

Entwicklung eines Konzeptes zur Nachrüstung von Regenklärbecken mit technischen Regenwasserfiltern

E. Hilbrands¹, F. Elsner¹, N. Altensell¹, H. Grüning¹
1 FH Münster, Stegerwaldstraße 39, 48565 Steinfurt, Deutschland

Kurzfassung: Durch eine Nachrüstung von Regenklärbecken mit Filtereinheiten können Beckenerweiterungen oder Neubaumaßnahmen vermieden und der Stoffrückhalt gesteigert werden. Im Projekt „NaReFil“ wurden verschiedene Filtereinbauvarianten exemplarisch für ein Bestandsbecken untersucht. Dabei zeigte die Variante mit horizontalem Filter, welcher etwa 75 % der Beckenoberfläche einnimmt, die besten Gesamtwirkungsgrade. Die Beurteilung der Varianten erfolgte unter Berücksichtigung der Wirkung und des Betriebs sowie der Kosten. Die Wirkung des Filters wird derzeit noch untersucht.

Key-Words: Technische Filter, Regenklärbecken, CFD, Bestandsbauwerke

1 Erfordernis einer weitergehenden Behandlung

1.1 Einordnung technischer Filter in den Stand der Technik

Das Arbeitsblatt DWA-A 102 schreibt eine gesteigerte Reinigungsleistung von Regenbecken vor (DWA, 2020). Die Reinigungsleistung von Regenbecken basiert auf dem Abscheideprinzip mittels Sedimentation von partikulären Stoffen (Abfiltrierbare Stoffe (AFS)) und Flotation von Schwimmstoffen (u. a. Öle, Fette, Leichtstoffe). Beide Prozesse erfordern eine ausreichend langsame und gleichmäßige Durchströmung des Beckens, weshalb die horizontale Fließgeschwindigkeit beim Bemessungszufluss auf $v_H \leq 0,5$ m/s und die Oberflächenbeschickung auf $q_A = 6$ m/h begrenzt werden soll (DWA, 2013 und DWA, 2020). Die Oberflächenbeschickung q_A ist der Quotient aus Zuflussvolumenstrom Q und der absetzwirksamen Fläche A des Beckens, welche in der Regel mit der Beckenoberfläche gleichgesetzt wird. Eine gesteigerte Reinigungsleistung erfordert eine Reduktion der Oberflächenbeschickung, was wiederum gleichbedeutend mit einer Verringerung des Zuflusses zum Becken (Abkopplung von angeschlossenen Flächen) oder einer Vergrößerung der absetzwirksamen Fläche des Beckens ist. Abkopplungsmaßnahmen sind im dicht besiedelten Raum und vor dem Hintergrund der Flächenkategorisierung gemäß Arbeitsblatt DWA-A 102 sowie Trennerlass NRW (Runderlass des MULNV „Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren“ vom 26.05.05 („Trennerlass“); derzeit in Fortschreibung in Bezug auf das DWA-A 102) nur eingeschränkt möglich. Gleichzeitig bedeutet eine Erweiterung der absetzwirksamen Fläche des Beckens mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund von Um-/Neubaumaßnahmen hohe Kosten (Freistaat Thüringen, 2002) sowie zusätzlichen Platzbedarf.

Um die Reinigungsziele dennoch zu erreichen, stellen Zulaufoptimierungen zur Energiedissipation, Nachrüstungen mit Schrägklärereinheiten (Lamellen) sowie auch Nachrüstungen mit technischen Filtern mögliche Alternativen zu Beckenerweiterung oder Abkopplungsmaßnahmen dar. Der Einbau von Lamellen zur Erhöhung der absetzwirksamen Fläche kann günstiger ausfallen als eine Beckenerweiterung oder der Beckenneubau (Pinnekamp, 2010), jedoch sind auch hier der Reinigungsleistung Grenzen gesetzt. Hinzu kommt, dass für den Wirkungsgrad von mit Lamellen nachgerüsteten Becken nicht mehr der

