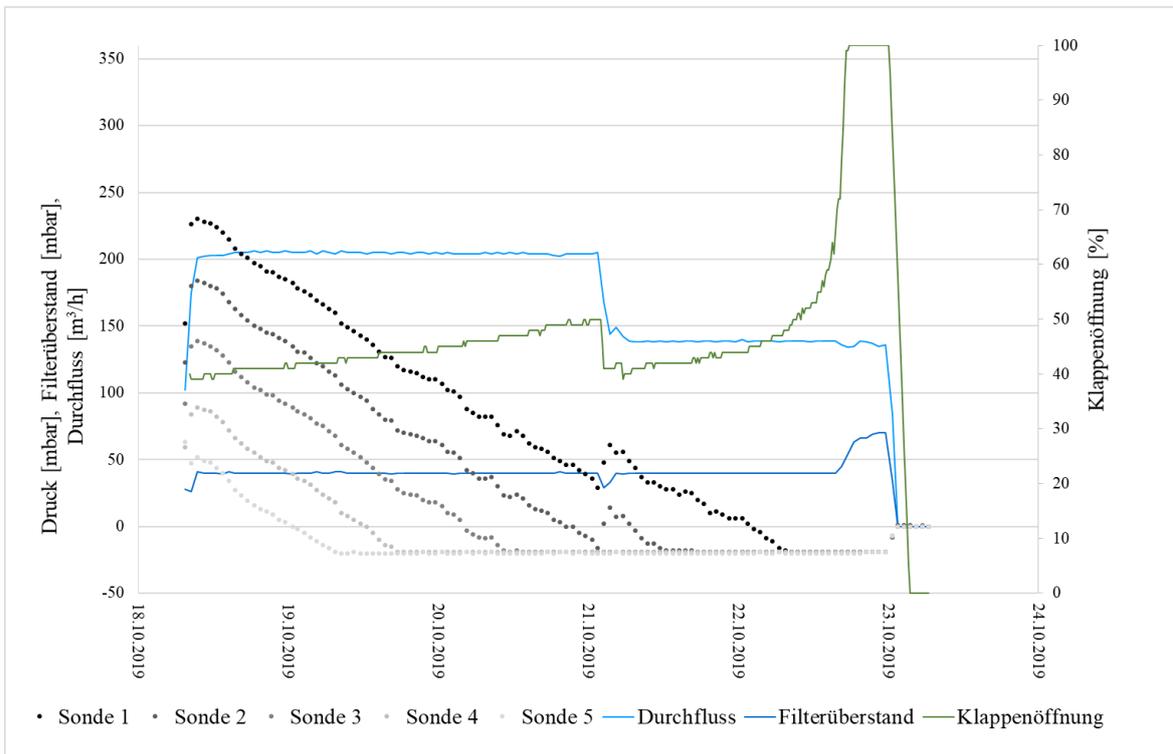


Abbildung 85: Druckdiagramm Bad Oeynhausen 18.10 - 22.10 (ISA-Sonden)

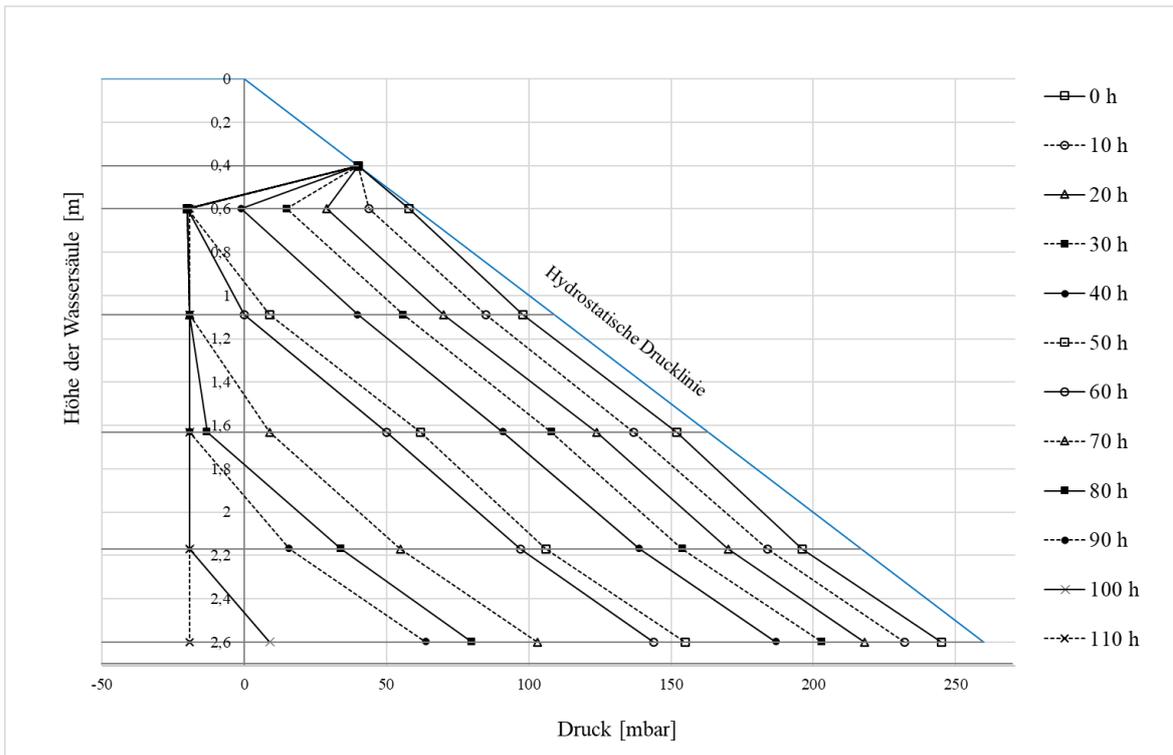


Abbildung 86: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 23.10 - 28.10 (ISA-Sonden)

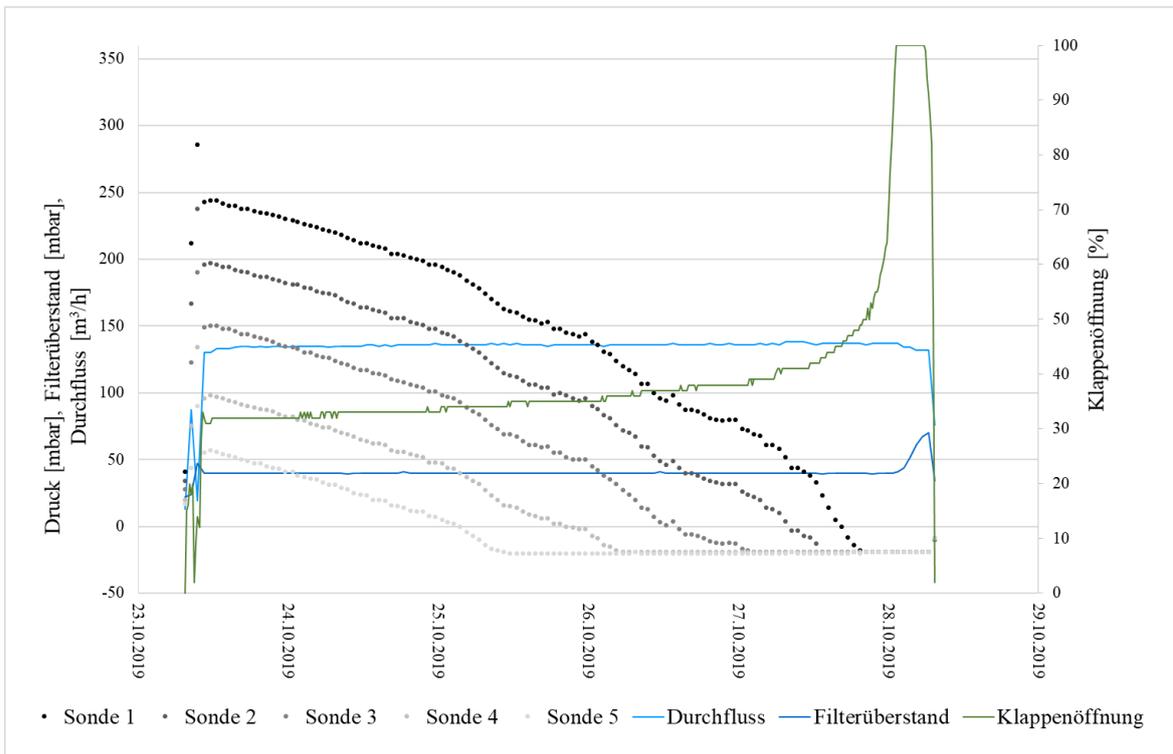


Abbildung 87: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.10 - 28.10 (ISA-Sonden)

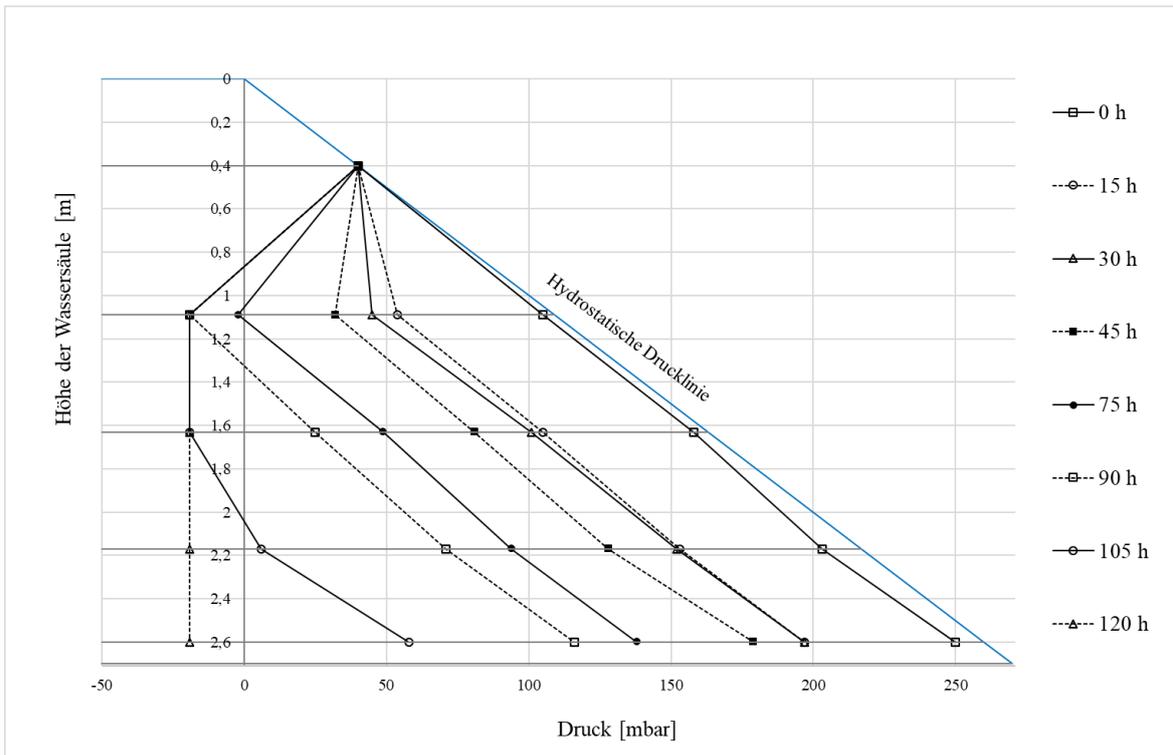


Abbildung 88: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 28.10 - 02.11 (ISA-Sonden)

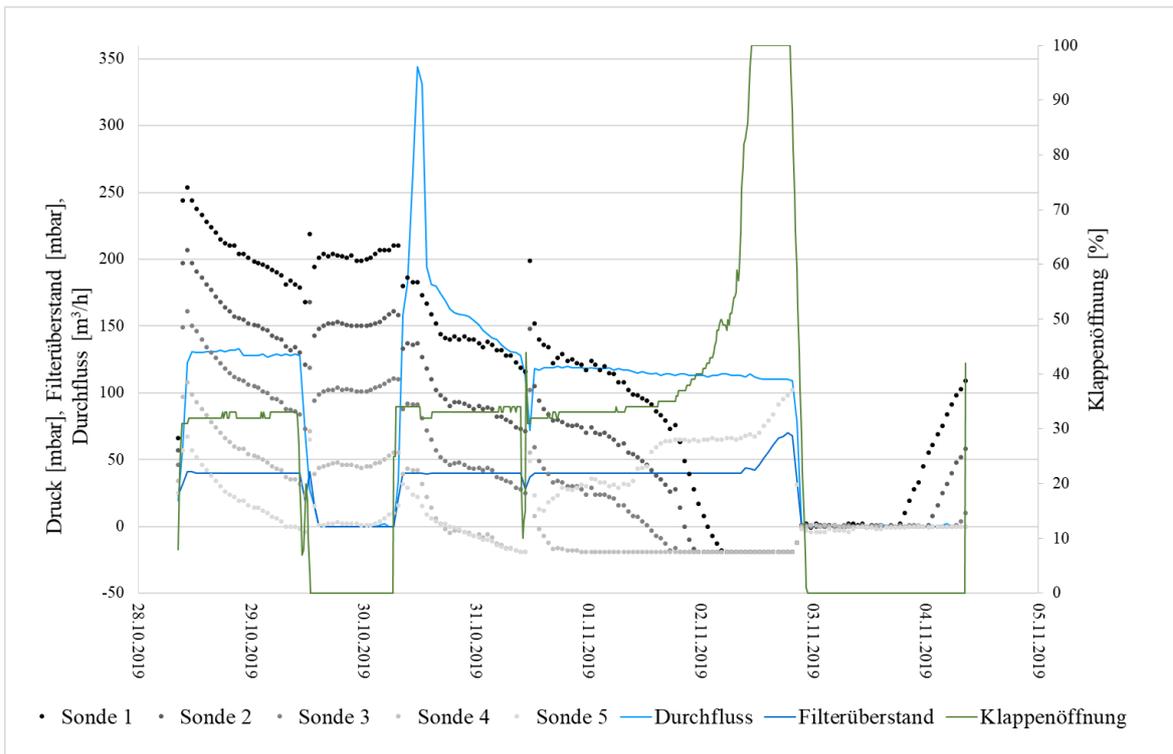


Abbildung 89: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 28.10 - 04.11 (ISA-Sonden)

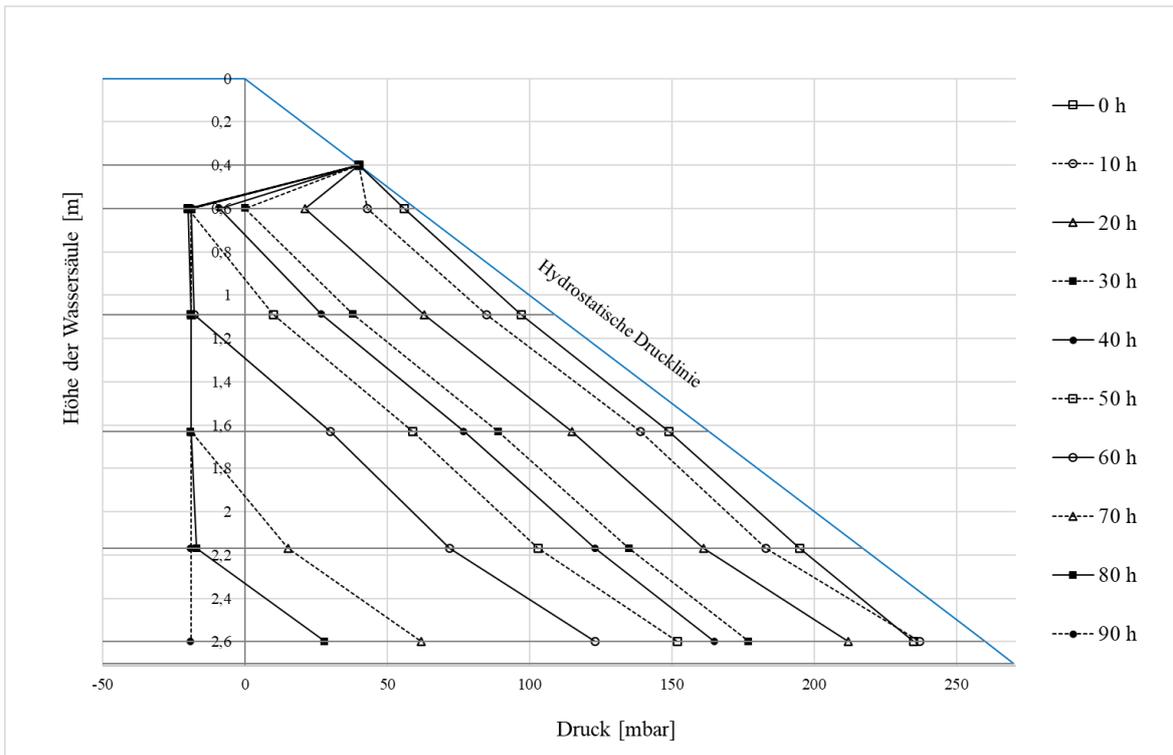


Abbildung 90: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 04.11 - 08.11 (ISA-Sonden)

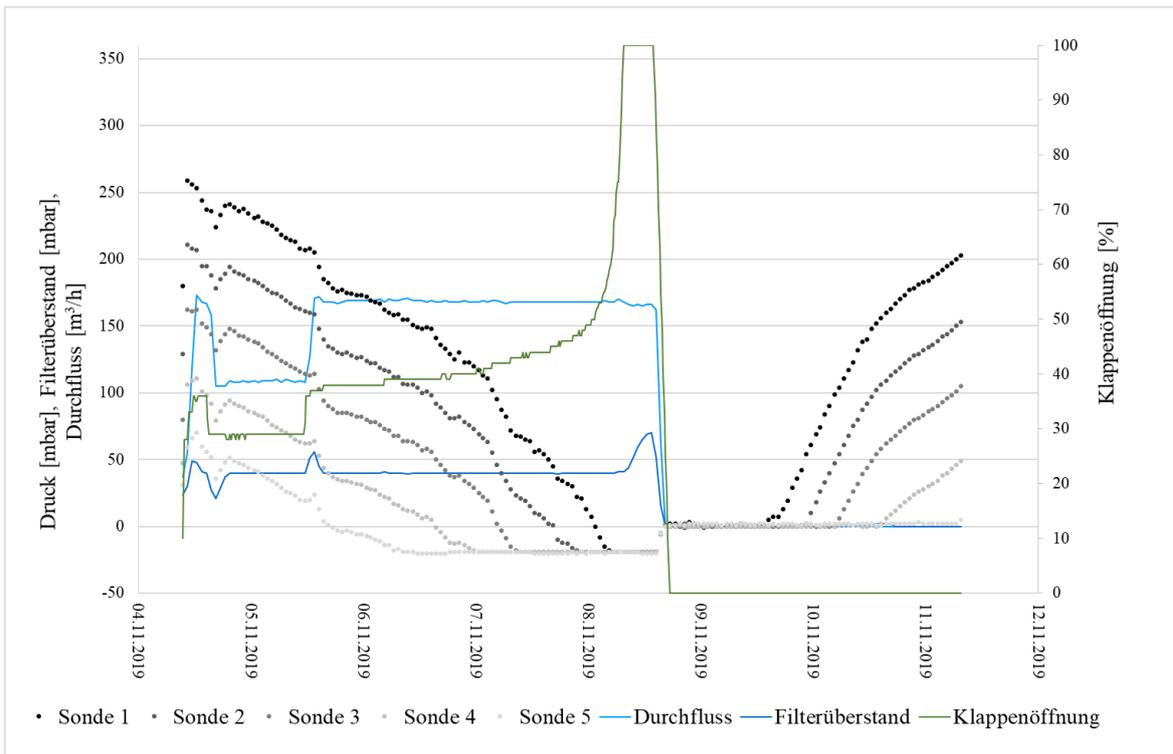


Abbildung 91: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.11 - 11.11 (ISA-Sonden)

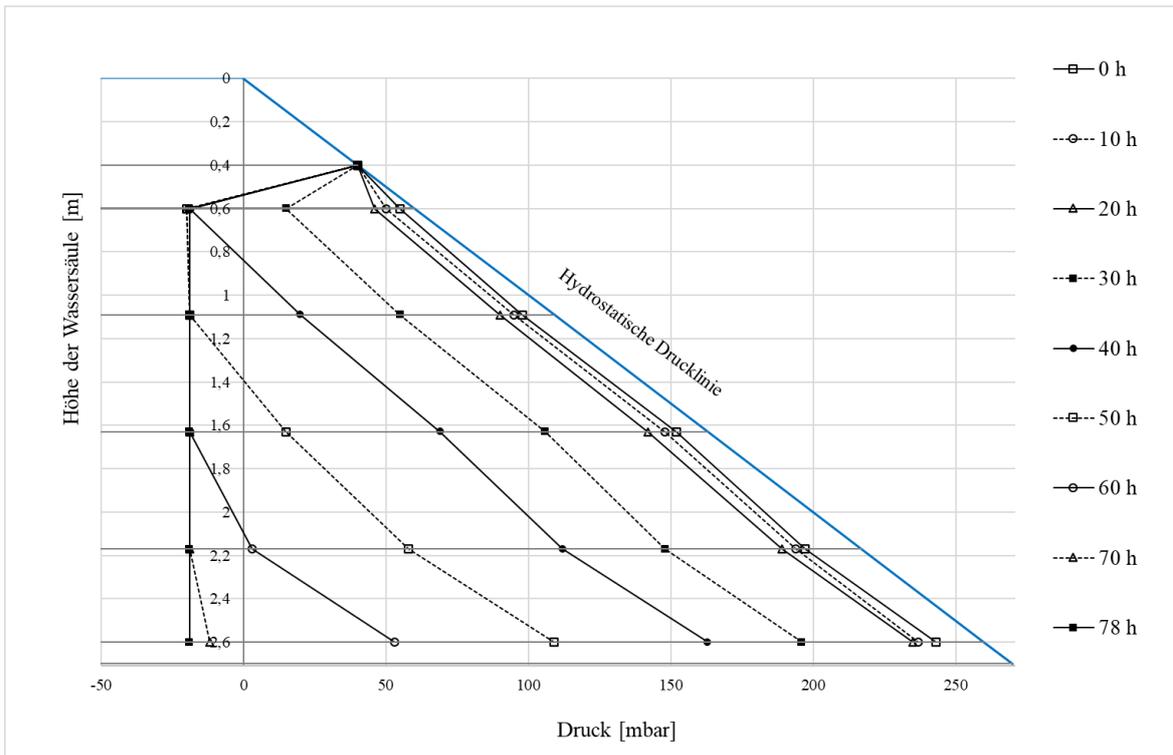


Abbildung 92: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 11.11 - 15.11 (ISA-Sonden)

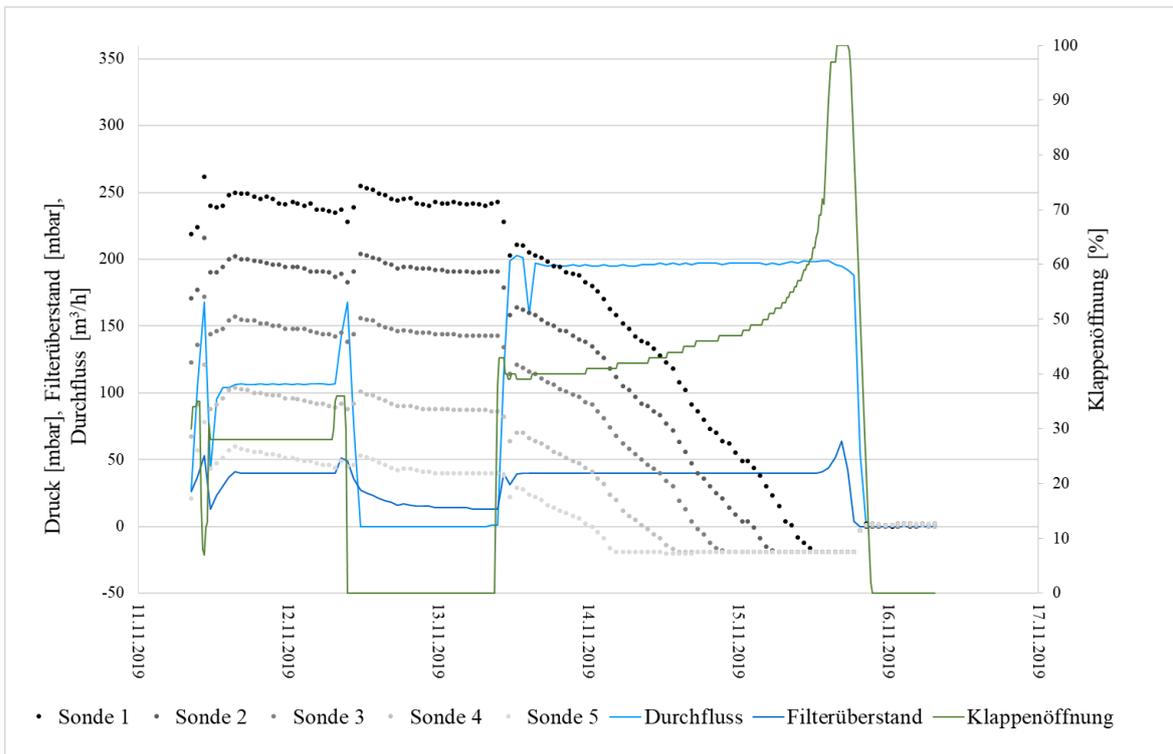


Abbildung 93: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 11.11 - 16.11 (ISA-Sonden)

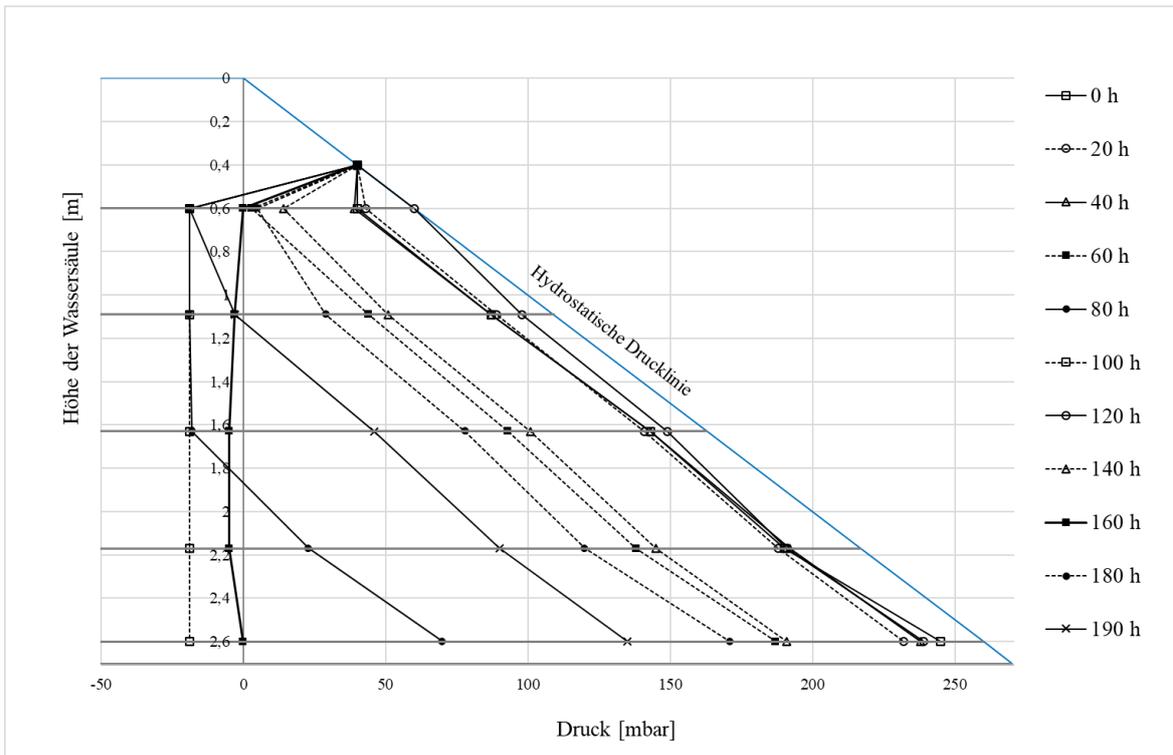


Abbildung 94: Micheau Diagramm Bad Oeynhausen vom 16.11 - 19.11 (ISA-Sonden)

