

Aus der Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

MENGEN UND TROCKENRÜCKSTAND VON RECHENGUT KOMMUNALER KLÄRANLAGEN

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Wirt.-Ing. (FH)
Michael Kuhn, Höpfingen,

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil H. Eckstädt, Universität Rostock
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil H. Brombach, Universität Stuttgart
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil U. Janoske, Universität Wuppertal

Tag der Einreichung: 6. Dezember 2013

Tag der Verteidigung: 4. Juli 2014

When the Well's dry, we know the Worth of Water.

Benjamin Franklin: Poor Richard's Almanack, etc., 1746

Vorwort

Diese Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit als Ingenieur in der Abwassertechnik. Motiviert wurde ich von offenen Fragestellungen zum Rechengut aus Kläranlagen. Insbesondere wurden in der Praxis häufig wissenschaftliche Erkenntnisse über die anfallende Menge sowie der mögliche Entwässerungsgrad von Rechengut nachgefragt. Dazu gab es jedoch keine befriedigenden aktuellen Antworten. Um für diese Fragen einen Wissenszuwachs zu erhalten, wurde die vorliegende Dissertation erstellt.

Zum Abschluss der Arbeit darf ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Eckstädt für die wissenschaftliche Betreuung und die Begutachtung der Arbeit herzlich danken. Bei den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Brombach von der Universität Stuttgart und Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske von der Universität Wuppertal bedanke ich mich für die Übernahme der Begutachtung der Arbeit.

Für die Durchführung der Laborversuche und die numerische Aufbereitung bedanke ich mich bei Hauke Gregor von der Universität Wuppertal. Seinem Kollegen Wolfgang Rupp danke ich für die Entwicklung und Konstruktion der Messeinrichtung an der Berufsakademie in Mosbach. Herrn Andreas Gramlich danke ich für die Planung der Sammlung von Rechengutproben. Bei Frau Keller von der Universität Würzburg bedanke ich mich für die statistische Aufbereitung der Daten, bei Frau Moritz für die Gestaltung der Arbeit und bei Herrn Prof. Dr. Michael Nelles für die wichtigen Anregungen zum Abfallrecht.

Den Mitarbeitern der Firma KUHN GmbH schulde ich Dank für die tatkräftige Mithilfe. Insbesondere die Herren Stefan Blaha und Stefan Friedlein haben mit konstruktiven Hinweisen und Anregungen aus der Praxis wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Herrn Stefan Mackert danke ich für die Durchführung vieler Analysen im Labor. Bei meinem Geschäftsführerkollegen Herrn Jürgen Kuhn bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung der Arbeit. Ein Dank gilt auch Frau Marianne Mihan von der Bibliothek der DWA für die kompetente Hilfe bei der Suche nach Literaturstellen zum Thema Rechengut.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Sabina und meinen Kindern Peter, David und Sophia. Sie haben mich jederzeit bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt. Sie waren Motivationsspenden, Antreiber, Korrekturleser und noch vieles mehr. Ohne sie wäre diese Arbeit in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Ich hoffe, dass ich mit der vorliegenden Arbeit neue Grundlagen geschaffen habe, an denen sich die Wissenschaft und die Praxis der Abwassertechnik zukünftig orientieren können.

Höpfingen, im Mai 2014

Michael Kuhn

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	i
VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	iv
FORMELZEICHEN.....	v
INDIZES.....	viii
ABKÜRZUNGEN.....	ix
1 EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung, Abgrenzung und Aufbau	2
2 LITERATURSTUDIE.....	4
2.1 Rechengutmenge.....	4
2.2 Trockenrückstand	7
2.3 Gesetze, Verordnungen, Anleitungen	10
2.3.1 Wasserrecht.....	10
2.3.2 Abfallrecht	11
2.3.3 Grenzbereich Wasserrecht und Abfallrecht	12
2.3.4 Weitere Rechtsgrundlagen	13
3 MASCHINEN ZUR ENTNAHME VON RECHENGUT.....	16
3.1 Einführung	16
3.2 Begriffe	17
3.3 Konstruktionsmerkmale	19
3.3.1 Öffnungsgeometrie der Separationsfläche	20
3.3.2 Aufstellwinkel der Separationsfläche	20
3.3.3 Konstruktiver Aufbau der Separationsfläche	20
3.3.4 Reinigung der Separationsfläche	21
3.3.5 Einbauart der Maschine.....	24
3.3.6 Piktogramme	24
3.4 Eigenschaften	29
3.4.1 Rückhaltevermögen.....	29
3.4.2 Hydraulische Belastung	32
3.4.3 Betriebsverhalten	39
3.4.4 Lebenszykluskosten	42
3.4.5 Elektrische Ausrüstung von Rechenanlagen.....	43
3.4.6 Arbeitssicherheit.....	44

4	BEHANDLUNG UND ENTSORGUNG VON RECHENGUT	46
4.1	Charakterisierung von Rechengut	46
4.2	Transportsysteme für Rechengut	48
4.2.1	Gurtförderer	49
4.2.2	Schneckenförderer	50
4.2.3	Schwemmrinnen.....	52
4.2.4	Sonstige	53
4.2.5	Piktogramme	54
4.3	Mechanische Verfahren zur Behandlung von Rechengut.....	55
4.3.1	Entwässerung	55
4.3.2	Rechengutwäsche.....	58
4.3.3	Zerkleinerung.....	59
4.3.4	Piktogramme	61
4.4	Biologische Verfahren zur Behandlung von Rechengut	62
4.4.1	Kompostierung	62
4.4.2	Vergärung	63
4.5	Thermische Verfahren für die Rechengutbehandlung	64
4.6	Recycling, Verwertung und Beseitigung	64
5	RECHENGUTMASSE	66
5.1	Durchgeführte Untersuchungen	66
5.2	Daten des Statistischen Bundesamts	66
5.3	Daten von Betreibern	69
5.4	Daten des Lehr- und Forschungskärwerks Büsnau	71
5.5	Abhängigkeiten der Rechengutmasse.....	75
5.5.1	Ausbaugröße der Anlage	75
5.5.2	Zeitlicher Verlauf	77
5.5.3	Abhängigkeit von der Spaltweite.....	80
5.6	Diskussion der Ergebnisse zur Rechengutmasse	82
6	ENTWÄSSERUNG VON RECHENGUT	84
6.1	Wassergehalt	84
6.2	Laborexperimente	87
6.2.1	Versuchsaufbau	87
6.2.2	Ergebnisse.....	97
6.2.3	Diskussion Laborexperimente	105
6.3	Feldtest.....	107
6.3.1	Versuchsaufbau	108
6.3.2	Ergebnisse.....	114
6.3.3	Diskussion Feldtest	123
6.4	Diskussion Rechengutentwässerung	125

7	TROCKENRÜCKSTAND VON RECHENGUT	127
7.1	Darstellung der Vorgehensweise.....	127
7.2	Probenahme.....	128
7.3	Analyse der gesammelten Proben.....	132
7.3.1	Trockenrückstand TR	132
7.3.2	Glühverlust GV	133
7.4	Statistische Auswertung	133
7.5	Ergebnisse der Langzeituntersuchungen.....	136
7.5.1	Unbehandeltes Rechengut	138
7.5.2	Behandeltes Rechengut.....	141
7.5.3	Regionale Verteilung	144
7.5.4	Jahreszeit	146
7.5.5	Diskussion der Ergebnisse der Langzeituntersuchung	147
7.6	Ergebnisse des Lehr- und Forschungsklärwerts Büsnau	148
7.6.1	Veränderung des TR und des GV	148
7.6.2	Korrelation zwischen TR und GV	155
7.6.3	Korrelation von GV und TR des Rechenguts zwischen Grob- und Feinrechenanlage	156
7.6.4	Diskussion Lehr- und Forschungsklärwert Büsnau	157
7.7	Zusammenstellung der wichtigsten Zahlen (TR).....	160
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	161
	LITERATURVERZEICHNIS	163
	ANHANG.....	176
	THESEN ZUR DISSERTATION	196
	SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.
	LEBENS LAUF	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

ABBILDUNG 2-1: LITERATURSTELLEN FÜR DIE SPEZIFISCHE RECHENGUTMENGE RG_{VE}	6
ABBILDUNG 2-2: LITERATURSTELLEN FÜR DEN TROCKENRÜCKSTAND, UNBEHANDELTES RECHENGUT	8
ABBILDUNG 2-3: LITERATURSTELLEN FÜR DEN TROCKENRÜCKSTAND, BEHANDELTES RECHENGUT	9
ABBILDUNG 3-1: RECHENGUT IM ABWASSERKANAL	16
ABBILDUNG 3-2: MEHRSTRASSIGE RECHENANLAGE	17
ABBILDUNG 3-3: VERLEGUNG DER SEPARATIONSFLÄCHE	21
ABBILDUNG 3-4: REINIGUNGSPRINZIP DER SEPARATIONSFLÄCHE VON FILTERSTUFENRECHEN	23
ABBILDUNG 3-5: PIKTOGRAMM MITSTROMRECHEN MIT RECHENSTÄBEN	25
ABBILDUNG 3-6: PIKTOGRAMM BANDSIEB MIT BÜRSTE UND SPÜLEINRICHTUNG	26
ABBILDUNG 3-7: PIKTOGRAMM FILTERSTUFENRECHEN	26
ABBILDUNG 3-8: PIKTOGRAMME DER RECHEN UND SIEBE	27
ABBILDUNG 3-9: BEGRENZUNG DER ÖFFNUNGSGEOMETRIE	29
ABBILDUNG 3-10: SUMMENHÄUFIGKEIT DER STABABSTÄNDE BEI GROBRECHEN	30
ABBILDUNG 3-11: SUMMENHÄUFIGKEIT DER STABABSTÄNDE BEI FEINRECHEN	31
ABBILDUNG 3-12: WASSERSPIEGEL- UND ENERGIEHÖHENDIFFERENZ AM RECHEN	33
ABBILDUNG 3-13: ABHÄNGIGKEIT DER FREIEN RECHENFLÄCHE	35
ABBILDUNG 3-14: DARSTELLUNG DER LOCHBLECHANORDNUNG R_V	37
ABBILDUNG 3-15: VERHÄLTNIS DER FREIEN FLÄCHE A_B ZUR LOCHWEITE BEI LOCHBLECHEN	38
ABBILDUNG 3-16: MASSIVER LAGERSCHADEN AM RECHEN	39
ABBILDUNG 3-17: SPLITANFALL IM KLÄRANLAGENZULAUF NACH EINEM HAVARIEFALL IM KANALNETZ	40
ABBILDUNG 3-18: STÖRUNGSZEITEN VON RECHEN IN ABHÄNGIGKEIT DER FLIESSGESCHWINDIGKEIT	41
ABBILDUNG 3-19: ROHRTRENNER UND ULTRASCHALLSENSOR AN EINEM RECHEN	45
ABBILDUNG 4-1: RECHENGUTZUSAMMENSETZUNG, JOHANNESBURG, SÜDAFRIKA	46
ABBILDUNG 4-2: SCHAUTAFEL AUF DER ARA EMMENSPITZ, CH	48
ABBILDUNG 4-3: GURTFÖRDERER AM ABWURF EINER RECHENSTRASSE IN MUMBAI, INDIEN	49
ABBILDUNG 4-4: DOPPELWELLENFÖRDERER AN EINER RECHENSTRASSE (KLA GÖTTINGEN)	51
ABBILDUNG 4-5: SCHNECKENFÖRDERER ZUR VERTEILUNG VON RECHENGUT	52
ABBILDUNG 4-6: SCHWEMMRINNE AM RECHEN, ENGLAND	53
ABBILDUNG 4-7: PIKTOGRAMME DER RECHENGUTFÖRDERER	54
ABBILDUNG 4-8: GESAMTMASSE IN ABHÄNGIGKEIT DES TROCKENRÜCKSTANDES TR	55
ABBILDUNG 4-9: SCHNITTBILD EINER WASCHPRESSE	58
ABBILDUNG 4-10: GEWASCHENES UND ENTWÄSSERTES RECHENGUT	59
ABBILDUNG 4-11: VERZOPFUNG VON ABWASSERINHALTSSTOFFEN	61
ABBILDUNG 4-12: PIKTOGRAMME DER BEHANDLUNGSMASCHINEN	61
ABBILDUNG 5-1: GROBRECHENANLAGE DES LFKW BÜSNAU	71
ABBILDUNG 5-2: FEINRECHENANLAGE DES LFKW BÜSNAU	72

ABBILDUNG 5-3: WAAGE AN DER RECHENANLAGE DES LKFW BÜSNAU	72
ABBILDUNG 5-4: RECHENGUTANFALL IN ABHÄNGIGKEIT DER AUSBAUGRÖSSE	76
ABBILDUNG 5-5: SPEZIFISCHE RECHENGUTMENGE VON KLÄRANLAGEN	77
ABBILDUNG 5-6: GANGLINIEN DES ABWASSERS UND SEINER FESTSTOFFE BEI TROCKENWETTER	78
ABBILDUNG 5-7: GANGLINIEN DES ABWASSERS UND SEINER FESTSTOFFE NACH REGENEREIGNIS	79
ABBILDUNG 5-8: SPEZIFISCHE RECHENGUTMENGE IN ABHÄNGIGKEIT DER ÖFFNUNGSGEOMETRIE	81
ABBILDUNG 6-1: BINDUNG VON WASSER AN FESTSTOFFE AM BEISPIEL VON KLÄRSCHLAMM	86
ABBILDUNG 6-2: VERSUCHSANLAGE MIT MESSRECHNER IN MOSBACH	87
ABBILDUNG 6-3: AUFBAU DER PRESSVERSUCHE	89
ABBILDUNG 6-4: CAD-MODELL DER PRESSVORRICHTUNG MIT 100 MM DURCHMESSER	89
ABBILDUNG 6-5: PRESSVORRICHTUNG, ENTWÄSSERUNGSVERSUCHE MIT 200 MM DURCHMESSER	90
ABBILDUNG 6-6: VERSUCHSAUFBAU DES DURCHSTRÖMUNGSVERSUCHES	92
ABBILDUNG 6-7: CAD-MODELL DER VORRICHTUNG FÜR DEN DURCHSTRÖMUNGSVERSUCH	93
ABBILDUNG 6-8: PRESSLING NACH DEM DURCHSTRÖMUNGSVERSUCH	94
ABBILDUNG 6-9: VERSCHLEISS AN DER SPITZE DER SCHNECKE EINER WASCHPRESSE	94
ABBILDUNG 6-10: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE MESSUNG DER SCHERFESTIGKEIT	95
ABBILDUNG 6-11: AUFGEFAHRENE MESSEINRICHTUNGEN FÜR DEN VERSUCH ZUR SCHERFESTIGKEIT	96
ABBILDUNG 6-12: CAD-SCHNITTMODELL DER MESSEINRICHTUNG	96
ABBILDUNG 6-13: AUSGEPRESSTE WASSERMENGE	97
ABBILDUNG 6-14: ZEITVERHALTEN DER PROBE 700870	98
ABBILDUNG 6-15: ENTWÄSSERUNGSVERHALTEN	100
ABBILDUNG 6-16: ABHÄNGIGKEIT DER ENTWÄSSERUNG VON DER ANZAHL DER PRESSUNGEN	100
ABBILDUNG 6-17: ABHÄNGIGKEIT DES TROCKENRÜCKSTANDS VOM ENTSPANNTEN DRUCK	101
ABBILDUNG 6-18: ABHÄNGIGKEIT DES MASSENSTROMS VOM DRUCK	102
ABBILDUNG 6-19: MASSENSTROM IN ABHÄNGIGKEIT VOM PRESSDRUCK	103
ABBILDUNG 6-20: ABHÄNGIGKEIT DES MASSENSTROMS VOM DRUCKVERHÄLTNIS	103
ABBILDUNG 6-21: WASCHPRESSE MIT AUSTRAGSROHR (RECHTS) FÜR RECHENGUT	109
ABBILDUNG 6-22: EINBAUSITUATION DES NACHPRESSMODULS	110
ABBILDUNG 6-23: EINGEBAUTES NACHVERDICHTUNGSMODUL MIT DEHNMESSSCHRAUBE	110
ABBILDUNG 6-24: NACHPRESSMODUL IM ORIGINAL UND ALS SIMULATIONSMODELL	111
ABBILDUNG 6-25: DEHNMESSSCHRAUBE	112
ABBILDUNG 6-26: KENNLINIE DER SCHRAUBE 3 NACH DER KALIBRIERUNG	112
ABBILDUNG 6-27: SCHEMA DER ANLAGE ZUM ENTWÄSSERUNGSVERSUCH	113
ABBILDUNG 6-28: ANZAHL DER MONATLICHEN ZYKLEN DER WASCHPRESSE	115
ABBILDUNG 6-29: ANZAHL DER ZYKLEN IM BEOBACHTUNGSZEITRAUM	116
ABBILDUNG 6-30: ZULAUFMESSUNG DER KLÄRANLAGE ALLFELD AM 15. AUGUST 2013	117
ABBILDUNG 6-31: DATENAUFZEICHNUNG ZYKLUS 1 AM 25.05.2010	118
ABBILDUNG 6-32: TROCKENWETTERAUSTRAG ZYKLUS 1 AM 11.09.2008	119

ABBILDUNG 6-33: REGENWETTERAUSTRAG ZYKLUS 6 AM 20.12. 2008	120
ABBILDUNG 6-34: TROCKENWETTERAUSTRAG ZYKLUS 3 AM 17. 02. 2009	121
ABBILDUNG 7-1: PROBENAHE AUS EINEM RECHENGUTCONTAINER	129
ABBILDUNG 7-2: BEISPIEL EINES AUSGEFÜLLTEN DATENBLATTES	130
ABBILDUNG 7-3: VOLLSTÄNDIG GEKENNZEICHNETE UND DOKUMENTIERTE RECHENGUTPROBE	131
ABBILDUNG 7-4: HISTOGRAMM DES TROCKENRÜCKSTANDS ALLER PROBEN	136
ABBILDUNG 7-5: SUMMENLINIE DES TR ALLER PROBEN	136
ABBILDUNG 7-6: BOXPLOT DES TR ALLER BEHANDELTEN UND UNBEHANDELTEN PROBEN	137
ABBILDUNG 7-7: STREUDIAGRAMM DES TR ALLER UNBEHANDELTEN PROBEN IM JAHRESVERLAUF	138
ABBILDUNG 7-8: HISTOGRAMM DES TR DER UNBEHANDELTEN PROBEN	139
ABBILDUNG 7-9: SUMMENLINIE DES TR DER UNBEHANDELTEN PROBEN	140
ABBILDUNG 7-10: BOXPLOT DES TR DER UNBEHANDELTE PROBEN IM JAHRESVERGLEICH	141
ABBILDUNG 7-11: STREUDIAGRAMM DES TR VON BEHANDELTEM RECHENGUT IM ZEITVERLAUF	142
ABBILDUNG 7-12: HISTOGRAMM DES TR DER BEHANDELTEN PROBEN	142
ABBILDUNG 7-13: SUMMENLINIE DES TR DER BEHANDELTEN PROBEN	143
ABBILDUNG 7-14: BOXPLOT DES TR DER BEHANDELTEN PROBEN NACH JAHREN	144
ABBILDUNG 7-15: VERTEILUNG DES TR VON BEHANDELTEN PROBEN NACH DER POSTLEITZAHL	145
ABBILDUNG 7-16: BOXPLOT DER VERTEILUNG DES TR NACH MONATEN	146
ABBILDUNG 7-17: STREUDIAGRAMM DES TR DER GROBRECHEN	149
ABBILDUNG 7-18: BOXPLOT DES TROCKENRÜCKSTANDES DER GROBRECHEN	150
ABBILDUNG 7-19: STREUDIAGRAMM DES GV DER GROBRECHEN	151
ABBILDUNG 7-20: BOXPLOT DES GLÜHVERLUSTES DES RECHENGUTS DER GROBRECHEN	151
ABBILDUNG 7-21: STREUDIAGRAMM DES TROCKENRÜCKSTANDS DES RECHENGUTS	152
ABBILDUNG 7-22: BOXPLOT DES TR DER FEINRECHEN	153
ABBILDUNG 7-23: STREUDIAGRAMM DES GLÜHVERLUSTES DES RECHENGUTS	154
ABBILDUNG 7-24: BOXPLOT DES GLÜHVERLUSTES DES RECHENGUTS DER FEINRECHEN	154
ABBILDUNG 7-25: KORRELATION VON TR UND GV IN DER FEINRECHENANLAGE	156
ABBILDUNG 7-26: KORRELATION DES TR VON GROB- UND FEINRECHEN	157

VERZEICHNIS DER TABELLEN

TABELLE 3-1: BESCHREIBUNG DER PIKTOGRAMME	28
TABELLE 4-1: BESCHREIBUNG DER PIKTOGRAMME VON RECHENGUTFÖRDERERN	54
TABELLE 4-2: BESCHREIBUNG DER PIKTOGRAMME VON BEHANDLUNGSMASCHINEN	62
TABELLE 4-3: ENTSORGUNG VON RECHENGUT IN DEUTSCHLAND	65
TABELLE 5-1: INPUT VON RECHENGUT AUF ENTSORGUNGSANLAGEN NACH BUNDESLÄNDERN	68
TABELLE 5-2: SPEZIFISCHE RECHENGUTMENGEN VERSCHIEDENER KLÄRANLAGEN	70
TABELLE 5-3: RECHENGUTMENGEN AUF DEM LFKW BÜSNAU (MAURER, 2012).....	73
TABELLE 5-4: SPEZIFISCHE RECHENGUTMENGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SPALTWEITE.....	80
TABELLE 6-1: ERGEBNISSE DES SCHERVERSUCHES FÜR RECHENGUT	104
TABELLE 7-1: ZUSAMMENSTELLUNG DER WICHTIGSTEN ZAHLEN ZUM TROCKENRÜCKSTAND	160

FORMELZEICHEN

Lateinische Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
A	Fläche	m ²	
A _B	freie Rechenfläche	m ²	
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	kg	
EGW	Einwohnergleichwert	E _{EGW}	60 g BSB ₅ / (E _{EZ} • d)
EW	Einwohnerwert	E _{EW}	EW = EZ + EGW
EZ	Einwohnerzahl	E _{EZ}	
F	Kraft	N	
F _{an}	Kraft aus dem Antriebsmoment	N	
F _{ent}	Entspannte Kraft	N	
F _{max}	Maximalkraft	N	
F _{press}	Presskraft	N	
H _{ix}	Heizwert	MJ / kg	
I	Stromstärke	A	
L	Länge Hebelarm	M	
M _{an}	Antriebsmoment	Nm	
M _L	Losbrechmoment	Nm	
oTR	organischer Trockenrückstand	-	
P	Wirkleistung	kW	
Q	Volumenstrom	L / s, m ³ / h	
R ²	Bestimmtheitsmaß	-	
RG _{vo}	Rechengutmenge, volumenbezogen	L	
RG _{ve}	spezifische Rechengutmenge	L / (E _{EZ} • a)	
T	Trockenmasseanteil	-	
TR	Trockenrückstand	-	
TR _i	Trockenrückstand an der Stelle i	-	
TS	Trockensubstanzgehalt	g / L	
V	Volumen	L	Der Großbuchstabe L wird für die Einheit „Liter“ verwendet, um Verwechslungen des Kleinbuchstabens l (L) mit dem Großbuchstaben I (i) zu vermeiden
W	Rangsumme	variabel	Wilcoxon-Rangsummen-Test
W _{LOI}	Glühverlust	-	
W _{ROI}	Glührückstand	-	

FORMELZEICHEN

Lateinische Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
a	Spaltweite, Stababstand	mm	
b	Breite	m	
d	Durchmesser	m	
f	Umrechnungsfaktor	-	
f ₀	Freiflächenfaktor	-	
f _B	Belegungsfaktor	-	
g	Fallbeschleunigung	m / s ²	
h	Höhe	m	
h _i	Höhe an der Stelle i	m	
h _v	Energielinienendifferenz	m	auch Verlusthöhe
Δh	Drucklinienendifferenz	m	auch Wasserspiegeldifferenz
m _a	Masse der leeren Schale	g	
m _b	Masse der Schale mit der feuchten Probe	g	
m _c	Masse der Schale mit der getrockneten Probe	g	
m _(a)	Masse des leeren Tiegels	g	
m _(c)	Masse des Tiegels mit dem Glührückstand	g	
m _(d)	Masse des Tiegels mit der getrockneten Probe	g	
m _G	Gesamtmasse	g	
m _{RG}	Rechengutmasse	kg	
m _{RGe}	spezifische Rechengutmasse	kg / (E _{EZ} • a)	
m _{tr}	Trockenmasse	g	
m _w	Wassermasse	g	
n	Anzahl	-	
p	Irrtumswahrscheinlichkeit	-	
p _i	Druck an der Stelle i	Pa	
p _{max}	Maximaldruck	Pa	
p _{RG}	Druck auf das Rechengut	Pa	
p _w	Druck auf das Wasser	Pa	
r _{mi}	mittlerer Radius	m	
r _s	Rangkorrelationskoeffizient	-	Spearman-Rangkorrelation-Test
s	Stabdicke	mm	
SRG	Schichtdicke	mm	

FORMELZEICHEN

Lateinische Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
t	Lochteilung	m	
u	Schnittlänge	m	
u _m	Feuchtegehalt	-	
v	Geschwindigkeit	m / s	
v _i	Geschwindigkeit an der Stelle i	m / s	
v _{ver}	Versuchsgeschwindigkeit	mm / min	
w	Lochweite	m	
w _{dr}	Trockenrückstand Probe	-	
x	Variable	variabel	
y	Variable	variabel	

Griechische Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
α	Signifikanzniveau	-	
α	Neigungswinkel des Rechenrostes	°	
β	Formfaktor	-	
ρ	Dichte	g / L, kg / m ³	
τ_{aB}	zulässige Scherspannung	Pa	
ψ	Feuchteanteil	-	

INDIZES

a	leer
aB	Abscherung
an	Antrieb
B	Belegung
b	feucht
c	geglüht
d	trocken
dr	dry (trocken)
e	pro Einwohner
ent	entspannt
EGW	Einwohnergleichwert
EW	Einwohnerwert
EZ	Einwohnerzahl
G	Gesamt
i_x	inferior (unterer)
i	Variable
LOI	loss on ignition
m	Feuchtegehalt
mi	mittlerer
max	Maximal
press	pressen
RG	Rechengut
RGe	Rechengut, spezifisch
ROI	residue on ignition
s	Spearman
tr	trocken
v	Verlust
ve	Volumen, spezifisch
ver	Versuch
vo	Volumen
w	Wasser

ABKÜRZUNGEN

aaRdT	allgemein anerkannte Regeln der Technik
ABA	Abwasserbehandlungsanlage
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AbwV	Abwasserverordnung
arithm.	arithmetisch
ATEX	Atmosphäre Explosive
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e.V.
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CSV	Comma-separated value
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
EAK	Europäischer Abfallartenkatalog
EAN	Europäische Abfallschlüsselnummer
EAV	Europäisches Abfallverzeichnis
EN	Europäische Norm
FF	Flansch-Flansch
Gew.-Proz.	Gewichts-Prozent
GUV	Gesetzliche Unfallversicherung
GV	Glühverlust
k.A.	keine Angabe
KEK	Kreislaufwirtschaft, Energie und Klärschlamm
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KVR	KUHN Vario Resistor
KWP	KUHN Waschpresse
LFKW	Lehr- und Forschungsklärwerk
Mio.	Million
NASS	Neuartige Sanitärsysteme
NSEF	National Screens Evaluation Facility
PI	Druckanzeige
R	Freie Programmiersprache
R_v	Rundlochung versetzte Reihe
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SCR	Screen Capture Ratio
TASI	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TOC	Total Organic Carbon
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanzgehalt
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
W	Rangsumme
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WI	Massenanzeige

ABKÜRZUNGEN

WIMES	Water Industry Mechanical and Electrical Specification
WR	Massenregistrierung
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
z.B.	zum Beispiel

1 EINLEITUNG

Wasser wird neben der Nutzung als Trinkwasser oder zur Bewässerung auch dazu genutzt, auf einfachem Wege Fäkalien, Urin und andere Feststoffe aus besiedelten Gebieten heraus zu transportieren. Dieser Gesamtstrom wird Abwasser genannt. Im Wasserhaushaltsgesetz wird das Abwasser folgendermaßen definiert:

„1. das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte Wasser und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie 2. das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen gesammelt abfließende Wasser (Niederschlagswasser)“. (WHG, 2009: § 54).

Abwasser muss jedoch vor der Einleitung in den Vorfluter weitestgehend von den durch die Nutzung zugeführten Stoffen separiert werden. Diese Trennung wird beinahe ausschließlich in Kläranlagen vorgenommen. Dabei werden als feste Bestandteile die Fraktionen Klärschlamm, Sand, Fett und Rechengut abgeschieden. Während dem Klärschlamm auf Grund seiner wesentlich größeren Menge sowohl unter Fachleuten als auch in der Öffentlichkeit eine große Bedeutung beigemessen wird, sind die anderen genannten Feststoffe selten Gegenstand von Vorträgen, Veröffentlichungen oder wissenschaftlichen Arbeiten.

1.1 Problemstellung

Die Abwasserbehandlung unterlag und unterliegt auch in Zukunft einem permanenten Weiterentwicklungsprozess. Durch ein verändertes Umweltbewusstsein seit den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden vom Gesetzgeber immer höhere Anforderungen an die Kläranlagen festgelegt. Viele weitere Faktoren wie demographische Veränderungen, geändertes Verbraucherverhalten, moderne Kanalisationssysteme, neue Reinigungstechnologien und steigende Energiekosten erhöhen noch zusätzlich die Notwendigkeit, die Verfahrenstechnik zur Reinigung von Abwasser ständig anzupassen und zu optimieren. Dieses Bestreben gilt auch für die Entnahme und Behandlung von Rechengut.

Durch die hohe Investitionstätigkeit der Kläranlagenbetreiber sowie die Entwicklungsarbeit der Hersteller von Anlagen und Maschinen zur Rechengutbehandlung werden heute viele verbesserte oder neue Technologien und Verfahren im Bereich der mechanischen

Vorreinigung eingesetzt. Die dadurch veränderte Menge des Rechenguts und dessen Behandlung führen zu dem Ergebnis, dass viele in der Literatur beschriebene Daten zur Rechengutmenge und zum Trockenrückstand nicht mehr aktuell sind.

Auch die bekannten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Rechengut selbst wurden schon vor langer Zeit ermittelt und veröffentlicht. Zudem lagen für die damaligen Erkenntnisse nur wenige Untersuchungen und Messungen vor. Es fehlen vor allen Dingen aktuelle Daten, die die anfallende Menge und die Entwässerungseigenschaften von Rechengut beleuchten.

1.2 Zielsetzung, Abgrenzung und Aufbau

Um den derzeitigen Stand der Wissenschaft zu ermitteln, wird in dieser Arbeit zunächst eine Literaturstudie (Kapitel 2) durchgeführt. Darin werden die bekannten Angaben zur Rechengutmenge und zum Trockenrückstand erfasst. Daraus wird eine allgemeine Übersicht über die in der Literatur vorhandenen Daten entwickelt. Zur Abrundung der Literaturrecherche werden zusätzlich die rechtlichen Grundlagen genannt und deren Abgrenzungsproblematik angesprochen.

In der aktuellen Literatur finden sich detaillierte technische Beschreibungen von Maschinen zur Rechengutentnahme, allerdings nur selten Hinweise zu relevanten Details wie den Konstruktionsmerkmalen oder den Eigenschaften. Diese Faktoren sind für die Planung und Auslegung der Maschinen und Anlagen zur Rechengutentnahme sehr wichtig. Diese werden in einer neuen Form aufbereitet und dargestellt (Kapitel 3).

Auf die Maschinen und Verfahren zur Rechengutbehandlung wurde bisher in der Literatur kaum eingegangen. Deshalb wird dieser Teil ausführlicher behandelt (Kapitel 4). Die erarbeitete Zusammenstellung soll die mögliche Bandbreite der derzeit eingesetzten Technologien aufzeigen.

Der Hauptteil der Arbeit beginnt mit der Ermittlung der Datengrundlage zur anfallenden Rechengutmasse auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland (Kapitel 5). Für die Auslegung der zuvor genannten Maschinen ist sie ein sehr wichtiges Kriterium. Deshalb werden durch verschiedene Ansätze aktuelle Zahlen ermittelt (Kapitel 5.2–5.4). Die Abhängigkeit der Rechengutmenge von verschiedenen Einflussfaktoren wird ebenfalls dargestellt (Kapitel 5.5)

Selbst so grundlegendes Wissen wie die Zusammenhänge bei der Entwässerung von Rechengut ist bisher noch nicht ausführlich wissenschaftlich beschrieben worden. Um auch hier zu neuen Erkenntnissen zu gelangen, wird das Entwässerungsverhalten im Labor ausführlich untersucht (Kapitel 6.2). In einem Feldversuch wird zudem das Entwässerungsverhalten einer Waschpresse mit einem Zusatzmodul untersucht. Dabei sollen zeitliche Schwankungen und deren Auswirkungen auf verschiedene Maschinenparameter analysiert werden. Mit diesen Daten soll ermittelt werden, welche Parameter zur Anpassung einer Maschine zur Rechengutbehandlung an die unterschiedlichen Zulaufsituationen von Kläranlagen geeignet sind (Kapitel 6.3).

In Deutschland gibt es 9.632 kommunale Kläranlagen (BROMBACH, 2013: 1046), in denen Rechengut aus dem Abwasser entnommen wird. Leider gibt es aber keine Übersicht über den erreichten Trockenrückstand des in diesen Anlagen entnommenen Rechengutes. Veröffentlicht wurden bislang nur Erhebungen, die in der Regel auf einzelne Anlagen oder kleine Gebiete beschränkt sind. Um dieser Einschränkung entgegenzuwirken, werden in einer über einen langen Zeitraum angelegten Untersuchung Proben von Rechengut gesammelt und analysiert (Kapitel 7). Diese Daten können als Anhaltspunkt für Leistungsvergleiche dienen. Außerdem ist der Trockenrückstand in der Praxis einer der wichtigsten Kennwerte von Rechengut. Der Trockenrückstand gibt Auskunft über die Frage, wie viel Wasser beim Transport mit befördert werden muss. Da die Entsorgungskosten über das Gesamtgewicht berechnet werden, spielt der Trockenrückstand eine große Rolle. Eine geringere Rechengutmasse bedeutet damit auch geringere Entsorgungskosten. Deshalb wird ein geringer Wassergehalt angestrebt.

Mit der Bezeichnung „Rechengut“ wird innerhalb dieser Arbeit ausschließlich Rechengut aus kommunalen Kläranlagen beschrieben. Die mit dem gleichen Namen bezeichneten Rückstände aus Gewässern oder aus der Industrie werden nicht betrachtet. Aus Gründen der Vereinfachung wird auch „Siebgut“ aus kommunalen Kläranlagen in diesem Begriff eingeschlossen. Die in den Kapiteln 5 und 7 genannten Fakten und Daten beziehen sich auf Rechengut aus Deutschland.

2 LITERATURSTUDIE

In diesem Kapitel werden Aussagen von Literaturquellen zur Rechengutmenge (Kapitel 2.1) und zum Trockenrückstand (Kapitel 2.2) dokumentiert. Den Abschluss bildet die Betrachtung der Rechtsgrundlagen und Normen, die mit dem Rechengut im Zusammenhang stehen (Kapitel 2.3).

2.1 Rechengutmenge

Aussagen zu der auf Kläranlagen anfallenden volumenbezogenen Rechengutmenge (RG_v) können an vielen Stellen der Literatur gefunden werden. Allerdings wird recht häufig eine Quelle genannt, oder die genannte Menge kann sehr leicht auf eben diese Quelle zurückgeführt werden. Eigene Untersuchungen sind dagegen sehr selten. Deshalb verdeutlicht die nachfolgende Abbildung 2-1 diejenigen Literaturstellen, bei denen vermutet werden kann, dass es sich um eigene Untersuchungen handelt. Außerdem werden in diese Auflistung auch Quellen aufgenommen, die von solchen Untersuchungen berichten. Zusätzlich sind auch Quellen aus der englischsprachigen Literatur aufgeführt.

Leider fehlt bei den vorhandenen Angaben fast immer der Hinweis, ob es sich um behandeltes oder unbehandeltes Rechengut handelt. Deshalb kann der Entwässerungsgrad sehr oft nur vermutet werden. Es ist davon auszugehen, dass die meisten Angaben sich auf unbehandeltes Rechengut beziehen. Wenn vermerkt ist, um welche Art von Rechengut es sich handelt, so wird diese in der Tabelle im Anhang I entsprechend gekennzeichnet.

Alle Literaturstellen werden auf die spezifische Rechengutmenge (RG_{ve}) mit der Einheit Liter Rechengut pro Einwohnerwert und Jahr ($L / (E_{EW} \cdot a)$) umgerechnet, weil diese die in der Literatur gebräuchlichste Form ist. Hauptsächlich in den älteren Quellen finden sich sehr häufig Begriffe wie „pro Kopf“ oder „pro Einwohner“. Diese werden hier mit der heute üblichen Bezeichnung Einwohnerwert gleichgesetzt, da ein möglicher industrieller Anteil nachträglich nicht abgeschätzt werden kann. Auch die an vielen Stellen verwendete Einheit „E“ ist nicht eindeutig, da diese sowohl für die Formelzeichen Einwohnerzahl (EZ), Einwohnergleichwert (EWG) und Einwohnerwert (EW) verwendet wird (DIN, 1985: 12 f). Um auch bei der Einheitenschreibweise eine eindeutige Zuordnung zu erhalten, wird in dieser Arbeit die Einheit durch Indizes ergänzt. Es steht für die Einwohnerzahl die Einheit E_{EZ} , für den Einwohnergleichwert die Einheit E_{EWG} und für den Einwohnerwert E_{EW} . Der Umrechnungsfaktor des Einwohnergleichwertes zum

Einwohnerwert wird nicht spezifiziert. Üblicherweise wurde in der Vergangenheit ein Wert von 60 g BSB₅ pro Einwohnerwert und Tag verwendet.

Wenn für die Rechengutmenge ein Bezug auf das Wasservolumen gefunden wurde, wird hier ein Umrechnungsfaktor von 4 L / s pro 1.000 Einwohner verwendet (IMHOFF, 2009: 124). Bei Angaben des Rechenguts als Masse wurde eine Dichte von 1 kg / L eingesetzt (ESCH, 1999: 946). Dieser Wert scheint schon allein wegen des relativ hohen Wassergehaltes der Proben plausibler als der an anderer Stelle genannte Wert von 0,8 kg / L (DOEDENS, 1984: 62; SCHÜSSLER, 1992: 1365).

Die Ergebnisse der Literaturstudie für die spezifische Rechengutmenge werden auf der folgenden Seite dargestellt (Abbildung 2-1). Zur besseren Übersicht wurde eine grafische Darstellung gewählt.

Die von den Autoren in Abbildung 2-2 genannten Bandbreiten der Rechengutmengen werden durch den waagerechten Strich repräsentiert. Der Punkt ist der Mittelwert des kleinsten und des größten Wertes und dient zur Orientierung. Detaillierte Angaben zu den Daten sind im Anhang I zu finden. Die jeweiligen Quellen werden in der Abbildung genannt.

Bei der Analyse der Daten fällt sofort die große Bandbreite der Werte von Seyfried auf. Darin wurden die Werte von unbehandeltem Rechengut aus sechs Anlagen dokumentiert. Allerdings handelt es sich dabei um Angaben der Betreiber, die nicht durch Messungen von Seyfried überprüft wurden. Die Daten wurden dennoch aufgenommen, weil die Literaturstelle (SEYFRIED, 1985) häufig zitiert wird.

Generell ist eine breite Streuung der Literaturdaten zur spezifischen Rechengutmenge RG_{ve} zu verzeichnen. Die sehr kleinen Werte $< 0,1 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$ stammen alle aus den amerikanischen Quellen (METCALF, 1991 und WEF, 2010). Darin bezieht sich die Rechengutmenge immer auf die Durchflussmenge des Abwassers. Der in den USA deutlich höhere spezifische Wasserverbrauch führt dann dazu, dass eine geringere Konzentration von Rechengut vorliegt. Es könnte deshalb sein, dass der aus der deutschen Literatur angesetzte Umrechnungsfaktor nicht zutrifft. Wenn in einer Vergleichsrechnung der spezifische Wasserverbrauch in Deutschland von $125 \text{ L} / (E_{EZ} \cdot d)$ eingesetzt wird, ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,4 L/s pro 1000 Einwohner.

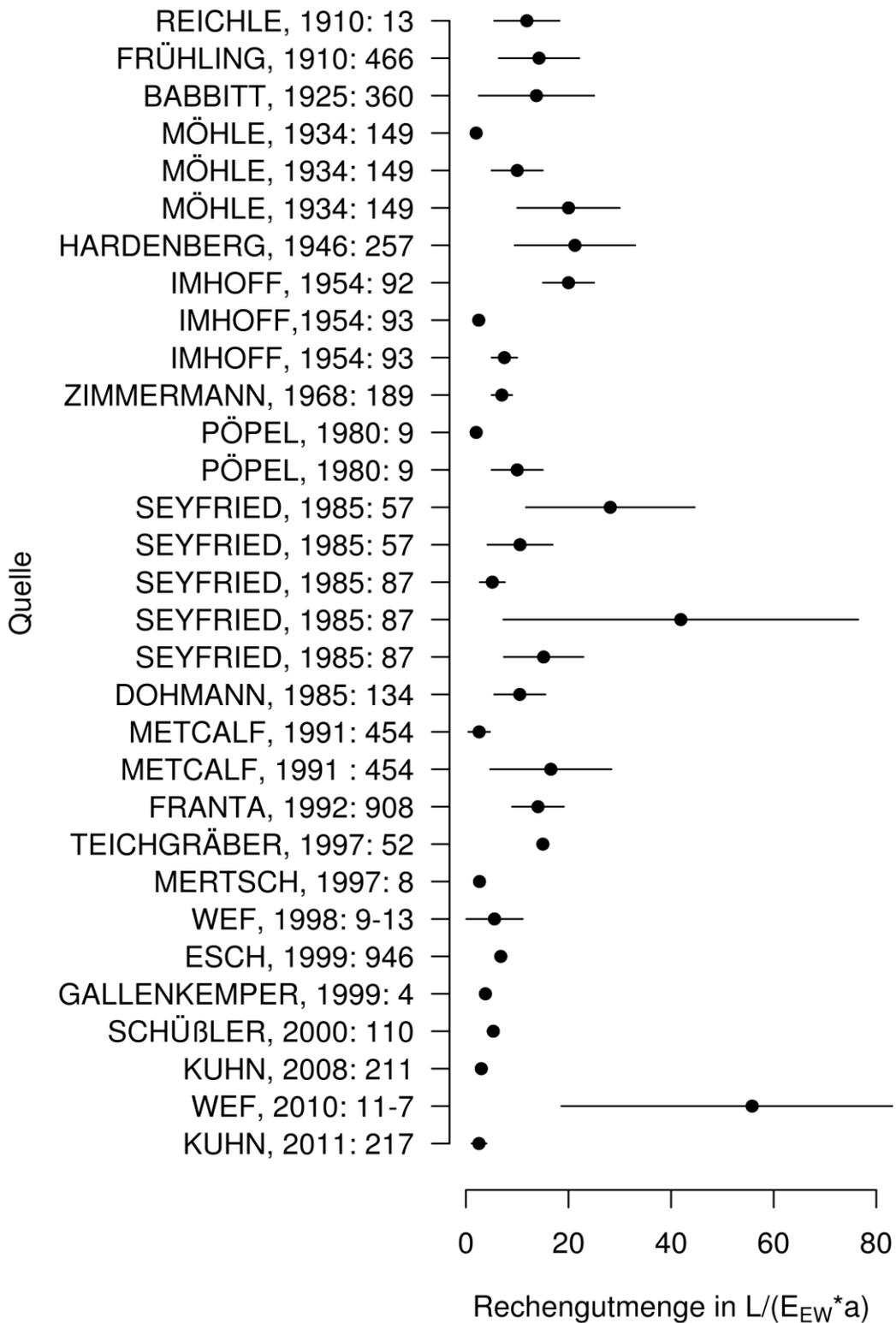


Abbildung 2-1: Literaturstellen für die spezifische Rechengutmenge RG_{ve}

Eine Überprüfung dieses Ergebnisses anhand der Kennzahlen der Klärwerke von Hamburg ergibt bei 2,4 Mio E_{EW} und einer behandelten Abwassermenge von 141,06 Mio m^3 / a (HAMBURG, 2007) einen Wert von 1,86 L / s pro 1000 E_{EW} und Jahr. Damit kann bestätigt werden, dass der genannte Umrechnungsfaktor von 4 L / s pro 1000 E_{EW} und Jahr für die Rechengutmenge aus deutschen Anlagen zu hoch angesetzt ist.

Ohne die amerikanischen Werte liegt der kleinste Wert für die spezifische Rechengutmenge bei 1 L / ($E_{EW} \cdot a$), der größte bei 76,5 L / ($E_{EW} \cdot a$). Insbesondere der höchste Wert ist, wie schon beschrieben, ein Einzelwert aus einer Anlage und deshalb nur bedingt übertragbar. Auf Grund der hohen Zahl von untersuchten Anlagen scheinen die Werte von Mertsch mit 2,65 L / ($E_{EW} \cdot a$) (MERTSCH, 1997) und Esch mit 6,8 L / ($E_{EW} \cdot a$) (ESCH, 1999) die Verhältnisse in Deutschland recht gut einzugrenzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Untersuchungszeitraum von Mertsch und Esch die zusätzliche Entwässerung von Rechengut möglicherweise bei den großen Verbänden in NRW, aber noch nicht allgemein auf deutschen Kläranlagen, verbreitet war. Die Verbreitung von Entwässerungsanlagen ist inzwischen fast flächendeckend. Daraus lässt sich schließen, dass die spezifische Rechengutmenge in Deutschland inzwischen niedriger geworden ist.

2.2 Trockenrückstand

Der Anteil der Trockenmasse an der gesamten Masse von Schlamm wird als Trockenrückstand (TR) bezeichnet (DIN, 2007b: 59 Nr. 9410). Diese Definition wird in der Praxis auch für Rechengut angewendet. Umgangssprachlich wird dieser Wert auch als Trockensubstanzgehalt oder Feststoffgehalt bezeichnet, was aber so nicht richtig ist.

Vergleichbar zum Kapitel 2.1 werden nachfolgend die Literaturstellen aufgelistet, die Angaben zum Trockenrückstand aufgrund eigener Untersuchungen machen oder von solchen Untersuchungen lediglich berichten. Zunächst werden die Fundstellen für unbehandeltes, also nicht gepresstes Rechengut dargestellt (Abbildung 2-2, folgende Seite).