Gesamtwirkungsgrad angesetzt werden darf, sondern lediglich der Sedimentationswirkungsgrad, da die (volumenabhängige) Speicherwirkung des Beckens durch die Nachrüstung mit Lamellen nicht verbessert wird. Gegenüber den Nachrüstungen zur besseren Durchströmung (Zulaufoptimierungen) oder Erhöhung der sedimentationswirksamen Fläche (Lamellen) haben technische Filter den Vorteil, dass sie neben Feinstpartikeln (AFS63) auch gelöste Stoffe (z. B. gelöste organische Spurenstoffe, Schwermetalle und Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)) zurückhalten können. Zudem ist davon auszugehen, dass sich im neuen Trennerlass auch neue Vorgaben zur Behandlung von Abflüssen von Kategorie III-Flächen finden werden, sodass für besagte Abflüsse die alleinige Reinigung durch Sedimentationseffekte nicht ausreichend ist und weitergehende Behandlungsmaßnahmen (Filtration, Behandlung in der Kläranlage) vorzusehen sind. Je nach Leistungsfähigkeit des vorliegenden Schmutzwasserkanals und der Kapazität der Kläranlage kann die Behandlung des abfließenden Niederschlagswassers in der Kläranlage technisch und wirtschaftlich machbar sein, gleichwohl würde dies eher einen „Rückschritt“ vom Trenn- zum Mischsystem darstellen.

Der Einsatz von technischen Regenwasserfiltern wird derzeit im Rahmen des Projektes „NaReFil“ (Nachrüstung von Regenklärbecken mit Filtereinheiten zur Optimierung des Stoffrückhaltes) an der FH Münster untersucht. In diesem vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW geförderten Projekt wird das Konzept zur Nachrüstung von Regenklärbecken mit technischen Filtern unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte wie Filtergeometrie, Filteraufbau und Beckenbetrieb erprobt. Ziel ist die Entwicklung eines ausgewogenen Produktes hinsichtlich der Reinigungsleistung durch Sedimentation und Filtration. Dieser Beitrag befasst sich mit den bisherigen Erkenntnissen aus der numerischen Simulation zur Entwicklung einer Empfehlung für die geometrische Einbausituation des Filters.

1.2 Vorhandene Behandlungsanlage

Bei dem untersuchten Becken handelt es sich um ein Regenklärbecken mit einer angeschlossenen, befestigten Fläche von 6,32 ha ($Q_{krit} \approx 95$ l/s, Flächenkategorien IIa und IIb). Das Becken hat Abmessungen von (L x B x T) 13,3 m x 3,0 m x 2,0 m und wird im Dauerstau betrieben. Über einen vorgeschalteten Beckenüberlauf (Trennbauwerk) wird das Wasser direkt in das benachbarte Regenrückhaltebecken (RRB) abgeschlagen. Der Ablauf des Beckens führt ebenfalls in das RRB und von dort gedrosselt in das parallel verlaufende Gewässer.

2 Methodik

2.1 Versuchsaufbau und -inhalte

Zur Entwicklung eines filterbasierten Optimierungskonzeptes für das Becken wurden numerische Simulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) mit physikalischen Untersuchungen gekoppelt (hybride Modellierung). Zur Validierung der Numerik wurden die Fließgeschwindigkeiten im physikalischen Modell für ausgewählte hydraulische Belastungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) ermittelt und ausgewertet.

Die Entwicklung von Designvorschriften für die Nachrüstung von Filterelementen in Regenklärbecken basiert auf verschiedenen Einbauvarianten der Filtereinheit. Diese wurden im Rahmen des Projektes entwickelt und mittels CFD auf ihren Einfluss auf die Durchströmungscharakteristik im Becken untersucht (Abbildung 54).

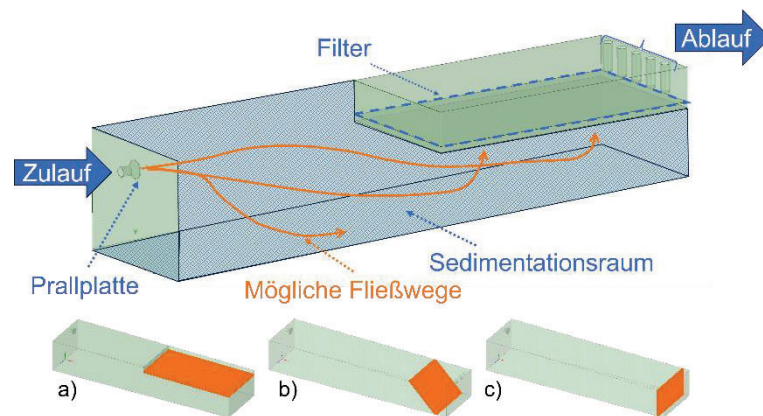


Abbildung 54: Übersicht über die Beckengeometrie (oben) sowie die untersuchten geometrischen Einbauvarianten des Filters im Regenklärbecken (a) horizontal, b) diagonal, c) vertikal)