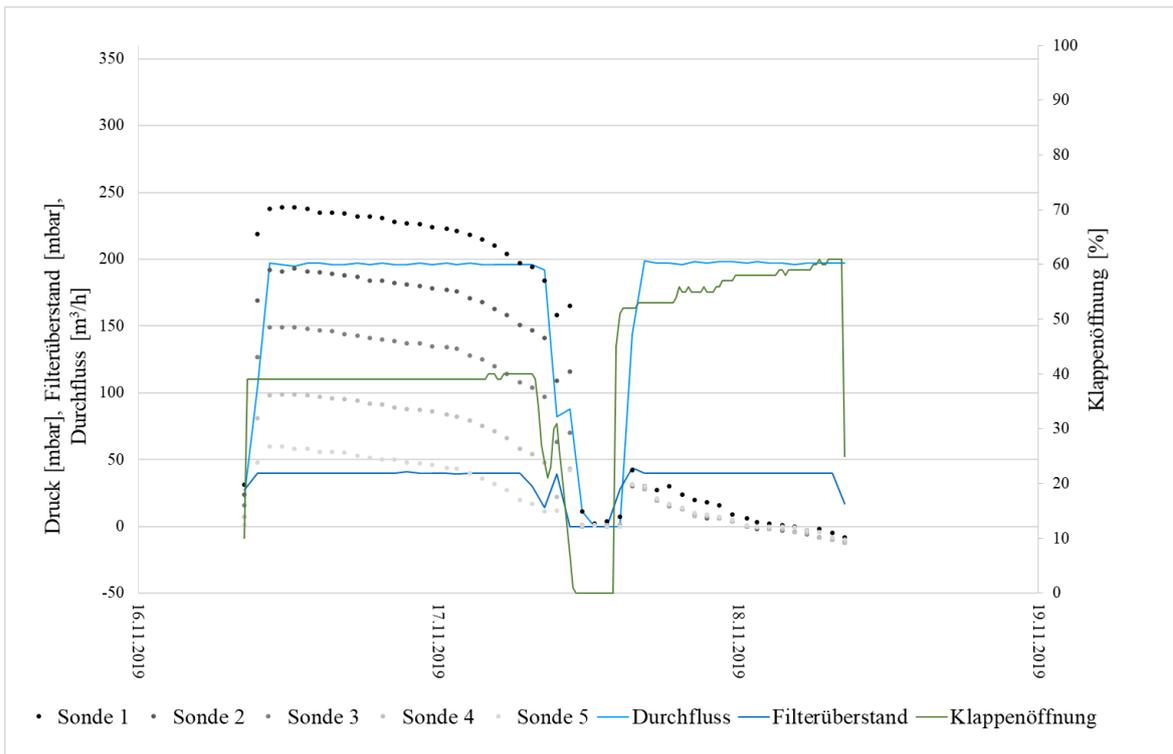


Abbildung 95: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.11 - 18.11 (ISA-Sonden)

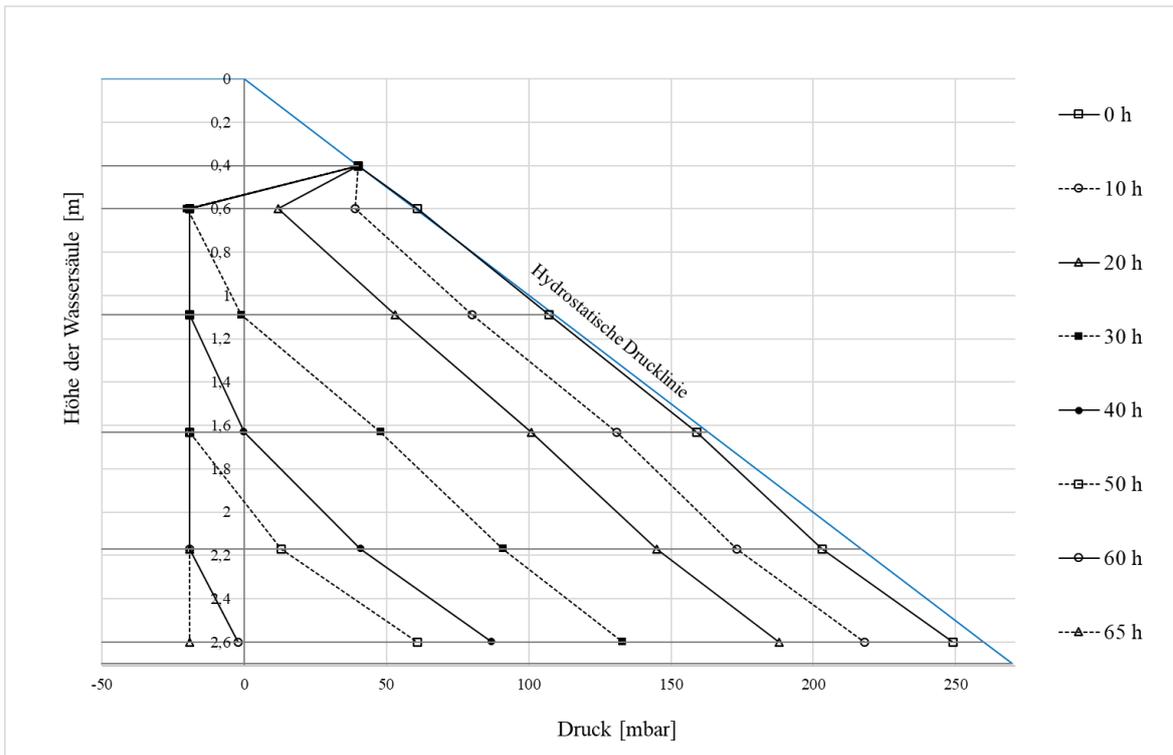


Abbildung 96: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (ISA-Sonden)

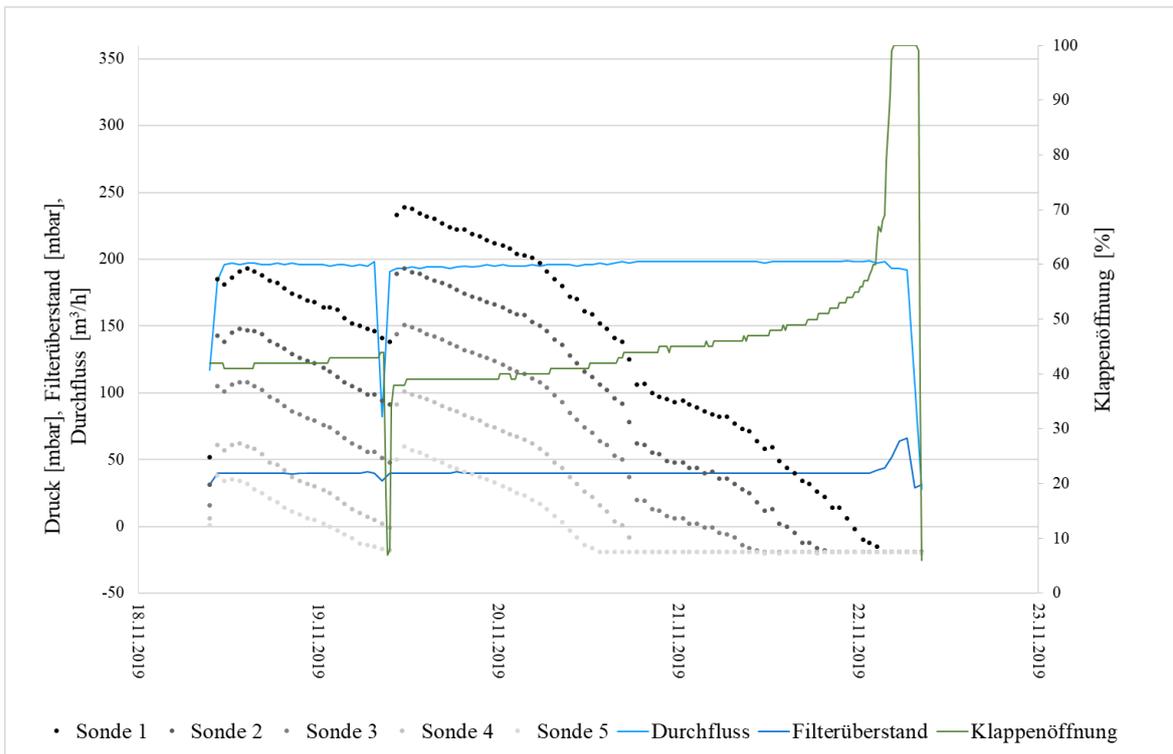


Abbildung 97: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 18.11 - 22.11 (ISA-Sonden)

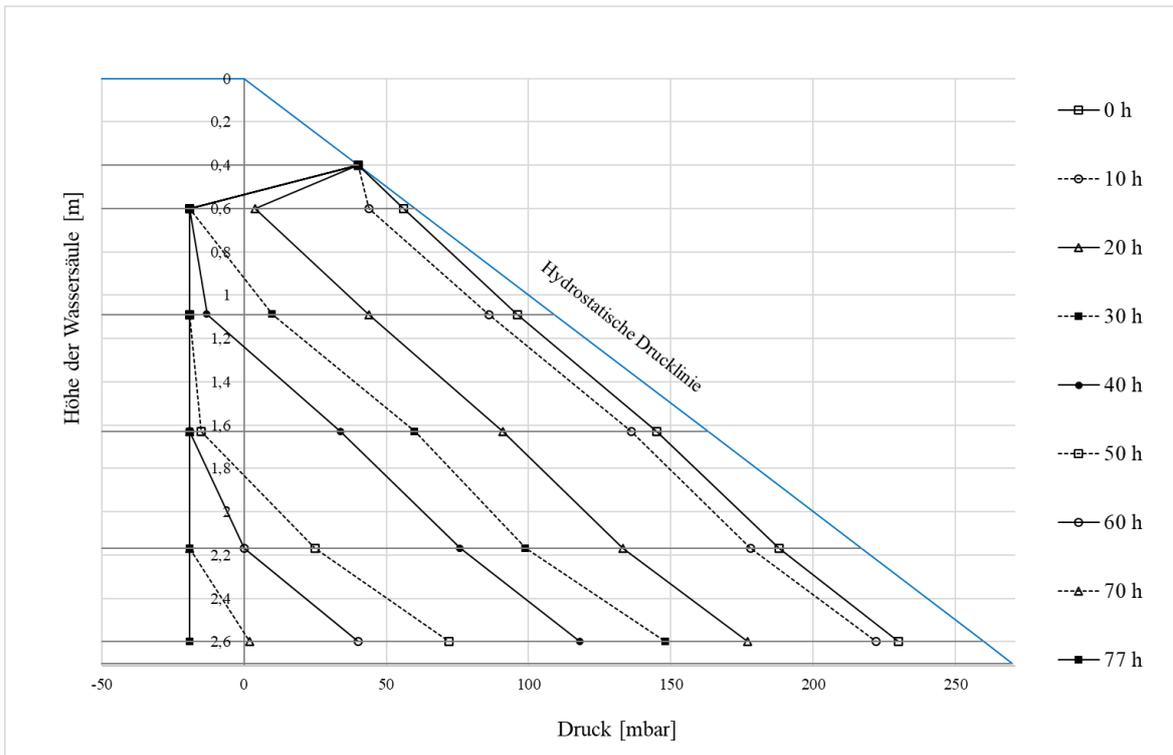


Abbildung 98: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 25.11 (ISA-Sonden)

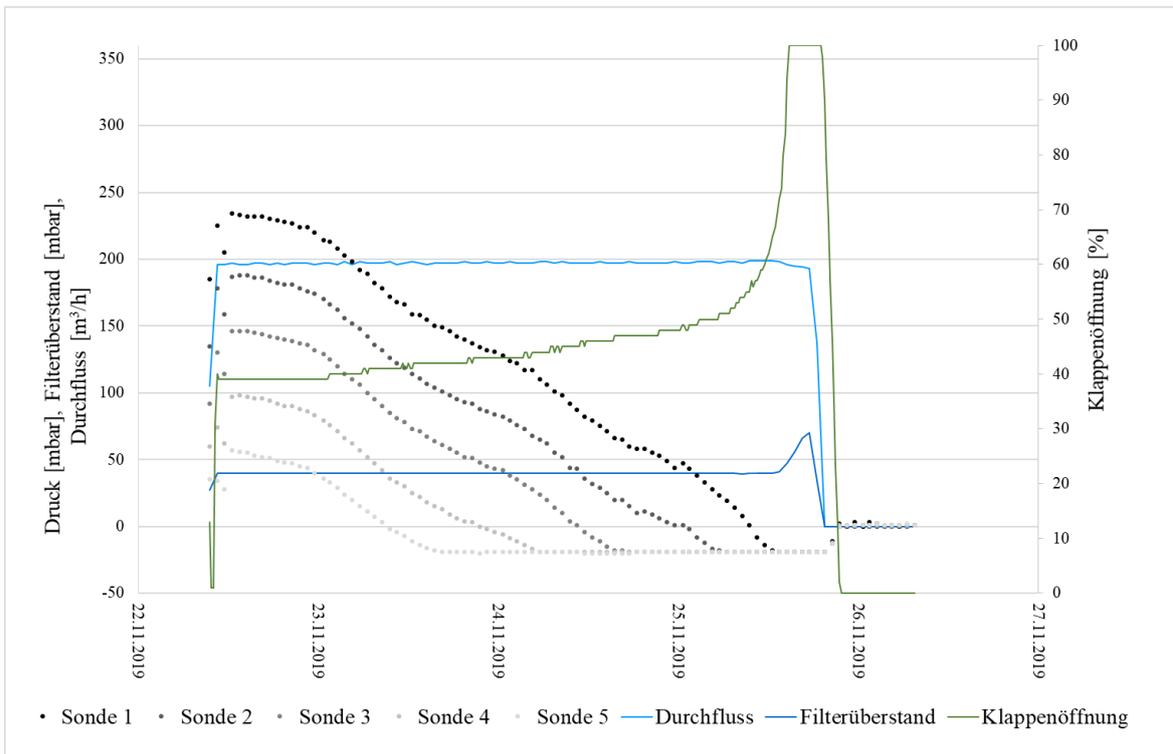


Abbildung 99: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 26.11 (ISA-Sonden)

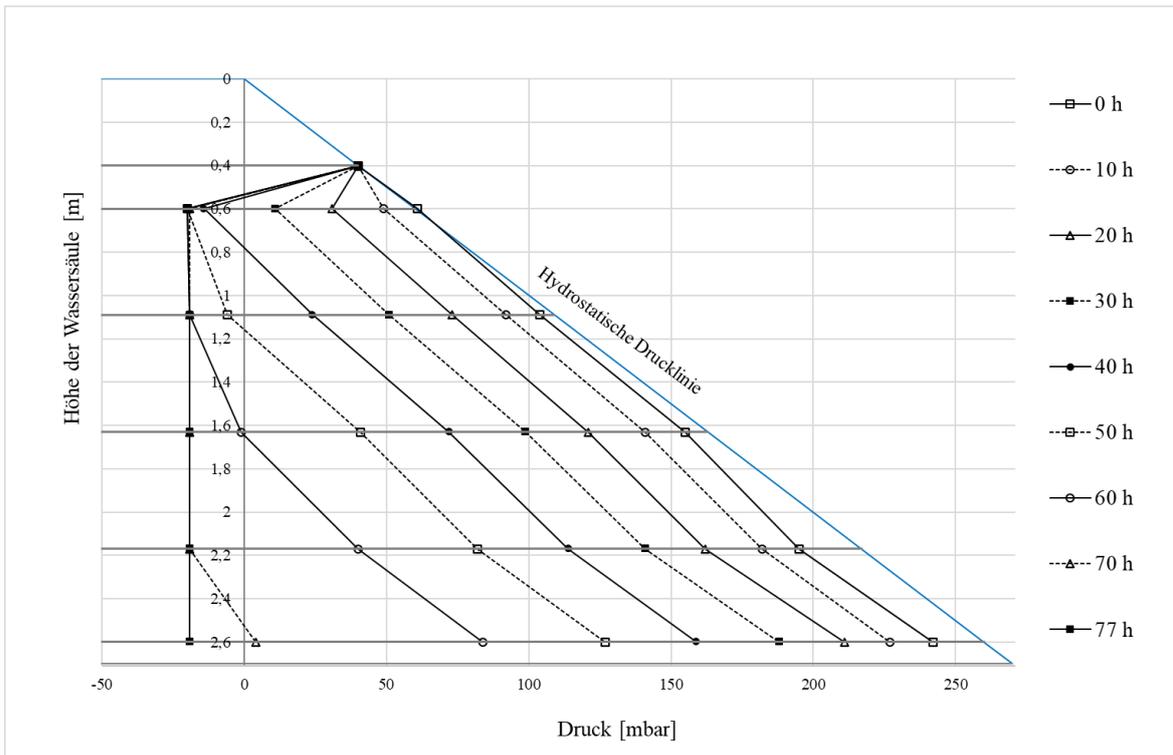


Abbildung 100: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 29.11 (ISA-Sonden)

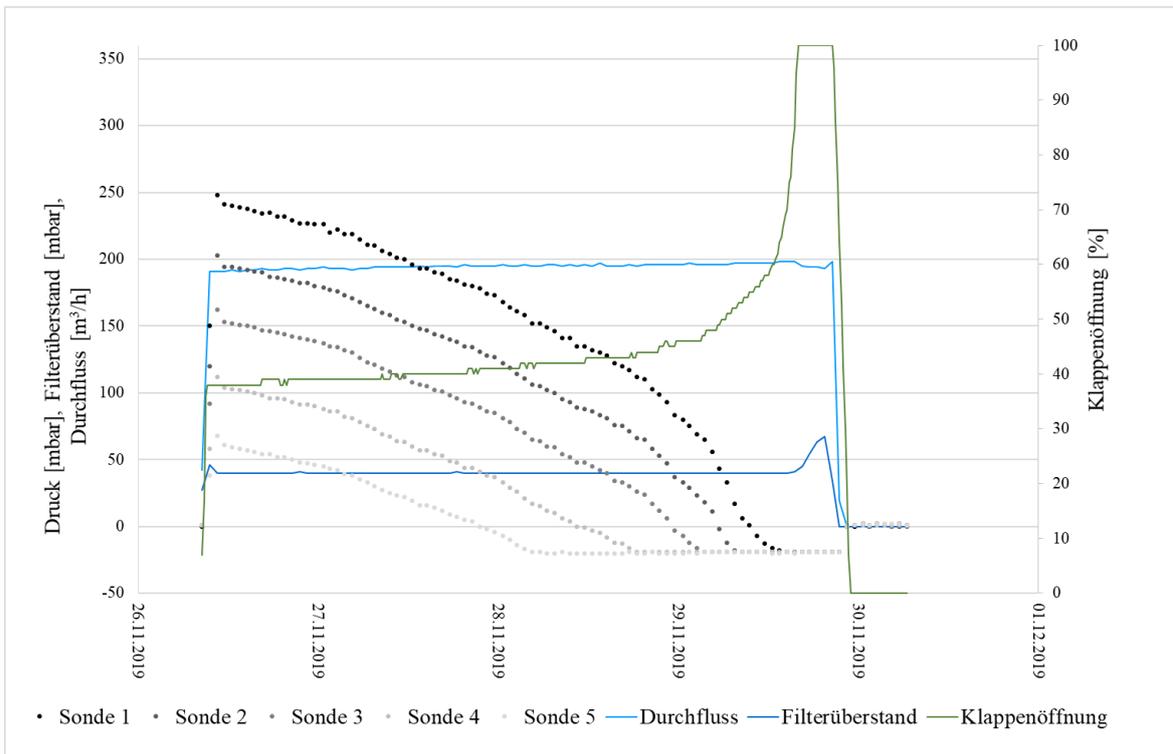


Abbildung 101: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 30.11 (ISA-Sonden)

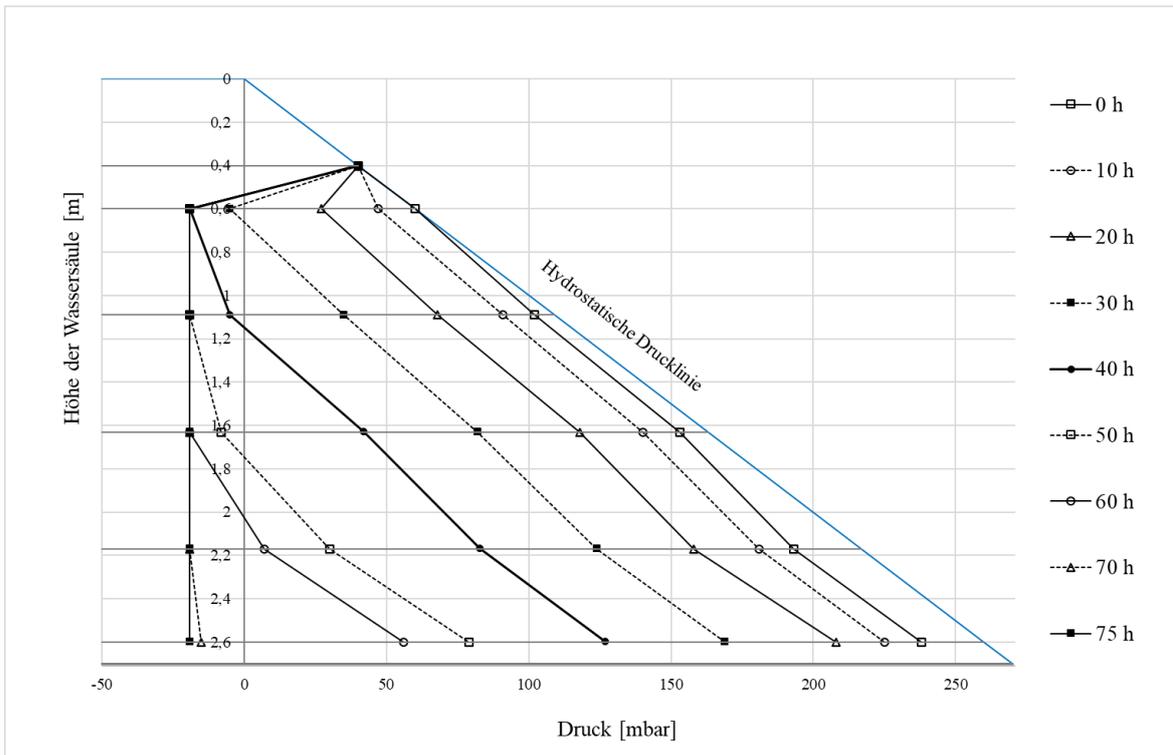


Abbildung 102: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 03.12 (ISA-Sonden)

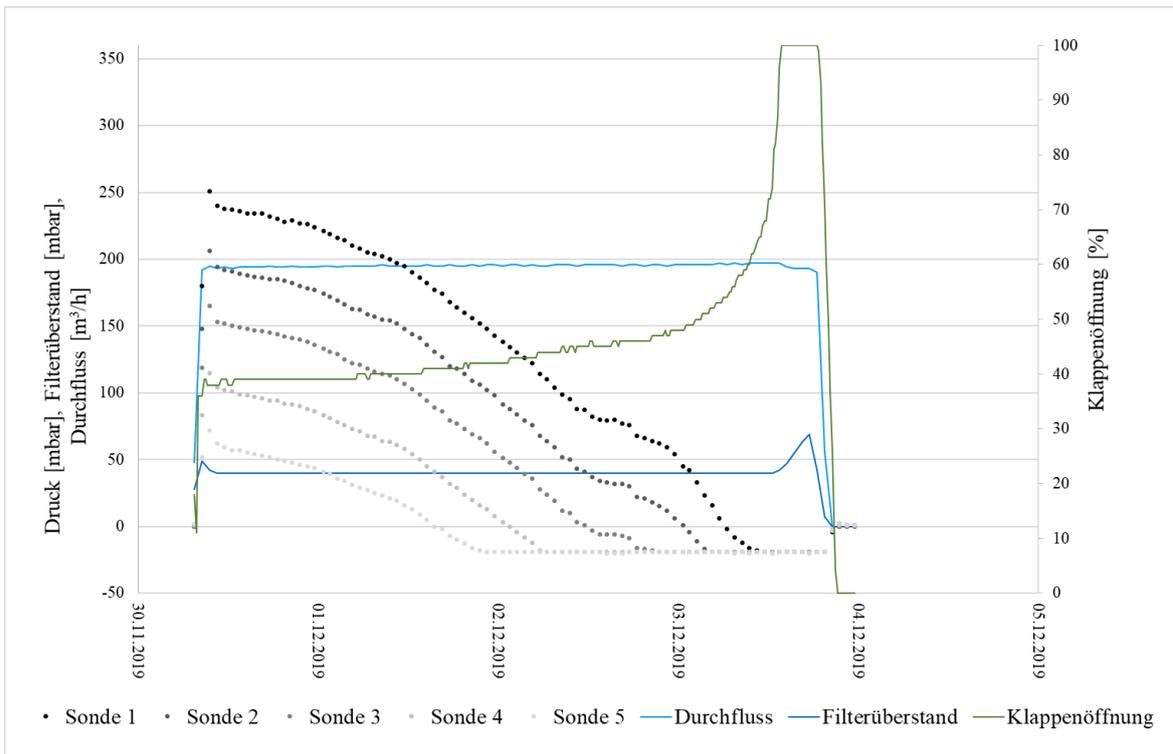


Abbildung 103: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.11 - 04.12 (ISA-Sonden)

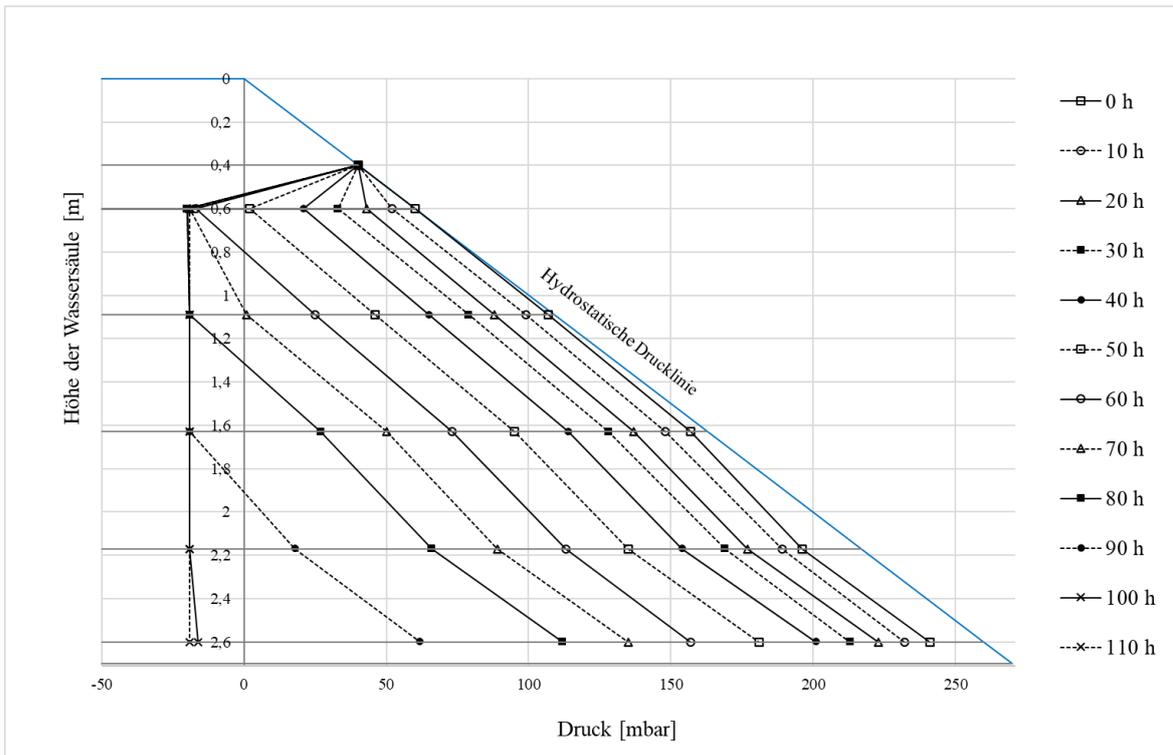


Abbildung 104: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 04.12 - 09.12 (ISA-Sonden)

