

Nicolas Haag

Einfache Methode zur Filterrückspülung bei der Trinkwasserauf- bereitung in Entwicklungsländern

Bachelor Thesis

Bachelor-Thesis

für Herrn cand. ing. Nicolas Haag (Matr.-Nr. 950231)

Eine einfache Methode zur Filterrückspülung bei der Trinkwasseraufbereitung in Entwicklungsländern

Die sichere Versorgung mit Trinkwasser ist eines der Hauptprobleme in den Entwicklungsländern. Rund 660 Mio. Menschen haben derzeit keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Verschmutztes Wasser und schlechte sanitäre Versorgung kosten täglich weltweit mehreren Tausend Kindern das Leben.

In diesem Zusammenhang besteht unter den Verantwortlichen sowie Entwicklungshelfern weitgehende Einigkeit, dass eine reine Kopierung der Wasserversorgungssysteme, wie sie in Industriestaaten zu finden sind, nicht zweckdienlich ist. Vielmehr sind einfache („low tech“) Systeme gefragt, die in von den betroffenen Ländern selbst hergestellt und betrieben werden können, also zu keinen neuen Abhängigkeiten führen.

Im Rahmen einer vorangegangenen Thesis wurde ein Verfahren zur einfachen Rohwasserfiltrierung als Vorstufe zur Desinfektion untersucht. Dabei wurde ein einfacher, überdruckloser Sandfilter verwendet, bei dem das Verfahren der Rückspülung noch offene Fragen aufweist bzw. noch nicht ausgereift ist.

Im Rahmen dieser Thesis sollen daher zunächst kurz die theoretischen Grundlagen zu dieser Thematik zusammengefasst werden sowie prinzipielle Vorgehensweisen dargestellt werden. Anschließend ist die Bemessung der o.g. vorhandenen Apparatur zur Rohwasserfiltration anhand von Literaturangaben zu überprüfen und der Filteraufbau ggf. anzupassen. Nachfolgend sind im Labor entsprechende Versuche durchzuführen, um das Verfahren der Rückspülung zu optimieren.

Sämtliche Datensätze sind der Arbeit auf Datenträger beizufügen.

Trier, den 22.10.2018



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Trinkwasseraufbereitung und Trinkwasserqualität	3
3 Trübung und Typische Trübungswerte	5
4 Filtration	7
5 Rückspülung von Filteranlagen	8
5.1 Grundlagen der Filtrerrückspülung	8
5.2 Skizze vom Funktionsprinzip der Rückspülung	9
6 Auswahl des Filtermaterial	10
6.1 Kornzusammensetzungen der Sieblinien von Filteraufbau 1	12
6.2 Kornzusammensetzungen der Sieblinien von Filteraufbau 2	14
6.3 Betrachtung mittels Filterregeln	17
6.4 Ergebnisse der Berechnungen	20
7 Filteraufbau	21
7.1 Filteraufbau Skizze	21
7.2 Materialliste der Versuchsgegenstände	22
7.3 Aufbaubeschreibung	23
7.4 Bilder	24
8 Testlauf der Filteranlage	25
8.1 Versuchsbeschreibung	25
8.2 Versuchsdurchführung	25
8.3 Messwerte	26
8.4 Ergebnisse	26
9 Reinigung des Filtermaterials	27
9.1 Versuchsbeschreibung	27
9.2 Versuchsdurchführung	27
9.3 Messwerte	28
9.4 Ergebnisse	29

10	Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch zur Überprüfung der Filtereffizienz	30
10.1	Versuchsbeschreibung	30
10.2	Versuchsdurchführung	30
10.3	Messwerte	31
10.3	Ergebnisse	34
11	Verhältnis zwischen Lehm und Wasser	35
11.1	Versuchsbeschreibung	35
11.2	Versuchsdurchführung	35
11.3	Messwerte	36
11.4	Ergebnisse	36
12	Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch mit Ziel der Sättigung	37
12.1	Versuchsbeschreibung	37
12.2	Versuchsbeschreibung	37
12.3	Messwerte	38
12.4	Ergebnisse	39
13	Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch als Nachweis einer Sättigung	40
13.1	Versuchsbeschreibung	40
13.2	Versuchsdurchführung	40
13.3	Messwerte	41
13.4	Ergebnisse	44
14	Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm	45
14.1	Versuchsbeschreibung	45
14.2	Skizze	47
14.3	Versuchsdurchführung	48
14.4	Messwerte	49
14.5	Ergebnisse	49
15	Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm	51
15.1	Versuchsbeschreibung	51
15.2	Skizze	52
15.3	Versuchsdurchführung	52
15.4	Messwerte	53
15.5	Ergebnisse	53
16	Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm	54
16.1	Versuchsbeschreibung	54
16.2	Skizze	55
16.3	Versuchsdurchführung	55
16.4	Messwerte	56
16.5	Ergebnisse	56

17	Nochmalige Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm.	58
17.1	Messwerte	58
17.2	Ergebnisse	59
18	Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm.....	60
18.1	Versuchsbeschreibung	60
18.2	Skizze	61
18.3	Versuchsdurchführung	62
18.4	Messwerte	62
18.5	Ergebnisse	63
19	Nachweis einer Reinigung des Filtermaterials.....	64
19.1	Versuchsbeschreibung	64
19.2	Versuchsdurchführung	64
19.3	Messwerte	65
19.4	Ergebnisse	67
20	Fazit.....	68
20.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	68
20.2	Verbesserungsvorschläge.....	69
20.3	Ausblick	70
21	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	71
21.1	Bücher:.....	71
21.2	Internetseiten:.....	71
21.3	Sonstige Quellen	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Typische Trübungswerte	6
Tab. 6.1: Filteraufbau 1	10
Tab. 6.2: Filteraufbau 2	10
Tab. 6.3: Probenmenge in Abhängigkeit des Größtkorns der Bodenprobe.....	11
Tab. 6.4: Siebrückstände von Quarzsand 0/1 mm	12
Tab. 6.5: Siebrückstände von Natursteinsplitt 2/5 mm	12
Tab. 6.6: Siebrückstände von Kalksteinschotter 16/32 mm	13
Tab. 6.7: Siebrückstände von Quarzsand 0/1 mm	14
Tab. 6.8: Siebrückstände von Quarzkies 2/5 mm.....	14
Tab. 6.9: Siebrückstände von Quarzkies 8/16 mm.....	14
Tab. 6.10: siebrückstände von Quarzkies 16/32 mm.....	14
Tab. 6.11: Überschlägliche Betrachtung für Filteraufbau 1	17
Tab. 6.12: Überschlägliche Betrachtung für Filteraufbau 2	17
Tab. 6.13: Genauere Betrachtung für Filteraufbau 1.....	18
Tab. 6.14: Genauere Betrachtung für Filteraufbau 2.....	18
Tab. 8.1: 1. Filtration von 50 l Wasser	26
Tab. 9.1: 1. Filtration von 100 l Wasser	28
Tab. 9.2: 2. Filtration von 100 l Wasser	28
Tab. 9.3: 3. Filtration von 100 l Wasser	29
Tab. 10.1: 1. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	31
Tab. 10.2: 2. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	32
Tab. 10.3: 3. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	32
Tab. 10.4: 4. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	33
Tab. 10.5: 5. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	33
Tab. 10.6: 6. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	34
Tab. 11.1: Versuch mit 5g Lehm in 10 l Wasser.....	36
Tab. 11.2: Versuch mit 10g Lehm in 10 l Wasser.....	36
Tab. 11.3: Versuch mit 20g Lehm in 10 l Wasser.....	36
Tab. 11.4: Versuch mit 200g Lehm in 100 l Wasser.....	36
Tab. 12.1: 1. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU	38
Tab. 12.2: 2. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU	38
Tab. 12.3: 3. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU	39
Tab. 13.1: 7. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	41
Tab. 13.2: 8. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	42
Tab. 13.3: 9. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	43
Tab. 13.4: 10. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	43
Tab. 13.5: 11. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	44
Tab. 14.1: 1. Rückspülung mit 120 l Wasser.....	49
Tab. 14.2: 2. Rückspülung mit 120 l Wasser.....	49
Tab. 15.1: 3. Rückspülung mit 120 l Wasser.....	53

Tabellenverzeichnis

Tab. 16.1: 4. Rückspülung mit 120 l Wasser.....	56
Tab. 17.1: 5. Rückspülung mit 120 l Wasser.....	58
Tab. 18.1: 1. Rückspülung mit 100 l Wasser.....	62
Tab. 18.2: 1. Rückspülung mit 100 l Regenwasser	62
Tab. 18.3: 2. Rückspülung mit 100 l Regenwasser	63
Tab. 18.4: 2. Rückspülung mit 100 l Wasser.....	63
Tab. 19.1: 2. Filtration von 50 l Wasser	65
Tab. 19.2: 12. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	65
Tab. 19.3: 13. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	66
Tab. 19.4: 14. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU	66

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Kalibrierflüssigkeiten mit Formazin.....	6
Abb. 5.1: Skizze vom Funktionsprinzip der Rückspülung.....	9
Abb. 6.1: Siebdurchgang von Rheinkies 8/16 mm.....	12
Abb. 6.2: Sieblinie von der verwendeten Gesteinskörnung für den Filteraufbau 1	13
Abb. 6.3: Sieblinie von der verwendeten Gesteinskörnung für den Filteraufbau 2	15
Abb. 6.4: Quarzsand 0/1 mm.....	16
Abb. 6.5: Quarzkies 2/5 mm.....	16
Abb. 6.6: Quarzkies 8/16 mm.....	16
Abb. 6.7: Quarzkies 16/32 mm.....	16
Abb. 7.1: Filteraufbau Skizze	21
Abb. 7.2: Trübungsmessgerät Wagtech turbity meter	22
Abb. 7.3: Filterunterbau	24
Abb. 7.4: Ausrichtung vom Filterunterbau.....	24
Abb. 7.5: Filteraufbau	24
Abb. 7.6: Filteraufbau mit Bütte.....	24
Abb. 8.1: Kuhle in der Sandoberfläche	26
Abb. 8.2: Bütte mit verdrecktem Wasser	26
Abb. 9.1: Filtertonne aufgefüllt mit Quarzsand 0/1 mm	27
Abb. 10.1: getrockneter Lehm in einem Eimer	31
Abb. 10.2: Bütte mi Lehm-Wasser-Gehmisch	31
Abb. 11.1: Eimer gefüllt mit verschiedenen Lehm-Wasser-Gemischen	35
Abb. 11.2: Bütte gefüllt mit einem Lehm-Wasser-Gemisch; mit 200g Lehm	35
Abb. 13.1: Oberflächiger Filterkuchen.....	40
Abb. 13.2: Filterkuchenabtrag	40
Abb. 14.1: Rückspülablauföffnung	46
Abb. 14.2: Rückspülablauf zur Bütte	46
Abb. 14.3: Rückspültonne	47
Abb. 14.4: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm	47
Abb. 14.5: Skizze zum Rückspülversuchs. mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm....	47
Abb. 14.6: Aufbrechen der Sandoberfläche	50
Abb. 14.7: Rückspülablauf in Betrieb	50
Abb. 14.8: Leh-Wasser-Gemisch aus Rückspülablauf.....	50
Abb. 15.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm	51
Abb. 15.2: Skizze zum Rückspülversuchs. mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm.....	52
Abb. 16.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm	54
Abb. 16.2: Skizze zum Rückspülversuchs. mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm...	55
Abb. 16.3: Lehm-Wasser-Gemisch aus Rückspülablauf mit 676 NTU	57
Abb. 17.1: Sandanteile	59
Abb. 18.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm	61
Abb. 18.2: skizze zum Rückspülversuchs. mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm	61

Abkürzungsverzeichnis

$\frac{1}{2}$ "	veraltete Längeneinheit für Zoll
DIN	Deutsches Institut für Normung
EG	Europäische Gemeinschaft
g	Fallbeschleunigung
Geka	Klauenkupplung Schlauchanschluss
G $\frac{3}{4}$	Gewindedurchmesser in $\frac{3}{4}$ Zoll
h	Höhe
l	Liter
μ m	Mikrometer
N	Newton
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
π	Kreiszahl / Pi
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)
ρ	Roh (Massendichte)
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
V	Volumen
WHO	World Health Organization

1 Einleitung

Wasser gilt als die Quelle des Lebens und doch wird seine flächendeckende, saubere Bereitstellung in der Gegenwart nicht allen Völkern zuteil: Heute haben schätzungsweise fünf Milliarden Menschen – das entspricht knapp zweidrittel der Weltbevölkerung – einen Zugang zu einer *nachhaltigen* wie auch *sicheren, sofort verfügbaren* und *sauberen Trinkwasserquelle*. Eine *grundlegende Wasserversorgung*, die noch unter einer halben Stunde erreicht werden kann, stehen zumindest 1,3 Milliarden Menschen zu Verfügung.¹ Aktuelle Schätzungen des Kinderhilfswerks UNICEF zufolge haben rund 660 Millionen Menschen aber *überhaupt keinen Zugang* zu sauberem Trinkwasser. Darüber hinaus fehlen ca. 2,4 Milliarden Menschen hygienische Latrinen oder Toiletten. Jährlich sterben in etwa 842.000 Menschen an den Folgen von Magen-Darm-Erkrankungen und Infektionen bedingt durch verunreinigtes Wasser. Vor allem Babys und Kleinkinder, deren Immunsysteme noch nicht ausgereift und damit besonders anfällig sind, werden von eben diesen Krankheiten bedroht. In der Konsequenz sterben jährlich rund 361.000 Kinder weltweit bevor sie das fünfte Lebensjahr erreichen.

Täglich müssen viele Kinder in den Entwicklungsländern – gerade in Regionen mit unzureichender Infrastruktur – weite Wege zurücklegen, um Wasser von entlegenen Quellen zu gewinnen und haben dadurch keine Zeit in die Schule zu gehen.² In erster Linie sind es Frauen und Mädchen, die etwa 40 Milliarden Stunden jährlich für die Suche nach Trinkwasser investieren müssen; und die Zahl wird mit Gewissheit weiter ansteigen: Laut UN- Prognosen sollen knapp sechs Milliarden Menschen im Jahr 2050 von Wasserknappheit bedroht sein.³

Die Verfügbarkeit von (Trink-)Wasser ist ein Grundrecht, das 2010 in der Erklärung der Menschenrechte der Vereinten Nationen festgeschrieben wurde. So ist es ein dringliches Anliegen der Weltbevölkerung, die Trinkwasseraufbereitung in Entwicklungsländern zu verbessern und damit den Menschen ihr grundlegendes Recht auf Trinkwasser zu gewährleisten.

¹ vgl. Welthungerhilfe 2018a

² vgl. UNICEF 2018

³ vgl. Welthungerhilfe 2018b

Einen möglichen Lösungsweg stellen dabei einfache, sog. *low-tech*-Systeme für Trinkwasseraufbereitung dar: Sie können effizient – also mit wenig Arbeitsaufwand bei geringen materiellen und finanziellen Kosten – erstellt werden: Mit einfachen Methoden kann aus verdrecktem Wasser, sauberes Trinkwasser gewonnen werden.

In vorangegangenen Untersuchungen konnten hierbei schon erste wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden: So untersuchte man ein Verfahren zur einfachen Rohwasserdesinfektion, bei dem Chlor aus einer Salzlösung gewonnen und anschließend zur Wasserreinigung verwendet wurde. Dabei ergab sich, dass aufgrund der im Rohwasser enthaltenen Feststoffe eine hohe Wiederverkeimungsgefahr bestand, die aber mithilfe eines überdrucklosen Sandfilters deutlich reduziert werden konnte.

Genau hier knüpft die vorliegenden Bachelor-Thesis an, indem der Filteraufbau einer vorangegangenen Untersuchung modifiziert und mittels Filterregeln überprüft werden soll. Der gewählte Filteraufbau wird anschließend mit dem Ziel der Filtersättigung durch ein Lehm-Wasser-Gemisch beaufschlagt, um schließlich ein Verfahren der Reinigung des Filtermaterials zu überprüfen. Hierzu wird eine Rückspülung mit verschiedenen Wasserdruckhöhen durchgeführt, um Erkenntnisse über eine möglichst optimale Wasserdruckhöhe zu gewinnen und im Idealfall eine effektive Reinigung des Filters zu erzielen. Gerade in Anbetracht dessen, dass in Entwicklungsländern häufig noch der Filtersand mühevoll mit der Hand gewaschen wird, vermag diese Methode eine *erhebliche* Verbesserung des Filteraufbaus aufzuzeigen.

2 Trinkwasseraufbereitung und Trinkwasserqualität

Um eine gute Trinkwasserqualität zu erreichen, ist meist eine Aufbereitung erforderlich. Die Aufnahme von unaufbereitetem Wasser kann aufgrund verschiedener Schadstoffe und Mikroorganismen zu ernsthaften, zum Teil tödlichen Erkrankungen führen. Durch Mikroorganismen werden meist nicht nur diejenigen mit Krankheitserregern infiziert, die das Wasser getrunken haben oder mit dem Wasser in Berührung kamen, sondern eben auch diejenigen, die bloßen zwischenmenschlichen Kontakt mit bereits Infizierten hatten: So können bedrohliche Epidemien mit vielen Erkrankten und Toten entstehen: etwa brach um 1900 eine verheerende Cholera Epidemie in großen Teilen Asiens, Russlands und Europas aus, im Verlaufe derer rund eine halbe Millionen Menschen angesteckt wurden.⁴ Es ist unerlässlich das Rohwasser, welches aus Brunnen oder anderen Quellen entnommen wird, hinreichend zu filtern und zu desinfizieren, sodass keine Krankheitserreger mehr enthalten sind.

Mit diesem Ziel können verschiedene Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung angewandt werden. Die Art des Verfahrens richtet sich nach der Rohwasserqualität. So können *einfache* physikalische Aufbereitungsmethoden genutzt werden oder eben *komplexe*, mehrstufige Anlagen mit kombinierten, physikalischen, chemischen und biologischen Verfahren.⁵

Doch sind für die Entwicklungsländer komplizierte und kostenintensive Verfahren ungeeignet, woraufhin nach rudimentären aber effizienten Wegen der Wasseraufbereitung gesucht werden muss.

Aus diesem Grund werden von der Weltgesundheitsorganisation WHO seit 1958 internationale Standards für Trinkwasser formuliert, die seit 1982 als *WHO Guidelines for drinking-water quality* vorgelegt werden. Bis zum Jahr 2011 wurden sie dreimal überarbeitet und mit der darauffolgenden vierten Ausgabe auf den derzeit aktuellen Stand gebracht. In den Richtlinien sind u.a. die Anforderungen an die chemische, mikrobiologische und radiologische Wasserqualität enthalten.