2.2 Numerische Untersuchungen

Die Abbildung von Strömungsprozessen in und durch poröse Medien mittels CFD ist komplex. Grund dafür ist die Vielfalt der Prozesse und Mechanismen (Herzig et al., 1970). Um das Verhalten des Filters auf die Strömungscharakteristik im Gesamtsystem dennoch realitätsnah abzubilden, wurde eine Sensitivitätsanalyse numerisch relevanter Filterparameter durchgeführt. Als maßgebliche Parameter stellten sich der Trägheitswiderstand („inertial resistance“), Porosität („porosity“) und Permeabilität („permeability“) heraus, was mit den Untersuchungen von Stricker et al. (2022) einhergeht. Das numerische Gitternetz wurde auf Basis einer Netzstudie mit 2,01 Mio. Zellen generiert.

Die Validierung des numerischen Modells fand mittels PIV statt, wobei es sich um eine nicht-invasive, optische Messmethode handelt, mit der Strömungsfelder analysiert werden können (Mesenhöller et al., 2022). Hier wurden die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen des numerischen Modells mit dem physikalischen Modell im Maßstab 1:10 verglichen. Die Skalierung fand nicht – wie im Wasserbau üblich – auf Basis von Froude statt (vgl. Strobl und Zunic, 2006), sondern unter Beibehaltung der Hazen-Zahl (Hazen, 1904). Damit wurde sichergestellt, dass die im Modell eingesetzten und untersuchten Partikel trotz der Skalierung ein ähnliches Absetzverhalten (abhängig von Sink- und Horizontalgeschwindigkeit) aufweisen.

Zur Beurteilung der Sedimentationsleistung des Beckens, d. h. gleichzeitig auch zur Quantifizierung der beim Filter ankommenden Partikel, wurden absetzbare, massenbehaftete inerte Partikel im Modell mittels Discrete Phase Model (DPM) verfolgt. Das DPM beschreibt die Partikelbewegungen im Lagrange'schen Bezugssystem. Dafür wurde ein mineralisches Partikelgemisch verwendet ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$). Die verwendete Sieblinie war dem Prüfmedium Millisil W4 (Quarzwerke, 2016) angeglichen. Die Partikeleigenschaften des betrachteten Modells substrates enthält Tabelle 17.

Tabelle 17: Übersicht über die Sieblinie des im Modell verwendeten Kornsubstrates Millisil W4

Korndurchmesser in μm	Sinkgeschwindigkeit nach STOKES in m/h	Summenhäufigkeit in M.-%
1,0	0,0	4,0
3,0	0,0	7,0
5,0	0,1	9,0
7,0	0,1	12,0
12,0	0,4	20,0
24,0	1,7	30,0
36,0	3,7	34,0
51,5	7,6	49,0
81,5	19,1	70,0
112,5	36,3	78,0
142,5	58,3	90,0
180,0	93,0	96,0
257,5	190,3	99,8
357,5	366,8	100,0

2.3 Kriterien für den Filtereinbau

Für den Vergleich der in Abbildung 54 dargestellten Einbauvarianten wurden verschiedene Kriterien definiert und untersucht (Abbildung 55). Zu den Kriterien zählen Betrieb, Aufbau, Kosten, Standzeit und Wirkungsgrad.