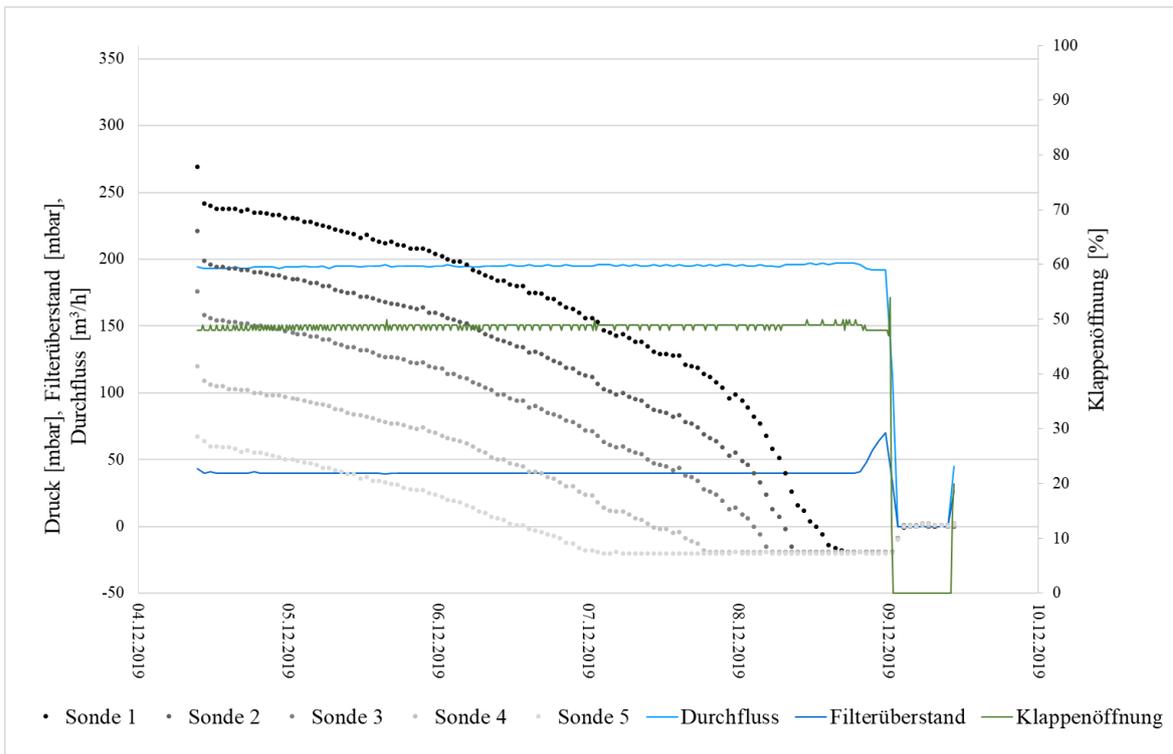


Abbildung 105: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.12 - 09.12 (ISA-Sonden)

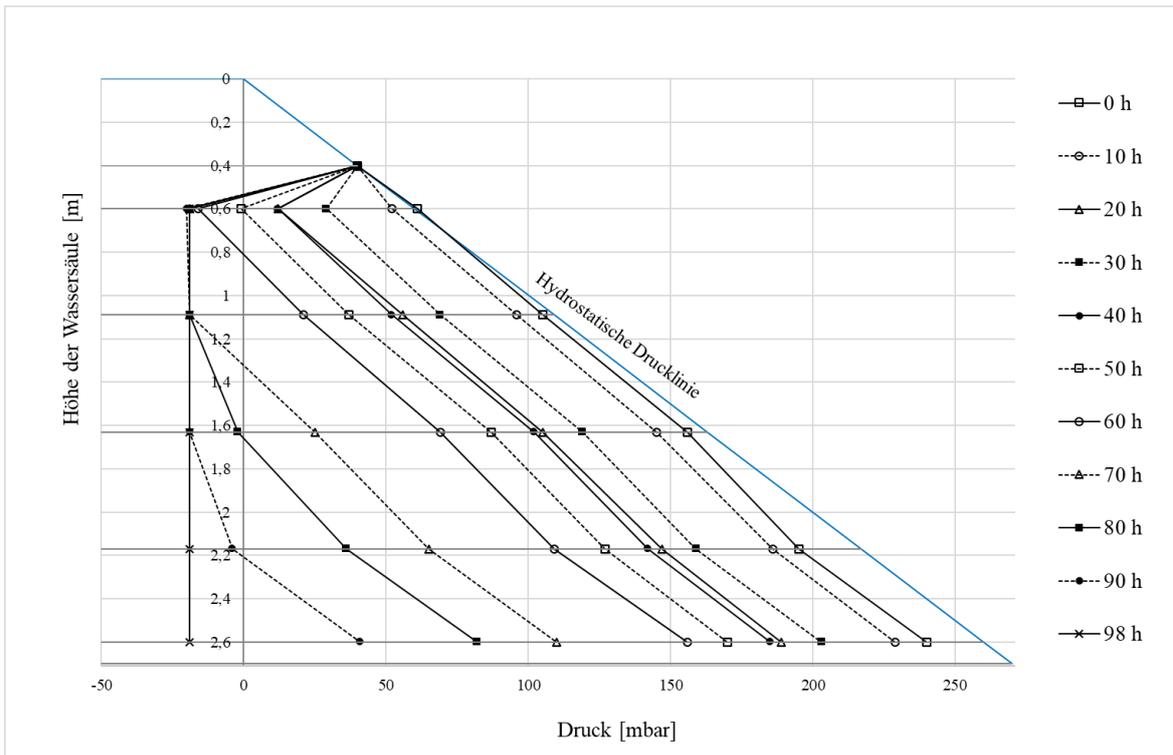


Abbildung 106: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (ISA-Sonden)

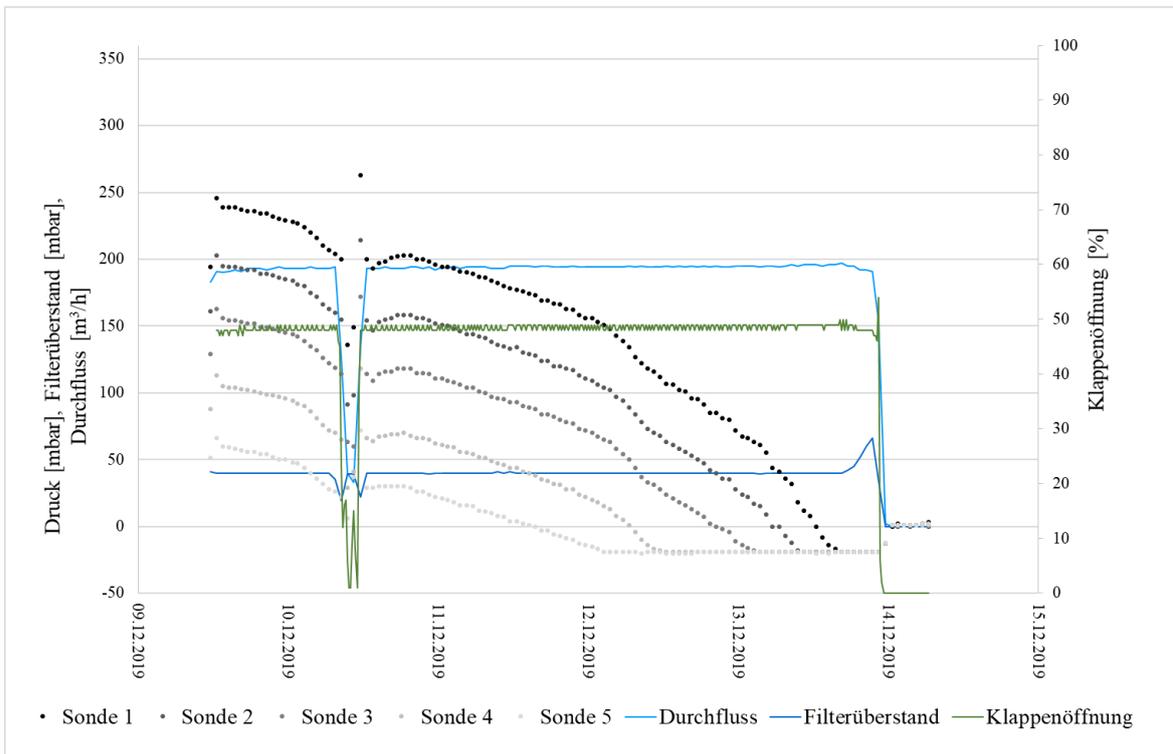


Abbildung 107: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 14.12 (ISA-Sonden)

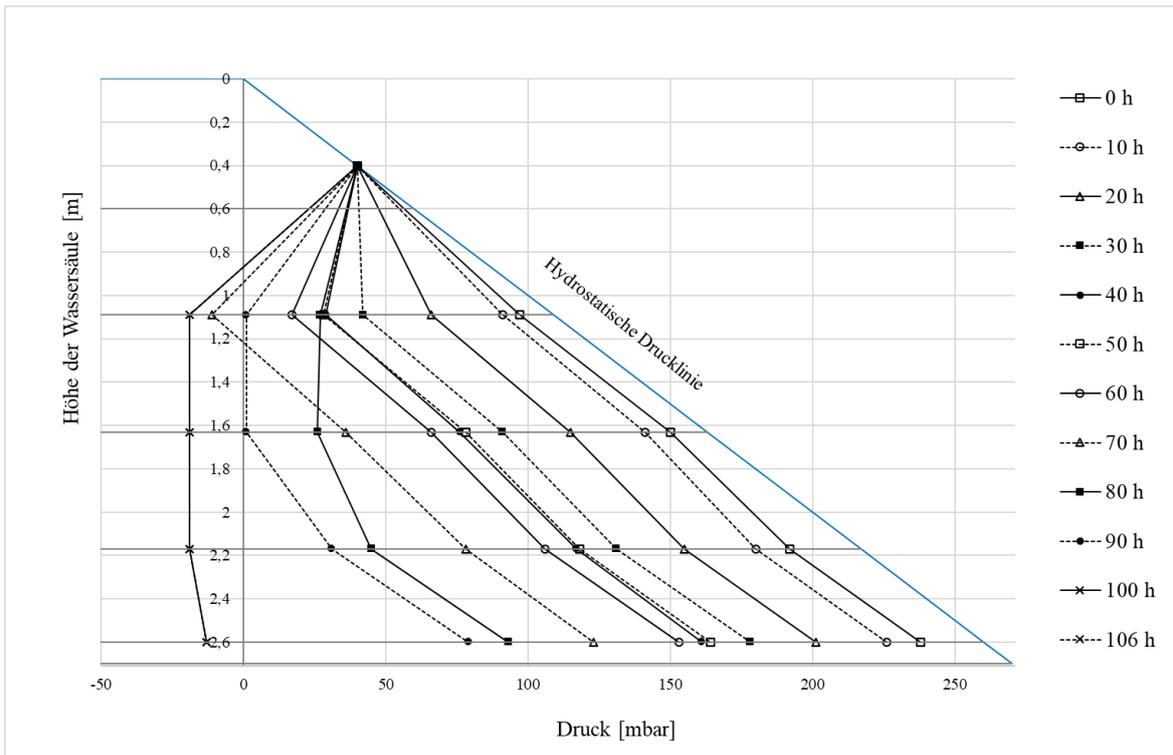


Abbildung 108: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausens vom 16.12 - 19.12 (ISA-Sonden)

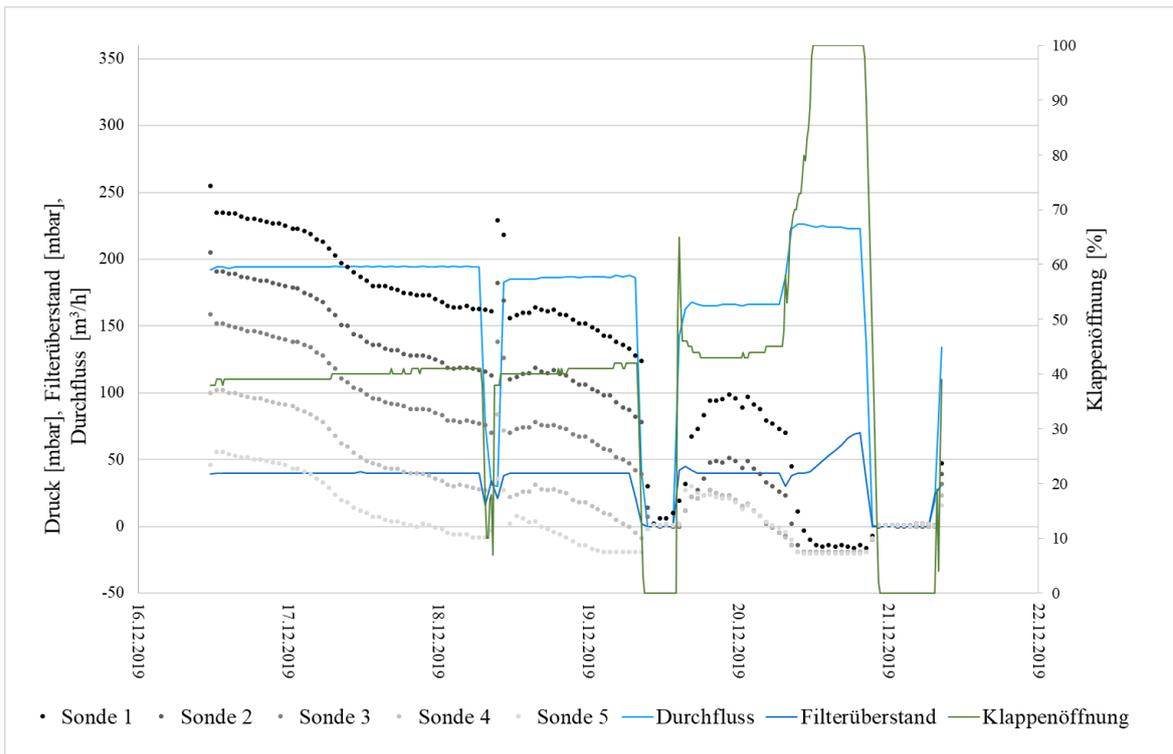


Abbildung 109: Druckdiagramm Bad Oeynhausens vom 16.12 - 21.12 (ISA-Sonden)

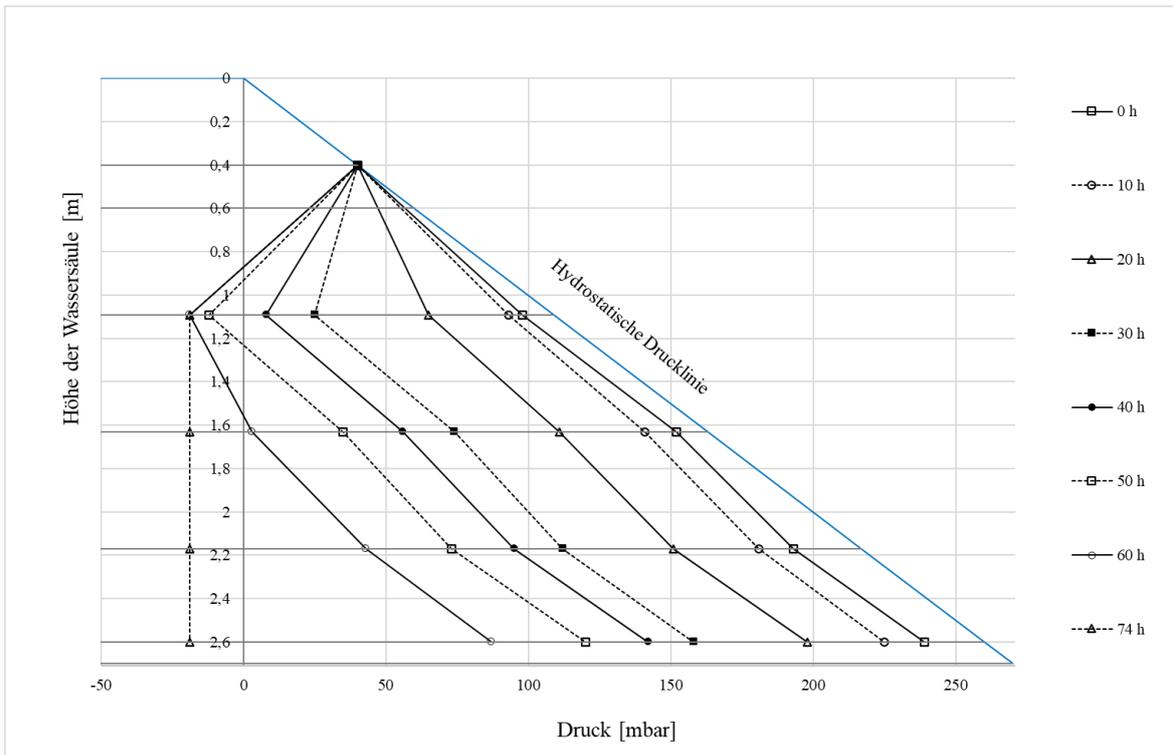


Abbildung 110: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 24.12 (ISA-Sonden)

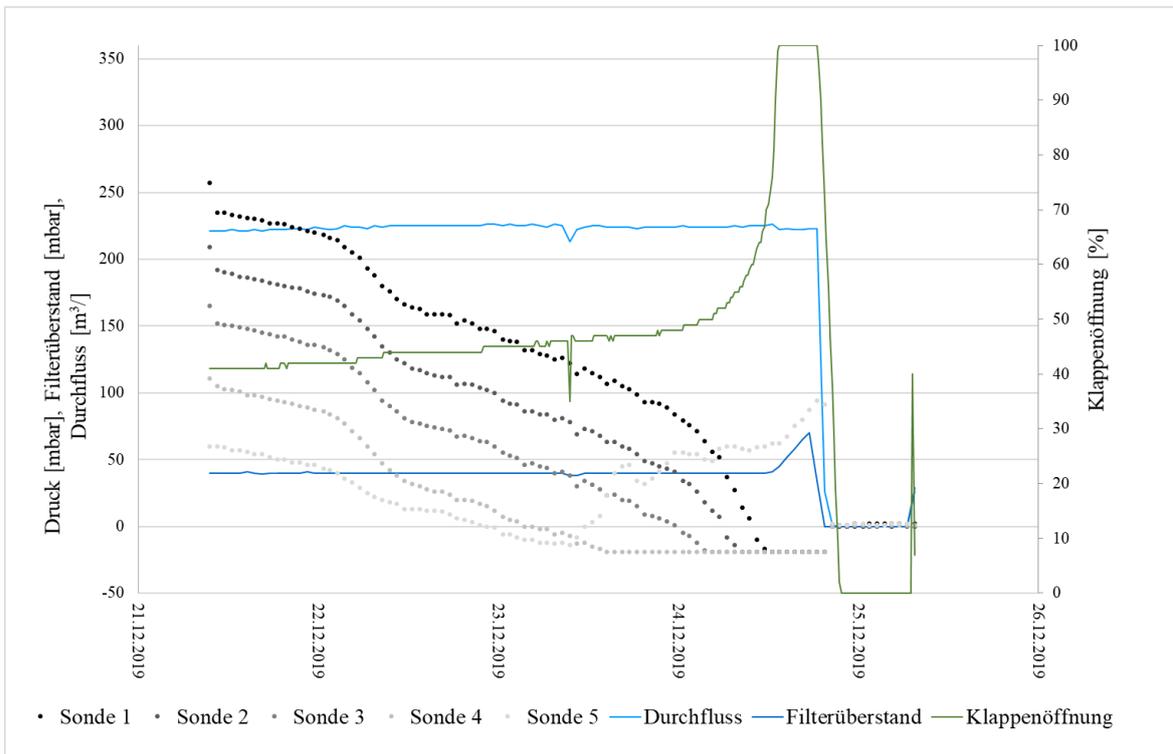


Abbildung 111: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 21.12 - 24.12 (ISA-Sonden)

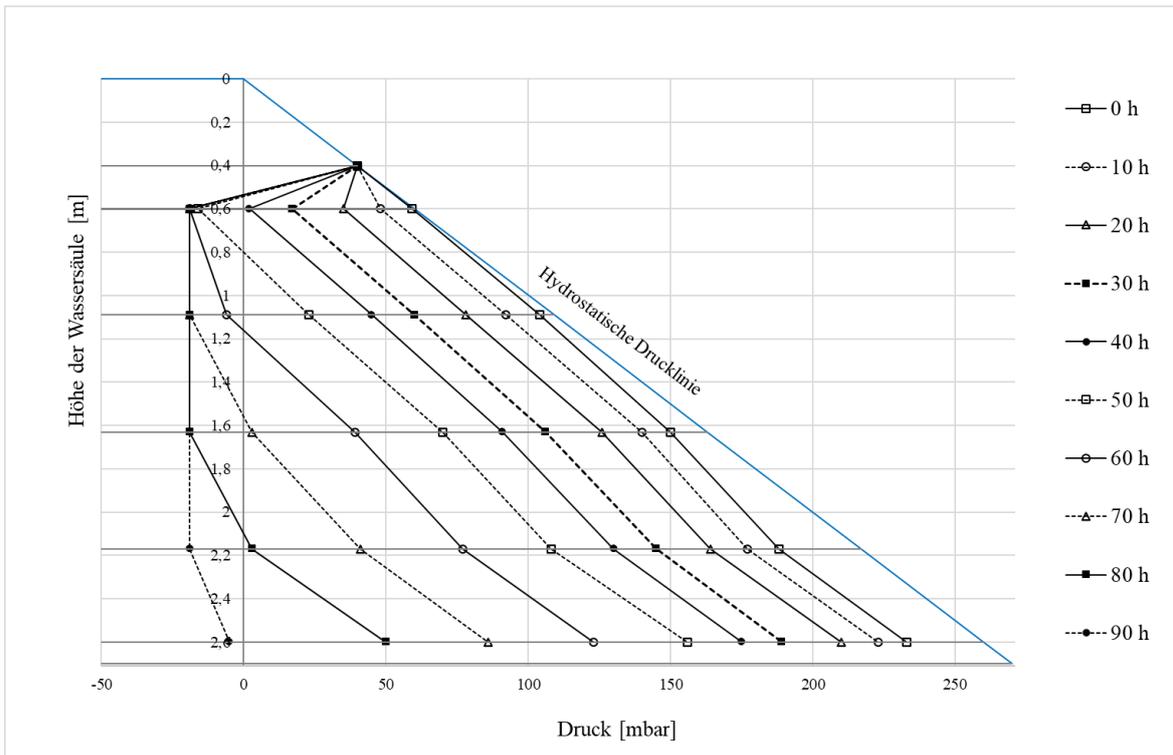


Abbildung 112: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (ISA-Sonden)

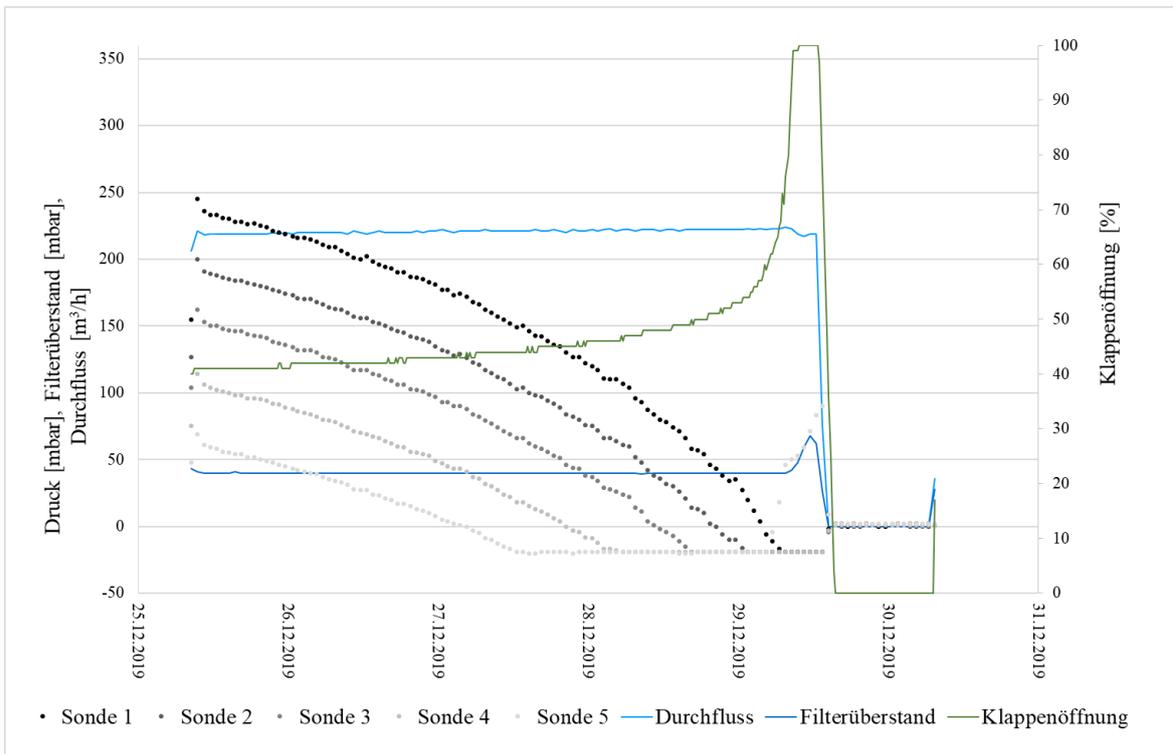


Abbildung 113: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (ISA-Sonden)

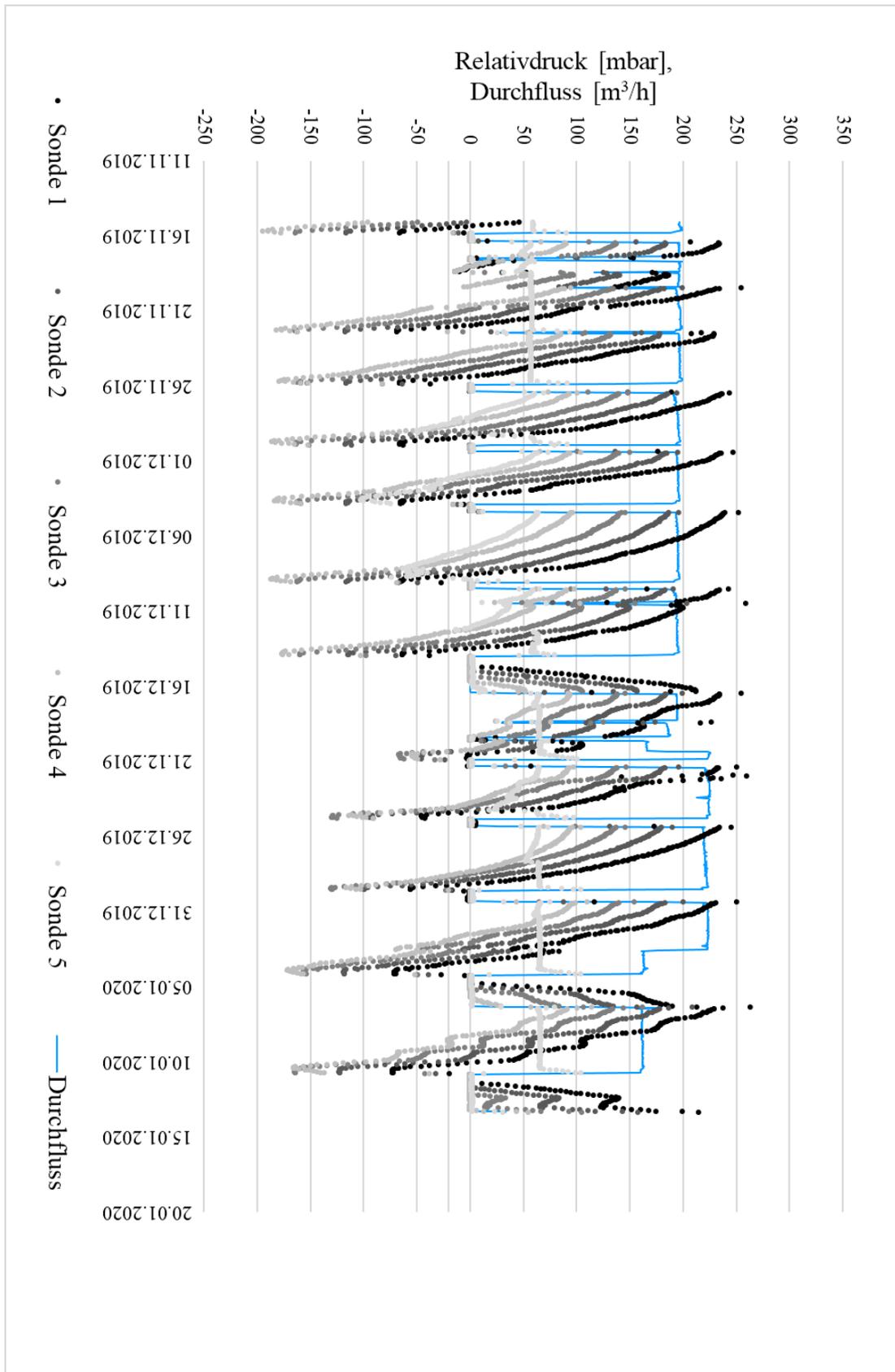


Abbildung 114: Gesamtdarstellung der Druckdaten in Bad Oeynhausen mit Beschickung Ablauf NK (Bad Oeynhausen (BO) -Sonden)