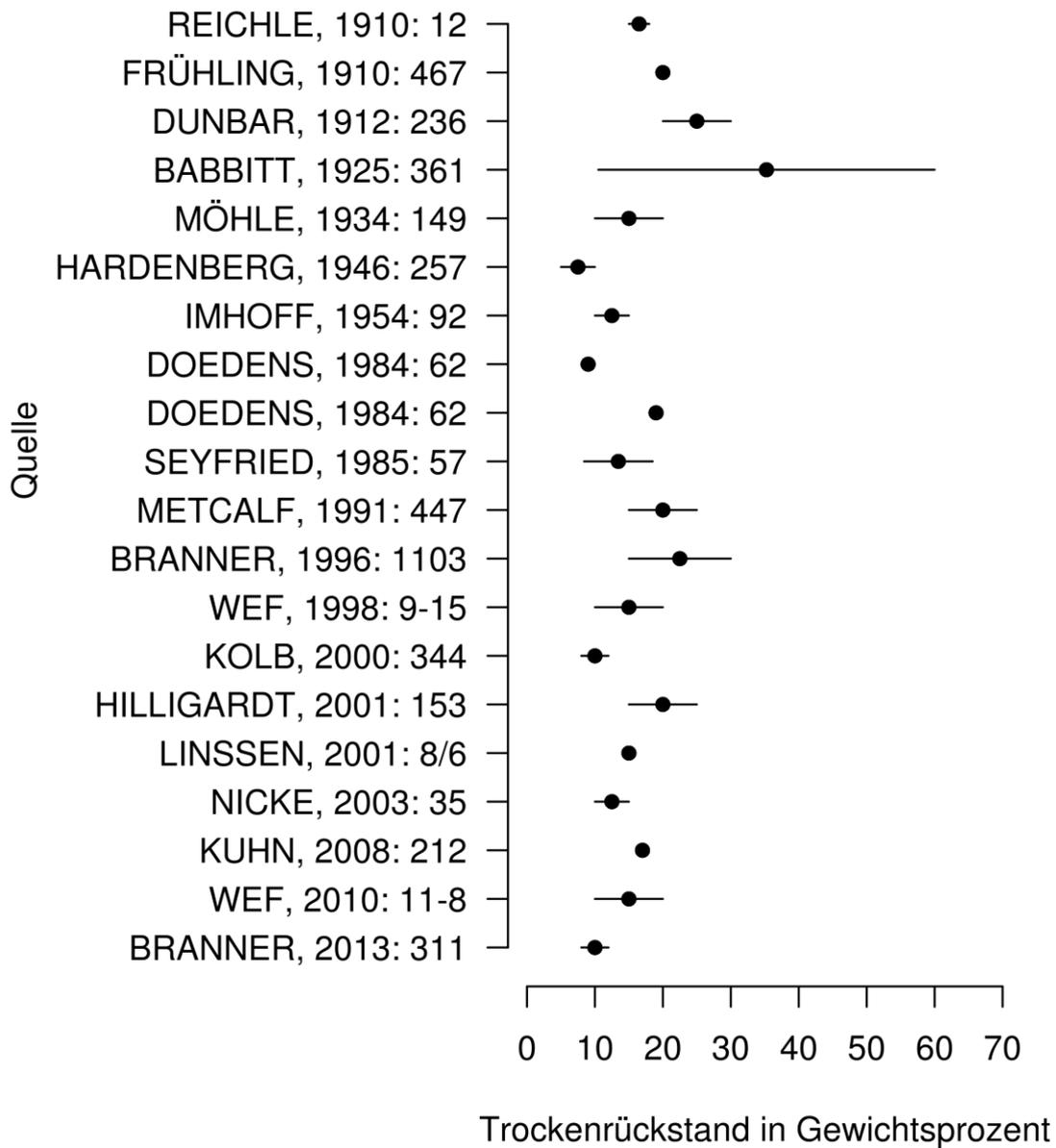


Abbildung 2-2: Literaturstellen für den Trockenrückstand von unbehandeltem Rechengut

In dieser Abbildung ist die von Babbitt angegebene Spreizung sicherlich unter Vorbehalt zu werten. Die Ursache für die große Spreizung der restlichen Werte kann daran liegen, dass alle Angaben, die nicht ausdrücklich als gepresstes, also behandeltes Rechengut bezeichnet werden, als unbehandelt gewertet wurden. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass vor allem Maximalwerte nicht richtig zugeordnet sind.

Ganz aktuell hat sich Branner mit der Messung des Trockenrückstands von Rohrechengut direkt vom Rechen beschäftigt. Da für diese Untersuchung eine große Anzahl von Werten zur Verfügung stand, können diese Werte von 8 bis 12 % TR für Rohrechengut, also

unbehandeltes Rechengut, als Referenz verwendet werden (BRANNER, 2013). Dennoch müssen die anderen Literaturangaben nicht unbedingt falsch sein. Insbesondere die Maximalwerte können sicherlich dann beobachtet werden, wenn das Rechengut lange auf dem Rechenrost liegt und dadurch lange abtropfen kann. Eine zusätzliche Sonneneinstrahlung kann dann auch zu sehr hohen Trockenrückständen führen. Die Details zum unbehandelten Rechengut finden sich im Anhang I.

Um die Entsorgungskosten zu verringern, wird Rechengut sehr häufig maschinell entwässert. Der dabei erreichbare Entwässerungsgrad ist für die Praxis von besonderer Wichtigkeit. Deshalb sind nachfolgend die Literaturstellen für behandeltes Rechengut dargestellt (Abbildung 2-3).

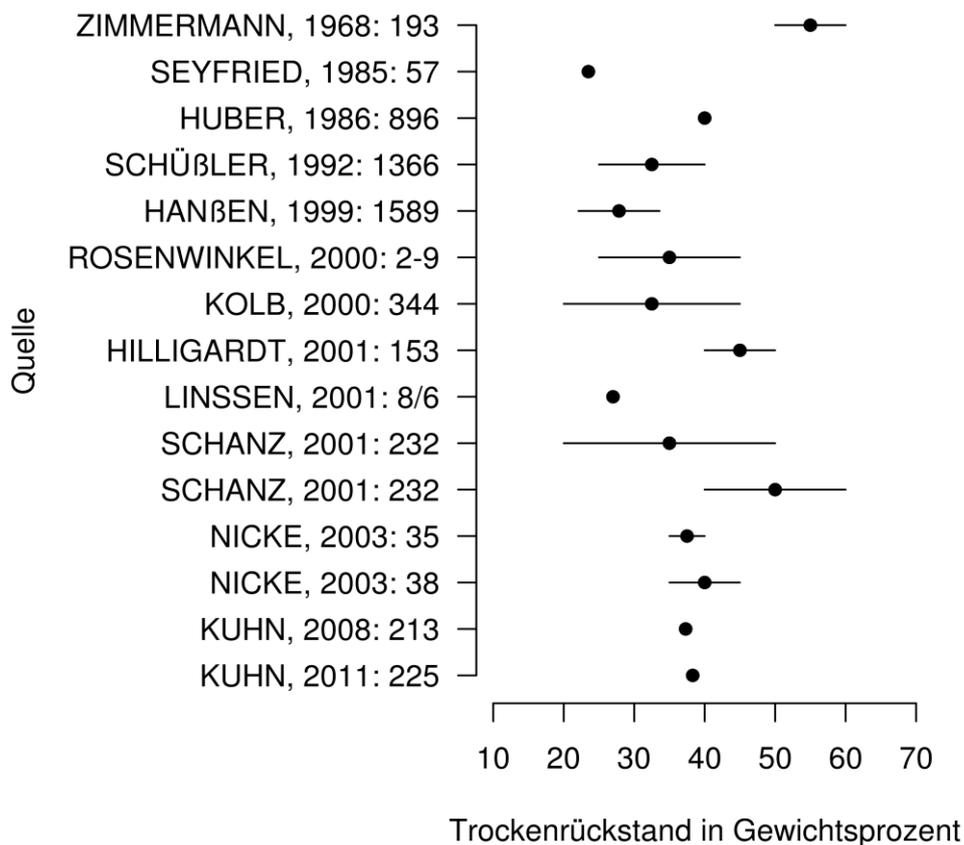


Abbildung 2-3: Literaturstellen für den Trockenrückstand von behandeltem Rechengut

Die Auswertung der vorliegenden Literatur zeigt, dass nur eine einzige ausdrücklich gekennzeichnete Angabe zum Trockenrückstand von verdichtetem Rechengut vor 1985 gefunden werden konnte. Dieser Umstand ist darauf zurück zu führen, dass sich durch veränderte Verbrauchergewohnheiten und den Einsatz feinerer Rechen die zu entsorgende

Rechengutmenge erhöht hat und damit auch deren Entsorgungskosten immer größer wurden. Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, wurden immer mehr Entwässerungsmaschinen eingesetzt. Deren Entwässerungsleistung wurde in begleitenden Untersuchungen gemessen und die Ergebnisse veröffentlicht.

Besonders auffällig ist in der Abbildung 2-3 die Anzahl der Untersuchungen zwischen 1999 und 2003, ein Hinweis darauf, dass die Deponierung von Rechengut ab 2005 in Deutschland nicht mehr möglich war und deshalb intensiv nach Wegen zur Reduzierung der Rechengutmenge geforscht wurde. Die aktuellen Untersuchungen zeigen Trockenrückstände von gepresstem Rechengut knapp unter 40 % TR. Auch diese Daten sind im Anhang I detailliert beschrieben.

2.3 Gesetze, Verordnungen, Anleitungen

Das deutsche Rechtssystem ist generell durch eine bestimmte Hierarchie gekennzeichnet. In manchen Bereichen existieren bereits europäische Vorgaben wie die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000), die, sofern es sich um Richtlinien handelt, dann in nationales Recht umgesetzt werden müssen. Das deutsche Bundesrecht wird in der Regel durch Gesetze ausgeübt, die einen Rahmen vorgeben, der durch unbestimmte Rechtsbegriffe wie zum Beispiel „Stand der Technik“, gekennzeichnet ist (WHG, 2009 § 57: 27). Solche unbestimmten Rechtsbegriffe wiederum werden dann durch Verordnungen präzisiert. Zusätzlich können auch Technische Anleitungen weitere Details zur Gesetzesanwendung liefern. Daneben existieren die Rechte der Bundesländer und die Satzungen von Kommunen (BMU, 2011: 7). Diese gelten neben den Bundesregelungen, soweit diese nicht berührt sind. Weitere Hinweise finden sich in Normen (DIN) oder Regelwerken von Fachgremien (DWA-Regelwerk). Letztere haben keinen verbindlichen Charakter, werden aber als allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT) zur Rechtsfindung herangezogen.

In diesem Kapitel werden das Wasserrecht (2.3.1) und das Abfallrecht (2.3.2) besprochen. Außerdem wird der Grenzbereich der beiden Gebiete beleuchtet (2.3.3) und weitere Rechtsgrundlagen genannt (2.3.4).

2.3.1 Wasserrecht

Rahmenvorschrift für das deutsche Wasserrecht ist das Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009). In Abschnitt 2 dieses Gesetzes finden sich die Vorschriften zur

Abwasserbeseitigung. Es unterscheidet sich vom Wasserhaushaltsgesetz alter Fassung insbesondere durch die Umsetzung diverser europäischer Richtlinien. Haneklaus weist darauf hin, dass das neue WHG den bisherigen Regelungsbereich des Bundesrechtes durch die Aufnahme von Vorschriften erweitert, die bislang im Wasserrecht der Länder unterschiedlich ausgestaltet waren. Bisher in den Landeswassergesetzen enthaltene Vorschriften bleiben folglich nur insoweit wirksam, wie sie den Neuregelungen des Bundes nicht widersprechen (HANEKLAUS, 2010: 786)

Rechengut wird im WHG nicht explizit beschrieben oder benannt. In § 54 Absatz 2 wird aber definiert, dass das Entwässern von Klärschlamm zur Abwasserbeseitigung gehört. Daraus lässt sich ableiten, dass auch die Entwässerung von Rechengut, solange es in Zusammenhang mit der Abwasserbeseitigung steht, also die Kläranlage nicht verlässt, auch noch zum Regelungsbereich des WHG gehört.

Auch in der Abwasserverordnung (ABWV, 1997) findet sich kein Hinweis zur Behandlung oder zur Verwertung von Rechengut, was jedoch nicht bedeutet, dass Rechengut aus juristischer Sicht vergessen wurde. Denn sobald das Rechengut zur weiteren Behandlung oder zur Beseitigung die Abwasserreinigungsanlage und damit den Geltungsbereich des WHG verlässt, findet das Abfallrecht Anwendung (Kapitel 2.3.2).

2.3.2 Abfallrecht

Der Europäische Rat und das Europäische Parlament haben mit der Abfallrahmenrichtlinie (ABRRL, 2008) zentrale Vorgaben für Abfälle verabschiedet. Diese müssen in nationales Recht umgesetzt werden, was in Deutschland durch die Anpassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG, 2012) geschehen ist. Dort wird eine fünfstufige Abfallhierarchie vorgegeben: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (dazu zählt insbesondere die energetische Verwertung) und Beseitigung (KrWG, 2012 § 6).

Im Unterschied zu den im KrWG genannten Maßnahmen „Vorbereitung zur Wiederverwertung“ und „Recycling“, deren Hauptzweck die Ausnutzung der stofflichen und energetischen Potenziale der Abfälle ist, liegt der Hauptzweck bei der Maßnahme „Beseitigung“ in der Verminderung der Abfallmenge und –schädlichkeit. Verwertung zielt somit auf die Kreislaufwirtschaft, Beseitigung hingegen auf das dauerhafte Ausschleusen bestimmter Stoffe ab: „Gleichwohl ist die Nutzung von stofflichen Eigenschaften und Energie auch bei der Beseitigung möglich und sogar geboten“ (WEIMAR, 2009: 221).

Eine Pflicht zur Verwertung von Abwasser und dessen Inhaltsstoffen wurde vom Gesetzgeber bisher nicht formuliert. Im KrWG findet sich weiter eine klare Abgrenzung vom Abfallrecht zum Wasserrecht: „Die Vorschriften dieses Gesetzes gelten nicht für (...) Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden“ (KrWG, 2012 §2 Abs. 2 Nr.9).

Im Umkehrschluss ergibt sich aus dieser Formulierung, dass das Rechengut, sobald es den Bereich der Abwasseranlagen verlässt, dem Abfallrecht zugeordnet werden muss. In der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TASI, 1993) wird im Abschnitt 5.2.9 Rechengut explizit benannt: „Eine Aufbereitung und Verwertung der Rückstände (Sandfang- und Fettfangrückstände, Rechengut, Rückstände aus Siel-, Kanalisations- und Gullyreinigung) ist anzustreben. Soweit dies nicht möglich ist, sind diese Abfälle der weiteren Entsorgung zuzuführen“ (TASI, 1993: 15).

Auch im europäischen Recht hat Rechengut einen direkten Niederschlag gefunden. Im europäischen Abfallartenkatalog (EAK), der durch die Abfallverzeichnisverordnung (AVV 2001) in deutsches Recht umgesetzt wurde, wird Rechengut der Abfallschlüsselnummer (EAN) 190801 zugeordnet.

2.3.3 Grenzbereich Wasserrecht und Abfallrecht

Da eine strikte Trennung zwischen bundesdeutschem Wasserrecht und Abfallrecht besteht, muss jede Handlung in Bezug auf das Rechengut beziehungsweise jede Behandlung von Rechengut daraufhin untersucht werden, ob ein einseitiger Zugriff des Wasserrechts oder des Abfallrechts vorliegt. Da das KrWG das umfassendere Rechtsregime darstellt, muss dieses vorrangig berücksichtigt werden. Stoffe, die in Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden, werden allerdings als Ausnahme davon behandelt (DWA 2008: 270).

Die Abgrenzung beider Rechtsgebiete hat Knäpple wie folgt definiert: „Flüssige Stoffe können begrifflich gleichzeitig Abwasser und Abfall sein. Abgesehen von Überwachungsbefugnissen der Abfallbehörden bei der Entsorgung von Abfällen in Abwasseranlagen findet auf den konkreten Stoff entweder nur Wasserrecht oder Abfallrecht Anwendung. Die Abwassereigenschaft endet mit dem Abschluss der Abwasserbehandlung. Umgekehrt endet die Abfalleigenschaft mit der Einleitung des Abfalls in eine Abwasseranlage“ (KNÄPPLE, 1999: 1549).

Verlässt das Rechengut also die Abwasseranlage, so liegt ein Übergang von Abwasser zu Abfall vor. Aber schon an diesem Punkt stellt sich die berechnigte Frage, ob denn aus der Kanalisation entnommenes Rechengut, zum Beispiel vor einem Zwischenpumpwerk, zum Abfall zu zählen ist. Es wird deutlich, dass hier ein unscharfer Grenzbereich zwischen dem Wasser- und dem Abfallrecht vorliegt.

Die Abwassertechnische Vereinigung (ATV) als Vorgängerin der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, s.u.) nimmt zu dieser Frage wie folgt Stellung: „Feste Inhaltsstoffe des Abwassers, die in der Abwasseranlage sedimentieren gehören zum Abwasser, da sie Bestandteil des Abwassers sind. Sie sind damit kein Abfall. Werden sie der Kanalisation entnommen und zur weiteren Behandlung zu einer Abwasserbehandlungsanlage transportiert, bleiben sie Abwasser im Sinne eines Kanals auf Rädern“ (ATV, 2003a: 7).

Der Ausdruck „Kanal auf Rädern“ zeigt an dieser Stelle auf, dass es durchaus problematisch sein kann, einen alltäglichen Vorgang so zu beschreiben, dass keine unerwünschten juristischen Konsequenzen zu befürchten sind. Allerdings wird diese Sichtweise bei den Behörden nicht unterstützt. Jeder Betreiber muss für sich selbst entscheiden, ob er glaubt, solche Transporte unter dem Wasserrecht durchführen zu können. Im Zweifel sollte aber eine Transportgenehmigung nach dem Abfallrecht beantragt werden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass das neue Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009: 26) ausdrücklich auch den Schlamm aus Kleinkläranlagen dem Wasserrecht zuordnet. Ob damit auch entsprechende Transporte unter das Wasserrecht fallen, ist derzeit noch nicht abschließend geklärt.

2.3.4 Weitere Rechtsgrundlagen

Die Anwendung, Ausfüllung und Ergänzung der gesetzlichen Grundlagen erfolgt durch weitere Verordnungen, landesrechtliche Regeln, örtliche Satzungen und Verwaltungsvorschriften. Im Gegensatz zum Klärschlamm, für den die Klärschlammverordnung geschaffen wurde (ABFKLÄRV, 1992), existiert für Rechengut keine direkt zuordenbare Verordnung.

Dennoch soll hier der Hinweis nicht fehlen, dass unter Umständen andere, zunächst nicht mit Rechengut in Verbindung stehende, Gesetze existieren und dennoch unter Umständen auf das Rechengut sehr weit reichende Konsequenzen haben. Als Beispiel sei hier das

Bodenschutzrecht mit all seinen Ausprägungen (Düngemittelgesetz, Düngemittelverordnung) genannt.

Normen

Die DIN EN 1085 wurde geschaffen, um auf dem Gebiet der Abwasserbehandlung eine einheitliche Terminologie der drei Sprachen Deutsch, Englisch und Französisch zu schaffen (DIN, 2007b: 4). Damit handelt es sich um ein Wörterbuch. Da die darin enthaltenen Beschreibungen der Begriffe häufig als Definitionen verwendet werden, wird nachfolgend daraus zitiert. Im Kapitel „Vorreinigung und Vorklärung“ werden Rechen, Siebe, und auch die Rechengutpresse benannt. Unter der Nummer 5030 wird Rechen- und Siebgut durch die Formulierung „mittels Rechen oder Sieben zurückgehaltene Stoffe“ definiert (DIN, 2007b: 32).

Die weiter relevante Norm DIN 19569 heißt vollständig: „Kläranlagen, Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil 2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen (DIN, 2002a)“. Darin werden zunächst verschiedene Merkmale und Anforderungen zur Ausrüstung und Funktionen von Rechen beschrieben. Anschließend werden in gleicher Weise Siebanlagen beschrieben. Die zu den Rechen- und Siebanlagen genannten Anforderungen an das Bauwerk und zur technische Ausrüstung der Rechengutentwässerung sind sehr allgemein gehalten und beschränken sich auf Unterschiede im Aufbau, Bemessungsanforderungen, besondere Konstruktionsmerkmale, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie Wartung und Betrieb.

Die Norm DIN EN 12255-3: „Kläranlagen, Teil 3 Abwasservorreinigung“ legt die Ausführungsanforderungen für die Abwasservorreinigung auf Kläranlagen für über 50 E_{EW} fest. Rechengut wird in der Norm im Zusammenhang mit der Rechenbelegung genannt. In Anmerkung 3 wird darauf hingewiesen, dass Rechanlagen mit Rechengutwaschung, Rechengutentwässerung und -kompaktierung kombiniert werden können (DIN, 2001a: 4).

Schließlich enthält die Norm DIN 19554: „Kläranlagen, Rechenbauwerk mit geradem Rechen als Mitstrom- und Gegenstromrechen“ nur die Definitionen für die Hauptmaße der Bauwerke (DIN, 2002b). Rechengut wird nicht erwähnt. Die Norm wird in dieser Arbeit nur deshalb erwähnt, weil sie in der Literatur oft benannt ist.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)

Die DWA, beziehungsweise deren Vorgängerorganisation ATV und ATV-DVWK (Abwassertechnische Vereinigung und Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.), geht insbesondere im Merkblatt ATV-DVWK-M 369 auf das Rechengut ein (ATV, 2003a: 17 ff). Zur Beschreibung von Zusammensetzung und Mengen wird darin hauptsächlich die Veröffentlichung von Seyfried aus dem Jahre 1985 herangezogen. Das Merkblatt wird derzeit vom Ausschuss KEK 11.1 der DWA überarbeitet und liegt im Gelbdruck vor.

Daneben werden auch in der DWA-Klärschlammhebung 2003 Angaben zur Rechengutmenge und deren Verbleib gemacht. Außerdem finden sich auch Aussagen über die Verbreitung von Maschinen zur Rechengutbehandlung (DWA, 2004: 10 und 43).

3 MASCHINEN ZUR ENTNAHME VON RECHENGUT

Die Entnahme von Grobstoffen durch Rechen oder Siebe aus dem Abwasserstrom ist der erste mechanische Verfahrensschritt bei der Reinigung von Abwasser. Erst durch diesen Vorgang entsteht ein neuer Teilstrom in der Kläranlage, das Rechengut. In diesem Kapitel werden zunächst die spezifischen Begriffe zu Rechen und Sieben zur Entnahme von Rechengut aus dem Abwasser erläutert (Kapitel 3.2), dann werden deren Konstruktionsmerkmale (Kapitel 3.3) und Eigenschaften beschrieben (Kapitel 3.4).

3.1 Einführung

Neben dem rein mechanischen Schritt der Grobstoffentnahme als Reinigungsvorgang haben Rechen und Siebe jedoch insbesondere Bedeutung beim Schutz von Maschinen, Pumpen und Rohrleitungen vor dem Verstopfen, vor übermäßigem Verschleiß und vor der möglichen Zerstörung (WEIMAR, 2009: 63). Werden die Grobstoffe, wie in Abbildung 3-1 zu sehen, nicht entfernt, können Probleme im Sandfang, in der Sandbehandlung, in der Belebung, den Absetzbecken und in der Schlammbehandlung die Folge sein. Diese Aufzählung verdeutlicht, welche wichtige Aufgabe Rechen und Siebe für den gesamten Reinigungsprozess von Abwasser haben.



Abbildung 3-1: Rechengut im Abwasserkanal

Darum müssen die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit von Rechen und Sieben (Abbildung 3-2) sehr hoch sein, und zwar auch bei sehr hohen quantitativen und qualitativen Schwankungen ohne Pufferung im Anlagenzulauf. Insbesondere sperrige oder zopfbildende Abwasserinhaltsstoffe sind eine Herausforderung an die Konstrukteure solcher Maschinen.



Abbildung 3-2: Mehrstraßige Rechenanlage

Dennoch wird diesen Anlagenteilen bei der Konzeption von Kläranlagen leider viel zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. In der Planung und bei der Auswahl der Maschinen muss der spätere Anlagenbetrieb viel mehr Beachtung finden (NICKE, 2003: 23).

3.2 Begriffe

Für den Bereich der Abwasserreinigung stellte Frühling schon 1910 fest, dass „die Bezeichnungen Rechen, Gitter und Siebe häufig in ganz ungleicher Weise gebraucht werden“. Er definiert deshalb zunächst den Gattungsnamen „Rechen“ für „Abfangvorrichtungen, deren einzelne Arten die Namen Stabrechen, Drahtrechen, Gitterrechen und Siebrechen führen“. Stab- und Drahtrechen bestehen aus „Stäben oder

Drähten, die sämtlich untereinander parallel sind“, Gitterrechen aus „sich kreuzenden Stäben“ und Siebrechen aus „sich kreuzenden Drähten oder aus durchlochenden Metallplatten“ (FRÜHLING, 1910: 487). Später wurden Siebe von Mühle als „gelochte Bleche oder Drahtmaschensiebe“ definiert. „Die feinen Sieböffnungen erfordern besonders gut durchgebildete Abstreifvorrichtungen, bei denen Bürsten, Druckluft oder Spritzwasser verwendet werden“ (MÖHLE, 1934: 147). Spätere Normen folgen diesen Definitionen:

- Ein Rechen ist eine „Einrichtung zum Zurückhalten von Grobstoffen durch im Abwasser parallel angeordnete Stäbe“ (DIN, 1985: 4.2.37).
- Ein Sieb ist eine „maschinelle Einrichtung zum Zurückhalten fester Stoffe, z.B. durch gelochte oder geschlitzte Bleche, Gewebe (z.B. Mikrosiebe) oder ähnliches“ (DIN, 1985: 4.2.70).
- „Eine Rechenanlage ist eine Anlage zum Zurückhalten und Entnehmen von Grobstoffen aus einem Wasserstrom. Sie besteht aus einem Rechen mit parallel angeordneten Stäben, aus einer Reinigungsvorrichtung (z.B. Harke) sowie nach Erfordernis aus einer Abstreifvorrichtung“ (DIN, 1989: 2).
- „Eine Siebanlage ist eine Anlage zum Zurückhalten und Entnehmen fester Stoffe aus einem Wasserstrom. Sie besteht aus einem Sieb (gelochte oder geschlitzte Bleche, Gewebe (z.B. Mikrosiebe) oder ähnliches) und aus einer Reinigungsvorrichtung (z.B. Abstreifer). Das Siebgut wird auf der Siebfläche zurückgehalten und von dieser durch Abschaben, Abbürsten, Abschwemmen, Abspritzen usw. entfernt“ (DIN, 1989: 3).

Die vorgenannten Definitionen sind sehr klar und passen sehr genau auf viele gebräuchliche Bezeichnungen wie „Harkenumlaufrechen“ oder „Spiralsieb“.

Eine weitere Unterscheidung von Rechen und Sieb findet sich in der DIN EN 1085. Dort werden Rechen als „Einrichtung zum Entfernen von Feststoffen aus einem Abwasserstrom“ definiert. Ein Sieb ist darin eine „Einrichtung zum Entfernen von feinen Feststoffen aus einem Abwasserstrom ... ANMERKUNG Siebe haben üblicherweise kleinere Durchlassöffnungen als Rechen“ (DIN, 2007b: 32).

Der Unterschied besteht also darin, dass Siebe im Gegensatz zum Rechen auch feine Feststoffe aus dem Abwasser entfernen. Leider fehlt in der Norm jeglicher Hinweis, wie die Definition (DIN, 2007b: 32) in der Praxis angewendet werden kann.

In der Verfahrenstechnik wird „Sieben“ als ein mechanisches Sortierverfahren durch Größentrennung bezeichnet (HAHN, 1987: 156). Diese Eigenschaft kann auch Rechen zugeschrieben werden, da durch die Stäbe oder Lamellen ein Teil der ungelösten Stoffe zurückgehalten wird, während die kleineren Fraktionen durch den Rechen in die nachfolgenden Behandlungsstufen gelangen. Damit ist aus verfahrenstechnischer Sicht nach Hahn jeder Rechen ein Sieb.

Auch die Filtration ist ein Sortierverfahren durch Größentrennung. Im Gegensatz zur Siebung werden aber nicht nur Teile zurückgehalten, die die Porengröße des Filters übersteigen, sondern auch Partikel, „welche einen Durchmesser haben, der kleiner als die Porengröße des Filtermediums ist“ (HAHN, 1987: 157).

Werden Rechen oder Siebe so betrieben, dass sich ein Belag aus Rechengut aufbauen kann, tritt auch eine Filterwirkung auf. Darauf weist die Bezeichnung „Filterstufenrechen“ hin.

3.3 Konstruktionsmerkmale

In der Literatur werden Bezeichnungen von Rechen häufig aus Konstruktionsmerkmalen gebildet. Beispiele dafür sind Gegenstromrechen, Kletterrechen oder Greiferrechen (DIN, 1985 4.2.37). Allerdings werden diese häufig noch durch Herstellerbezeichnungen verändert. Dadurch ergibt sich manchmal eine Sprachverwirrung, was zu unklaren Spezifikationen führt. Branner schlägt deshalb vor, die Maschinen in die vier Gruppen Stabrechen, Stufenrechen, rotierende Spalt- und Lochblechsiebe und umlaufende Lochblechrechen einzuteilen (BRANNER, 2013: 311). Aber auch hier ist die Namensgebung nicht logisch aufgebaut, da eine Maschine mit einem Lochblech als Separationsfläche nach den Definitionen in Kapitel 3.2 kein Rechen ist.

Darum scheint es viel sinnvoller, die Maschinen in Anlehnung an die Merkmale der DIN 19569-2 zu unterscheiden beziehungsweise zu beschreiben (DIN, 2002a: 6 bzw. 9). Darin werden die Maschinen durch die Beschreibung einzelner Konstruktionsmerkmale und Funktionen abstrahiert, statt eine Gesamtbeschreibung zu formulieren.

In diesem Kapitel werden Öffnungsgeometrie (3.3.1), Aufstellwinkel (3.3.2), Separationsfläche (3.3.3), und die Reinigung der Separationsfläche besprochen (3.3.4). Abschließend werden Einbauart der Maschinen (3.3.5) und deren Darstellung in Piktogrammen (3.3.6) vorgestellt.

Nachfolgend werden diese Merkmale und Funktionen besprochen.

3.3.1 Öffnungsgeometrie der Separationsfläche

Je nach Aufgabe und Einsatzgebiet der Maschinen werden unterschiedliche Öffnungsgeometrien der Separationsflächen gewählt. Am häufigsten sind Öffnungen in Spalt- oder Kreisform. Es finden sich aber auch Langlöcher und Maschen aus Drahtgewebe. Die Abmessungen der Öffnungen werden in Abhängigkeit vom Schutzziel bestimmt. Berücksichtigt werden müssen dabei die nachfolgenden Behandlungsstufen, die Anforderungen an die Schlamm Entsorgung sowie die Einleitungsbedingungen an den Kläranlagenabfluss (DIN, 2001a: 4). Auf kommunalen Anlagen wird aus betrieblichen Gründen der Stababstand a nicht feiner als 5 – 6 mm gewählt, wobei das individuelle Sandaufkommen berücksichtigt werden muss (NICKE, 2003: 25). Die Eigenschaften der Öffnungsgeometrien werden in Kapitel 3.4 näher dargestellt.

3.3.2 Aufstellwinkel der Separationsfläche

Für die Wahl des Aufstellwinkels von Rechen und Sieben sind zwei gegenläufige Faktoren zu berücksichtigen. Um einerseits eine möglichst geringe Grundfläche zu beanspruchen, ist es sinnvoll, den Rechen möglichst steil aufzustellen. Dadurch wird der Rechen kurz und die Maschine billiger. Um andererseits eine große Durchströmungsfläche zu erreichen, ist eine flache Aufstellung sinnvoll. Daraus folgt wiederum ein geringerer hydraulischer Verlust (KIRSCHMER, 1926: 40). In Kapitel 3.4.2 wird dieser hydraulische Verlust ausführlicher behandelt.

3.3.3 Konstruktiver Aufbau der Separationsfläche

Die Separationsfläche von Rechen besteht aus parallelen Stäben oder Lamellen. Diese können, von der Seitenansicht aus betrachtet, gerade, gerundet oder teilweise gerundet ausgeführt werden. Je nach Ausführung können die Stäbe separat am Kanal befestigt sein oder sind in den Rechenrahmen integriert. Eine Sonderform stellen rotierende Separationsflächen dar. In Kapitel 3.3.6 sind die Stabformen grafisch dargestellt.

Die Stäbe selbst können eine rechteckige, runde oder eine speziell strömungsoptimierte Form aufweisen. Für letztere hat sich gezeigt, dass zur Vermeidung von Verstopfungen eine sich nach hinten öffnende Stabform sinnvoll ist. Bei hydraulisch optimierten Querschnitten mit einer zulaufseitigen Verengung des Spaltes (Fischbauchform) können sich an dieser Stelle Teilchen, insbesondere kleine Steine, einklemmen (Abbildung 3-3). Diese können, wenn sie sehr fest sitzen, den Reinigungsprozess der Separationsfläche behindern oder sogar zu Störungen führen.

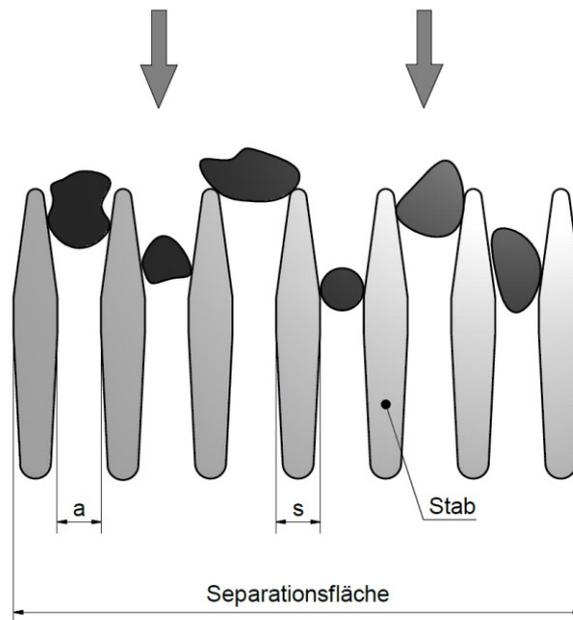


Abbildung 3-3: Verlegung der Separationsfläche bei strömungsgünstig geformten Stäben

Die Separationsflächen von Sieben sind sehr häufig an einem Kettenantrieb befestigte, umlaufende Lochbleche oder flach geneigte, drehbar gelagerte Trommeln. Die umlaufenden Lochbleche werden vom Abwasser zweimal durchströmt und haben einen entsprechend höheren hydraulischen Widerstand. Für Trommelsiebe müssen sehr häufig die Gerinne verbreitert werden, um eine genügend große Separationsfläche zu erreichen. Für kleine Durchflüsse werden Separationsflächen auch als feststehende Halbschalen ausgebildet. Diese müssen entsprechend aufwändig gereinigt werden. Deutlich weniger verbreitet sind rotierende Siebe aus Maschengewebe. Diese werden nur bei höchsten Rückhalteanforderungen wie vor Membrananlagen eingesetzt.

Wichtig ist für alle Separationsflächen, dass die durch die Fließgeschwindigkeit und die Wasserspiegeldifferenz auftretenden Kräfte auch bei hoher Belegung sicher aufgenommen werden können. Diese Anforderung ist insbesondere bei sehr breiten Maschinen zu berücksichtigen.

3.3.4 Reinigung der Separationsfläche

Das an der Separationsfläche angesammelte Rechengut bewirkt eine stetige Verringerung der freien Durchtrittsfläche für das Abwasser. Um einen zu hohen Oberwasserstand zu vermeiden, muss diese Fläche entsprechend der Belegung geräumt werden, was durch viele verschiedene Lösungsansätze erreicht werden kann.

Bei Rechen werden häufig an umlaufenden Ketten befestigte Harkenkämmen eingesetzt. Die Zähne dieser Kämmen müssen mindestens bis zur engsten Stelle zwischen den Stäben reichen, damit eine Blockierung der Stäbe vermieden werden kann. Reine Schaber sind hierfür nur bedingt geeignet. Bei Stababständen < 6 mm ist die notwendige Festigkeit der Zähne und die Toleranz der Stababstände über der gesamten Separationsfläche nur noch mit Einschränkungen zu erreichen.

Weiterhin werden auch elektrisch oder hydraulisch angetriebene Gelenk- oder Teleskoparme zur Reinigung eingesetzt. Dabei kann der Reinigereingriff zwischen den Stäben vom Unterwasser oder von der Oberwasserseite aus erfolgen. Der Vorteil dieser Konstruktionen ist, dass keine Antriebsteile in das Abwasser eintauchen und somit kein großer Verschleiß durch die abrasiven Inhaltsstoffe des Abwassers zu erwarten ist. Diese positive Eigenschaft trifft auch auf den Kletterrechen zu, welcher allerdings durch ein angetriebenes Zahnrad, welches in eine Zahnstange eingreift, angetrieben wird. Der notwendige Abstand der Rechenharke bei der Abwärtsbewegung wird durch eine entsprechende Führung am Rahmen realisiert. Ein wichtiges Merkmal dieser Reinigungsvorrichtungen ist, dass der Räumzyklus recht lange dauert. Dadurch können Belastungsspitzen bei stoßartigem Anfall von Rechengut nur unzureichend ausgeglichen werden.

Eine besondere Bauform von Rechen stellt der Stufenrechen dar. Bei diesem Maschinentyp wird die Separationsfläche gleichzeitig als Reinigungsvorrichtung genutzt (Abbildung 3-4, folgende Seite).

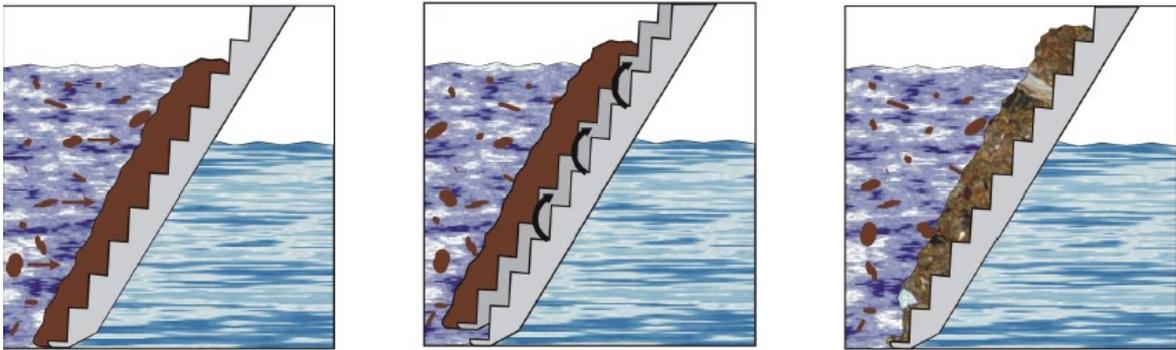


Abbildung 3-4: Reinigungsprinzip der Separationsfläche von Filterstufenrechen (KUHN, 2005)

Dabei rotieren die beweglichen Lamellen auf einer Kreisbahn. Zusammen mit den feststehenden Lamellen wird das Rechengut stufenweise nach oben gefördert. Während dieses Prozesses bewegt sich zwar das Lamellenpaket unter dem Wasserspiegel, aber das dazu notwendige untere Lager befindet sich bei den Stufenrechen der meisten Hersteller über dem Wasserspiegel. Somit ist es nicht möglich, dass Schmutz in das Lager eindringt und dieses beschädigt oder zerstört.

Bei Sieben ist die Reinigung über einen Harkenkamm nicht möglich, da definitionsbedingt kein durchgehender Spalt vorhanden ist. Deshalb erfolgt die Abreinigung der Siebflächen sehr häufig durch Spülleisten und Bürsten. Die Spülleisten sorgen für die Ablösung des Rechengutes von der Separationsfläche. Sie werden so angeordnet, dass das Rechengut möglichst komplett den dafür vorgesehenen Transportweg erreicht. Die hierfür notwendigen Wassermengen sind nicht unerheblich, benötigen einen hohen Versorgungsdruck und müssen je nach Düsensystem einen bestimmten Reinheitsgrad aufweisen (NICKE, 2003: 32).

Da das mit dem Rechengut mitgeführte Fett die Öffnungsgeometrie von Sieben leicht zusetzen kann und der Wasserstrahl oft nicht ausreicht, um das Fett zu entfernen, werden Bürsten mit eigenem Antrieb zur Freihaltung des Öffnungsquerschnittes eingesetzt. Da diese beim Transportvorgang des Rechengutes ständig in Betrieb sein müssen, ist ein starker Verschleiß der Bürsten zu verzeichnen. Bürsten mit höherer Widerstandsfähigkeit sind zwar am Markt verfügbar, würden aber wiederum auf der Separationsfläche einen höheren Verschleiß verursachen. Solch ein Verschleiß der Separationsfläche muss aber in jedem Falle vermieden werden, denn Bürsten sind preislich wesentlich günstiger und leichter auszutauschen.

3.3.5 Einbauart der Maschine

Am häufigsten werden Rechen und Siebe im Abwassergerinne montiert. Dazu müssen Maschine und Gerinne genau aufeinander abgestimmt werden. Um das Rechengut an das nächste Anlagenteil zu übergeben, muss der Rechen oder Sieb so konstruiert werden, dass die Reinigungseinrichtung das Rechengut über die gesamte Kanaltiefe und die Abwurfhöhe transportieren kann. Insbesondere bei Kletterrechen kommt die notwendige Führung des Transportwagens hinzu. Dadurch ergibt sich eine sehr große Bauhöhe von Kletterrechen über dem Gerinne.

Wird die Maschine außerhalb von Gerinnen montiert, kann die Bauhöhe auf das notwendige, von der Separationsfläche bestimmte Maß, begrenzt werden. Allerdings muss dann der Abwasserstrom gepumpt und durch eine Rohrleitung dem Rechen oder Sieb zugeführt werden. Außerdem müssen Rechen oder Sieb als Gesamtanlage dann auch die Gerinnefunktion übernehmen.

3.3.6 Piktogramme

Die zuvor in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.5 beschriebenen Konstruktionsmerkmale bilden ein breites Band an Variationsmöglichkeiten zur Konstruktion von Rechen und Sieben. Damit sind die bisher gebräuchlichen Bezeichnungen wie „Gegenstromrechen“ oder „Mittstromrechen“ zur Beschreibung der Maschinen nicht mehr ausreichend. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit einfache Piktogramme entwickelt, die eine prägnante Darstellung der oben genannten Konstruktionsmerkmale ermöglichen.

Grundlage für diese Piktogramme ist die Abbildung der Siebschnecke im DWA-Themenheft Neuartige Sanitärsysteme (DWA, 2008: 113). Darin wird die Siebschnecke mit ihren Zu- und Abflüssen dargestellt. Die Maschine selbst wird durch ein Quadrat symbolisiert. Um nun eine deutliche Unterscheidung der Maschinentypen zu erreichen, wurde zusätzlich zu der Kennzeichnung im Themenheft in dieses Quadrat ein Maschinensymbol eingefügt. Zur Erläuterung des grundsätzlichen Aufbaues des Symbols werden nachfolgend die Piktogramme von drei verschiedenen Maschinen stellvertretend vorgestellt (Abbildungen 3-5 bis 3-7).

Grundsätzlich strömt das Rohabwasser von links zu und wird durch einen Pfeil repräsentiert. Auf der gegenüberliegenden Seite verlässt vorgereinigtes Abwasser das System. Das entnommene Rechengut wird durch den Pfeil nach unten dargestellt. Notwendige Hilfsmittel werden durch einen Pfeil von oben dargestellt.

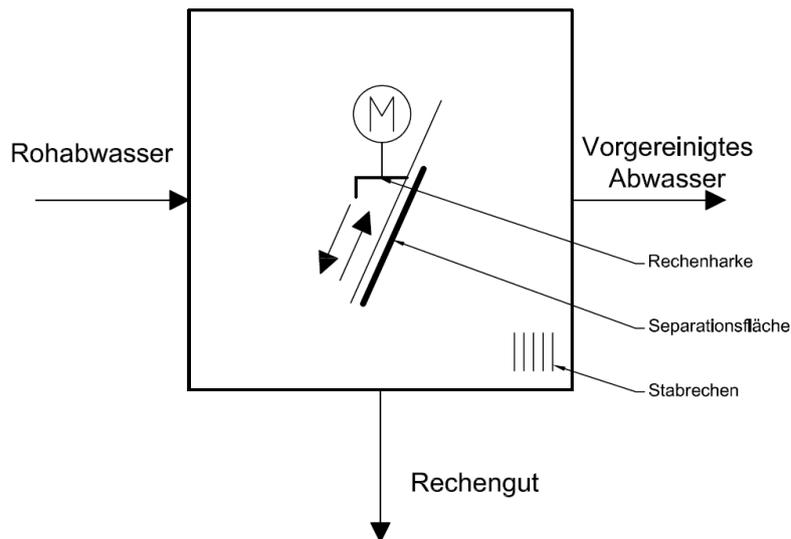


Abbildung 3-5: Piktogramm Mitstromrechen mit Rechenstäben

Die Abbildung zeigt, dass die Rechenfläche (größere Strichstärke) in sich gerade aber in einem bestimmten Winkel zur Senkrechten geneigt ist. Rechts unten in der Ecke findet sich die Darstellung der Art der Separationsfläche durch parallele Striche, welche einen Stabrechen darstellen (Abbildung 3-5). Das Rechengut wird durch eine Rechenharke transportiert. Für den Antrieb der Kette wird ein Motor benötigt. Weitere Zusatzeinrichtungen sind nicht notwendig.

Bei dieser Maschine bilden die einzelnen Lochbleche die Separationsfläche, welche runde Öffnungen aufweist (Abbildung 3-6, rechts unten). Das Rechengut wird durch die umlaufenden Lochbleche nach oben transportiert. Zur Reinigung der Rückhaltefläche ist Spülwasser (Pfeil von oben) notwendig. Die Bürste dient zur Reinigung der Öffnungsgeometrie.