Abbildung 55: Übersicht über die für den Filterbetrieb relevanten Kriterien

Die **Investitionskosten** werden maßgeblich von der Filterverankerung (Materialstärken), einer ggf. notwendigen Schichttrennung (bei Mehrschichtfiltern), dem Aufwand für den Einbau sowie den Mengen des Filtermaterials beeinflusst. Der **Wirkungsgrad** setzt sich aus dem Filterwirkungsgrad und dem Sedimentationswirkungsgrad des Beckens zusammen. Dabei

wird der Wirkungsgrad des Filters neben den komplexen Wirkmechanismen der Tiefenfiltration bei Substratfiltern von der Einbausituation (Art der Anströmung), dem Schichtaufbau, der hydraulischen Belastung und der Beckendurchströmung beeinflusst. Maßgebliche Kriterien für den Reinigungserfolg sind die Wirkzeit zwischen Stoff und Filter (Filtergeschwindigkeit) und die Art der am Filter ankommenden Stoffe und Partikel (Größe, gelöst/partikulär) (Liu et al., 2005). Bei einem diagonalen und vertikalen Filtereinbau könnten aufgrund der Schwerkraft unerwünschte Absetz- und Sortierprozesse des Schüttgutes einen negativen Einfluss auf die Filterwirksamkeit haben.² Der Sedimentationswirkungsgrad ist abhängig von der Durchströmung des Beckens, welche auch von der Anordnung des Filters im Becken beeinflusst werden kann. Beim **Betrieb** eines technischen Regenwasserfilters sind der Filterwechsel sowie die Reinigung der Beckenkammer maßgeblich. Der Filterwechsel und die Entnahme der sedimentierten Stoffe erfolgt teilweise manuell und durch ein Saug-Spülfahrzeug. Dafür ist erfahrungsgemäß ein Zeitaufwand von ein bis zwei Tagen erforderlich. Ein Klarwasserabzug ist empfehlenswert, um die Kläranlage zu entlasten. Hier müssen sowohl Betriebs- als auch Kostenaufwand berücksichtigt werden. Der **Schichtaufbau** und das gewählte Substrat sind für die Wirkung des Filters maßgeblich. Abhängig vom Filtermaterial können mehr oder weniger partikuläre und gelöste Stoffe zurückgehalten werden. Bei einem Mehrschichtfilter können unterschiedliche Stoffe wie gelöste Schwermetalle, Organik als auch partikuläre Stoffe zurückhalten werden. Der Schichtaufbau kann sich auf die Standzeit des Filters auswirken. Die **Standzeit** beschreibt die Kolmationswahrscheinlichkeit des Filters. Sie wird maßgeblich von der Art und Größe der ankommenden Partikel beeinflusst. Grundsätzlich wirkt sich die hier vorgeschaltete Sedimentation sowie die Durchströmungsrichtung von unten nach oben positiv auf die Standzeit des Filters aus. Negativ wirkt sich dagegen eine höhere hydraulische Belastung (größere angeschlossene Fläche) aus (Grüning und Schmitz, 2020). Die Vorhersage der Standzeit eines Filters ist bisher nur eingeschränkt möglich. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

3 Ergebnisse

3.1 Beeinflussung der Durchströmungscharakteristik durch Einbau des Filters

Die Reinigungsleistung von Regenklärbecken basiert in erster Linie auf Sedimentationsvorgängen. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus der Überlagerung von Absetzwirkung und Speicherwirkung eines Beckens zusammen (DWA, 2020 und Weiß, 2022). Ähnlich wie der nachträgliche Einbau von Lamellen, führt auch der nachträgliche Einbau eines Filters zu einem eingeschränkten Gesamtabsetzvolumen im Becken und kann damit potenziell den Gesamtwirkungsgrad beeinflussen. Aus diesem Grund wurden – ebenfalls im numerischen Modell und zusätzlich zur Analyse von Partikelwirkungsgraden – Stromlinien im Becken qualitativ miteinander verglichen. In Abbildung 56 sind exemplarisch die Fließgeschwindigkeiten und -richtungen über den Beckenquerschnitt mit und ohne Filter dargestellt. Es fällt auf, dass der Filter einen positiven Einfluss auf die Vergleichmäßigung der Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich des Filters haben kann. Die grundsätzlichen Fließrichtungen – insbesondere die Rezirkulationen nach Zulauf sowie mittig im Becken – werden allerdings nicht signifikant durch den Einbau beeinflusst.