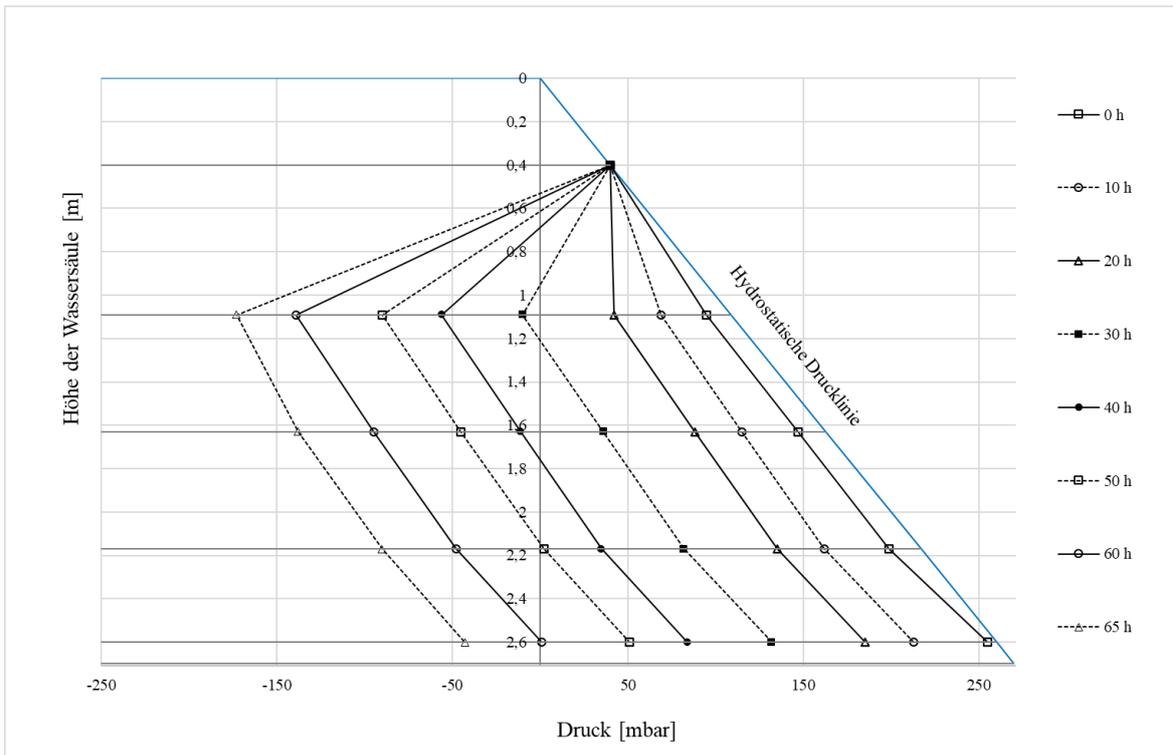


Abbildung 115: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (BO-Sonden)

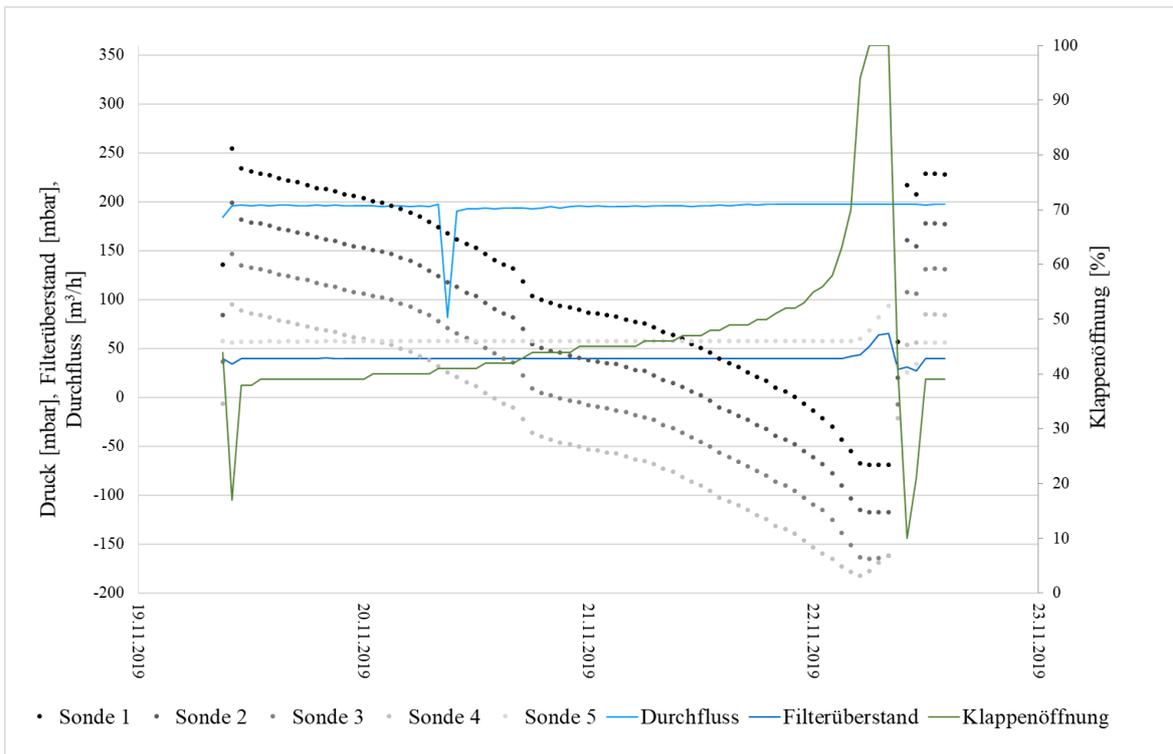


Abbildung 116: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 19.11 - 22.11 (BO-Sonden)

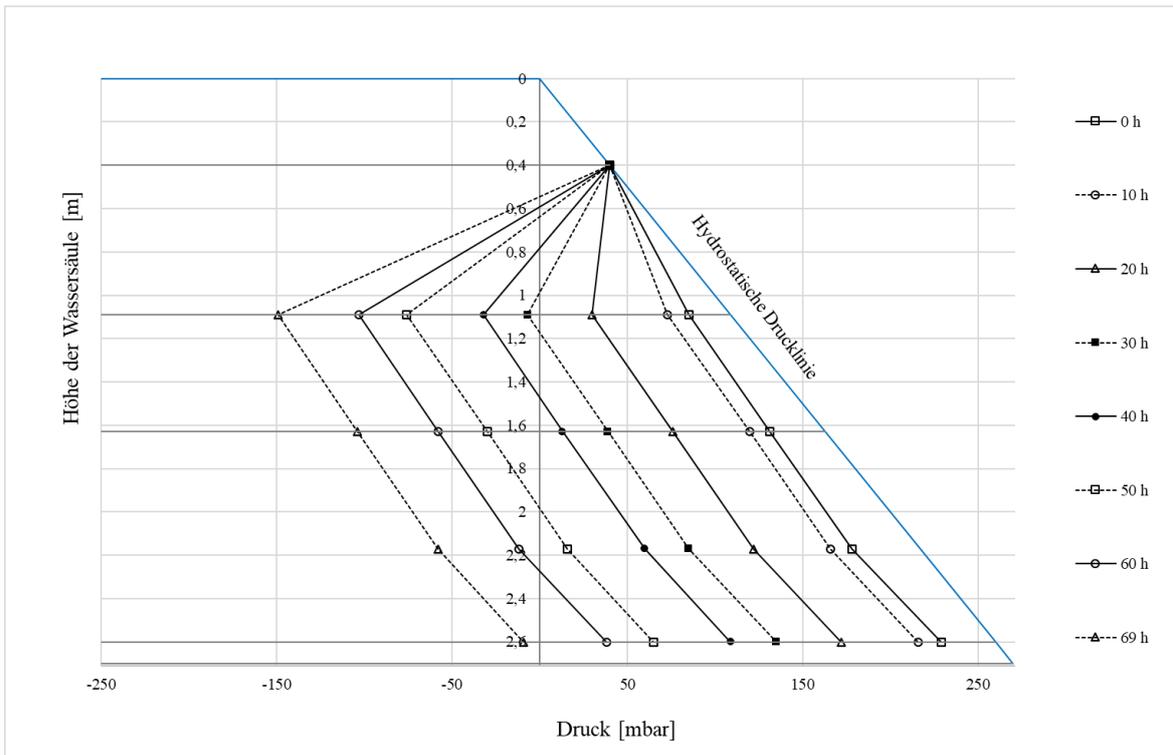


Abbildung 117: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 25.11 (BO-Sonden)

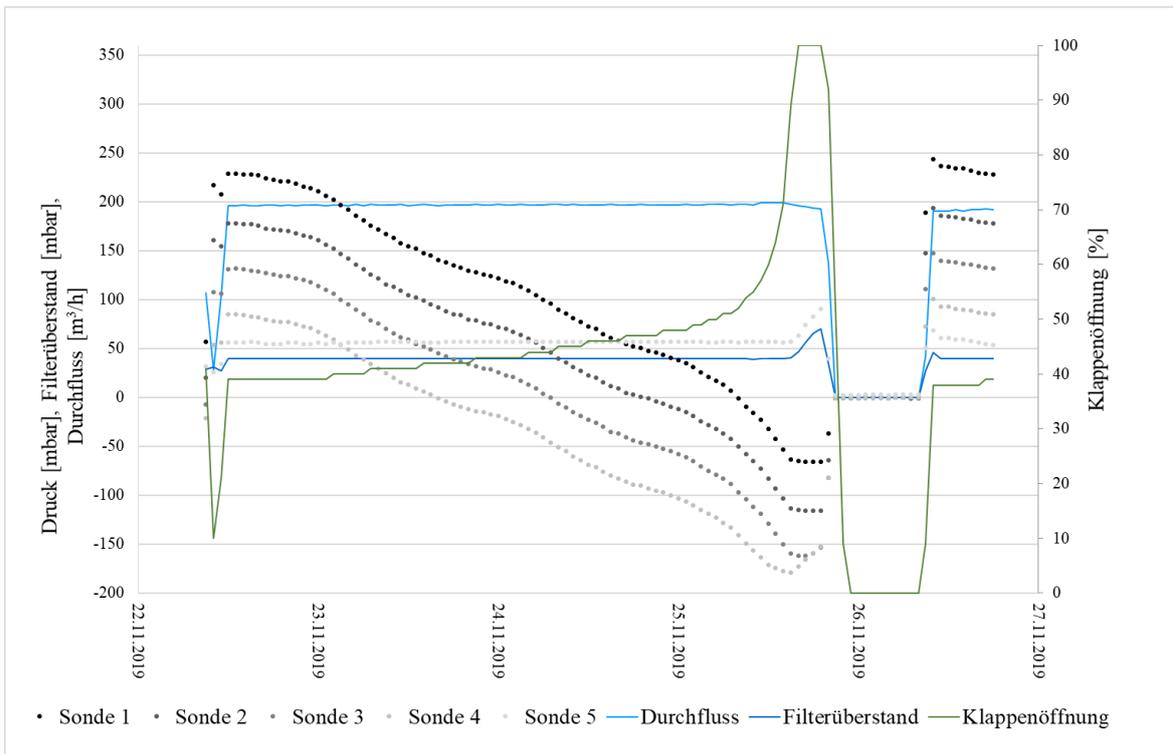


Abbildung 118: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.11 - 26.11 (BO-Sonden)

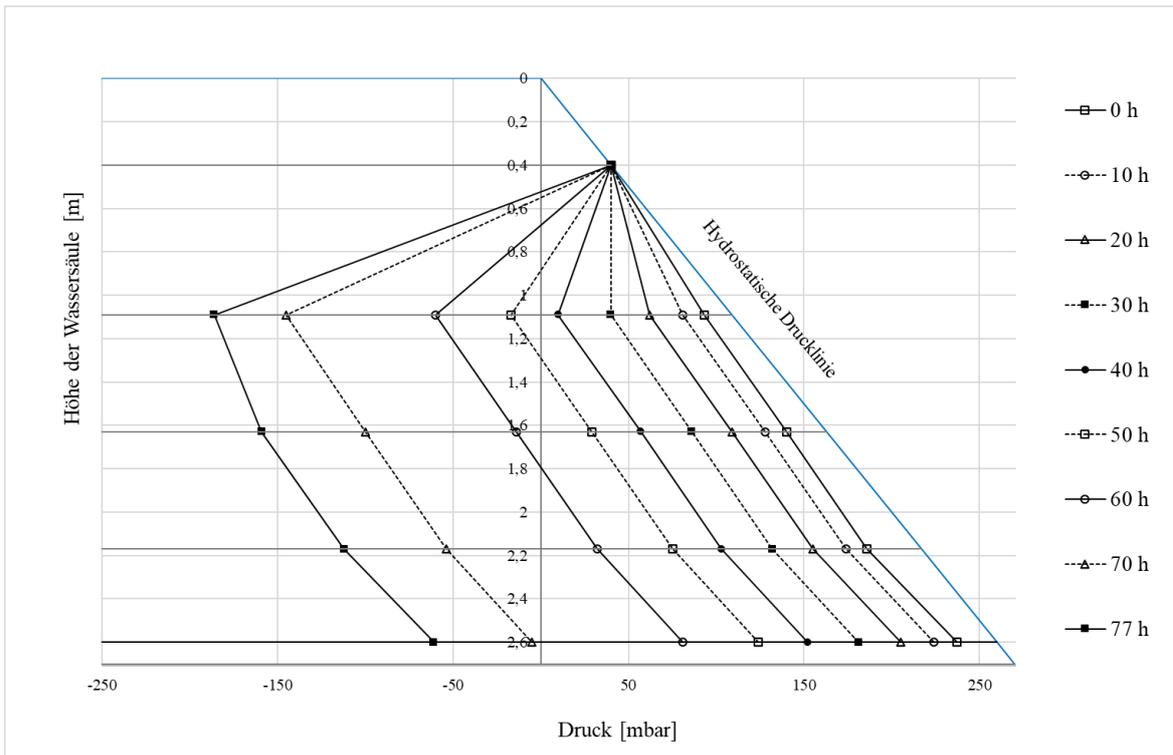


Abbildung 119: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 29.11 (BO-Sonden)

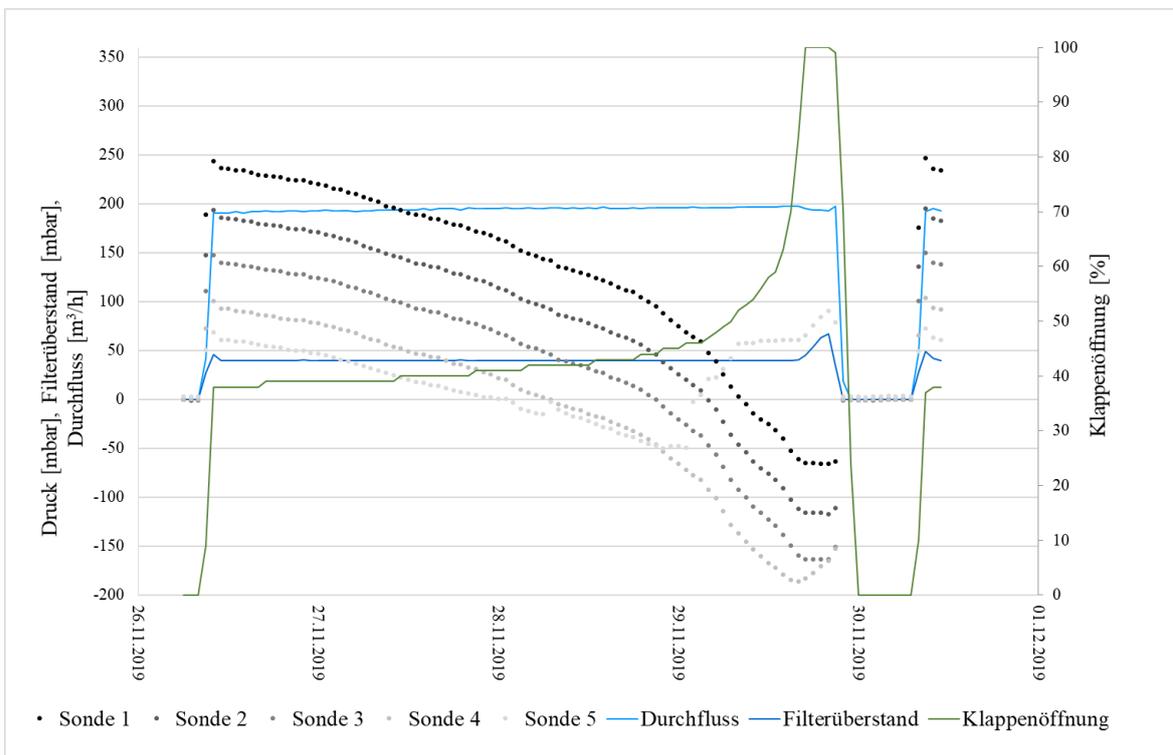


Abbildung 120: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 26.11 - 30.11 (BO-Sonden)

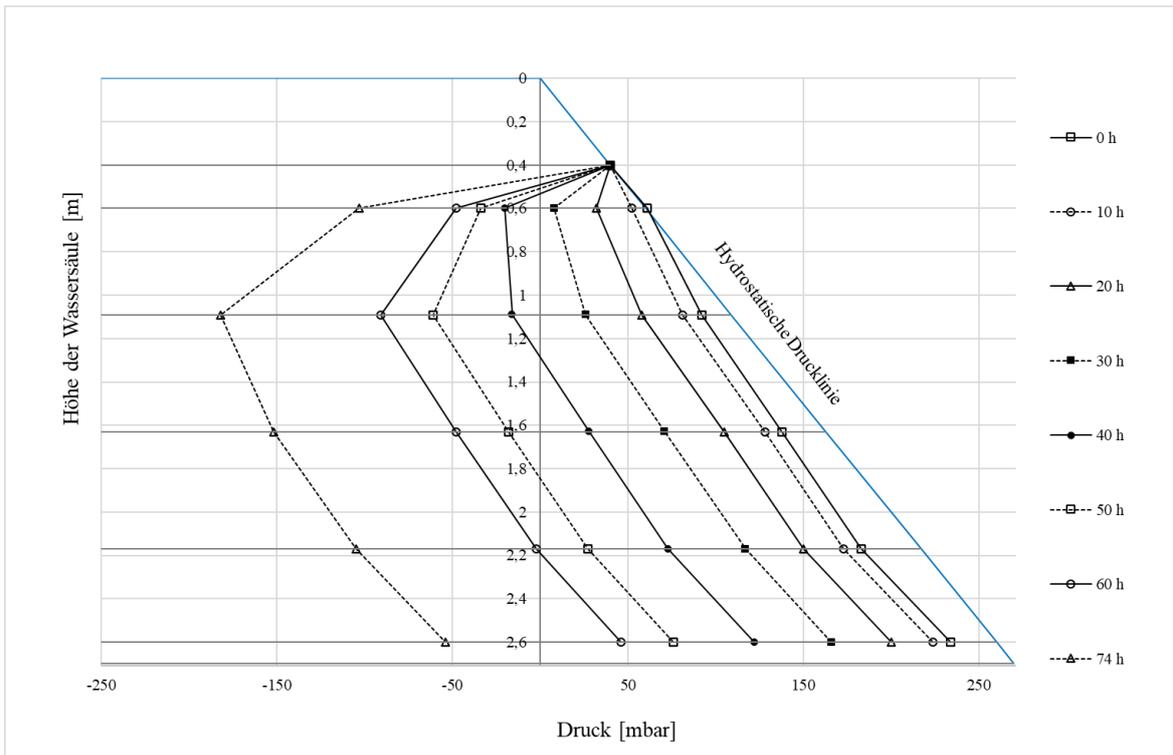


Abbildung 121: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausens vom 30.11 - 03.12 (BO-Sonden)

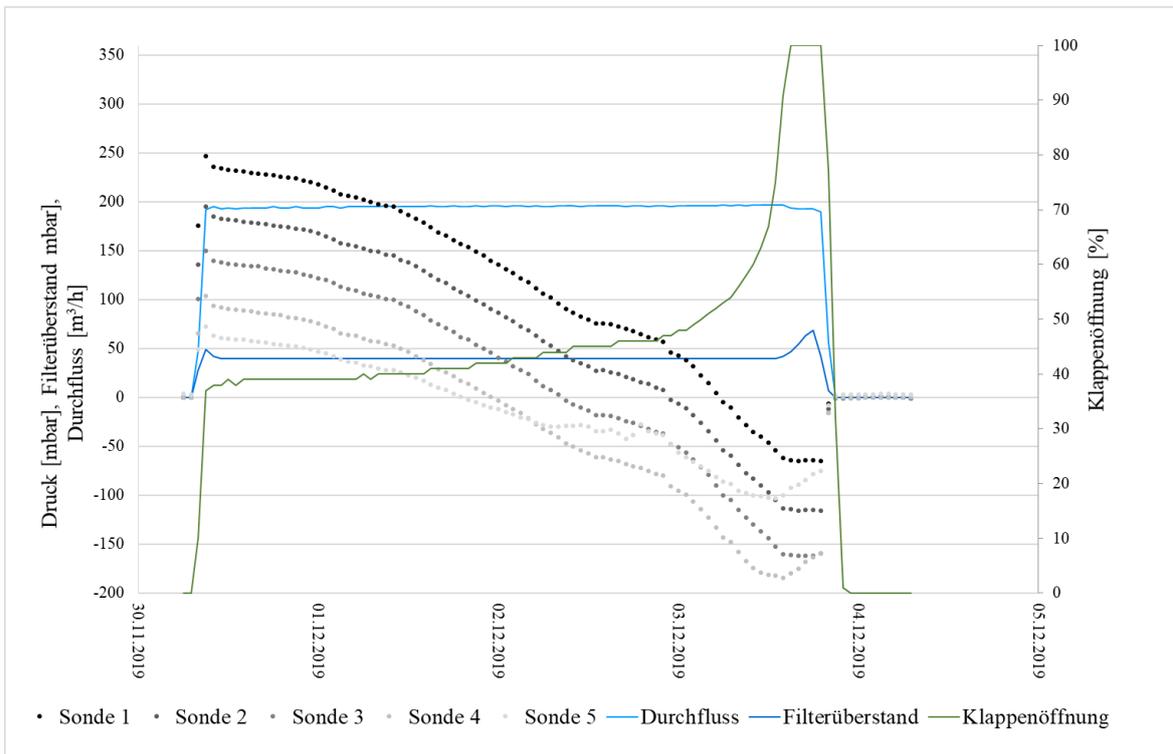


Abbildung 122: Druckdiagramm Bad Oeynhausens vom 30.11 - 04.12 (BO-Sonden)

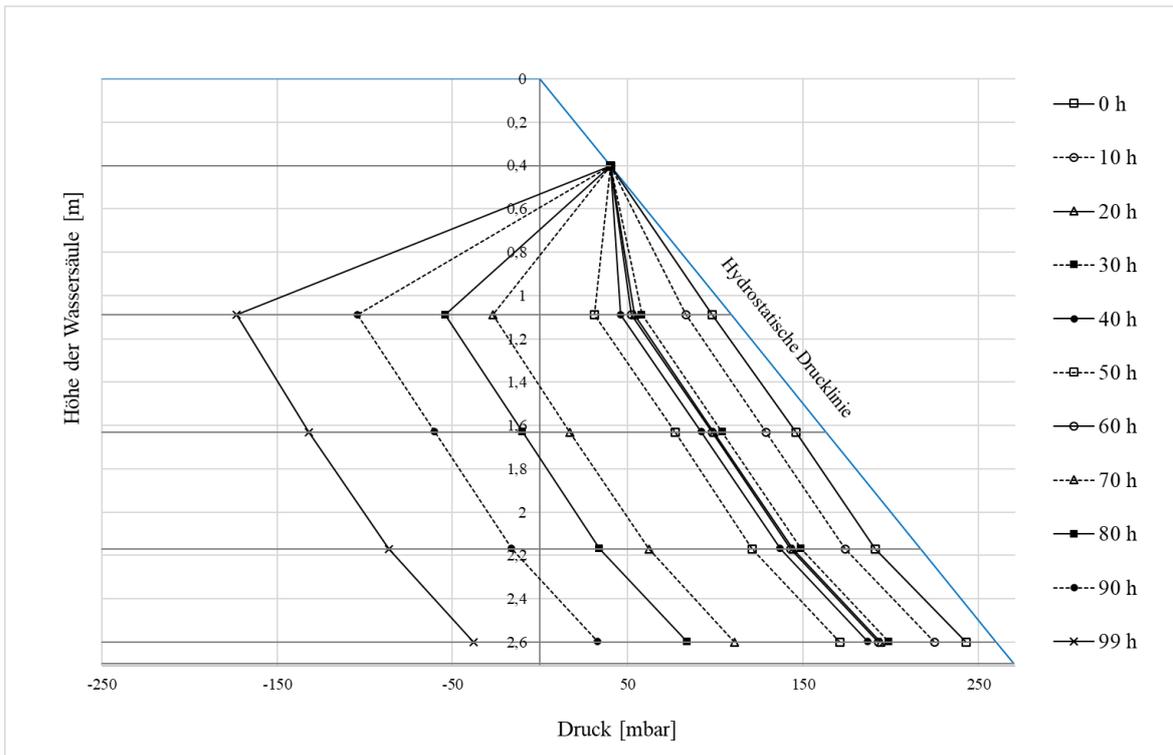


Abbildung 123: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (BO-Sonden)

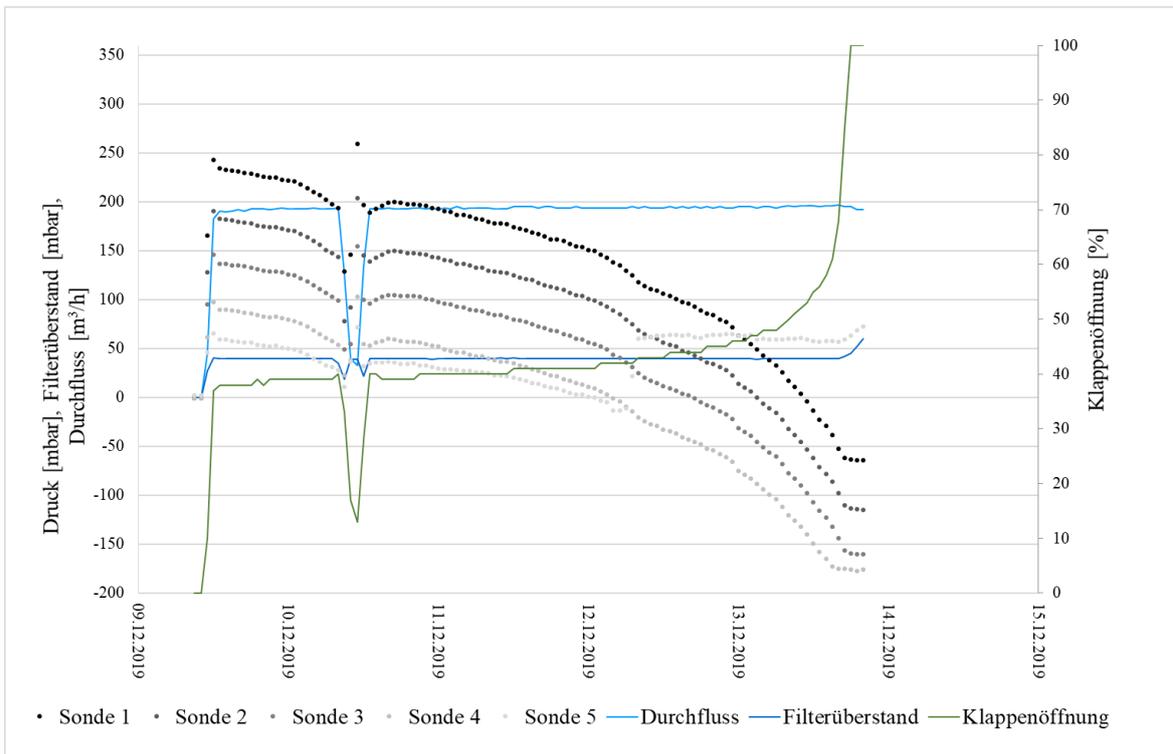


Abbildung 124: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 09.12 - 13.12 (BO-Sonden)