⁴ vgl. Umweltbundesamt 2018

⁵ vgl. Rautenberg 2014, S.10

Die WHO-Vorgaben zur Trinkwasserqualität wurden von der Europäischen Kommission als wissenschaftliche Basis für die EG-Richtlinie über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch genutzt. Dies betrifft auch die in Deutschland geltende Trinkwasserverordnung, welche im Dezember 2012 zuletzt aktualisiert wurde und u. a. die Mindestanforderungen und Grenzwerte für das Trinkwasser bestimmt.

Auch die DIN 2000 gehört zu den anerkannten Regeln der Technik, auf die in der Trinkwasserverordnung mehrfach verwiesen wird. In ihr sind die Qualitätsanforderungen an Trinkwasser wie folgt zusammengefasst:⁶

- Das Wasser muss mikrobiologisch so beschaffen sein, dass durch den Gebrauch keine Bedrohung einer Erkrankung des Menschen besteht.
- Es muss frei von Keimen sein und die gesetzlichen Bestimmungen erfüllen.
- Die Konzentration der Stoffe, die sich im Trinkwasser befinden, dürfen nur so hoch sein, dass keine Schädigung der menschlichen Gesundheit – auch nach langem Gebrauch – zu befürchten ist.
- Es sollte zum Genuss anregen und appetitlich sein. Es muss klar, farblos, kühl sowie geruchlich und geschmacklich einwandfrei sein.

Diese Prämissen sollten für jedes Trinkwasser gelten und eine Grundlage für alle Menschen auf der Welt darstellen. Jedermann sollte Zugang zu hygienisch und chemisch unbedenklichem Trinkwasser haben, sodass keine Gefahr einer Erkrankung besteht. Auch wenn nicht unbedingt alle EG-Richtlinien erfüllt sind, kann mithilfe einfacher Filtermethoden im Ergebnis eine ausreichende Wasserqualität erreicht werden.

⁶ vgl. Rautenberg 2014, S.5f.

3 Trübung und Typische Trübungswerte

Die Trübung von Flüssigkeiten ist eine durch Lichtstreuung und Lichtabsorption hervorgerufener optischer Eindruck und ist keine physikalische Größe. Die Streuung des Lichts erfolgt dabei in Flüssigkeiten durch kleinste Mikropartikel.

In der Vergangenheit wurde die Trübung noch mit Hilfe eines durchsichtigen Behälters bestimmt, der auf der Rückseite mit einer Sichttafel versehen war. Diese Sichttafel war nummeriert und gab das Maß der Trübung an. Mit dem Auge wurde nun durch die Flüssigkeit auf die Sichttafel geschaut, und die Zahl, die gerade noch lesbar war, als Trübungswert bestimmt. Da diese Betrachtung auf Subjektivität beruht, war dieses Verfahren recht ungenau.

Auch Heute wird die Trübung noch mit optischen Verfahren gemessen. Die Messung erfolgt jedoch mit elektronischen Sensoren:

In der Regel unterscheidet man zwischen zwei Messverfahren:

- Die Schwächung der durchgehenden Lichtstrahlung (Durchlicht)
- Die Seitwärtsstreuung der Lichtstrahlung (Streulicht)

Üblicherweise liegt die Wellenlänge des Messlichtes im Infrarotbereich bei 860 nm (nach ISO 7027).

Hierzu stehen verschieden Messgeräte und Trübungseinheiten zu Verfügung. Um eine Vergleichbarkeit der Trübungen mit deren Einheiten zu erreichen, beziehen sich alle Trübungseinheiten auf die Flüssigkeit Formazin. Diese ist eine polymere chemische Verbindung aus Formaldehyd und Hydrazin.⁷

Die gebräuchlichen Trübungseinheiten sind wie folgt definiert:

- FAU *Formazine Attenuation Units* [Die Durchlichtmessung (Winkel 0°) gemäß den Vorschriften der Norm ISO 7027]
- FNU *Formazine Nephelometric Units* [Die Streulichtmessung (Winkel 90°) gemäß den Vorschriften der Norm ISO 7027]
- FTU *Formazine Turbidity Unit* (In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit)

⁷ vgl. Internetchemie 2018

- TE/F *Trübungseinheit/Formazin* (Deutsche Einheit, die in der Wasseraufbereitung verwendet wird)
- NTU *Nephelometric Turbidity Unit* (Messung bei 90° gemäß den Vorschriften der USA)

Für Formazin gelten die Beziehungen $FAU=FNU=FTU=TE/F=NTU$. Andere Flüssigkeiten wie Milch, deren Fetttropfen eine ähnliche Partikelgröße wie Formazin haben (ca. 1µm) liefern bei der Lichtmessung einen Unterschied von 50% der Messwerte.

Typische Trübungswerte:

Tab. 3.1: Typische Trübungswerte

Medium	Trübungswert (NTU)
Sauberes Wasser	0,02
Trinkwasser	0,05 - 0,5
Abwasser	100-2000
Formazin	4000
Milch (1,5%Fett)	5000

Kalibrierflüssigkeiten mit Formazin für das Trübungsmessgerät *wagtech-turbidity-meter*:

Von links nach rechts: 0.02 NTU, 20.0 NTU, 100 NTU, 800 NTU



Abb. 3.1: Kalibrierflüssigkeiten mit Formazin, 0.02 NTU, 20.0 NTU, 100 NTU, 800 NTU

Trübstoffe spielen auch in der Wasseraufbereitung eine wichtige Rolle. Denn auch an chemisch unbedenklichen Trübstoffen wie Tonteilchen können sich Keime und Viren anhaften bzw. umhüllen, was die Sicherheit der Desinfektion herabsetzt. Daher wird im Zuge der Aufbereitung auch die Eliminierung der Trübstoffe angestrebt.⁸

⁸ vgl. Wricke 2014, S.270

4 Filtration

Man spricht von einer Filtration, wenn durch eine poröse Schicht hindurch Feststoffteilchen, etwa kleine Lehmartikel, zurückgehalten werden, und eine Trennung der heterogenen Systeme stattfindet. In der Thesis wird hierfür ein überdruckloser Sandfilter verwendet.

Bei der Filtration können sog. Filterkuchen entstehen: Diese bilden sich, wenn sich die Feststoffteilchen *in* oder *auf* der porösen Schicht anstauen und eine eigene Filterschicht bilden. So übernimmt der Filterkuchen die Funktion, das Fest-Flüssig-Gemisch zu filtern und ermöglicht sehr kleine Feststoffteilchen vom Gemisch abzutrennen. Nun setzt sich die Filterschicht aus dem Filtermaterial und dem Filterkuchen zusammen. Ein klares Filtrat mit niedrigen Trübungswerten ist häufig erst dann erreichbar. Bei der Bildung eines Filterkuchens erhöht sich außerdem der Filterwiderstand und somit nimmt auch die Durchflussgeschwindigkeit zu. Je größer der Filterkuchen wird, desto höher der Filterwiderstand und desto langsamer vollzieht sich der Durchfluss. Deshalb sollten Filterkuchen ab einer bestimmten Größe entfernt werden. Die Art und Form, die Zusammensetzung und die Kompressibilität des zu filternden Gemischs sind für die Bildung des Filterkuchens entscheidend. Ein gut durchlässiger Kuchen baut sich anhand grober und starrer Feststoffpartikel auf. Grobe und glatte Teilchen ergeben einen Kuchen mit geringer Restfeuchte als Schichten aus feinen, rauen Feststoffteilchen. Eine Substanz, die stark kompressibel ist und Bestandteile von organischen Makromolekülen enthält, bildet einen schlecht durchlässigen Filterkuchen. Es ist möglich solche Suspensionen gegebenenfalls mit stufenweiser Erhöhung der Druckdifferenz oder mit konstanter Geschwindigkeit zu filtern.

Generell sollte daher das Filtermaterial einen geringen Strömungswiderstand besitzen. Außerdem sollte es kostengünstig sein und keine Trübung im Filtrat hervorrufen. Das Material muss auch eine mechanische Stabilität aufweisen, damit die Körnungen sich nicht miteinander vermischen.^{9 10}

⁹ vgl. Kremer 1991, S.66

¹⁰ vgl. Grohmann et al. 2011, S.275

5 Rückspülung von Filteranlagen

Das Reinigen des Filtermaterials durch Rückspülung ist in der heutigen Technik ein häufig angewandtes Verfahren. Eine Sättigung des Filters, die durch eine starke Verlangsamung der Durchflussgeschwindigkeit erkennbar wird, oder auch hohe Trübungswerte im Filtrat, können darauf hinweisen, dass das Filtermaterial gereinigt werden muss. In den Entwicklungsländern wird mit mühevoller Arbeit das Filtermaterial mit bloßen Händen gewaschen.

5.1 Grundlagen der Filterrückspülung

Eine Rückspülung könnte das Reinigen des Filters außerordentlich vereinfachen. Für die Rückspülung des verwendeten Filteraufbaus in dieser Thesis wird Wasser als Spülmedium verwendet. In geschlossenen Filtersystemen kann auch Luft als Spülmedium zur Rückspülung dienen. Während einer Filterrückspülung durchströmt das Wasser den Filter in entgegengesetzter Filtrationsrichtung. So können nach erfolgreichem Aufbrechen und Ablösen der Verunreinigungen vom Filtermaterial eben diese ausgespült und entfernt werden. Die Stützsicht wurde für den Filteraufbau bis knapp über den Rückspüleinflussstutzen errichtet, da so das Wasser, welches in den Filter gedrückt wird, sich erst in dem grobkörnigen Quarzkies verteilen und die nächsten Schichten gleichmäßiger durchströmen kann.

Hier sollte darauf geachtet werden, dass die Filterschicht, die zum Beispiel durch Quarzsand gebildet wird und nicht mitausgeschwemmt werden darf, keinen Verlust des Sandes zur Folge hat. Eine optimale Durchflussgeschwindigkeit während der Rückspülung ist dann erreicht, wenn die Sandkörner in Bewegung versetzt, aber nicht mitausgespült werden. Dadurch wird die Filterschicht aufgelockert und die Verunreinigungen können sich leichter lösen.^{11 12}

¹¹ vgl. Hancke 1998, S.115f.

¹² vgl. Grohmann et al. 2011, S.277

5.2 Skizze vom Funktionsprinzip der Rückspülung

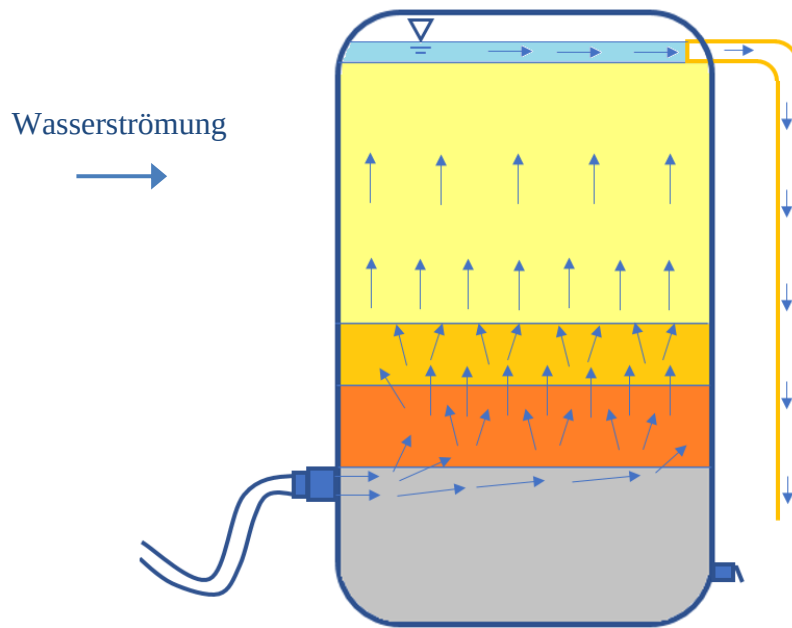


Abb. 5.1: Skizze vom Funktionsprinzip der Rückspülung

6 Auswahl des Filtermaterial

Zur Auswahl des Filtermaterials wurden zwei verschiedene Filteraufbauweisen miteinander verglichen. Im Vorfeld war es wichtig eine geeignete Korngruppe für das Filtermaterial zu wählen. In Bezug auf die Durchlässigkeit des Filtermaterials sind Korngruppen mit einer gleichmäßigen Filterkorngröße geeignet. Denn die Durchlässigkeit des Filterkieses ist umso größer, und damit der Filterwiderstand umso kleiner, je gleichmäßiger die Filterkorngröße, und je größer das Filterkorn ist. Filterkiese, die einen größeren Bereich der Sieblinie – z.B. die Korngruppe 3 bis 7 mm – umfassen, ähneln den Betonkieskörnungen, welche ein dichtes Gefüge anstreben, und sind daher eher ungeeignet. Sie sind auch deshalb dysfunktional, weil sich die einzelnen Korngruppen beim Einbringen leicht entmischen und ungleich lagern.¹³

Nach den Anforderungen nach EN 12904 zufolge ist die Korngruppe so festzulegen, dass Über- und Unterkorn den Anwendungen der jeweiligen Filterart entsprechen. Für ein Mehrschichtfilter sollen zum Beispiel die Anteile von Über- und Unterkorn kleiner als 5% sein.¹⁴

Tab. 6.1: Filteraufbau 1

Filteraufbau 1		Filteraufbau 2	
Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm	Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm
Schutzschicht	Natursteinsplitt 2/5 mm	Schutzschicht	Quarzkies 2/5 mm
	Rheinkies 8/16 mm		Quarzkies 8/16 mm
Stützschiicht	Kalksteinshotter 16/32 mm	Stützschiicht	Quarzkies 16/32 mm

Tab. 6.2: Filteraufbau 2

Für die Erstellung der Sieblinien wurden Proben des Filtermaterials in der Amtlichen Prüfstelle für Baustoffe und Beton der Hochschule Trier von einem Facharbeiter geprüft.

Um zu einem repräsentativen Probenquerschnitt zu gelangen, ist die Probenmenge in Abhängigkeit des in der Bodenprobe vorkommende Größtkorns zu variieren.

¹³ vgl. Fritsch 2014, S.190

¹⁴ vgl. Euroquarz 2018

DIN 18123 empfiehlt:

Tab. 6.3: Probenmenge in Abhängigkeit des Größtkorns der Bodenprobe

bei geschätztem Größtkorn der Bodenprobe in mm	Probenmenge in g mindestens
2	150
5	300
10	700
20	2000
30	4000
40	7000
50	12000
60	18000

Für die Siebanalyse wurden folgende Siebsätze aus Drahtsiebböden und Quadratlochplatten verwendet:

Maschenweiten: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 mm

Lochweiten: 4; 5,6; 8; 16; 31,5; 63 mm

Der Korndurchmesser wird dann mittels der Siebrückstände und der einzelnen Siebböden bestimmt. Der Siebrückstand der auf einem Siebboden liegen bleibt wird dann dem jeweils darunter liegenden Sieb zugewiesen. Die Kornfraktion des einzelnen Korn weist somit einen Korndurchmesser auf, der größer ist als desjenigen Siebes, auf dem es liegen bleibt, aber kleiner als die Siebweite des darüber angeordneten Siebes.

Durch Wiegen werden dann die Massen der einzelnen Siebrückstände auf den jeweiligen Sieben und der Auffangschale bestimmt. Die Massen der Rückstände m_i auf den einzelnen Sieben und der Auffangschale sowie ggf. des Filtrats werden jeweils durch die Gesamttrockenmasse m_d dividiert und in Prozent umgerechnet. Das Ergebnis wird anschließend als sogenannte Körnungslinie in Form einer Summenkurve (i.e. Sieblinie) grafisch dargestellt:¹⁵

$$(m_i/m_d) \cdot 100 = \text{Siebrückstand [\%]}$$

¹⁵ vgl. Schoen 2008/2009, S.5.1f.

6.1 Kornzusammensetzungen der Sieblinien von Filteraufbau 1

Für den Filteraufbau 1 wurde eine handelsübliche Rheinkieskörnung 8/16 mm als zweite Schutzschicht zum Vergleich verwendet, die auch in der vorangegangenen Thesis verwendet wurde. Dessen Sieblinie wurde von einem Baustofftechnischem Labor voruntersucht und übernommen. Die anderen Filterschichten wurden wie oben beschrieben erstellt.