² Um diese Aussagen zu belegen, werden die genauen Auswirkungen der Einbauposition im Rahmen des Projektes noch in einem halbtechnischen Versuchsaufbau untersucht. Sie ergeben sich allerdings aus bisherigen, umfangreichen Projekterfahrungen.

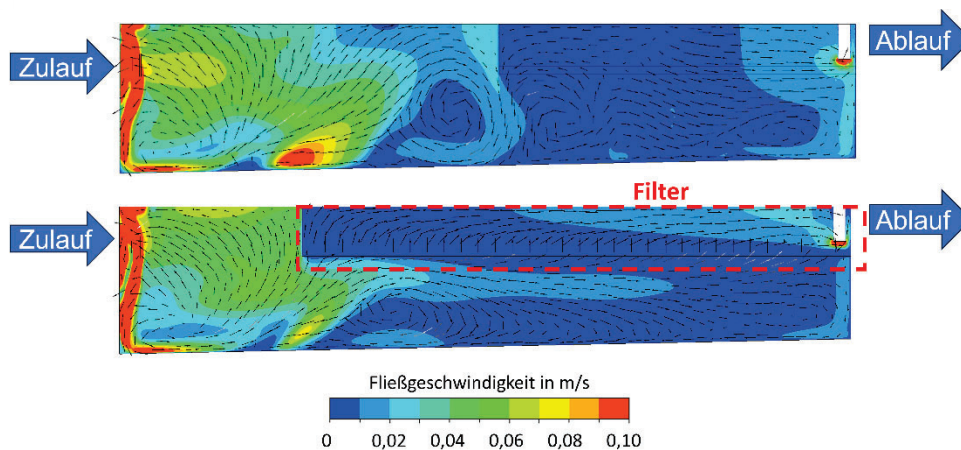


Abbildung 56: Fließrichtungsvektoren und -geschwindigkeiten über den Beckenquerschnitt ohne Filter (oben) und mit horizontalem Filter (unten) bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer horizontalen Filterfläche von 75 % (der Beckenoberfläche)

3.2 Qualitativer Variantenvergleich auf Basis von Einbaukriterien

Auf Basis bisheriger Betriebserfahrungen und vergangener sowie laufender Forschungsprojekte mit technischen Filtern in Wuppertal (Grüning und Schmitz, 2020 und Grüning et al., 2017) wurden die drei Einbauvarianten des Filters qualitativ bewertet. Dabei stellte sich die horizontale Ausrichtung bei allen Kriterien bis auf die „Reinigung der Beckenkammer“ als beste Variante heraus, während die vertikale Filtervariante in fast allen Kriterien signifikant schlechter eingestuft wurde (Tabelle 18). Auf die jeweiligen Hintergründe und Erläuterungen kann hier nur kurz eingegangen werden. Wesentliche Aspekte sind die positiven Effekte bei aufwärts durchströmten Filtern und die Möglichkeit des mehrlagigen Substrateinbaus bei horizontalem Filterbett.

Tabelle 18: Übersicht über die Bewertung der Einbauvarianten nach Kriterien

Kriterium		Horizontal	Diagonal	Vertikal
Kosten	Investition	+	-	o
Wirkungsgrad	Filter	+	o	-
	Sedimentation	+	o	-
Betrieb	Filterwechsel	+	-	-
	Reinigung der Beckenkammer	o	+	-
Schichtaufbau	Einschicht-/ Mehrschichtfilter	+	-	-
Standzeit	Wahrscheinlichkeit der Kolmation	+	o	-

3.3 Quantitativer Variantenvergleich auf Basis von Sedimentationswirkungsgraden

3.3.1 Einfluss der Einbaugeometrie

Im numerischen Modell wurden Sedimentationswirkungsgrade für die verschiedenen Einbauvarianten des Filters ermittelt (vgl. Kapitel 2.2). Dabei wurden AFS und AFS63 als Parameter betrachtet. In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind die

Sedimentationswirkungsgrade für die drei Einbauvarianten dargestellt und außerdem der Wirkungsgrad ohne Filter. Hier wird deutlich, dass der Einbau eines horizontalen Filterelements (hier bei $q_A = 4 \text{ m/h}$ und einer Filterfläche von $A_{\text{Filter}} = 50 \% \cdot A_{\text{Becken}}$) den besten Sedimentationswirkungsgrad im Becken erzielt – sowohl für die AFS-Gesamtfraktion als auch für die Feinfraktion. Die geringeren Unterschiede für die Wirkungsgrade von AFS63 lassen sich auf die ohnehin eingeschränkte Sedimentationsfähigkeit dieser Partikelgrößen zurückführen. Ob und inwieweit der Filter einen grundsätzlich positiven Einfluss auf das Durchströmungsgeschehen hat, wird derzeit noch untersucht.