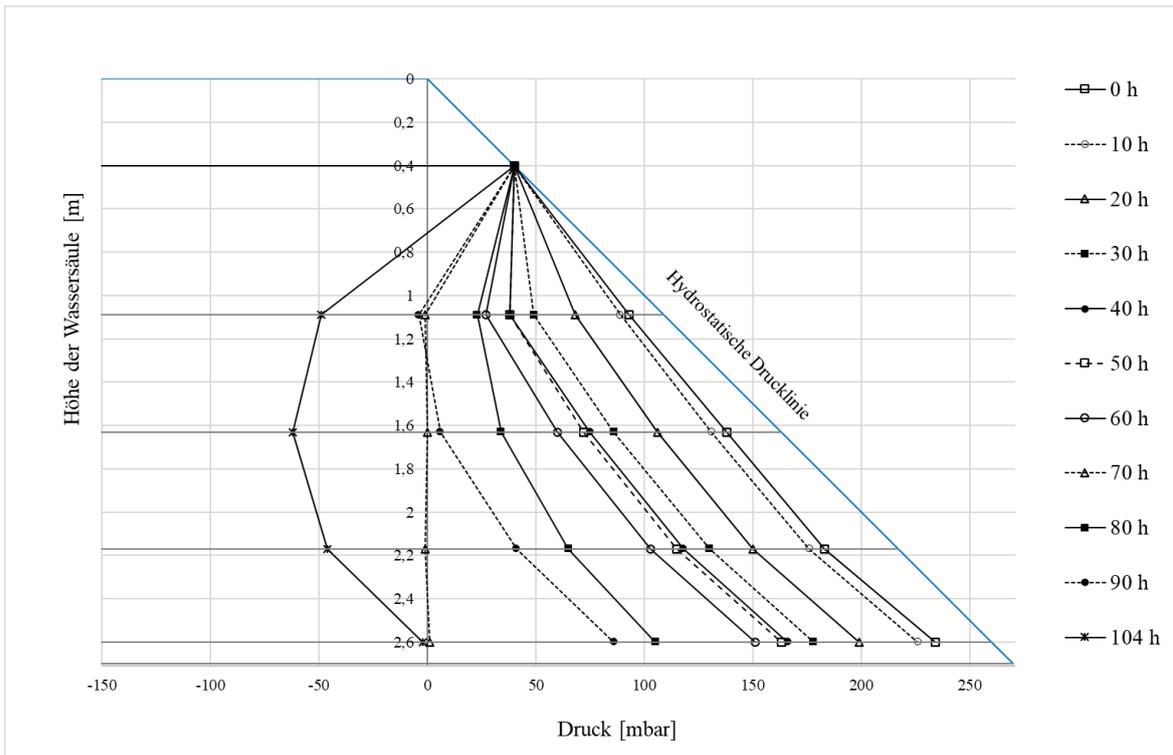


Abbildung 125: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 20.12 (BO-Sonden)

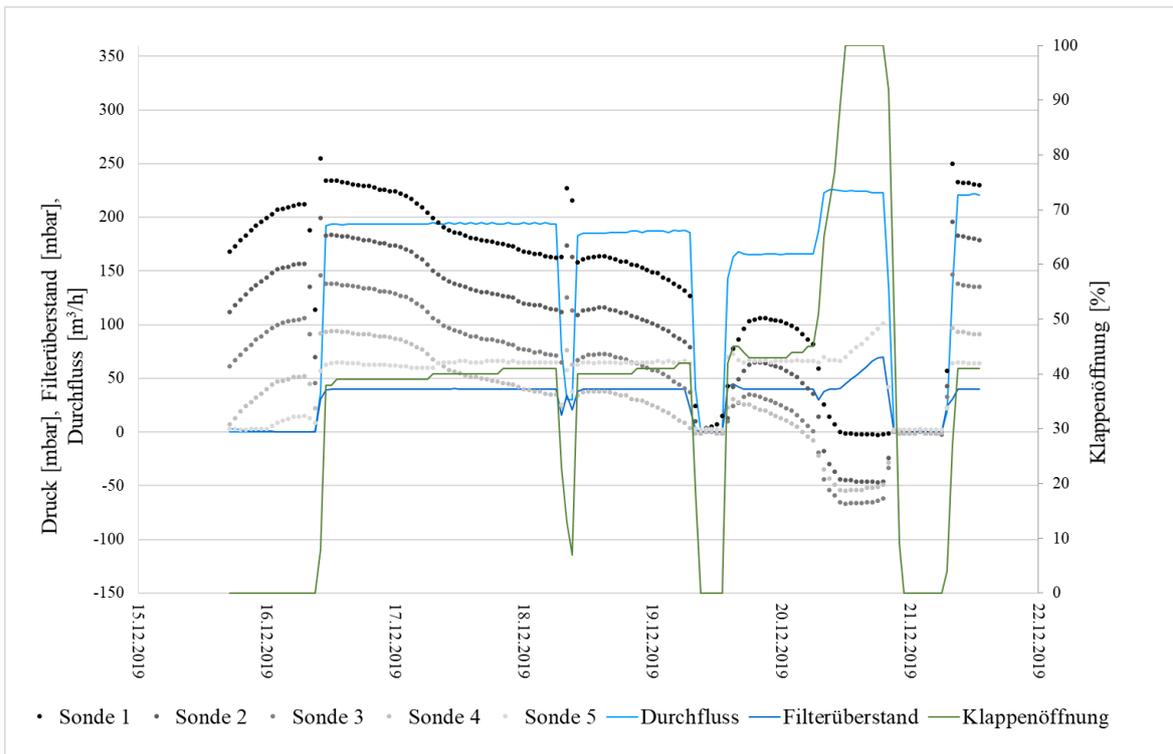


Abbildung 126: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.12 - 21.12 (BO-Sonden)

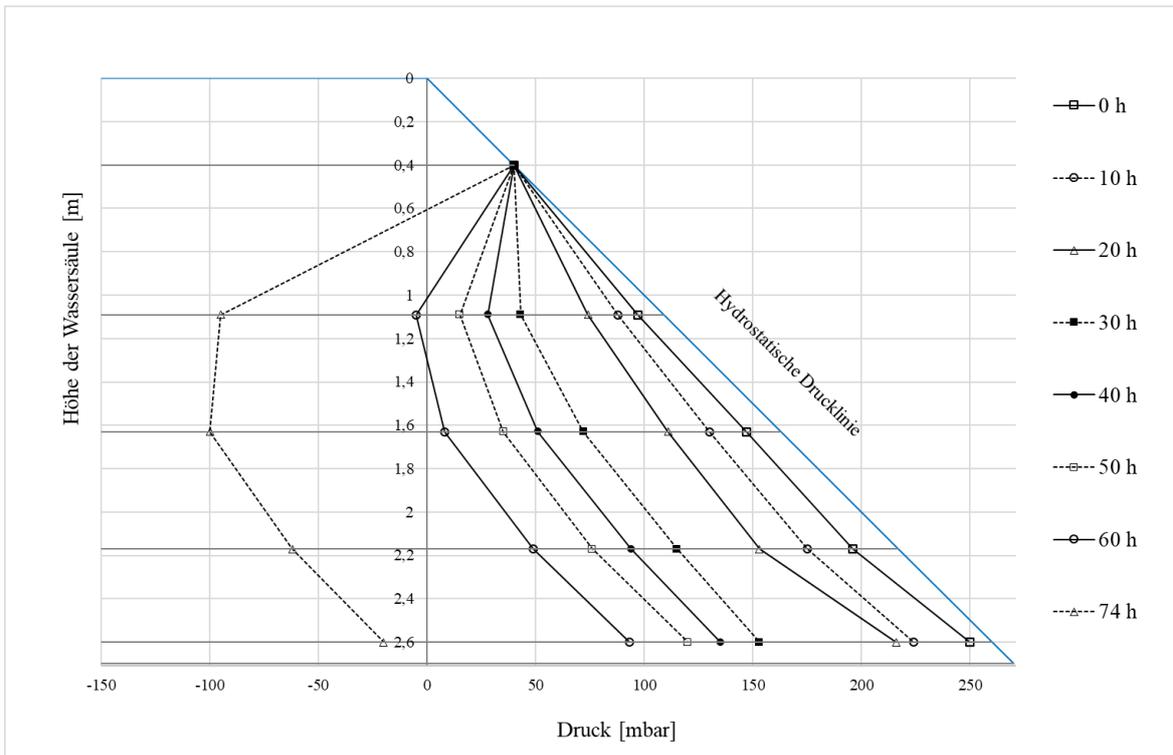


Abbildung 127: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausens vom 21.12 - 24.12 (BO-Sonden)

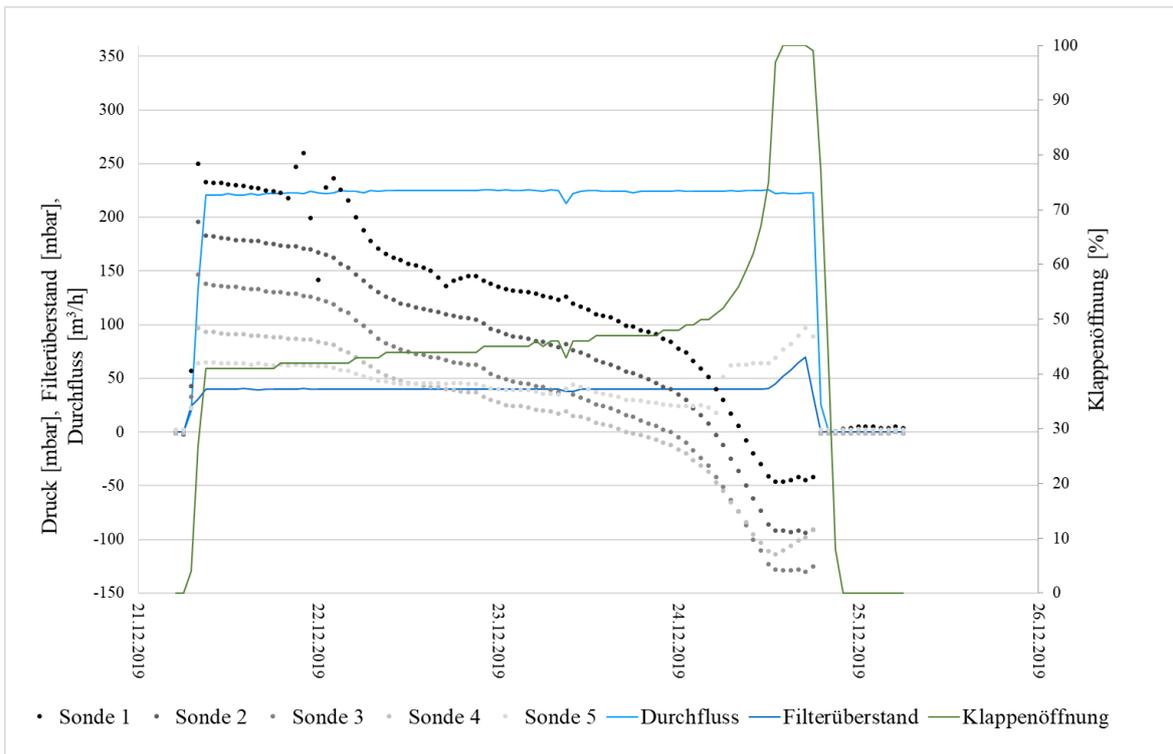


Abbildung 128: Druckdiagramm Bad Oeynhausens vom 21.12 - 25.12 (BO-Sonden)

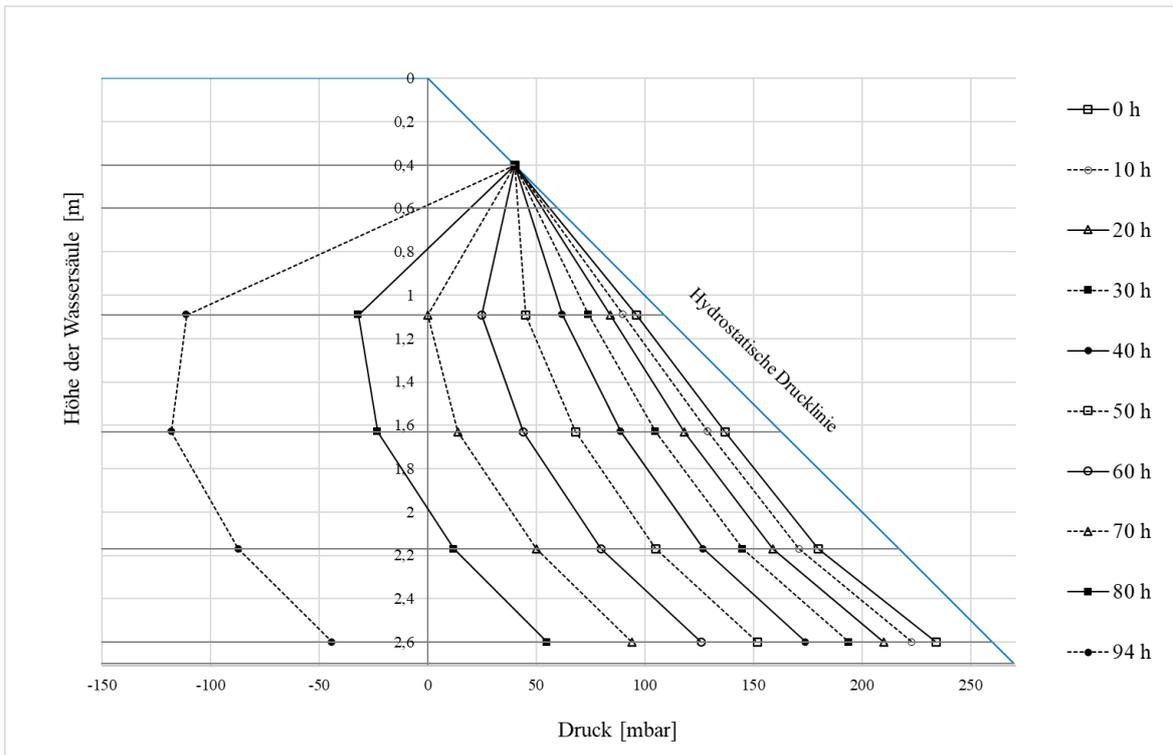


Abbildung 129: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 29.12 (BO-Sonden)

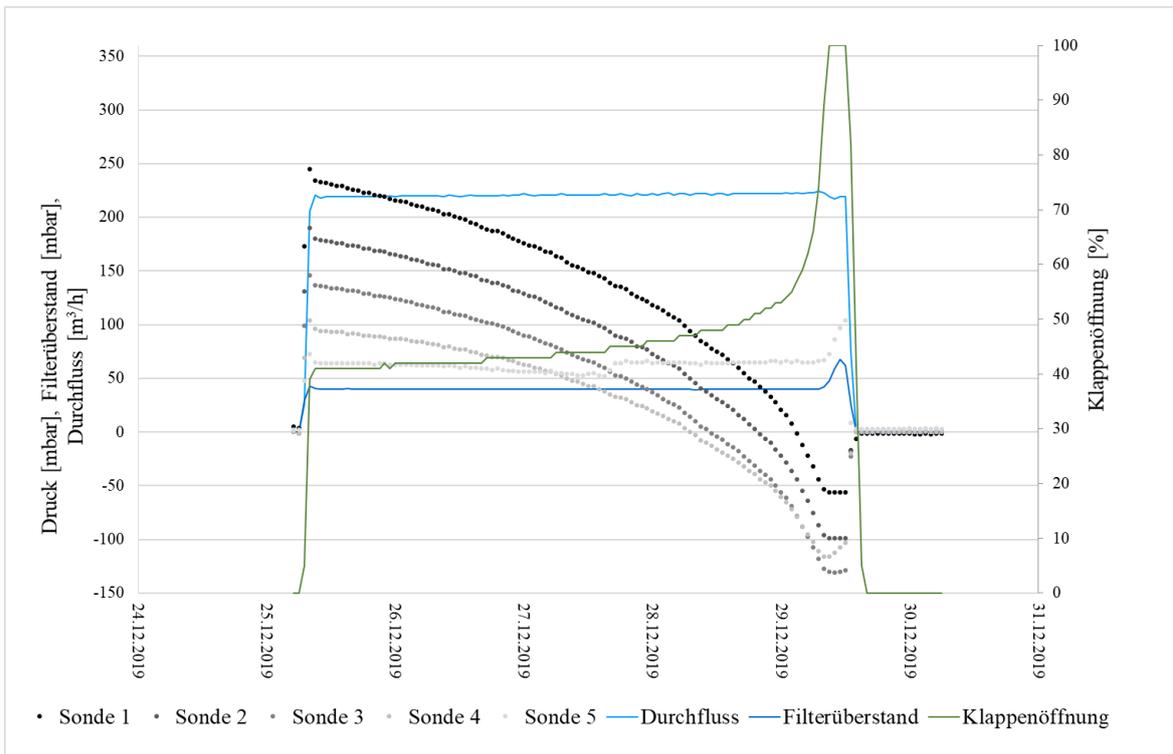


Abbildung 130: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 25.12 - 30.12 (BO-Sonden)

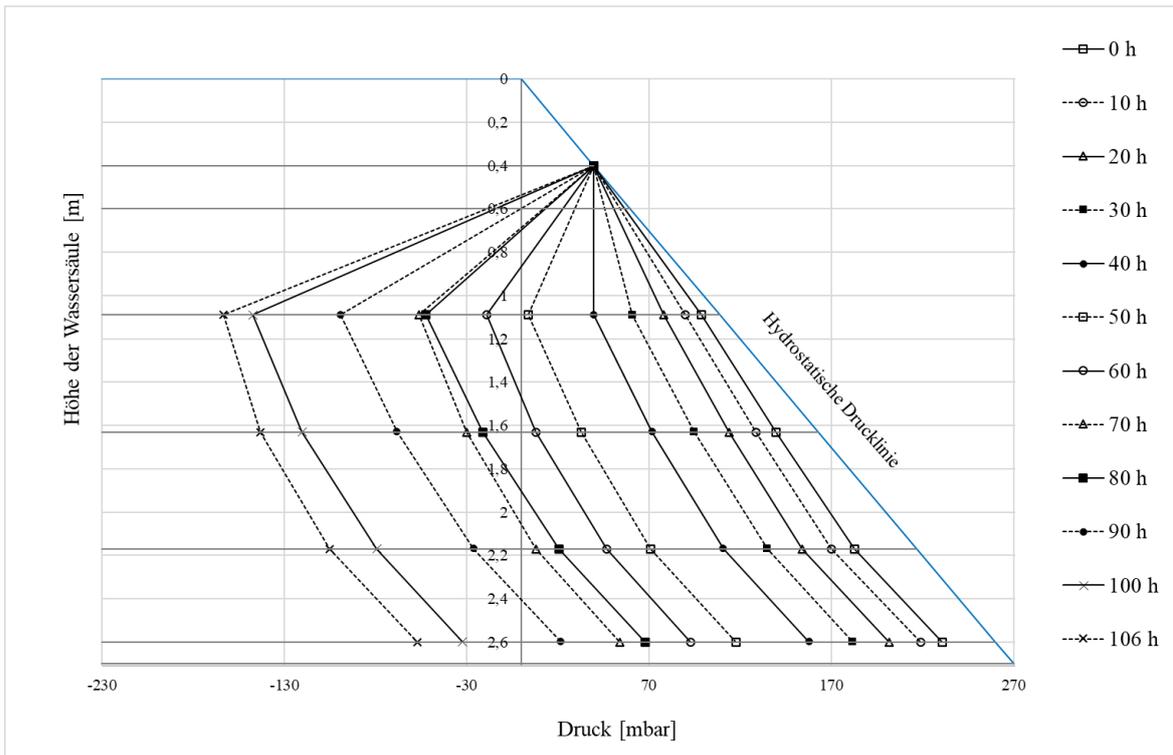


Abbildung 131: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 30.12 - 04.01 (BO-Sonden)

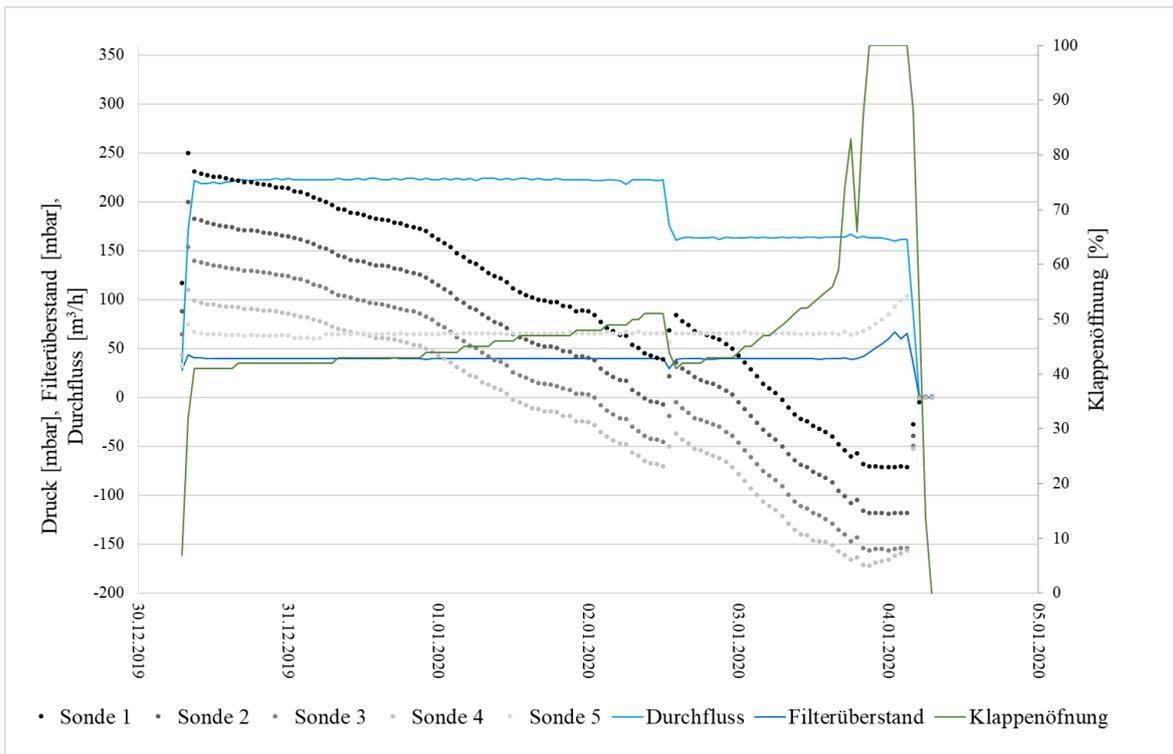


Abbildung 132: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 30.12 - 04.01 (BO-Sonden)

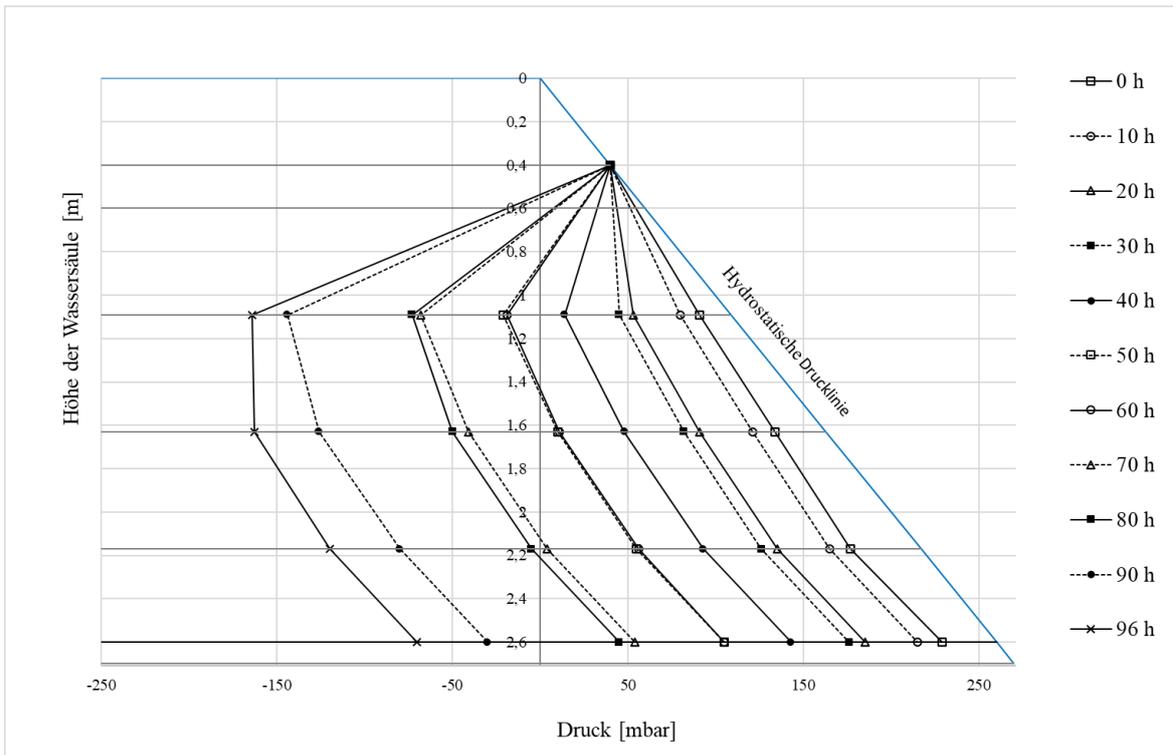


Abbildung 133: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.01 - 10.01 (BO-Sonden)