Tab. 6.4: Siebrückstände von Quarzsand 0/1 mm

Korngruppe	Quarzsand 0/1 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
2,8	0	0	100
2	1	0,2	99,8
1	4,2	0,84	99,16
0,5	34,6	6,92	93,08
0,25	353,8	70,76	29,24
0,125	490,5	98,1	1,9
0,063	496	99,2	0,8
Auffang Σ	500	-	-

Tab. 6.5: Siebrückstände von Natursteinsplitt 2/5 mm

Korngruppe	Natursteinsplitt 2/5 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
8	0	0	100
5,6	122,7	12,3	87,7
4	432,8	43,3	56,7
2,8	-	-	-
2	908,6	90,9	9,1
1	992,6	99,3	0,7
Auffang Σ	1000	-	-

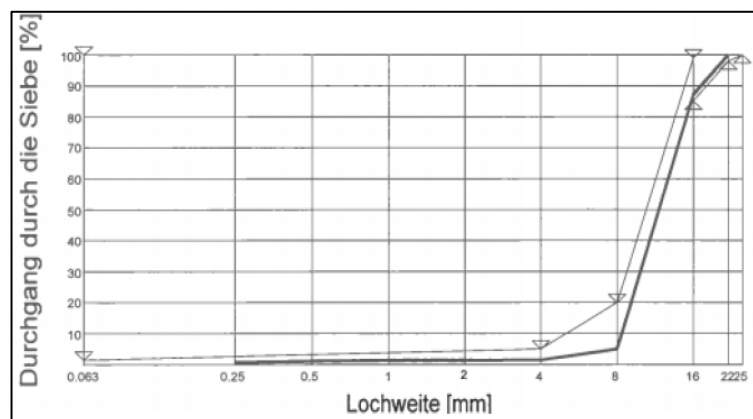


Abb. 6.1: Siebdurchgang von Rheinkies 8/16 mm ¹⁶

¹⁶ Kieswerke-Weiss 2018

Tab. 6.6: Siebrückstände von Kalksteinschotter 16/32 mm

Korngruppe	Kalksteinschotter 16/32 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
45	0	0	100
31,5	905	13,9	86,1
22,4	-	-	-
16	6038,8	92,8	7,2
11,2	-	-	-
8	6493	99,8	0,2
5,6	-	-	-
4	6493	99,8	0,2
Auffang Σ	6504	-	-

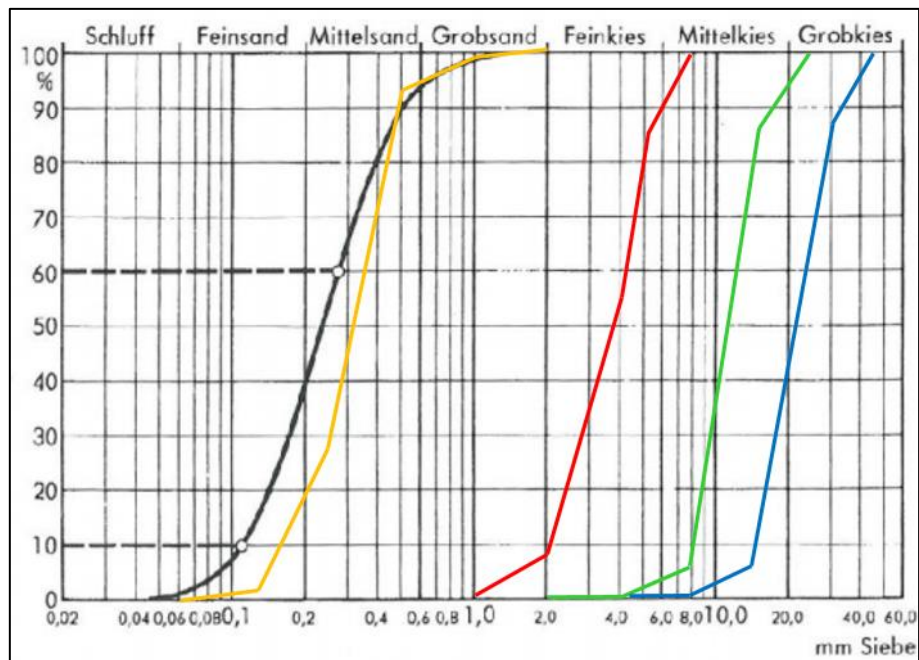


Abb. 6.2: Sieblinie von der verwendeten Gesteinskörnungen für den Filteraufbau 1

Legende für die Tabelle:

- Quarzsand 0/1 mm ● Natursteinsplitt 2/5 mm ● Rheinkies 8/16 mm
- Kalksteinschotter 16/32 mm

6.2 Kornzusammensetzungen der Sieblinien von Filteraufbau 2

Tab. 6.7: Siebrückstände von Quarzsand 0/1 mm

Korngruppe	Quarzsand 0/1 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
2,8	0	0	100
2	1	0,2	99,8
1	4,2	0,84	99,16
0,5	34,6	6,92	93,08
0,25	353,8	70,76	29,24
0,125	490,5	98,1	1,9
0,063	496	99,2	0,8
Auffang Σ	500	-	-

Tab. 6.8: Siebrückstände von Quarzkies 2/5 mm

Korngruppe	Quarzkies 2/5 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
8	0	0	100
5,6	0,7	0,1	99,9
4	125	12,5	87,5
2,8	-	-	-
2	978,5	97,9	2,1
1	1000	100,0	0,0
Auffang Σ	1000	-	-

Tab. 6.9: Siebrückstände von Quarzkies 8/16 mm

Korngruppe	Quarzkies 8/16 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
22,4	0	0,0	100
16	99	3,3	96,7
11,2	-	-	-
8	2882	95,8	4,2
5,6	-	-	-
4	2998	99,7	0,3
Auffang Σ	3008	-	-

Tab. 6.10: Siebrückstände von Quarzkies 16/32 mm

Korngruppe	Quarzkies 16/32 mm		
Korngröße in mm	Rückstand		Durchgang
	g	M.-%	M.-%
45	0	0	100
31,5	113	2,2	97,8
22,4	1954	38,5	61,5
16	4856	95,7	4,3
11,2	-	-	-
8	5069	99,9	0,1
5,6	-	-	-
4	-	-	-
Auffang Σ	5075	-	-

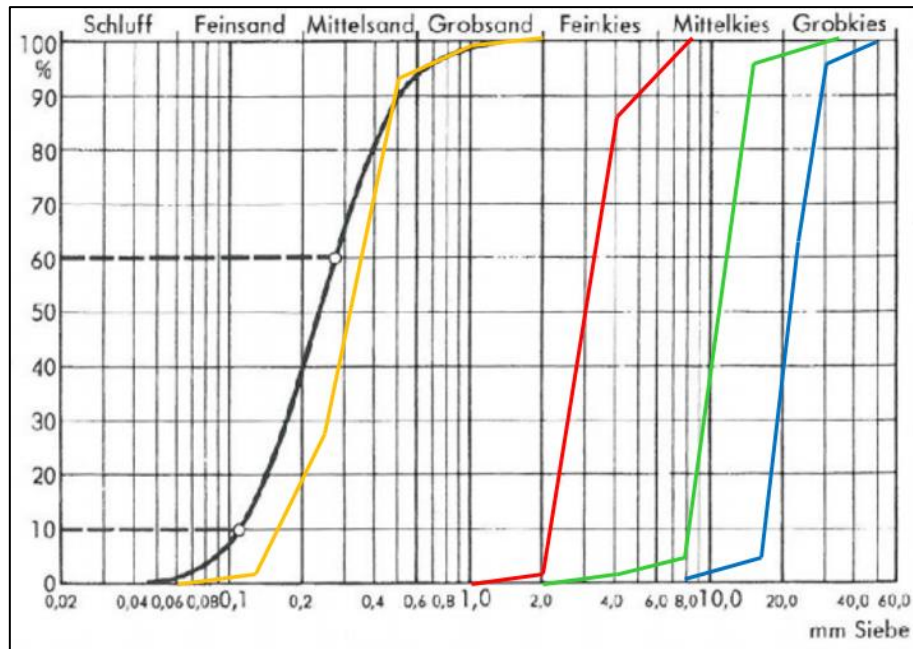


Abb. 6.3: Sieblinie von der verwendeten Gesteinskörnungen für den Filteraufbau 2

Legende für die Tabelle:

- Quarzsand 0/1 mm • Quarzkies 2/5 mm • Quarzkies 8/16 mm
- Quarzkies 16/32 mm

Bilder vom Filtermaterial für den Filteraufbau 2:



Abb. 6.4: Quarzsand 0/1 mm



Abb. 6.5: Quarzkies 2/5 mm



Abb. 6.6: Quarzkies 8/16 mm



Abb. 6.7: Quarzkies 16/32 mm

6.3 Betrachtung mittels Filterregeln

Für abgestufte Kies-Sand-Filter gelten verschiedene Filterregeln: „Überschlägig können Filterschichten so dimensioniert werden, dass das Korngrößenverhältnis der oberen zur unteren Lage D_{50}/d_{50} etwa zwischen 6 und 10 liegt.“¹⁷ Diese Formel ist aber nur im weitesten Sinne zu beachten, da sie sich nicht gänzlich auf den geprüften Filteraufbau übertragen lässt. D_{50} und d_{50} wurden aus dem Sieblinien-Diagramm abgelesen, die in Tab. 6.12 und Tab 6.13 aufgeführt werden.

Tab. 6.11: Überschlägliche Betrachtung für Filteraufbau 1

Filteraufbau 1		D_{50}/d_{50}
Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm	11,94
Schutzschicht	Natursteinsplitt 2/5 mm	
	Rheinkies 8/16 mm	3,22
Stützschiicht	Kalksteinshotter 16/32 mm	1,93

Tab. 6.12: Überschlägliche Betrachtung für Filteraufbau 2

Filteraufbau 2		D_{50}/d_{50}
Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm	9,52
Schutzschicht	Quarzkies 2/5 mm	
	Quarzkies 8/16 mm	3,8
Stützschiicht	Quarzkies 16/32 mm	1,92

Das Filtermaterial wurde zusätzlich mit der gängigen Formel nach *Terzaghi* und *Peck* betrachtet. Wenn U_f und $U_b > 2$ ergab, wurde nach dem *Cistin/Ziems*-Diagramm vorgegangen.

Anzumerken ist, dass die Formel nach *Terzaghi* und *Peck* zwei wesentliche Perspektiven ermöglicht. Zum *einen* betrachtet der Ausdruck $d_{15,f}/d_{85,b} < 4$ die Filterstabilität der aufeinander stehenden Bodenschichten. Dieser Nachweis muss erfüllt sein, da ansonsten die Bodenkörner durch die Strömungskraft in die nächste Bodenschicht gedrückt werden würden.

¹⁷ Sartor 2015, S. WB I – 5.28.

Zum *anderen* wird die Durchlassseffektivität durch den Ausdruck $d_{15,f} / d_{15,b} > 4$ beschrieben. Diese Betrachtung ist für den Filteraufbau und dessen Verwendungszweck von minderer Bedeutung.¹⁸

Tab. 6.13: Genauere Betrachtung für Filteraufbau 2

Filteraufbau 1		d ₁₀	d ₁₅	d ₅₀	d ₆₀	d ₈₅	U _{f,b} = d ₆₀ /d ₁₀
Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm	0,153	-	0,31	0,35	-	2,29
Schuttschicht	Natursteinsplitt 2/5 mm	2,1	2,25	3,7	4,25	5,5	2,02
	Rheinkies 8/16 mm	8,1	8,5	-	12,5	15,9	1,54
Stüttschicht	Kalksteinshotter 16/32 mm	16,8	17,4	-	25,5	-	1,52

Tab. 6.14: Genauere Betrachtung für Filteraufbau 2

Filteraufbau 2		d ₁₀	d ₁₅	d ₅₀	d ₆₀	d ₈₅	U _{f,b} = d ₆₀ /d ₁₀
Filterschicht	Quarzsand 0/1 mm	0,153	-	0,31	0,35	-	2,29
Schuttschicht	Quarzkies 2/5 mm	2,1	2,25	2,95	3,25	4,0	1,55
	Quarzkies 8/16 mm	8,4	8,65	-	12,1	14,8	1,44
Stüttschicht	Quarzkies 16/32 mm	17,0	17,5	-	23,0	-	1,35

Terzaghi und Peck:

$$d_{15,f} / d_{85,b} < 4 \text{ und } d_{15,f} / d_{15,b} > 4$$

mit: $U_f < 2$ und $U_b < 2$

Cistin/Ziems-Diagramm-Verfahren:

$A_{50,zul.}$ = wird im Diagramm abgelesen

$$A_{50,vorh.} = d_{50,f} / d_{50,b}$$

$$A_{50,zul.} > A_{50,vorh.}$$

Bereich: $0,1 \text{ mm} < d_{50,b} < 30 \text{ mm}$ und $4 \text{ mm} < d_{50,f} < 100 \text{ mm}$ ¹⁹

¹⁸ vgl. Schoen 2018

¹⁹ vgl. Saenger 2016, S.13.44f.

Filteraufbau 1

Für Quarzsand 0/1 mm und Natursteinsplitt 2/5 mm mit:

$$A_{50,zul} = 11 \text{ und } A_{50,vorh.} = 3,7 \text{ mm} / 0,31 \text{ mm} = 11,94$$

$$A_{50,zul.} > A_{50,vorh.}$$

$$11 > 11,94 \rightarrow \text{Nachweis nicht erfüllt}$$

Bereich: $4 \text{ mm} < 3,7 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$, liegt nicht im Bereich

Für Natursteinsplitt 2/5 mm und Rheinkies 8/16 mm mit:

$$A_{50,zul} = 8,1 \text{ und } A_{50,vorh.} = 11,9 \text{ mm} / 3,7 \text{ mm} = 3,22$$

$$A_{50,zul.} > A_{50,vorh.}$$

$$8,1 > 3,22 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Bereich Bedingung erfüllt

Für Rheinkies 8/16 mm und Kalksteinschotter 16/32 mm mit:

$$d_{15,f}/d_{85,b} < 4 \text{ und } d_{15,f}/d_{15,b} > 4$$

$$17,4 \text{ mm} / 15,9 \text{ mm} = 1,09 < 4 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$17,4 \text{ mm} / 8,5 \text{ mm} = 2,05 > 4 \rightarrow \text{Nachweis nicht erfüllt}$$

Filteraufbau 2

Für Quarzsand 0/1 mm und Quarzkies 2/5 mm mit :

$$A_{50,zul} = 8,4 \text{ und } A_{50,vorh.} = 2,95 \text{ mm} / 0,31 \text{ mm} = 9,52$$

$$A_{50,zul.} > A_{50,vorh.}$$

$$8,4 > 9,52 \rightarrow \text{Nachweis nicht erfüllt.}$$

Bereich: $4 \text{ mm} < 2,95 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$, liegt nicht im Bereich.

Für Quarzkies 2/5 mm und Quarzkies 8/16 mm mit:

$$d_{15,f}/d_{85,b} < 4 \text{ und } d_{15,f}/d_{15,b} > 4$$

$$8,65 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = 2,16 < 4 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$8,65 \text{ mm} / 2,25 \text{ mm} = 3,85 > 4 \rightarrow \text{Nachweis nicht erfüllt}$$

Für Quarzkies 8/16 mm und Quarzkies 16/32 mm mit:

$$d_{15,f}/d_{85,b} < 4 \text{ und } d_{15,f}/d_{15,b} > 4$$

$$17,5 \text{ mm} / 14,8 \text{ mm} = 1,18 < 4 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$17,5 \text{ mm} / 8,65 \text{ mm} = 2,02 > 4 \rightarrow \text{Nachweis nicht erfüllt}$$

6.4 Ergebnisse der Berechnungen

Vergleicht man die Ergebnisse miteinander, so weisen sie für den zweiten Filteraufbau eine bessere Filterstabilität auf. Zwar konnten nicht alle Nachweise erfüllt werden, doch sollte den Berechnungen zufolge während des Filtrationsprozesses kein Quarzsand in die Schutz- und Stüttschicht mitgespült werden, wodurch voraussichtlich einer Erosion vorgebeugt werden kann: „Bei einer Erosion werden fast alle Fraktionen eines Erdstoffes transportiert.“²⁰ So findet eine Umlagerung wie auch ein Transport fast aller Kornfraktionen eines Bodens als Folge von Wasserströmung statt, was möglichst vermieden werden sollte. Da die Stütz- und Schutzschichten aus einer Art von Gesteinskörnung (i.e. Quarzkies) bestehen, können sie aus einem Material durch Sieben erzeugt und für den Filter verwendet werden. Sie sollten enggestuft, also mit einem geringen Anteil von Über- und Unterkorn generiert werden. So steigt die Durchlassfähigkeit der Schichten und der Filter kann mit einer größeren Menge an Lehm-Wasser-Gemisch beaufschlagt werden. In einer vorangegangenen Thesis konnte eine gute Filtereffektivität, mit dem Filteraufbau 1 nachgewiesen werden. Infolgedessen wurden die Schichtdicken für den Filteraufbau 2 mit geringen Abweichungen gewählt. So fand eine Erhöhung der ersten Schutzschicht Quarzkies 2/5 mm auf 8 cm statt, mit dem Ziel eine höhere Filterstabilität der aufeinander stehenden Schichten zu gewährleisten.

²⁰ Lattermann 2010, S. 141

7 Filteraufbau

Für die Filterkonzeption kamen zwei Spannring Deckelfässer zum Einsatz, die bereits der Filter- und Rückspültonne aus dem Versuchsaufbau einer vorangegangenen Thesis dienten. Mit einer Bohrmaschine wurden zuerst Löcher für den Rückspülanschluss und das Auslaufventil gebohrt. Für den Anschluss der Rückspülung fand eine Verschraubung des Kugelhahns mit einer Geka Schnelkupplung statt. Um sicherzustellen, dass die Verbindung auch bei höherem Druck ausreichend dicht ist, wurden die Gewindegänge mit Hanf umwickelt. Zusätzlich erfolgte eine Installation der Gummidichtungen zwischen dem Rückspülanschluss und der Tonne wie auch des Kugelauslauventils. Da die Anschlüsse ein relativ hohes Eigengewicht hatten und aufgrund des langen Hebels die Gefahr des Kippens bestand, musste Silikon eingespritzt werden, um eine vollständige Dichtung der Verbindung zu erreichen.

7.1 Filteraufbau Skizze

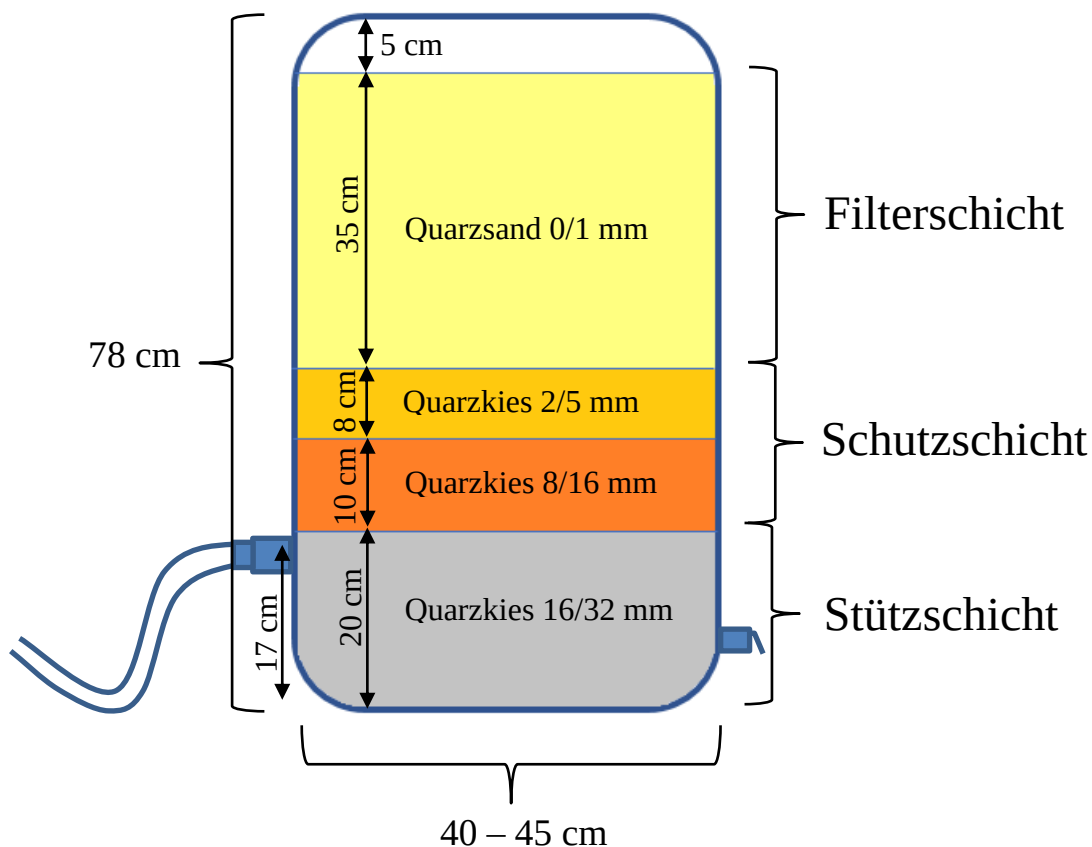


Abb. 7.1: Filteraufbau Skizze

7.2 Materialliste der Versuchsgegenstände

- 2x Spannring Deckelfass mit jeweils 120 Liter Fassungsvermögen und Gefah-
rengutzulassung
- 2x Geka Schnelkupplung mit Außengewinde 26,5 mm (G $\frac{3}{4}$) aus Messing
- 2x Geka Schnelkupplung, Messing Schlauchstück 13 mm ($\frac{1}{2}$ ")
- 1 Zoll Kugelhahn aus Messing, verchromt
- $\frac{1}{2}$ Zoll Kugel-Auslaufhahn aus Messing, vernickelt
- Renovo Sanitär-Silikon weiß
- Dichtungshanf
- Handelsübliche 10 Liter Eimer und ein 15 Liter mit Messlinien versehen.
- 4x Betonwürfel (15cm x 15cm)
- Kunstfaserflies
- Wasserwaage
- PVC-Schlauch; Ø innen: 16mm; Wandstärke 2,5 mm; Länge 4 m
- PVC-Schlauch; Ø innen: 18mm; Wandstärke 2,5 mm; Länge 91 cm
- Küchenwaage
- Trübungsmessgerät *Wagtech turbidity meter*



Abb. 7.2: Trübungsmessgerät *Wagtech turbidity meter*

7.3 Aufbaubeschreibung

Der Filteraufbau fand auf einem Unterbau aus vier Betonwürfeln mit den jeweiligen Maßen 15x15 cm statt. Zur Kontrolle der horizontalen und vertikalen Ausrichtung diente eine Wasserwaage mit der Länge von 100 cm. Ausgeglichen werden konnte die Höhendifferenz zur Optimierung mit einem Kunstfaserflies, was mehrlagig unter die Betonwürfel gelegt wurde.