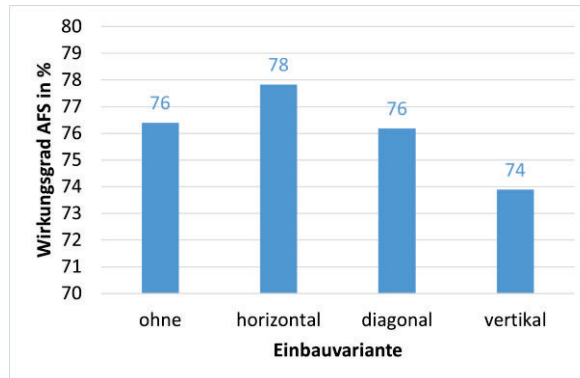


Abbildung 57: AFS-Sedimentationswirkungsgrade für verschiedene Einbauvarianten des Filters bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ und einer horizontalen Filterfläche von 50 % (der Beckenoberfläche)

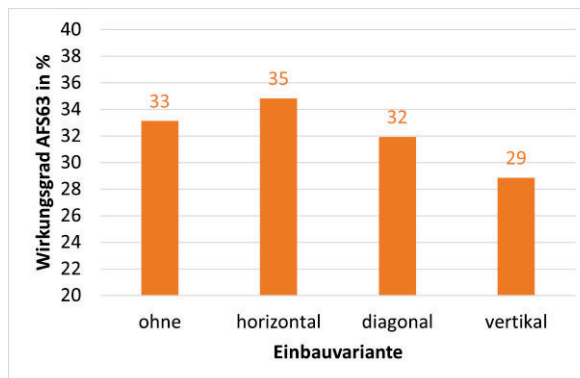


Abbildung 58: AFS63-Sedimentationswirkungsgrade für verschiedene Einbauvarianten des Filters bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ und einer horizontalen Filterfläche von 50 % (der Beckenoberfläche)

Um in Hinblick auf die Zielsetzung des Projektes eine Empfehlung für die geometrische Einbausituation zu treffen, wurden weiterhin verschiedene Flächenanteile des Filters (in Bezug auf die Oberfläche des Beckens) hinsichtlich der resultierenden Sedimentationswirkungsgrade im numerischen Modell untersucht. Da die ersten Untersuchungen mit einem Filter gemacht wurden, der genau 50 % der Beckenoberfläche einnimmt, wurden vergleichbare Modelle aufgebaut, in denen der Filter 25 %, 75 % und 95 % der Beckenoberfläche einnimmt. Diese Untersuchungen ergaben, dass das Optimum der Sedimentationsleistung im Becken mit einem Filter erreicht werden kann, der etwa 75 % der Beckenoberfläche einnimmt (Abbildung 59).

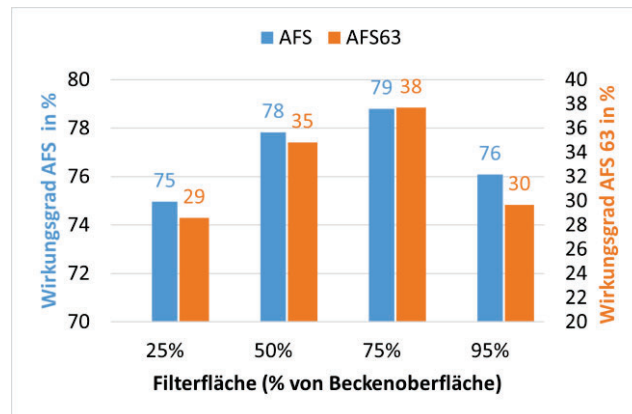


Abbildung 59: Sedimentationswirkungsgrade für AFS und AFS63 für verschiedene Filtergrößen (Anteil Filteroberfläche von Beckenoberfläche) bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$