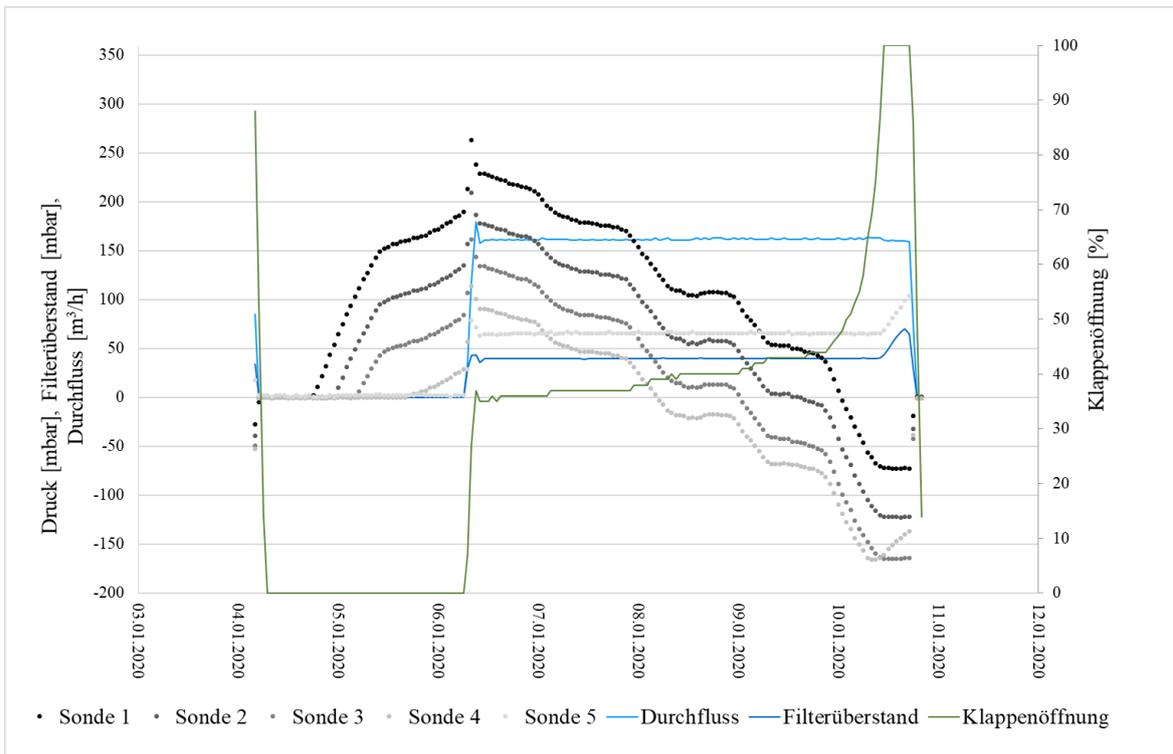
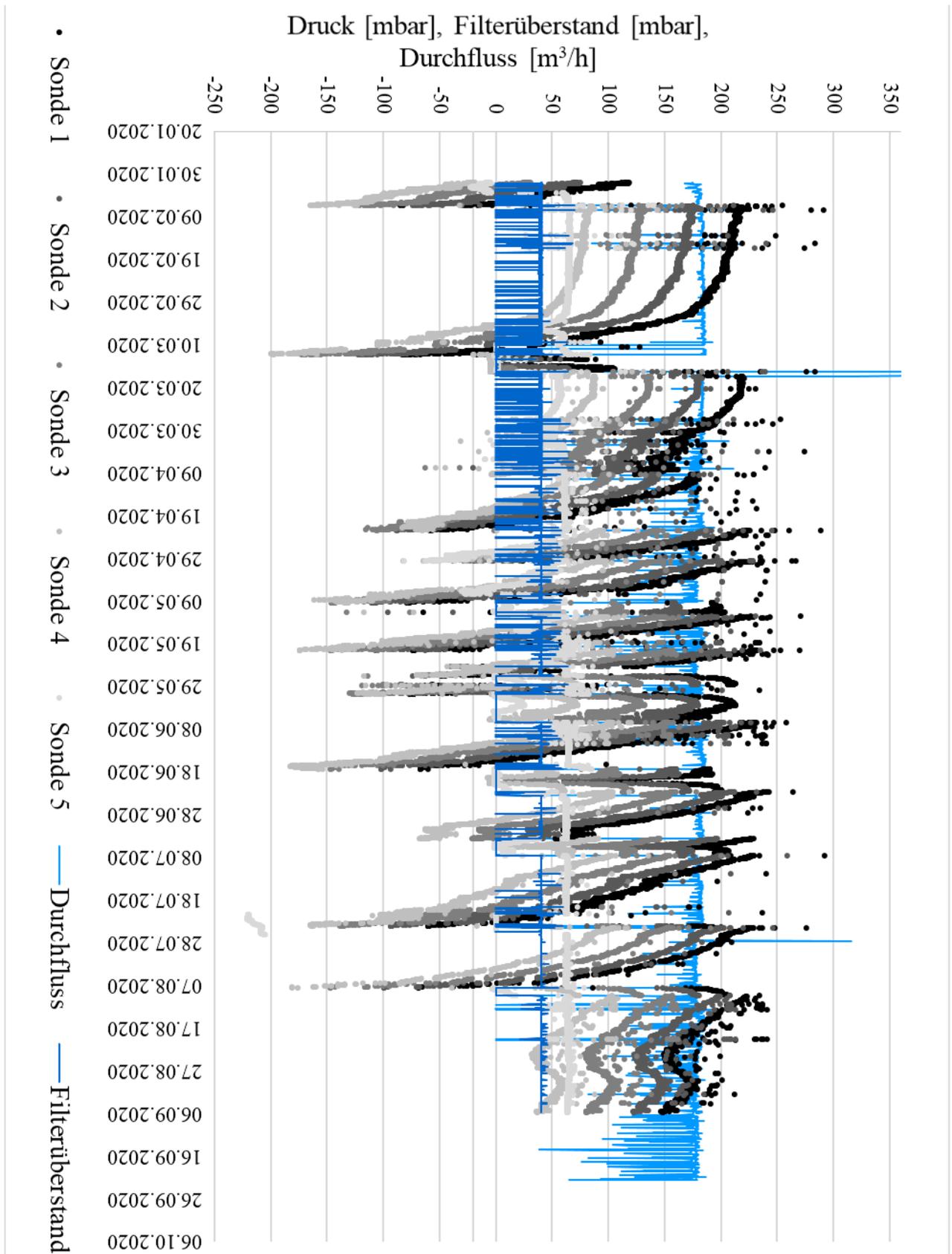


Abbildung 134: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 04.01 - 10.01 (BO-Sonden)

## Anhang B.2: Druckdaten KA Bad Oeynhausen – Ablauf FloFi



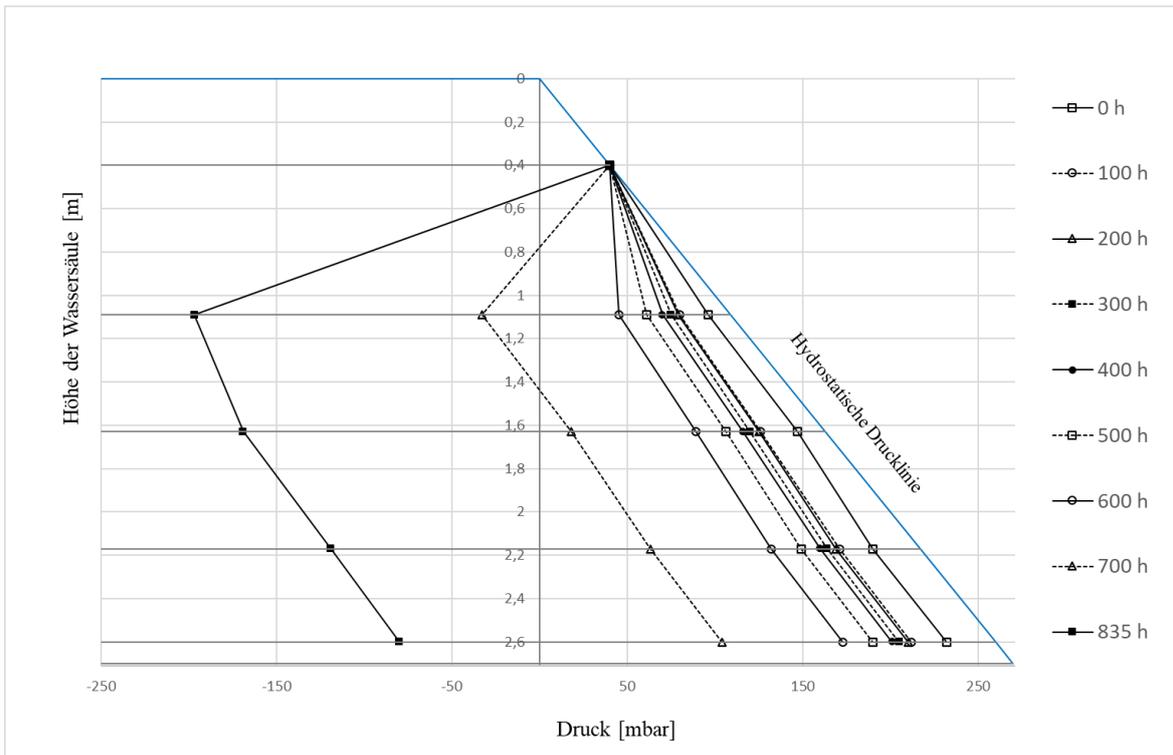


Abbildung 135: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 06.02 - 12.03 (BO-Sonden)

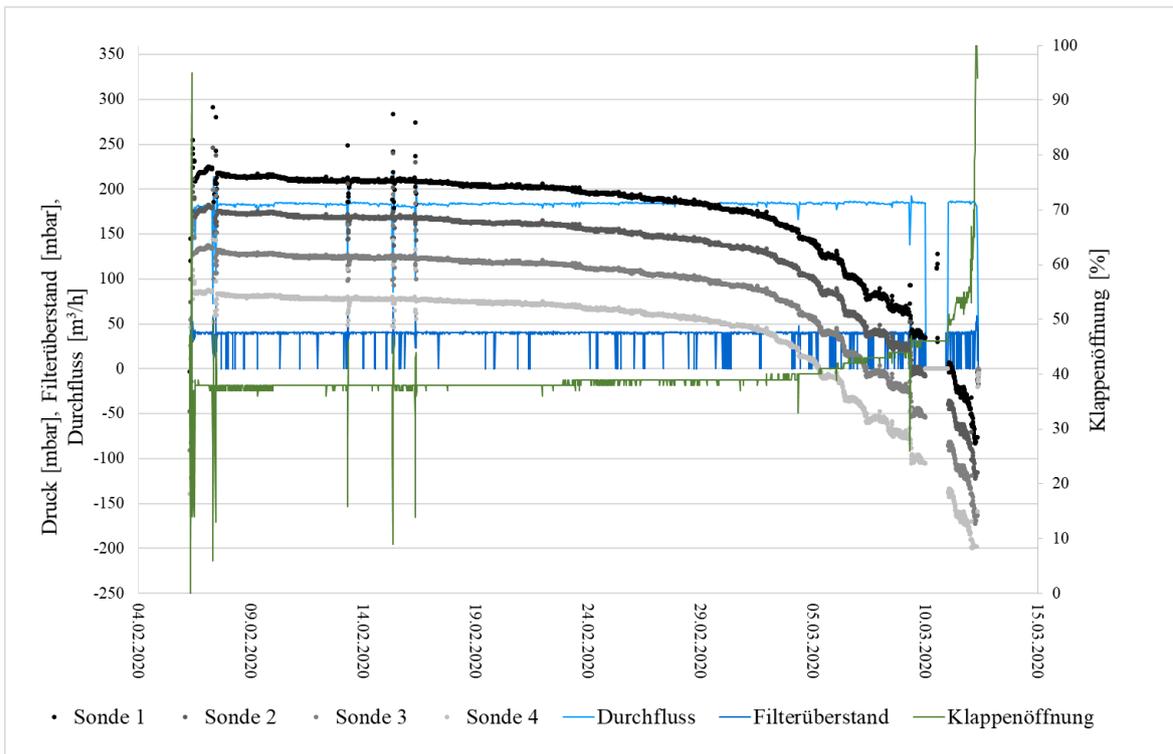


Abbildung 136: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 06.02 - 12.03 (BO-Sonden)

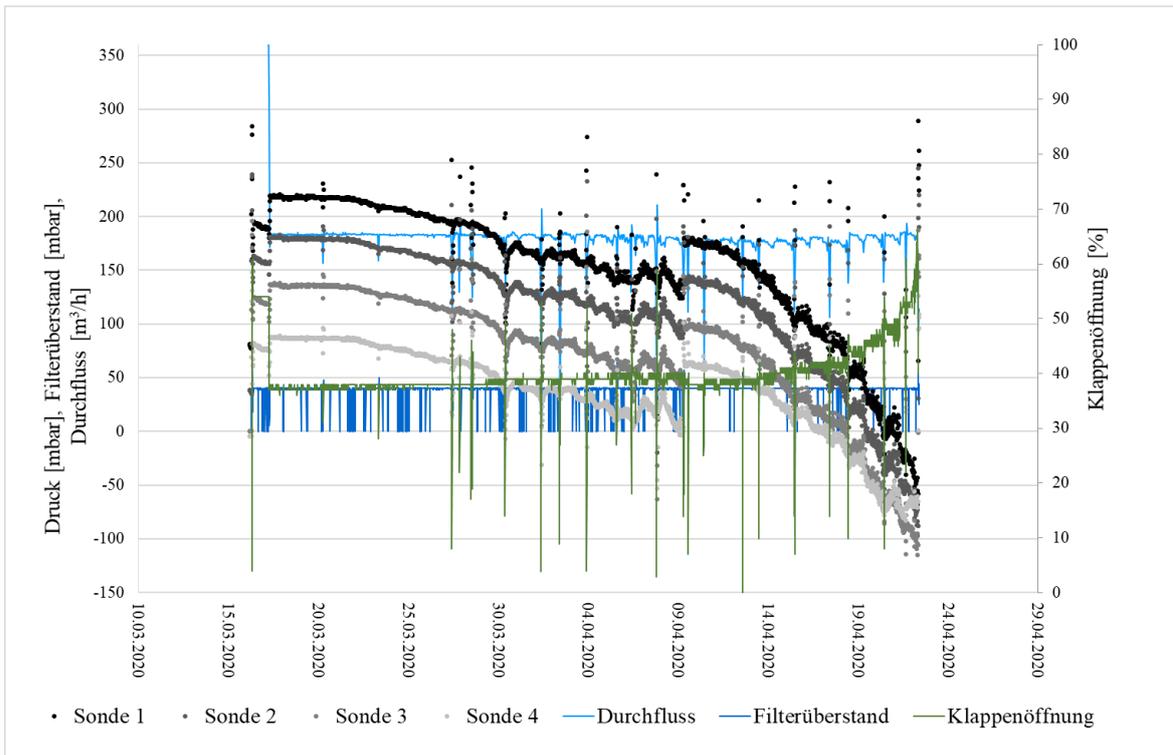


Abbildung 137: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 16.03 - 22.04 (BO-Sonden)

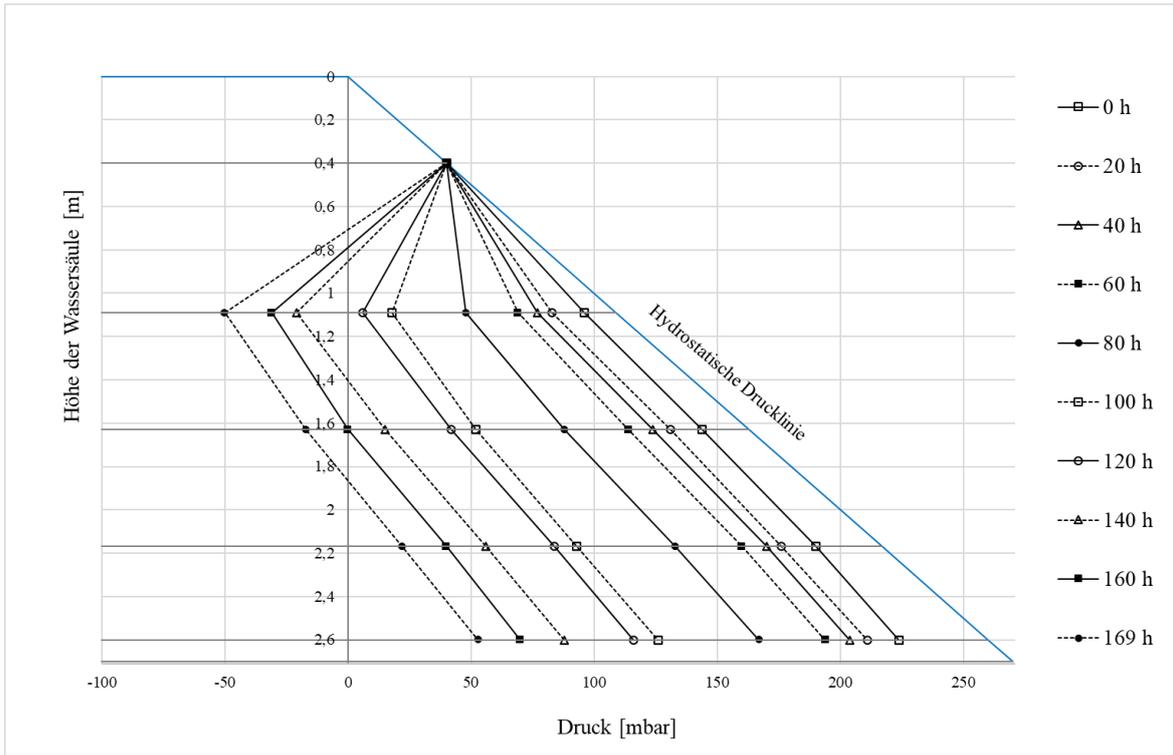


Abbildung 138: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 22.04 - 29.04 (BO-Sonden)

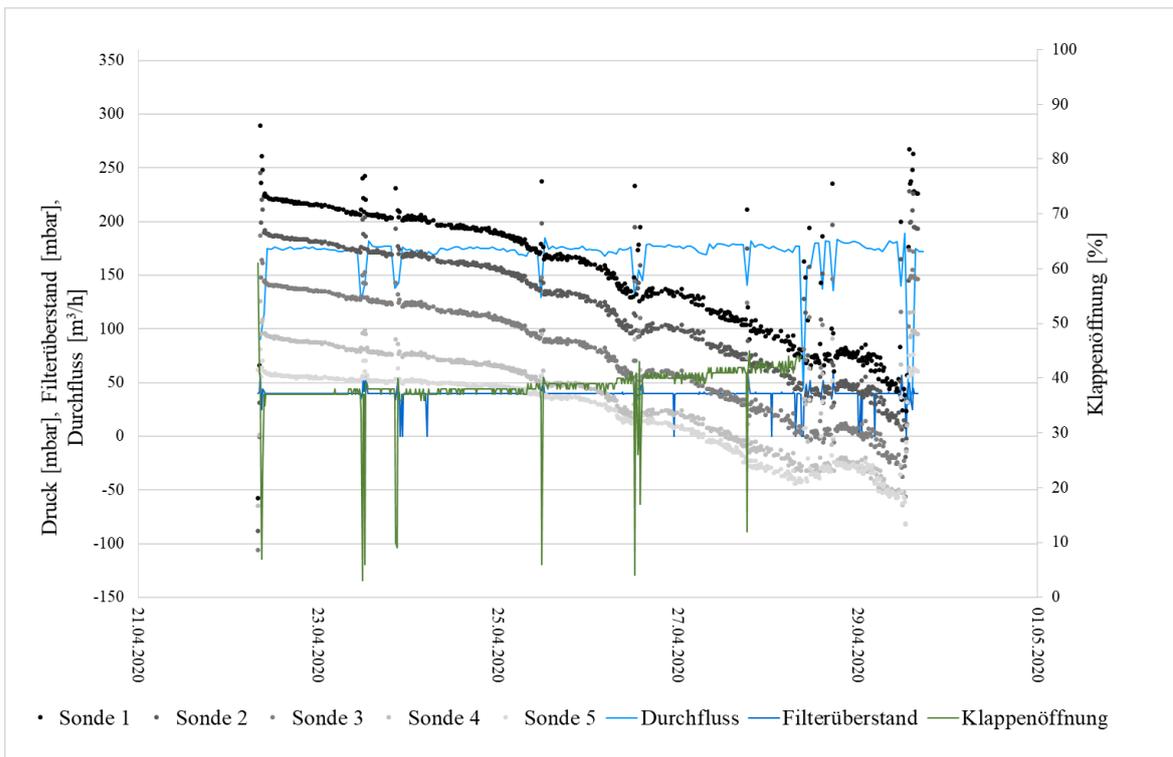


Abbildung 139: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 22.04 - 29.04 (BO-Sonden)

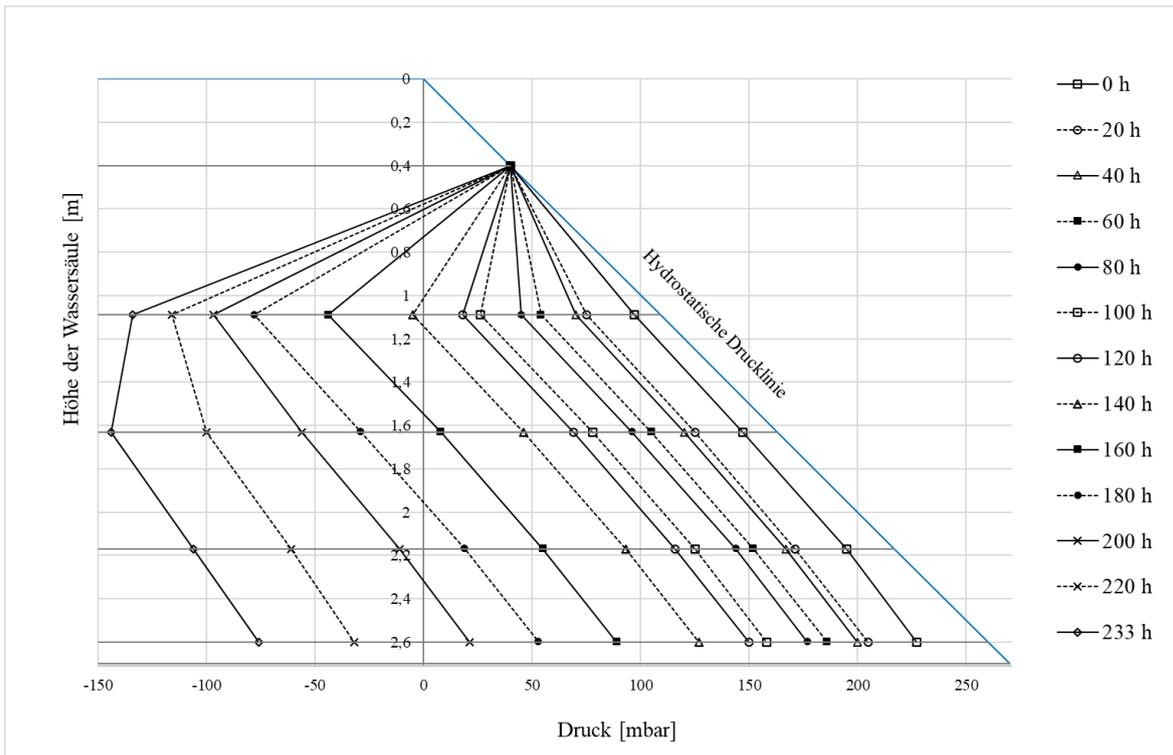


Abbildung 140: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 29.04 - 09.05 (BO-Sonden)

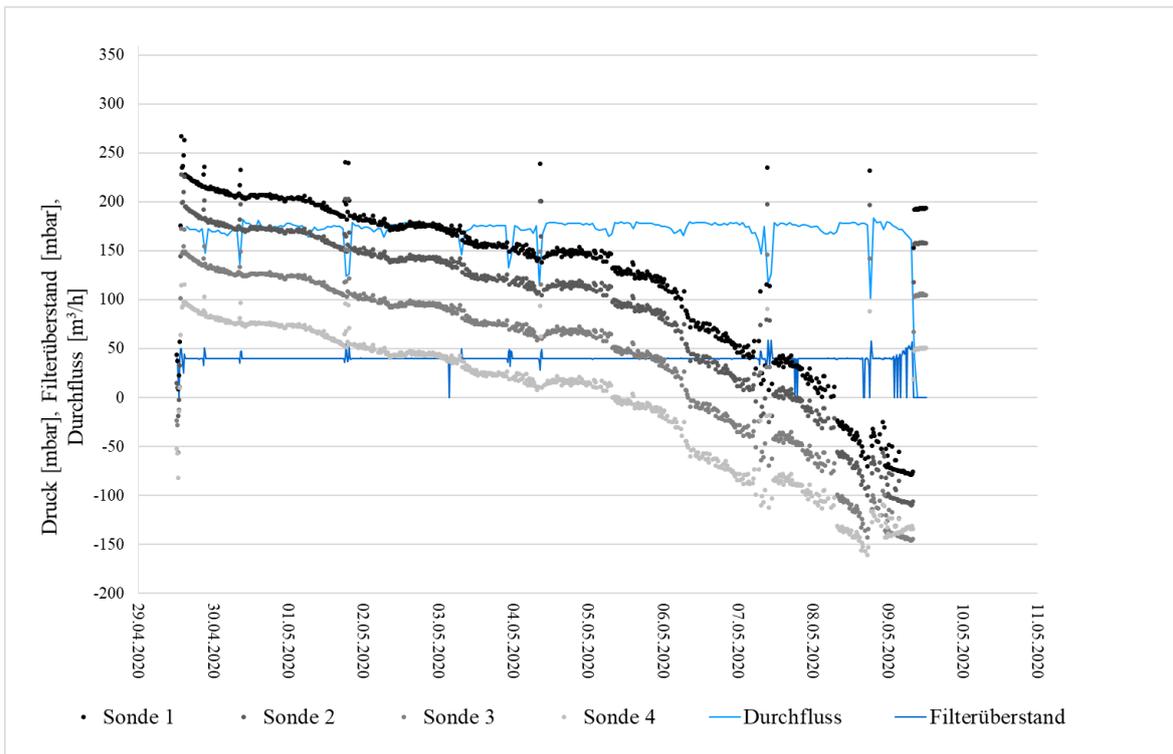


Abbildung 141: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 29.04 - 09.05 (BO-Sonden)

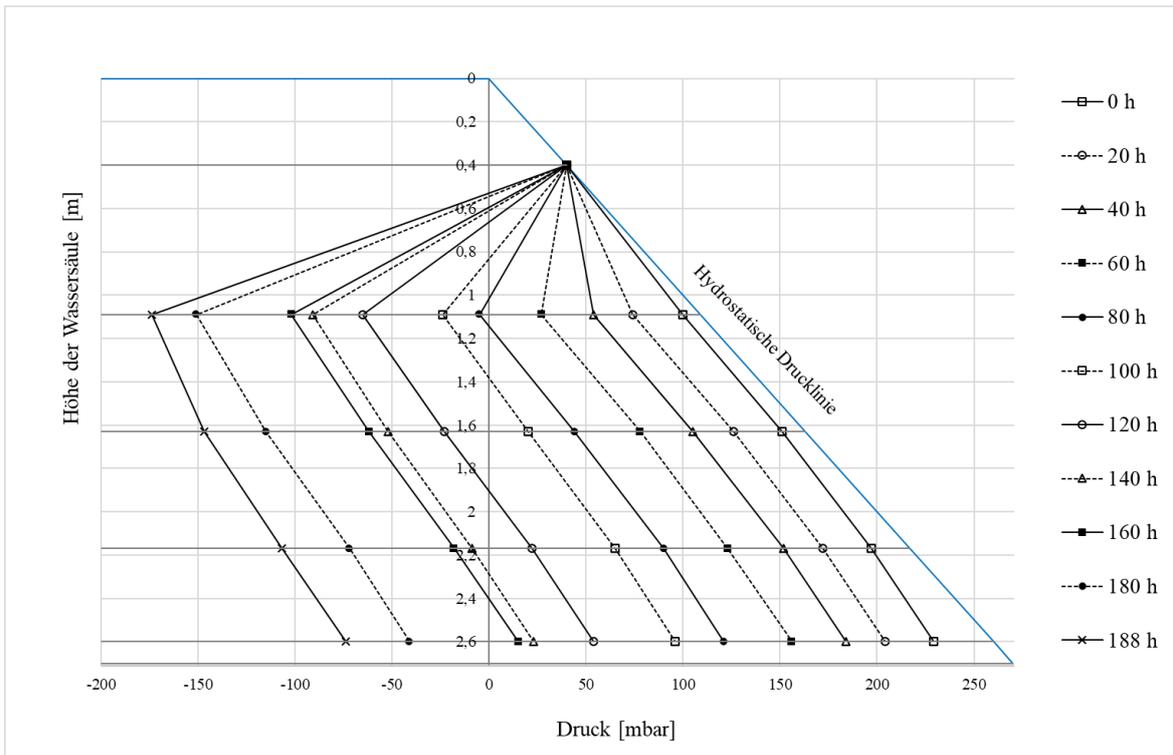


Abbildung 142: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 12.05 - 20.05 (BO-Sonden)

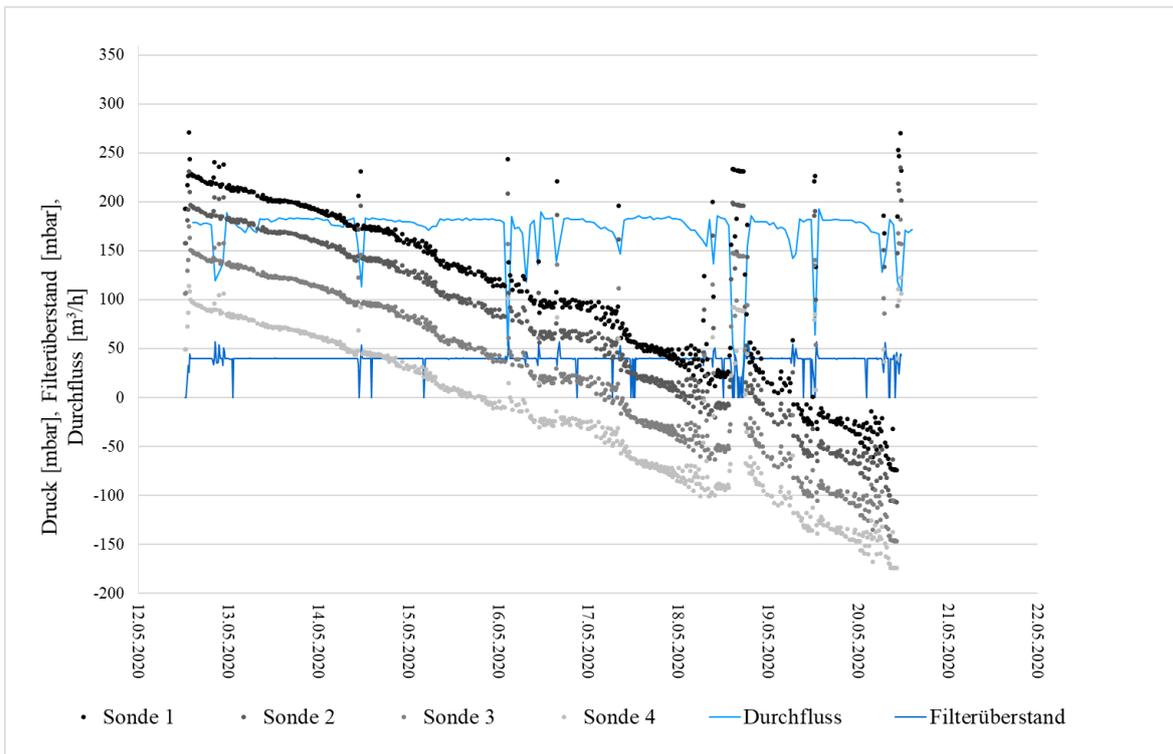


Abbildung 143: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 12.05 - 20.05 (BO-Sonden)