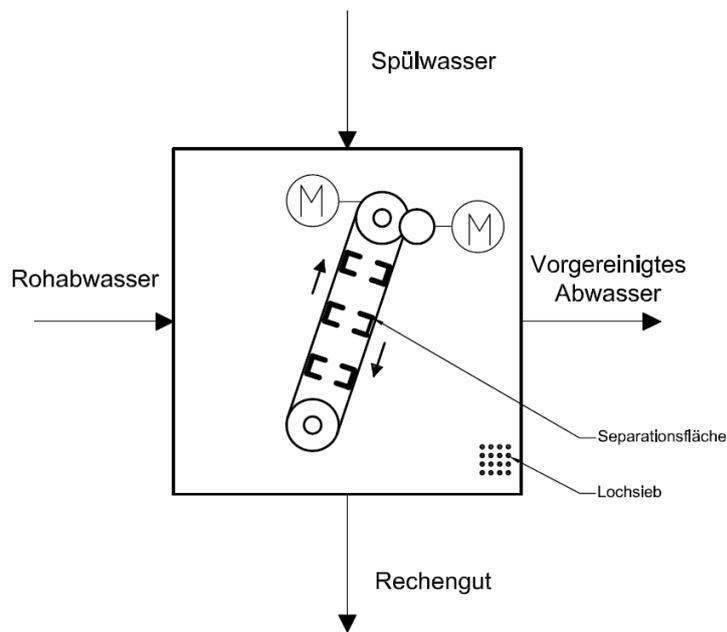


Abbildung 3-6: Piktogramm Bandsieb mit Bürste und Spüleinrichtung

Abbildung 3-7 zeigt einen Filterstufenrechen. Die Separationsfläche wird durch die stufigen Lamellen gebildet (fett dargestellt). Die Lamellen sind wie beim Mitstromrechen stabförmig angeordnet und bilden somit eine Spalte. Wie beschrieben bildet bei diesem Rechentyp die Separationsfläche gleichzeitig den Transportmechanismus.

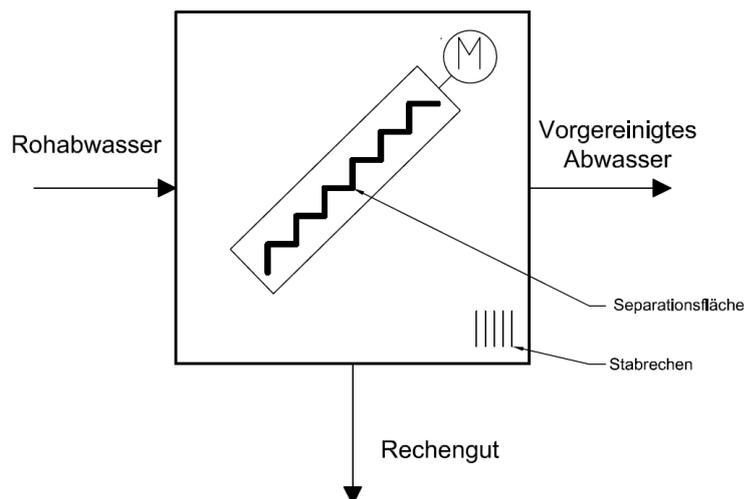


Abbildung 3-7: Piktogramm Filterstufenrechen

Zur besseren Übersicht ist nachfolgend in Abbildung 3-8 eine Sammlung vorhandener Piktogramme von geläufigen Rechen dargestellt. In Tabelle 3-1 auf der folgenden Seite werden die einzelnen Piktogramme erläutert.

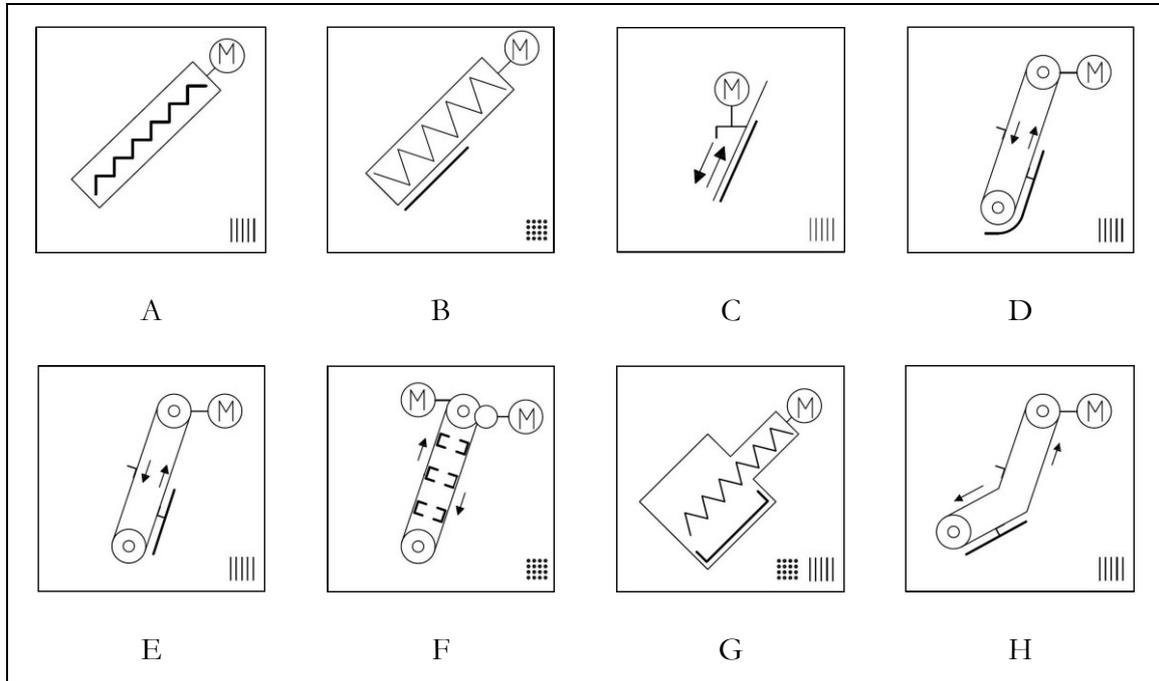


Abbildung 3-8: Piktogramme der Rechen und Siebe

Tabelle 3-1: Beschreibung der Piktogramme aus Abbildung 3-8 mit relevanten Konstruktionsparametern von Rechen und Sieben

Nr.	Art der Öffnungsgeometrie	Reinigung durch	Antrieb	Zusatzeinrichtungen	Bemerkungen
A	Spalt	bewegliche Lamellen	ja	nein	Filterstufenrechen
B	Loch	Förderschnecke mit Bürste	ja	nein	Spiralsieb
C	Spalt	Räumwagen	ja	nein	Mitstromrechen
D	Spalt	Umlaufende Harke	ja	nein	Harkenumlaufrechen mit größerer Separationsfläche
E	Spalt	Umlaufende Harke	ja	nein	Harkenumlaufrechen
F	Loch	Umlaufende Lochplatten	ja	Bürste und Absprühleiste	Lochblechsieb
G	Spalt oder Loch	Rotierender Rechen oder Sieb	ja	Kamm (Rechen) Bürste (Sieb) und Absprühleiste	Rotationsrechen
H	Spalt	Umlaufende Harke	ja	nein	Harkenumlaufrechen für maximale hydraulische Ansprüche

Im DWA-Themenheft sind die Angaben zu den zu- beziehungsweise abgegebenen Mengen von Abwasser und Rechengut eines Bogensiebs zu finden (DWA, 2008: 115). Diese Daten auch für die anderen Maschinentypen zu ermitteln wäre sehr interessant und könnten durch nachfolgende Arbeiten erfolgen.

3.4 Eigenschaften

Je nach Auswahl der Konstruktionsmerkmale ergeben sich typische Eigenschaften der Maschinen in Bezug auf die Rechengutmenge und den Trockenrückstand. Nachfolgend wird auf ausgewählte Eigenschaften näher eingegangen, um deren Auswirkungen für die Auswahl und den Betrieb darzustellen.

Die Eigenschaften sind unterteilt in Rückhaltevermögen (3.4.1), hydraulische Belastung (3.4.2) und das Betriebsverhalten (3.4.3). Weiterhin werden auch die Lebenszykluskosten (3.4.4), die elektrische Ausrüstung (3.4.5) und die Arbeitssicherheit (3.4.6) angesprochen.

3.4.1 Rückhaltevermögen

Die Art der Separationsfläche und deren Öffnungsgeometrie spielen für das Rückhaltevermögen einer Maschine eine große Rolle. Die Vor- und Nachteile bezüglich des Rückhaltevermögens verschiedener Öffnungsgeometrien wurden von Seyfried schon angesprochen (SEYFRIED, 1985: 12 ff). Einfache Analysen der Geometrie zeigen, dass der Rückhalt von ungelösten Stoffen mit unregelmäßiger, kugelhähnlicher Form in Spalten grundsätzlich geringer ist als in allseitig begrenzten Öffnungen wie bei Löchern oder Maschen (Abbildung 3-9).

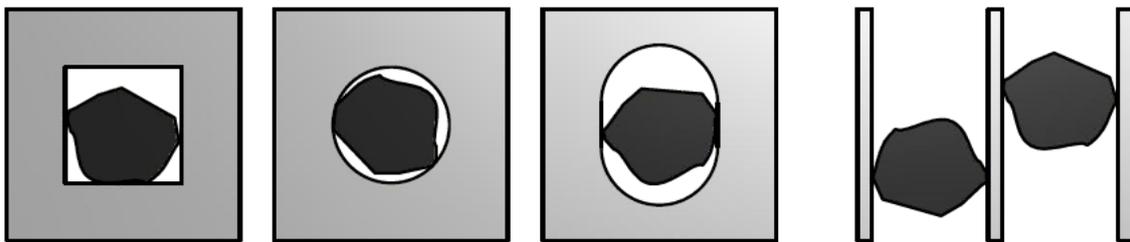


Abbildung 3-9: Begrenzung der Öffnungsgeometrie (nach SEYFRIED, 1985: 14)

Bei Rechen, die mit parallelen Stäben unterschiedlichster Formen arbeiten, spielt der Abstand der Stäbe eine große Rolle. Je geringer der Abstand, desto kleinere Teilchen werden direkt von den Stäben aufgehalten. Bei einer entsprechenden Belegung werden durch die Filterwirkung auch kleinere Teile zurückgehalten.

Bei Sieben werden durch die häufigeren Berührungspunkte möglicherweise auch Stoffe zurückgehalten, die einen Rechenrost passieren können. Allerdings spielen hierbei auch andere Kriterien, wie zum Beispiel die Fließgeschwindigkeit durch die Öffnungsgeometrie, eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Durch den Strömungseffekt können Teile, die zuvor quer auf den Rechen zugetrieben sind, längs durch die Öffnung hindurch treten. Bei sehr hohen Fließgeschwindigkeiten kann es vorkommen, dass Teile regelrecht hindurchgepresst werden. Eine weitere Folge sind dann Verzopfungen, die durch die direkt nach der Öffnung entstehenden starken Wasserwirbel erzeugt werden (nach RÖPER, 1981: 280).

In jedem Fall spielt die Größe der Öffnungsgeometrie eine große Rolle für den Rechengutrückhalt. Die Erhebung der DWA für das Jahr 2003 zeigt folgende Verteilung der Stababstände von Grobrechen auf Kläranlagen (Abbildung 3-10). Es ist zu erkennen, dass Grobrechen ganz überwiegend einen Stababstand a zwischen 20 mm und 30 mm aufweisen. Weshalb auch Stababstände unter 10 mm von den Betreibern der Kategorie Grobrechen zugeordnet wurden, ist nicht nachvollziehbar.

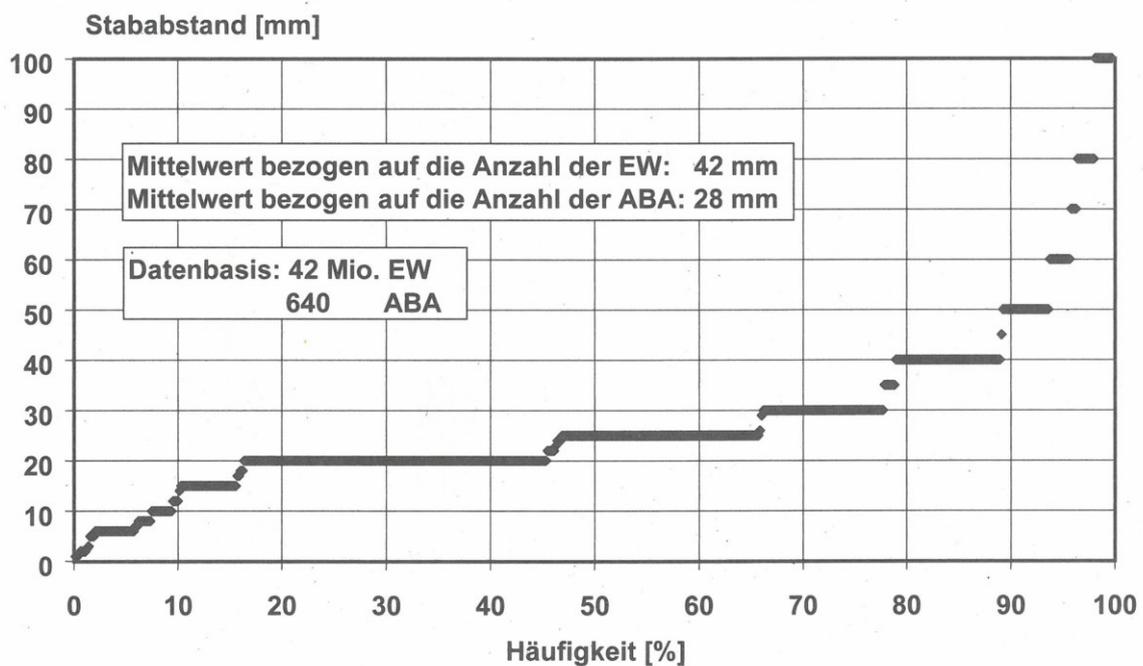


Abbildung 3-10: Summenhäufigkeit der Stababstände bei Grobrechen (DWA, 2005: 9)

Die Verteilung der Stababstände von Feinrechen auf Kläranlagen ergibt folgendes Bild (Abbildung 3-11, folgende Seite).

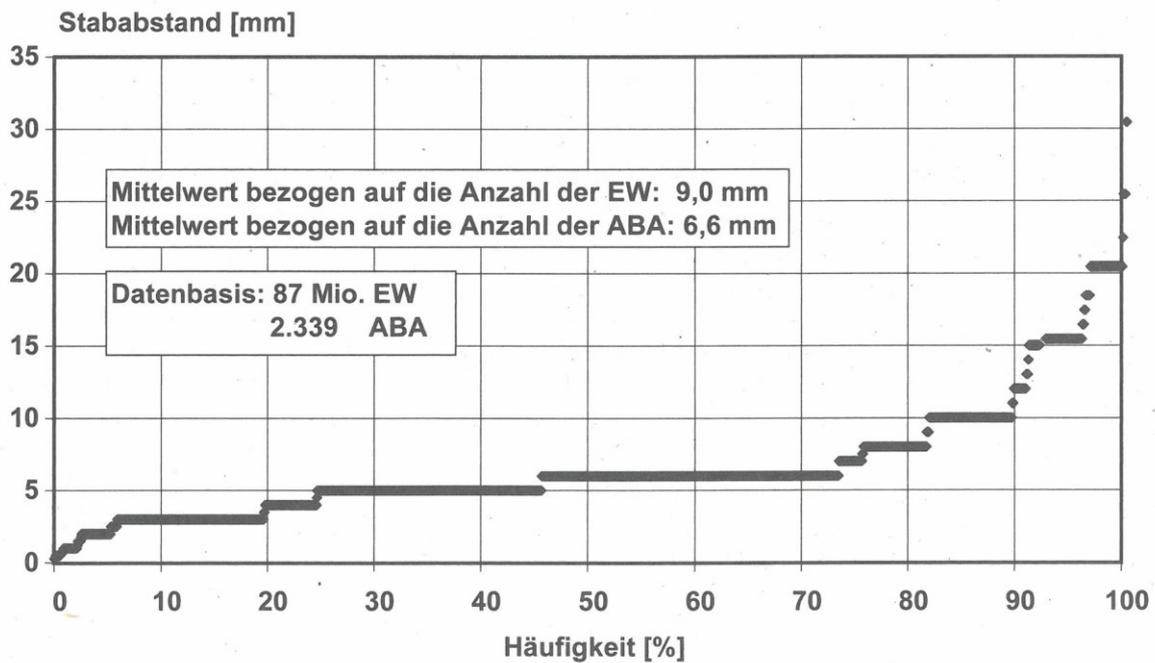


Abbildung 3-11: Summenhäufigkeit der Stababstände bei Feinrechen (DWA, 2005: 9)

Die Abbildung 3-11 beinhaltet Rechen und Siebe. Deshalb bezieht sich die Bezeichnung der Ordinate neben dem Stababstand höchstwahrscheinlich auch auf die Maschenweite beziehungsweise auf den Lochdurchmesser der Öffnungsgeometrie.

Dieser Abbildung (3-11) ist zu entnehmen, dass bei der Erhebung im Jahr 2003 Feinrechen überwiegend mit einem Stababstand zwischen 3 mm und 6 mm eingesetzt waren. Dass der Mittelwert bezogen auf die Anzahl der Einwohnerwerte deutlich höher liegt als derjenige mit Bezug auf die Anzahl der Kläranlagen deutet darauf hin, dass sowohl bei den Grob- wie auch bei den Feinrechen in größeren Anlagen die Rechen einen größeren Stababstand aufweisen. Dies bedeutet, dass die großen Anlagen dem Trend hin zu kleineren Öffnungen noch nicht gefolgt sind. Wahrscheinlich liegt das an den wesentlich breiteren und tieferen Gerinnen. Die Herstellung von Rechen und Sieben für diese großen Abmessungen mit der für die kleinen Öffnungen wichtigen Präzision und der notwendigen Belastbarkeit ist schwierig. Offensichtlich neigen die Betreiber von großen Anlagen deshalb zur Vorsicht.

In Großbritannien werden Versuche zum Rückhaltevermögen von Rechen am National Screen Evaluation Facility (NSEF) in Chester-Le-Street durchgeführt. Dabei werden auf einer Kläranlage die zu testenden Rechen in ein Gerinne eingebaut und mit einer Wasserförderschnecke beschickt. Das vom Rechen zurückgehaltene Rechengut wird am Abwurf aufgefangen und gewogen. Das durch den Rechen hindurch fließende Abwasser wird direkt danach durch einen Filtersack geleitet. Die dort aufgefangene Menge an Rechengut wird ebenfalls gewogen (WIMES, 2008: 33). Das Rückhaltevermögen (Screen

Capture Ratio, SCR) wird dann aus dem Verhältnis von zurückgehaltenem Rechengut zum Gesamtrechengut (Summe von Rechengut vom Rechen und aus dem Filter) berechnet. Dieser Wert dient dann zusammen mit anderen Kriterien zur Bewertung des Rechens hinsichtlich seines Rückhaltevermögens.

Schwachpunkt dieser Messweise des Rückhaltevermögens ist die Versuchsdauer. Die sehr feinen Öffnungen des Filtersacks sind sehr schnell durch Rechengut, aber auch durch andere Inhaltsstoffe des Abwassers verstopft. Dadurch kann die Messung nur für sehr kurze Zeit durchgeführt werden. Es ergibt sich somit nur eine kurze Momentaufnahme des Rückhaltevermögens. Außerdem ist die momentane Fracht an Rechengut ein sehr zufälliges Ereignis. Auch wenn mehrere Messungen durchgeführt werden, kann das Ergebnis keine verlässliche Abbildung des tatsächlichen Rückhaltevermögens ergeben.

3.4.2 Hydraulische Belastung

Ein weiterer wichtiger Maßstab zur Wahl und zur Auslegung der Rechenanlage ist das hydraulische Verhalten des Rechens. Es steht mit dem Rückhaltevermögen in direktem Zusammenhang.

Da der gesamte Volumenstrom über den Rechen geführt werden muss und dieser durch seine wie auch immer geartete Separationsfläche dem Wasserstrom einen deutlichen Widerstand entgegensetzt, sind die Auswirkungen der Separationsfläche auf die Differenz der Wasserspiegel vor und nach dem Rechen und damit des maximalen Volumenstroms, aber auch auf Absetzeigenschaften vor und nach dem Rechen signifikant.

Deshalb müssen verschiedene Lastfälle für den Rechen, aber auch für das Zulaufgerinne gerechnet werden (SCHMIEDER, 1997: 5-11). Das Zulaufgerinne muss bei maximalem Wasserstrom die Wassermenge aufnehmen können, und bei minimalem Durchfluss müssen Sandablagerungen wirksam vermieden werden.

Hydraulische Stöße bei der Zuschaltung von Pumpen oder quantitative Stöße von Rechengut bei der Entleerung von Becken können zu einer deutlich größeren Belastung der Rechenanlage führen. Deshalb ist der Rechen für solch eine Belastung auszulegen. Es muss aber auch beachtet werden, wie häufig solche Ereignisse auftreten und welche wirtschaftlich sinnvolle Lösung bei der Auslegung der Rechen gefunden werden kann.

Um die hydraulischen Verluste nicht zu groß werden zu lassen, muss die Fließgeschwindigkeit durch den Rechen begrenzt werden. Die Praxis zeigt, dass die Fließgeschwindigkeit durch den Rechen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den

Rückhalt hat (WEIMAR, 2006: 71). Umgekehrt können aber optimale Geschwindigkeiten für den Rechen unter Umständen zu niedrigen Geschwindigkeiten vor und nach dem Rechen führen, was in der Regel aufgrund von möglichen Sandablagerungen zu betrieblichen Problemen führt (NICKE, 2003: 25).

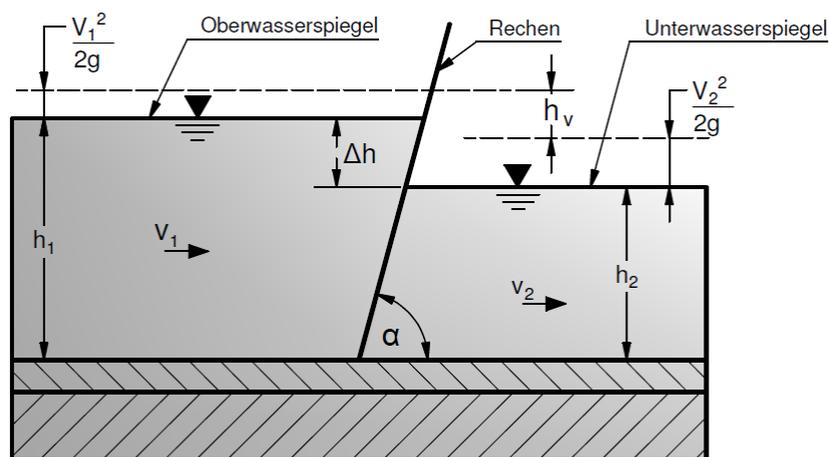
Da der Abfluss im Rechengerinne üblicherweise im strömenden Bereich liegt, ist für die hydraulische Berechnung des Rechens zunächst der Unterwasserspiegel zu bestimmen. Zu diesem addiert sich die hydraulische Verlusthöhe des Rechens. Damit erhält man den Oberwasserspiegel, mit dem das Gerinne vor dem Rechen und die eventuell davor geschalteten Hebewerke berechnet werden können. Dabei müssen die entsprechenden Geschwindigkeitshöhen berücksichtigt werden.

$$\Delta h = h_1 - h_2 = h_v + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad \text{Gleichung 3.1}$$

(KIRSCHMER, 1926: 24)

Darin ist Δh die Differenz der Drucklinie (Wasserspiegel), h_1 ist der Wasserstand vor und h_2 der Wasserstand nach dem Rechen. Die Differenz der Energieelinie ist h_v , v_1 ist die Geschwindigkeit vor und v_2 die Geschwindigkeit nach dem Rechen (Abbildung 3-12).

Da die Höhe dieser Wasserspiegel besonders kritisch sind, muss dem hydraulischen Verlust des Rechens in der Planungsphase besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.



**Abbildung 3-12: Wasserspiegel- und Energiehöhendifferenz am Rechen
(nach KIRSCHMER, 1926: 24 und 26)**

Rechen

Für das hydraulische Verhalten des Rechens spielt die wirksame (oder freie) Fläche, durch die das Abwasser hindurchfließen kann, eine entscheidende Rolle, was in der Kontinuitätsgleichung deutlich wird (Gleichung 3.2).

Gleichung: 3.2

$$Q = b \cdot h \cdot v$$

Der Wasserstand h im Gerinne erhöht oder vermindert sich umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit v bei gegebenem Volumenstrom Q und gegebener Gerinnebreite b .

Die freie Durchtrittsfläche A_B des Rechens ist durch die Gleichung 3.3 definiert (DIN 2002a: 6):

Gleichung: 3.3

$$A_B = A \cdot f_0 \cdot (1 - f_B)$$

Dabei ist A die Rechenfläche entsprechend der Geometrie des Rechens und der Wassertiefe h_2 , f_0 der Freiflächenfaktor und f_B der Belegungsfaktor. Der Freiflächenfaktor f_0 (Gleichung 3.4) ergibt sich aus der geringsten Spaltweite a und der größten Stabdicke s (DIN 2002a: 6).

Gleichung: 3.4

$$f_0 = \frac{a}{a + s}$$

Mit den Gleichungen 3.2 bis 3.4 kann die Fließgeschwindigkeit durch den Rechen ermittelt werden. Zur Festlegung der Spaltweite gibt es jedoch kaum handfeste Auslegungshilfen für Planer beziehungsweise Betreiber. Die Entscheidung mit welcher Spaltweite der Rechen auszurüsten ist, ist abhängig vom Schutzziel und fällt oft aufgrund von persönlichen Erfahrungen (SCHRAMMEL, 1998). Dabei wirken sich die Auswahl der Spaltweite und der Stabdicke signifikant auf die Freifläche aus, wie Abbildung 3-13 entnommen werden kann (folgende Seite).

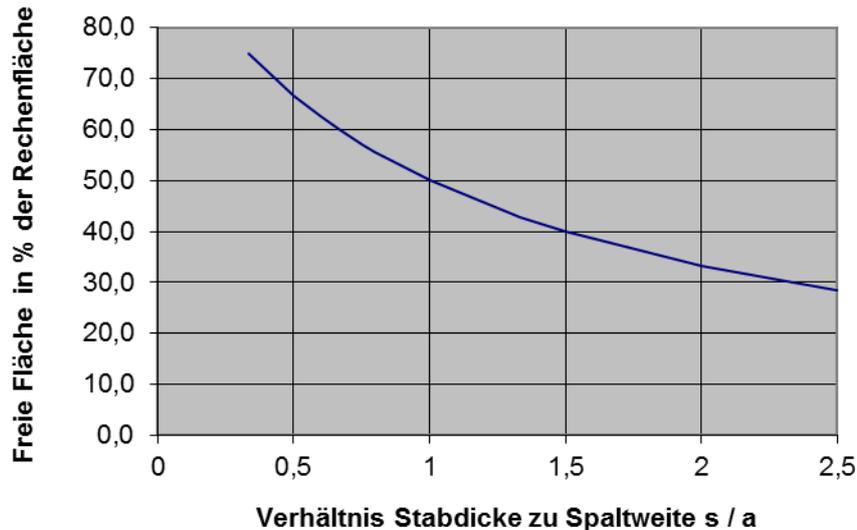


Abbildung 3-13: Abhängigkeit der freien Rechenfläche zum Verhältnis von Stabdicke zu Spaltweite

Zur näheren Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Stabdicke und Spaltweite sollen folgende Beispiele dienen:

Ein Filterstufenrechen hat eine Lamellendicke (Stabdicke) von 2 mm bei einem Spalt von 6 mm. Daraus ergibt sich ein Verhältnis s / a von 0,33. Unter Vernachlässigung der Belegung f_B bleibt somit eine freie Fläche A_B von 75 % der Rechenfläche. Für einen Stabrechen gleicher Spaltweite mit einer Stabdicke von 8 mm ergibt sich ein Verhältnis s / a von 1,33, und damit bleibt eine freie Fläche A_B von 43 %. Damit ist die freie Fläche des Filterstufenrechens mit einer Lamellendicke von 2 mm um 74,4 % größer als die freie Fläche des Stabrechens. Aufgrund der Kontinuitätsgleichung ergibt sich somit beim Stabrechen eine proportional höhere Fließgeschwindigkeit als durch den Filterstufenrechen.

Der eigentliche hydraulische Verlust (Gleichung 3.5) kann bei frontal angeströmten Rechen mit der Formel von Kirschmer berechnet werden (KIRSCHMER, 1926: 40):

$$\Delta h = \beta \cdot \left(\frac{s}{a} \right)^{4/3} \cdot \frac{v_1^2}{2g} \cdot \sin \alpha \quad \text{Gleichung: 3.5}$$

Darin sind β der Formfaktor des Rechenstabprofils, α der Neigungswinkel des Rechenrostes gegen die Horizontale und v_1 die Geschwindigkeit vor dem Rechen.

Der hydraulische Verlust wird ganz entscheidend von der freien Fläche und damit vom Verhältnis von Spaltweite zu Stabstärke beeinflusst. Dadurch wird im obigen Beispiel der Filterstufenrechen bei sonst gleichen Verhältnissen einen deutlich niedrigeren Verlust erzeugen als der Stabrechen. Zusätzlich ist zu beachten, dass die freie Fläche konstruktionsbedingt weiteren Einschränkungen wie der möglicherweise vorhandenen Bodenstufen und dem Rechenrahmen unterliegt.

Auch der Aufstellwinkel hat einen großen Einfluss auf die freie Fläche des Rechens. Je flacher der Rechen aufgestellt ist, desto größer ist die zur Verfügung stehende freie Fläche. Allerdings ist dann eine größere Baulänge zu beachten, wofür auch ein entsprechend langes Gerinne benötigt wird.

Für die Berechnung des hydraulischen Verlustes nach Kirschmer (1926: 40) muss die Geschwindigkeit v_1 vor dem Rechen in Gleichung 3.5 eingesetzt werden. Da v_1 aber vom hydraulischen Verlust abhängt, kann die Lösung nur durch ein Iterationsverfahren gefunden werden, weil bei strömendem Abfluss die hydraulische Berechnung gegen die Fließrichtung erfolgt.

Allerdings ist zu beachten, dass die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Gleichung 3.5 ein geringer hydraulischer Verlust des Rechens ist, da Kirschmer in seiner Berechnung $v_1 = v_2$ gesetzt hat (KIRSCHMER, 1926: 29). Für Anwendungsfälle, bei denen die Bedingung $h_1 \gg h_2$ erfüllt ist, kann die Gleichung 3.5 nicht oder nur bedingt eingesetzt werden. Diese Bedingung trifft zum Beispiel für eine deutliche Belegung der Separationsfläche, oder wenn der Wasserstand h_2 nicht durch ein Wehr auf einer bestimmten Höhe gehalten wird, zu.

Neuere Untersuchungen ergaben, dass Berechnungen zum Energieverlust von Rechen, die mit der Formel von Kirschmer durchgeführt wurden, den Energieverlust bedeutend unterschätzen (GIESECKE, 2009: 172). Da die Untersuchungen aber für Flusskraftwerke durchgeführt wurden, bleibt unklar, inwieweit dies auch für Rechenanlagen in Kläranlagen zutrifft. Für heute übliche Spaltweiten in Kläranlagen müssen die Ergebnisse, insbesondere bei deutlicher Belegung der Siebfläche, mit Erfahrungswerten abgeglichen werden. Eventuell können dazu auch andere Berechnungsansätze zum Vergleich herangezogen werden (FÖRSTER, 1999: 1610).

Eine Belegung des Rechens führt in jedem Fall dazu, dass sich durch die verminderte freie Fläche die Fließgeschwindigkeit zwischen den Rechenstäben erhöht. Bei hohem Belegungsgrad ist die Geschwindigkeit deutlich höher. Dadurch wird vermehrt Rechengut

durch die Öffnungsgeometrie transportiert. Die DIN 19569-2 empfiehlt bei einer Zykluszeit der Räumung von 15 s einen Belegungsfaktor von 0,2 bis 0,6 einzusetzen (DIN, 2002a: 7). Nach Uckschies ist aber die Auslegung von Rechen mit einer Durchschnittsbelegung von 40 % nicht sinnvoll. Er schlägt eine Belegung von 60 % für die Auslegung vor (UCKSCHIES, 2013: 62). Wenn die Belegung die hydraulische Leistungsfähigkeit des Rechens soweit minimiert, dass der Zufluss größer als die Leistungsfähigkeit ist, dann ist ein Rückstau im Zulaufgerinne die Folge. Dadurch können ungewollt oberstrom liegende Anschlüsse geflutet werden, Wehre ansprechen oder gar Gerinne überflutet werden. Diese Störungen sollten durch eine geeignete Auswahl von Rechen und deren Anzahl soweit wie möglich vermieden werden.

Siebe

Die vorhergehenden Erkenntnisse aus der Betrachtung der Rechen treffen im Grundsatz auch auf Siebe zu. Allerdings kann deren hydraulischer Verlust nicht mit der gleichen Formel berechnet werden. In der Literatur finden sich kaum Hinweise auf entsprechende Berechnungsansätze oder Randbedingungen. Eine Möglichkeit für die Berechnung der hydraulischen Belastung auf Siebe ist die Verwendung der Formel zur Berechnung des Ausflusses aus einer seitlichen Blende (UCKSCHIES, 2013: 64). Es ist aber zu beachten, dass bei Umlaufsieben die Siebgeometrie zweimal durchflossen werden muss.

Auch die freie Fläche muss auf anderem Weg ermittelt werden als bei Rechen. Als Beispiel für die Flächenermittlung wird nachfolgend ein Sieb aus Lochblech (Abbildung 3-14) mit versetzten Reihen (R_v) betrachtet, welches die größte freie Fläche von Lochblechen aufweist und deshalb für Siebe sehr häufig verwendet wird.

Die prozentuale freie Fläche A_B errechnet sich mit folgender Formel (DILLINGER, 2011):

$$A_B = \frac{90,7 \cdot w^2}{t^2}$$

Gleichung: 3.6

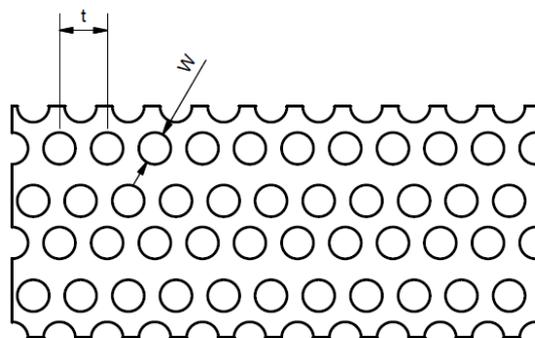


Abbildung 3-14: Darstellung der Lochblechanordnung R_v mit den Abmessungen von 1–10 mm Lochweite (DILLINGER, 2011)

Aus Gleichung 3-6 ergibt sich für Lochbleche mit den Abmessungen aus der Tabelle in Abbildung 3-15 folgendes Diagramm der freien Fläche A_B :

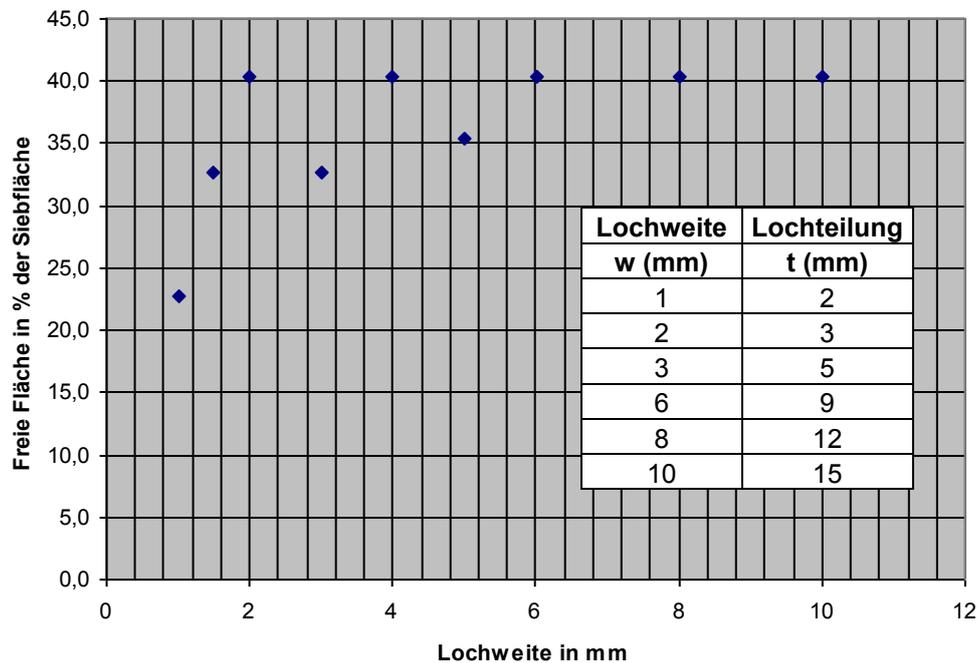


Abbildung 3-15: Verhältnis der freien Fläche A_B zur Lochweite bei Lochblechen vom Typ R_v

Die besten Werte in der Abbildung 3-14 zeigen eine freie Fläche A_B von 40,3 % der Gesamtfläche. Dieser Wert ist mit einem Rechen mit einem Verhältnis s / a von 1,3 (Abbildung 3-12), also zum Beispiel einer Spaltweite von 6 mm und einer Stabdicke von 8 mm, zu vergleichen. Damit hat eine Siebfläche aus Lochblech einen sehr ungünstigen Einfluss auf die hydraulische Leistungsfähigkeit. Der hydraulische Verlust ist im Vergleich zu einem Filterstufenrechen deutlich höher. Es ist also im Einzelfall genau zu betrachten, welche Öffnungsgeometrie ausgewählt wird. Eine detaillierte Untersuchung zu verschiedenen Öffnungsgeometrien findet sich bei WEIGAND (1992: 28 ff).

Die hydraulische Berechnung von Rechen, aber vor allen Dingen von Sieben, wird in der Praxis sehr unterschiedlich gehandhabt. Es fehlt hier an allgemein gültigen und nachvollziehbaren Berechnungswegen. In einer nachfolgenden Arbeit könnten diese ermittelt und publiziert werden.

3.4.3 Betriebsverhalten

Neben den hydraulischen Gesichtspunkten sind es vor allem die betriebsbedingten Details, die bei der Auswahl von Rechanlagen berücksichtigt werden müssen. Werden die Rechen und Siebe besonderen Betriebsbedingungen wie zum Beispiel die zu erwartenden Stoßbelastungen von Rechengut nicht angepasst, sind häufige Betriebsstörungen zu erwarten (Abbildung 3-16).

Die häufigsten Ursachen für Betriebsstörungen an Rechen sind Probleme der Hydraulik und des Rechenkamms. Es ist laut SCHMIEDER (1997: 3-23 bzw. 4-17) mit 0,83 Reparaturschäden je Rechen und Jahr zu rechnen, wobei unklar ist, welche Störungen bzw. Schäden eingeschlossen sind. Aus der Erfahrung ist anzunehmen, dass damit Störungen an Antriebsteilen des Rechens und Störungen des Wasserdurchflusses durch den Rechen gemeint sind.

Obwohl die Erhebung nur einen einzigen Abwasserverband berücksichtigt, können ihre Ergebnisse zu Betriebsstörungen an Rechen aufgrund der großen Stichprobe und langen Studiendauer ($n = 131$ Rechen, Zeitraum = 3 Jahre) als repräsentativ für diese Zeit angesehen werden.



Abbildung 3-16: Massiver Lagerschaden am Rechen

Falls am oder nach dem Abwurf des Rechens das Rechengut in einen Trichter geführt wird, sind dessen Wände mit einer Neigung von mindestens 50° , besser 60° , auszuführen, da sonst das Rechengut nicht abrutscht und eine Brückenbildung die höchst wahrscheinliche Folge ist. Falls der steile Aufstellungswinkel des Trichters nicht ohne weiteres möglich ist, kann auch versucht werden, durch eine geeignete Anordnung von Wasserzuführungen den Weitertransport zu unterstützen (PANKRATZ, 1995: 183). Eine Brückenbildung im Trichter führt zu einem Rückstau des Rechengutes im Rechen. Dieser kann dadurch in seiner Leistung beeinträchtigt oder gar ganz behindert werden. Dadurch können in Folge Rückstau oder Überlauf im Oberwasserbereich ausgelöst werden.

Die dem Rechen nachfolgende Einheit, egal ob Trichter, Förderer oder Rechengutbehandlung, hat einen unmittelbaren und nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Betriebsverhalten und die Vermeidung von Ausfällen der Rechen. Dies gilt insbesondere für plötzlich auftretenden oder gar ständigen Anfall von Split. Bei einem derartigen Anfall wie in der folgenden Abbildung 3-17 dargestellt, ist mit einem sofortigen Ausfall von Rechen und möglicherweise auch der Rechengutbehandlung zu rechnen.



Abbildung 3-17: Splitanfall im Kläranlagenzulauf nach einem Havariefall im Kanalnetz

Auch die Fließgeschwindigkeit vor dem Rechen ist von großer Bedeutung für das Betriebsverhalten von Rechen. In der DIN EN 12255-3 wird eine Mindestfließgeschwindigkeit vor dem Rechen von 0,3 m / s angegeben (DIN, 2001a: 4). Dadurch sollen Sandablagerungen vor allen Dingen vor Feinrechen vermieden werden. Allerdings zeigt die Praxis, dass diese Auslegung nicht ausreicht. In einer Untersuchung von Uckschies (Abbildung 3-18) wurde festgestellt, dass bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,4 – 0,6 m / s im Zulaufgerinne die Störungshäufigkeit am geringsten ist.

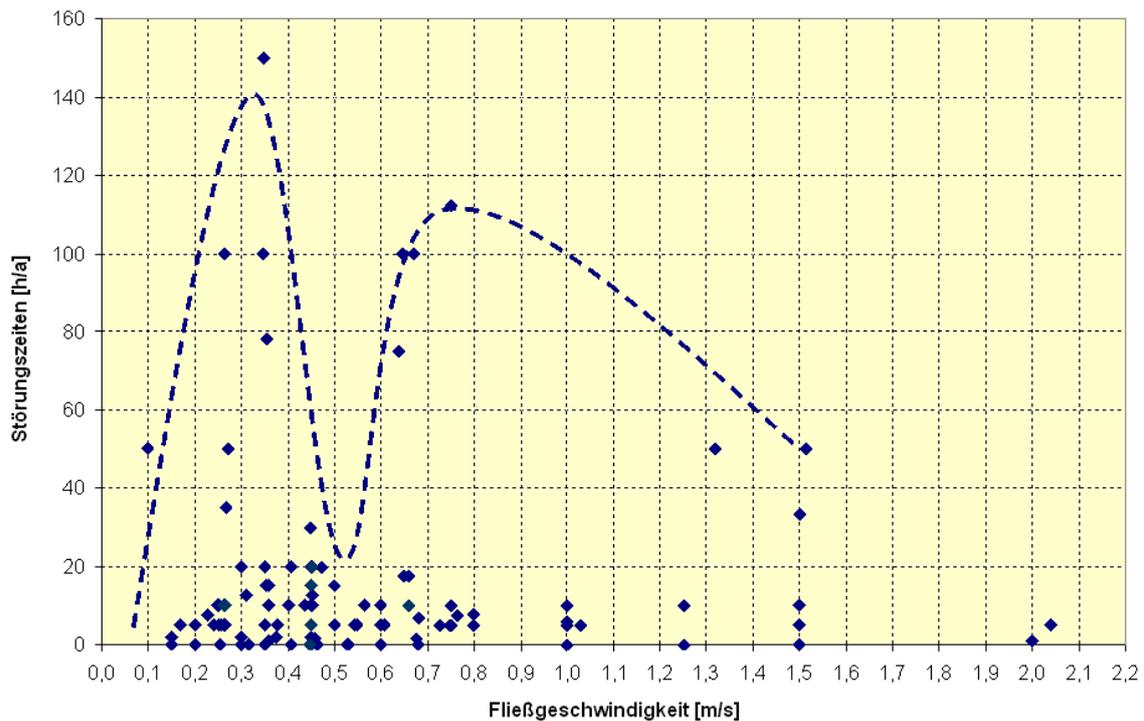


Abbildung 3-18: Störungszeiten von Rechen in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit vor dem Rechen (UCKSCHIES, 2013: 3)

Die Hüllkurve in Abbildung 3-18 zeigt deutlich geringere Störungszeiten im Bereich von 0,4 – 0,6 m / s. Allerdings können die wenigen Störungszeiten über 20 h/a auch als Ausreißer betrachtet werden, oder sie hängen mit anderen Faktoren aber nicht mit der Fließgeschwindigkeit vor dem Rechen zusammen. Ohne die Ausreißer ist eine flache Normalverteilung der Ausfallzeiten im Bereich von 0,15 – 0,8 m / s Fließgeschwindigkeit im Zulaufgerinne zu erkennen.

Leider ist es aber durch die große Differenz zwischen Nachtzufluss und maximalem Zulauf schwierig, diese Geschwindigkeiten vor dem Rechen immer einzuhalten. Außerdem führen Gerinneerweiterungen für den Rechen, die aus hydraulischen Gründen notwendig sind, zu

geringeren Geschwindigkeiten im Gerinne und damit zu Sandablagerungen. Solche Auslegungsprobleme sind am einfachsten durch mehrstraßige Anlagen auszugleichen. Wenn eine Mehrstraßigkeit nicht möglich oder aus Kostengründen nicht durchsetzbar ist, sollte eine Sohlspülung mit Luft oder Wasser vorgesehen werden.

3.4.4 Lebenszykluskosten

Rechen und Siebe unterliegen einer sehr hohen Beanspruchung. Einerseits stellen sie als erste Reinigungsstufe von Klärwerken eine wichtige Schutzvorrichtung für die gesamte technische Ausrüstung der Anlage dar. Wenn also an Rechen ein Problem auftritt, ist die gesamte Anlage betroffen. Außerdem wurde bereits beschrieben, dass die Beanspruchung der Maschinen durch die Inhaltsstoffe im Rohabwasser enorm hoch ist. Damit ist eine solide und zuverlässige Konstruktion und die richtige Behandlung während der Betriebszeit eine wichtige Grundlage für das Erreichen der geforderten Lebensdauer. Deshalb arbeiten Rechen „nur bei sorgfältiger Überwachung und turnusmäßiger Wartung mit der geforderten Betriebssicherheit“ (ATV, 1997: 75).