3.3.2 Einfluss des Filterwiderstandes

Der Filterwiderstand repräsentiert den bei der Filtration auftretenden Druckabfall, d. h. den energetischen Aufwand für die Durchströmung des Filters. Um den Einfluss des Filterwiderstandes auf die Durchströmungscharakteristik zu beurteilen, wurden ebenfalls numerische Untersuchungen zum Partikelverhalten mit verschiedenen Filterwiderständen (hier angegeben in der Verlusthöhe, u. a. 0,1 mm, 2 mm, 10 cm) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Anwesenheit eines Filters, d. h. eine Verlusthöhe $> 0 \text{ mm}$, zu einer gleichmäßigeren Durchströmung und damit zu einem verbesserten Sedimentationswirkungsgrad führen kann. Ab mehreren Zentimetern Druckverlust ist keine positive Änderung des Wirkungsgrades mehr zu erwarten (Abbildung 60).

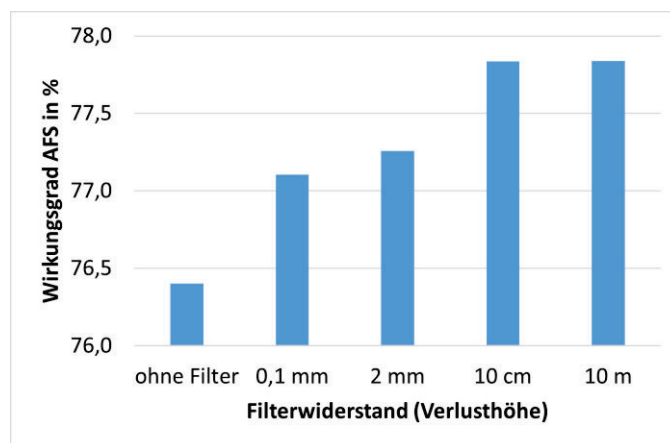


Abbildung 60: AFS-Sedimentationswirkungsgrade für verschiedene Filterwiderstände bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ und einer horizontalen Filterfläche von 50 % (der Beckenoberfläche)

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen im Projekt „NaReFil“ zeigen, dass technische Regenwasserfilter sich zur Nachrüstung von Regenklärbecken eignen, um eine gesteigerte Reinigungsleistung mit moderatem Aufwand und Platzbedarf zu erreichen und der Einbau eines Filters die Sedimentationsleistung von Bestandsbecken nicht negativ beeinflussen

muss. Der Einbau eines horizontalen Filters, welcher von unten nach oben durchströmt wird und etwa drei Viertel der gesamten Beckenoberfläche (absetzwirksame Fläche) ausmacht, zeigt sich als wirksamste Variante im Hinblick auf den Rückhalt von partikulären Stoffen. Dabei kann sich der Einfluss des Filters positiv auf die Durchströmung im Becken auswirken und den Rückhalt von partikulären Stoffen durch Sedimentation sogar steigern.

Die hier beschriebenen aktuellen Ergebnisse des Projektes „NaReFil“ ermöglichen eine erste Einschätzung hinsichtlich des nachträglichen Einbaus von Filtereinheiten in bestehende Regenklärbecken. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Regenbecken wurde bis jetzt noch nicht geprüft, ist jedoch Teil des Forschungsprojektes und wird im Rahmen einer Beckenstudie im nächsten Schritt untersucht.

Technische Filtersysteme ermöglichen einen weitergehenden Rückhalt feinpartikulärer und auch gelöster Stoffe. Die Nachrüstung bestehender Regenklärbecken trägt damit zur Gewässerentlastung bei. Eine aufwändige Erweiterung oder sogar Neubaumaßnahme können so vermieden werden. Filter sind wirksam, stellen aber an das Betriebspersonal zusätzliche Anforderungen im Vergleich zu reinen Sedimentationsanlagen. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass bereits durch Füllstandsvergleiche im Zu- und Ablaufbereich maßgebliche Informationen gewonnen werden können, um den Betriebsaufwand zu reduzieren.

5 Literaturverzeichnis

DWA (2013): Arbeitsblatt DWA-A 166. Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung - konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 166).