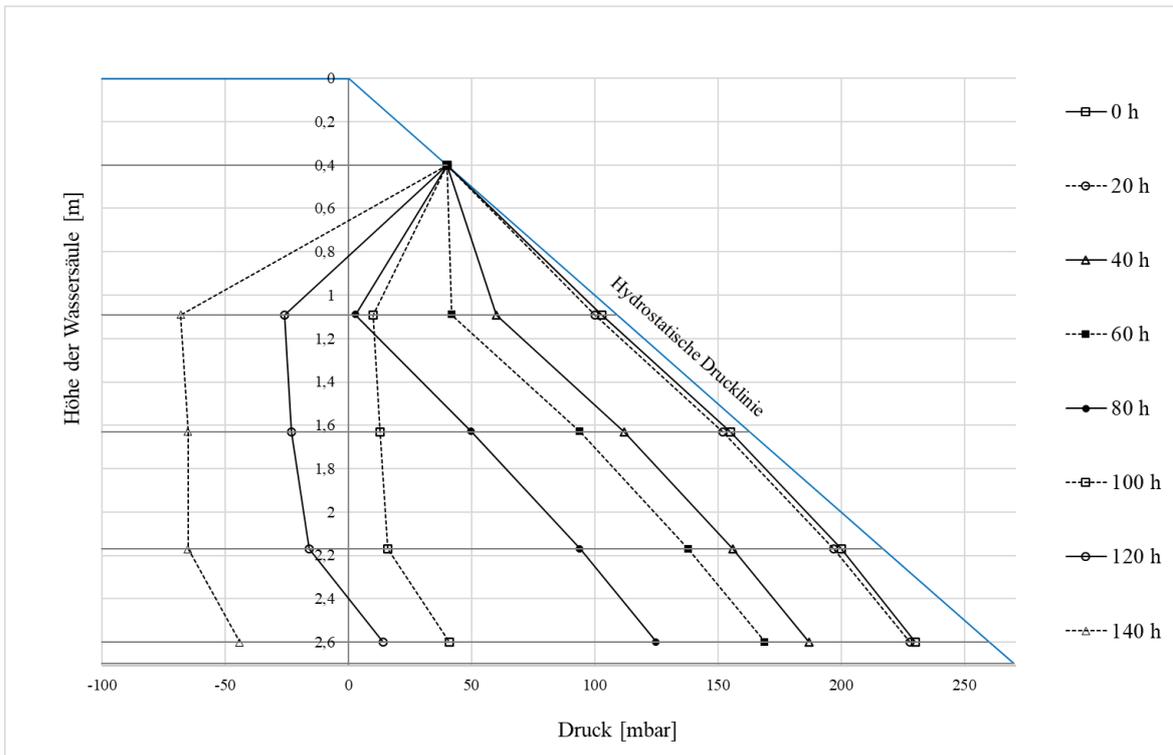


Abbildung 144: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 20.05 - 26.05 (BO-Sonden)

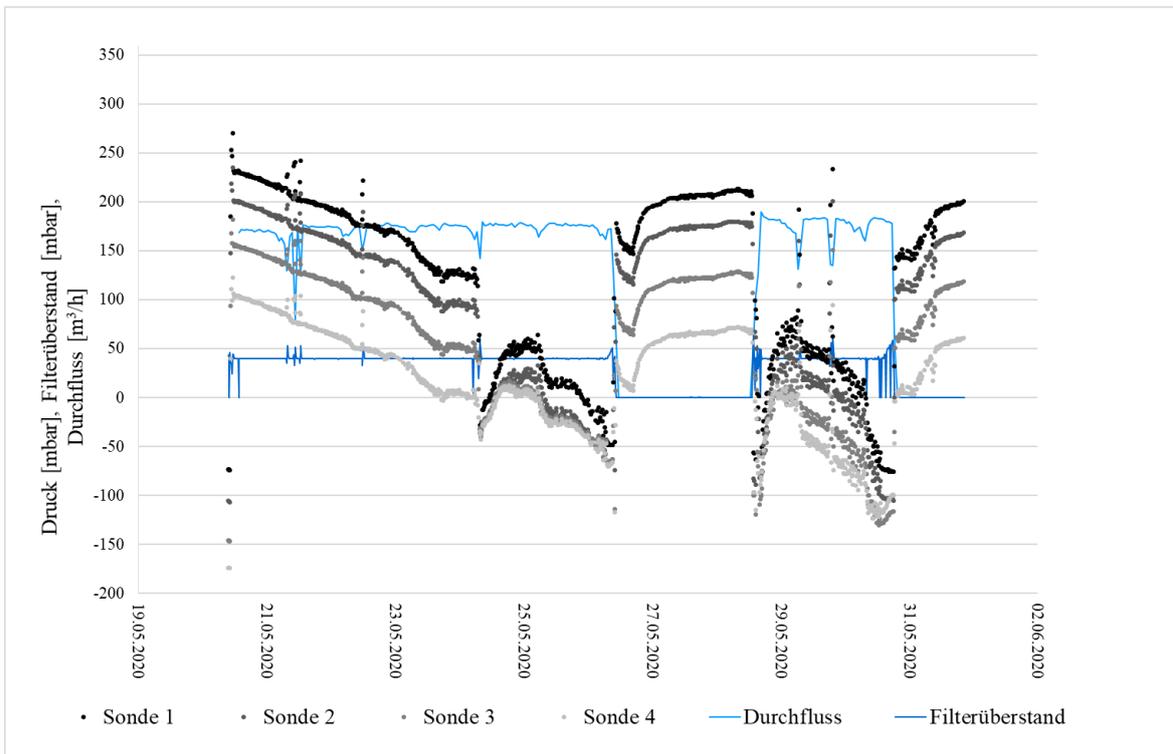


Abbildung 145: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 20.05 - 01.06 (BO-Sonden)

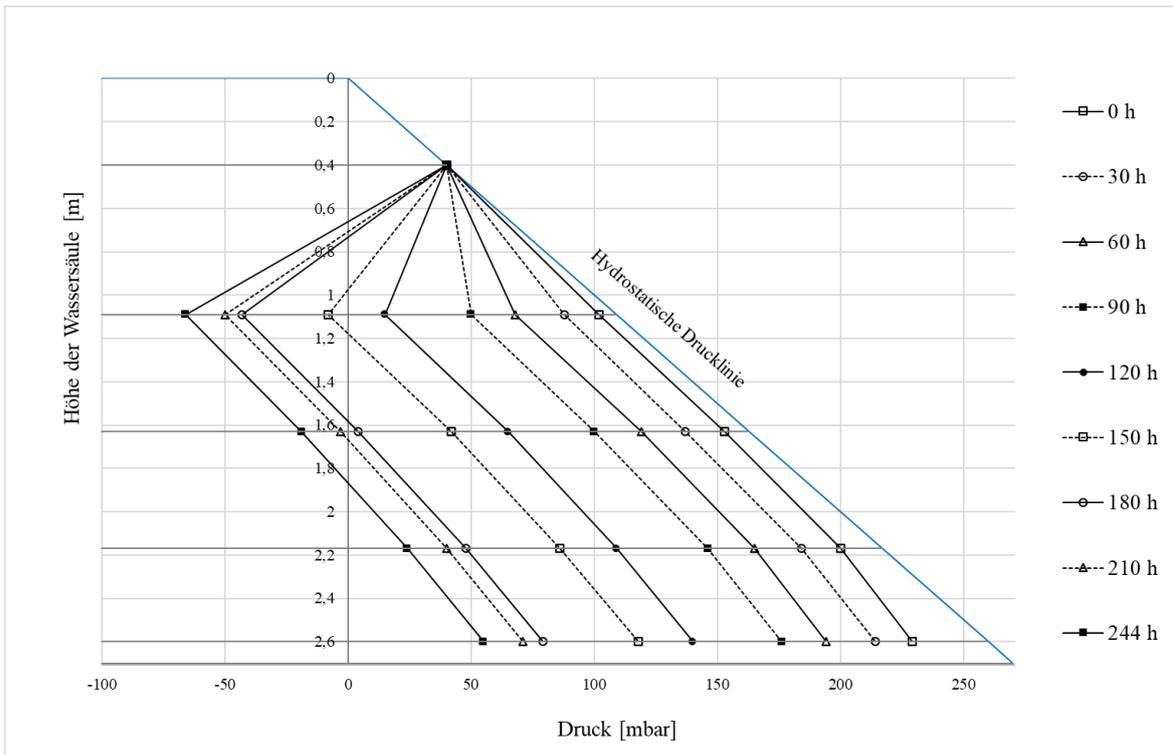


Abbildung 146: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 23.06 - 03.07 (BO-Sonden)

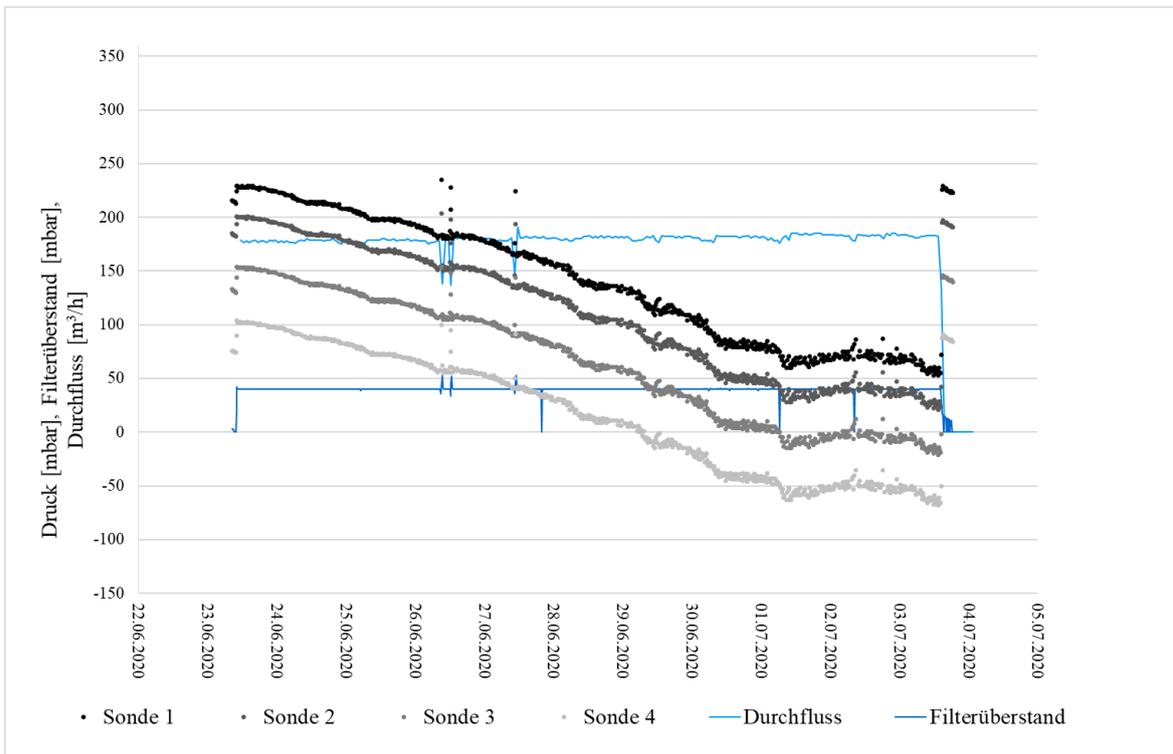


Abbildung 147: Druckdiagramm Bad Oeynhausen 23.06 - 05.07 (BO-Sonden)

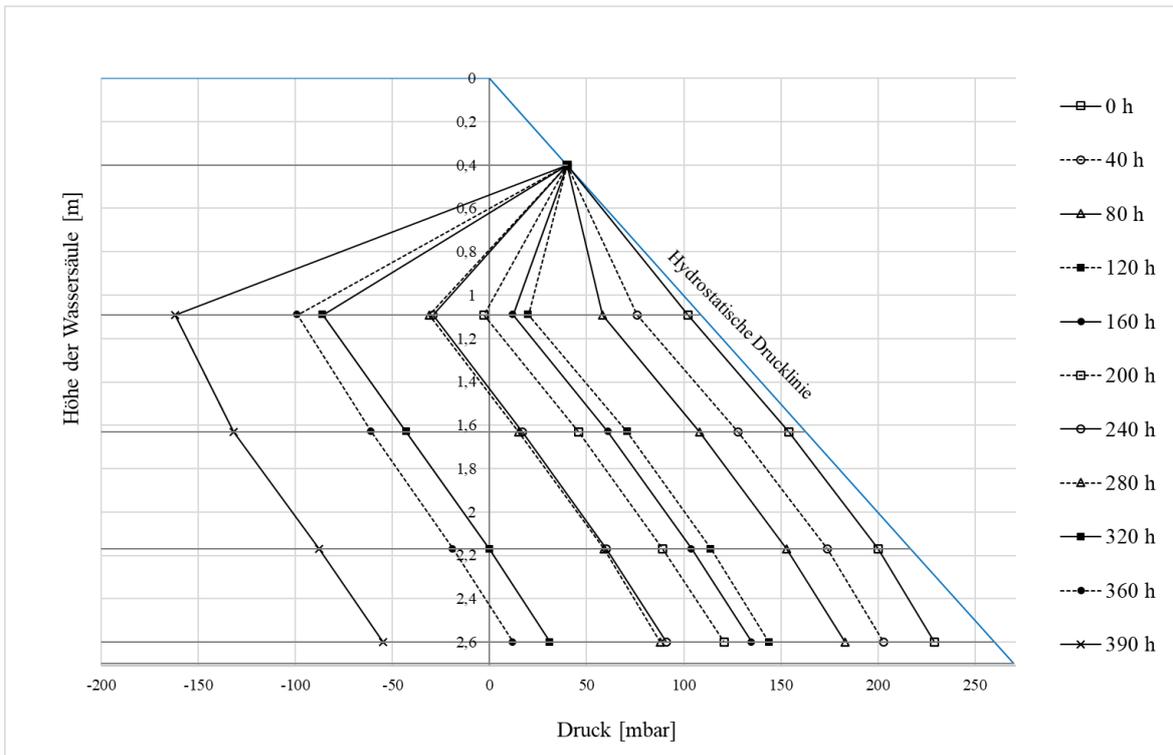


Abbildung 148: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 07.07 - 23.07 (BO-Sonden)

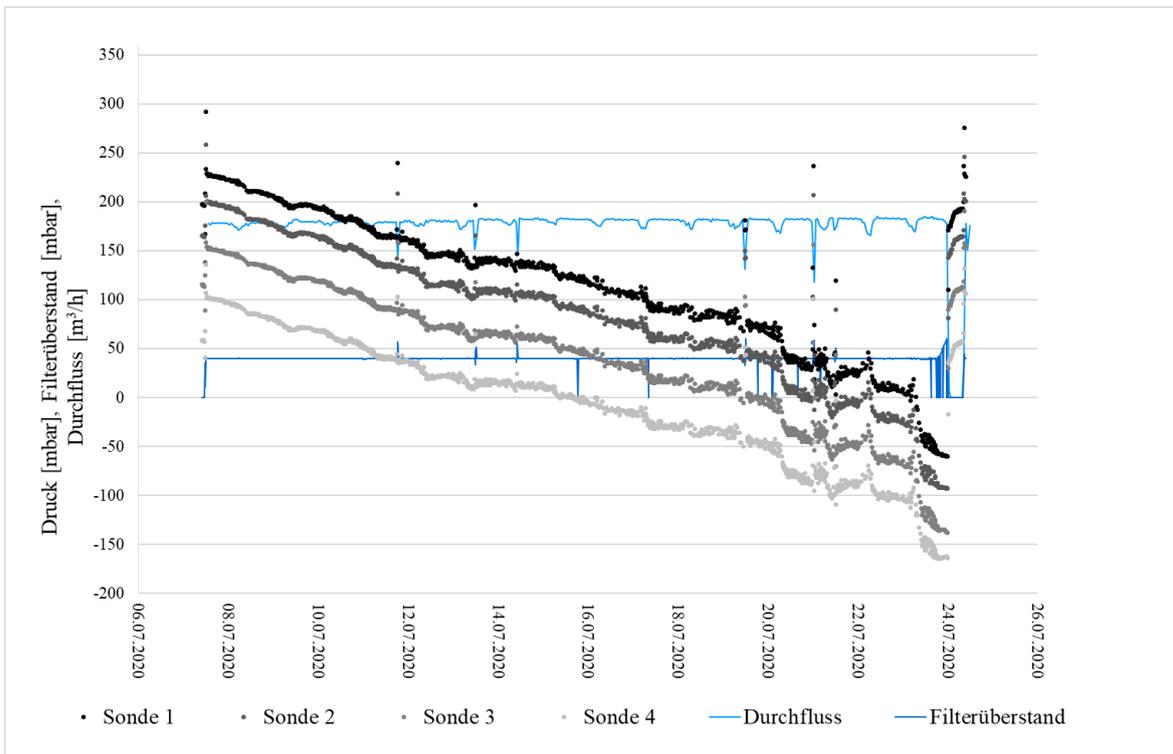


Abbildung 149: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 07.07 - 24.07 (BO-Sonden)

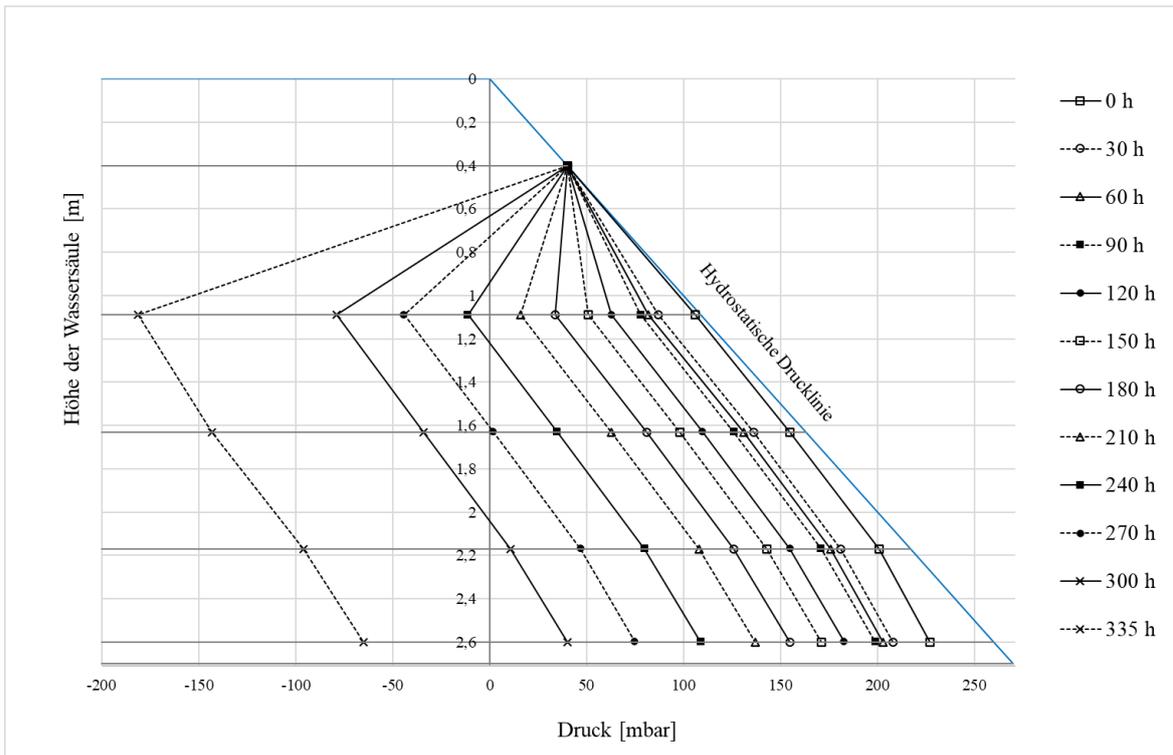


Abbildung 150: Micheau-Diagramm Bad Oeynhausen vom 24.07 - 07.08 (BO-Sonden)

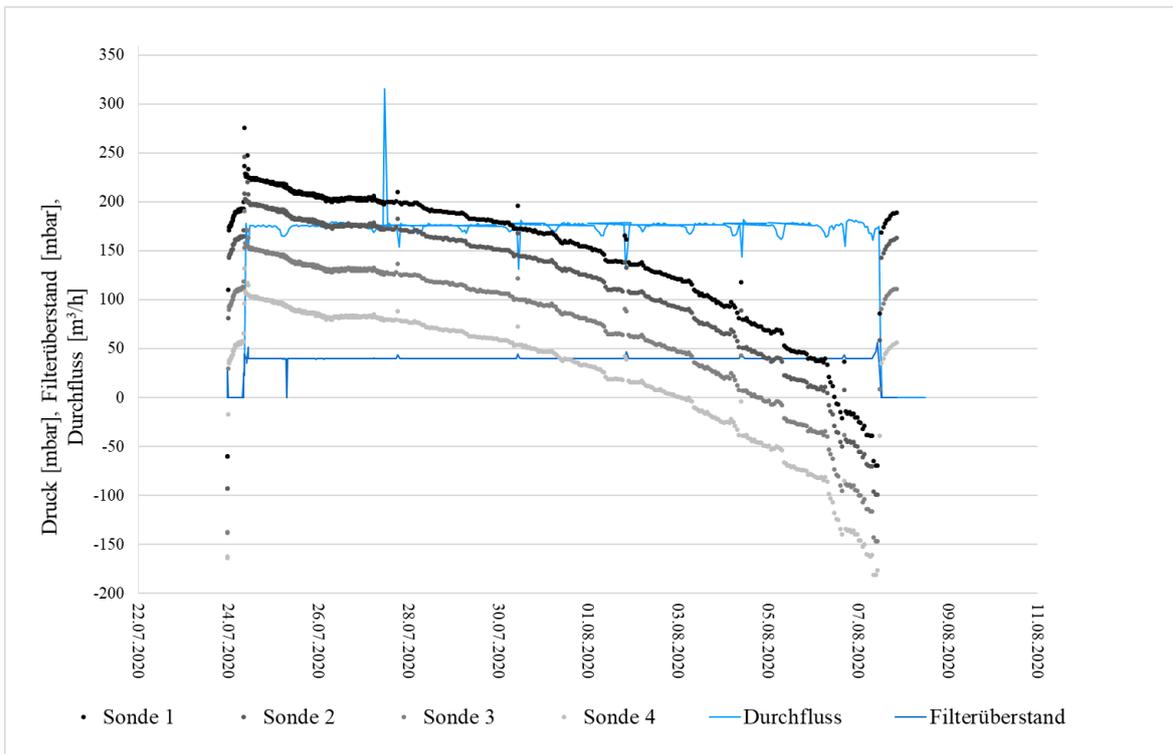


Abbildung 151: Druckdiagramm Bad Oeynhausen vom 24.07 - 09.08 (BO-Sonden)

## Anhang C: Druckdaten KA Gütersloh Putzhagen

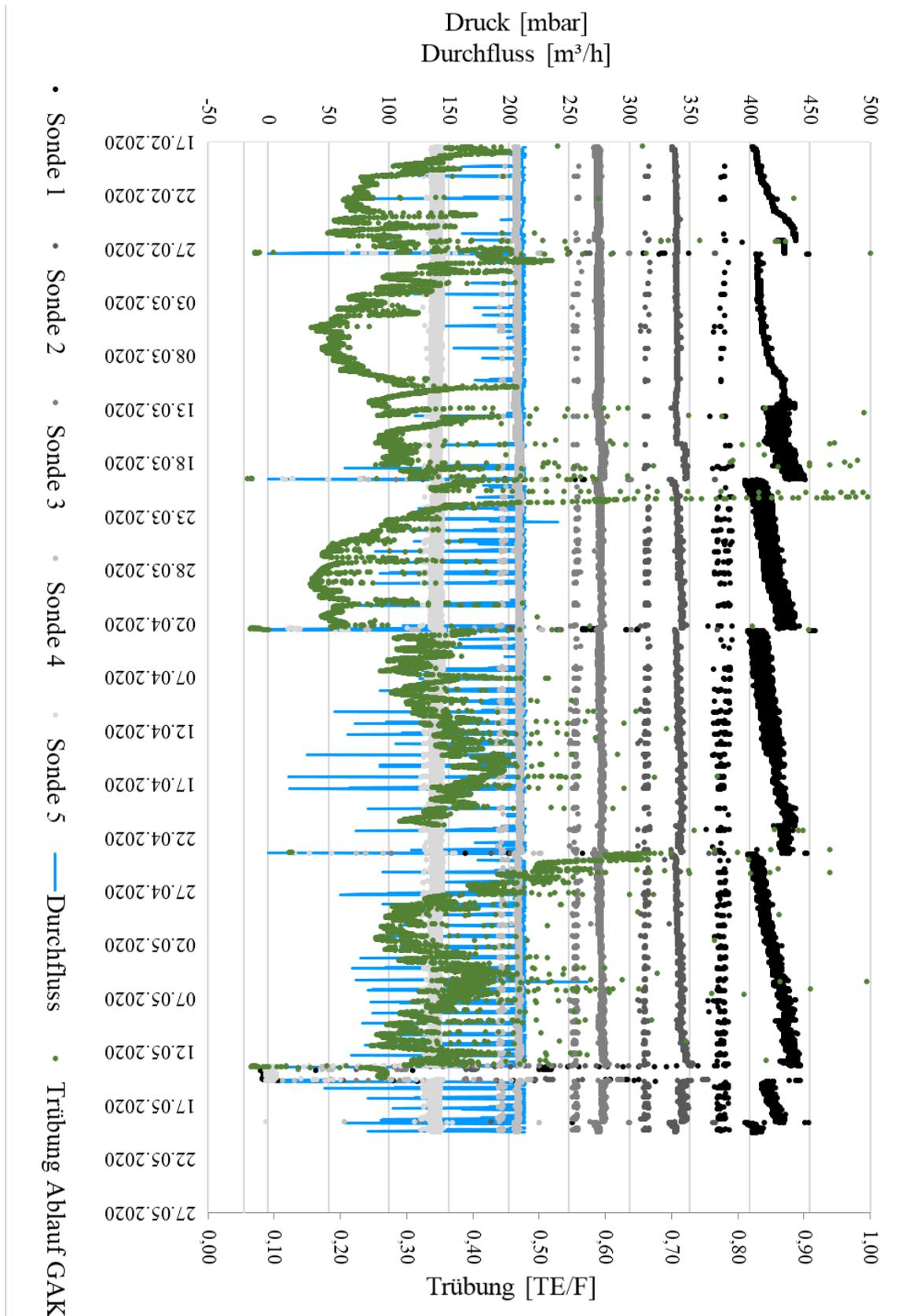


Abbildung 152: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 1. Untersuchungszeitraum