In der Folge erreichte die Filtertonne eine Aufstellhöhe von 30 cm. Mittels Ablesen der Libelle wurde erneut die Ausrichtung überprüft, wobei zu bemerken ist, dass weiterhin ein leichtes Gefälle in Richtung des Abflussventils bestand. Anschließend begann die Befüllung der Filtertonne mit der Stützschticht aus Quarzkies 32/16 mm, bis auf eine Höhe von 20 cm. Sorgsam wurden mithilfe zwischenzeitlicher Verteilung und Verdichtung drei 10 Liter Eimer hierfür mit o.g. Material befüllt und etappenweise der Tonne hinzugegeben.

Analog erfolgte eine Befüllung der nächsten Schutzschichten und der Filterschticht. Die erste Schutzschicht aus Quarzkies 8/16 mm bedurfte zwei gefüllten Eimern, um eine Gesamthöhe von 30 cm zu erreichen. Im Anschluss wurde die zweite Schutzschicht bestehend aus Quarzkies 2/5 mm hinzugegeben, die ebenfalls zwei gefüllte Eimer benötigte, um auf eine Gesamthöhe von 38 cm zu kommen. Zuletzt konnte die Filterschticht aus Quarzsand 0/1 mm erstellt werden. Fünf volle Eimer Quarzsand erreichten die Gesamthöhe von 63 cm.

Nach dem erstem Testlauf, der im Folgenden genauer beschrieben wird, wurden nachträglich zwei weitere gefüllte Eimer mit Quarzsand 0/1 mm hinzugefügt, um die geplante Höhe von 73 cm zu erlangen.

(Danach konnte mit den weiteren Versuchen begonnen werden.)

7.4 Bilder

*Abb. 7.3: Filterunterbau**Abb. 7.4: Ausrichtung des Filterunterbaus**Abb. 7.5: Filteraufbau**Abb. 7.6: Filteraufbau mit Bütte*

8 Testlauf der Filteranlage

Der verwendete Quarzsand und -kies wurde vor dem Einbau in die Filtertonne nicht gereinigt. Mit dem ersten Testlauf sollte überprüft werden, inwiefern das Filtermaterial noch Verunreinigungen aufwies. Auch bestand die Vermutung der Verdichtung des Quarzsandes durch den Testlauf.

8.1 Versuchsbeschreibung

Um den Sand zu verdichten und eine erste Reinigung des Filtermaterials zu bewirken, erfolgte eine Beaufschlagung des Filters mit zunächst 50 Litern Wasser und einem Trübungswert von 0,00 NTU.

8.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurden 100 Liter Wasser mit 0,00 NTU in einen schwarzen Auffangbehälter resp. eine Plastikbütte gefüllt. Vor dem Beaufschlagen des Wassers wurde das Auslaufventil der Filtertonne geöffnet. Mithilfe eines 15 Liter Eimers, der mit einer Messlinie versehen war, konnte nun in 10 Liter-Schritten der Filter mit dem Wasser aus der Bütte beaufschlagt werden. Der Abstand von der Quarzsandoberfläche und der Oberkante der Filtertonne betrug 15 cm. Dadurch konnte ein Eimer mit 10 Litern Wasser vollständig in die Filtertonne geschüttet werden. Sobald das Wasser das Filtermaterial durchflossen hatte, begannen die Messungen der Trübungswerte; darauffolgend wurde der Trübungswert kontinuierlich alle 10 Minuten ermittelt.

8.3 Messwerte

Tab. 8.1: 1. Filtration von 50 l Wasser

Filtration von 50 Liter Wasser mit 0,00 NTU					
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration		
Uhrzeit	Dauer	Wassermenge	Uhrzeit	Zeit	Trübungswert
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]
11:54	3	50			
11:57			11:57	3	682
			12:04	10	373
			12:14	20	211
			12:24	30	199

8.4 Ergebnisse

Durch die große Fallhöhe des Wassers auf den Quarzsand bildete sich eine Kuhle. Es konnten innerhalb von drei Minuten 50 Liter Wasser in die Filtertonne geschüttet werden. Die Durchflussgeschwindigkeit des Wassers war vergleichsweise hoch und die erste Messung konnte nach drei Minuten erfolgen. Die Messergebnisse zeigten, dass das Filtermaterial noch stark verunreinigt war, und kleinste Partikel mitausgespült wurden. Es dauerte nur eine halbe Stunde bis die letzten Tropfen des verunreinigten Wassers aus dem Auslaufventil traten. Beobachtungen zeigten ein Absenken und eine Verdichtung des Quarzsandes.



Abb. 8.1: Kuhle in der Sandoberfläche



Abb. 8.2: Bütte mit verdrecktem Wasser

9 Reinigung des Filtermaterials

Der erste Testlauf der Filteranlage ergab, dass sich die Trübungswerte des Wassers nach dem Durchlaufen des Filters stark anstiegen. Eine Verunreinigung des Filtermaterials konnte somit nachgewiesen werden, und um dementsprechend eine Filterwirkung beurteilen zu können, musste das Filtermaterial zuerst gereinigt werden.

9.1 Versuchsbeschreibung

Zur Optimierung wurden zwei weitere Eimer voll Quarzsand in die Filtertonne gegeben und mit der Hand verdichtet. In der Folge konnte die geplante Gesamthöhe des Filtermaterials von 73 cm erreicht werden.

Auf eine effektivere Reinigung des Filters abzielend wurde für die nächsten drei Durchläufe die Wassermenge auf 100 Liter mit 0,00 NTU erhöht. Die Beaufschlagung des Wassers erfolgte anstelle der Verwendung eines Eimers mithilfe eines Gartenschlauches.



Abb. 9.1: Filtertonne aufgefüllt mit Quarzsand 0/1 mm

9.2 Versuchsdurchführung

Damit weiterhin präzise Messergebnisse zu gewährleisten waren, mussten zunächst Hochrechnungen zur Ausflussgeschwindigkeit des Gartenschlauchs angestellt werden. Mit dem festgelegten Modus *Sprühstrahl* des Gartenschlauchs, konnten innerhalb von zwei Minuten 10 Liter Wasser in den Eimer befüllt werden. Unter Hinzunahme einer

Stoppuhr wurden dann relativ exakt die 100 Liter Wasser beaufschlagt. Der Balanceakt, die Filtertonne nicht zu überfüllen, konnte durch kurzzeitiges Unterbrechen der Wasserzufuhr und durch simultanes Pausieren der Stoppuhr erzielt werden. Auf dieser Grundlage Beaufschlagungsintervall recht genau bestimmt und notiert werden.

Die erste Trübungsmessung erfolgte 10 Minuten nach der Beaufschlagung durch das Wasser. Nach vierzig Minuten wurden die Messungen dann alle 10 Minuten durchgeführt.

9.3 Messwerte

Tab. 9.1: 1. Filtration von 100 l Wasser

Filtration von 100 Liter Wasser mit 0,00 NTU					
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration		
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]
13:10	2	10			
13:12					
13:13	2	10			
13:15					
13:15	4	10			
13:19					
13:22	3	10	13:20	10	542
13:25					
13:27	2	10			
13:29					
13:31	3	10			
13:34					
13:35	3	10			
13:38					
13:39	2	10			
13:41					
13:44	2	10			
13:46					
13:48	2	10			
13:50					
			13:50	40	63,7
			14:10	50	43,3
			14:20	80	51,6

Tab. 9.2: 2. Filtration von 100 l Wasser

Filtration von 100 Liter Wasser mit 0,00 NTU					
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration		
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]
14:30	2	10			
14:32					
14:34	2	10			
14:36					
14:37	2	10			
14:39					
14:47	2	10	14:40	10	352
14:49					
14:49	3	10			
14:52					
14:53	3	10			
14:56					
14:58	2	10			
15:00					
15:02	2	10			
15:04					
15:05	2	10			
15:07					
15:08	2	10			
15:10					
			15:20	50	17,24
			15:30	60	18,2
			15:40	70	20,1
			15:50	80	23,7

Tab. 9.3: 3. Filtration von 100 l Wasser

Filtration von 100 Liter Wasser mit 0,00 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert			
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]			
10:00	2	10						
10:03								
10:05	2	10						
10:07								
10:08	2	10				10:10	10	184
10:10								
10:12	3	10						
10:15								
10:16	2	10				10:19	19	48,6
10:18								
10:21	2	10						
10:23								
10:24	2	10						
10:26								
10:27	2	10						
10:29								
10:33	2	10						
10:35								
10:37	2	10						
10:39								
						10:40	40	25
						10:50	50	21,7
						11:00	60	18,49
						11:10	70	17,64
			11:20	80	17,96			
			11:30	90	17,26			
			11:40	100	17,28			
			11:50	110	17,16			
			12:00	120	17,16			

9.4 Ergebnisse

Die Messergebnisse offenbarten, dass nach dem Beaufschlagen mit 350 Litern Wasser noch Verunreinigungen des Filtermaterials festzustellen waren. Es konnte beobachtet werden, dass zu Beginn eines Reinigungsdurchlaufes, die Trübungswerte noch sehr hoch, im Laufe der Zeit aber gesunken waren.

Die Trübungswerte fielen zwar nach jedem Reinigungsdurchlauf, aber eine vollständige Reinigung des Filtermaterials konnte durch die Versuche nicht erreicht werden. Vergleicht man die Messwerte untereinander, zeigen sich eine kontinuierliche Verbesserung der Trübungswerte und eine Reinigung des Materials.

10 Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch zur Überprüfung der Filtereffizienz

Zur Überprüfung der Filtereffizienz konnte im Anschluss der Filterreinigung nun der Filter mit einem Lehm-Wasser-Gemisch beaufschlagt werden. Anzumerken ist, dass das Filtermaterial nicht vollständig gereinigt wurde, und es als wahrscheinlich gilt, dass bei der Beaufschlagung mit dem Lehm-Wasser-Gemisch immer noch Verunreinigungen des Filtermaterials mitausgespült wurden.

10.1 Versuchsbeschreibung

Um die erhaltenen Messergebnisse in einen vergleichbaren Kontext zu setzen, wurde vor jedem Filterdurchlauf ein Lehm-Wasser-Gemisch nahe der Trübungswert-Messgrenze des Messgerätes verwendet (< 1000 NTU). Dieses Gemisch bestand anteilig aus getrocknetem Lehm (aus einer Baugrube) und aus Wasser mit Trübungswert $0,00$ NTU.

10.2 Versuchsdurchführung

Es erfolgte in einem Eimer eine Zerkleinerung des getrockneten Lehms und anschließend dessen Vermischung mit Wasser. Dieses Gemisch hatte einen – selbst mit Messgeräten nicht erfassbaren – Trübungswert. Nun wurde in einer Bütte mithilfe des Lehm-Wasser-Gemischs und zusätzlichen Wassers ein 100 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit einem Trübungsgrad nahe 1000 NTU angerührt. Dieses Gemenge wurde mit einem Eimer in 10 Liter-Schritten beaufschlagt, während zeitgleich die Einfülldauer gemessen wurde. Analog zum ersten Versuch fand auch hier die Befüllung der Filtertonne bis zur Oberkannte statt. Die Trübungswerte wurden alle 5 Minuten nach Beginn des Beaufschlagens des Filters und nach Ablauf der 90 Minuten alle weitere 10 Minuten gemessen. Zusätzlich fand eine Notation der Auslaufzeiten, der Auslaufdauer und der gefilterten Wassermenge statt.



Abb. 10.1: getrockneter Lehm in einem Eimer



Abb. 10.2: Bütte mit Lehm-Wasser-Gemisch

10.3 Messwerte

Tab. 10.1: 1. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 914-967 NTU					
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration		
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]
12:43 12:44	1	10			
12:44 11:46	2	10			
12:47 12:50	3	10			
12:51 12:53	2	10			
12:56 12:58	2	10			
			12:53	10	282
			13:03	20	58,5
			13:13	30	44,5
			13:23	40	39,9
			13:28	45	39,6
			13:33	50	38,6
			13:38	55	40,6
			13:43	60	39,8
			14:03	80	39,9

Tab. 10.2: 2. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 961-992 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
11:10 11:11	1	10						
11:12 11:14	2	10						
11:18 11:19	1	10	11:15	5	338	11:15	4	10
11:22 11:24	2	10	11:20	10	174	11:19		
11:27 11:30	3	10	11:25	15	106		10	10
			11:30	20	74,8	11:29		
			11:35	25	48,7		16	10
			11:40	30	45,4			
			11:45	35	39,9	11:45		
			11:50	40	38,1		19	10
			11:55	45	35,4			
			12:00	50	33,5			
			12:05	55	33,4	12:04		
			12:10	60	31,8		31	10
			12:15	65	30,6			
			12:20	70	30,4			
			12:25	75	29,9			
			12:30	80	30,0			
			12:35	85	46,4	12:35		

Tab. 10.3: 3. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 951-992 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
13:15 13:16	1	10						
13:17 13:22	5	10	13:20	5	158	13:20	8	10
13:24 13:29	5	10	13:25	10	127	13:28		
13:31 13:36	5	10	13:30	15	90	13:34	6	10
13:37 13:42	5	10	13:35	20	60,8			
			13:40	25	41,2		13	10
			13:45	30	39,7	13:47		
			13:50	35	33,2		19	10
			13:55	40	31,8			
			14:00	45	30,5			
			14:05	50	30,3	14:06		
			14:10	55	28,9		34	10
			14:15	60	28,8			
			14:20	65	28,8			
			14:25	70	28,2			
			14:30	75	28,2			
			14:35	80	28,2			
			14:40	85	29,9	14:40		

Tab. 10.4: 4. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 973-989 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
15:45 15:48	3	10						
15:50 15:54	4	10	15:50	5	34,6	15:50	8	10
15:55 15:59	4	10	15:55	10	65,6	15:58		
16:02 16:07	5	10	16:00	15	55,5	16:05	7	10
16:09 16:12	3	10	16:05	20	38,2			
			16:10	25	30,0	16:12	7	10
			16:15	30	19,42	16:23	11	10
			16:20	35	21,1			
			16:25	40	19,84			
			16:30	45	16,44			
			16:35	50	16,62			
			16:40	55	16,40			
			16:45	60	16,66			
			16:50	65	16,65			
			16:55	70	16,51			
			17:00	75	16,52			
			17:05	80	15,97			
			17:10	85	15,61	17:10	37	10

Tab. 10.5: 5. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 902-982 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
09:30 09:32	2	10						
09:33 09:40	7	10	09:40	10	34,4	09:37	10	10
09:41 09:47	6	10	09:45	15	46,7	09:47		
09:49 09:56	7	10	09:50	20	37,8	09:53	6	10
09:58 10:06	8	10	09:55	25	30,6			
			10:00	30	23,9	10:01	8	10
			10:05	35	20,7			
			10:10	40	18,69	10:09	8	10
			10:15	45	18,20			
			10:20	50	18,97			
			10:25	55	18,55			
			10:30	60	17,82			
			10:35	65	17,58			
			10:40	70	17,55			
			10:45	75	17,30			
			10:50	80	16,88			
			10:55	85	16,70			
			11:00	90	19,09	11:00	51	10

Tab. 10.6: 6. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 955-972 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
12:00								
12:03	3	10						
12:04			12:05	5	26,6	12:05		
12:11	7	10	12:10	10	38,3		8	10
12:13			12:15	15	46	12:13		
12:21	8	10	12:20	20	33,5		8	10
12:23			12:25	25	27,5	12:21		
12:31	8	10	12:30	30	22,3	12:30	9	10
12:33			12:35	35	20,4			
12:42	9	10	12:40	40	18,15	12:41	11	10
			12:45	45	17,49			
			12:50	50	15,73			
			12:55	55	14,68			
			13:00	60	14,30			
			13:05	65	13,94			
			13:10	70	13,83			
			13:15	75	13,34			
			13:20	80	13,76	13:20		
							39	10

10.3 Ergebnisse

Nach jedem Filterdurchlauf sanken von Versuch zu Versuch die Trübungswerte bei zeitgleicher Verlangsamung der Durchflussgeschwindigkeit. Die Lehmteilchen verteilten sich in den Hohlräumen und verdichteten das Gefüge des Filtermaterials. An dieser Stelle wurde ein Filterkuchen allerdings noch nicht vermutet.

In einem Filterdurchlauf selbst wurden anfangs sehr hohe Trübungswerte gemessen, die womöglich auf Verunreinigungen des Filtermaterials zurückzuführen sind. Mit Abnahme der Durchlaufgeschwindigkeit sanken auch die Trübungswerte. Eine Filterwirkung konnte schon nach dem ersten Filterdurchlauf festgestellt werden. Hier wurden Trübungswerte im Bereich von Quellwasser (40-100NTU) gemessen.

11 Verhältnis zwischen Lehm und Wasser

Um die in Kapitel 12 dargestellte Beaufschlagung evaluieren zu können, bedurfte es Überlegungen und Hochrechnungen der Verhältnismäßigkeit zwischen Lehm und Wasser, welche als Gemisch hohe Trübungswerte aufweisen sollten. Weil das Trübungsmessgerät nur Werte < 1000 NTU anzeigt, wurden die Proben solange modifiziert bis das Lehm-Wasser-Gemisch einen nicht mehr messbaren Wert anzeigte.

11.1 Versuchsbeschreibung

Die Überlegung hierzu war, Lehm abzuwiegen und in verschiedenen Portionen mit immer der gleichen Menge Wasser anzumischen. So konnte überschlägig ein Verhältnis zwischen Lehm und Wasser ermittelt werden. Demnach war es möglich, die Ergebnisse des zuvor bestimmten Verhältnisses an einer quantitativ größeren Menge an Lehm-Wasser-Gemisch zu überprüfen und zu vergleichen.

11.2 Versuchsdurchführung

Dabei erfolgte eine Gewichtsmessung der drei verschiedene Mengen Lehm (5, 10, 20 und 200 Gramm) mit einer Küchenwaage. Danach wurden drei Eimer mit jeweils 10 Litern Wasser befüllt und mit den jeweiligen Mengen Lehm verunreinigt. Der Lehm konnte mit einem Holzstab adäquat zerkleinert werden. Nach Beginn der Zugabe vom Lehm wurde zwei Stunden lang im 10 Minuten-Takt das Lehm-Wasser-Gemisch aufgerührt und die jeweiligen Trübungswerte gemessen. Bis auf den Versuch mit 5g Lehm wurden die verbliebenen Versuche am nächsten Tag gemessen.



Abb. 11.1: Eimer gefüllt mit verschiedenen Lehm-Wasser-Gemischen; mit 5g, 10g, 20g Lehm



Abb. 11.2: Bütte gefüllt mit einem Lehm-Wasser-Gemisch; mit 200g Lehm

11.3 Messwerte

Tab. 11.1: Versuch mit 5g Lehm in 10 l Wasser

5g Lehm in 10 Liter Wasser mit 0,00 NTU					
Lehm		Lehm-Wasser-Gemisch			
Uhrzeit	Zeit	Trübungswert			Durchschnitt
[/]	[min]	[NTU]			[NTU]
15:47	10	209	148	192	183
15:57					
16:07					
16:17	20	238	159	193	197
16:27	30	263	195	213	224
16:37	40	254	238	220	237
16:47	50	229	269	254	251
16:57	60	270	252	266	263
17:07	90	318	290	267	292
17:17	120	255	302	298	285

Tab. 11.2: Versuch mit 10g Lehm in 10 l Wasser

10g Lehm in 10 Liter Wasser mit 0,00 NTU						
Lehm		Lehm-Wasser-Gemisch				
Uhrzeit	Zeit	Trübungswert			Durchschnitt	
[/]	[min]	[NTU]			[NTU]	
14:23	10	328	336	380	348	
14:33						
14:43						
14:53	20	399	426	418	414	
15:03	30	506	494	468	489	
15:13	40	486	483	493	487	
15:23	50	514	530	520	521	
15:33	60	560	553	516	543	
15:43	90	528	578	599	568	
16:23	120	554	519	569	547	
09:23	1140	521	561	563	548	

Tab. 11.3: Versuch mit 20g Lehm in 10 l Wasser

20g Lehm in 10 Liter Wasser mit 0,00 NTU					
Lehm		Lehm-Wasser-Gemisch			
Uhrzeit	Zeit	Trübungswert			Durchschnitt
[/]	[min]	[NTU]			[NTU]
15:47	10	303	343	305	317
15:57					
16:07					
16:17	20	403	435	413	417
16:27	30	446	432	522	467
16:37	40	496	501	546	514
16:47	50	540	521	541	534
16:57	60	592	643	635	623
17:07	90	616	662	704	661
17:17	120	710	752	750	737
09:17	1050	925	946	OR	OR

Tab. 11.4: Versuch mit 200g Lehm in 100 l Wasser

200g Lehm in 100 Liter Wasser mit 0,00 NTU						
Lehm		Lehm-Wasser-Gemisch				
Uhrzeit	Zeit	Trübungswert			Durchschnitt	
[/]	[min]	[NTU]			[NTU]	
14:36	10	401	423	217	347	
14:46						
14:56						
15:06	20	426	522	584	511	
15:16	30	665	678	620	654	
15:26	40	666	680	692	679	
15:36	50	744	707	724	725	
15:46	60	703	762	757	741	
16:06	90	745	794	811	783	
16:36	120	885	811	825	840	
09:36	1140	OR	OR	OR	OR	

11.4 Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, dass große Mengen an Lehm eine bestimmte Zeitspanne benötigen, um sich gänzlich im Wasser zu lösen. Da die Messergebnisse sich relativ linear verhalten, konnte überschlägig ein Verhältnis zwischen Lehm und Wasser festgestellt werden. Es ist außerdem darauf hinzuweisen, dass größere Lehmklumpen Anteile an kleinen Steinen mitführten und möglicherweise eine geringfügige Abweichungen der Ergebnisse bewirkten.

So ergab sich:

5g Lehm in 10 Liter Wasser aufgelöst -> ca. 250 NTU

10g Lehm in 10 Liter Wasser aufgelöst -> ca. 500 NTU

20g Lehm in 10 Liter Wasser aufgelöst -> ca. >1000 NTU

200g Lehm in 100 Liter Wasser aufgelöst -> ca. >1000 NTU

12 Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch mit Ziel der Sättigung

Zur schnellen Sättigung des Filters wurde ein stark verdrecktes Lehm-Wasser-Gemisch beaufschlagt. Mit dem vorrangegangenen Ansatz des Verhältnisses konnte der Trübungsgrad des erzeugten Lehm-Wasser-Gemischs abgeschätzt werden.

12.1 Versuchsbeschreibung

Mit einer Küchenwaage wurde für alle Versuche die gleiche Menge an getrocknetem Lehm abgewogen und verwendet. Es erfolgten insgesamt drei Filterdurchläufe mit jeweils 100 Litern Lehm-Wasser-Gemisch. Auch hier wurde Leitungswasser mit 0,00 NTU verwendet. Einen Trübungswert von ca. >3000 NTU konnte mit 600g getrocknetem Lehm erzeugt werden. Das Wasser, was aus dem Auslaufventil austrat, wurde wieder zurück in die Bütte geschüttet, um einen Filterkreislauf zu erzeugen und eine große Durchflussmenge zu ermöglichen. Im Ersten Durchlauf bestand die Vermutung – vor allem weil das Gemisch nicht gänzlich gefiltert wurde –, dass die Trübungswerte in der Bütte durch das gefilterte Lehm-Wasser-Gemisch zwar sinken, doch nach jedem einzelnen Filterdurchlauf geringfügig ansteigen würden.

12.2 Versuchsbeschreibung

600 g getrockneter Lehm wurde in zwei 10 Liter Eimern aufgeteilt, mit einem Holzstab zerkleinert und in Wasser gelöst. Danach wurde dieses Gemisch in eine Bütte gegeben und mit Wasser auf 100 Liter aufgefüllt. Die Beaufschlagung mit dem Lehm-Wasser-Gemisch auf den Filter erfolgte – wie bereits in den Filtrationsdurchläufen zuvor – nur anstelle von 50 Litern jetzt mit einer Beaufschlagungsmenge von 100 Litern. Die Messung der Trübungswerte wurden eine Stunde lang alle 5 Minuten und anschließend alle 10 Minuten gemessen. Zum Ende des zweiten Filterdurchlaufs fand der Versuch statt, mit einem Holzstab die Oberfläche zu durchbrechen, auf welcher sich eine Lehmschicht gebildet hatte, um schließlich erneut eine schnellere Durchlaufzeit zu bewirken.

12.3 Messwerte

Tab. 12.1: 1. Filtration von 100 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU

Filtration von 100 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
11:45	3	10						
11:48								
11:50	5	10						
11:55			11:55	10	282	11:55		
11:57	4	10					6	10
12:01			12:00	15	218	12:01		
12:03	6	10					7	10
12:09			12:05	20	134	12:08		
12:11	6	10					7	10
12:17			12:10	25	91	12:15		
12:20	6	10	12:15	30	61,6		7	10
12:26			12:20	35	52,2	12:22		
12:28	9	10	12:25	40	45,7		8	10
12:37			12:30	45	40,9	12:30		
12:37	9	10	12:35	50	37,7		7	10
12:46			12:40	55	33,7	12:37		
12:47	9	10	12:45	60	28,1		10	10
12:56						12:47		
12:58	10	10	12:55	70	22,5		10	10
13:08			13:05	80	21,3	12:57		
						13:07	10	10
			13:15	90	20,2		33	10
			13:25	100	21,0			
			13:35	110	24,2			
			13:40	115	20,9	13:40		

Tab. 12.2: 2. Filtration von 100 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU

Filtration von 100 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
14:45	2	10						
14:47			14:50	5	22,6			
14:49	13	10	14:55	10	23,0	14:49	19	10
15:02			15:00	15	26,2			
15:04	13	10	15:05	20	26,7	15:08	37	10
15:17			15:10	25	30,8			
15:19	18	10	15:15	30	30,8		26	10
15:37			15:20	35	23,3			
15:39	22	10	15:25	40	26,0	15:45	37	10
16:01			15:30	45	25,5			
16:04	27	10	15:35	50	20,6	16:11	26	10
16:31			15:40	55	18,42			
16:35	11	10	15:45	60	15,00	16:36	25	10
16:46			15:55	70	13,92			
16:47	10	10	16:05	80	12,47	16:50	14	10
16:57			16:15	90	12,56			
17:58	11	10	16:25	100	11,94	17:05	15	10
17:09			16:35	110	11,90			
17:12	12	10	16:45	120	22,5	17:23	18	10
17:24			16:55	130	22,0			
			17:05	140	22,0		21	10
			17:15	150	20,3			
			17:25	160	17,09			
			17:35	170	14,30	17:44		
			17:45	180	12,80		55	10
			17:55	190	8,66			
			18:05	200	11,74	18:09		
			18:18	210	11,51			
			18:25	220	11,73	nächster Tag	> 14 Stdn.	10
			18:35	230	11,49			
			18:45	240	10,90			

Tab. 12.3: 3. Filtration von 100 l Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000NTU

Filtration von 100 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit >3000 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
09:15	2	10	09:20	5	17,69	09:20	20	10
09:17			09:25	10	18,80			
09:22	12	10	09:30	15	19,24			
09:34			09:35	20	20,7			
09:38	9	10	09:40	25	21,1			
09:47			09:45	30	30,0	09:40	8	10
09:50	8	10	09:50	35	28,7			
09:58			09:55	40	27,3	09:52	8	10
10:02	8	10	10:00	45	26,0	10:02	10	10
10:10			10:05	50	22,7	10:14	12	10
10:13	10	10	10:10	55	19,7			
10:23			10:15	60	17,82			
10:28	19	10	10:25	70	13,49	10:27	13	10
10:47			10:35	80	11,13	10:49	22	10
10:54	24	10	10:45	90	10,82			
11:18			10:55	100	10,15	11:16	27	10
11:26	24	10	11:05	110	9,51	11:42	26	10
11:50			11:15	120	9,68			
11:55	27	10	11:25	130	9,48	12:15	33	10
12:22			11:35	140	8,49			
			11:45	150	9,82	13:25	70	10
			11:55	160	9,26			
			12:05	170	9,66			
			12:15	180	10,31			
			12:25	190	9,65			
			12:35	200	9,31			
			12:45	210	9,11			
			12:55	220	8,96			
			13:05	230	8,57			
			13:15	240	9,78			
			13:25	250	9,08			

12.4 Ergebnisse

Den anfänglichen Vermutungen entsprechend hatte sich die Durchlaufzeit aufgrund des hohen Lehmantils stark vergrößert. Der hohe Anteil an Lehmpartikeln führte dazu, dass sich eine Lehmschicht auf der Sandoberfläche gebildet hatte. Aus der Entstehung einer solchen Lehmschicht lässt sich ableiten, dass der Filter die Lehmpartikel nicht schnell genug abführen konnte, und sie sich an der Oberfläche anstauten: Es hatte sich ein Filterkuchen gebildet. In der Folge konnten hier die niedrigsten Trübungswerte von bis zu 8,49 NTU erzielt werden. Bis auf den ersten Filterdurchlauf mit 100 Litern Lehm-Wasser-Gemisch von >3000 NTU wurde in den weiteren zwei Versuchen das Gemisch fast vollständig von den Lehmpartikeln befreit. Hier konnten die 200 Liter Lehm-Wasser-Gemisch bis auf einen maximalen Trübungswert von 30,8 NTU gefiltert werden.

13 Filtration von Lehm-Wasser-Gemisch als Nachweis einer Sättigung

Die Filterversuche haben ergeben, dass die Trübungswerte des gefilterten Lehm-Wasser-Gemischs immer niedriger wurden, doch nahm die Durchlaufzeit dabei rapide zu. Es konnte an diesem Punkt von einer gewissen Sättigung des Filters ausgegangen werden. Die geringen Trübungswerte kamen deshalb zustande, weil die Lehmschicht resp. der oberflächige Filterkuchen die stärkste Filterwirkung erzeugte.

13.1 Versuchsbeschreibung

Für jeden einzelnen Filterdurchlauf wurde der Filter erneut mit einem 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch und einem Trübungswert von ca. 1000 NTU beaufschlagt. Als Nachweis für eine tiefere Sättigung erfolgte die Entfernung der oberen Lehmschicht nach dem dritten Filterdurchlauf.

13.2 Versuchsdurchführung

Die Beaufschlagung und die Messungen fanden nach demselben Vorgehen der in Kapitel 10 beschriebenen Versuche statt.



Abb. 13.1: Oberflächiger Filterkuchen



Abb. 13.2: Filterkuchenabtrag

13.3 Messwerte

Tab. 13.1: 7. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 946-982 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
09:30	8	10	09:35	5	13,55	09:35	42	10
09:32			09:40	10	13,28			
09:38	24	10	09:45	15	10,68			
10:02			09:50	20	10,20			
10:08	25	10	09:55	25	9,36			
10:33			10:00	30	9,21			
10:38	30	10	10:05	35	9,26			
11:08			10:10	40	9,68			
11:13	28	10	10:15	45	10,02	10:17		
11:41			10:20	50	10,73			
			10:25	55	12,14	10:47	30	10
			10:30	60	12,60			
			10:35	65	13,05			
			10:40	70	13,42			
			10:45	75	13,13			
			10:50	80	13,34			
			10:55	85	12,91	11:20	33	10
			11:00	90	13,40			
			11:10	100	16,27			
			11:20	110	14,89			
			11:30	120	14,62	11:59	39	10
			11:40	130	13,97			
			11:50	140	13,74			
			12:00	150	13,85			
			12:10	160	14,18	13:00	61	10
			12:20	170	14,41			
			12:30	180	14,19			
			12:40	190	14,32			
			12:50	200	14,66			
			13:00	210	15,33			

Tab. 13.2: 8. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 952-989 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
14:00	11	10	14:05	5	14,21	14:04	71	10
14:11			14:10	10	14,46			
14:16	48	10	14:15	15	12,77			
15:04			14:20	20	13,28			
15:13	43	10	14:25	25	14,64			
15:56			14:30	30	14,13			
16:02	60	10	14:35	35	15,49			
17:02			14:40	40	15,55			
17:10	62	10	14:45	45	16,29			
18:12			14:50	50	14,66			
			14:55	55	16,43	15:15	54	10
			15:00	60	16,26			
			15:05	65	16,42			
			15:10	70	16,13			
			15:15	75	15,53			
			15:20	80	14,63			
			15:25	85	14,29			
			15:30	90	10,14			
			15:40	100	9,84			
			15:50	110	8,03			
			16:00	120	9,31	16:09	63	10
			16:10	130	10,90			
			16:20	140	10,92			
			16:30	150	11,05			
			16:40	160	11,04			
			16:50	170	10,95			
			17:00	180	10,87			
			17:10	190	11,17			
			17:20	200	10,80			
			17:30	210	11,11	18:02	50	10
			17:40	220	10,99			
			17:50	230	10,60			
			18:00	240	10,39			
			18:30	270	8,01			
			19:00	300	10,42			
			19:30	330	11,18			
			20:00	360	10,93	20:00	118	10

Tab. 13.3: 9. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 928-958 NTU											
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration								
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge			
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]			
10:40	1	10	10:45	5	26,0	10:44	23	10			
10:41			10:50	10	29,1						
10:44	14	10	10:55	15	36,8						
10:58			11:00	20	46,1						
11:02	21	10	11:05	25	50,8				11:07	24	10
11:23			11:10	30	42,4						
11:27	24	10	11:15	35	38,2	11:31	29	10			
11:51			11:20	40	34,9						
11:57	30	10	11:25	45	30,9						
12:27			11:30	50	27,8						
			11:35	55	25,5				12:41	59	10
			11:40	60	23,1						
			11:45	65	21,7						
			11:50	70	20,1						
			11:55	75	18,36						
			12:00	80	17,78	13:40					
			12:05	85	17,25						
			12:10	90	16,43						
			12:20	100	14,48						
			12:30	110	14,88						
			12:40	120	14,45						
			12:50	130	14,00						
			13:00	140	13,99						
			13:10	150	14,20						
			13:20	160	13,51						
			13:30	170	13,63						
			13:40	180	13,47						

Tab. 13.4: 10. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 953-961 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
09:55	1	10	10:00	5	15,04	09:59	20	10
09:56			10:05	10	26,1			
09:58	13	10	10:10	15	52,4			
10:11			10:15	20	58,5			
10:13	13	10	10:20	25	57,8			
10:26			10:25	30	49,8	10:33	14	10
10:28	13	10	10:30	35	35,2			
10:41			10:35	40	27,2			
10:43	15	10	10:40	45	21,4	10:48	15	10
10:58			10:45	50	18,69			
			10:50	55	16,36			
			10:55	60	17,01	11:03	15	10
			11:00	65	15,34			
			11:05	70	14,91			
			11:10	75	13,95			
			11:15	80	14,33			
			11:20	85	13,99	11:55	52	10
			11:25	90	14,55			
			11:35	100	14,95			
			11:45	110	14,83			
			11:55	120	13,55			

Tab. 13.5: 11. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 915-983 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
13:30	3	10	13:35	5	16,37	13:35	25	10
13:33			13:40	10	18,0			
13:37	15	10	13:45	15	21,9			
13:52			13:50	20	31,2			
13:56	14	10	13:55	25	37,7			
14:10			14:00	30	37,6	14:00		
14:12	10	10	14:05	35	36,6	14:17	17	10
14:22			14:10	40	35,4			
14:27	14	10	14:15	45	28,8			
14:41			14:20	50	23,7			
			14:25	55	20,3	14:34	17	10
			14:30	60	17,90			
			14:35	65	15,75			
			14:40	70	15,50	14:50	16	10
			14:45	75	14,68			
			14:50	80	13,94			
			14:55	85	13,66	15:50	60	10
			15:00	90	13,65			
			15:10	100	13,97			
			15:20	110	14,19			
			15:30	120	14,86			
			15:40	130	16,00			
			15:50	140	16,25			

13.4 Ergebnisse

Anfangs waren die Durchlaufzeiten aufgrund des Filterkuchens, der sich an der Oberfläche gebildet hatte, noch sehr langsam. Nach dem dritten Filterdurchlauf wurde die obere Lehmschicht abgetragen und führte wieder zu einem schnelleren Durchfluss, bei zeitgleichem Anstieg der Trübungswerte; doch ist die Durchflusszeit im Vergleich zu den Versuchen aus Kapitel 10 deutlich gesunken. Dies lässt darauf schließen, dass auch eine tiefere Sättigung des Filters erreicht worden ist. Eine vollständige Sättigung konnte mit den Filterversuchen aber auch hier nicht erreicht werden, da es weder zu einem verstopfen des Filters kam, noch die Trübungswerte im Filtrat signifikant anstiegen.

14 Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm

Als erste Versuchshöhe wurde eine Aufstellhöhe von 101cm für die Rückspültonne gewählt, sodass sie vollständig über dem Wasserspiegel der Filtertonne lag. Hierdurch sollte ein Großteil der Wassermenge sich durch das Filtermaterial drücken, um die Lehmartikel im Ergebnis mitauszuschwemmen.

14.1 Versuchsbeschreibung

Die Höhendifferenz zwischen dem Wasserspiegel der Rückspültonne und dem Einflusstutzen der Filtertonne betrug 114 cm (i.e. die Wasserdruckhöhe). Als Ansatz wurde hier die Formel $p = \rho \cdot g \cdot h$ zur Berechnung des Wasserdrucks angewandt.²¹ Da der Wasserspiegel im Laufe eines Rückspülversuchs stetig sinkt, wird zeitgleich auch der Wasserdruck kontinuierlich niedriger; in dem beschriebenen Versuchsaufbau bis auf eine Wasserdruckhöhe von 59 cm.

Die Aufstellhöhe errechnete sich durch:

$$\begin{aligned}\text{Aufstellhöhe} &= 5 \cdot \text{Treppenstufe}_{\text{groß}} + 1 \cdot \text{Treppenstufe}_{\text{klein}} = 5 \cdot 18,5 \text{ cm} + 1 \cdot 8,5 \text{ cm} \\ \text{Aufstellhöhe} &= 101 \text{ cm}\end{aligned}$$

Mit:

$$\begin{aligned}\rho \cdot g &= 10000 \text{ N/m}^3 \text{ und einer Höhendifferenz/Wasserdruckhöhe von } 114 \text{ cm} \\ h_D &= 1,14 \text{ m.; } 1 \text{ Pa (Pascal)} = 1 \text{ N/m}^2 ; 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa (Meteorologie)}\end{aligned}$$

Ergibt zu Beginn der Rückspülung einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 1,14 \text{ m} = 11400 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,114 \text{ bar}$$

Zum Ende einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,59 \text{ m} = 5900 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,059 \text{ bar}$$

²¹ vgl. Sartor 2017, S. HYM – 2.1.

Die Berechnung des Wasserdrucks in der Filterschicht war mit Blick auf die konzeptionellen Vorgaben der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit nicht möglich, weil der Widerstand der Stütz- und der Schutzschicht im Zuge der Anstauung von Lehmpartikeln anstieg, und der sich daraus ergebende Aufwand den formellen Rahmen gesprengt hätte: jede Korngruppe hätte individuell berechnet und untersucht werden müssen.

Es wurde zur Optimierung der Rückspülung zusätzlich ein PVC-Schlauch (Ø18mm) an der Filtertonne installiert. So konnte das Wasser, das durch das Filtermaterial geströmt war und die feinen Lehmpartikel mitausgespült hatte, einfach in die Bütte abgeführt werden. Ein weiterer Mehrwert bestand außerdem in der Bestimmung der Trübungswerte im Verlaufe der Untersuchung. Für die Rückspülung wurde die Filter- und Rückspültonne mit einem PVC-Schlauch (Ø16mm) verbunden. Durch den Höhenunterschied konnte das Wasser in die Filtertonne gedrückt werden.

Zur Berechnung der Wassermenge, die sich am Ende eines Rückspüldurchlaufes in der Bütte befand, wurde ein Schlauch von 4 Metern Länge installiert und die Volumenformel für Zylinder angewandt:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 0,08 \text{ dm}^2 \cdot 40 \text{ dm} = 0,804 \text{ dm}^3 = 0,8 \text{ l} \approx \text{für die Tabelle mit 1 Liter}$$

Wassermenge in der Bütte berechnet mit:

$$\text{Wassermenge}_{\text{Bütte}} = \text{Gesamtwassermenge} - \text{Wassermenge}_{\text{Auslaufventil}} - \text{Restwassermenge}_{\text{Rückspültonne}} - \text{Wassermenge}_{\text{Pvc-Schlauch}(\text{Ø16mm})}$$

$$\text{Wassermenge}_{\text{Bütte}} = 120 \text{ l} - 33 \text{ l} - 5 \text{ l} - 1 \text{ l} = 81 \text{ Liter}$$



Abb. 14.1: Rückspülablauföffnung



Abb. 14.2: Rückspülablauf zur Bütte



Abb. 14.3: Rückspültonne



Abb. 14.4: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm

14.2 Skizze

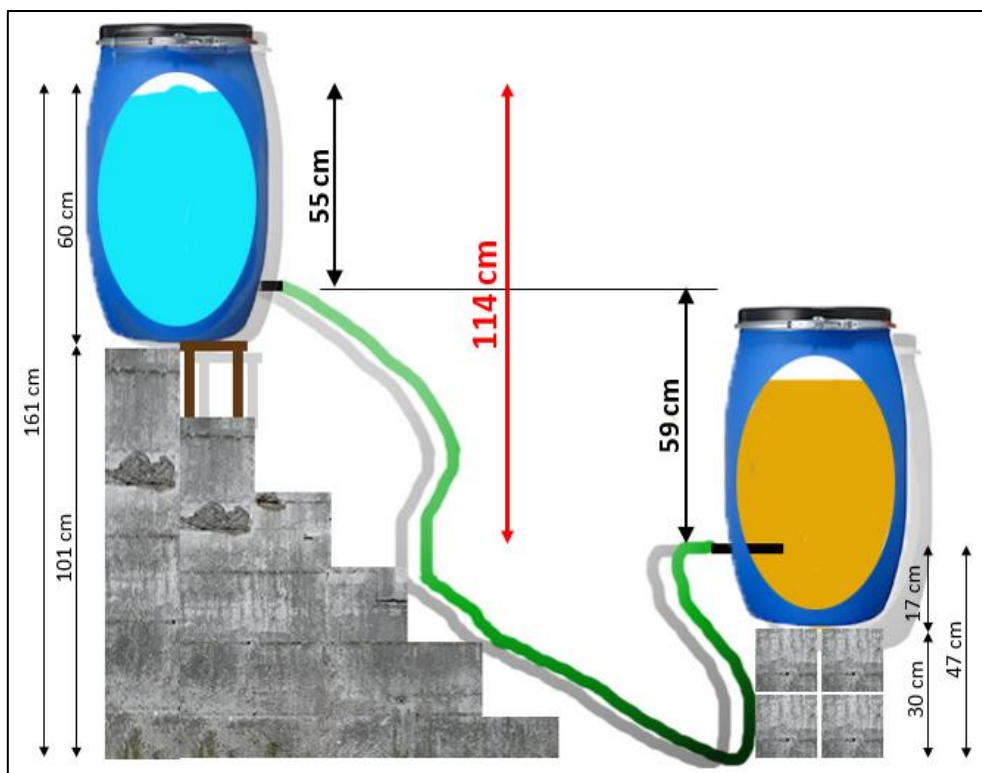


Abb. 14.5: Skizze zum Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm

14.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Versuchsdurchführung erfolgte die Platzierung der Rückspültonne auf einer Höhe von 101 cm. Zur Stabilität wurde ein Holzbänkchen und eine Keramikfliese unter die Tonne gelegt. Dadurch konnte auf der Treppe eine für die Rückspültonne ausreichende Auflagefläche erstellt werden. Anschließend fand eine Verbindung der Rückspültonne mittels eines PVC-Schlauchs mit dem Rückspülanschluss der Filtertonne statt. Vor dem Einfüllen des Wassers in die Rückspültonne musste darauf geachtet werden, dass der Kugelhahn für die Rückspülung, und das Auslaufventil der Filtertonne geschlossen sind. Danach wurden 120 Liter Wasser mit 0,00 NTU in die Rückspültonne gefüllt. Der Wasserspiegel in der Rückspültonne erreichte daraufhin eine Höhe von 60 cm.

Zum exakten Abmessen der Wassermenge diente ein Eimer mit einer Messlinie, mithilfe derer in 10 Liter-Schritten die Rückspültonne befüllt werden konnte. Nachdem die Rückspültonne nun mit 120 Litern gefüllt war, konnte der Kugelhahn für die Rückspülung geöffnet werden. Hierzu erfolgte eine punktgenaue Notation, nach welcher Zeit das erste Lehm-Wasser-Gemisch an der Oberfläche zu sehen war. Dieses Gemisch wurde durch einen weiteren PVC-Schlauch in die Bütte abgeführt und alle 5 Minuten gemessen. Nachdem der Rückspüldurchlauf beendet war, und nur noch vereinzelte Lehm-Wasser-Gemisch-Tropfen aus dem PVC-Schlauch traten, konnte das restliche Wasser, das sich noch in der Filtertonne befand, durch das Auslaufventil der Filtertonne abgelassen werden. Hier wurden auch Zeiten, Dauer des Ausflusses, Wassermenge und Trübungswerte gemessen. Das restliche Wasser, das sich noch in der Rückspültonne befand, wurde in den Eimer geschüttet und die anschließende Messung ergab einen Wert von 5 Litern. Daraufhin erfolgte eine abschließende Probennahme des Lehm-Wasser-Gemisches aus der Bütte.

14.4 Messwerte

Tab. 14.1: 1. Rückspülung mit 120 l Wasser

Rückspülung mit 120 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
14:50	0	-	81
14:55	5	OR	
15:00	10	OR	
15:05	15	OR	
15:10	20	585	
15:15	25	215	
15:20	30	92,4	
15:25	35	60,0	
15:30	40	47,5	
15:35	45	41,7	
15:40	50	42,9	
15:45	55	39,0	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
15:50	nach öffnen	2,22	10
15:52	2	4,02	
15:55	5	175	10
16:00	10	369	10
16:05	15	314	3

Tab. 14.2: 2. Rückspülung mit 120 l Wasser

Rückspülung mit 120 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
16:55	0	-	81
17:00	5	OR	
17:05	10	OR	
17:10	15	799	
17:15	20	188	
17:20	25	67,5	
17:25	30	45,2	
17:30	35	34,1	
17:35	40	30,7	
17:40	45	32,7	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
17:45	nach öffnen	6,03	10
17:47	2	6,49	
16:50	5	46,4	10
16:55	10	145	10
17:00	15	93,9	3

14.5 Ergebnisse

Nachdem der Kugelhahn für die Rückspülung geöffnet wurde, konnte nach 4 Minuten eine Anhebung und ein leichtes Aufbrechen der Sandoberfläche beobachtet werden. In der Folge fand beim ersten Rückspüldurchlauf eine Spülung kleinerer Anteile von Sand in die Bütte statt. Durch den PVC-Schlauch (Ø18mm) konnte das gesamte Lehm-Wasser-Gemisch von der Oberfläche in die Bütte abgeleitet werden. Im Zuge dessen blieben die Lehmteilchen in Bewegung und es konnte sich nur eine geringe Menge an Lehmteilchen absetzen. Das Lehm-Wasser-Gemisch wurde daraufhin so schnell abgeführt, dass es im PVC-Schlauch nicht zum vollkommenden Überfall kam. Nach dem Rückspüldurchlauf wurde das Auslaufventil des Filters geöffnet und es konnten 33 Liter aufgefangen werden. Das Lehm-Wasser-Gemisch wies anfangs sehr niedrige Trübungswerte auf. Gegen Schluss stiegen die Werte wieder an und es bleibt zu vermuten,

dass ein großer Anteil der Lehmartikel aus der Stütz- und Schutzschicht mitausgeschwemmt wurde. Im zweiten Rückspüldurchlauf konnten bereits in 45 Minuten 81 Liter Wasser durch den Filter gedrückt werden. Dabei blieb die Wassermenge durchgehend erhalten und konnte weiter zur Bewässerung von Pflanzen genutzt werden. Die Messwerte zeigen deutlich, dass die Rückspülung besonders effizient arbeitete, indem sie große Mengen an Lehmpartikeln bei geringem Aufwand mitausspülte. Eine Probe aus der Bütte ergab einen Trübungswert über >1000 NTU.

Da im zweiten Rückspüldurchlauf nochmals eine Erhebung der Sandoberfläche stattfand, kam die Vermutung auf, dass der Wasserdruck zu hoch gewählt worden war. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass ein Filterkuchen, der sich ggf. im Sand gebildet haben könnte, hierfür ursächlich war. Während des Rückspüldurchlaufs bildete sich ein Schaum auf der Oberfläche, in dem kleinste Sandpartikel enthalten waren.



Abb. 14.6: Aufbrechen der Sandoberfläche



Abb. 14.7: Rückspülablauf in Betrieb



Abb. 14.8: Lehm-Wasser-Gemisch aus Rückspülablauf

15 Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm

15.1 Versuchsbeschreibung

Um eine Sandbewegung während des Rückspülvorgangs zu verhindern, wurde in diesem Versuch die Rückspültonne auf eine Höhe von 64 cm gestellt, und die Wasserdruckhöhe folglich auf 77 cm reduziert. So konnte ein geringerer Wasserdruck und eine langsamere Rückspülgeschwindigkeit erreicht werden.

Die Aufstellhöhe errechnete sich durch:

$$\begin{aligned}\text{Aufstellhöhe} &= 3 \cdot \text{Treppenstufe}_{\text{groß}} + 1 \cdot \text{Treppenstufe}_{\text{klein}} = 3 \cdot 18,5 \text{ cm} + 1 \cdot 8,5 \text{ cm} \\ \text{Aufstellhöhe} &= 64 \text{ cm}\end{aligned}$$

Mit:

$$\text{Höhendifferenz/Wasserdruckhöhe von 77 cm } h_D = 0,77 \text{ m.}$$

Ergibt zu Beginn der Rückspülung einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,77 \text{ m} = 7700 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,077 \text{ bar}$$

Zum Ende einen Wasserdruck von:

Da sich die Wasserspiegelhöhen der Rückspül- und der Filtertonne nach der Zeit auf ein gleiches Niveau anglichen, sank der Wasserdruck auf null.



Abb. 15.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm

15.2 Skizze

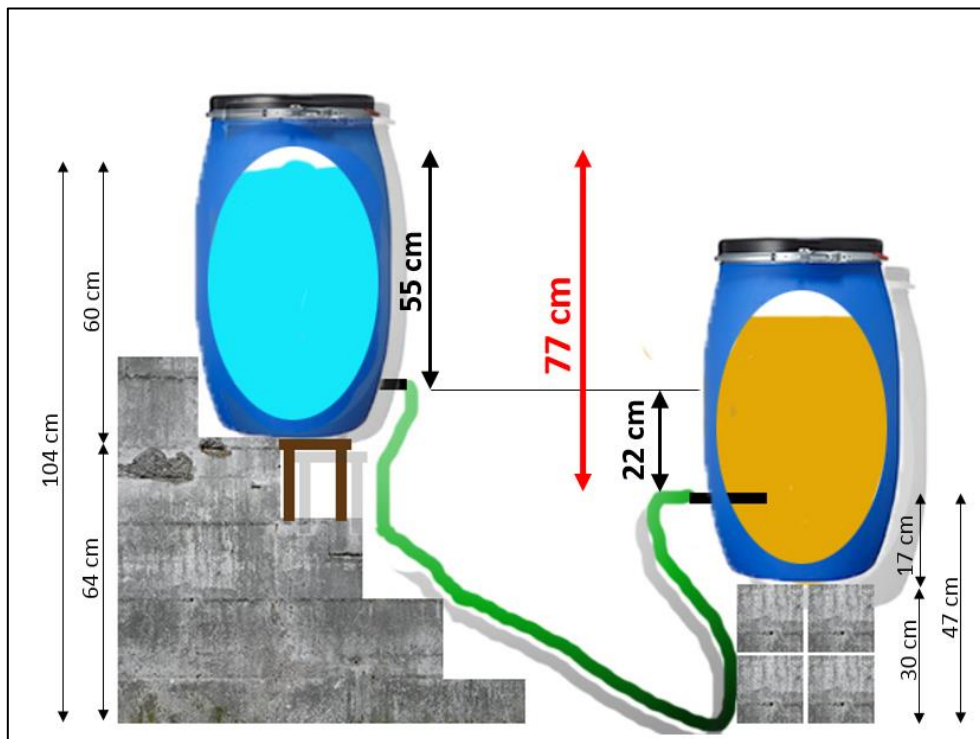


Abb. 15.2: Skizze zum Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 77 cm

15.3 Versuchsdurchführung

Das jetzige Prozedere erfolgte den vorherigen Rückspülversuchen entsprechend. Nur wurde hier die Rückspültonne zwei Treppenstufen tiefer auf eine Höhe von 64 cm gestellt. Der Rückspülvorgang musste jedoch nach 90 Minuten abgebrochen werden, da die Durchflussgeschwindigkeit, und somit auch die Durchflussmenge ein zu geringes Maß erreicht hatten, und dadurch ein Reinigen des Filters nicht mehr effizient genug erschien.

15.4 Messwerte

Tab. 15.1: 3. Rückspülung mit 120 l Wasser

Rückspülung mit 120 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
10:10	0	-	7
10:15	5	-	
10:20	10	OR	
10:25	15	OR	
10:30	20	OR	
10:35	25	OR	
10:40	30	OR	
10:45	35	OR	
10:50	40	OR	
10:55	45	931	
11:00	50	600	
11:05	55	846	
11:10	60	720	
11:15	65	617	
11:20	70	734	
11:25	75	655	
11:30	80	608	
11:35	85	184	
11:40	90	499	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
11:45	nach öffnen	3,90	10
11:47	2	4,70	
11:50	5	85,3	10
11:55	10	140	10
12:00	15	122	3

15.5 Ergebnisse

Im Vergleich zu den Rückspülergebnissen aus den vorangegangenen Versuchen konnte hier nur eine geringe Menge an Wasser den Filter durchlaufen; bloß 7 Liter wurden in der Bütte aufgefangen. Die Durchlaufzeiten waren in diesem Versuch schon zu Beginn der Rückspülung recht langsam. In den ersten zwei Rückspüldurchläufen sanken zwar die Trübungswerte im Laufe der Zeit deutlich, aber insgesamt war die Rückspülung nicht so effizient und die Wasserdruckhöhe auf einem zu niedrigen Level. Die 7 Liter Lehm-Wasser-Gemisch wiesen einen Trübungswert von 963 NTU auf; trotz allem war die Menge der Lehmpartikel im Verhältnis zuvor wesentlich geringer.

16 Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm

Die Versuchsergebnisse der Rückspülungen ließen den Schluss zu, dass die Wasserdruckhöhe bis zu diesem Zeitpunkt zu niedrig oder noch zu hoch bemessen wurde. Somit erfolgte die Positionierung der Rückspültonne innerhalb der Mitte der beiden zuvor versuchten Höhen.

16.1 Versuchsbeschreibung

In diesem Rückspülversuch wurde die Rückspültonne auf eine Höhe von 82,5 cm gestellt und die Wasserdruckhöhe auf 95,5 cm erhöht. Der Wasserdruck lag somit genau zwischen den beiden Versuchen zuvor.

Mit:

Höhendifferenz/Wasserdruckhöhe von 95,5 cm $h_D = 0,955 \text{ m}$.

Ergibt zu Beginn der Rückspülung einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,955 \text{ m} = 9550 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,096 \text{ bar}$$

Zum Ende einen Wasserdruck von:

Da sich die Wasserspiegelhöhen der Rückspül- und der Filtertonne nach der Zeit auf ein gleiches Niveau anglichen, sank der Wasserdruck auf null.



Abb. 16.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm

16.2 Skizze

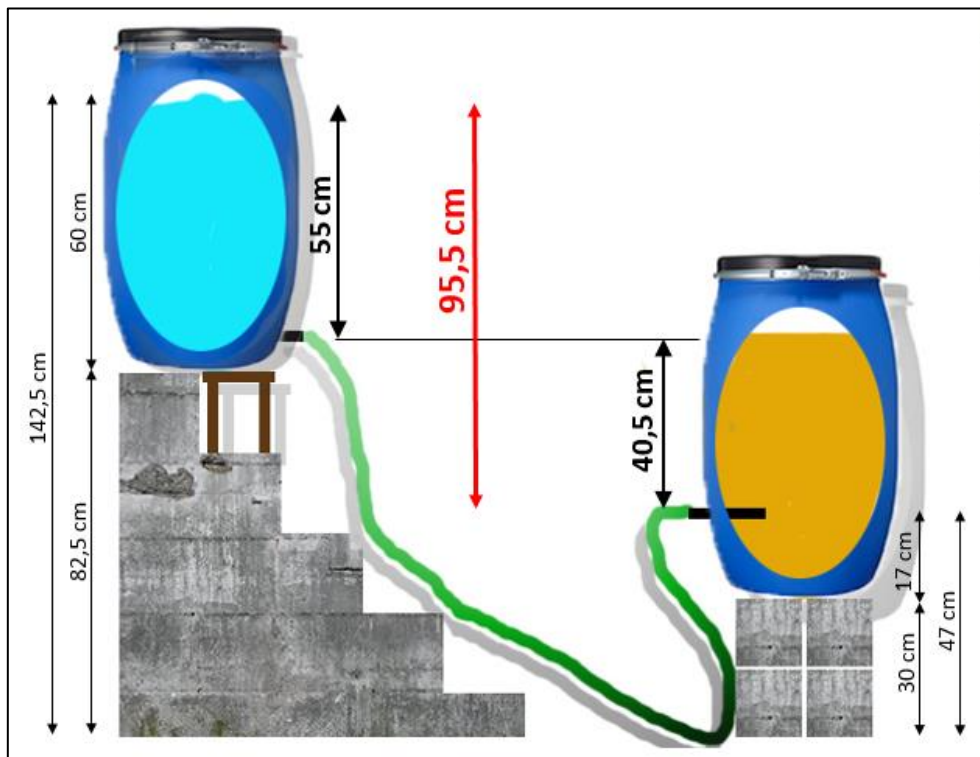


Abb. 16.2: Rückspülversuchsaufbau Skizze mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm

16.3 Versuchsdurchführung

Die Rückspültonne wurde in diesem Versuch wieder eine Treppenstufe höher aufgestellt und stand auf einer Gesamthöhe von 82,5 cm. Auch hier fand dasselbe Vorgehen wie bei den anderen Rückspüldurchläufen Anwendung. In diesem Versuch musste der Rückspüldurchlauf nach 95 Minuten unterbrochen werden, weil – wie im Versuch zuvor – der Wasserdruck gegen Ende zu gering und der Durchfluss zu langsam wurde. Nach dem Rückspülversuch konnte die Menge des Lehm-Wasser-Gemischs aus der Bütte mittels eines Eimers gemessen werden.

16.4 Messwerte

Tab. 16.1: 4. Rückspülung mit 120 l Wasser

Rückspülung mit 120 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
12:55	0	-	48
13:00	5	-	
13:05	10	OR	
13:10	15	696	
13:15	20	285	
13:20	25	141	
13:25	30	52,2	
13:30	35	40,5	
13:35	40	27,8	
13:40	45	25,1	
13:45	50	20,1	
13:50	55	18,15	
13:55	60	16,34	
14:00	65	18,88	
14:05	70	15,13	
14:10	75	14,29	
14:15	80	14,18	
14:20	85	14,98	
14:25	90	14,65	
14:30	95	12,50	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
14:35	nach öffnen	6,08	10
14:37	2	5,82	
14:40	5	70,2	10
14:45	10	9,46	10
14:50	15	79,6	3

16.5 Ergebnisse

Die Messwerte zeigen, dass wenn die Durchflussgeschwindigkeit anfangs noch höher war, eine größer Anzahl an Lehmpartikeln ausgeschwemmt wurde. Zum Ende hin konnte das Filtermaterial nicht mehr effizient gereinigt werden. Dabei ist zu beachten, dass nach jedem Rückspülversuch eine gewisse Menge an Lehm ausgespült worden war und

die Trübungswerte in der Konsequenz von Versuch zu Versuch sanken. Bei einer niedrigeren Wasserdruckhöhe entstand während der Rückspülversuche kein Schaum an der Oberfläche des Lehm-Wasser-Gemisches. Es konnten 48 Liter Lehm-Wasser-Gemisch in der Bütte aufgefangen und ein Trübungswert von 676 NTU nachgewiesen werden. In den Versuchen mit einer geringeren Wasserdruckhöhe kam es zu keiner Anhebung der Sandoberfläche oder einem Verlust von Sandanteilen im Abfluss.



Abb. 16.3: Lehm-Wasser-Gemisch aus Rückspülablauf mit 676 NTU

17 Nochmalige Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm.

Eine Anhebung und ein Aufbrechen der Sandoberfläche könnte darauf hinweisen, dass Anfangs ein Filterkuchen in der Filterschicht vorhanden war: Um genau das zu überprüfen, wurde nochmals mit der Wasserdruckhöhe von 114 cm eine Rückspülung durchgeführt, wodurch außerdem ein Vergleich der Trübungswerte erfolgen konnte.

Der Versuchsaufbau, die Rückspülung und die Trübungsmessungen vollzogen sich wie in Kapitel 15 beschrieben.

17.1 Messwerte

Tab. 17.1: 5. Rückspülung mit 120 l Wasser

Rückspülung mit 120 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
15:20	0	-	81
15:25	5	OR	
15:30	10	OR	
15:35	15	312	
15:40	20	60,9	
15:45	25	36,1	
15:50	30	23,2	
15:55	35	50,8	
16:00	40	29,2	
16:05	45	27,3	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
16:10	nach öffnen	1,91	10
16:12	2	3,05	
16:15	5	24,4	10
16:20	10	53,3	10
16:25	15	60,3	3

17.2 Ergebnisse

Wenn die Trübungswerte mit den ersten zwei Rückspülversuchen und der gleichen Wasserdruckhöhe von 114 cm gegenübergestellt werden, sind die Trübungswerte gesunken und das Filtermaterial wurde effizient gereinigt. Es konnten 81 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit einem Trübungswert von >1000 NTU in die Bütte abgeleitet werden. Im Vergleich zu den Versuchen mit einem niedrigeren Wasserdruck, wurde hier wieder einer größere Menge an Lehmpartikeln ausgeschwemmt und die Reinigung des Filtermaterials deutlich verstärkt. Jedoch konnte in dem letzten Rückspülversuch wieder eine Anhebung der Sandoberfläche beobachtet werden, die zwar nicht zu einem Aufbrechen führte, aber für ein kurzes Aufsprudeln am Rand der Filtertonne sorgte; in der Bütte konnten zum wiederholten Male kleiner Sandanteile festgestellt werden.

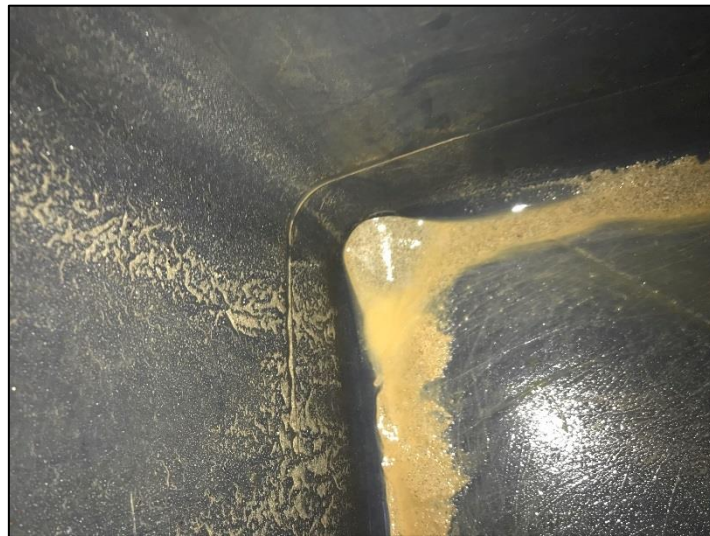


Abb. 17.1: Sandanteile in der Bütte

18 Rückspülung mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm

Da bei den Rückspülversuchen mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm ein Sandverlust zu erkennen war und der Abstand von der Sandoberfläche zur Filtertonnenoberkante auf 7 cm schrumpfte, musste die Wasserdruckhöhe entsprechend reduziert werden. Da in den Versuchen mit einer Wasserdruckhöhe von 95,5 cm keine Sandbewegung beobachtet werden konnte, die Filterreinigung aber nicht so effizient erschien, wurde eine Wasserdruckhöhe zwischen beiden Versuchen gewählt.

18.1 Versuchsbeschreibung

Daher erfolgte die Festlegung der Wasserdruckhöhe für die nächsten Rückspülungen mit einem Wert von 104 cm, indem der vorher konzipierte Rückspülaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 114 cm verwendet wurde, und sich die Befüllung der Rückspültonne nur mit 100 Liter Wasser vollzog. In der Rückspültonne ergab sich folglich eine Wasserspiegelhöhe von 50 cm und die Wasserdruckhöhe konnte um 10 cm gesenkt werden.

Mit:

Höhendifferenz/Wasserdruckhöhe von 104 cm $h_D = 1,04 \text{ m}$.

Ergibt zu Beginn der Rückspülung einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 1,04 \text{ m} = 10400 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,104 \text{ bar}$$

Zum Ende einen Wasserdruck von:

$$p = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,59 \text{ m} = 5900 \text{ N/m}^2 \quad p = 0,059 \text{ bar}$$

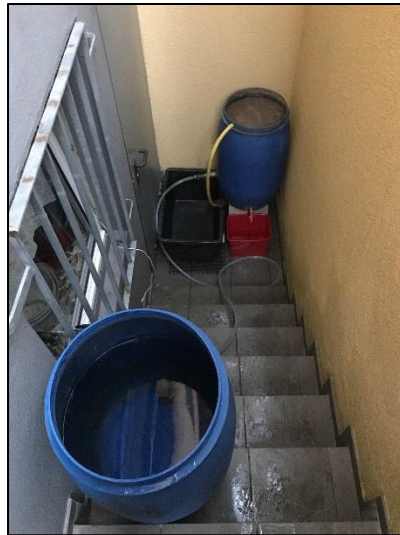


Abb. 18.1: Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm

18.2 Skizze

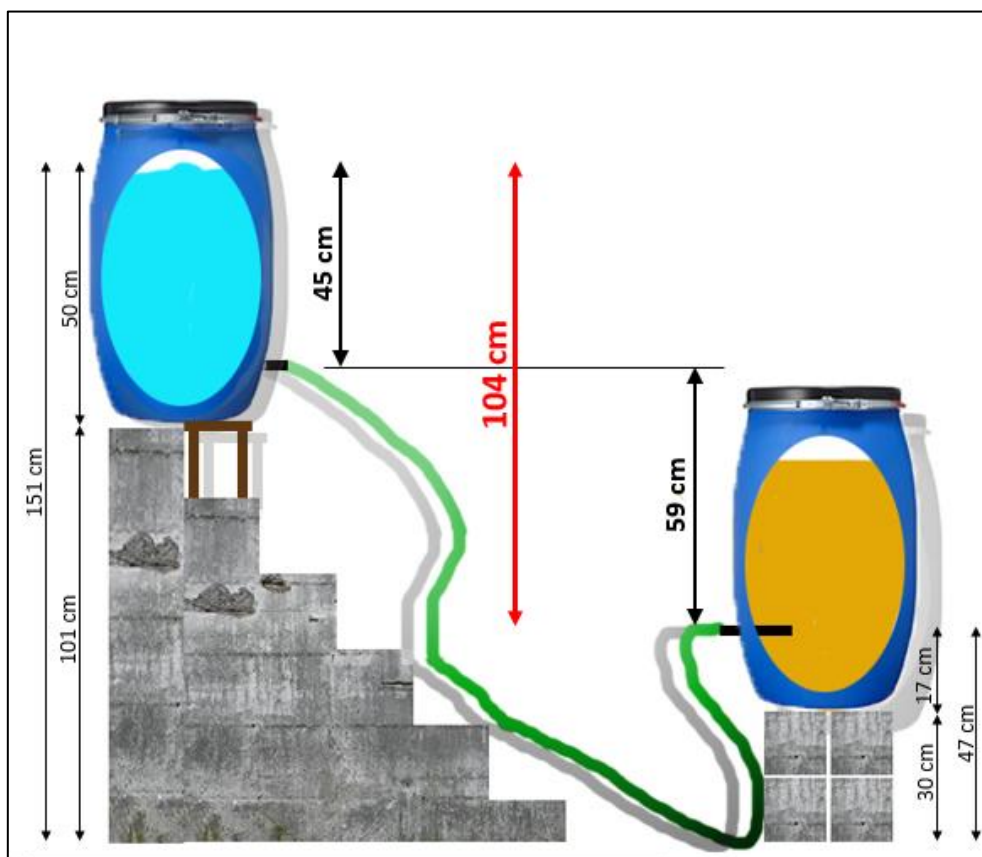


Abb. 18.2: Skizze zum Rückspülversuchsaufbau mit einer Wasserdruckhöhe von 104 cm

18.3 Versuchsdurchführung

Im Unterschied zu den vorherigen Versuchen wurden hier für jeden Rückspüldurchlauf nur 100 Liter Wasser in die Rückspültonne gefüllt. Im ersten Versuch wurde wieder mithilfe eines Messeimers genau 100 Liter Wasser eingefüllt und anhand eines Metermaßes der Wasserspiegel von 50 cm abgelesen. Schließlich konnte für die nächsten Versuche der Gartenschlauch für die Befüllung der Rückspültonne genutzt werden.

Im zweiten und dritten Rückspüldurchlauf wurde Regenwasser verwendet, das mit einer Gartenpumpe aus der Regenzisterne gepumpt und mittels Gartenschlauch in die Rückspültonne gefüllt wurde.

18.4 Messwerte

Tab. 18.1: 1. Rückspülung mit 100 l Wasser

Rückspülung mit 100 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs-wert	Wasser-menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
17:00	0	-	61
17:05	5	OR	
17:10	10	501	
17:15	15	84,1	
17:20	20	26,2	
17:25	25	14,85	
17:30	30	10,05	
17:35	35	7,95	
17:40	40	8,15	
17:45	45	7,52	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
17:50	nach öffnen	1,13	10
17:52	2	1,93	
17:55	5	16,5	10
18:00	10	32,1	10
18:05	15	26,7	3

Tab. 18.2: 1. Rückspülung mit 100 l Regenwasser

Rückspülung mit 100 Liter Regenwasser (1,14-1,23NTU)			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs-wert	Wasser-menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
09:30	0	-	61
09:35	5	OR	
09:40	10	684	
09:45	15	205	
09:50	20	74,4	
09:55	25	38,6	
10:00	30	33,3	
10:05	35	24,6	
10:10	40	23,1	
10:15	45	23,5	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
10:20	nach öffnen	1,41	10
10:22	2	3,29	
10:25	5	26,9	10
10:30	10	48,0	10
10:35	15	42,2	3

Tab. 18.3: 2.Rückspülung mit 100 l Regenwasser

Rückspülung mit 100 Liter Regenwasser (1,14-1,23 NTU)			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
11:25	0	-	61
11:30	5	716	
11:35	10	297	
11:40	15	60,8	
11:45	20	26,2	
11:50	25	17,43	
11:55	30	12,82	
12:00	35	10,78	
12:05	40	9,90	
12:10	45	9,02	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
12:15	nach öffnen	1,91	10
12:17	2	1,92	
12:20	5	19,53	10
12:25	10	23,5	10
12:30	15	21,5	3

Tab. 18.4: 2.Rückspülung mit 100 l Wasser

Rückspülung mit 100 Liter Wasser und 0,00 NTU			
Lehm-Wasser-Gem. von der Oberfläche			
Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Wasser- menge
[/]	[min]	[NTU]	[Liter]
14:20	0	-	61
14:25	5	OR	
14:30	10	488	
14:35	15	59,3	
14:40	20	16,19	
14:45	25	8,78	
14:50	30	6,42	
14:55	35	5,23	
15:00	40	4,31	
15:05	45	6,99	
Lehm-Wasser-Gem. aus dem Kugelhahn			
15:10	nach öffnen	0,53	10
15:12	2	0,70	
15:15	5	14,85	10
15:20	10	17,47	10
15:25	15	13,8	3

18.5 Ergebnisse

Mit der Wasserdruckhöhe von 104 cm war in den letzten Rückspülversuchen keine Sandbewegung feststellbar. Allerdings erschien die Reinigung des Filters mit dieser Wasserdruckhöhe äußerst effizient und hat sich als optimale Einstellung herauskristallisiert. Es konnten 61 Liter Wasser durch den Filter gedrückt, und eine große Menge an Lehmartikel aus dem Filtermaterial ausgespült werden. Die Trübungswerte sanken von Versuch zu Versuch und eine Reinigung des Filtermaterials konnte dementsprechend nachgewiesen werden. Betrachtet man die Proben, die nach den Rückspülungen aus der Bütte entnommen wurden, fanden sich zum Ende hin noch eine aus dem Filtermaterial ausgespülte große Menge an Lehmteilchen. Die Proben aus der Bütte, die das 61 Liter Lehm-Wasser-Gemisch enthielt, ergaben die Trübungswerte von 410 NTU, 537 NTU, 399 NTU und 431 NTU.

Eine vollständige Reinigung des Filters konnte nach den Rückspüldurchläufen nicht erreicht werden. Es erfolgte eine Ableitung der Sandoberfläche von insgesamt 542 Liter Wasser, welches das Filtermaterial durchströmen konnte. Mit der doppelten Menge an Wasser könnte eine vollständige Reinigung des Filters bewirkt werden, weil sich die Trübungswerte in der Bütte des ersten Durchlaufes zum Ende hin mehr als halbiert hatten.

19 Nachweis einer Reinigung des Filtermaterials

Nach den Rückspüldurchläufen fand in den nächsten Experimenten der Versuch statt, einen Nachweis für die Reinigung des Filtermaterials zu erbringen. Die Ergebnisse und Beobachtungen zuvor ließen aber schon auf eine Reinigung des Filtermaterials schließen, weil ja bereits große Mengen an Lehmpartikeln ausgeschwemmt wurden.

19.1 Versuchsbeschreibung

Zunächst erfolgte die Beaufschlagung des Filters mit 50 Litern Wasser, um dadurch die restlichen Lehmartikel, die sich nach dem letzten Rückspülversuch gelöst hatten und sich noch im Filtermaterial befanden, auszuspülen. Danach wurde der Filter – wie bei den vorherigen Rückspülungen – mit einem 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch und Trübungswerten nahe >1000 NTU beaufschlagt.

Daraufhin konnten die ermittelten Messwerte mit den anderen Filterversuchen verglichen und im Ergebnis eine Reinigung des Filtermaterials festgestellt werden.

19.2 Versuchsdurchführung

Die Beaufschlagung und benötigte Messung erfolgten wie in den Filterversuchen zuvor. Das Wasser hatte einen Trübungswert von $0,00$ NTU und das Lehm-Wasser-Gemisch einen Trübungswert nahe ~ 1000 NTU.

19.3 Messwerte

Tab. 19.1: 2. Filtration von 50 l Wasser

Filtration von 50 Liter Wasser mit 0,00 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
16:25 16:26	1	10						
16:27 16:28	1	10	16:27	2	63,0	16:27	5	10
16:29 16:31	2	10	16:30	5	48,2	16:32		
16:32 16:34	2	10				16:34	2	10
16:35 16:37	2	10	16:35	10	24,9	16:37	3	10
			16:40	15	8,74	16:42	5	10
			16:45	20	6,40			
			16:50	25	5,42		18	10
			16:55	30	4,49			
			17:00	35	4,83	17:00		

Tab. 19.2: 12. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit >1000-997 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
18:25 18:26	1	10						
18:26 18:27	1	10	18:27	2	36,7	18:27		
18:28 18:31	3	10	16:30	5	24,9	18:31	4	10
18:32 18:35	3	10	18:35	10	70,9	18:35	4	10
18:37 18:40	3	10	18:40	15	62,8	18:39	4	10
			18:45	20	56,2	18:44	5	10
			18:50	25	37,5		31	10
			18:55	30	37,2			
			19:00	35	38,8			
			19:05	40	37,8			
			19:10	45	36,6			
			19:15	50	35,2	19:15		

Tab. 19.3: 13. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit >1000-946 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
09:55	1	10						
09:56								
09:56	4	10	09:58	3	28,2	09:58	7	10
10:00			10:00	5	32,9			
10:01	4	10	10:05	10	73,5	10:05		
10:06								
10:07	5	10	10:10	15	49,2	10:11	6	10
10:12								
10:12	5	10	10:15	20	40,3	10:16	5	10
10:17								
			10:20	25	36,7	10:22	6	10
			10:25	30	33,6			
			10:30	35	32,4			
			10:35	40	30,8			
			10:40	45	28,9			
			10:45	50	28,5			
			10:50	55	27,2	10:50	28	10

Tab. 19.4: 14. Filtration von 50 l Lehm-Wasser-Gemisch mit ~1000NTU

Filtration von 50 Liter Lehm-Wasser-Gemisch mit 943-975 NTU								
Beaufschlagungsintervall			Nach der Filtration					
Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge	Uhrzeit	Zeit	Trübungs- wert	Uhrzeit	Dauer	Wasser- menge
[/]	[min]	[Liter]	[/]	[min]	[NTU]	[/]	[min]	[Liter]
11:25	1	10						
11:26								
11:27	5	10	11:30	5	28,9	11:28	7	10
11:32								
11:33	6	10	11:35	10	66,5	11:35		
11:39			11:40	15	38,3			
11:41	5	10	11:45	20	30,2	11:42	7	10
11:46								
11:47	6	10	11:50	25	25,9	11:48	6	10
11:53								
			11:55	30	21,3	11:55	7	10
			12:00	35	16,9			
			12:05	40	14,8			
			12:10	45	13,7			
			12:15	50	13,8			
			12:20	55	13,7			
			12:25	60	13,5			
			12:30	65	13,0	12:30	35	10

19.4 Ergebnisse

Im Anschluss an die Beaufschlagung mit 50 Litern Wasser zeigte sich anhand der Messwerte, dass immer noch Trübungsstoffe mitausgespült wurden. Die Trübungswerte stiegen mit der Höhe der Durchflussgeschwindigkeit und ließen mit Abnahme nach. Zum Ende wurde ein Trübungswert von 4,83 NTU gemessen. Auch wenn das Filtermaterial noch nicht vollständig gesäubert wurde, hatte sich der Durchfluss im Vergleich zu den vorherigen Filterversuchen vor den Rückspüldurchläufen erheblich verstärkt. Der Filter konnte wie zu Beginn der Versuche beaufschlagt werden. Das Beaufschlagungsintervall lag hier nach der Rückspülung wieder bei 1-2 Minuten.

Die Messwerte des Filtrats aus dem Lehm-Wasser-Gemisch zeigten, dass nur ein Trübungswert von 35,2 NTU erreicht und nicht alle Lehmpartikel aus dem Gemisch gefiltert werden konnten. Nach den weiteren Filterdurchläufen hatte sich der Durchfluss wieder geringfügig verlangsamt, und die Lehmpartikel setzten sich im Filtermaterial ab. Hierdurch sanken auch die Trübungswerte erneut und erreichten am Ende einen Wert von 13,0 NTU. Dieser Wert ist im Vergleich niedriger als der Spitzenwert der letzten Filtration vor der Rückspülung. Daraus ergibt sich, dass in dem zugrundeliegenden Filteraufbau nur mit einem Filterkuchen sehr niedrige Trübungswerte erreicht werden können. Die Messergebnisse zeigen außerdem, dass die Filterschichtdicke nicht hoch genug gewählt worden war.

20 Fazit

20.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mithilfe der durchgeführten Versuche konnten bedeutende Erkenntnisse gewonnen werden: Im Testlauf zeigte sich, dass die Reinigung des Filtermaterials erforderlich war. So musste es vor den Filtrationsversuchen mit Wasser gesäubert werden. Bei einer hohen Beaufschlagung konnte eine Verformung der Sandoberfläche festgestellt werden, die als Kuhle zu erkennen war. Folglich ist die Beaufschlagungshöhe für die Filtration gering zu halten.

Die Filtrationsversuche ergaben, dass der Filter eine gewisse Zeit benötigt, um ein klares Filtrat zu erreichen. Die Lehmpartikel aus dem Lehm-Wasser-Gemisch bildeten *auf* wie auch *in* dem Filtermaterial eine immer höhere Dichte und konnten demnach kleinere Partikel auffangen. Im Zuge dessen wird jedoch die Durchflussgeschwindigkeit geringer, da sich der Filterwiderstand stetig erhöhte. Besondere Signifikanz war bei einem Lehm-Wasser-Gemisch mit sehr hohen Trübungswerten zu verzeichnen: In der Folge bildete sich schnell ein Filterkuchen auf der Quarzsandoberfläche, der nach wenigen Filterdurchläufen zur Steigerung der Durchflussgeschwindigkeit mit einer Schaufel entfernt werden musste.

Eine vollständige Sättigung des Filtermaterials konnte nach den Filterdurchläufen nicht erzielt werden, doch wurde ein gewisses Maß an Sättigung erreicht. Daher konnte nach einer Reinigung mittels Rückspülung im Anschluss mit Filtrationsversuchen die Reinigungseffizienz analysiert werden. Mit verschiedenen Wasserdruckhöhen für die Rückspülversuche konnte eine optimale Höhe für den verwendeten Filteraufbau gefunden werden. Hier zeigte sich die notwendige Aufstellhöhe bei 101 cm und folglich ergab eine Wasserdruckhöhe von 104 cm den idealen Eingangsdruck. Das Filtermaterial wurde auch nach Durchströmen von 542 Litern Wasser nicht vollständig gereinigt. Nach dem folgenden Versuch zeigte die Beaufschlagung mit Wasser in den Messresultaten, dass immer noch Lehmpartikel mitausgeschwemmt wurden. Allerdings konnte eine große Menge an Lehmpartikeln aus dem Filtermaterial entfernt werden. Die Messergebnisse sind dabei so gesunken, dass die Vermutung besteht, etwa mit einer doppelten Menge an Wasser den Filter *vollständig* reinigen zu können.

Die Ergebnisse der folgenden Filterversuche belegen, dass die Reinigung mittels der Rückspülung sich als besonders effizient erwies. Es konnte eine ähnliche Dauer der Beaufschlagung wie zu Beginn des ersten Filterversuchs erzielt werden. Ebenso sanken sich die Trübungswerte des Filtrats und erreichten einen Wert der niedriger war, als im letzten Filterdurchlauf vor der Rückspülung. Da aber die Trübungswerte in allen Versuchsreihen nicht unter 5,00 NTU sanken, ist davon auszugehen, dass die Filterschicht eventuell zu dünn gewählt wurde oder das Filtermaterial zu keiner Zeit vollständig gereinigt war.

20.2 Verbesserungsvorschläge

Um eine effektivere Filterwirkung zu erzielen, könnte eine dickere Filterschicht gewählt werden. Mit einer größeren Filtertonne wäre eine Schicht etwa mit einer Dicke von 50-60 cm möglich. Eine größere Schicht bedeutet auch, dass der Filter mit einer größeren Menge an Lehm-Wasser-Gemisch beaufschlagt werden könnte; nicht zuletzt indem diese Schicht mehr Hohlräume bietet, in denen sich Lehmartikel ablagern könnten.

Als zusätzliches Filtermaterial wäre der Einsatz von Holzkohle denkbar, welche gute Eigenschaften hinsichtlich der Filtrierung von organisch-chemischen Verbindungen besitzt. Aktivkohle filtert durch Adsorption (Anziehungskräfte) natürliche Geruchs- und Geschmacksstoffe (wie z.B. Humin-Säuren) heraus. Auch eine Vielzahl von Kohlenwasserstoffen, wie u. a. schwer abbaubare Halogen-Kohlenstoffe, werden gefiltert. So könnte eine Kohleschicht mit Hilfe von Kohlenstücke aus einem Lagerfeuer zweckhaft sein:²² Man müsste sie zerkleinern und zwischen zwei Stoffschichten einbauen. Hier kann ein Textilstück verhindern, dass es zu einer Vermischung der einzelnen Schichten kommt.

Zur Effizienzsteigerung der Reinigung mittels Rückspülung könnte man den Wasserspiegel in der Rückspültonne auf konstantem Niveau halten und so mit einem gleichbleibenden Wasserdruck das Filtermaterial reinigen. Eine Steigerung der Durchflussmenge wäre über einen kontinuierliche Wasserstrom durch das Filtermaterial zu erreichen bis eine vollständigen Reinigung des Filtermaterials eintritt. Mithilfe eines Gefäßes sowie des passenden Auslaufdurchmessers könnte ein konstanter Nachfluss zur Rückspültonne gelingen.

²² vgl. Wasserklinik 2018

20.3 Ausblick

Zur Genese einer sicheren und sauberen Trinkwasserversorgung für die gesamte Weltbevölkerung ist nicht eine bloße Kopie der Wasserversorgungssysteme und Aufbereitungsanlagen aus den Industriestaaten zweckdienlich. Sondern bereits mit kostengünstigen und einfachen Methoden kann Trinkwasser gewonnen werden, sodass keine Bedenken einer Erkrankung – auch bei täglichem Gebrauch – für den Menschen vorliegen. Mit überdrucklosen Sandfiltern, wie sie auch in dieser Thesis Anwendung fanden, können Trübstoffe effektiv vom Fest-Flüssig-Gemisch aufgefangen und ausgefiltert werden. Mit wenig Aufwand und Kosten kann der Filteraufbau erstellt sowie genutzt werden. Durch eine Rückspülung ist es möglich, das Filtermaterial ohne mühevollen Handarbeit effizient und schnell zu reinigen. Während des Filter- und Rückspülprozesses kommt es darüber hinaus zu keinem Wasserverlust, und das Wasser kann im Anschluss wieder genutzt werden – etwa im Sinne der Nachhaltigkeit zum Zwecke der Pflanzenbewässerung.

Nachdem die Trübstoffe aus dem Rohwasser gefiltert werden, und keine Gefahr einer schnellen Wiederverkeimung besteht, kann eine chemische Desinfektion des Wassers erfolgen. Aus einer anderen Thesis wurde hierzu ein Verfahren untersucht, in dem Chlor aus einer Salzlösung erzeugt und zur Desinfektion genutzt wurde. In der Praxis hatte sich diese Methode bewährt und zu nachhaltigen Ergebnissen geführt. Eine Kombination beider Systeme hätte zur Folge, dass eine gute Trinkwasserqualität aus dem Rohwasser erzeugt werden könnte. Inbezugnahme der o.g. Verbesserungsvorschläge wäre die Realisierung einer noch effizienteren Filteranlage möglich.

Die Industriestaaten stehen in der Verantwortung, jedem Menschen ausreichend Trinkwasser und die notwendigen sanitären Einrichtungen zu gewährleisten. Ihre Aufgabe ist es den Bedürftigen und Hilflosen zur Seite zu stehen. Daher erscheint es unabdingbar, die Menschen in Entwicklungsländer über die einfachen Wasseraufbereitungsmethoden aufzuklären: Mit wenig Aufwand könnte so die Lebensqualität von mehreren Millionen Menschen grundlegend verbessert werden!

21 Literatur- und Quellenverzeichnis

21.1 Bücher:

Fritsch, P. (2014): Wassergewinnung. – In: Fritsch, P./ Hoch, W./ Merkl, G./ Otillinger, F./ Rautenberg, J./ Weiß, M./ Wricke, B. (Hrsg.): Mutschmann/Stimmelmayer – Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden 2014: Verlag Springer Vieweg, S.115-236.

Grohmann, A. N./ Jekel, M./ Grohmann, A./ Szewzyk, R./ Szewzyk, U. (2011):
Wasser – Chemie, Mikrobiologie und nachhaltige Nutzung. Berlin 2011: De Gruyter Verlag.

Hancke, K. (1998): Wasseraufbereitung: Chemie und chemische Verfahrenstechnik: Berlin 1998: Springer Verlag.

Kremer, K. (1991): Physikalisch-chemische Verfahren zur Wasser-, Abwasser-, Schlammbehandlung und Wertstoffrückgewinnung – Teil 1. Berlin 1991: Verlag für Bauwesen GmbH.

Lattermann, E. (2010): Wasserbau-Praxis. 3. Auflage. Berlin 2010: Verlag Bauwerk GmbH.

Rautenberg, J. (2014): Ziele und Aufgaben der Wasserversorgung. – In: Fritsch, P./ Hoch, W./ Merkl, G./ Otillinger, F./ Rautenberg, J./ Weiß, M./ Wricke, B. (Hrsg.): Mutschmann/Stimmelmayer – Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden 2014: Verlag Springer Vieweg, S.1-14.

Saenger, N. (2016): Wasserbau und Wasserwirtschaft. – In: Albert, A. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. 22. Auflage. Köln 2016: Bundesanzeiger Verlag GmbH, S.13.2-13.45.

Wricke, B. (2014): Wasseraufbereitung. – In: Fritsch, P./ Hoch, W./ Merkl, G./ Otillinger, F./ Rautenberg, J./ Weiß, M./ Wricke, B. (Hrsg.): Mutschmann/Stimmelmayer – Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden 2014: Verlag Springer Vieweg, S.237-397.

21.2 Internetseiten:

Euroquarz 2018 (Abgerufen am 06/12/2018):

<https://www.euroquarz.de/wissen-ueber-quarzsand-quarzkies/normen-fuer-die-aufbereitung/themen-normen-fuer-die-aufbereitung/en12904-filterquarz/>

Internetchemie 2018 (Abgerufen am 04/12/2018):

<https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/stoffe/f/formazin.php>

Kieswerke-Weiss 2018 (Abgerufen am 02/12/2018):

https://www.kieswerke-weiss.de/images/kieswerke/pdf/2011_weiss_ba_sieblinie_8-16kies.pdf

Umweltbundesamt 2018 (Abgerufen am 07/12/2018):

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet#textpart-3>

UNICEF 2018 (Abgerufen am 07/12/2018):

<https://www.unicef.de/informieren/aktuelles/presse/2018/weltwassertag-am-22--maerz--jeder-tropfen-zaehlt-/161934>

Wasserklinik 2018 (Abgerufen am 04/12/2018):

<https://www.wasserklinik.com/aktivkohlefilter/>

Welthungerhilfe 2018a (Abgerufen am 08/12/2018):

<https://www.welthungerhilfe.de/aktuelles/blog/weltwassertag-2018-eine-neue-dekade-fuer-wasser/>

Welthungerhilfe 2018b (Abgerufen am 01/12/2018):

https://www.welthungerhilfe.de/fileadmin/pictures/publications/de/fact_sheets/topics/2018-factsheet-wasser-maerz.pdf

21.3 Sonstige Quellen

Sartor, J. (2015): *Script: Wasserwirtschaft und Wasserbau Teil B Wasserbau 1 – Fachgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau*. Trier 2015: Hochschule Trier.

Sartor, J. (2017): *Script: Hydromechanik – Fachgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau*. Trier 2017: Hochschule Trier.

Schoen, H.-G. (2018): *Gespräch: Dialog zwischen Herrn Prof. Dr. Ing. H. G. Schoen und Herrn cand. Ing. N. Haag am 29. Oktober 2018 an der Hochschule Trier*.

Schoen, H.-G. (2008/2009): *Script: Geotechnik 1 – Fachgebiet Geotechnik, Erstatik, Grundbau und Bodenmechanik*. Trier 2008/2009: Hochschule Trier.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich – Nicolas Haag - gemäß § 10 Abs. 6 der Prüfungsordnung vom 04.05.2012, mit der Änderungsordnung vom 04.03.2015, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

.....

Ort, Datum, Unterschrift