DWA (2020): Arbeitsblatt BWK-A 3-2/DWA-A 102-2, Dezember 2020. Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. Korrigierte Fassung: Stand April 2022. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (BWK-Arbeitsblatt, A 3-2).

Freistaat Thüringen (2002): Kosten für Regenklärbecken in geschlossener Betonbauweise. Unter Mitarbeit von Harald Sommer. Hg. v. Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH. Online. Online verfügbar unter <https://www.sieker.de/fachinformationen/article/regenklaerbecken-270.html#:~:text=EUR%20bzw.%20spezifische%20Kosten%20von%20ca.%201.900%20EUR%2Fm%C2%B3,Regenkl%C3%A4rbeckens%20Dianasee%20liegen%20bei%20ca.%2010%2C50%20EUR%20%2Fm%C2%B2.>, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

Grüning, Helmut; Pecher, Klaus Hans; Massing, Christian (2017): Regenwasserbehandlung in einer Großfilteranlage im Einzugsgebiet "In der Fleute". Projektbericht. Unter Mitarbeit von Thorsten Schmitz, Christian Schmidt, Andreas Giga, Katja Ines Fricke, Thorsten Gigl und Michael Kalz. Wuppertal.

Grüning, Helmut; Schmitz, Thorsten (2020): Abschlussbericht ReWaFil. Analyse und Optimierung des Rückhalts von feinpartikulären und gelösten Stoffen in Anlagen zur technischen Regenwasserfiltration (ReWaFil). Unter Mitarbeit von Marc Wichern, Eva Heinz, Mareike Evers, Klaus-Hans Pecher und Daniela Böckmann.

Hazen, Allen (1904): On Sedimentation. In: *T. Am. Soc. Civ. Eng.* 53 (2), S. 45–71. DOI: 10.1061/TACEAT.0001655.

Herzig, J. P.; Leclerc, D. M.; Goff, P. Le. (1970): Flow of Suspensions through Porous Media—Application to Deep Filtration. In: *Ind. Eng. Chem.* 62 (5), S. 8–35. DOI: 10.1021/ie50725a003.

Liu, Dingfang; Sansalone, John J.; Cartledge, Frank K. (2005): Comparison of Sorptive Filter Media for Treatment of Metals in Runoff. In: *J. Environ. Eng.* 131 (8), S. 1178–1186. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:8(1178).

Mesenhöller, Eva; Jacobs, Steffen; Vennemann, Peter; Hussong, Jeanette (2022): Unsteady Ventilation in a Scaled Room Model with Swirl Ceiling Diffusers.

Pinnekamp, Johannes (2010): Lamellenabscheider in der Mischwasserbehandlung. Teil 1: Literaturrecherche Teil 2: Messkampagne RÜB Homberg-Hakenfeld. Aachen: Linksrheinische Entwässerungs-Genossenschaft LINEG. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/Abschlussbericht_Messkampagne_RUEB_Homberg-Hakenfeld.pdf.

Quarzwerte (2016): Leistungserklärung und Sortenverzeichnis. Kennnummer 13139-2013. Online verfügbar unter https://www.quarzwerte.com/fileadmin/quarzwerte/Leistungserklaerungen/Leistungserkl-Sortenverz-EN13139-SMH_Revision_1.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2023.

Stricker, Max; Littfinski, Tobias; Heinz, Eva; Pecher, Klaus Hans; Lübken, Manfred; Grüning, Helmut; Wichern, Marc (2022): Design-oriented evaluation of the hydrodynamics in a full-scale combined filter-lamella separator for urban stormwater treatment. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 85 (10), S. 2854–2868. DOI: 10.2166/wst.2022.135.

Strobl, Theodor; Zunic, Franz (2006): Wasserbau. Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer.

Weiß, Gebhard (2022): Bemessung von Schrägklärern und Regenklärbecken nach dem Arbeitsblatt DWA-A 102-2. Erste Erfahrungen. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* (5).

Korrespondenz:

Eske Hilbrands M.Sc.
Stegerwaldstraße 39, 48565 Steinfurt
02551-9-62597
eske.hilbrands@fh-muenster.de

Fördermittelgeber:
Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen