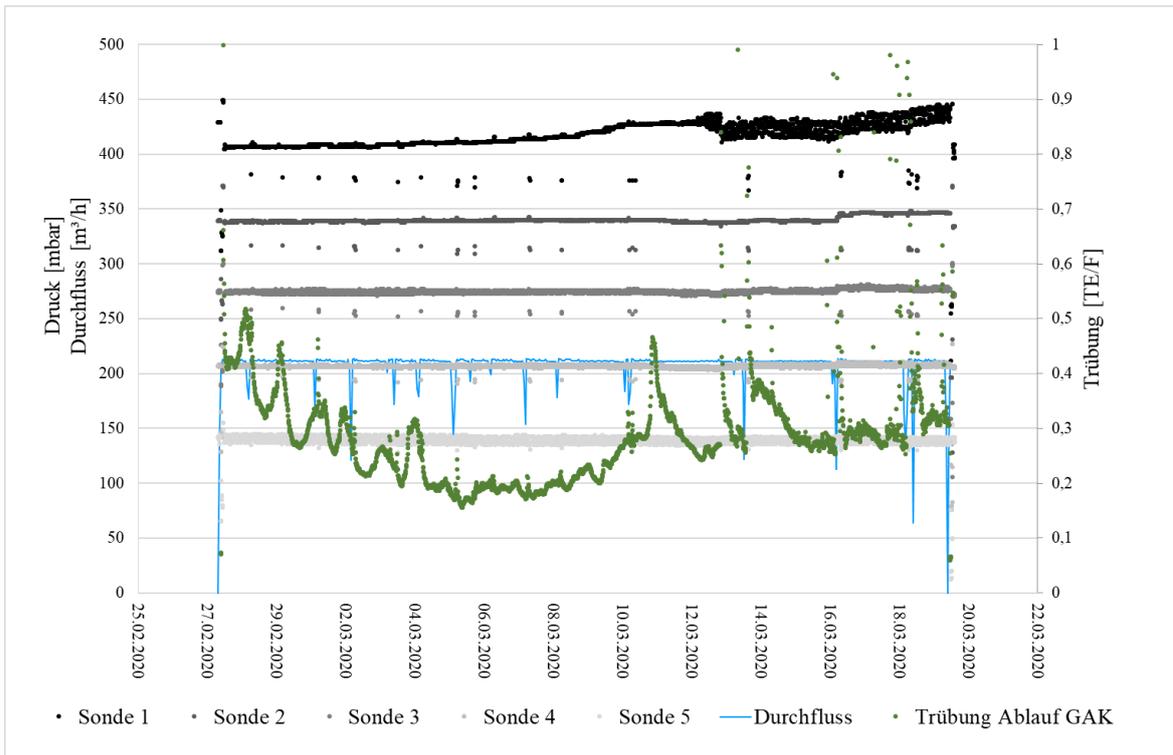


Abbildung 153: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 27.02 - 19.03

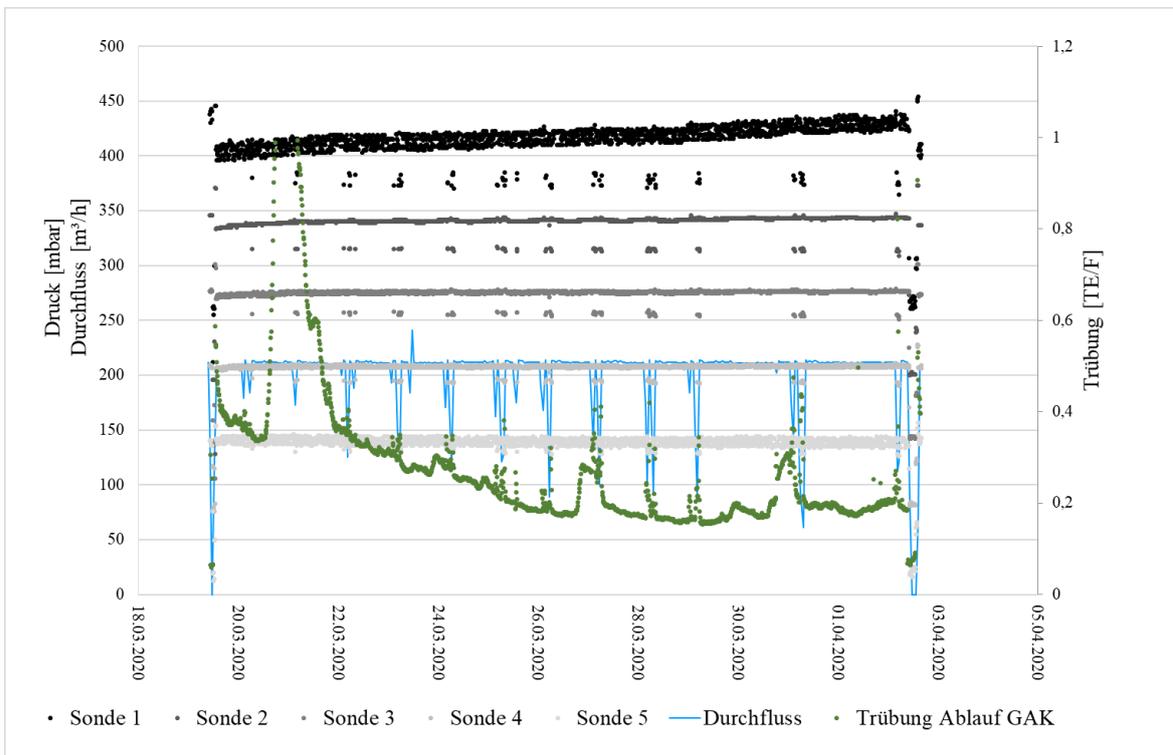


Abbildung 154: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 19.03 - 02.04

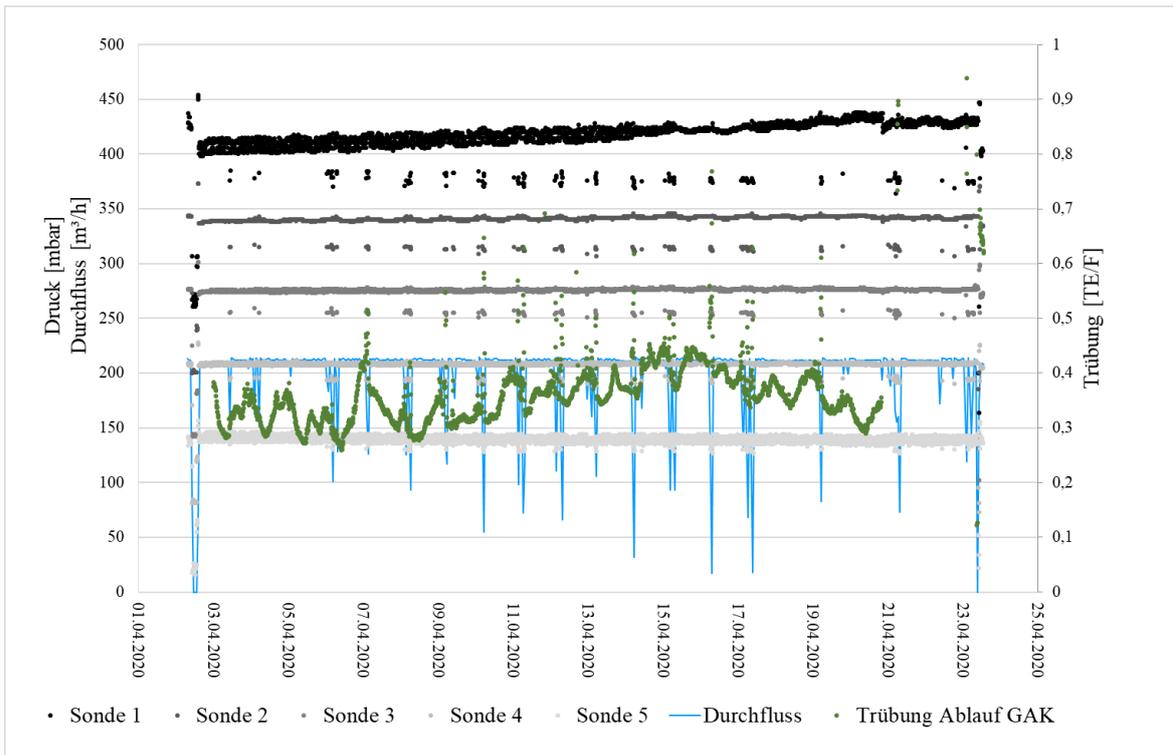


Abbildung 155: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 02.04 - 23.04

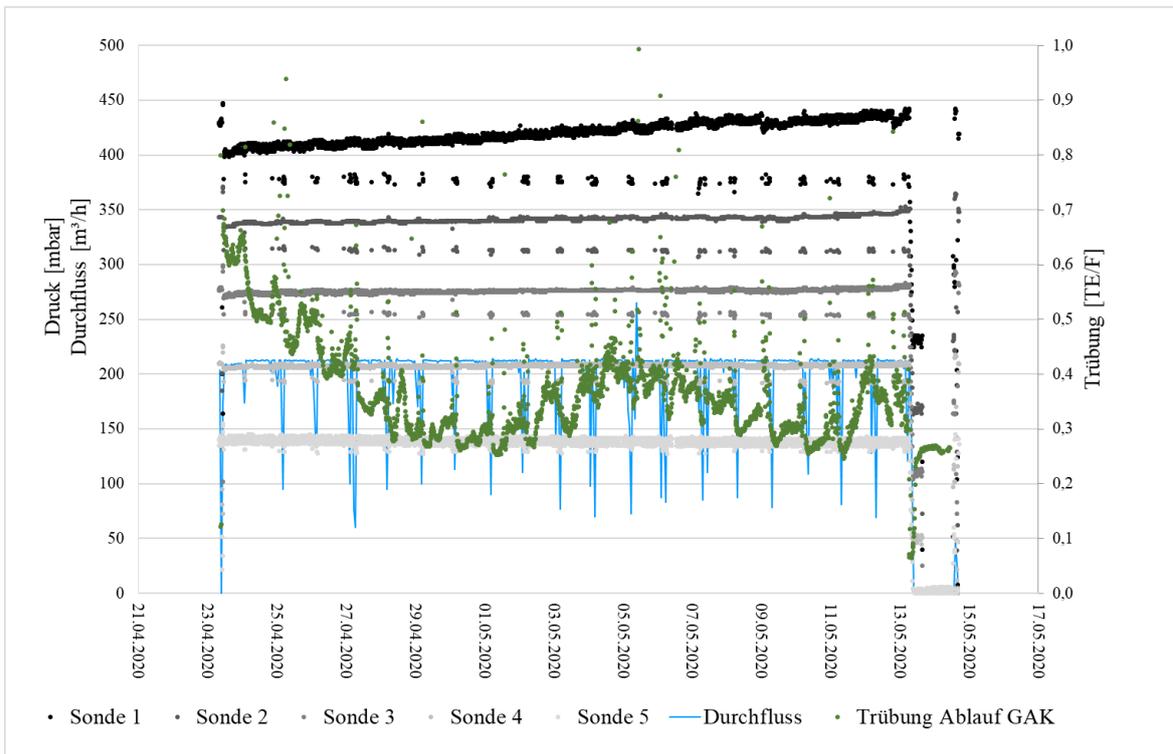


Abbildung 156: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 23.04 - 14.05

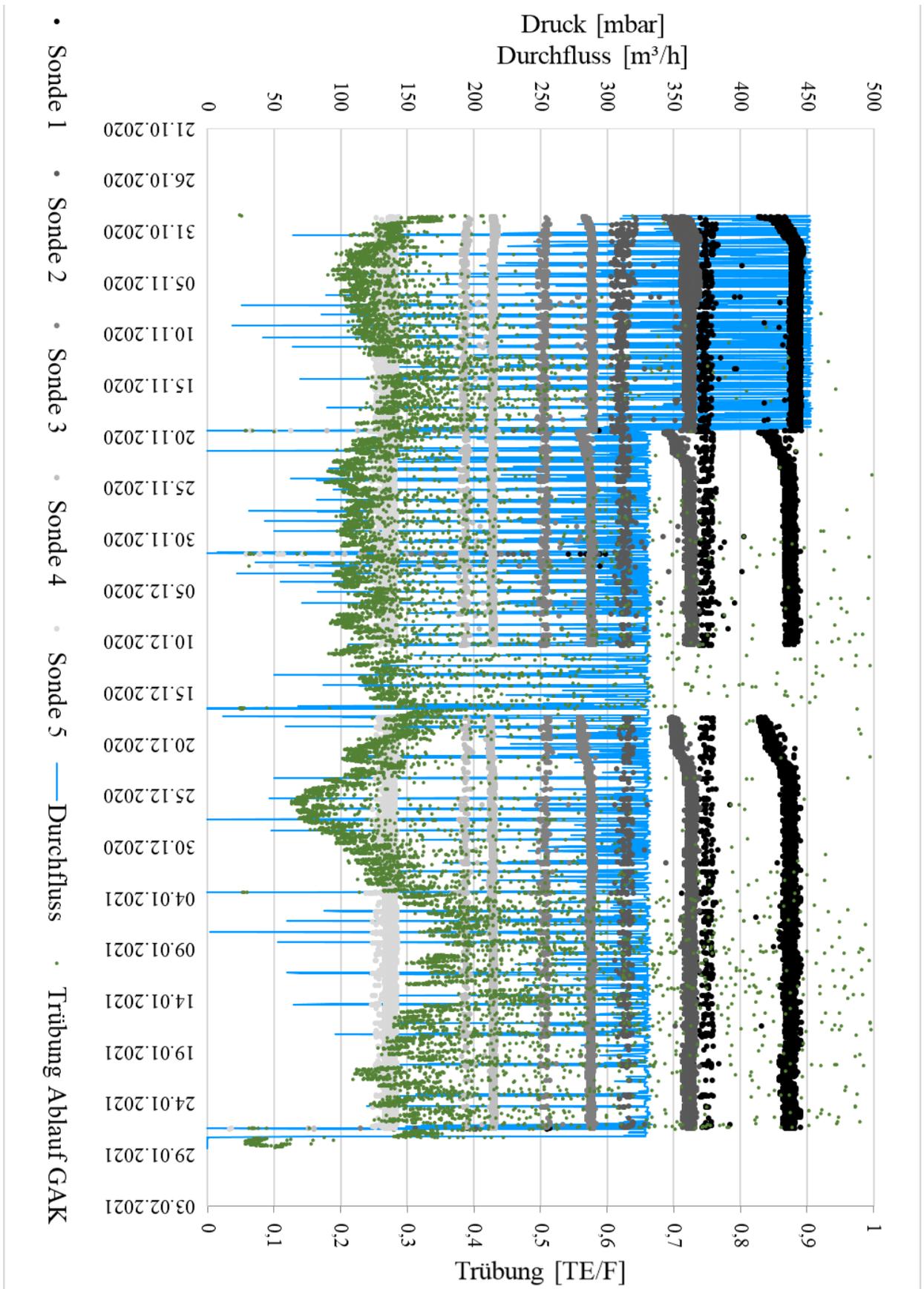


Abbildung 157: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 2. Untersuchungszeitraum

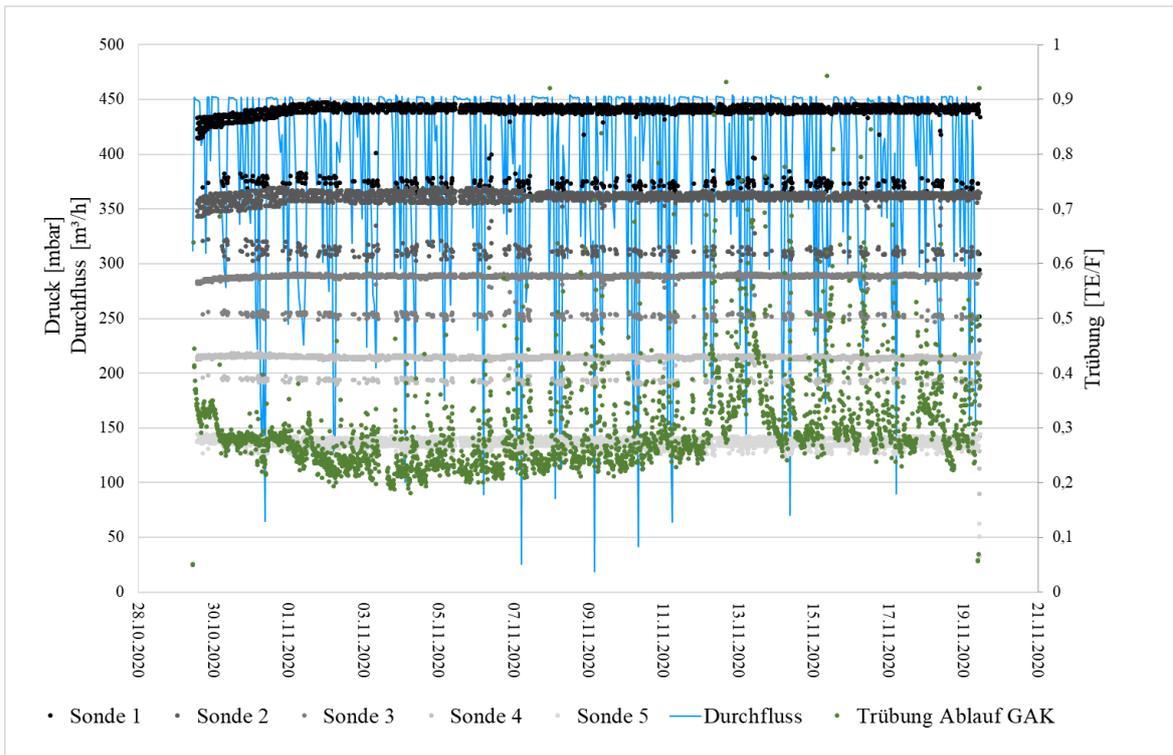


Abbildung 158: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 29.10 - 19.11

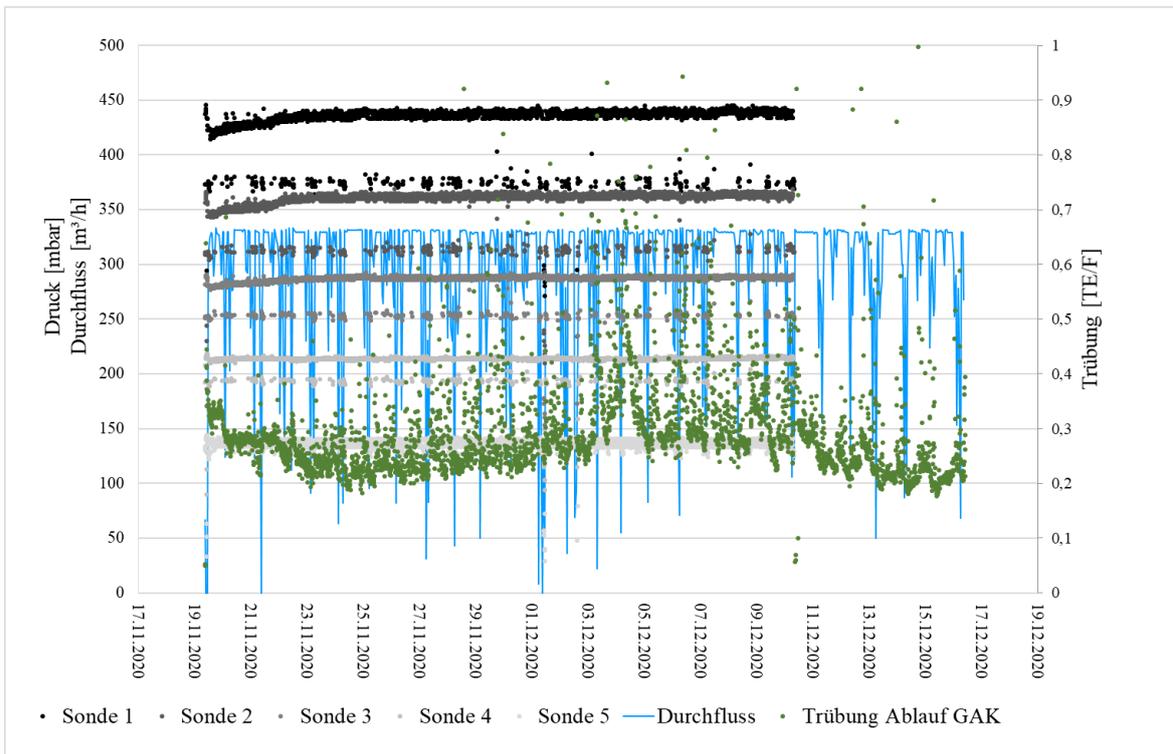


Abbildung 159: Druckdiagramm Gütersloh-Putzhagen vom 19.11 - 16.12

## Anhang D: Druckdaten KA Obere Lutter

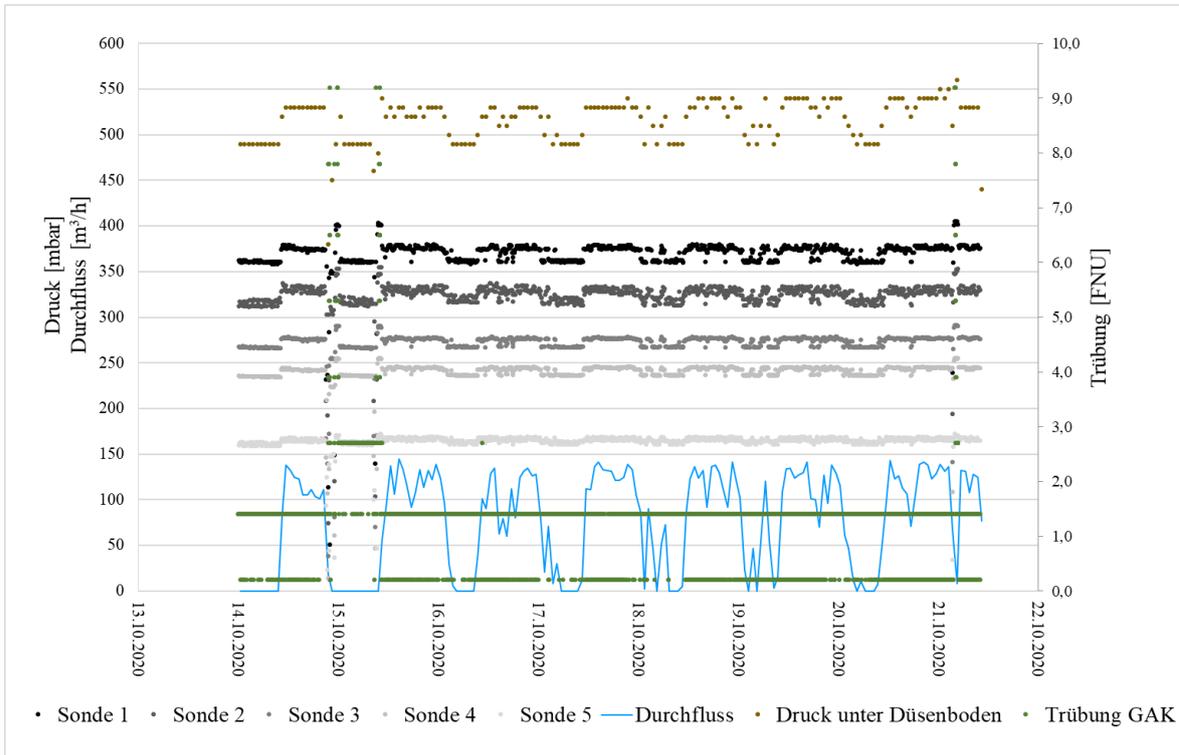


Abbildung 160: Druckdiagramm Obere Lutter vom 14.10 - 21.10

## Anhang E: Druckdaten KA Köln Rodenkirchen

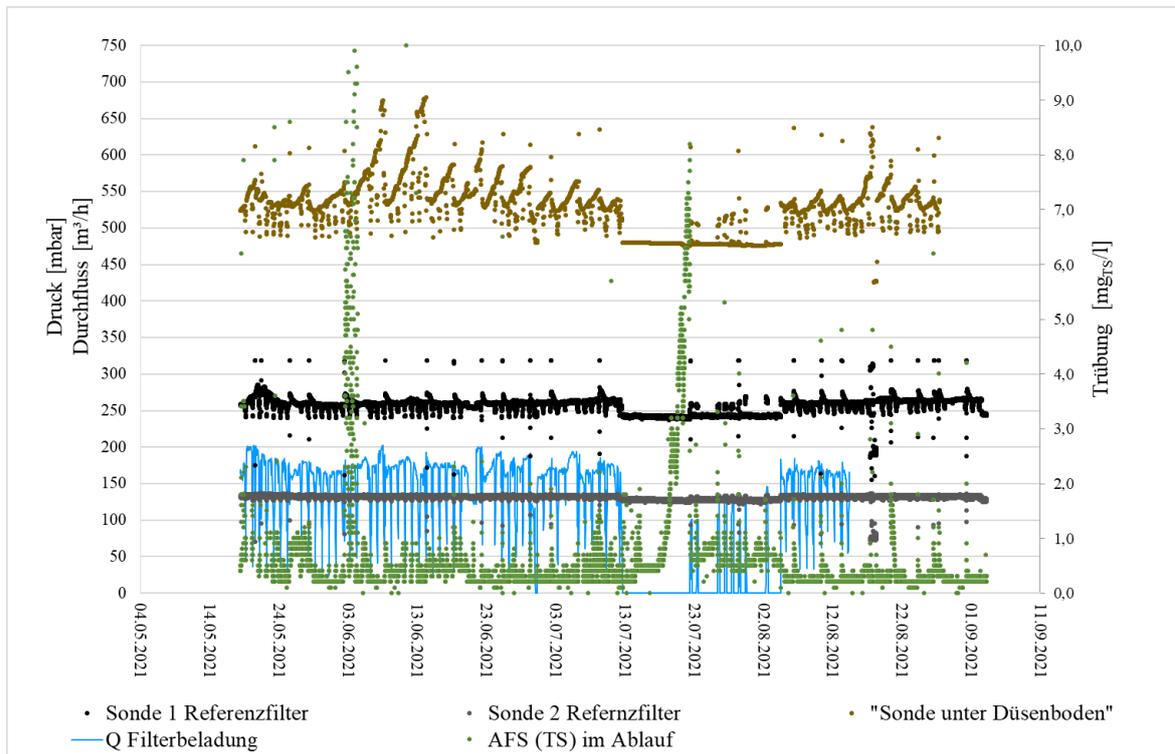


Abbildung 161: Druckdiagramm Köln Rodenkirchen ab Mai 2021 für den Referenzfilter

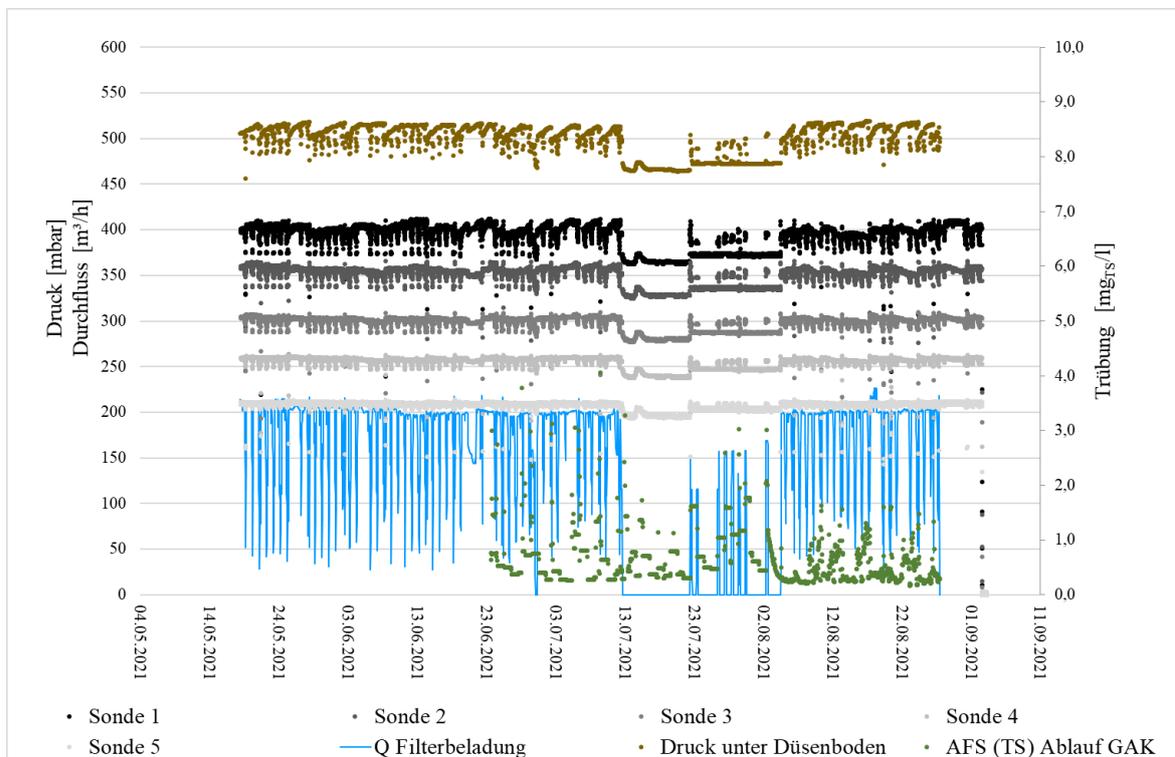


Abbildung 162: Druckdiagramm Köln Rodenkirchen ab Mai 2021 für den GAK-Filter