Je nach Grad der Beanspruchung sind Rechen und Siebe für eine rechnerische Lebensdauer von 10.000 h (Lebensdauerklasse 2) oder 20.000 h (Lebensdauerklasse 3) auszulegen (DIN, 2002c: 16). Somit sind entsprechende Maßnahmen zu treffen, um einen möglichst störungsfreien Betrieb sicherzustellen. Ein wichtiges Kriterium hierfür ist sicherlich die Auswahl der Werkstoffe. Um die Korrosionsanfälligkeit zu minimieren, wird heute beinahe ausschließlich der Werkstoff Edelstahl, je nach Aggressivität des Abwassers in verschiedenen Güten, verwendet. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass manche Teile wie zum Beispiel Lager oder Schaber aus konstruktiven Gründen aus anderen Werkstoffen hergestellt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Lebenszykluskosten sind die Kosten für Wartung und Ersatzteile der Maschinen. Müssen zum Beispiel Zusatzaggregate zur Räumung der Separationsfläche regelmäßig getauscht werden, so muss diese Eventualität in die Betrachtung der Gesamtkosten eines Produkts eingerechnet werden. Auch der Aspekt einer Aufstellung im Freien oder in einem entsprechenden Bauwerk muss, je nach den örtlichen Bedingungen, abgewogen werden.

Ein besonderes Augenmerk muss auf den Energieeinsatz gelegt werden. Es ist bei immer weiter steigenden Energiepreisen sehr genau abzuwägen, ob ein oder mehrere Motoren eingesetzt werden. Auch deren Leistung und die Laufzeit spielen hierbei eine wichtige

Rolle. Werden Zusatzeinrichtungen wie Bürsten oder Spüleisten verwendet, muss der dazu notwendige Verbrauch an Wasser und Energie ebenfalls berücksichtigt werden.

Der VDMA hat in seinem Einheitsblatt 34160 ein Prognosemodell zur Ermittlung der Lebenszykluskosten vorgestellt. Darin wird die Lebensdauer einer Maschine von der Anschaffung bis zum Ende der festgelegten Nutzungszeit betrachtet. Es soll der einheitlichen Kostenbetrachtung für Hersteller und Kunden dienen. Allerdings funktioniert das Modell nur bei einem vergleichbaren Output von Maschinen. Da dieser Output bei Rechen aber nur sehr schwer gemessen und noch schwerer mit den Produkten verschiedener Hersteller verglichen werden kann, ist die Anwendung des Modells für Rechen nur eingeschränkt möglich (VDMA, 2006).

3.4.5 Elektrische Ausrüstung von Rechenanlagen

Der Betrieb von Rechen- und Siebanlagen setzt zunächst eine ausfallsichere Energieversorgung, entsprechende Antriebe und eine Steuerungs- oder Regelungseinrichtung voraus. In der Regel wird der Betrieb der Maschine durch die Messung eines oder mehrerer Wasserspiegelmassen gesteuert (NICKE, 2003: 26). Ein Überschreiten von einstellbaren Wasserspiegeln oder deren Differenz löst den Räumvorgang der Separationsfläche aus. Diese kann durch eine einzelne Räumung der Separationsfläche oder eine Teilräumung wie beim Lochblechsieb geschehen. Bei hohem Rechengutanfall wird die Fläche kontinuierlich geräumt. Außerdem gibt es zeitabhängige Einschaltbefehle, welche eingesetzt werden, um ein Festsitzen der beweglichen Teile zu vermeiden.

Um einen automatisierten Betrieb der Rechen und Siebe zu ermöglichen, werden Steuerungs-, Regelungs- und Automatisierungssysteme eingesetzt, die der Unterstützung des Betriebspersonals bei der Prozessführung und -dokumentation dienen. Solch ein Steuerungssystem muss in einem frühen Planungsstadium bereits berücksichtigt werden. Außerdem ist zu beachten, dass für diese Steuersysteme erfahrenes und ausgebildetes Personal erforderlich ist (DIN, 2003: 5).

Neben der reinen Steuerung des Antriebs ist auf das gute und reibungslose Zusammenspiel von Hilfsantrieben und nachfolgenden Anlagen und Maschinen zu achten. Dazu werden in der Regel speicherprogrammierbare Steuerungen eingesetzt, welche die Maschinen nach den von Sensoren erfassten Daten und den dazu hinterlegten Handlungsanweisungen steuern oder regeln.

3.4.6 Arbeitssicherheit

In Kläranlagen können nach DIN 12255-10 neben den Gefährdungen durch bewegte Fahrzeuge und Maschinen auch Gefahren „durch Feststoffe, Flüssigkeiten, Dämpfe, Gase und Aerosole, Mikroorganismen und Stäube in gefährlicher Menge oder Konzentration sowie durch sauerstoffverdrängende Medien“ entstehen. Gefahren durch Stoffe können von außen eingebracht werden oder sich vor Ort durch biologische Vorgänge oder chemische Reaktionen bilden (DIN, 2001b: 5). Nach der Betriebssicherheitsverordnung muss der Arbeitgeber eine Gefährdungsbeurteilung der Arbeitsplätze vornehmen (BETRSTICHV, 2002: 5), was auch für Kläranlagen gilt. Für die Gefährdungsbeurteilungen finden sich konkrete Regeln in der DIN EN 12255-10 (DIN, 2001b) und in einer Informationsschrift der Gesetzlichen Unfallversicherung (GUV, 2005).

Ein wichtiger Aspekt der Arbeitssicherheit ist der Explosionsschutz. In Rechengebäuden muss mit einer explosionsfähigen Atmosphäre durch Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten wie zum Beispiel Benzin gerechnet werden. Nach einer Behandlung des Abwassers (etwa in belüfteten Sandfängen) ist eine solche Gefährdung nicht mehr gegeben (GUV, 2005: 17). Um eine Gefährdung für das leibliche Wohl auszuschließen, müssen daher schon bei der Planung der Rechengebäude und Anlagen entsprechende Schutzmaßnahmen wie explosionsgeschützte Antriebe, Lüftungsmaßnahmen und Gaswarnsysteme berücksichtigt und eingeplant werden (DIN, 2001b: 8). Die Verantwortung für den Explosionsschutz, zum Beispiel die Einteilung der Explosionsschutz-Zonen, liegt beim Anlagenbetreiber. In der Regel wird er die Beurteilung der Gefährdung durch die Beauftragung eines fachkundigen Ingenieurbüros vornehmen lassen. Die in explosionsgefährdeten Bereichen aufgestellten Maschinen müssen der europäischen ATEX-Produktrichtlinie entsprechen (ATEX, 1994).

Im Abwasser finden sich die verschiedensten Krankheitserreger, welche insbesondere bei Arbeiten im Zusammenhang mit Rechengut eine Gesundheitsgefährdung darstellen. Grundsätzlich sollte der Kontakt von Personen mit den Feststoffen vermieden werden (DIN, 2001b: 9). Aber der direkte Kontakt mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen von Rechengut kann für das Betriebspersonal von Kläranlagen nicht ausgeschlossen werden (NICKE, 2003: 41). Deshalb sollen, wo immer möglich, Abdeckungen an Maschinen und Anlagen vorgesehen werden, durch welche jedoch die visuelle Kontrolle sowie die Zugänglichkeit für Wartung und Störungsbeseitigung eingeschränkt werden. Deshalb muss auf eine leichte Abnehmbarkeit der Abdeckungen geachtet werden. Besonders bei

Abspritzanlagen muss darauf geachtet werden, dass keine Aerosole außerhalb der Abdeckungen auftreten.

Bei allen Wartungs- und Reparaturarbeiten an Maschinen und Anlagen muss dringend darauf geachtet werden, dass der automatische Anlauf oder das versehentliche Einschalten von Maschinen sicher vermieden wird. Hierzu sind in der elektrischen Anlage entsprechende Sicherheitsregeln vorzusehen. Beispiele für Sicherheitseinrichtungen finden sich in Abbildung 3-19.



Abbildung 3-19: Rohrtrenner und Ultraschallsensor an einem Rechen

Auch der Wasseranschluss muss nach den gültigen Vorschriften erfolgen. Keinesfalls darf eine ungesicherte Verbindung zwischen einer Trinkwasserleitung und dem Rechen erfolgen. Dies ist unerheblich, wenn eine Betriebswasserversorgung existiert.

4 BEHANDLUNG UND ENTSORGUNG VON RECHENGUT

Nach der Entnahme des Rechenguts aus dem Abwasserstrom durch Rechen und Siebe wird es in weiteren Prozessschritten behandelt und transportiert. In diesem Kapitel wird zunächst das Rechengut charakterisiert (4.1), dann werden Transportsysteme für Rechengut auf Kläranlagen vorgestellt (4.2). Die mechanischen (4.3), biologischen (4.4) und thermischen (4.5) Behandlungsverfahren schließen sich an. Abschließend werden Recycling, Verwertung und Beseitigung von Rechengut (4.6) beschrieben

4.1 Charakterisierung von Rechengut

Rechengut ist „mittels Rechen und Siebe zurückgehaltene Stoffe“ (DIN, 2007b: 32). Darin findet sich alles, was die richtige Größe hat, um durch die Kanalisationsrohre transportiert, an der Separationsfläche von Rechen zurückgehalten und durch das Reinigungssystem des Rechens oder des Siebes ausgetragen werden zu können (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Rechengutzusammensetzung, Johannesburg, Südafrika

Je nachdem, ob das Einzugsgebiet im Trennsystem betrieben wird oder ob es sich um eine Mischkanalisation handelt, finden sich jede nur vorstellbare Art von Zivilisationsmüll im Rechengut. Wie bei gemischten Siedlungsabfällen üblich, handelt es sich bei Rechengut um eine heterogene Abfallfraktion (NRW, 2001: 302). Damit sind auch verallgemeinernde Aussagen nur bedingt auf konkrete Einzelfälle anwendbar.

Rohrechengut hat einen sehr hohen Wasseranteil von $> 80\%$. Nach HANSSEN (1999: 1589 f.) konnte bei einer Untersuchung von Rechengut mittels Handsortierung ermittelt werden, dass sich der Feststoffanteil hauptsächlich aus Zellulose ($> 80\%$), Kunststoffen (2-14 %) und mineralischen Anteilen zusammensetzt. Die Zellulose besteht zu großen Teilen aus Toilettenpapier und anderen Hygieneartikeln. Die Kunststoffe sind oft Verpackungen, Schutzfolien und Wattestäbchen. Daneben befinden sich natürlich auch Fäkalien, Essensreste und andere organische Abfälle im Rechengut. Je nach Jahreszeit enthält Rechengut auch natürliche Materialien wie Grasschnitt, Zweige und Laub. Mineralische Stoffe, in der angegebenen Untersuchung von Hanßen gemessen als Glührückstand, haben im Rechengut einen Anteil zwischen 3,5 und 9,4 %. Interessanterweise findet sich im Rechengut zum Beispiel bei der Schwermetallkonzentration im Vergleich zum Klärschlamm ein geringeres Schadstoffpotenzial (HANSSEN, 1999: 1589 f.).

In der Aufzählung zu den Inhaltsstoffen von Rechengut dürfen aber auch andere Bestandteile nicht vergessen werden, die zwar einen geringen Anteil an der Gesamtmenge ausmachen, aber unter Umständen bei der Abwasserreinigung erhebliche Störungen verursachen können. Dazu zählen Haare, Spielzeuge, Verschlüsse von Verpackungen, medizinische Teststreifen, Präservative, Zigarettenfilter, Reinigungstücher (manchmal mit Metallfäden durchwoben), Kleidungsstücke und Feuerzeuge, eben alles, was durch die Kanalisation passt. Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 4-2, folgende Seite) zeigt beispielhaft, in welcher Vielfalt sich unerwartete Gegenstände im Rechengut befinden können.



Abbildung 4-2: Schautafel auf der ARA Emmenspitz, CH

Die Tafel wurde von Schweizer Klärwärtern aufgestellt, um Besuchern, vornehmlich Schulklassen, darstellen zu können, was nicht in die Kanalisation gehört. Dazu zählen insbesondere Medikamente, Rasierklingen und vor allem Wattestäbchen. Letztere überwinden alle Hindernisse, die in der Kläranlage aufgebaut sind und gelangen bis in den Auslauf zum Vorfluter.

4.2 Transportsysteme für Rechengut

Auf allen Kläranlagen ist der Transport von Rechengut eine wichtige Aufgabe. Im einfachsten Fall kann das Rechengut durch die eigene Gewichtskraft zu einem bestimmten Zielort bewegt werden. Wenn dieser Transportweg nicht möglich ist, muss eine Fördereinrichtung eingeplant werden. Die dann notwendige Auswahl der besten Ausführungsart für den Rechenguttransport hängt von der Rechengutmenge, dem Wassergehalt, der Konsistenz und vor allem von den Platzverhältnissen, der Transportstrecke und der dabei zu überwindenden Förderhöhe ab (PANKRATZ, 1995:

183). Außerdem ist zu beachten, ob das Rechengut von mehreren Stellen zusammengeführt und nach dem Transport auf verschiedene Stellen verteilt werden soll. In jedem Fall sind der Geruchsentwicklung und hygienischen Fragen beim gewählten Transportsystem erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

In diesem Kapitel werden Gurtförderer (4.2.1), Schneckenförderer (4.2.2) Schwemmrinnen (4.2.3) und sonstige Transportsysteme besprochen (4.2.4). Abschließend erfolgt eine Darstellung der Transportsysteme durch Piktogramme (4.2.5).

4.2.1 Gurtförderer

Ein einfaches Verfahren zum Transport von Rechengut stellen Gurtförderer dar (Abbildung 4-3). Die Bespannung des Förderers, die mit dem Antriebsmotor verbunden ist, erfolgt üblicherweise mit einem Gummiband (evtl. mit Transportnoppen) oder einem Siebband. Das Rechengut wird von einem Rechen oder einem anderen Förderer auf das Band abgeworfen und transportiert.



Abbildung 4-3: Gurtförderer am Abwurf einer Rechenstraße in Mumbai, Indien

Die Ausführung des Förderers muss so gestaltet sein, dass das vom Rechengut abtropfende Wasser sicher in ein Gerinne oder ein Rohr abgeleitet wird und dass das ungewollte Herabfallen von Rechengut neben oder unter das Förderband vermieden wird. Dies gilt insbesondere an der Abwurfstelle. Dort ist in aller Regel ein Schaber zur vollständigen Entfernung des Rechengutes notwendig. Eine regelmäßige (automatische) Reinigung mit Wasserdüsen ist aus hygienischen und arbeitstechnischen Gründen sinnvoll.

Der Aufstellungswinkel des Förderers ergibt sich aus dem zu überwindenden Höhenunterschied und der Entfernung. Da eine Kapselung eines Gurtförderbandes sehr aufwändig ist, muss bei der Verwendung eines solchen mit Geruchsemissionen gerechnet werden. Über verfahrbare oder teleskopierbare Gurtförderer kann die Verteilung von Rechengut auf nebeneinander aufgestellten Container erfolgen (NICKE, 2003: 39).

4.2.2 Schneckenförderer

Schneckenförderer bestehen in der Regel aus einem Rohr oder einem Trog und einer Förderschnecke. Das Rechengut wird durch die sich drehende Schnecke (genauer: Schraube) transportiert. Wegen der besseren Zugänglichkeit für Reinigungs- und Wartungszwecke wird in der Regel ein abgedeckter Trog statt eines Rohrs verwendet. Die Förderspirale selbst ist meist wellenlos, um das Umwickeln des Zentralrohres mit langfaserigem Rechengut zu vermeiden. Solche Spiralförderer sind weniger störanfällig als Transportbänder (SCHMIEDER, 1997: 3-55). Durch die Reibung der Förderspirale an den Auflagepunkten unterliegen diese Förderer aber einem gewissen Verschleiß (NICKE, 2003: 39).

Spiralförderer werden sowohl horizontal, in der Regel mit leichtem Gefälle zur Entwässerungsstelle am Einwurf, wie auch mit Steigung zur Überwindung von Höhenunterschieden eingesetzt. In manchen Fällen wird auch eine vertikale Förderung angewendet. Dieser senkrechte Transport setzt aber besondere Vorkehrungen voraus, um stets die Relativbewegung des Rechengutes zur Spirale zu sichern.

Der Motor des Förderers kann ziehend oder schiebend angeordnet werden. Bei schiebendem Motor muss auf eine gute Wellenabdichtung geachtet werden; eine zusätzliche Entwässerungszone kann diese Abdichtung deutlich entlasten. Die Spirale wird durch den Förderungsvorgang gestaucht und verkürzt sich dadurch („Federeffekt“), was bei der Konstruktion des Abwurfes beachtet werden muss. Ziehende Motoren brauchen hingegen in der Regel keine aufwändige Abdichtung, weil nicht mit anstehendem Wasser

zu rechnen ist. Allerdings besteht die Gefahr, dass sich Rechengut vor der Wellendurchführung aufstaut und somit die Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird. In extremen Fällen kann dies auch zu einer vollständigen Blockierung und möglicherweise zum Bruch der Antriebswelle oder der Spirale führen. Zur Erhöhung der Ausfallsicherheit können Doppelwellenförderer eingesetzt werden (Abbildung 4-4). Dabei werden zwei Spiralförderer in einem Doppeltrog montiert, von denen jeder einen unabhängigen Antrieb besitzt. Die Beschickung mit Rechengut erfolgt über ein Klappensystem, welches ebenfalls automatisiert werden kann.



Abbildung 4-4: Doppelwellenförderer an einer Rechenstraße (Kläranlage Göttingen)

Als Zusatzeinrichtungen werden für Spiralförderer auch einfache Verdichtungsrichtungen für Rechengut mit einer Entwässerungszone angeboten, wodurch eine Vorentwässerung erreicht werden kann.

In größeren Kläranlagen reicht es in der Regel nicht aus, das bei Stoßbelastung anfallende Rechengut in einem stationär vorhandenen Container zu sammeln. Um Störungen durch überfüllte Container zu vermeiden, wird deshalb eine automatisierte Verteileranlage mit

Spiralförderern installiert, welche mit speziellen Auslässen ausgerüstet werden, die mit Schiebern geöffnet und geschlossen werden können (Abbildung 4-5) (NICKE, 2003: 39).

Eine weitere Ausführungsart zur Vermeidung übervoller Behälter sind Containerverschiebeanlagen, die in großen Anlagen Anwendung finden. Dabei werden volle Container über ein Schienensystem automatisch an einen für den Abtransport vorgesehenen Ort transportiert. Anschließend wird ein leerer Container an den nun freien Platz gestellt. Somit steht für große Stoßbelastungen ein erheblich größeres Lagervolumen für Rechengut zur Verfügung (NICKE, 2003: 40).



Abbildung 4-5: Schneckenförderer zur Verteilung von Rechengut

Auf dem Bild sind die redundant ausgelegten Querförderer mit den automatisierten Auslässen an den Rechengutcontainern zu sehen.

4.2.3 Schwemmrinnen

Schwemmrinnen sind offene oder abgedeckte Tröge, die mit einem leichten Gefälle montiert sind (Abbildung 4-6, folgende Seite). In diese Tröge wird das Rechengut von oben hineingegeben. Der Transport erfolgt wie in der Kanalisation durch die Zugabe von Treib- oder Schwemmwasser, welches entweder durch am Rechen vorhandene Abspritzvorrichtungen bereits in genügendem Maße vorhanden ist oder zusätzlich

zugeführt werden muss. Schwemmrinnen sind sehr häufig auf Kläranlagen in angelsächsisch geprägten Ländern zu finden. Neuerdings finden sie aber auch in Deutschland immer mehr Verbreitung. Der größte Vorteil von Schwemmrinnen ist die einfache Anpassung der Rinnen an die vorgegebenen Zwangspunkte der Anlage ohne zusätzliche Technik.



Abbildung 4-6: Schwemmrinne am Rechen, England

Auf dem Bild ist eine Schwemmrinne zum Transport von Rechengut zu sehen. Von rechts kommt eine weitere Zuführung in den Hauptkanal.

4.2.4 Sonstige

Rechengutcontainer werden innerhalb oder auch außerhalb der Kläranlage auch mit LKW transportiert. Diese Art der Beförderung von Rechengut wird aber nur angewendet, wenn andere Transportmethoden nicht wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden können.

Pneumatische Förderer werden sehr selten für den Rechenguttransport eingesetzt. Bei diesem System wird das Rechengut in ein Rohrsystem gebracht und mit Hilfe von Druckluft gefördert. Es wird berichtet, dass mit dieser Methode Förderweiten bis 300 m

und mehr erreicht werden können. Denkbar sind auch Varianten, in denen die Förderung durch Anlegen von Unterdruck erfolgt (PANKRATZ, 1995: 188).

Eine Förderung von Rechengut kann auch mittels Injektorpumpen realisiert werden. Dazu wird das Rechengut von den Rechen in eine Kammer abgeworfen. Von dort wird es mit einer mit Wasser gespeisten Pumpe angesaugt und zur weiteren Behandlung transportiert. Das System hat den großen Nachteil, dass die Pumpen sehr leicht verstopfen und dass das Rechengut-Wassergemisch nachfolgend eine groß dimensionierte Entwässerungsanlage erfordert.

4.2.5 Piktogramme

Zur besseren Übersicht ist nachfolgend in Abbildung 4-7 eine Sammlung von Piktogrammen von Rechengutförderern dargestellt.

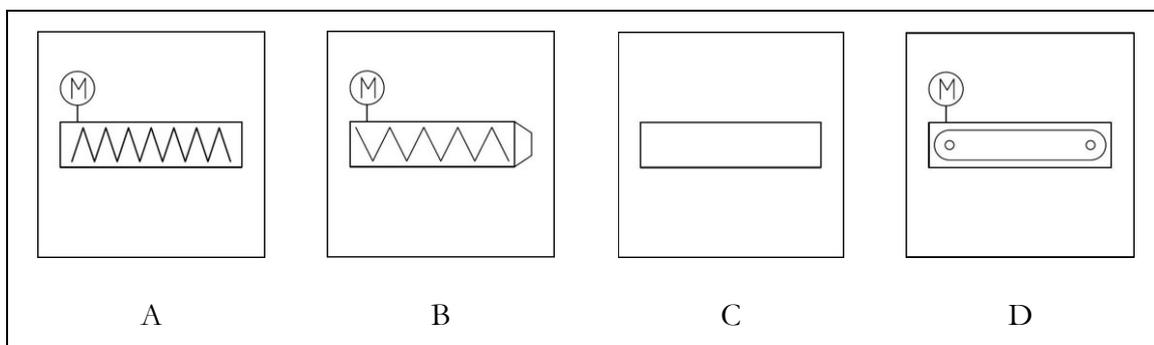


Abbildung 4-7: Piktogramme der Rechengutförderer

Die einzelnen Piktogramme werden in der nachfolgenden Tabelle 4-1 spezifiziert.

Tabelle 4-1: Beschreibung der Piktogramme von Rechengutförderern

Kennzeichen	Art der Förderung	Antrieb	Zusatzeinrichtungen	Bemerkungen
A	Schnecke	ja	nein	Spiralförderer
B	Schnecke	ja	Entwässerungsmodul	Spiralförderer
C	Schwemmsystem	nein	Transportwasser	Schwemmrinne
D	Förderband	ja	nein	Gurtförderer

4.3 Mechanische Verfahren zur Behandlung von Rechengut

Die häufigste Art der Behandlung von Rechengut zur Reduzierung von Masse und Volumen sind die mechanischen Verfahren, welche nachfolgend beschrieben werden. Der Schwerpunkt liegt dabei zunächst auf der Entwässerung (4.3.1). Dann folgen Rechengutwäsche (4.3.2) und Zerkleinerung (4.3.3). Das Kapitel wird durch die entsprechenden Piktogramme (4.3.4) abgeschlossen.

4.3.1 Entwässerung

Nach neueren Untersuchungen hat Rohrechengut, welches direkt vom Rechen entnommen wird, einen Feststoffanteil von 8 % bis 12 %; bei längerer Abtropfzeit kann der Anteil auf 18 % steigen (BRANNER, 2013: 311). Deshalb ist es schon aus Transportgründen wichtig, das Volumen und die Masse von Rechengut zu reduzieren, was am einfachsten durch die Verminderung des Wasseranteils geschieht.

Da der Wassergehalt von Rohrechengut sehr hoch ist, wird die Gesamtmasse bei der Entwässerung schnell geringer. Dieser Effekt verlangsamt sich jedoch mit steigendem Trockenrückstand. In Abbildung 4-8 wird dieser Zusammenhang für eine Trockenmasse von $m_{tr} = 5 \text{ kg}$ dargestellt:

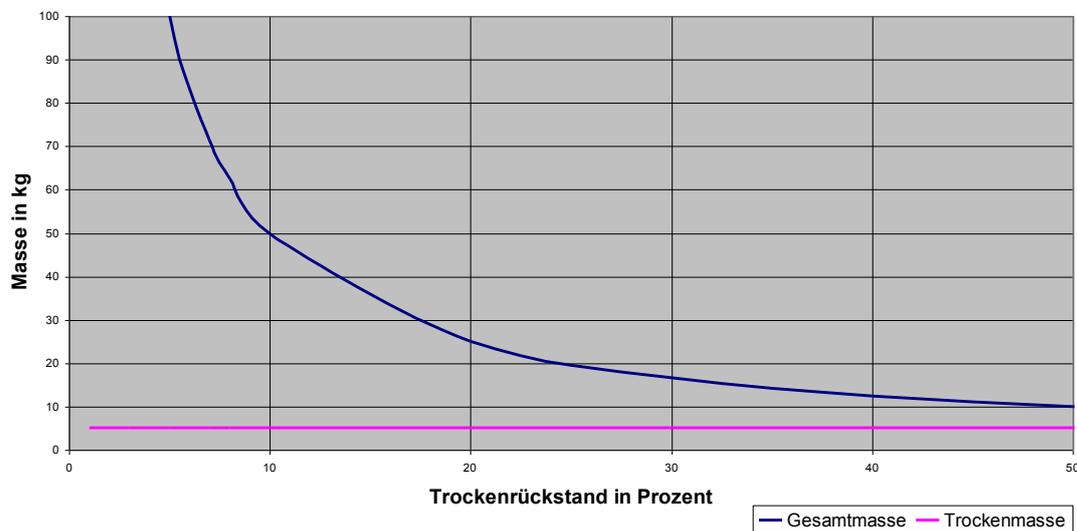


Abbildung 4-8: Gesamtmasse in Abhängigkeit des Trockenrückstandes TR (nach ATV, 1996: 97)

In der Abbildung ist sehr deutlich zu erkennen, dass schon bei einem Trockenrückstand von 10 % eine deutliche Abflachung der Kurve festzustellen ist. Dennoch ergibt sich

beispielsweise bei einer Entwässerung von 35 % TR auf 45 % TR immer noch eine Reduzierung der Gesamtmasse um 22%.

Die Hyperbel in Abbildung 4-8 errechnet sich aus folgender Gleichung:

$$m_i = \frac{m_{tr}}{TR_i} \qquad \text{Gleichung: 4.1}$$

Darin ist m_{tr} die Trockenmasse in kg und TR_i das Verhältnis der Trockenmasse m_{tr} zur Gesamtmasse m_i .

Die Verminderung der Gesamtmasse m_i von Rechengut durch Entwässerung ist folglich unter dem Gesichtspunkt der Gewichts- und Volumenreduktion für den Transport und die Entsorgung nicht unerheblich. Ob dieser Entwässerungsgrad auch wirtschaftlich sinnvoll ist, kann nur durch die Einbeziehung weiterer Randbedingungen wie dem Energieaufwand und dem Verschleiß an den Behandlungsmaschinen ermittelt werden. Nachfolgend werden die einzelnen mechanischen Entwässerungsverfahren vorgestellt.

Absetzverfahren

Die einfachste Form der Rechengutentwässerung ist die statische Entwässerung. Dabei wird das Rechengut in einen Entwässerungscontainer gefördert und dort gelagert. Durch die Gewichtskraft der oben liegenden Rechengutteile werden die darunter liegenden Schichten zusammengepresst, und das Wasser entweicht durch seitlich und unter dem Rechengut angebrachte Öffnungen. Diese Öffnungen verstopfen jedoch relativ leicht, und der geringe Druck begrenzt den Entwässerungserfolg. Zumindest bei entsprechender Lagerdauer und guten Witterungsbedingungen findet eine weitere Entwässerung auch durch Verdunstung statt. Je nach Rechentyp kann dieser Prozess bereits während der Verweilzeit auf dem Rechen beginnen. Durch Zuführung von sonst ungenutzter thermischer Energie kann die Entwässerung im Container deutlich gesteigert werden (SICKELMANN, 2010: 1715).

Maschinelle Verdichtung

Die maschinelle Verdichtung von Rechengut erfolgt in der Regel durch einen Pressvorgang. Nach DIN ist eine Rechengutpresse (Siebgutpresse) eine „maschinelle Einrichtung zum Vermindern des Volumens und des Wassergehaltes von Rechen- oder Siebgut“ (DIN, 2007b: 32).

Eingesetzt werden Schnecken-, Kolben- und Walzenpressen (DIN, 2002a: 11). In dieser Norm werden auch die entsprechenden Baugrundsätze genannt.

Der Hauptgrund für den Einsatz solcher Pressmaschinen liegt in der Gewichts- und Volumenverminderung durch die Reduzierung des Wassergehalts im Rechengut auf circa 50 % - 55 % zur Reduktion der Transportkosten des Rechengutes (SCHÄFER, 1998: 643). Bereits 1996 verfügte jede zweite Kläranlage in Deutschland über eine Rechengutpresse oder -wäsche (ESCH, 1999: 946). Rechengutpressen werden als Nachfolgeaggregat nach dem Rechen eingesetzt. Bei bestimmten Bauformen wie dem Spiralsieb kann das Rechengut auch im Rechen verdichtet werden.

Bei der Schneckenpresse drückt die Schnecke das Rechengut vom Aufnahmetrichter in ein Austragsrohr. Die dort vorhandene Reibung erzeugt den notwendigen Gegendruck. Das Rechengut wird durch das Austragsrohr üblicherweise in einen Sammelbehälter gefördert. Dieser wird dann zum Abtransport genutzt. Bei der Kolbenpresse wird die Verdichtung durch einen Kolben erzielt, der das Rechengut gegen einen geschlossenen Schieber oder in ein zunächst klein dimensioniertes Austragsrohr presst.

Walzenpressen werden in der Literatur zwar beschrieben (ATV, 1997: 94), in der Praxis aber wegen ihrer großen Störanfälligkeit kaum eingesetzt.

Ein immer wieder auftretendes Problem bei der Verdichtung von Rechengut ist die Verstopfung des Austragsrohres, was zu schwerwiegenden Problemen bei der Reparatur führt, da dann das Rechengut im Rohr üblicherweise sehr trocken und äußerst hart ist. Nicht selten muss das Rechengut mit Stemmwerkzeugen manuell aus dem Rohr entfernt werden. In diesen Fällen sind Spülanschlüsse sehr hilfreich.

Der Verschleiß in allen vorgenannten Verdichtungsmaschinen ist erheblich. Der mit dem Rechengut ausgetragene mineralische Anteil sowie die für die Entwässerung notwendigen Kräfte sorgen für deutliche Abnutzungserscheinungen. Diese lassen sich durch geeignete Maßnahmen wie große Wandstärken und verschleißfeste Werkstoffe deutlich reduzieren.

In diesem Zusammenhang soll nicht unerwähnt bleiben, dass der Rechen und die nachfolgende Einrichtung als funktionelle Einheit zu sehen ist (ATV, 1997: 93). Gemeint ist damit die Tatsache, dass bei einem Ausfall der Nachfolgeeinrichtung auch sehr schnell der Rechen betroffen ist. Da dessen Ausfall in der Regel weitreichende Konsequenzen für den Betriebsablauf der Kläranlage hat, muss auch die Nachfolgeeinheit robust sein, um die Ausfallzeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

4.3.2 Rechengutwäsche

Durch den Einsatz von Rechen mit immer kleineren Spaltweiten in den letzten Jahrzehnten stieg der Anteil von Fäkalien im Rechengut immer mehr an. Dieser Anstieg führte zu vermehrten Hygiene- und Geruchsproblemen. Zudem lässt sich Rechengut bei solch hohem Gehalt an organischen Inhaltsstoffen nur sehr schwer entwässern, und die darin enthaltenen leicht abbaubaren organischen Substanzen fehlen in den nachfolgenden Verfahrensschritten im Abwasserstrom als Substrat.

Um die genannten Nachteile zu vermeiden, wird Rechengut zuerst ausgewaschen (Abbildung 4-9). Dieser Vorgang erfolgt mit Hilfe von Wasser als Lösungsmittel und einer mehr oder weniger schnellen Umwälzung des Rechengutes. Sehr häufig wird die Rechengutwäsche und die Entwässerung in einem Aggregat kombiniert (NICKE, 2003: 37).

Das Washwasser wird je nach Hersteller der Rechengutwäsche nur von außen oder auch von außen und innen dem Rechengut zugegeben. Dazu kann Rohabwasser, Betriebswasser oder Trinkwasser verwendet werden. Die Auswaschung erfolgt besonders intensiv durch die Vor- und Rückwärtsbewegung der Schnecke oder durch zusätzlich eingebaute Wirbelräder (ATV, 1997: 92). Bei hoher Stoßbelastung wird in der Regel auf eine intensive Auswaschung verzichtet, um eine hohe Durchsatzleistung zu erreichen und damit die Betriebssicherheit zu gewährleisten (NICKE, 2003: 37).

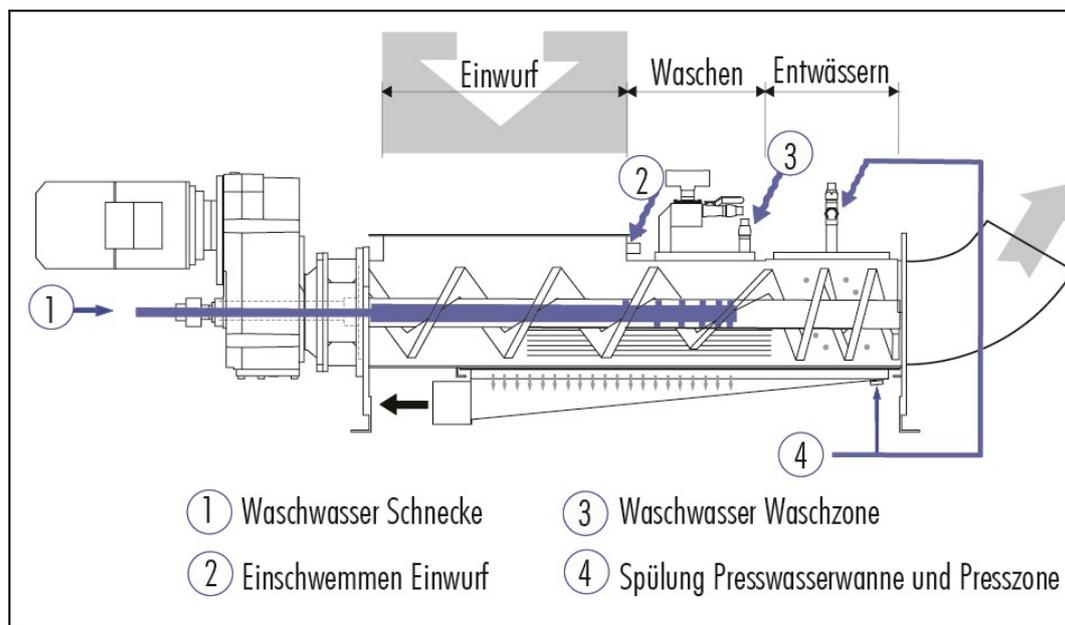


Abbildung 4-9: Schnittbild einer Waschpresse (KUHNS GmbH, 2011)

Trotz der Auswaschung beträgt der organische Anteil im Rechengut immer noch deutlich mehr als 5%, weshalb eine Deponierung nicht mehr möglich ist. Sehr häufig werden Rechengutwäschen mit Pressen in einer Maschine kombiniert. Rechengut aus einer solchen Waschpresse kann eine Schüttdichte von 900 – 1000 g / L erreichen. Abhängig von der Verdichtung kann die Dichte von Rechengut in einem Container (Containerschüttung) zwischen 400 und 700 g / L liegen (POTTENGEIER, 2011).

Je nach Zusammensetzung des Rechenguts und je nach der Behandlungsmethode ist das Ergebnis der Auswaschung und der Verdichtung sehr verschieden.



Abbildung 4-10: Gewaschenes und entwässertes Rechengut

Der in der Abbildung 4-10 gezeigte Rechengutpressling ist sehr gut ausgewaschen und deshalb durch seine Farbe wie auch durch den hohen Gehalt an Toilettenpapier schon sehr hell. Auch die Verdichtung ist sehr zufriedenstellend. Dieser hohe Auswaschungs- und Verdichtungsgrad ist an den deutlich sichtbaren Vertiefungen, die die Verschleißleisten der Waschpresse verursacht haben, zu erkennen.

4.3.3 Zerkleinerung

Um die negativen Auswirkungen von Rechengut in den nachfolgenden Anlagenteilen und Maschinen zu minimieren, werden sehr selten Zerkleinerer eingesetzt, durch die eine optische Verbesserung des Abwasserstromes erreicht wird. Allerdings ist das Rechengut immer noch im Abwasserstrom vorhanden und kann bei ungünstigen Umständen zu

Verzopfungen führen (Abbildung 4-11). Eine weitere Anwendung der Zerkleinerung stellt die Vorbereitung zur Beimischung des Rechengutes zum Klärschlamm dar, um folglich die Ausbeute von Klärgas zu erhöhen; aber auch hier besteht die Gefahr der Zopfbildung, und die nicht abbaubaren Reststoffe stören bei der weiteren Verwertung des Klärschlammes.

In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2000 nennt Schüssler die Zahl von 23 Kläranlagen, also weniger als ein Promille aller Anlagen in Deutschland, die die Rechengutzerkleinerung einsetzen (SCHÜSSLER, 2000). Allerdings konnten nur die Angaben aus neun Anlagen für die Auswertung herangezogen werden. Bei sieben Anlagen wurden häufige Verstopfungen als negative Auswirkung auf den Kläranlagenbetrieb genannt. Sechsmal wurde eine stärkere Schwimmschlamm-Bildung als vor dem Einbau der Zerkleinerung beobachtet (SCHÜSSLER, 2000: 110). Kleffner berichtet weiter über den Einsatz von Zerkleinerung aus Hamburg „vielfältige Betriebsschwierigkeiten wie Zopfbildung und Verstopfungen in den Leitungen und Pumpen vor allem des Faulbehälterbereiches, Schwimmdecken auf Eindickern und Faulbehältern, und Kettenbrüchen an Bandräumern durch Umwickeln der Zahnräder“ und weiter „Auf dem Klärwerk selbst lohnt sich der Einsatz am Zulauf nicht, da sich das zerkleinerte Material erst durch die Turbulenz in der Belebung zu größeren Teilen zusammenspinnt.“ (KLEFFNER, 1976: 40).

Die auch nach der Zerkleinerung im Rechengut zu findenden Kunststoff-, Glas- und Metallstücke verbleiben weiterhin als teilweise gesundheitsgefährdende Störstoffe für den weiteren Klärprozess, insbesondere in der Schlammbehandlung. Deshalb wird die Zerkleinerung von Rechengut mittlerweile als „betrieblich nicht sinnvoll“ erachtet (TEICHGRÄBER, 1998: 93). Die Rechengutzerkleinerung hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt. Abbildung 4-11 (folgende Seite) zeigt eine sehr lange und voluminöse Verzopfung aus einer Kläranlage in England. Die helle Farbe deutet darauf hin, dass sich das Material schon sehr lange im Abwasserstrom befunden hat und entsprechend gut ausgewaschen ist.



Abbildung 4-11: Verzopfung von Abwasserinhaltsstoffen

4.3.4 Piktogramme

Zur besseren Übersicht ist nachfolgend in Abbildung 4-12 eine Sammlung vorhandener Piktogramme von geläufigen Behandlungsmaschinen für Rechengut dargestellt.

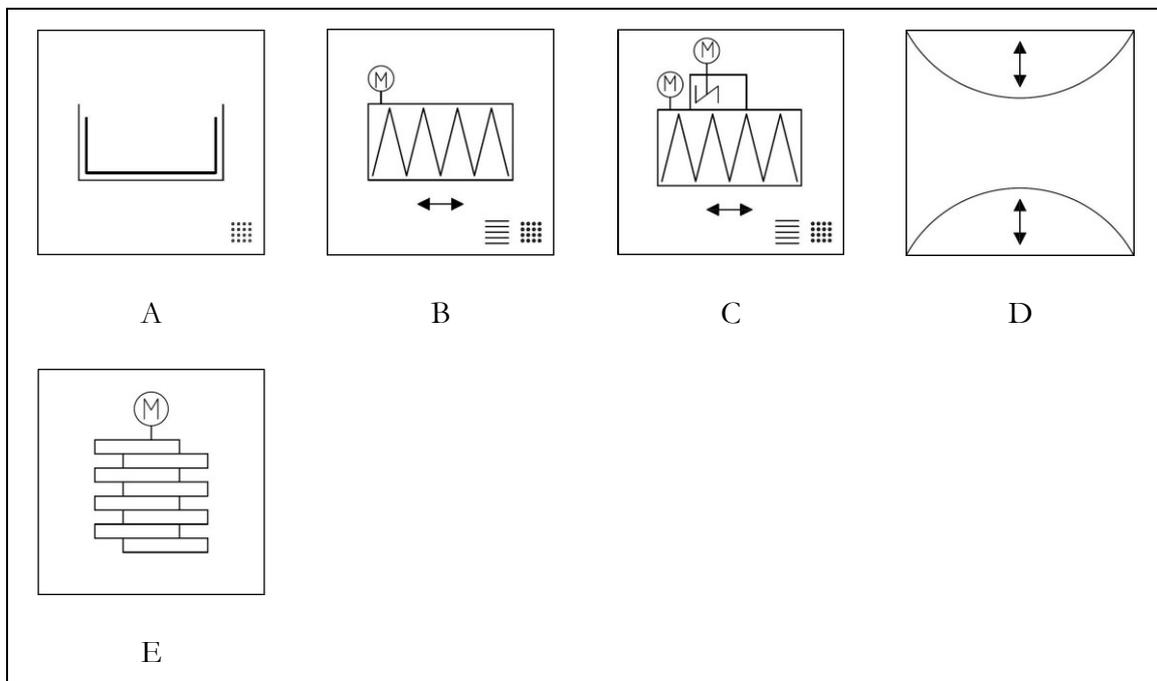


Abbildung 4-12: Piktogramme der Behandlungsmaschinen

In Tabelle 4-2 werden die einzelnen Piktogramme erläutert.

Tabelle 4-2: Beschreibung der Piktogramme von Behandlungsmaschinen

Nr.	Art der Öffnungsgeometrie	Reinigung durch	Antrieb	Zusatzeinrichtungen	Bemerkungen
A	Loch	keine	keinen	keine	Entwässerungscontainer
B	Spalt und / oder Loch	Bürste	ja	Waschwasser	Waschpresse
C	Spalt und / oder Loch	Bürste	ja	Waschwasser und Wirbelrad	Waschpresse mit Verwirbelungszone
D	keine	nein	nein	Druckluftversorgung	Regelung des Widerstandes möglich
E	keine	keine	ja	Schneidmesser	Zerkleinerer

4.4 Biologische Verfahren zur Behandlung von Rechengut

Neben den maschinellen Verfahren kann Rechengut auch mit biologisch-technischen Verfahren behandelt werden. Diese wurden relativ selten zur Behandlung von Rechengut aus deutschen Kläranlagen angewendet (SCHÜSSLER, 2000: 108). Da Rechengut seit 2005 auch nach einer mechanischen Behandlung wegen des zu hohen Gehalts an organischen Bestandteilen nicht mehr deponiert werden darf, ist der Anteil des biologisch behandelten Rechengutes seitdem deutlich gestiegen. Zu diesen biologischen Verfahren zählen die Kompostierung (4.4.1) und die Vergärung (4.4.2).

4.4.1 Kompostierung

Bei der Verwertung von Rechengut durch Kompostierung ist „nicht die Beseitigung von Schadstoffen, sondern die Nutzung der positiven Eigenschaften und Inhaltsstoffe“ maßgeblich (BERKNER, 1999: 1597). Ziel der Kompostierung ist die „Hygienisierung und biologische Stabilisierung“ des Rechengutes (SCHRIEFER, 2005: 295). Außerdem ist die Reduzierung des Wassergehaltes ein willkommener Effekt.

Mit dem Begriff „Kompostierung“ wird in der Regel der natürlich-biologische Zersetzungsprozess von organischen Abfällen (Gartenabfällen) unter Ausnutzung von

freiem Sauerstoff (Luft) bezeichnet. „Für diesen Prozess wird gleichermaßen der Begriff Rotte benutzt“ (ATV, 1996: 153).

In der technischen Mikrobiologie wird dagegen von aerob-thermophiler Stabilisierung gesprochen, wenn die Temperaturen über 50° C erreichen. Auslöser der Zersetzung sind Mikroorganismen, die mit dem Luftsauerstoff die organischen Inhaltsstoffe zersetzen. Ziel der Rechengutkompostierung ist die oben genannte Stabilisierung, womit eine längere Lagerdauer ohne zu starke Geruchsprobleme erreicht werden kann. Gleichzeitig ist eine deutliche Massereduzierung von bis zu 90 % bezogen auf das Eingangsmaterial zu beobachten (TRITT, 1996: 7). Die Kompostierung von Rechengut findet in den meisten Fällen nicht auf dem Gelände der Kläranlagen statt; es wird an Abfallanlagen übergeben.

4.4.2 Vergärung

Im Gegensatz zur Kompostierung setzt die Vergärung anaerobe Verhältnisse voraus. Ziel der Vergärung des Klärschlammes auf der Kläranlage ist die Methangasproduktion und die Volumenreduktion. Um die Mengen an verwertbarem Methan zu erhöhen, kann zusätzliches Substrat eingesetzt werden. Da dieses Substrat aus vielerlei Gründen zusammen mit dem Klärschlamm im Faulturn vergärt wird, spricht man auch von der Co-Vergärung. „Der Terminus Co-Vergärung ist bisher nicht präzise definiert. Er bezeichnet die Mitbehandlung begrenzter Mengen eines Materials in einer Vergärungsanlage“ (DWA, 2009: 7).

Die praktische Umsetzung der Co-Vergärung erfolgt derzeit nur an wenigen deutschen Kläranlagen. Die bisher veröffentlichten Ergebnisse von Schäfer und Müller sind in Bezug auf die Erhöhung der Faulgasproduktion durchaus positiv, wenn auch die rechtlichen Rahmenbedingungen zukünftig erwartungsgemäß schwieriger werden, weil die Co-Vergärung in der wasserrechtlichen Genehmigung für die Betreiber von Kläranlagen nicht eingeschlossen ist (SCHÄFER, 2009; MÜLLER, 2009).

Auch Rechengut erfüllt zunächst die Voraussetzungen, die an Co-Substrate gestellt werden. Der hohe Anteil an organischen Bestandteilen im Rechengut kann die Faulgasausbeute eines Faulturns erhöhen. Im Gegensatz zu Speiseresten oder Fettabscheiderinhalten ist die Zugabe von Rechengut in den Faulturn aus juristischer Sicht in der Regel unproblematisch, weil ja das Rechengut, solange es die Abwasserreinigungsanlage noch nicht verlassen hat, nicht als Abfall gilt. Eine Beeinträchtigung der Ablaufwerte oder eine Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit ist nicht zu erwarten (MILKOWSKI,

2009: 60). Dadurch kann die Zugabe von Rechengut durch eine Ergänzung der wasserrechtlichen Genehmigung erlaubt werden (DWA, 2009: 10). Diese Genehmigung hat wohl auch zur Konsequenz, dass der Gärrest rechtlich Klärschlamm bleibt.

Allerdings ist zu beachten, dass Rechengut die bereits in Kapitel 4.3.3 genannten Störungen verursachen kann. Deshalb bewertet die DWA Rechengut als nur bedingt für die Co-Vergärung einsetzbar. „Rechengut ist nur nach sorgfältiger Aufbereitung geeignet und ist somit als bedingt (*geeignet*; Anmerkung des Verfassers) einzustufen“ (DWA, 2009: 49).

4.5 Thermische Verfahren für die Rechengutbehandlung

Für die Verbrennung ist der Heizwert eines Stoffes wahrscheinlich die wichtigste Kenngröße überhaupt. In der Literatur finden sich für Rechengut nur wenige entsprechende Angaben. Häufig genannt werden Werte von 2 – 10 MJ / kg (SCHÄFER, 1998: 643). Schüller nennt sogar einen Wert von > 11 MJ / kg (SCHÜSSLER, 1998: 145). In Hamburg durchgeführte Untersuchungen ergaben einen Heizwert von 4,8 MJ / kg im Mittel; es wurden jedoch beachtliche Schwankungen im Heizwert beobachtet (HANSSEN, 1999: 1589). Leider fehlt auch bei Hanßen der Hinweis, ob die Werte mit gepresstem oder ungespresstem Rechengut ermittelt wurden.

Wegen der Inhomogenität und des hohen Störstoffanteils im Rechengut ist die alleinige Verbrennung von Rechengut nicht empfehlenswert. Eine Mitverbrennung ist wegen des vorhandenen Energieinhaltes und der vergleichmäßigen Wirkung der anderen Brennstoffe möglich und sinnvoll. Auf Grund des insgesamt niedrigen Glührückstandes verbrennt das Rechengut aschearm. Sein Schadstoffpotenzial ist außer bei Chlor und dem Mineralölgehalt niedriger als im Klärschlamm (HANSSEN, 1999: 1590).

4.6 Recycling, Verwertung und Beseitigung

Wie schon in Kapitel 4.1 beschrieben, sind das Recycling von Rechengut sowie die Kreislaufführung der Inhaltsstoffe aus hygienischen und ästhetischen Gründen nur sehr schwer vorstellbar. Um diese Probleme zu umgehen, müssten automatische Sortieranlagen eingesetzt werden. Die dafür notwendige Technik und deren Kosten übersteigen aber deutlich den aus der Sortierung zu gewinnenden Nutzen.

Eine Verwertung von Rechengut kann jedoch gut im Deponiebau oder bei der Rekultivierung erfolgen. Zuvor muss aber eine Reduzierung des hohen Organikgehalts zum Beispiel durch Kompostierung erfolgen (DWA, 2013: 26)

Vor dem Jahr 2005 war die Deponierung die häufigste Methode der Beseitigung von Rechengut. Seit dem Ende der Übergangsfrist der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASI, 1993), die durch die Abfallablagereungsverordnung rechtlich aufgewertet wurde (ABFABLV, 2001), ist dies nicht mehr möglich, da der organische Anteil im Rechengut deutlich über der Grenze von 5 % der Gesamtmasse liegt. Die Auswirkung dieser rechtlichen Rahmenbedingung auf die Entsorgungsart von Rechengut wird in der nachfolgenden Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Entsorgung von Rechengut in Deutschland (DESTATIS, 2009a: 24ff; DWA, 2005: 44)

Anlagenart	Masse 2007	Anteil 2007	Anteil 2003
	1.000 Mg	%	%
Biologische Anlagen	70,4	42,7	28,0
Thermische Anlagen	41,1	24,9	25,0
Deponien	18,9	11,4	47,0
Sortieranlagen	11,5	7,0	-
Bodenbehandlung	9,7	5,9	-
Mechanisch-Biologische Anlagen	5,9	3,6	-
Chemisch-Physikalische Anlagen	5,7	3,5	-
Sonstige	1,7	1,0	-
Summe	165,0	100,0	100,0

Während noch 2003 47 % des Rechengutes aus Deutschland auf Deponien verbracht wurde, ging dieser Anteil 2007 auf 11,4 % zurück. Die deutlich gestiegene Anlieferungsmenge zu biologischen Anlagen deutet darauf hin, dass das Rechengut vorbehandelt wurde, um dann die Voraussetzung zur sonstigen Verwertung oder zur Beseitigung zu ermöglichen. Die Beseitigung erfolgt sehr häufig in Form der Mitverbrennung. Durch den hohen organischen Anteil ist der Heizwert groß genug, um ohne Hilfsstoffe zu verbrennen (HANSEN, 1999: 1589). Durch die Verbrennung wird die Restmasse deutlich reduziert, und diese kann anschließend deponiert werden.

5 RECHENGUTMASSE

Die auf kommunalen deutschen Kläranlagen anfallende Rechengutmasse (m_{RG}) hängt von sehr vielen Faktoren ab. Beispiele dafür sind die Größe und die Art des Einzugsgebietes, die Art der Kanalisation (Misch-, Trennkanalisation oder Mischformen), Art und Anzahl der vorgeschalteten Pumpwerke, Witterungseinflüsse und die zeitliche Dimension (Jahreszeit, Wochentag, Tageszeit). Eine ganz besondere Bedeutung haben, wie in Kapitel 3 dargestellt, die Bauform des Rechens und die Spalt- bzw. die Loch- oder Maschenweite.

Die Auslegung von Anlagen zum Rückhalt von Rechengut und dessen Behandlung hängt demnach ganz entscheidend von der Rechengutmasse ab. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit aktuelle Daten zur Rechengutmasse ermittelt (5.2 – 5.5) und diskutiert (5.6).

5.1 Durchgeführte Untersuchungen

Abweichend von der in der Literatur (Kapitel 2) hauptsächlich zu findenden *volumenbezogenen* Rechengutmenge in $L / (E_{EW} \cdot a)$ werden in diesem Kapitel aktuelle Daten zur spezifischen Rechengut*masse* (m_{RGe}) in $kg / (E_{EW} \cdot a)$ präsentiert, da deren Erfassung ebenfalls als Masse erfolgt. Die Daten werden aus Zahlen verschiedener Quellen ermittelt. Zunächst werden Daten des Statistischen Bundesamtes untersucht (5.2). Danach werden veröffentlichte Daten von Betreibern ausgewertet (5.3). Weiter wird die angefallene Rechengutmenge des Klärwerkes in Büsnau besprochen, die sehr genau analysiert und dokumentiert ist (5.4). Abschließend werden verschiedene Parameter untersucht, die einen signifikanten Einfluss auf die Rechengutmasse nehmen (5.5).

5.2 Daten des Statistischen Bundesamts

Die absolute Rechengutmasse ist sehr häufig eine wenig aussagekräftige Größe. Um eine Skalierung von Anlagen vornehmen zu können, wird deshalb die spezifische Rechengutmasse herangezogen. Sie beschreibt die Masse an Rechengut, welche auf einer oder mehreren Kläranlagen pro Einwohner beziehungsweise Einwohnerwert und Jahr anfällt (ATV, 2003b: 10).

Laut Statistischem Bundesamt wurden in Deutschland im Jahr 2008 175.600 Mg Rechengut (EAV, 190801) zu Abfallanlagen angeliefert, davon ca. 38 % auf biologische Anlagen, ca. 34 % zur thermischen Behandlung und ca. 9 % auf Deponien (DESTATIS, 2010: 25ff). Die dort angegebenen Massen beziehen sich nach Auskunft des Bundesamtes auf das

„Feuchtgewicht beim Input in die Anlage“ (STRATMANN, 2010). Daten zur Herkunft, Vorbehandlung oder Trockenrückstand sind aber nicht vorhanden. Es ist also davon auszugehen, dass in dieser Angabe alle denkbaren Arten und Zusammensetzungen von Rechengut zusammengefasst sind.

Die für die Ermittlung der spezifischen Rechengutmasse notwendigen ergänzenden Zahlen sind in einer anderen Veröffentlichung zu finden. Danach waren im Jahr 2007 in Deutschland 78,1 Millionen Einwohner (E_{EZ}) oder 124,5 Millionen Einwohnerwerte (E_{EW}) an Kläranlagen angeschlossen (DESTATIS, 2009b). Zeitgleiche Veröffentlichungen des statistischen Bundesamtes zu der Anlieferung von Rechengut zu Abfallanlagen sind leider nicht verfügbar. Da aber unschwer abgeschätzt werden kann, dass sich die Zahl der angeschlossenen Einwohner oder der angeschlossenen Einwohnerwerte innerhalb eines Jahres nicht dramatisch geändert hat, erhält man rechnerisch eine spezifische Rechengutmasse von $2,25 \text{ kg} / (E_{EZ} \cdot a)$ oder $1,4 \text{ kg} / (E_{EW} \cdot a)$. Damit wird deutlich, dass sich die spezifische Rechengutmasse seit den Untersuchungen von Mertsch (MERTSCH, 1997) und Esch (ESCH, 1999) deutlich verringert hat. Bei einer angenommenen Dichte des Rechenguts von $1 \text{ kg} / \text{L}$ liegt dieses Ergebnis deutlich unter den nach wie vor häufig genannten Werten für Feinrechen von $5 - 15 \text{ L} (E_{EW} \cdot a)$ (IMHOFF, 2009; ATV, 2003a).

Im Jahr 2010 wurden nur noch 152.400 Mg Rechengut zu Abfallanlagen angeliefert (DESTATIS, 2012). Die Ursache für die tendenziell rückläufige Rechengutmasse liegt sicherlich an mehreren Faktoren. Dazu zählen die deutlich stärkere Verbreitung von Rechengutpressen auf deutschen Kläranlagen, aber auch der Rückgang der Einwohnerzahl in Deutschland und der sicherlich verringerte Eintrag von Abwasser aus der Industrie. Eine gegenläufige Entwicklung zur Verringerung der Rechengutmasse ist die steigende Anzahl von Rechen an Entlastungsbauwerken. Erste Studien gehen von einer dadurch verursachten Erhöhung des Rechengutanfalls von 10 % bis 20 % aus (UCKSCHIES, 2013: 61). Wie sich diese beiden Tendenzen insgesamt auf die zu entsorgende Rechengutmasse auswirken, bleibt abzuwarten.

Um zu prüfen, ob die spezifische Rechengutmasse in den einzelnen Bundesländern verschieden ist und ob möglicherweise ein Unterschied zwischen Trenn- und Mischkanalisation festgestellt werden kann, wurden beim Statistischen Bundesamt die Daten für die einzelnen Länder abgefragt. Die folgende Tabelle (5-1, folgende Seite) zeigt das Ergebnis.

**Tabelle 5-1: Input von Rechengut auf Entsorgungsanlagen nach Bundesländern
(DESTATIS, 2009b; STUTE, 2010)**

Bundesland	Entsorgungsanlagen insgesamt (Anzahl)	Input insgesamt (1000 Mg)	Angeschlossene Einwohner (1000 E _{EZ})	spezifische Rechengutmasse (kg/(E _{EZ} •a))
Spalte	1	2	3	4
Baden-Württemberg	6	6,6	10.554	0,63
Bayern	15	7,1	12.160	0,58
Berlin	3	0,3	1.408	0,21
Brandenburg	5	0,6	4.395	0,14
Bremen	4	17,3	803	21,54
Hamburg	6	14,8	1.890	7,83
Hessen	6	4,4	5.986	0,74
Mecklenburg- Vorpommern	4	1,8	1.442	1,25
Niedersachsen	14	5,7	7.313	0,78
Nordrhein-Westfalen	43	48,4	17.512	2,76
Rheinland-Pfalz	11	6,6	3.774	1,75
Saarland	3	3,6	997	3,61
Sachsen	7	5,6	3.571	1,57
Sachsen-Anhalt	21	20,3	2.129	9,53
Schleswig-Holstein	6	1,5	2.599	0,58
Thüringen	8	31,0	1.578	19,65
Insgesamt	162	175,6	78.111	2,25

Die Daten der Spalten 1 und 2 gelten für das Jahr 2008 (STUTE, 2010). Die Zahlen in Spalte 3 gelten für das Jahr 2007 (DESTATIS, 2009b). Spalte 4 wurde aus den Spalten 2 und 3 errechnet.

Bei der Auswertung fällt sofort auf, dass die Werte für die einzelnen Bundesländer sehr große Abweichungen voneinander aufweisen. Während Bremen und Hamburg, aber auch in geringerem Maße Thüringen und Sachsen-Anhalt, sehr hohe spezifische Rechengutmassen angeben, werden in den andern Bundesländern sehr kleine Mengen zu Abfallanlagen gebracht. Die großen Differenzen können darauf zurückgeführt werden,

dass es sich bei den Rechengutmassen um Input in die Abfallanlagen handelt. Offensichtlich wird sehr viel Rechengut von einem Bundesland in das Nächste transportiert. Deshalb haben die „Empfängerländer“ einen wesentlich höheren Input. Der Vergleichswert von Tabelle 5.1 ist darum wenig aussagekräftig.

In einem weiteren Schritt wurde versucht, Informationen zu Rechengutmassen über die DWA zu bekommen. Dem DWA Themenheft „Klärschlamm“ kann entnommen werden, dass entsprechende Daten vorliegen und verarbeitet wurden (DWA, 2005: 9). Einzelne Daten, die in dem Themenheft verarbeitet wurden, wurden von der DWA nicht weitergegeben. Dies wurde auf Nachfrage mit der vereinbarten Geheimhaltungspflicht begründet.

Eine weitere Möglichkeit zur Erforschung der Rechengutmassen bilden die Betriebstagebücher der einzelnen Kläranlagen. Die Daten dort abzufragen wäre aber mit einem ineffektiv hohen Aufwand verbunden. Einfacher wäre es, wenn die in den Jahresmeldungen zusammengefassten Daten an einer zentralen Stelle zu finden wären, wie dies früher der Fall war. Leider werden diese Berichte inzwischen nicht mehr bei den Kreisverwaltungen (früher: Wasserwirtschaftsämter) gesammelt. Diese Feststellung gilt zumindest für das Bundesland Baden-Württemberg. Somit können die Daten nur bei den einzelnen Anlagen abgefragt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine entsprechende Umfrage begonnen. Leider war die Rücklaufquote so gering, dass die Befragung eingestellt wurde (Kapitel 7.2)

Ob und wie sich in Zukunft die anfallende Masse an Rechengut verändern wird, ist schwer vorhersagbar. Falls sich die neuartigen Sanitärsysteme (NASS) mit der Trennung und Nutzung der einzelnen Fraktionen durchsetzen sollten, ist definitiv mit einer Verringerung des Rechengutanfalls auf Kläranlagen zu rechnen.

5.3 Daten von Betreibern

Um die vom Statistischen Bundesamt genannten Zahlen zur Rechengutmenge in deutschen Kläranlagen zu verifizieren bzw. zu evaluieren, wurden in zufälliger Auswahl von 12 Kläranlagenbetreibern veröffentlichte Zahlen recherchiert und in Tabelle (5-2) auf der folgenden Seite zusammengefasst. Die jeweiligen Quellen werden in der Tabelle auf der folgenden Seite aufgeführt.

Tabelle 5-2: Spezifische Rechengutmengen verschiedener Kläranlagen

Quelle	Kläranlage	Ausbau und Größe (1000 E _{EW})	Spaltweite Rechen (mm)	Rechengutmenge (Mg/a)	Jahr	spezifische Rechengut- menge (kg/ E _{EW} *a)
MERGENTHEIM 2007	Bad Mergentheim	45	6 (Stab)	96	2010	2,13
BERLIN 2007	Berlin-Ruhleben	1.600	8 (Stab)	2.007	2006	1,25
DRESDEN 2011	Dresden-Kaditz	740	k.A.	1.642	k.A.	2,22
HAMBURG 2007	Hamburg- Köhlbrandhöft	2.400	k.A.	7.490	2006	3,12
HANNOVER 2007	Hannover- Herrenhausen und -Gümmerswald	1.250	k.A.	1.813	2006	1,45
KÖLN 2008	Köln-Stammheim	1.570	10 (Loch)	6.315	2008	4,02
MÜNCHEN 2007	München- Gut Großlappen	2.000	k.A.	4.345	2006	2,17
MÜNCHEN 2007	München- Gut Marienhof	1.000	k.A.	1.108	2006	1,11
RUHRVERBAND 2010	Gesamtanfall	2.808	k.A.	5.986	2009	2,13
STUTTGART 2007	Stuttgart-Mühlhausen	1.200	k.A.	1.400	2006	1,17
WIESLOCH 2010	Leimbach- Angelbachtal	95	k.A.	134	2009	1,42
MAURER 2012	Stuttgart-Büsnau	9	5 (Loch)	12	2011	1,44

Es ist zu erkennen, dass die von den Betreibern veröffentlichten spezifischen Rechengutmengen in etwa den Daten des Statistischen Bundesamtes entsprechen. Die auf den Einwohnerwert bezogene tatsächliche Belastung im Jahr der einzelnen Anlagen war aus den Unterlagen jedoch nicht immer erkennbar. Es ist daher anzunehmen, dass bei

Einberechnung der tatsächlichen Belastung der Wert der spezifischen Rechengutmenge pro Einwohner und Jahr noch etwas höher liegen wird.

5.4 Daten des Lehr- und Forschungsklärwerks Bösnau

Eine sehr genaue Erfassung der Rechengutmenge wird seit mehreren Jahren auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW) der Universität Stuttgart in Bösnau durchgeführt (MAURER, 2012). Dort befindet sich eine zweistufige Rechenanlage. Bis Ende 2009 waren zwei parallele Grobrechen mit einem Spaltabstand von 30 mm eingebaut. Das Rechengut wurde direkt in einen Container gefördert. Im November 2009 wurden an Stelle der alten Grobrechen zwei Harkenumlaufrechen mit einem Spaltabstand von 25 mm eingebaut. Das entnommene Rechengut wird seitdem über einen Spiralförderer in eine Rechengut-Waschpresse transportiert. Dort wird das Rechengut ausgewaschen und verdichtet (Abbildung 5-1). Das Waschwasser wird in das Gerinne zurückgeführt. Der Anteil der Trockenmasse, die auf diese Weise zurück in den Abwasserstrom gelangt, beträgt 5 % bis 10 % (BRANNER, 2013: 311).



Abbildung 5-1: Grobrechenanlage des LFKW Bösnau

Die den Grobrechen folgenden Feinrechen sind seit 2003 als Spiralsiebe ausgeführt (Abbildung 5-2). Die Separationsfläche hat runde Öffnungen mit einem Durchmesser von 5 mm. Außerdem ist in den Feinsieben eine Wasch- und Presszone vorhanden.



Abbildung 5-2: Feinrechenanlage des LFKW Bünsau

Die durch die Rechen entnommene Rechengutmasse wird über das Gewicht der Container erfasst. Dazu ist eine Waage direkt an der Rechenanlage installiert (Abbildung 5-3). Alle Container werden dort gewogen und das Ergebnis in einer Datenbank erfasst. Die



qualitativen Daten des LFKW werden im Kapitel 7-6 besprochen.

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Datenbank des LFKW sind in der nachfolgenden Tabelle (5-3, folgende Seite) zusammengefasst.

Abbildung 5-3: Waage an der Rechenanlage des LFKW Bünsau

Tabelle 5-3: Rechengutmengen auf dem LFKW Bünsau (Maurer, 2012)

	Jahr	Rechengutmenge (kg/a)	Anteil an der Gesamtmasse (Gew.-Proz.)	TR arithm. Mittel (Gew. Proz.)	Trockenmasse (kg/a)	Anteil an der Gesamt- Trockenmasse (Gew.-Proz.)
Spalte	1	2	3	4	5	6
Grobrechen	2011	3.690	30,1	53,3	1.967	60,2
	2010	3.863	22,2	47,8	1.845	48,3
	2009	11.805	38,1	15,3	1.803	41,1
	2008	6.773	24,2	15,3	1.034	26,6
	2007	6.541	22,0	15,3	999	24,2
Feinrechen	2011	8.571	69,9	15,2	1.299	39,8
	2010	13.532	77,8	14,6	1.978	51,7
	2009	19.155	61,9	13,5	2.580	58,9
	2008	21.238	75,8	13,5	2.861	73,4
	2007	23.241	78,0	13,5	3.131	75,8
Grob- + Feinrechen	2011	12.261	100,0	26,6	3.267	100,0
	2010	17.395	100,0	22,0	3.823	100,0
	2009	30.960	100,0	14,2	4.383	100,0
	2008	28.011	100,0	13,9	3.895	100,0
	2007	29.782	100,0	13,9	4.129	100,0

Wie zu erwarten, hat sich im LFKW die Rechengutmenge durch die Entwässerung des Rechenguts in der Grobrechenstraße seit 2010 deutlich reduziert (Spalte 2). Während in den Jahren 2007 und 2008 im Mittel 6.657 kg Rechengut pro Jahr angefallen sind, ist der Mittelwert der Jahre 2010 und 2011 nur noch 3.776 kg, was einer Reduzierung um 43,3 % entspricht. Die Rechengutmasse des Jahres 2009 ist extrem hoch und wurde deshalb im obigen Beispiel nicht berücksichtigt. Ein besonderer Grund für diesen Ausreißer konnte nicht festgestellt werden. Möglicherweise wurden in diesem Jahr besonders viele Kanäle gespült und dadurch mehr Rechengut zur Kläranlage transportiert.

Obwohl die Feinrechen baulich und maschinell unverändert geblieben sind, kann eine deutliche Reduzierung der Rechengutmasse festgestellt werden (Spalte 2). Während in den Jahren 2007 und 2008 im Mittel 22.239 kg Rechengut pro Jahr angefallen sind, ist der Mittelwert der Jahre 2010 und 2011 nur noch 11.015 kg, was einer Reduzierung um 50,3 % entspricht. Die Rechengutmasse des Jahres 2009 wurde zur besseren Vergleichbarkeit wiederum nicht beachtet. Die Ursache für diese Reduzierung der Rechengutmasse an den Feinrechen ist die höhere Entnahmemenge durch die neuen Grobrechen, da an diesen Rechen die Spaltweite von 30 mm auf 25 mm verringert wurde.

Auch bei der Betrachtung der gesamten, auf dem LFKW angefallenen, Rechengutmasse kann eine deutliche Reduzierung der Rechengutmasse festgestellt werden (Spalte 2). Während in den Jahren 2007 und 2008 im Mittel 29.584 kg Rechengut pro Jahr angefallen sind, ist der Mittelwert der Jahre 2010 und 2011 nur noch 14.828 kg, was einer Reduzierung von 49,8 % entspricht. Die Rechengutmasse des Jahres 2009 wurde ebenfalls nicht beachtet.

Interessant sind die Anteile der Rechengutmassen von Grob- und Feinrechen an der Gesamtmasse (Spalte 3). Die Rechengutmasse an den Grobrechen hat sich durch den Einbau der Waschpresse und der damit verbundenen Verminderung des Wassergehaltes reduziert. Die Rechengutmasse an den Feinrechen hat sich reduziert, weil die Grobrechen durch den geringeren Stababstand mehr Rechengut zurück halten. Da sich beide Veränderungen in einem ähnlichen Verhältnis auswirken, bleibt auch das Verhältnis der Rechengutmasse von Grob- und Feinrechen zur Gesamtmasse in der gleichen Größenordnung. So ist der Mittelwert des Anteils der Rechengutmasse der Feinrechen der Jahre 2007 und 2008 an der Gesamtmasse 76,9 %. Der Mittelwert der Jahre 2010 und 2011 beträgt 73,8 %.

Durch Verrechnung der Gesamtmasse (Spalte 2) mit dem für die einzelnen Jahre errechneten Mittelwertes des Trockenrückstandes (Spalte 4) kann auf die Trockenmasse der einzelnen Fraktionen (Spalte 5) geschlossen werden. Dabei kann eine deutliche Erhöhung der Trockenmasse an den Grobrechen um 87,5 % und eine ebenso große Reduzierung der Trockenmasse an den Feinrechen errechnet werden, was allein durch die Reduzierung des Spaltweite von 30 mm auf 25 mm am Grobrechen verursacht wurde. Dies wird am jeweiligen Anteil der Trockenmasse (Spalte 5) an der Gesamttrockenmasse (Spalte 6) deutlich. War in den Jahren 2007 und 2008 der Anteil der Trockenmasse der Feinrechen an der Gesamttrockenmasse im Mittel noch 74,6 %, hat sich dieser Anteil im Mittel der

Jahre 2010 und 2011 auf 45,7 % reduziert. Diese Entwicklung spiegelt die Grobrechenstraße in umgekehrtem Maße wieder.

Die Reduzierung der Spaltweite der Grobrechen zum Ende des Jahres 2009 im LFKW Büsnau hatte eine erhebliche Auswirkung auf die Verteilung der Rechengutmasse auf die Grob- und Feinrechen. Der Einbau der Waschpresse zum gleichen Zeitpunkt hat zusätzlich die Gesamtmasse des zu entsorgenden Rechengutes halbiert.

5.5 Abhängigkeiten der Rechengutmasse

Die in den Kapiteln 5.2-5.4 ermittelten Rechengutmassen stellen für sich eine interessante Größe dar. Um herauszufinden, wie sich wichtige Parameter auf den Rechengutanfall auswirken können, werden nachfolgend der Einfluss der Ausbaugröße der Kläranlage (5.5.1), der zeitliche Verlauf (5.5.2) und die Abhängigkeit von der Öffnungsgeometrie (5.5.3) ermittelt.

5.5.1 Ausbaugröße der Anlage

Während für den Betreiber die Entsorgungskosten pro Jahr ein sehr wichtiges Kriterium darstellen, weil diese in seine Gebührenkalkulation einfließen, sind für Planer und Ausrüster ganz andere Fakten zur Rechengutmasse von entscheidender Bedeutung. Diese müssen nämlich darauf achten, dass die ausgeschriebenen und eingebauten Maschinen den speziellen Anforderungen der jeweiligen Anlage angepasst sind. Einerseits sollen sich die Investitionen auf das wirklich Notwendige beschränken. Andererseits muss aber auch die bei einer Stoßbelastung auftretende Rechengutmenge sicher verarbeitet werden können.

Generell ist festzustellen, dass der jährliche Anfall von Rechengut einer sehr starken Schwankung unterliegt, was die folgende Abbildung (5-4, folgende Seite) verdeutlicht.

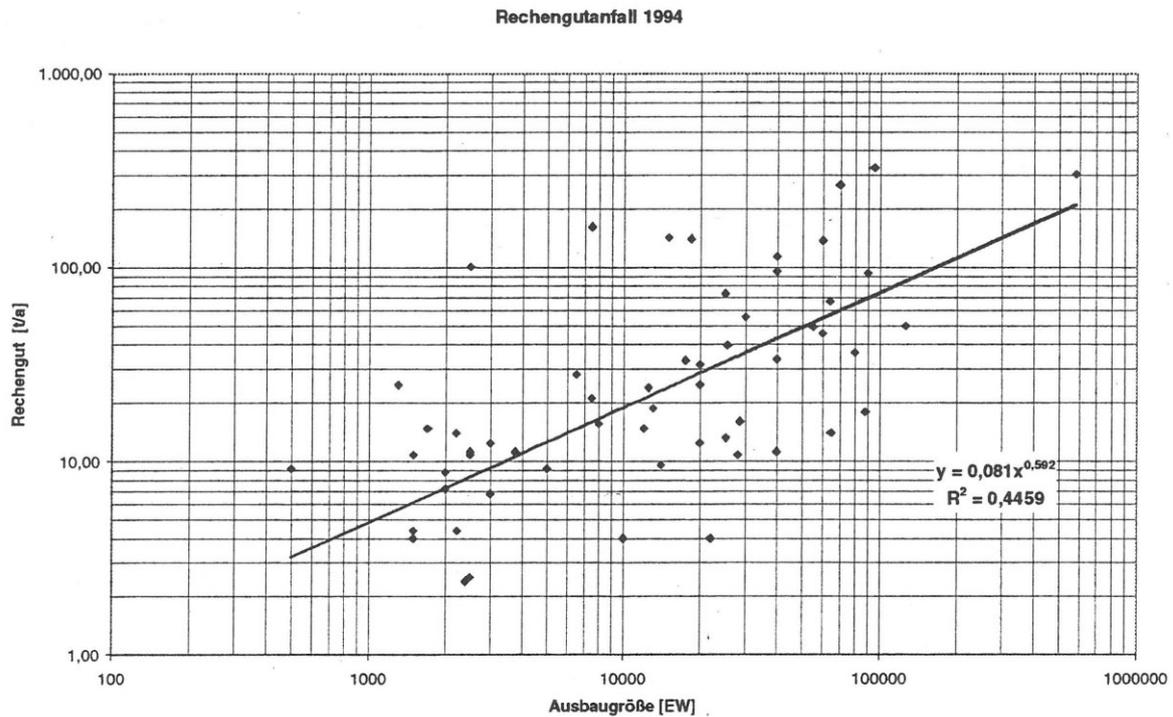


Abbildung 5-4: Rechengutanfall in Abhängigkeit der Ausbaugröße (HANEKE, 2001: 107)

Aus dem Diagramm können spezifische Rechengutmengen zwischen $0,18 \text{ kg} / (\text{E}_{\text{EW}} \cdot \text{a})$ (Datenpunkt 22.000 EW und $4 \text{ t} / \text{a}$) und 40 kg Rechengut pro Einwohnerwert und Jahr (Datenpunkt 2.500 EW und $100 \text{ t} / \text{a}$) errechnet werden, was die große Spannweite der vorhandenen Daten zeigt. Diese Streuung kann aber auch entstehen, wenn sich bei der Erfassung oder Übertragung der Daten Fehler eingeschlichen haben. Die eingezeichnete Trendlinie stellt lediglich einen Richt-/Hilfswert dar (HANEKE, 2001).

Während in Abbildung 5-4 die in einem Jahr angefallene Rechengutmasse der Anlagengröße gegenüber gestellt wird, vergleicht Uckschies (2013) den spezifischen Rechengutanfall mit der Anlagengröße. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt nachfolgende Abbildung (5-5).

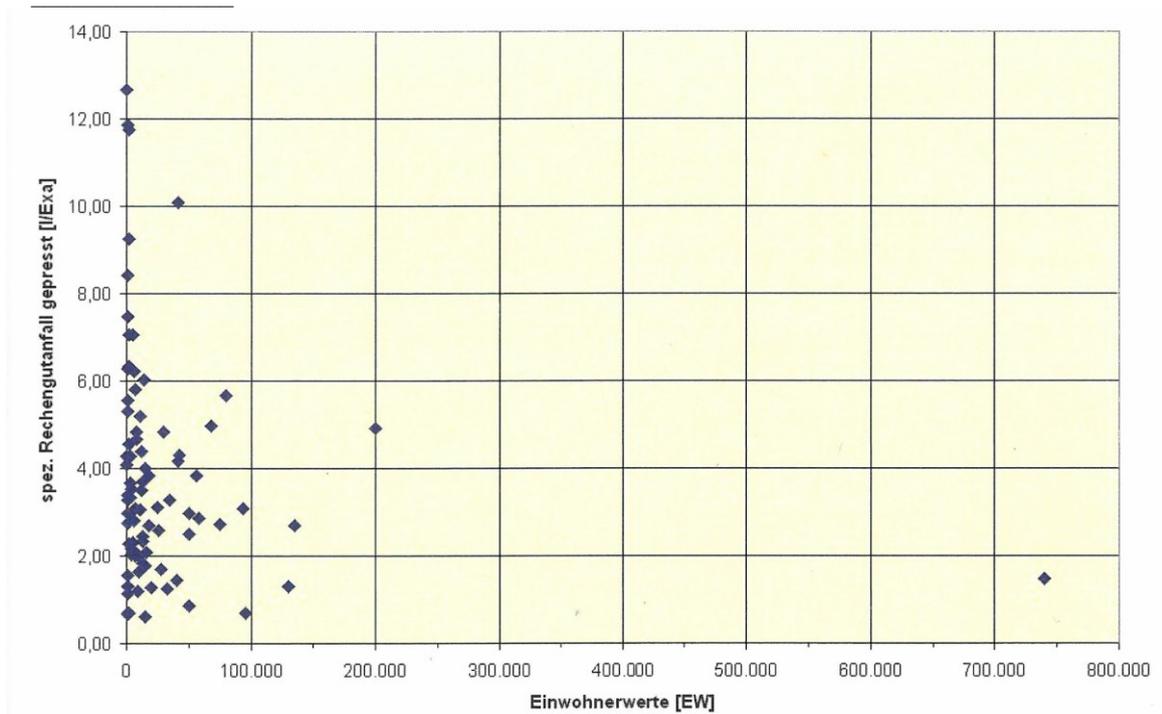


Abbildung 5-5: Spezifische Rechengutmenge von 85 Kläranlagen in Abhängigkeit der Ausbaugröße der Kläranlage (UCKSCHIES, 2013: 61)

Wie zu erkennen ist, sind sehr viele kleine Anlagen in die Untersuchung eingeflossen. Deren Rechengutanfall ist sehr stark gestreut. Größere Anlagen haben eine deutliche geringere Streuung der spezifischen Rechengutmasse. „Erst ab einer Ausbaugröße von ca. 35.000 EW verringert sich die Bandbreite auf 2 bis 6 L Rechengut gepresst je EW und Jahr“ (UCKSCHIES, 2013: 61). Uckschies folgert daraus, dass der Rechengutanfall in der Planungsphase eine kaum zu kalkulierende Größe darstellt. Dies gilt insbesondere für Kläranlagen kleinerer Ausbaugrößen (UCKSCHIES, 2013: 61).

5.5.2 Zeitlicher Verlauf

Während es durch die Dokumentation im Betriebstagebuch von Kläranlagen relativ einfach ist, die in einem Monat oder einem Jahr angefallene Rechengutmenge zu ermitteln, muss der Rechengutanfall im Tagesverlauf über eine aufwändige Volumen- oder Massenerfassung gemessen werden. In Abbildung 5-6 sind die Ergebnisse einer solchen Untersuchung aus dem Jahr 1981 abgebildet. Über einen Zeitraum von zwei Wochen wurden sowohl Wasser- als auch Rechengutanfall einer Abwasserreinigungsanlage mit 70.000 E_{EW} aufgezeichnet. Die untere Rechengutlinie stellt einen typischen „Sonntagsverlauf“ dar, während die obere Linie den Werktagen zugeordnet werden kann.

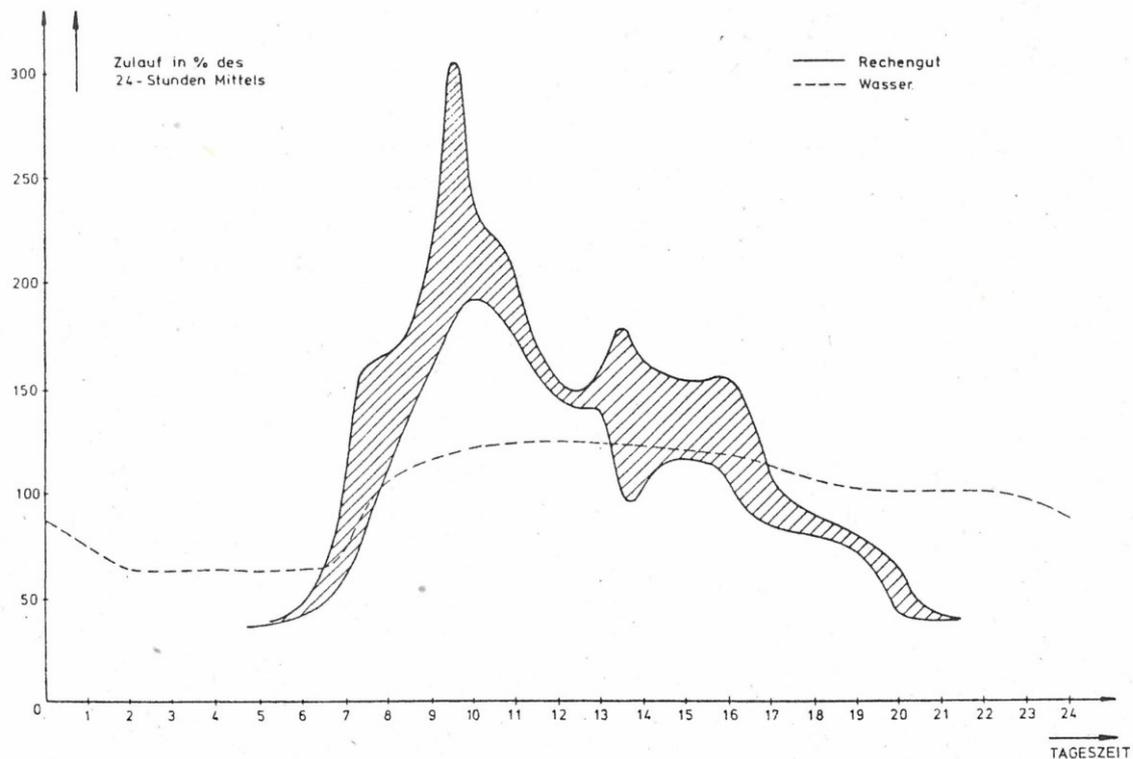


Abbildung 5-6: Ganglinien des Abwassers und seiner Feststoffe bei Trockenwetter (RÖPER, 1981: 279)

Es ist zu erkennen, dass mit dem erhöhten Wasserzufluss ab 7 Uhr überproportional mehr Rechengut zur Abwasserreinigungsanlage transportiert wird, welches sich in der Nacht wegen des zu niedrigen Wasserstandes in der Kanalisation abgesetzt hatte (RÖPER, 1981: 279). Außerdem ist der Rechengutanfall durch die Morgentoilette deutlich erhöht.

Während die Schwankungen der Zulaufmenge und des Rechengutanfalls an Trockenwettertagen relativ leicht ermittelt werden kann, gibt es nur sehr selten Aufzeichnungen für die aus dem Netz zu erwartenden Stoßbelastungen. Ein erhöhter Rechengutanfall kann vor allem bei oder nach einem Niederschlagsereignis festgestellt werden, und zwar unabhängig davon, ob das Kanalsystem als Misch- oder Trennsystem angelegt ist. Somit ist für die Auslegung der Anlagenteile zur Entnahme und Behandlung von Rechengut von größter Bedeutung, sowohl die für das Einzugsgebiet typischen Spitzen zu ermitteln als auch diese der Auslegung zugrunde zu legen.

Während die Schwankungen der Zulaufmenge im Einzugsgebiet durch bereits vorhandene Messgeräte noch relativ leicht zu ermitteln sind, stößt der Planer aber bei der ebenso schwankenden Rechengutmenge auf unüberwindliche Hindernisse, weil die Messung der Rohrechengutmenge notwendig wäre, es aber eine solche Messung nicht gibt. Es wäre

deshalb für die Praxis sehr wichtig und hilfreich, wenn zumindest Messungen zur Rechengutmenge in einem Zeitintervall von 15 Minuten oder kürzer auch in Deutschland auf mehreren Anlagen durchgeführt werden könnten. Da solche aber bislang nicht vorliegen, ist es für die Planer notwendig, auf die Informationen aus der Vergangenheit zurückzugreifen und außerdem auf die Erfahrungen des Betriebspersonals zu vertrauen.

In der nachfolgenden Abbildung (5-7) wird die Auswirkung eines Regenereignisses auf die anfallende Rechengutmenge dargestellt.

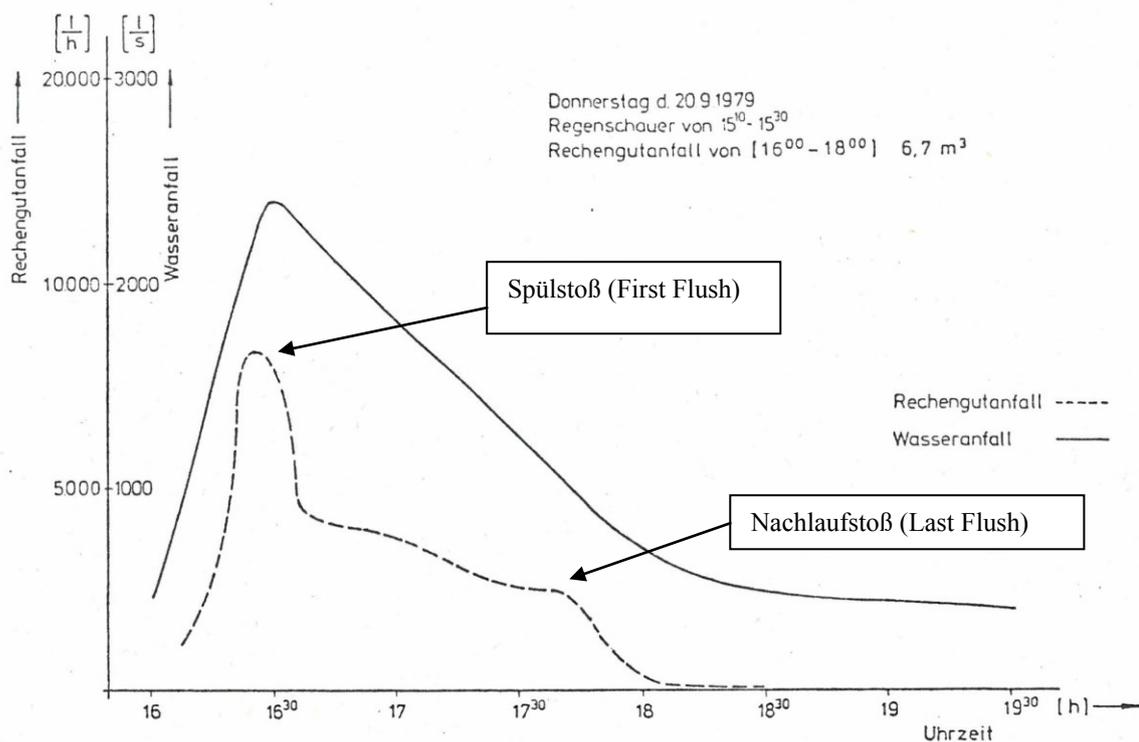


Abbildung 5-7: Ganglinien des Abwassers und seiner Feststoffe nach einem Regenereignis (RÖPER, 1981: 279)

Die Abbildung zeigt die Auswirkung eines Regenereignisses auf den Wasserzulauf und den Rechengutanfall auf einer Kläranlage. Es ist zu erkennen, dass mit Beginn des Regens die Rechengutmenge sehr stark ansteigt, also die im Kanal gespeicherten Ablagerungen zur Kläranlage transportiert werden. Die Rechengutmenge wird nach dem Spülstoß recht schnell deutlich geringer, bleibt aber solange auf einem mittleren Niveau, bis das Rechengut ganz ausgespült ist. Dann geht die Rechengutmenge ganz zurück, obwohl noch Regennachlauf zu verzeichnen ist.

In der Literatur berichtet Schübler von einer Stoßbelastung von Rechengut bei Regenereignissen, die auf das 5 – 10 fache des Normalen ansteigen kann (SCHÜSSLER,

2000: 114). Auch in England wurden in einer Abwasserreinigungsanlage zur Stoßbelastung von Rechengut Untersuchungen durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden aber leider nicht veröffentlicht. Als Faustregel wurde jedoch angegeben, dass die Stoßbelastung das Zehnfache des durchschnittlichen Anfalls von Rechengut betragen kann (THOMPSON, 2011).

Aus betriebswirtschaftlichen Gründen ist es jedoch sicherlich richtig, die Bemessung der Rechengutbehandlung nicht auf die maximal denkbare Menge auszulegen. Hier hat sich in der Praxis durchgesetzt, bei sehr hohen Stoßbelastungen das Rechengut ohne besondere Auswaschung direkt in den Container zu fördern. Dieser pragmatische Ansatz vermeidet überdimensionierte Anlagen, und sorgt für einen reibungslosen Betrieb bei Starkregenereignissen (siehe auch NICKE, 2003).

5.5.3 Abhängigkeit von der Spaltweite

Die an vielen Stellen in der Literatur angegebenen spezifischen Rechengutmengen in Abhängigkeit der Spaltweite sind sehr häufig auf die Arbeit von Seyfried zurückzuführen. Deren Ergebnisse werden nachfolgend in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-4: Spezifische Rechengutmengen in Abhängigkeit von der Spaltweite (SEYFRIED, 1985: 63)

Siebweite/ Spaltweite	Feststoffmasse	spez. Gutmengen bei einem Feststoffg. v.			
		ungepreßt		gepreßt	
		8,0%	14,0%	25%	35%
mm	kg/E·a	l/E·a	l/E·a	l/E·a	l/E·a
0,5	2,75	45,8	26,2	15,7	11,2
0,7	2,40	40,0	22,9	13,7	9,8
1,0	2,07	34,5	19,7	11,8	8,4
1,5	1,76	29,3	16,8	10,1	7,2
2,0	1,56	26,0	14,9	8,9	6,4
3,0	1,33	22,2	12,7	7,6	5,4
6,0	1,00	16,7	9,5	5,7	4,1
15,0	0,69	11,5	6,6	3,9	2,8

Der Tabelle sind Dichten für ungesprestes Rechengut von 750 g / L und für gepresstes Rechengut von 700 g / L zugrunde gelegt. Die Feststoffgehalte für das ungespreste Rechengut und der niedrige Wert für das gepresste Rechengut wurden in Anlehnung an die Versuchsergebnisse gewählt. Der hohe Wert für das gepresste Rechengut ist aufgrund von Herstellerangaben gewählt. Wie zu erwarten nimmt mit geringer werdender Spaltweite die

Feststoffmasse deutlich zu. Diese wurde aus den Feststoffgehalten, dem spezifischen Rechengutvolumen und der Dichte berechnet.

In jüngerer Zeit wurden zur Abhängigkeit des Rechengutanfalls von der Größe der Öffnungsgeometrie neue Daten von Branner (2013) und Uckschies (2013) ermittelt. Branner berechnet den Anfall von ungespresstem Rechengut (Rohrechengut) aus 100 Kläranlagen und findet dabei Werte zwischen 5 und 50 Liter Rechengut pro angeschlossenen Einwohner und Jahr. Unklar ist dabei, ob mit „angeschlossenen Einwohner“ die Einwohnerzahl (E_{EZ}) oder der Einwohnerwert (E_{EW}) gemeint ist.

Uckschies untersuchte 85 Kläranlagen und fand Werte „von 0,5 bis rund 13 l Rechengut gepresst je Einwohnerwert (E_{EW}) und Jahr“ (UCKSCHIES, 2013: 61). Die von ihm gefundene Abhängigkeit von der Spaltweite ist nachfolgend in Abbildung 5-8 dargestellt.

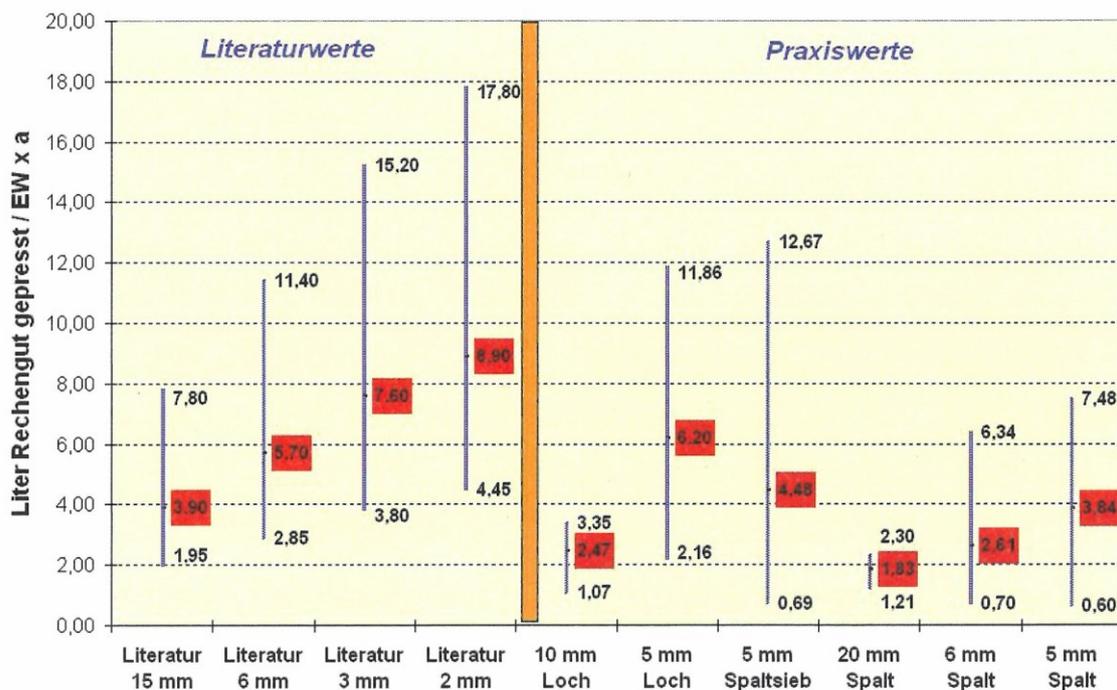


Abbildung 5-8: Spezifische Rechengutmenge in Abhängigkeit der Öffnungsgeometrie (UCKSCHIES, 2013: 61)

Im linken Teil der Grafik sind die von Uckschies gefundenen Literaturwerte aufgetragen. Mit kleinerer Spaltweite steigt erwartungsgemäß die Rechengutmenge an. Allerdings sind die angegebenen Streubreiten erheblich. Im rechten Teil finden sich die bei der Erhebung von Uckschies gefundenen Werte zum Rechengutanfall in Abhängigkeit von der Spaltweite und der Öffnungsgeometrie. Es ist zu erkennen, dass kleinere Öffnungen mehr Rechengut

zurückhalten. Aber auch hier sind die Streubreiten erheblich. Die spezifischen Rechengutmengen für die verschiedenen Öffnungsgeometrien sind ebenfalls sehr unterschiedlich. Der Mittelwert für einen Rechen mit einer Spaltweite von 5 mm liegt knapp unter $4 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$. Bei einem Sieb mit einem Lochdurchmesser von 5 mm ist dieser Wert knapp über $6 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$. Aber der kleinste gefundene Wert für die Lochgeometrie ist mit $2,16 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$ deutlich kleiner als der größte Wert für den Spaltrechen mit $7,48 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$ (UCKSCHIES, 2013).

Die Größe der einzelnen Öffnungen der Separationsfläche scheint zwar einen wichtigen Faktor für den Rückhalt von Rechengut darzustellen. Aber es gibt offensichtlich weitere Faktoren wie die Strömungsgeschwindigkeit durch die Öffnungsgeometrie, die Rechengutzusammensetzung und die Stoßbelastung, die den Rückhalt von Rechengut deutlich beeinflussen. Die Ermittlung dieser weiteren Faktoren wäre ein interessantes Thema für weitere Arbeiten.

5.6 Diskussion der Ergebnisse zur Rechengutmasse

Die Auslegung von Anlagen zum Rückhalt von Rechengut und dessen Behandlung hängt ganz entscheidend von der anfallenden Rechengutmasse ab. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit aktuell vorliegende Daten zur Rechengutmasse recherchiert, evaluiert und diskutiert.

Die Daten des Statistischen Bundesamtes ergeben eine spezifische Rechengutmasse von $1,4 \text{ kg} / (E_{EW} \cdot a)$. Die Daten der zufällig ausgewählten Betreiber von Kläranlagen ergeben eine spezifische Rechengutmasse zwischen $1,1$ und $4,0 \text{ kg} / (E_{EW} \cdot a)$. Diese Ergebnisse können aber nur bedingt zur Auslegung von Rechenanlagen genutzt werden, weil in den genannten Quellen keine Angaben darüber gemacht werden, ob die jeweilige Mengenangabe Rechengut in behandeltem oder unbehandeltem Zustand beschreibt. So bleibt die Vergleichbarkeit der angegebenen Mengen eingeschränkt; eine Generalisierung von Rechengutmengen ist demnach aus den vorliegenden Daten kaum möglich.

Durch die Reduzierung der Spaltweite der Grobrechen am LFKW Bünsau von 30 mm auf 25 mm wurde erhöhte sich die zurückgehaltene Trockenmasse um 87,5 %. Obwohl sich die Trockenmasse erhöht hat, wurde durch den Einbau einer Rechengutwaschpresse die Gesamtmasse an den Grobrechen um 43,3 % reduziert.

Trotz der sehr detaillierten Datenerfassung in Bünsau (LFKW) sind Mess- und Übertragungsfehler denkbar und möglich. Diese Fehler könnten zum Beispiel

Verwechslungen bei der Zuordnung der Container zu den Rechenstraßen nach der Wiegung sein. Es könnten auch Fehler bei der Ablesung der Masse oder deren Übertragung in die Datenbank auftreten. Dennoch erscheint die hier vorgestellte Datenermittlung im Vergleich zu den anderen, bereits vorliegenden Daten als zuverlässiger, was eine standardisierte Messung von Rechengutmengen anbelangt. Insgesamt bestätigt sich die in den Kapiteln 2-1 und 5-2 genannte Vermutung, dass die bisher in der Literatur genannten Rechengutmengen nicht mehr die aktuelle Lage abbilden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen von Haneke (2001) und Uckschies (2013) zur Abhängigkeit der Rechengutmenge von der Anlagengröße zeigen, dass bei größeren Kläranlagen die Streubreite der Rechengutmenge deutlich geringer ist. Kleinere Anlagen hingegen haben markante Extremwerte. Hier kann vermutet werden, dass diese Daten manchmal nicht zutreffend sind, weil auf kleinen Anlagen der Rechengutcontainer sehr häufig auch für die Entsorgung des auf der Kläranlage anfallenden Restmülls verwendet wird.

Der zeitliche Verlauf des Rechengutanfalls ist sehr stark von der Tageszeit und auch von Regenereignissen abhängig (RÖPER, 1981). Allerdings ist die kurzzeitig anfallende Rechengutmenge bei einer Stoßbelastung je nach Anlage sehr unterschiedlich. Hier wären weitere Untersuchungen sehr hilfreich. Dazu müsste der Rechengutanfall über eine Waage in hoher zeitlicher Auflösung, zum Beispiel im Abstand von 15 Minuten oder kürzer, aufgezeichnet und ausgewertet werden. Ergebnisse einer solch engmaschigen Messreihe würden die Planung und Auslegung von Anlagen zur Rechengutbehandlung wesentlich erleichtern.

Auch der Einfluss der Größe und der Form der Öffnungsgeometrie auf die zurückgehaltene Rechengutmenge konnte deutlich herausgearbeitet werden. Kleinere Öffnungen halten mehr Rechengut zurück, wenn die Fließgeschwindigkeit durch die Öffnungsgeometrie nicht zu hoch ist (Kapitel 3.4.2). Da diese Geschwindigkeitsgrenze nicht immer eingehalten wird, sind bei den Untersuchungen zur Abhängigkeit der spezifischen Rechengutmenge in Abhängigkeit zur Öffnungsgeometrie sehr große Streubreiten zu finden (UCKSCHIES, 2013). Auch die Zusammensetzung des Rechenguts spielt für die Streuung anscheinend eine große Rolle. Die Abhängigkeit der Rechengutmenge sowohl von der Öffnungsgeometrie der Separationsflächen von Rechen und Sieben als auch von der Fließgeschwindigkeit durch die Öffnungen der Separationsfläche wäre demnach ein interessantes Gebiet für folgende Studien.

6 ENTWÄSSERUNG VON RECHENGUT

Wegen der weiteren Behandlung und Entsorgung des Rechengutes ist es für die Betreiber wünschenswert, einen recht gleichmäßigen und hohen Trockenrückstand in allen Betriebszuständen zu erreichen, weil die Entsorgungskosten an der Rechengutmasse gemessen werden. Dieser Aspekt wird aber bisher kaum thematisiert. In der aktuellen Literatur finden sich bisher nur Angaben zum *Grad* der Entwässerung von Rechengut; entsprechende Daten wurden durch Messungen auf deutschen Kläranlagen ermittelt. Der eigentliche Entwässerungsvorgang von Rechengut wurde aber bisher erstaunlicherweise weder untersucht noch beschrieben.

Um diese Lücke zu schließen, werden im Rahmen dieser Arbeit die Eigenschaften und das Verhalten von Rechengut beim Entwässerungsvorgang untersucht. Wie schon im Kapitel 1.2 formuliert, ist das Ziel der nachfolgenden Experimente, das Entwässerungsverhalten von Rechengut erstmals zu beschreiben und diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen eines Feldtestes zu vergleichen. Dieser Vergleich soll darüber Aufschluss geben, in wie weit das theoretische Wissen über das Entwässerungsverhalten von Rechengut in der Praxis bereits umgesetzt wird, oder in Zukunft zur Erzielung von gleichmäßigen Entwässerungsergebnissen von Nutzen sein kann.

Zu diesem Zweck werden zwei getrennte Versuchsaufbauten vorgestellt. Zunächst wird der Wassergehalt im Rechengut definiert (Kapitel 6.1). Anschließend werden in Laborexperimenten (Kapitel 6.2) Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten, der Durchströmung und der Abscherung durchgeführt und diskutiert. Danach wird in einem Feldtest (Kapitel 6.3) unter realen Bedingungen die Verdichtung von Rechengut einer Rechengutwaschpresse mit einer Nachverdichtungseinheit über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgezeichnet, ausgewertet und diskutiert.

6.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt oder die Feuchte beschreiben im Allgemeinen das Vorhandensein von Wasser in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen. Bei der Feuchte in Feststoffen spricht man auch von Materialfeuchte. Nachfolgend werden die wichtigsten diesbezüglichen Begriffe erläutert (KUPFER, 1997: 16f).

Mit dem Begriff „Wassergehalt“ wird lediglich das physikalisch gebundene Wasser bezeichnet. Der Begriff „Feuchte“ wird technisch so bestimmt, dass eine bestimmte

Wassermasse unter definierten Trocknungsbedingungen aus dem Stoff ausgetrieben wird. Mit dem „Feuchtegehalt u_m “ wird das Verhältnis der im Stoff enthaltenen Wassermasse m_w zur Masse des trockenen Stoffes m_{tr} errechnet:

$$u_m = \frac{m_w}{m_{tr}} \quad \text{Gleichung: 6.1}$$

Dieser Kennwert wird auch als Wassergehalt, absolute Feuchte oder Massenfeuchte bezeichnet. Die Summe von Wassermasse m_w und der Masse des trockenen Stoffes m_{tr} ergibt die Gesamtmasse m_G :

$$m_G = m_w + m_{tr} \quad \text{Gleichung: 6.2}$$

Bei der Berechnung des „Feuchteanteils ψ “ wird die im Stoff enthaltene Wassermasse m_w in das Verhältnis zur Gesamtmasse m gesetzt:

$$\psi = \frac{m_w}{m_G} = \frac{u_m}{1 + u_m} \quad \text{Gleichung: 6.3}$$

Dieser Wert wird auch Materialfeuchte oder relative Feuchte oder Masseprozent genannt.

Der Trockenmasseanteil T stellt das Verhältnis von Trockenmasse zur Gesamtmasse dar:

$$T = \frac{m_{tr}}{m_G} = 1 - \psi \quad \text{Gleichung: 6.4}$$

Der Trockenmasseanteil ist also die Ergänzung der Materialfeuchte zur Gesamtmasse (alle Gleichungen siehe KUPFER, 1997: 16f). Gleichung 6.4 ist im Original mit $T = 1 - u_m$ angegeben. Da u_m jedoch als Feuchtegehalt definiert ist, also das Verhältnis von Wassermasse zur Trockenmasse, kann damit der Trockenmasseanteil nicht errechnet werden. Die Gleichung wurde deshalb korrigiert.

In der Abwassertechnik wird für den Begriff „Trockenmasseanteil“ der Begriff „Trockenrückstand“ mit der Abkürzung „TR“ verwendet. Dieser dient in der Regel zur Beschreibung des Klärschlammes (DIN, 2007b: 59). Der Begriff „Trockenrückstand“ wird aber auch für den Trockenmasseanteil von Rechengut verwendet. Fälschlicherweise wird in diesem Zusammenhang oft der Begriff „Trockensubstanzgehalt“ (TS) verwendet (DIN, 2007b: 19). Dieser ist aber die „Konzentration der Summe aus gelösten, suspendierten und

aufschwimmenden Stoffen“. Da diese Definition für die Inhaltsstoffe von *Abwasser* verwendet wird, trifft er für das Rechengut nicht zu.

Neben der Frage nach dem Wasseranteil ist auch interessant, wie das Wasser am oder im Feststoff eingelagert ist (Abbildung 6-1). Wasser kann in festen Stoffen chemisch und physikalisch gebunden sein. Bei der chemischen Bindung sind die Wassermoleküle in die Struktur des Stoffes mit einbezogen und können nur durch Erhitzen entfernt werden. Physikalisch kann das Wasser in verschiedene Formen an den Feststoff gebunden sein. Bei der Adsorption werden die Wassermoleküle durch elektrostatische oder van-der-Waalsche Kräfte an den Phasengrenzflächen gehalten. Bei der Adhäsion haften die Wassermoleküle auf Grund von intermolekularen Wechselwirkungen. Die Adhäsion überlagert die Adsorption, wobei die Grenzen zwischen beiden offen sind. Dieser Wasseranteil an Feststoffen wird Haftwasser genannt. Es lässt sich in der Regel ebenfalls nur durch thermische Verfahren abtrennen (KUPFER, 1997).

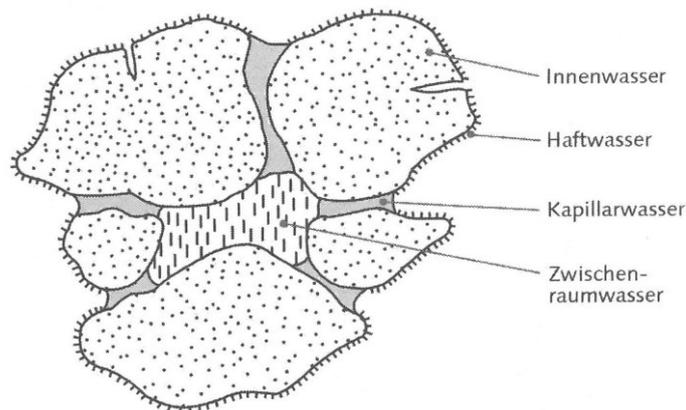


Abbildung 6-1: Bindung von Wasser an Feststoffe am Beispiel von Klärschlamm (WEIMAR, 2009: 229)

Innerhalb der einzelnen Zellen befindet sich auch Wasser, welches Innenkapillarwasser oder Zellwasser genannt wird. Es ist durch die Zellmembran eingeschlossen und kann quasi nur durch die Zerstörung der Zelle austreten, welche in der Regel nur mit sehr hohem energetischem Aufwand möglich ist. Kapillarwasser wird durch Oberflächenkräfte in Zwischenräumen von Materialpartikeln gehalten. Wie viel Wasser in Kapillaren gehalten werden kann, hängt von der Struktur, der Geometrie und der Anzahl der Kapillare ab. Es kann durch Verdichten des Materials entfernt werden. Der größte Anteil an Wasser findet sich als Zwischenraumwasser. Hier liegen kaum Bindungskräfte vor, weshalb das Wasser relativ leicht verdrängt werden kann. In manchen Fällen oder bei längerer Lagerung kann

sich daraus Tropfwasser bilden, das sich durch das Eigengewicht vom Feststoff lösen kann. Allein durch Absetzvorgänge beziehungsweise durch leichten Pressdruck bei der Lagerung mehrerer Schichten kann sich das Zwischenraumwasser vermindern (KUPFER, 1997). Bei Rechengut ist so eine Entwässerung bis zu 15 % Trockenrückstand erreichbar.

Der Anteil von Adsorptions- und Innenwasser beträgt beim Klärschlamm circa 5 % - 8 %, von Haft- und Kapillarwasser circa 10 % - 22 %, und von Zwischenraumwasser circa 70 % - 80 % (DWA, 2004: 22).

6.2 Laborexperimente

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen zur Verdichtung, Durchströmung und Scherfestigkeit von Rechengut wurden im Werkstofflabor der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Mosbach durchgeführt.

6.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand für die drei genannten Untersuchungen von Rechengut wurde im Rahmen einer Studienarbeit konzipiert (RUPP, 2007). Kernstück der Versuchsanlage war



eine im Labor der Dualen Hochschule vorhandene Werkstoffprüfmaschine Z 100 der Firma Zwick Roell (Zug- und Druckpresse; Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland). Diese Maschine kann eine maximale Kraft von 100 kN aufbringen. Für die Versuchszwecke wurde die bestehende Werkzeugaufnahme modifiziert, und es wurden verschiedene Aufsätze für die nachfolgenden Experimente entworfen und gebaut. Die Versuchsanlage ist in Abbildung 6-2 zu sehen.

Abbildung 6-2: Versuchsanlage mit Messrechner in Mosbach (SCHWAB, 2007: 3)

Um den Aufwand für die Vorbereitung der Rechengutproben für die Durchführung der Messungen zur Entwässerung zu minimieren, wurden zunächst entsprechende Versuchsreihen mit Rechengutproben unterschiedlicher Herkunft und Aufbereitung durchgeführt. Maßgebliche Kriterien dafür waren Handhabbarkeit und Versuchsdauer. Zunächst wurde festgelegt, dass die Entwässerungsversuche nur mit ausgewaschenem Rechengut erfolgen. Dieses Vorgehen war der Tatsache geschuldet, dass in der Praxis inzwischen in überwiegendem Maße Rechengut ausgewaschen ist, bevor es entwässert wird. Außerdem konnte in weiteren Vorversuchen gezeigt werden, dass die Entwässerung bei unausgewaschenen Proben, also mit einem höheren Anteil an Organik, einen niedrigeren TR zur Folge hat (RUPP, 2007: 11). Daraus ergaben sich drei Möglichkeiten der Probenvorbereitung (GREGOR, 2009: 17):

1. Die Rechengutprobe wird direkt vom Rechen entnommen und von Hand ausgewaschen.
2. Das Rechengut wird direkt aus der Presszone einer Waschpresse entnommen. Dazu muss die Maschine nach Abschluss des Waschprozesses rückwärts laufen gelassen und das Rechengut aus dem Einlaufbereich entnommen werden.
3. Das Rechengut wird aus dem Sammelcontainer einer Waschpresse entnommen, zerteilt und gewässert.

Die erste Möglichkeit wurde sehr schnell verworfen, weil solche ein Vorgehen sehr aufwändig ist und aus hygienischer Sicht den Mitarbeitern nicht zuzumuten war. Deshalb konnte diese Möglichkeit nicht genutzt werden.

Die zweite Möglichkeit war aus Sicht der Hygiene deutlich besser. Leider konnte aber auch sie nicht genutzt werden, da dabei die Menge an gewaschenem Rechengut, die der Maschine entnommen werden konnte, nur ausreichte, um eine oder zwei Messungen zur Entwässerung durchzuführen.

Bei der dritten Möglichkeit stellt sich die Frage, ob die Versuchsergebnisse mit denen der direkt vom Rechen entnommenen Proben vergleichbar sind. Die Vergleichbarkeit ist unabdingbare Voraussetzung für die Anwendung der Aufbereitungsmethode, da sonst die Ergebnisse nicht gewertet werden können. Deshalb wurde eine weitere Testserie durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der gleich behandelten Proben deutlich größere Abweichungen zwischen den Probenaufbereitungen 1 und 3 aufwiesen als die verschiedenen Proben untereinander bei gleicher Aufbereitungsart. Diese Abweichungen liegen offensichtlich an den deutlich unterschiedlichen Zusammensetzungen des

Rechenguts in den Proben (Kapitel 4.1). Als Ergebnis dieser Vorversuche ist festzuhalten, dass die Art der Probenaufbereitung weniger wichtig ist als die Zusammensetzung der Probe. Deshalb wurde entschieden, dass alle Proben für die Laborversuche nach Methode 3 aufbereitet werden, mit dem Vorteil, dass die oben genannten hygienischen Probleme vermieden wurden, und dass genügend Probematerial zur Verfügung stand (GREGOR, 2009).

Verdichtung

Zunächst wurden Versuche zum Verhalten von Rechengut bei der Verdichtung durchgeführt. Die meisten auf deutschen Kläranlagen eingesetzten Entwässerungsmaschinen für Rechengut basieren auf dem Prinzip der mechanischen Verdichtung (vergleiche Kapitel 4): durch das Zusammenpressen des Rechenguts mittels Kolben oder Schnecken wird das Wasser verdrängt. Dieser Vorgang wurde durch eine spezielle Vorrichtung an der Werkzeugaufnahme der Zwick-Maschine nachgebildet. Ziel war es, das Entwässerungsverhalten von Rechengut zu beobachten und zu dokumentieren und die dazu aufgebrauchten Kräfte und die ausgepressten Wassermengen zu quantifizieren.

Der Aufbau der Versuchsanlage für die Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtung auf die Entwässerung von Rechengut ist aus den nachfolgenden Abbildungen (6-3, 6-4, 6-5) zu entnehmen.

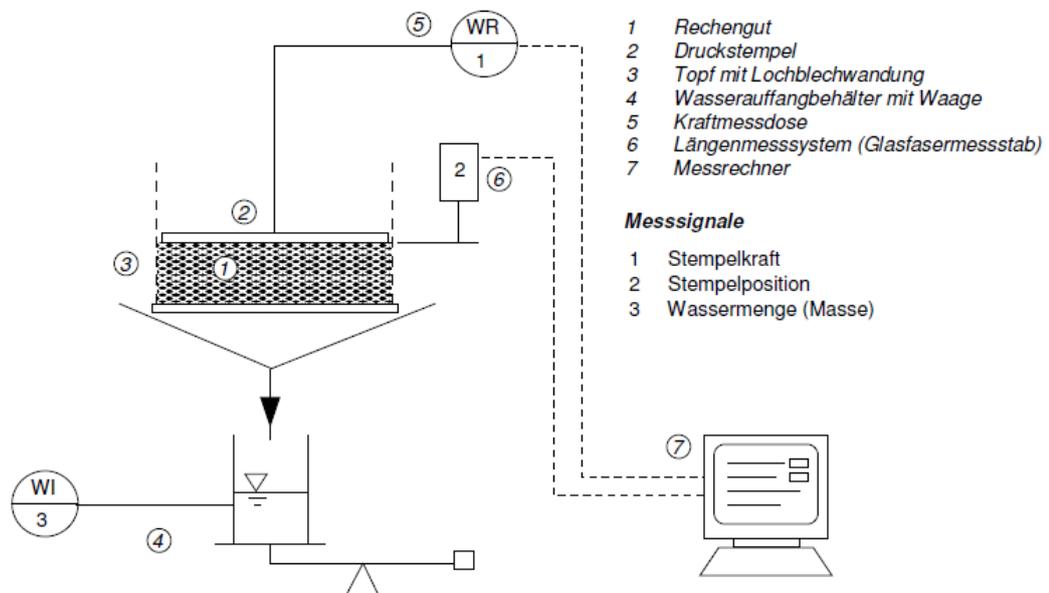


Abbildung 6-3: Aufbau der Pressversuche (GREGOR, 2009: 16)

Für die Pressversuche wurde die modifizierte Werkzeugprüfmaschine mit einem Behälter für das Rechengut ausgerüstet, der einen Durchmesser von 200 mm aufwies und eine Lochblechwandung mit Öffnungen von 1,1 mm Durchmesser hatte ($R_v, w = 1,1 \text{ mm}$, $t = 3,2 \text{ mm}$), welche als Siebeinrichtung genutzt wurde. Das seitlich ausgetretene Wasser wurde gesammelt und über einen Schlauch in einen auf einer Waage befindlichen Auffangbehälter geleitet, über den die Masse des ausgetretenen Wassers quantifiziert werden konnte (SCHWAB, 2007).

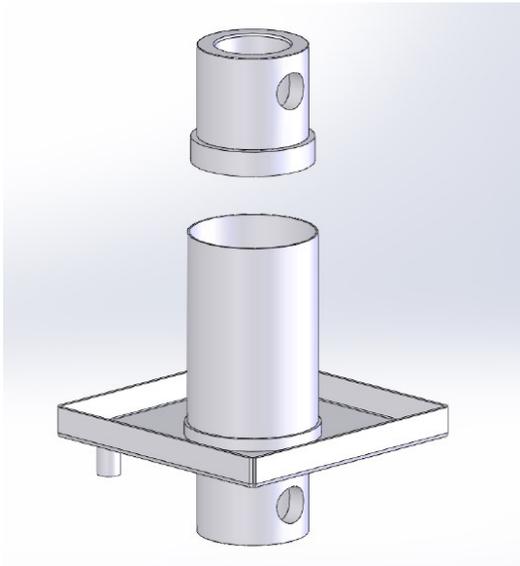


Abbildung 6-4: CAD-Modell der Pressvorrichtung mit 100 mm Durchmesser (SCHWAB, 2007)



Abbildung 6-5: Foto der Pressvorrichtung für die Entwässerungsversuche mit 200 mm Durchmesser (SCHWAB, 2007: 3)

Für die einzelnen Versuche wurde zunächst Rechengut mit der Masse von circa 1 kg in den Behälter gefüllt. Diese Menge entspricht einer Füllhöhe im Zylinder zwischen 50 mm und 75 mm, je nach der Zusammensetzung des Rechengutes. Anschließend wurde die Druckplatte durch den Stempel mit der eingestellten Geschwindigkeit von 100 mm/min nach unten gefahren, bis die eingestellte Vorkraft von 5 N erreicht wurde. Dieser Schritt diente dazu, die Versuchsdauer zu begrenzen. Mit dem Erreichen der Vorkraft wurde der Stempel mit der langsameren Versuchsgeschwindigkeit v_{ver} weiter nach unten gefahren und somit das Rechengut zusammengedrückt. Das Erreichen der Vorkraft startete gleichzeitig die Datenaufzeichnung. Mittels einer eingebauten Kraftmessdose und eines Längenmesssystems wurden Kraftverlauf und der zurückgelegte Weg des Stempels sowie

die zugehörige Zeit in einem Messwerterechner dokumentiert. Der Versuch wurde beendet, wenn die Kraft die voreingestellte Maximalkraft F_{\max} erreichte. Durch das Zusammenpressen entwich das Wasser durch das Lochblech nach außen. Von dort floss es in den Wasserauffangbehälter, dessen Gewicht alle 10 Sekunden manuell aufgezeichnet wurde (RUPP, 2007: 8f).

In einer weiteren Testreihe wurde das Entwässerungsverhalten getestet wenn im Unterschied zur kontinuierlichen Verdichtung der Stempel stufenweise nach unten gedrückt wird und damit kleine Pausen zwischen den Hubvorgängen stattfinden. Damit wurde die mittlere Pressgeschwindigkeit weiter reduziert.

Die Untersuchungen zur Verdichtung wurden mit einer dritten Testreihe abgeschlossen. Dabei wurde eine bestimmte Maximalkraft F_{\max} eingestellt und dann bis zu elf Pressvorgänge mit der jeweils gleichen Probe durchgeführt. Dann wurde ein neuer Versuch mit einer veränderten Kraft durchgeführt. Zusätzlich wurde nach jedem Pressvorgang eine Wartezeit von drei Minuten eingehalten. Erst danach erfolgte die Ablesung des Wassergewichts. Damit konnte erreicht werden, dass jedem Pressvorgang genau die ausgepresste Wassermenge zugeordnet werden konnte.

Durchströmung

Um das Entwässerungsverhalten von Rechengut besser zu verstehen, wurden nach den Versuchen zur Entwässerung Durchströmungsexperimente vorgenommen. Ziel war es, herauszufinden, welcher Wasser-Massenstrom in Abhängigkeit des Maximaldruckes auf das Rechengut durch eine definierte Rechengutprobe hindurchzufließt. Diese Abhängigkeit ist deshalb interessant, weil in der Praxis ein Wasserteilchen bei einer größeren Entwässerungsmaschine mit einem folglich größeren Durchmesser einen längeren Weg von innen nach außen zurückzulegen hat, um durch die Separationsfläche zu gelangen wie bei einer kleinen Maschine. Dadurch erhöht sich der notwendige Druck, denn das Rechengut muss durch das fest gepresste Material hindurchströmen.

Für diese Durchströmungsversuche wurde die Zwick- Werkstoffprüfmaschine mit einer anderen Testvorrichtung bestückt. Der Versuchsaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung (6-6, folgende Seite) zu erkennen.

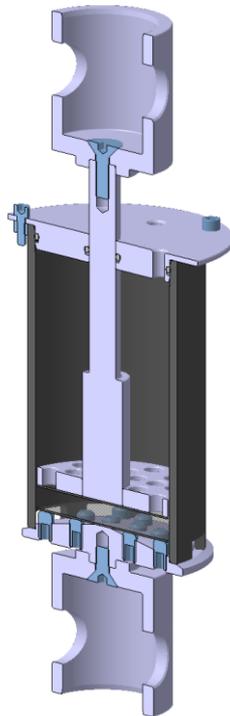


Abbildung 6-7: CAD-Modell der Vorrichtung für den Durchströmungsversuch (GRAMLICH, 2008 DSV4)

Auch für diese Versuchsanordnung wurden Überlegungen zur Versuchsdauer angestellt. Aus hygienischen Gründen sollte der Versuch immer unter Aufsicht ablaufen. Deshalb wurde eine Versuchsdauer von etwa 10 Minuten angestrebt. Da die Zeit für den Durchfluss vom aufgebrachtem Luftdruck abhängt, sollte dieser möglichst hoch sein. Dagegen spricht aber, dass ein hoher Luftdruck das Rechengut weiter zusammenpresst, als dies durch die Kolbenkraft geschieht. Deshalb wurde der Höchstdruck der Luft auf 0,4 MPa festgelegt.

Die Durchströmungsversuche (Abbildung 6-8, folgende Seite) wurden immer nach dem gleichen Muster durchgeführt. Nach dem Einfüllen von circa 500 g Rechengut wurde die Maximalkraft F_{\max} mehrmals aufgebracht. Dadurch ergab sich eine Packungshöhe von circa 20 mm. Dann wurde nach einer Wartezeit von fünf Minuten der entspannte Druck gemessen. Danach wurde das Wasser in den Behälter über dem Presszylinder eingefüllt und die Druckluft mit dem voreingestellten Druck eingelassen und der Wasserdurchfluss alle 30 Sekunden für die Dauer von 10 min aufgenommen. Für jede Maximalkraft wurden drei bis fünf Durchströmungsversuche mit unterschiedlichem Luftdruck auf der gleichen Probe durchgeführt (GREGOR, 2009: 25).



Abbildung 6-8: Pressling nach dem Durchströmungsversuch (GREGOR, 2009: 24)

Scherfestigkeit

Wie im Kapitel 6.2.2 noch beschrieben werden wird, dehnt sich das Rechengut nach der Verdichtung aus. Diese Expansion findet auch an der Spitze der Förderschnecke einer Schneckenpresse statt. Beim Start der Presse muss dann das Rechengut, welches sich durch die Expansion um die Spitze der Förderschnecke gelegt hat, abgeschert werden.



Abbildung 6-9: Verschleiß an der Spitze der Schnecke einer Waschpresse

Wegen dieser Abscherung und der Reibung während des Betriebs treten an der Spitze entsprechend hohe Kräfte auf. Dadurch entsteht eine hohe Materialbeanspruchung mit einem entsprechenden Verschleiß, der durch die mineralischen Anteile im Rechengut noch

erhöht wird. Dieser Verschleiß ist in Abbildung 6-9 sehr gut zu erkennen. Auf dem Bild ist links eine dünne, stark abgenutzte Spitze im Vergleich zu einer dicken, fast neuen Spitze rechts zu sehen. Diese ist mit einem zusätzlichen Verschleißschutz ausgestattet, den die linke Spitze nicht hatte.

Um die notwendigen Kräfte an dieser Spitze zu bestimmen, wurde die nachfolgende Versuchsreihe zur Scherfestigkeit durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde in einer Studienarbeit an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Mosbach ermittelt (SCHAAF, 2008). Der Aufbau ist in der folgenden Abbildung (6-10) zu erkennen.

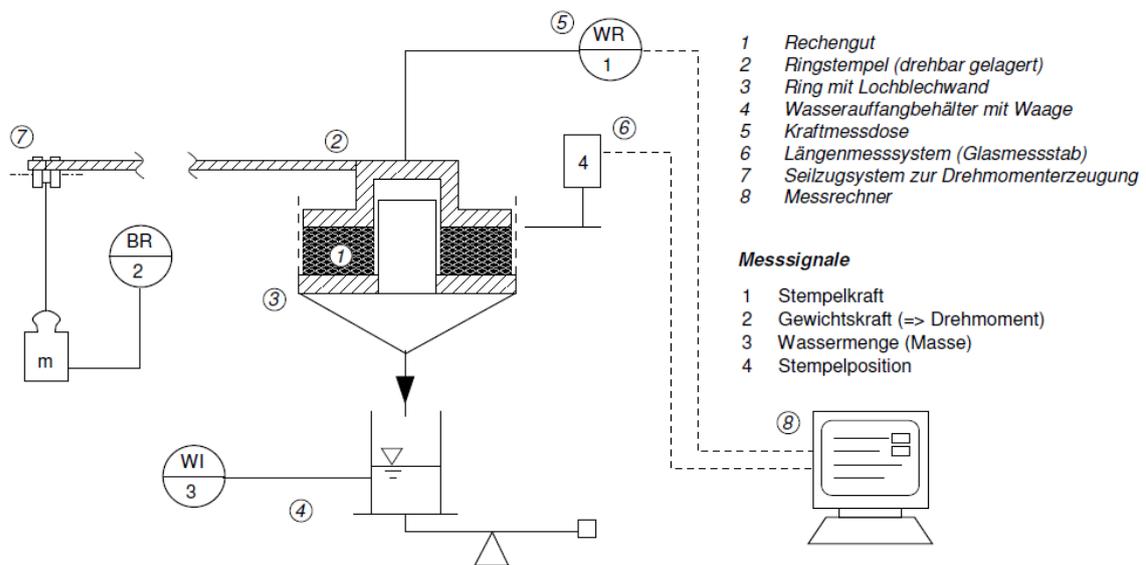


Abbildung 6-10: Versuchsaufbau für die Messung der Scherfestigkeit (GREGOR, 2009: 28)

Für die Versuche wurde ebenfalls ein Lochblechzylinder, in diesem Fall mit einem Durchmesser von 230 mm, verwendet, der mit dem unteren Ring verbunden war. In diesen Zylinder wurde das Rechengut gefüllt. Der obere Ring war drehbar gelagert und mit dem Stempel der Zug-Druck-Prüfmaschine verbunden. Zentral war am unteren Ring ein Zylinder mit 114 mm Durchmesser angebracht. An beiden Ringen waren jeweils zum Rechengut hin radial kleine Flacheisen angebracht, die der Spitze einer Schneckenpresse nachgebildet waren. Nach dem Einbringen des Rechengutes wurde das Rechengut wieder mit einer Maximalkraft zusammen gepresst. Mittels eines am oberen Ring angebrachten Vierkantrohres konnte das Drehmoment aufgebracht werden. Die Kraft wurde dabei durch ein an einem Seilzugsystem befestigtes Gewicht aufgebracht (GREGOR, 2009: 28).

Die Abbildungen 6-11 und 6-12 zeigen Details des Versuchsaufbaus.

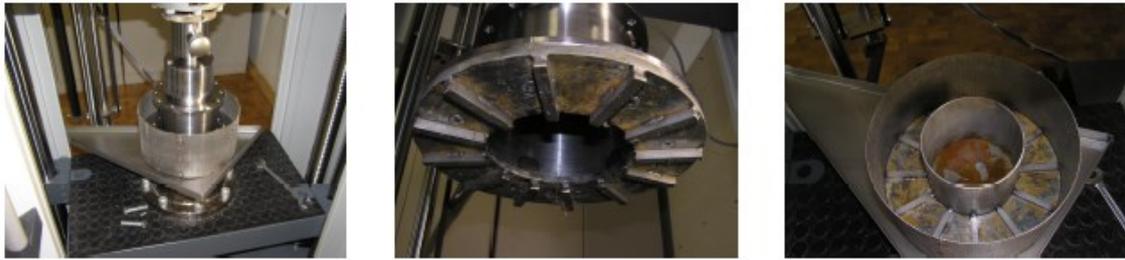


Abbildung 6-11: Aufgefahrene Messeinrichtungen für den Versuch zur Scherfestigkeit

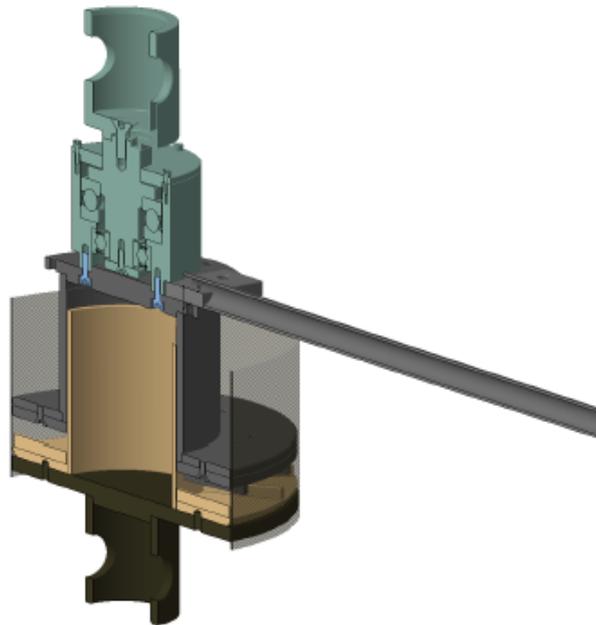


Abbildung 6-12: CAD-Schnittmodell der Messeinrichtung für den Versuch zur Scherfestigkeit (GREGOR, 2009: 29)

Zur Durchführung der Versuche zur Scherfestigkeit wurden zunächst 2 kg Rechengut in den Zylinder gefüllt und durch fünf Pressvorgänge mit dem Maximaldruck F_{\max} entwässert. Nach weiteren drei Minuten Wartezeit wurde der eigentliche Reibversuch durchgeführt. Dazu wurden definierte Wassermengen in einen Eimer eingefüllt. Dieser übte die Gewichtskraft aus, welche über den Seilzug und den Hebelarm wiederum ein Moment auf den oberen Ring ausübte. Durch die Zugabe von kleinen, ebenfalls definierten Wassermengen wurde die Wassermasse solange erhöht, bis die Gewichtskraft die Scherfestigkeit überwunden hatte. Über das zugegebene Wasservolumen beziehungsweise das abschließende Wiegen konnte die Gewichtskraft zum Aufbringen der Scherkraft dokumentiert werden (GREGOR, 2009: 31).

6.2.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zu Verdichtung, Durchströmung und Scherfestigkeit beschrieben.

Verdichtung

In den zuerst durchgeführten Testreihen wurde ermittelt, wie viel Wasser sich aus kommunalem Rechengut im Verhältnis zur aufgewendeten Presskraft verdrängen lässt. Dazu beispielhaft die nachfolgende Abbildung (6-13):

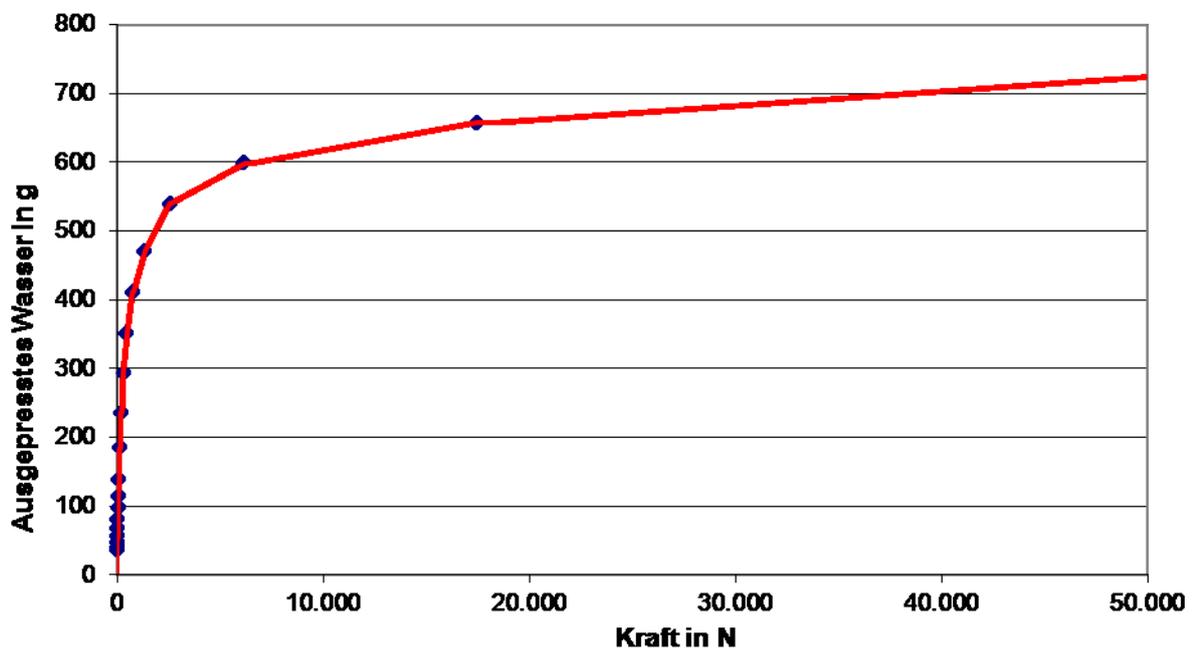


Abbildung 6-13: Ausgepresste Wassermenge in Abhängigkeit der aufgebrauchten Kraft der Probe PN 700870 (SCHWAB, 2007: 7)

Der Entwässerungsvorgang beginnt schon bei geringer Kraft. Dabei wird das Zwischenraumwasser durch das Lochblech nach außen verdrängt. Ab circa 7.500 N setzten hörbare Quetschgeräusche ein, es kann nur noch wenig Wasser verdrängt werden. Das Rechengut im Zylinder wird dabei auf eine Höhe von 6 - 10 mm zusammengepresst. Mit der Probe PN 700870 wird ein Trockenrückstand im Rechengut von 47 % erreicht (SCHWAB, 2007).

Interessant bei diesem Vorgang ist der zeitliche Verlauf (Abbildung 6-14).

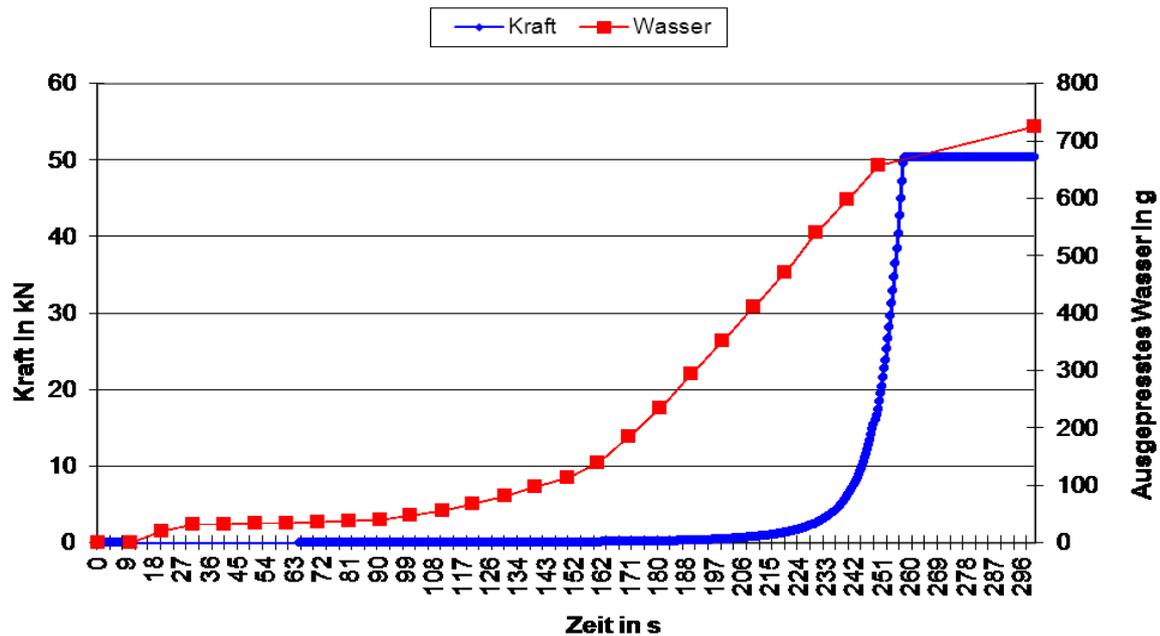


Abbildung 6-14: Zeitverhalten der Probe 700870 (SCHWAB, 2007)

Der Kraftsensor zeichnet über lange Zeit nur sehr geringe Kräfte auf. Erst nach 200 Sekunden steigt die Kraft langsam an. Der sehr steile Anstieg beginnt nach 240 Sekunden und hat bereits 18 Sekunden später die Maximalkraft von 50 kN erreicht, was bei der eingestellten Stempelgeschwindigkeit von 15 mm/min bedeutet, dass der Druckanstieg innerhalb eines Stempelwegs von 4 mm erfolgt. Insgesamt hat der Stempel seit dem Erreichen der Vorkraft 64,5 mm zurückgelegt. Der Entwässerungsvorgang wird erst nach 18 Sekunden registriert, obwohl das Wasser sofort nach Versuchsbeginn aus dem Zylinder ausgetreten ist. Diese Verzögerung ist bedingt durch die Fließzeit des Wassers vom Zylinder bis zur Waage. Nach 100 Sekunden ist ein Anstieg der Entwässerungsleistung festzustellen. Danach ergibt sich eine gleichmäßige Entwässerung. Auch nach dem Stillstand des Stempels steigt die Wassermasse wegen der genannten Verzögerung noch weiter an.

Um eine Optimierung zwischen Versuchsdauer und Entwässerungsverhalten zu erreichen, wurden mehrere Geschwindigkeiten und Maximalkräfte getestet. Der höchste Druck von 12,7 MPa wurde mit der Kombination von einer Maximalkraft F_{\max} von 100 kN und einem Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm eingestellt. Aus diesem Versuch konnte kein Entwässerungsergebnis gemessen werden, weil der Zylinder dem hohen Druck nicht standhalten konnte. Bei den Versuchen zur Pressgeschwindigkeit zeigte sich deutlich, dass

diese eine größere Auswirkung auf die Entwässerung als die Maximalkraft ausübt. Wird die Geschwindigkeit zu groß gewählt, kann das Wasser nicht schnell genug aus dem Zylinder entweichen. Umgekehrt kann das Wasser schon bei geringer Kraft ausgepresst werden, wenn genügend Zeit für die Verdichtung und Entwässerung gegeben ist (SCHWAB, 2007).

Für die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse gelten, sofern nicht anders erwähnt, eine Versuchsgeschwindigkeit v_{ver} von 15 mm / min und eine Maximalkraft F_{max} von 50 kN, was einem Druck p_{RG} von 1,59 MPa entspricht.

Bei der Analyse des Kraftverlaufes ist festzustellen, dass sich die am Stempel gemessene Kraft nach dem Erreichen der Maximalkraft wieder reduziert, obwohl der Stempel in der Endposition gehalten wurde. Diese Entspannung ist darauf zurückzuführen, dass der auch nach dem Abschalten anstehende Druck weiter den Entwässerungsvorgang antreibt. Das dadurch austretende Wasser reduziert dann jedoch den verbleibenden Druck. Im entspannten Zustand, der nach ungefähr drei Minuten erreicht wird, bleibt ein Druck von etwa 1,3 MPa bestehen (SCHWAB, 2007).

Wird der Stempel nach dem Erreichen der Maximalkraft zurückgefahren, entspannt sich das Rechengut auch räumlich. Die Höhe des Presskuchens im Zylinder steigt auf 11 – 25 mm (SCHWAB, 2007). Damit wird das Volumen durch die Entspannung ungefähr verdoppelt.

Das Ergebnis der stufenweisen Verdichtung wird auf der folgenden Seite in Abbildung 6-15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Wartezeit die Entwässerung früher beginnt und der Kraftanstieg deutlich flacher verläuft. Bei den beschriebenen Versuchen konnte eine Volumenreduzierung ohne Entspannung zwischen 80% und 90% erreicht werden. Nach der Entspannung konnte eine Reduzierung zum ursprünglichen Volumen zwischen 70 % und 75 % gemessen werden (SCHWAB, 2007: 4).

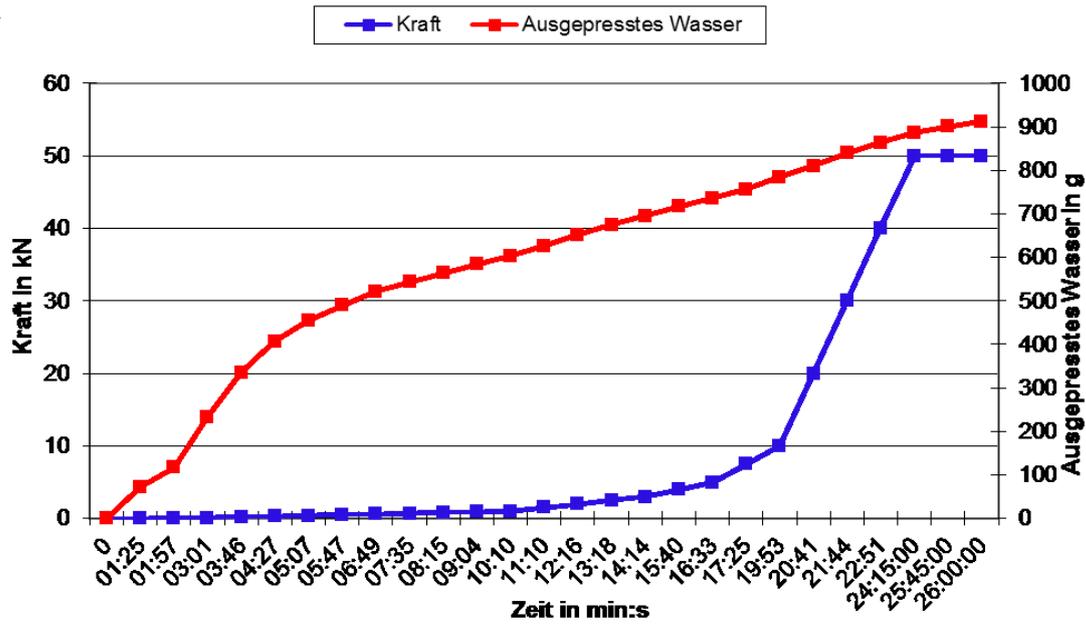


Abbildung 6-15: Entwässerungsverhalten bei schrittweiser Erhöhung der Maximalkraft bei Probe 700860 (SCHWAB, 2007)

In der nachfolgenden Abbildung 6-16 sind die Ergebnisse der Versuche dokumentiert, bei denen die eingestellte Maximalkraft F_{max} mit bis zu 11 Pressvorgängen wiederholt wurde.

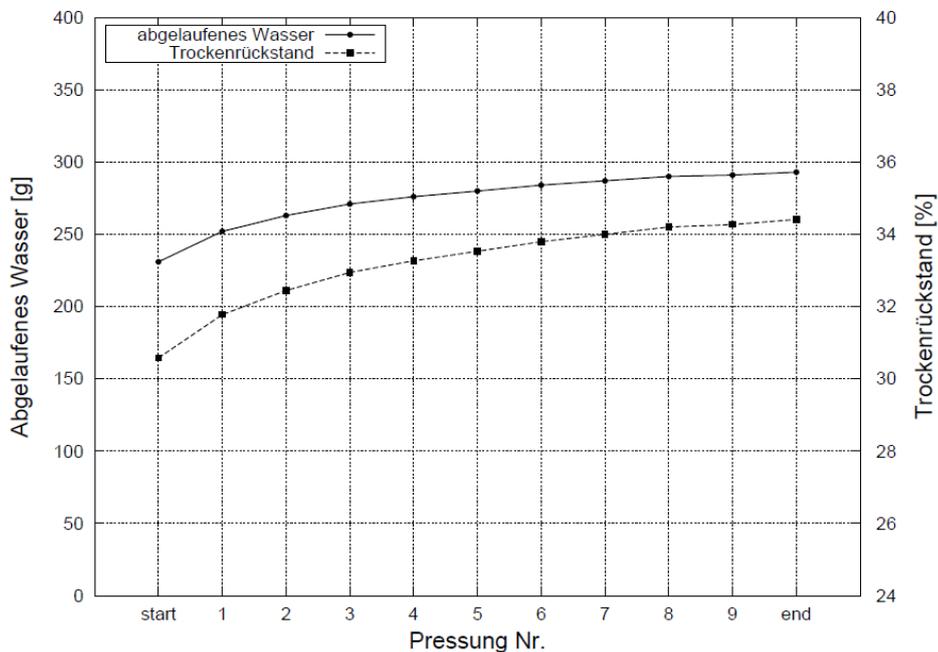


Abbildung 6-16: Abhängigkeit der Entwässerung von der Anzahl der Pressungen mit Maximalkraft (GREGOR, 2009: 20)

Es ist zu erkennen, dass jeder Pressversuch eine Steigerung des Wasserablaufs und damit des Trockenrückstands zur Folge hatte, weil sich durch das abgetrennte Wasser auch die Gesamtmasse reduziert, während die Trockenmasse gleich bleibt. Allerdings reduzierte sich die zusätzlich auspressbare Wassermasse bei jedem Versuch. Dennoch konnte damit der Trockenrückstand deutlich gesteigert werden. Auch die bei den vorherigen Versuchen beschriebene Unsicherheit bezüglich der Latenzzeit konnte dadurch eliminiert werden.

Die nachfolgende Abbildung (6-17) zeigt die Zusammenfassung von allen durchgeführten Messungen dieser Versuchsreihe mit der mehrfach aufgebrauchten Maximalkraft.

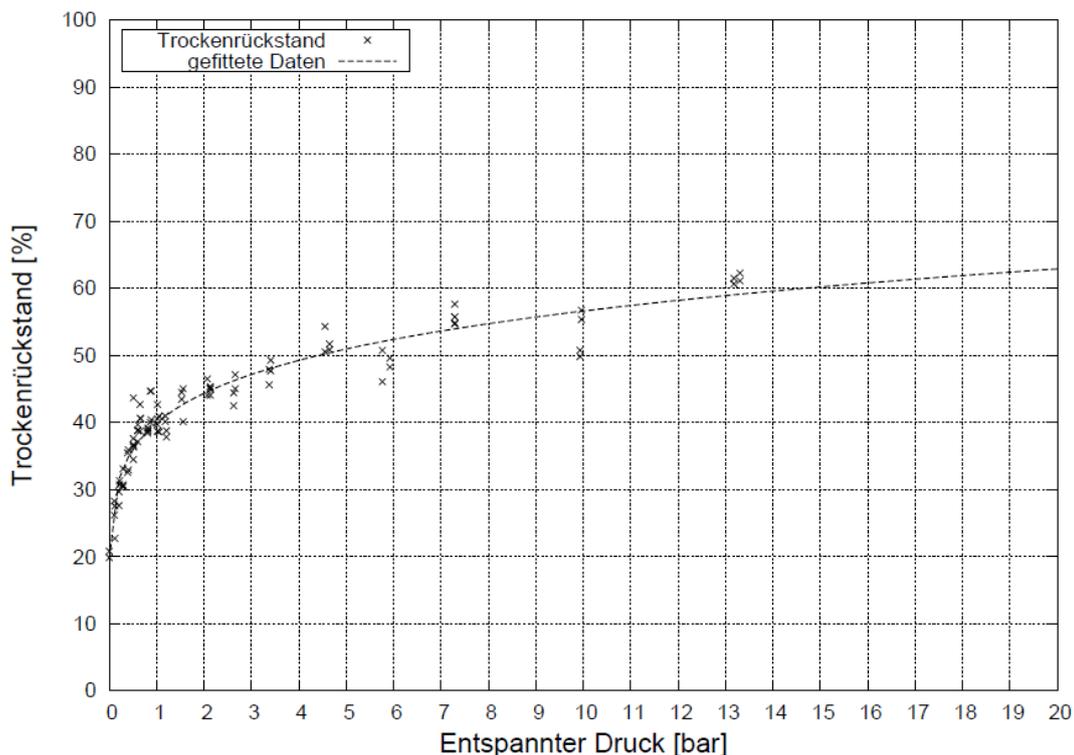


Abbildung 6-17: Abhängigkeit des Trockenrückstands vom entspannten Druck (GREGOR, 2009: 21)

Mit entspanntem Druck wird der Druck nach einer Wartezeit von drei Minuten bezeichnet. Der TR wurde aus zwei Proben jeder Messung bestimmt. Die Rechengutproben wurden über einen Zeitraum von fünf Wochen aus einer Kläranlage entnommen (GREGOR, 2009: 20).

Es ist zu erkennen, dass die Entwässerung schon bei niedrigen Maximaldrücken einsetzt. Ab einem Druck von 0,1 MPa wird die Entwässerungsleistung geringer. Bei weiterer Steigerung des Maximaldrucks werden die Erhöhung des Trockenrückstandes und damit die Verringerung der Gesamtmasse immer langsamer.

Auffällig ist auch, dass die Ergebnisse in Abbildung 6-17 nicht immer den Erwartungen entsprechen, was sicherlich an der heterogenen Zusammensetzung des Rechengutes sowie an der möglichen Fehlerquelle bei der Probenvorbereitung liegen kann. Als Beispiel können die Ergebnisse bei 0,7 MPa und 1 MPa herangezogen werden, denn der TR ist beim höheren Druck niedriger. Schon bei einem Druck von 0,3 MPa kann der häufig geforderte TR von 45 % erreicht werden. Eine Verdopplung der Presskraft bringt lediglich eine Steigerung auf 50% TR.

Durchströmung

Mit dem Versuchsaufbau zur Durchströmung konnte die Abhängigkeit des Massenstroms des Wassers durch das Rechengut je nach aufgebrachtem Maximaldruck p_{RG} durch den Stempel und nach aufgebrachtem Druck p_w auf die Wasservorlage beobachtet werden (Abbildung 6-18).

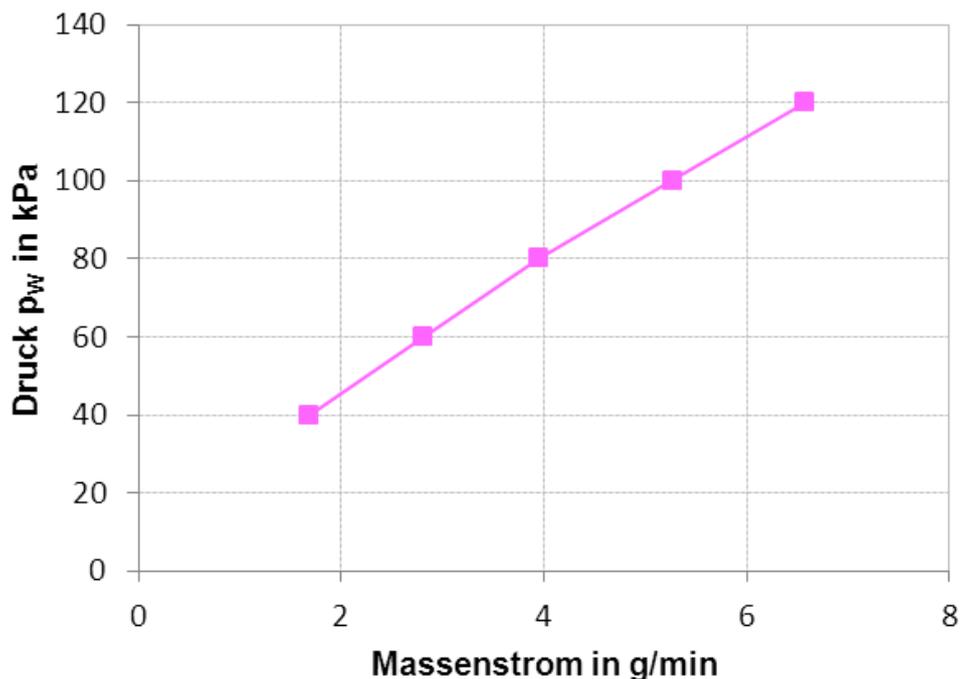


Abbildung 6-18: Abhängigkeit des Massenstroms vom Druck auf die Wasserfläche bei einem Maximaldruck p_{RG} auf das Rechengut von 300 kPa

Da für diesen Versuch immer dieselbe Probe verwendet wurde, ergab sich ein gleichmäßiger Verlauf für den Wasserdurchfluss. Je höher der aufgebrachte Druck war, desto höher war auch der Durchfluss durch das vorgepresste Rechengut.

In der nächsten Abbildung (6-19, folgende Seite) wird die Abhängigkeit des Massenstroms vom maximal eingestellten Druck dargestellt.

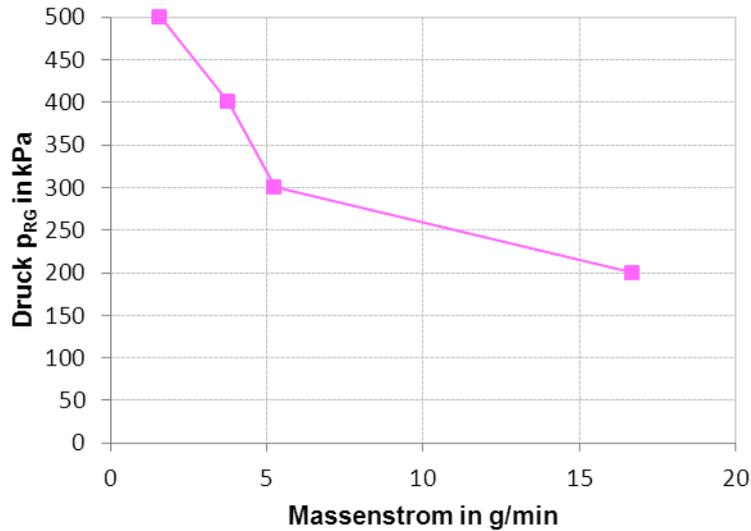


Abbildung 6-19: Massenstrom in Abhängigkeit vom Pressdruck

Wie zu erwarten, ist der Massenstrom umgekehrt proportional zum Maximaldruck. Denn je fester das Rechengut zusammengepresst wird, desto enger sind die Poren, durch die das Wasser abfließen kann. Der etwas ungleichmäßige Verlauf liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an den verschiedenen Rechengutproben, die bei den Versuchen verwendet wurden.

Um das Zusammenspiel von Luftdruck und Maximaldruck deutlich zu machen, wird in nachfolgender Abbildung (6-20) der Massenstrom in Abhängigkeit des Druckverhältnisses dargestellt.

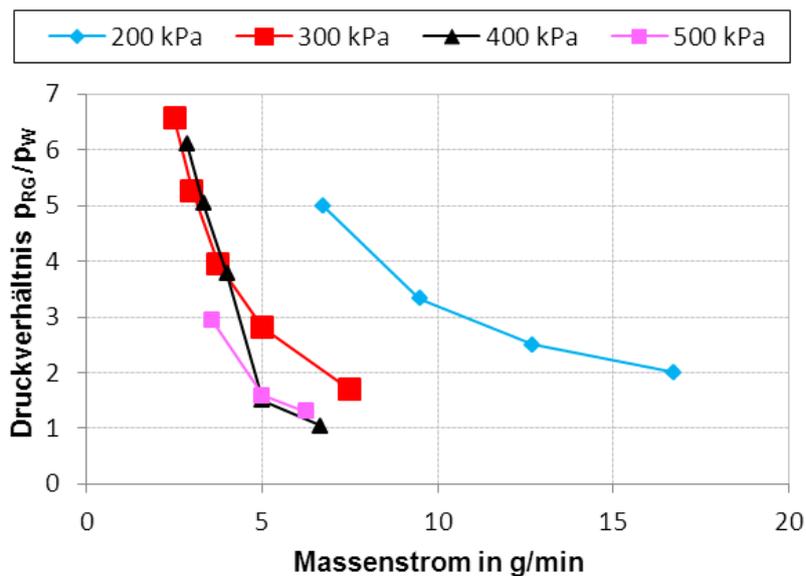


Abbildung 6-20: Abhängigkeit des Massenstroms vom Druckverhältnis Rechengut/Wasser (p_{RG}/p_W) für verschiedene Maximalkräfte F_{max}

Die einzelnen Kurven stellen die Versuchsergebnisse für die in der Legende bezeichnete Maximalkraft F_{\max} dar. Es ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit des Massenstroms vom Druckverhältnis für verschiedene Drücke recht ähnlich ist. Die deutliche Abweichung der Versuchsergebnisse mit einem Maximaldruck von 200 kPa kann ebenfalls auf die unterschiedlichen Rechengutproben zurückgeführt werden.

Scherfestigkeit

Mit den drei Versuchen zur Scherfestigkeit wurde die Scherkraft von Rechengut in Abhängigkeit vom Maximaldruck auf das Rechengut ermittelt. Die Scherspannung wird nach folgender Formel berechnet:

$$\tau_{aB} = \frac{F}{A} \quad \text{Gleichung: 6.5}$$

Darin ist τ_{aB} die Scherspannung, F die Scherkraft und A die Scherfläche. Die Scherkraft entspricht der jeweiligen Gewichtskraft des Wasserbehälters. Die Scherfläche von 0,0048 m² ist die Summe der zwölf Flacheisen, die 50 mm lang und 8 mm hoch waren. Bei der Scherfestigkeit ist zu beachten, dass die Messung nach der Entspannung durchgeführt wurde.

In der nachfolgenden Tabelle (6-1) werden die jeweiligen Ergebnisse zur Scherkraft dargestellt.

Tabelle 6-1: Ergebnisse des Scherversuches für Rechengut (nach GREGOR, 2009: 31)

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Maximalkraft	F_{\max}	N	315,0	1.571,0	3.142,0
Entspannte Kraft	F_{ent}	N	220,0	520,0	1.530,0
Druck	p_{\max}	kPa	12,8	63,9	127,9
Wassermasse	m	g	3.142,0	5.660,0	11.000,0
Scherspannung	τ_{sB}	N/m ²	6.421,0	11.567,0	22.481,0
Hebelarm	L	m	0,7	1,0	1,0
Losbrechmoment	M_L	Nm	21,6	55,5	107,9

Die auf den Stempel aufgebrachte Maximalkraft F_{\max} wurde von Versuch 1 zu Versuch 3 in zwei Schritten gesteigert. Gleichzeitig erhöhten sich damit die entspannte Kraft und der resultierende Druck. Die Wassermasse, welche als Gewichtskraft über das Seil und den Hebelarm das notwendige Losbrechmoment auf das Rechengut ausübte, stieg bis zur Überwindung der Scherfestigkeit erwartungsgemäß, wie die Maximalkraft, an. Die aufgebrachte Maximalkraft zur Verdichtung des Rechengutes ist deutlich niedriger als in den zuvor durchgeführten Versuchen zur Verdichtung. Eine weitere Steigerung der Maximalkraft in den Versuchen zur Scherfestigkeit war nicht möglich, da die Versuchsvorrichtung nicht für höhere Gewichtskräfte ausgelegt war.

6.2.3 Diskussion Laborexperimente

Der Trockenrückstand von unbehandeltem Rechengut beträgt 8 % bis 12 % (Kapitel 2.2). Deshalb beginnt die Entwässerung von Rechengut bereits durch das Aufbringen geringer Presskräfte. Bei Erhöhung dieser Kräfte und einer damit einhergehenden Drucksteigerung ist eine weitere Entwässerung zu beobachten; allerdings verlangsamt sich dabei der Wasseraustritt immer mehr. Nach der Beendigung des Verdichtungs Vorgangs entspannt sich das Rechengut unter Verringerung des Drucks, auch wenn das zur Verfügung stehende Volumen nicht verändert wird. Wird für das Rechengut nach der Verdichtung die räumliche Begrenzung aufgehoben, expandiert das Rechengut bei der Entspannung wieder.

Wird die Presskraft auf das Rechengut langsam gesteigert, wird ein höherer Entwässerungsgrad des Rechenguts erzielt, weil das Wasser mehr Zeit hat, sich einen Weg aus dem Rechengut zu bahnen. Auch eine mehrfache Verdichtung mit dem gleichen Maximaldruck ergibt einen geringeren Wassergehalt von Rechengut.

Diese Ergebnisse zur Verdichtung von Rechengut bestätigen die Beobachtungen in der Praxis, dass die überproportionale Erhöhung der Presskräfte nur noch eine geringe Verbesserung des Entwässerungsgrades ermöglicht. Damit sind der Entwässerung von Rechengut in der Praxis wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

Der dabei auftretende Verschleiß einzelner Maschinenteile kommt als weitere Komponente der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinzu. Die Expansion von verdichtetem Rechengut bei seiner Entspannung ist ebenfalls in der Praxis zu beobachten und muss bei der Dimensionierung des Austragsrohres von Rechengut nach der Entwässerung berücksichtigt werden.

Die Messergebnisse der Durchströmungsversuche zeigen, dass zum Verdrängen von Zwischenraum- und Kapillarwasser die Lücken im Rechengut, die durch die Strukturstoffe vorhanden sind, immer enger zusammen gedrückt werden müssen. Gleichzeitig wird dadurch aber der Fließwiderstand für das zu verdrängende Wasser immer höher. Damit ergibt sich eine asymptotische Kurve, weil sich die Wirkung von höherem Druck und höherem Fließwiderstand aufheben. Aus diesem Grund ist der Steigerung der Entwässerungsleistung eine natürliche Grenze gesetzt. Da auch die Schichtdicke für das Entwässerungsverhalten eine Rolle spielt, werden Maschinen mit größeren Fließwegen durch das Rechengut, also Maschinen mit größerem Durchmesser, tendenziell schlechtere Ergebnisse erzielen oder mehr Zeit brauchen. Auch diese Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungen der Praxis.

Ein wichtiges Ergebnis der hier vorgestellten Untersuchungen zur Scherfestigkeit ist der Nachweis, dass bei erhöhter Presskraft auf und der damit erreichten Verdichtung von Rechengut die Scherkraft überproportional höher wird. Diese Kraft muss bei einer Verdichtung über eine Schnecke durch den Motor aufgebracht und von den anderen Bauteilen aufgenommen werden können. Diese Kraft und der durch die abrasiven Inhaltsstoffe von Rechengut hervorgerufene hohe Verschleiß müssen bei der Auslegung des Antriebs, aber auch bei der Auswahl der Werkstoffe berücksichtigt werden.

Generell ist für alle unter Kapitel 6.2 durchgeführten Labor-Experimente zur Entwässerung von Rechengut festzuhalten, dass in der Probenahme, dem Transport und der Versuchsvorbereitung sowie durch die inhomogene Zusammensetzung des Rechenguts sehr große Fehlerquellen bestehen. Es ist verständlich, dass die Ergebnisse in sehr starkem Maße streuen.

Die Zeit-, Druck- und Wegeaufnahme in der Werkzeugprüfmaschine erfolgt durch eingebaute Sensoren und liefern so genaue Daten, welche automatisch an den Messrechner übertragen werden. Auch die Waagen zur Bestimmung der Gewichte der Probe und die Waage unter dem Auffangbehälter liefern genaue Daten. Allerdings wird das Wassergewicht während des Versuchs manuell abgelesen und dokumentiert. Dabei sind Ablesefehler oder Dokumentationsfehler nicht ausgeschlossen.

Wichtig ist es, bei der Analyse der Ergebnisse zu beachten, dass durch die Auffangwanne des Wassers und die Schlauchverbindung zur Waage eine gewisse zeitliche Verzögerung bei der Erfassung des Wassers im Vergleich zur Druck- und Weganzeige vorhanden ist. Es

bleibt auch immer ein wenig Wasser an der Druckdose und in der Schlauchleitung zurück. Dadurch treten bei der Massenbilanz kleinere Fehler auf.

Analog zum Entwässerungsversuch gibt es auch beim Durchströmungsversuch eine Zeitverzögerung zwischen dem Austritt des Wassers und der Erfassung auf der Waage. Um diese Verzögerung zu minimieren, wurde bei diesem Versuchsaufbau eine Minimierung dieses Fehlers durch eine deutlich steiler geneigte Auffangwanne und einen kürzeren Schlauch angestrebt.

Auch die zufällig ausgewählte Zusammensetzung von Rechengut übt bei der Durchströmung desselben einen sehr großen Einfluss auf die Messergebnisse aus. Es ist leicht vorstellbar, dass ein Bereich, den das Wasser leicht durchströmen kann (zum Beispiel entlang eines kleinen Asts oder durch eine Ansammlung kleiner Steine) die Durchströmungsgeschwindigkeit entscheidend verändert.

Die Untersuchungen zur Scherfestigkeit unterliegen ebenfalls verschiedenen Fehlereinflussquellen. Dazu zählen die Einflüsse durch die Lagerung und die Änderung der Länge des Hebelarmes durch die Drehbewegung. In beiden Fälle wurden die zu erwartenden Fehler abgeschätzt beziehungsweise berechnet. Auf Grund der hohen Scherkraft und den bereits bekannten Schwankungen der Zusammensetzung von Rechengut ist der Einfluss der genannten Fehlerquellen vernachlässigbar.

Aus den Messergebnissen zur Scherfestigkeit kann aber keine zuverlässige Extrapolation vorgenommen werden, um die Scherkräfte bei realen Entwässerungsmaschinen abschätzen zu können. Die Durchführung von Experimenten zur Scherfestigkeit mit Maximaldrücken von praxistauglichen Maschinen könnte im Rahmen einer nachfolgenden Arbeit erfolgen.

6.3 Feldtest

Die Ergebnisse von Entwässerungsvorgängen in der Praxis sind bei sonst gleichen Parametern immer unterschiedlich, da das Rechengut stets heterogen ist. Allerdings wäre es wegen der weiteren Behandlung und Entsorgung wünschenswert, einen recht gleichmäßigen Trockenrückstand in allen Betriebszuständen zu erreichen. Da sich das Rechengut aber ändert, müssen andere Parameter angepasst werden. Nachdem für den Trockenrückstand von Rechengut keine Messmethode zur Verfügung steht, die in einem Regelkreis die Anpassung an einen Sollwert ermöglicht, können nur Einstellungsparameter der Maschine wie zum Beispiel der Gegendruck geändert werden. Wie die Laboruntersuchungen (6.2) zeigen, bietet es sich an, die den Entwässerungsvorgang

entscheidend beeinflussende Presskraft zu variieren. Eine längere Pausenzeit wäre ebenfalls denkbar. Diese Lösung scheidet aber wegen des dadurch zu geringen Rechengutdurchsatzes aus.

Auch aus diesem Grund werden von der Industrie Zusatzmodule angeboten, die eine höhere Verdichtung des Rechenguts während oder nach der eigentlichen Behandlung ermöglichen. Am häufigsten werden dazu Kolbenpressen in verschiedenen Formen verwendet. Allerdings ist eine selbstständige Anpassung der Nachverdichtung auf den Entwässerungsgrad bisher nicht realisiert. Eine andere Lösung ist die Variierung der Friktion im Austragsrohr, zum Beispiel durch die Verwendung von Blenden mit verschiedenen Durchmessern. Diese haben allerdings den Nachteil, dass der einmal eingestellte Widerstand nur durch den Austausch der Blende verändert werden kann. Weitere von der Industrie angebotene Zusatzmodule ermöglichen es, den freien Querschnitt stufenlos zu verstellen und somit durch den geringeren Querschnitt den Gegendruck zu erhöhen oder verringern, was auch den Wassergehalt des Rechenguts beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit wird in einem Feldtest mit einer Waschpresse und einem Zusatzmodul auf einer Kläranlage untersucht, ob es möglich ist, den freien Querschnitt der Zusatzmodule und damit den Gegendruck für die Entwässerung durch die Größen Schraubenkraft, Wirkleistung und Druck in einem Regelkreis zu führen. Der Versuchsaufbau wird in Kapitel 6.3.1 dargestellt. Zudem werden die gewonnenen Daten aus diesem Feldversuch (Kap. 6.3.2) zu einem Vergleich der im Labor gewonnenen Daten herangezogen und abschließend diskutiert (Kap. 6.3.3).

6.3.1 Versuchsaufbau

In den nachfolgenden Kapiteln werden die im Feldtest eingesetzten Maschinen und Messmethoden näher beschrieben.

Waschpresse

Um die Tests zur Rechengutentwässerung durchführen zu können, wurde eine Rechengutwaschpresse KWP der KUHN GmbH Technische Anlagen (Höpfingen, Deutschland) auf einer Kläranlage eingebaut. Die Waschpresse hat einen Elektromotor mit einer Nennleistung von 3,6 kW und einem Drehmoment von 1.846 Nm. Die innenliegende eingängige Förderschnecke dreht sich mit einer Drehzahl von 0,32 1 / s und hat einen Außendurchmesser von 250 mm. An der Spitze beträgt die Steigung 120 mm pro Umdrehung. Das Austragsrohr hat einen Außendurchmesser von 273 mm. Die gewählte

Kläranlage in Allfeld (Baden-Württemberg) reinigt das Abwasser für den Abwasserzweckverband Schefflental und hat eine Ausbaugröße von 18.000 E_{EW} bei 11.600 angeschlossenen Einwohnern. Das Kanalnetz wird als Mischkanalisation betrieben und ist relativ lang. Die größte Entfernung zu einer größeren Ansiedlung beträgt 20 km (MÜLLER, 2013).

Der Aufbau sowie die Inbetriebnahme der Versuchsanlage wurden im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt (SCHNARRENBERGER, 2008). Die nachfolgende Abbildung (6-21) zeigt den Aufbau der Waschpresse auf der Kläranlage.



Abbildung 6-21: Waschpresse mit Austragsrohr (rechts) für Rechengut auf der Kläranlage Allfeld ohne Zusatzmodul

Zusatzmodul

Zur Erhöhung der Verdichtung wurde das Modul KVR (KUH N Variabel Resistor, KUH N GmbH, Technische Anlagen, Höp fingen) verwendet und zusätzlich eingebaut. Das Gerät besteht aus einem Stahlrohr mit zwei Flaschen. In dieses Rohr wurde eine Gummimembrane eingepasst. Dieses Rohr wird mit einem Zwischenstück auf die Waschpresse geschraubt (Abbildung 6-23). Diese Waschpresse fördert somit das

Rechengut zunächst durch das Modul, bevor es durch das Austragsrohr in einen Container geführt wird (Abbildung 6-22).

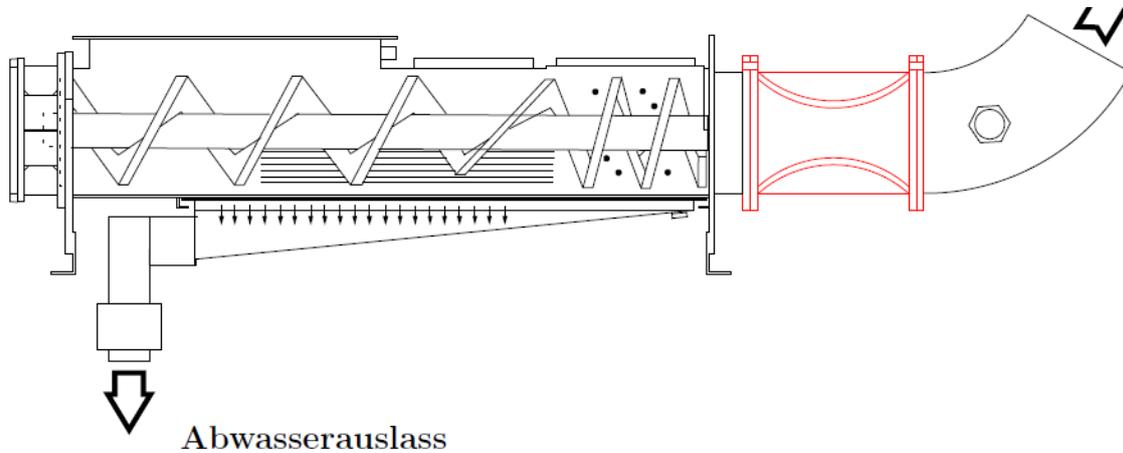


Abbildung 6-22: Einbausituation des Nachpressmoduls (GREGOR, 2009: 35)

Das Rechengut wird in der Einwurfzone in die Maschine gegeben. In der Waschzone erfolgt das Auswaschen des Rechenguts und in der Presszone die Entwässerung.

In Abbildung 6-23 ist die Einbausituation des Zusatzmoduls nach dem Umbau auf der Kläranlage Allfeld zu sehen.

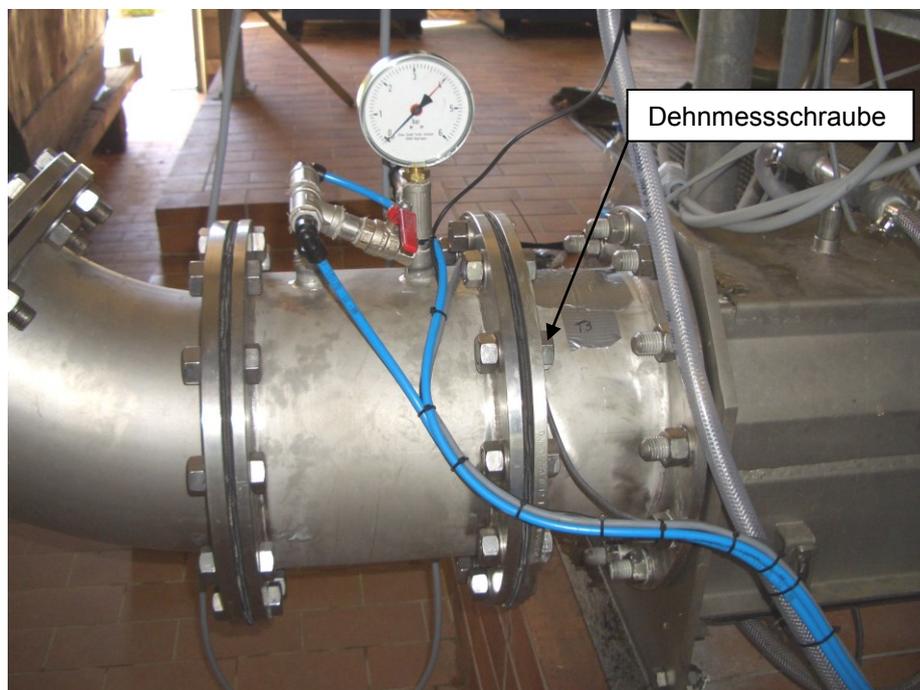
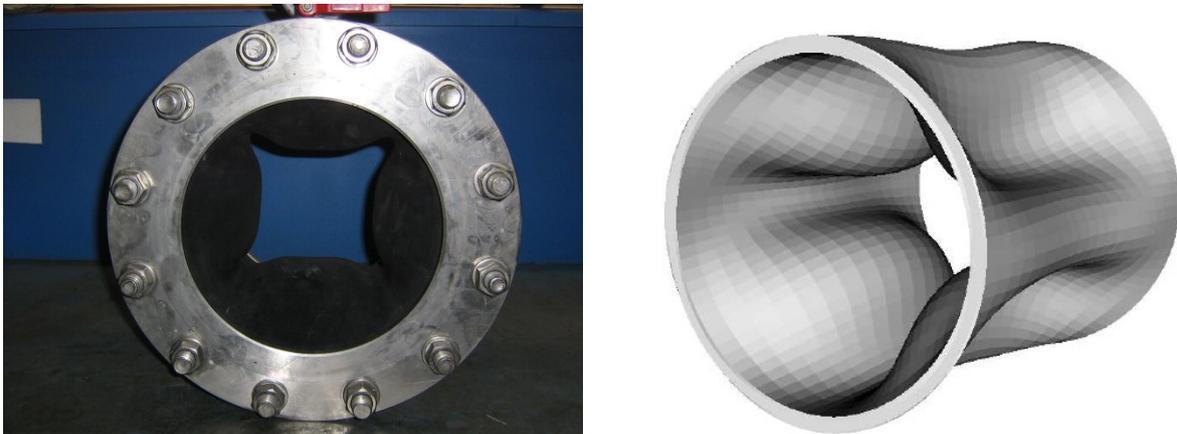


Abbildung 6-23: Eingebautes Nachverdichtungsmodul mit Dehnmessschraube

Das Bild zeigt im linken Teil den Krümmer des Austragsrohres zum Rechengutcontainer. Rechts ist die Waschpresse zu erkennen. In der Mitte ist die Nachpresseinheit (Abbildung 6-24) mit den pneumatischen Anschlüssen zu sehen. Rechts daneben ist ein FF-Stück montiert. An der Flanschverbindung zwischen der Nachpresseinheit und diesem Rohrteil wurden drei von zwölf Schrauben mit einem Dehnmessstreifen versehen.

Durch die Beaufschlagung mit Luft zwischen dem Stahlrohr und dem Gummibalg beult sich die Membrane ein und verschließt somit einen definierten Querschnitt, wodurch sich die Reibung des Rechenguts an der Membrane erhöht, was wiederum für einen höheren Druck auf das Rechengut sorgt. Dieser Vorgang führt zu einer höheren Entwässerung des Rechenguts. Für die beschriebene Versuchsreihe wurde ein fester Druck auf die Membran von 300 kPa eingestellt.



**Abbildung 6-24: Nachpressmodul im Original und als Simulationsmodell
(GREGOR, 2009 S. 61)**

In dieser Untersuchung wurden Dehnmessstreifen zur Messung der Zugkräfte auf die Flanschverbindung eingesetzt. Dazu wurden drei Schrauben DIN 4017 M 20 x 50 entsprechend vorbereitet. Die Dehnmessstreifen selbst wurden vom Ingenieurbüro Dr. Scholz (Ingolstadt) geliefert und als Vollbrücke auf die Schrauben aufgeklebt, wodurch die Zugkräfte ohne den Einfluss anderer Einflüsse gemessen werden können. Als Messverstärker wurde der Typ MV 35 der Firma Mesomatic (Kernen i.R.) eingesetzt. Nachfolgende Abbildung (6-25) zeigt eine mit Dehnmessstreifen fertig ausgerüstete Schraube.

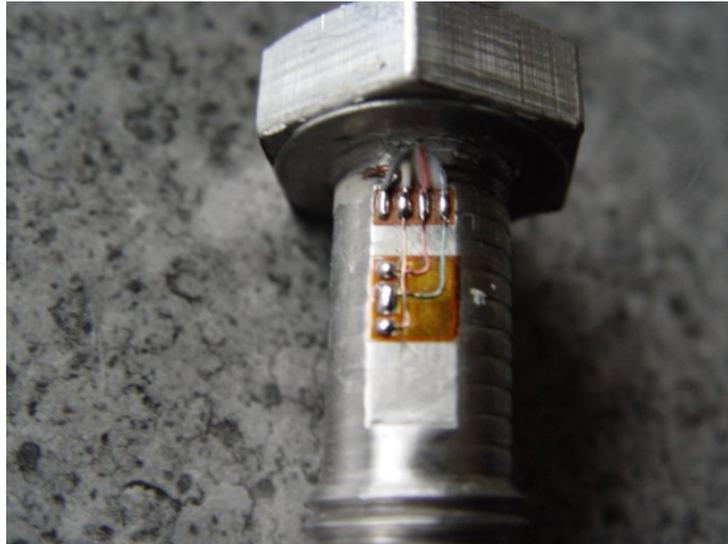


Abbildung 6-25: Dehnmessschraube (RUPP, 2010)

Nach der Montage der Dehnmessstreifen wurden die Schrauben in einem Zugversuch kalibriert. Dazu wurden diese in die schon beschriebene Zwick-Zug-Druckmaschine eingespannt und die Kennlinie durch das Aufbringen von Zugkräften aufgenommen und in das Messsignal mit 4 – 20 mA umgewandelt. Bereits hier wurde festgestellt, dass schon sehr kleine Unterschiede bei der Einspannung der Schrauben das Messergebnis deutlich beeinflussen (RUPP, 2010). Nachfolgende Abbildung (6-26) zeigt die Kennlinie der Schraube 3.

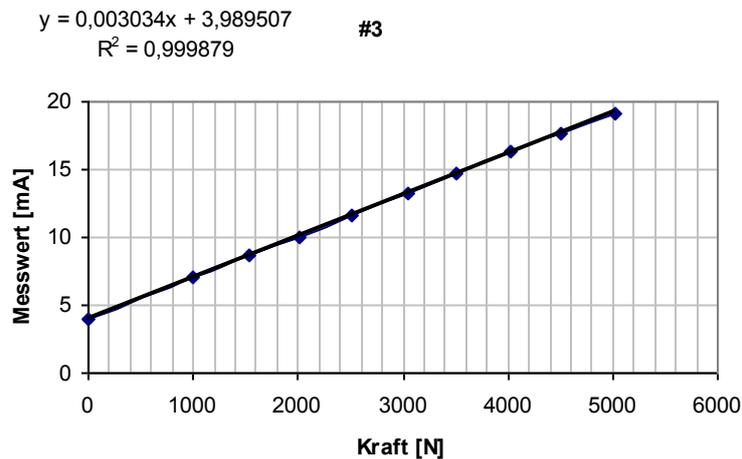


Abbildung 6-26: Kennlinie der Schraube 3 nach der Kalibrierung (RUPP, 2010)

Datenaufzeichnung

Für den Feldtest wurden Daten der Maschine wie auch der Kläranlage Allfeld aufgezeichnet. An der Waschpresse wurden die Drehrichtung und die Wirkleistung aufgezeichnet. Am Zusatzmodul wurden der Druck in der Membran und die Schraubenkräfte dokumentiert. Von der Anlage wurde der Zufluss und die Wetterdaten übernommen, Die Daten wurden von der auf der Anlage vorhandenen Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) S7 (Siemens, München) abgenommen. Dazu wurde der Datenlogger ACCON-S7-EasyLog (Deltalogic Automatisierungstechnik GmbH, Schwäbisch Gmünd) verwendet.

Nachfolgend ist der Aufbau der Entwässerungsmaschine als Piktogramm dargestellt (Abbildung 6-27).

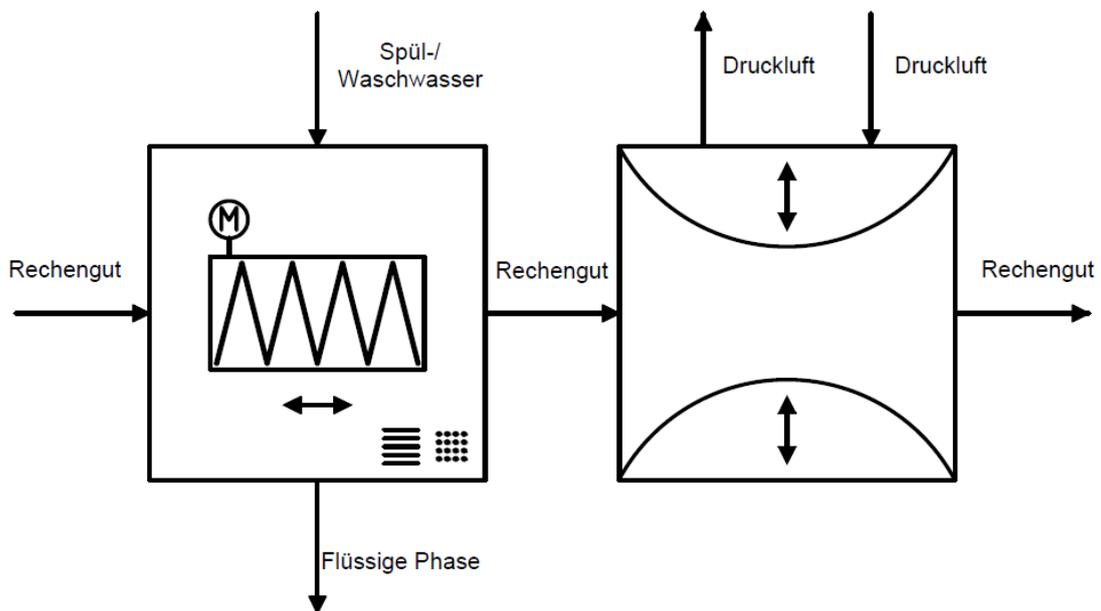


Abbildung 6-27: Schema der Anlage zum Entwässerungsversuch

Im linken Teil ist die Waschpresse dargestellt. Dem Rechengut wird Spül- und Waschwasser zugeführt (Pfeil von oben). Nach unten ist das austretende Wasser dargestellt. Das Rechengut wird weiter in den KVR auf der rechten Seite gefördert. Dort wird von oben Druckluft zu- oder abgegeben. Das Rechengut tritt nach rechts aus. Eine Behandlung des Rechenguts findet im KVR nicht statt.

6.3.2 Ergebnisse

Nach dem Einbau der Schrauben in die Flanschverbindung und der Einstellung der Schraubenkraft mit einem Drehmomentschlüssel bei allen Schrauben wurde die Anlage ab März 2008 in Betrieb genommen und Daten aufgezeichnet. Nach verschiedenen Anpassungen wurde die Anlage von März 2009 bis März 2011 durchgehend ohne Veränderung betrieben.

Neben der Anzahl der Behandlungszyklen wurden auch die Drehrichtung, die Schraubenkräfte, die Wirkleistung, der Druck in der Membran des Zusatzmoduls sowie weitere Parameter im Abstand von einer Sekunde gemessen und in im CSV-Format gespeichert. Diese Daten wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel® in der Office-Version 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) aufbereitet. Dabei wurde jeweils ein Behandlungszyklus zusammengefasst: Als Behandlungszyklus wurde der Zeitraum vom Beginn der Behandlung bis zum Austrag gewertet. Als Trenngröße wurde eine Pause von mindestens 5 Sekunden definiert. Insgesamt wurden 13.045 Behandlungszyklen aufgezeichnet. Bei einer Aufzeichnungszeit von 21 Monaten ergibt dies 621 Zyklen pro Monat beziehungsweise durchschnittlich 21 Zyklen pro Tag. Dabei ist eine Spanne von 2 Zyklen pro Tag bei absolutem Trockenwetter bis zu 122 Zyklen bei einem Regentag zu finden. Die Dauer der Zyklen schwankt zwischen 100 Sekunden und über 18 Minuten ohne Unterbrechung.

Nachfolgend sind die Anzahl der Zyklen und die Regenmenge pro Monat aufgezeigt (Abbildung 6-28). Die angegebene Regenmenge wurde von der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2013) in Öhringen, welche 33 km südlich von Allfeld besteht, aufgezeichnet.

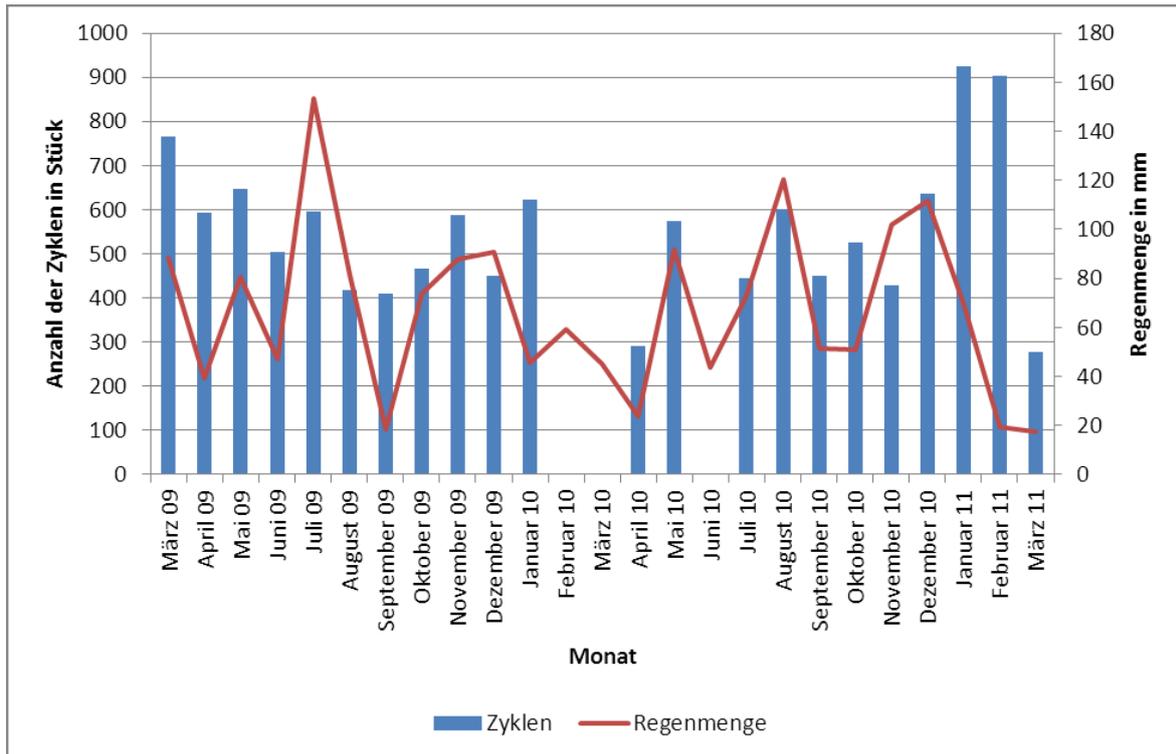


Abbildung 6-28: Anzahl der monatlichen Zyklen der Waschpresse im Untersuchungszeitraum im Vergleich mit der gemessenen Regenmenge der Wetterstation Öhringen

In den Monaten Februar, März und Juni 2010 wurden aufgrund technischer Probleme keine Daten der Waschpresse aufgezeichnet. Im Monat April 2010 und im März 2011 erfolgte nur eine teilweise Aufzeichnung. Eine auffällig hohe Anzahl von Zyklen sind in den Monaten Januar und Februar 2011 zu finden. Bei der detaillierten Analyse wurde festgestellt, dass in beiden Monaten jeweils ein Regentag (6. Januar und 11. Februar 2011) auftrat, an denen über einhundert Zyklen aufgenommen wurden. Auch der 24. März 2009 ist ein solcher Ausnahmetag, wenn auch in geringerem Maße.

Die ermittelte Regenmenge passt recht gut zu den hier aufgezeichneten Zyklen. Abweichungen der Zyklen von der Regenmenge sind im Juli 2009, aber besonders im Januar und Februar 2011 zu erkennen. Bei der Suche nach der Ursache der Abweichungen wurde festgestellt, dass die oben genannten Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet offensichtlich wesentlich stärker waren als in der 33 km entfernten Wetterstation.

Vor der Auswertung der auf der Kläranlage Allfeld aufgenommenen Daten wurde eine klare Abhängigkeit der Anzahl der Zyklen von der Wetterlage erwartet, also im Winter mehr und im Sommer weniger Rechengut, weil die Regenmengen im Winterhalbjahr in

Deutschland höher sind. Dieser Zusammenhang ist den Ergebnissen (Abbildung 6-29) jedoch nicht zu entnehmen, passt aber zu der Überlegung, dass das Rechengut eher gleichmäßig über das ganze Jahr anfällt. In trockenen Perioden wird Rechengut durch die geringe Schleppspannung im Kanal zwischengespeichert und beim nächsten Regen durch mehr Transportwasser bis zum Rechen und zur Waschpresse befördert. Es ist also zu erwarten, dass dieser Vorgang bei mehr Regen eher gleichmäßig, in trockenen Zeiten aber stoßartig erfolgt. Diese Unterscheidung bildet das Diagramm aber nicht ab.

Die Frage nach einer Korrelation von Zyklusanzahl und Rechengutmenge kann durch die vorliegenden Ergebnisse nicht beantwortet werden, weil die Rechengutmenge auf der Anlage nicht genau erfasst wird. Dort werden nur die Anzahl der abgefahrenen Container pro Monat aufgezeichnet. Da der Füllungsgrad bei der Abfuhr jedoch sehr unterschiedlich ist und der Container auch zur Entsorgung des anfallenden Restmülls der Anlage verwendet wird, kann die Rechengutmenge nicht mehr bestimmt werden (MÜLLER, 2012). Nach der monatlichen Auswertung wurde die Verteilung der Betriebszyklen der Waschpresse über die Tageszeit untersucht, um eine Tagesganglinie zu ermitteln. Die Ergebnisse werden in Abbildung 6-29 dargestellt.

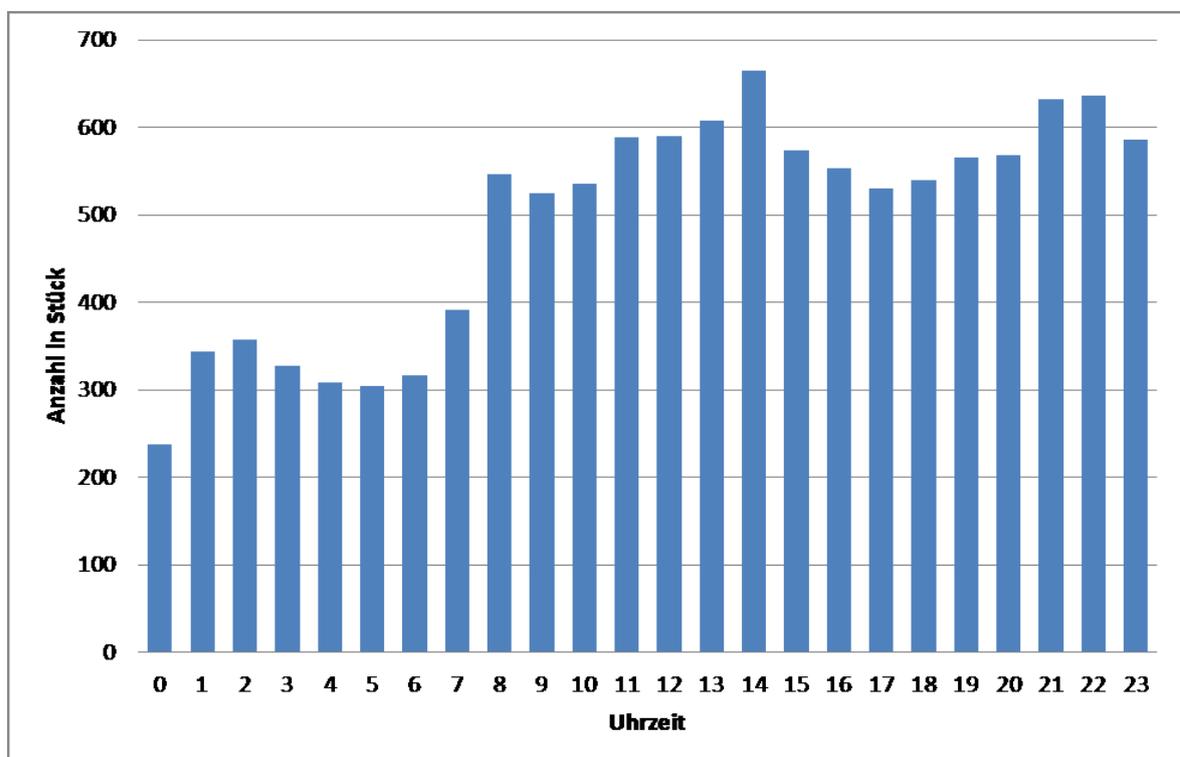


Abbildung 6-29: Anzahl der Zyklen im Beobachtungszeitraum nach Uhrzeit sortiert

Es sind deutlich weniger Zyklen in den Nachtstunden zu verzeichnen, was auch dem normalen Verlauf im Zufluss einer Kläranlage entspricht. Durch die lange Fließzeit dauert

es bis 7:00 Uhr, bis die erste Erhöhung der Anzahl der Zyklen zu erkennen ist. Um 14:00 Uhr ist die Mittagsspitze zu erkennen. Der hohe Zufluss hält bis 24:00 Uhr an. Der Einfluss von Regenereignissen ist nicht zu erkennen.

Zum Vergleich wird nachfolgend ein Tagesgang der Zulaufmessung zur Kläranlage Allfeld an einem Trockenwettertag dargestellt (Abbildung 6-30).

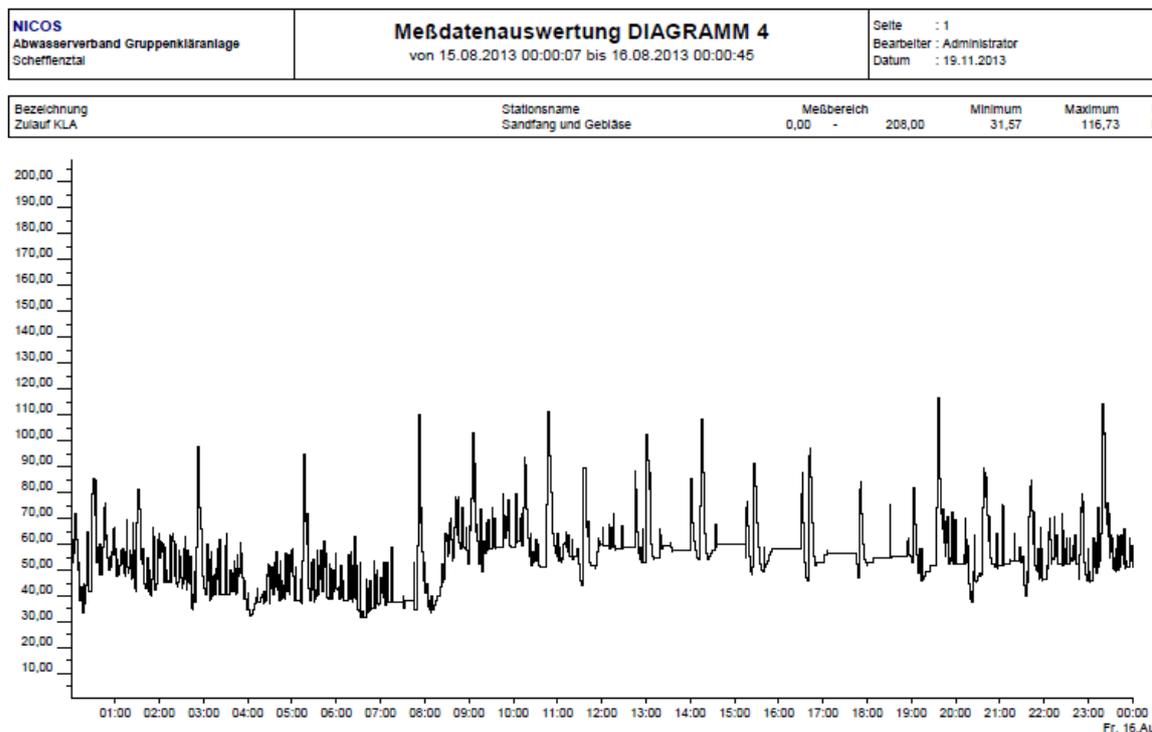


Abbildung 6-30: Zulaufmessung der Kläranlage Allfeld am 15. August 2013 (MÜLLER, 2013)

Der Verlauf der Zulaufmessung ähnelt dem Verlauf der Zyklen in Abbildung 6-30. Auch hier ist ein sprunghafter Anstieg des Zulaufs ab 8:00 Uhr zu erkennen. Nach der Zuflussspitze zwischen 9:00 Uhr und 10:00 Uhr ist eine leichte Verminderung des Zulaufes bis 1:00 Uhr festzustellen. Bis 3:00 Uhr sinkt dann der Zufluss bis zum Minimalwert ab. Der niedrigste Zulauf ist zwischen 3:00 Uhr und 8:00 Uhr zu beobachten.

Neben diesen grundsätzlichen Auswertungen zu der Anzahl der Zyklen und zum Wasserzulauf zur Kläranlage waren die Daten der aufgetretenen Kräfte an den Dehnmessschrauben von besonderer Bedeutung, da diese die Belastung der Maschine abbilden sollten. Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 6-31, folgende Seite) zeigt beispielhaft die Messergebnisse eines Dehnmessstreifens.

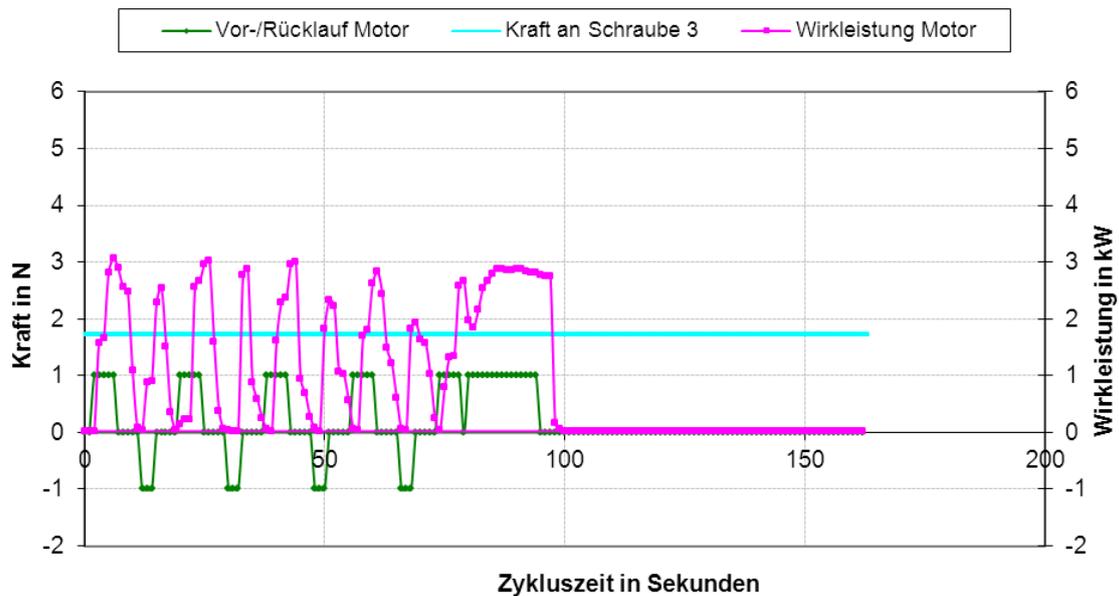


Abbildung 6-31: Datenaufzeichnung Zyklus 1 am 25.05.2010

Die grüne Linie zeigt die Drehrichtung des Motors. Der Wert +1 steht für den Vorwärtsbetrieb, -1 steht für den Rückwärtslauf. Die rote Linie zeigt den Verlauf der Wirkleistung des Motors. Es ist gut zu erkennen, dass sich in der Anlage die Belastung ständig verändert hat. Dennoch konnte an der Schraube 3 (blaue Linie) keine Veränderung beobachtet werden. Auch die anderen Schrauben lieferten keine sinnvollen Werte. Das Messsystem mit den Dehnmessstreifen hat somit versagt.

Die Auswertung der Parameter Druck in der Membran und Wirkleistung des Motors brachte interessante Ergebnisse. Nachfolgend ist beispielhaft die Auswertung eines Datensatzes mit den Parametern Wirkleistung und Druck in grafischer Form dargestellt (Abbildung 6-32, folgende Seite).

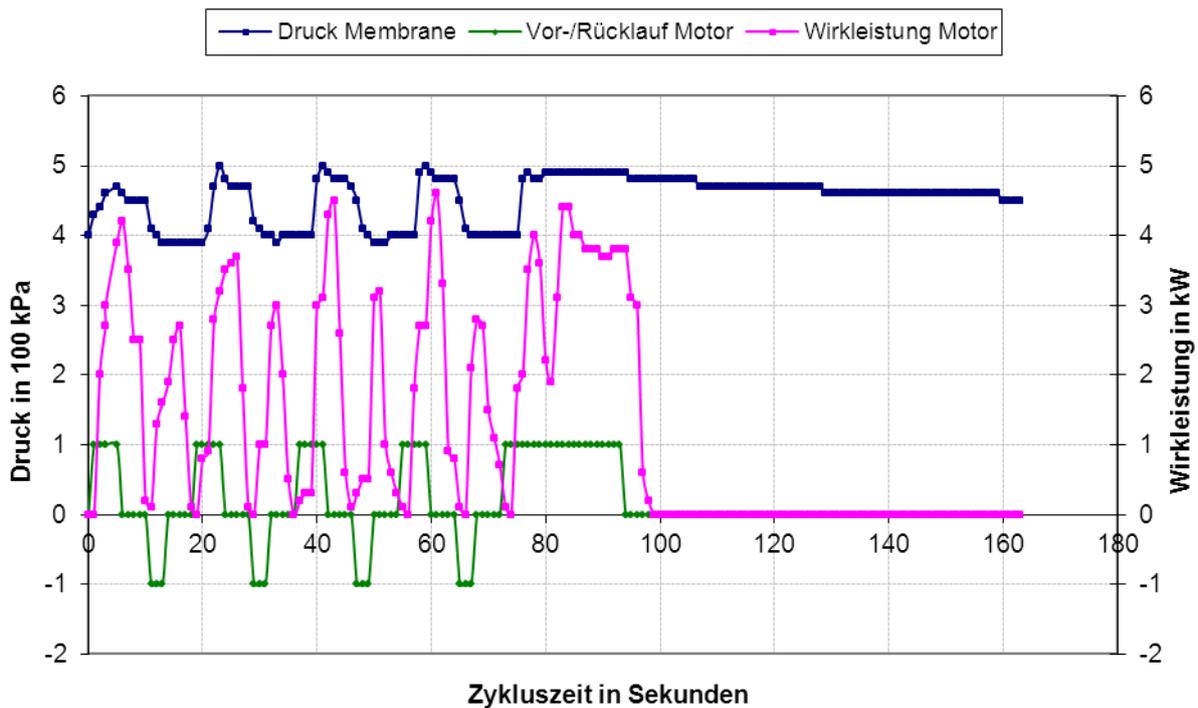


Abbildung 6-32: Trockenwetteraustrag Zyklus 1 am 11.09.2008

Durch den regelmäßigen Vor- und Rückwärtsbetrieb ist zu erkennen, dass die Maschine im Trockenwettermodus betrieben wurde. In diesem Modus liegt der Schwerpunkt der Behandlung auf der Auswaschung und der Entwässerung. Dazu sind in diesem Fall vier Waschzyklen programmiert. Am Ende des Zyklus läuft die Maschine länger in der Vorwärtsbewegung, um das ausgewaschene Rechengut zum Austragsrohr zu befördern. Danach steht die Maschine still, um dem Wasser genügend Zeit zu geben, aus dem Rechengut abzulaufen. Die Vorwärtsbewegung dauerte insgesamt 44 Sekunden. Daraus ergeben sich 11 Umdrehungen in der Vorwärtsbewegung.

Die rote Linie zeigt den Verlauf der Wirkleistung. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Motor in der Vorwärtsbewegung (grüne Linie +1) in der Spitze zwischen 3,7 und 4,6 kW aufnimmt. In der Rückwärtsbewegung (grüne Linie -1) liegt der Wirkstrom zwischen 2,7 und 3,2 kW. Der letzte *Peak* zeigt den Austragmodus der Waschpresse, er dauert länger an. Der höchste Wert der Wirkleistung wurde im Dezember 2010 mit 5,35 kW aufgezeichnet. Die dunkle Linie zeigt den Druckverlauf im Nachpressmodul. Er korreliert sehr gut mit dem Wirkstrom des Motors in der Vorwärtsbewegung. Der höchste Druck erreicht hier 500 kPa.

Im gesamten Beobachtungszeitraum wurde in der Membran der höchste Druck mit 590 kPa im März 2009 aufgezeichnet. Durch den Austragsmodus baut sich im Pressrohr ein höherer Druck auf, der langsam abklingt. Diese Druckentspannung konnte auch bei den Laborversuchen beobachtet werden und wurde in Kapitel 6.2.2 beschrieben.

Im Vergleich zum Trockenwetterdiagramm wird nachfolgend ein Regenwetterdiagramm gezeigt (Abbildung 6-33). Darin wird der Unterschied der Betriebsmodi Trockenwetter – Regenwetter deutlich.

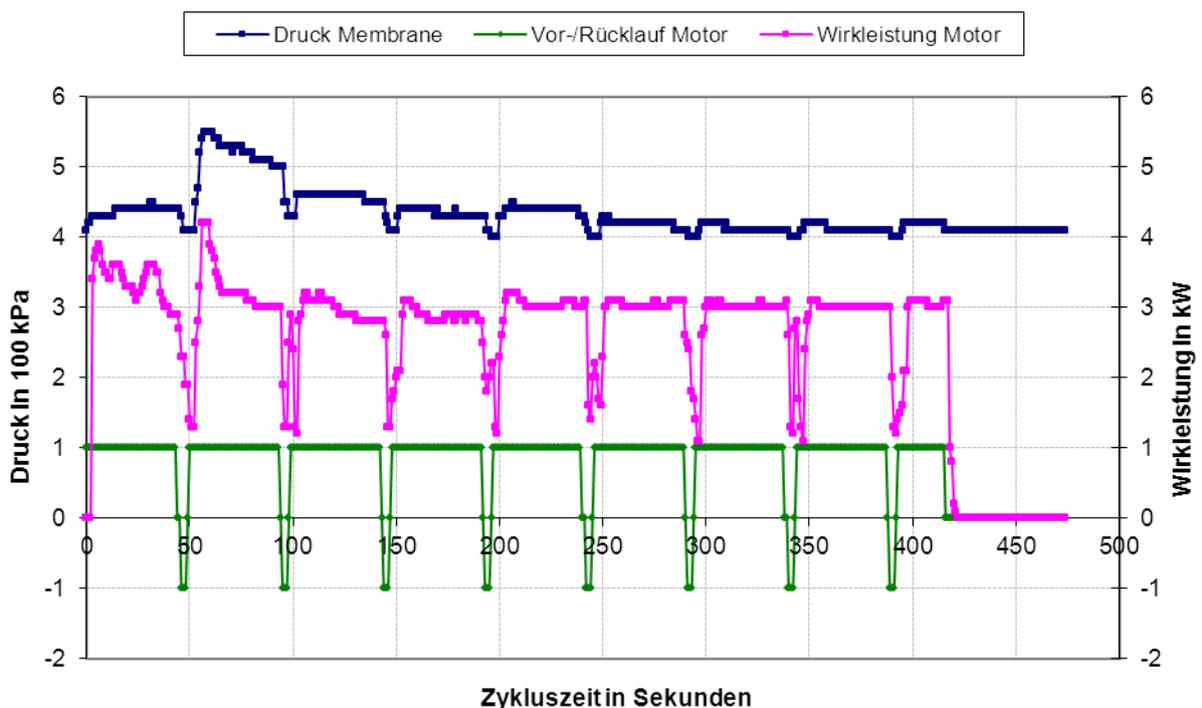


Abbildung 6-33: Regenwetteraustrag Zyklus 6 am 20.12. 2008

Die Waschpresse ist 45 Sekunden in der Vorwärtsbewegung und wechselt dann nur kurz in die Rückwärtsbewegung, um mögliche Blockaden am Spaltsieb zu lösen. Im Vergleich zum Trockenwettermodus sind sowohl der Wirkstrom wie auch der Druck in der Membrane bei Regenwetter deutlich niedriger. Der *Peak* im zweiten Zyklus bei Wirkleistung und Druck könnte von einem sperrigen Gegenstand kommen, der eine größere Reibung verursacht und durch die Deformation der Membran den Druck erhöht. Nachdem der Gegenstand durch das Modul gefördert ist, bleibt der Druck in seinem normalen Bereich.

Im Regenwettermodus ist es wichtig, das bei Regenwetter stoßartig ankommende Rechengut möglichst schnell in den Container zu befördern. Eine schlechtere Auswaschung oder verminderte Entwässerung wird in diesem Fall akzeptiert.

Die Auswertung der Motordrehrichtung ergab, dass der Motor im Berichtszeitraum die Förderschnecke fast 158 Stunden in Vorwärtsrichtung bewegte, und rückwärts 19,5 Stunden. Daraus ergibt sich ein Verhältnis vorwärts/rückwärts von 8,1:1. Bei Trockenwetter ist die Maschine so programmiert, dass der Vorwärtslauf ungefähr die dreifache Zeitdauer hat wie der Rückwärtslauf. Im Regenwettermodus wird der Vorwärtslauf auf das Neunfache erhöht. Dies dient dazu, den höheren Rechengutanfall zu verarbeiten. Damit liegt der Durchschnitt aus der Versuchsdauer von zwei Jahren sehr nahe am Regenwetterbetrieb. Aus den vorgenannten Zahlen kann geschlossen werden, dass die Maschine deutlich häufiger in Regenwetterbetrieb arbeitet. Dieses Ergebnis passt zu der Erfahrung, dass bei Regen das bei Trockenwetter in den Kanälen liegengebliebene Rechengut auf die Kläranlage geschwemmt wird. Durch das bei dieser Anlage vorliegende sehr lange Einzugsgebiet wird das stoßweise Auftreten von Rechengut bei Regenereignissen noch verstärkt.

Da ohne den Motorbetrieb der Waschpresse keine Verdichtung von Rechengut stattfinden kann, steht die Wirkleistung als Regelgröße immer zur Verfügung. Der Druck in der Membran kann jedoch durch eine Undichtigkeit oder wegen der aus verfahrenstechnischen Gründen notwendigen Öffnung der gesamten Querschnittsfläche auch im Betrieb der Maschine auf den Umgebungsdruck abfallen. Dieser Vorgang wird im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 6-34) dargestellt.

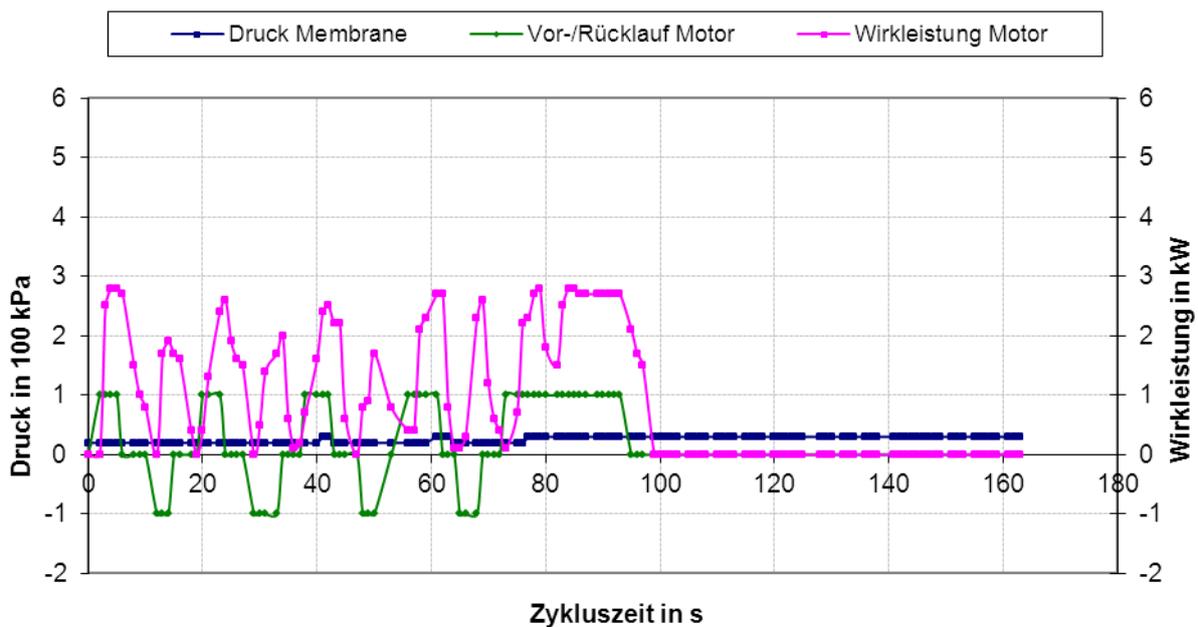


Abbildung 6-34: Trockenwetteraustrag Zyklus 3 am 17. 02. 2009

Es ist gut zu erkennen, dass der Druck in der Membran abgefallen ist. Dadurch ist auch die Wirkleistung des Motors deutlich reduziert. In der Vorwärtsbewegung ist die Wirkleistung nur noch 2,5 bis 2,8 kW, in der Rückwärtsbewegung maximal 2 kW. Auch der Endaustrag liegt deutlich unter 3 kW.

Unter der Annahme, dass der Druck im Zusatzmodul überall gleich ist, also auch am Ausgang zum Austragsrohr, kann aus diesem Druck die Kraft für den Ausgangsquerschnitt berechnet werden:

$$F_{press} = \frac{p_i \cdot d^2 \cdot \pi}{4} \quad \text{Gleichung: 6.6}$$

Für einen in der Membran gemessenen Druck p_i von 500 kPa ergibt sich bei einem Durchmesser d von 250 mm eine Kraft F_{press} von 24,5 kN. Zum Vergleich wird nachfolgend die Presskraft über das Antriebsmoment berechnet:

$$F_{an} = \frac{M_{an}}{r_m} \quad \text{Gleichung: 6.7}$$

Aus dem Antriebsmoment M_{an} von 1846 N und dem mittleren Radius der Schnecke r_m von 0,083 m ergibt sich eine Antriebskraft von 22.241 N. Daraus kann die Presskraft errechnet werden:

$$F_{press} = \frac{F_{an}}{\tan \alpha} \quad \text{Gleichung: 6.8}$$

Mit der Antriebskraft F_{an} von 22.241 N und dem Winkel $\alpha = 13,5^\circ$ ergibt sich eine Presskraft F_{press} von 92,7 kN.

Die Scherfestigkeit τ_{aB} des Rechenguts in der Waschpresse lässt sich ebenfalls aus dem Antriebsmoment berechnen:

$$\tau_{aB} = \frac{F_{an}}{u \cdot s_{RG}} \quad \text{Gleichung: 6.9}$$

Mit der Antriebskraft F_{an} von 22.241 N, der Schnittlänge u von 0,083 m und der angenommenen Schichtdicke s von 0,025 m errechnet sich im Feldtest die Scherfestigkeit von 10.719 kPa. Die Schichtdicke entsteht bei der Entspannung des Rechenguts, die bereits im Kapitel 6.2.2 beschrieben wurde. Der eingesetzte Wert ist eine reine Abschätzung. Eine entsprechende Messung konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden.

Da am Rechengut nicht immer sicher festzustellen ist, in welchem Betriebszustand es behandelt wurde, wurden zur Bestimmung des Trockenrückstandes solche Proben ausgewählt, die in einer längeren Trocken- beziehungsweise Regenperiode genommen wurden. Bei dem Abgleich der Daten aus dem Datenlogger mit dem gemessenen Trockenrückstand konnte ein deutlicher Zusammenhang von Druck und Wirkleistung mit dem TR gefunden werden. Bei Regenwetter wurden Werte des Trockenrückstandes von 37 % gefunden. Bei Trockenwetter über mehrere Tage konnten bis zu 54 % Trockenrückstand erreicht werden.

Da bei Trockenwetter sowohl die Wirkleistung des Motors als auch der Druck in der Membran höher waren als bei Regenwetter, konnte ein Zusammenhang zwischen diesen Indikatoren und dem Trockenrückstand nachgewiesen werden. Damit ist auch klar, dass diese beiden Parameter geeignet sind, als Regelgröße in einem Regelkreislauf für einen vergleichmäßigten Trockenrückstand des Rechenguts zu fungieren. Je nach eingestelltem Sollwert der Wirkleistung oder des Membran-Innendruckes kann der Innendruck so nachgeführt werden, dass der Widerstand der Membran durch die Volumenänderung immer den richtigen Gegendruck zur Förderschnecke erzeugt.

6.3.3 Diskussion Feldtest

Die Waschzyklen der bei diesem Feldtest eingesetzten Rechengutwaschpresse spiegeln die in der nahegelegenen Wetterstation Öhringen gemessenen monatlichen Regenmengen recht gut wider. Es zeigt sich, dass das in der Kanalisation abgelagerte Rechengut durch Regenereignisse der Kläranlage zugeführt wird. Dadurch ergibt sich eine entsprechend höhere Anzahl von Waschzyklen der Waschpresse.

Auch der Einfluss der Tageszeit ist an der Anzahl der Waschzyklen zu erkennen. Während des Nachtzuflusses ist die Zyklenanzahl gering, während sie tagsüber deutlich höher ist. Damit wird der Zusammenhang zwischen Rechengutaufkommen und der Waschpresse dokumentiert.

Der gemessene Innendruck im Zusatzmodul passt gut zum Verdichtungsgrad des Rechengutes. Während bei Trockenwetter und hoher Verdichtung auch der Druck im Modul hoch war, sank dieser Druck bei Regenwetter und damit niedrigerer Verdichtung ab. Allerdings muss bei einem Einsatz dieses Zusatzmoduls der Druck in der Membran laufend überwacht werden, denn bei einem ungewollten Druckabfall kann die Anpassung des Widerstandes an das ankommende Rechengut nicht mehr erfolgen.

Die Messung der Wirkleistung des Motors der Rechengutwaschpresse ist nach den Versuchsergebnissen ebenfalls geeignet, um den Gegendruck zur Transportschnecke und damit den Verdichtungsgrad zu regulieren. Er bietet sich auch für andere entsprechende Zusatzmodule zur Veränderung des Widerstandes an, bei denen keine Druckmessung als Führungsgröße vorliegt.

Da die Spitze der Transport- und Verdichtungsschnecke nicht vollflächig, sondern mit einer schmalen Fläche die Presskraft aufbringt, wird die für die Entwässerung notwendige Pause zwischen dem Aufbringen der Presskraft bei einer Schneckenmaschine durch die Drehbewegung der Spitze realisiert. Allerdings ist die Pause zwischen den Zyklen, bedingt durch die Drehzahl der Maschine, nur sehr kurz. In den Trockenwetterphasen sind dafür genügend große Wartezeiten *zwischen* den Zyklen vorhanden, in denen das Wasser austreten kann. Im Regenwetterfall kann die Maschine jedoch im Dauerbetrieb laufen; dann sind diese Entspannungspausen nicht vorhanden. Solch ein Dauerbetrieb wirkt sich negativ auf die Entwässerungsleistung aus, weil das Wasser dann nicht genügend Zeit hat, aus dem Rechengut herauszufließen.

Die nicht erfolgreiche direkte Messung der Zugkräfte auf die Dehnmessschrauben durch die Presskräfte der Schnecke liegt offensichtlich daran, dass nur 3 von 12 Schrauben der Flanschverbindung mit Dehnmessstreifen ausgerüstet wurden. Durch die empfindliche Messung und das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten konnten so keine sinnvollen Daten ermittelt werden. Bei der Suche nach möglichen Ursachen für die nicht interpretierbaren Messungen der Dehnmessstreifen wurde festgestellt, dass sich im laufenden Betrieb die Schrauben aus dem Werkstoff 1.4401 in unterschiedlichem Maß dehnen. Trotz mehrfacher Angleichung der Schraubenkräfte konnte dieses Verhalten nicht unterbunden oder beeinflusst werden. Höchstwahrscheinlich hätte man dieses Problem dadurch beheben können, dass alle Schrauben mit Dehnmessstreifen versehen werden. Dieser Ansatz konnte aber im Rahmen des Projekts nicht verwirklicht werden.

Die anderen Messwerte unterliegen aufgrund der einfachen Messung und der direkten Speicherung im Datenlogger einer geringen Fehlerquote und können damit als sehr zuverlässig eingestuft werden.

Ein Regelungskonzept, das den Gegendruck mit der Wirkleistung des Motors oder des Innendrucks des verwendeten Zusatzmoduls verbindet, konnte aus Zeitgründen nicht mehr umgesetzt und erprobt werden. Es bleibt späteren Untersuchungen überlassen, ein solches Konzept zu erstellen und zu testen. Von besonderem Interesse sollte dabei sein, wie gut die Wirkleistung den Trockenrückstand des Rechenguts abbilden kann.

6.4 Diskussion Rechengutentwässerung

Zur Minimierung der Entsorgungskosten ist ein gleichmäßiger, möglichst hoher Trockenrückstand des Rechenguts wünschenswert. Dies kann aber auf Grund der unterschiedlichen Randbedingungen nur durch die Anpassung des Entwässerungsvorgangs erreicht werden. Allerdings ist es dazu notwendig, das Entwässerungsverhalten von Rechengut zu kennen. Die in Kapitel 6 durchgeführten Untersuchungen sollten deshalb dieses Entwässerungsverhalten von Rechengut erstmals beschreiben und diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen eines Feldtestes vergleichen.

Der Entwässerungsvorgang durch mechanische Verdichtung wird offensichtlich schlechter bei steigender Stempelgeschwindigkeit. Deshalb wurden die Laborversuche mit einer Geschwindigkeit von 15 mm / min durchgeführt. Bei einer Schneckenpresse erfolgt die Verdichtung mit einer Geschwindigkeit von 38,4 mm / s. Dadurch ist eine deutlich schlechtere Verdichtung des Rechenguts zu erwarten, Diese höhere Verdichtungsgeschwindigkeit wird, zumindest im Trockenwettermodus, durch die sehr lange Wartezeit zwischen den Zyklen kompensiert.

Die mehrfache Verdichtung von Rechengut mit dem gleichen Maximaldruck erbrachte ebenfalls eine höhere Verdichtung. Bei den Laborversuchen wurden bis zu 11 Pressungen mit der gleichen Maximalkraft durchgeführt. Die im Feldtest eingesetzte Rechengutwaschpresse hat im Trockenwettermodus rechnerisch 14 Verdichtungs Vorgänge, also eine vergleichbare Anzahl, durchgeführt. Im Endergebnis ist die in den Laborversuchen erzielte Verdichtung in der gleichen Größenordnung wie die Verdichtung im Feldtest.

Die Durchströmungsversuche im Labor haben gezeigt, dass sich mit steigender Verdichtung des Rechenguts der Massenstrom reduziert. Daraus kann geschlossen werden,

dass das Presswasser mehr Zeit braucht, wenn die Verdichtung höher wird oder der Fließweg länger ist. Dies lässt sich mit Beobachtungen aus der Praxis bestätigen, dass bei sonst gleichen Bedingungen die Entwässerung in größeren Maschinen durchweg einen geringeren Entwässerungsgrad erbringt.

Insbesondere hat der Feldtest in Allfeld aufgezeigt, dass zur Erzielung eines gleichmäßigen und hohen Entwässerungsgrades eine Anpassung des Gegendrucks durch ein entsprechendes Modul KVR in Verbindung mit einer Regelung notwendig und möglich ist.

Die ermittelte Scherfestigkeit aus den Laborversuchen liegt deutlich um den Faktor 500 niedriger als die berechnete Scherfestigkeit der Rechengutwaschpresse. Allerdings können die Ergebnisse zur Scherfestigkeit nicht direkt miteinander verglichen werden, weil in den Laborversuchen die Presskraft auf das Rechengut deutlich niedriger war. Durch den sich andeutenden exponentiellen Verlauf des Verhältnisses von Presskraft und Scherfestigkeit im Laborversuch kann eine ähnliche Größenordnung der Scherkraft wie in der Waschpresse abgeschätzt, aber nicht bestätigt werden. Die Ermittlung entsprechender Vergleichswerte könnte in einer nachfolgenden Arbeit erfolgen.

Aus den oben angeführten Vergleichen ist zu entnehmen, dass bisher noch nicht bekanntes Wissen um Vorgänge des Entwässerungsvorgangs von Rechengut in der Praxis umgesetzt worden ist. Diese Umsetzung erfolgte höchstwahrscheinlich durch Betriebserfahrungen der Hersteller und Betreiber mit den Prototypen der eingesetzten Maschinen.

7 TROCKENRÜCKSTAND VON RECHENGUT

Weder die Ergebnisse der im vorigen Kapitel beschriebenen Experimente im Labor noch diejenigen des Feldtests lassen einen Rückschluss auf den durchschnittlich zu erwartenden Trockenrückstand von Rechengut aus Waschpressen in Kläranlagen zu. Aus diesem Grund wurde bereits im Jahr 2007 eine langfristige Untersuchung gestartet, um den durchschnittlichen Trockenrückstand von Rechengut auf deutschen Kläranlagen zu ermitteln. Ziel war es, eine breite Datenbasis für die in der Praxis erzielten Trockenrückstände zu erhalten. Im folgenden Kapitel werden die Vorgehensweise, die Probenahme (7.2), die Analyse (7.3), die statistische Auswertung (7.4) und die Ergebnisse dieser Langzeit-Untersuchung (7.5) dargestellt. Weiterhin werden zusätzlich die Ergebnisse der Datenaufzeichnungen zum Trockenrückstand von Rechengut des Lehr- und Forschungsklärarwerks Büsnau (7.6) beschrieben und diskutiert.

7.1 Darstellung der Vorgehensweise

Die Datenerhebung zur Ermittlung des durchschnittlichen Trockenrückstands erfolgte durch die Sammlung und Analyse von Rechengutproben. Diese wurden sowohl zeitlich wie auch örtlich zufällig entnommen. Sie sind somit Zufallsstichproben und liefern nur eine Momentaufnahme des jeweiligen Trockenrückstands. Einflüsse wie das Wetter, die Jahreszeit, aber auch die Tageszeit beeinflussen das Rechengut in Menge und Zusammensetzung in erheblichem Maße. Um die Auswirkungen dieser Einflüsse untersuchen zu können, sollten so viele Proben wie möglich gesammelt werden. Denn bei einer genügend großen Anzahl von Proben führt die Stichprobe dazu, dass sich Messfehler und Systemunterschiede teilweise gegeneinander aufheben und sich ein realitätsnahes Bild ergibt (BROMBACH, 2003: 442).

Um die Auswirkungen äußerer Einflüsse wie Zulaufschwankungen oder Betriebsunterbrechungen möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, Proben zeit-, volumen- oder ereignisproportional zu entnehmen. Dieses Vorgehen kann auf Grund der Gleichzeitigkeit vieler Ereignisse auf Kläranlagen nur in einem automatisierten Verfahren realisiert werden. Für Rechengut scheidet eine solche automatische Probenahme allerdings aus, da in der Praxis keine geeigneten Analysegeräte verfügbar oder gar installiert sind. Deshalb bleibt für die angestrebte Untersuchung nur der Weg, die Proben über einen langen Zeitraum durch eine manuelle Entnahme auf Kläranlagen zu sammeln. Da möglichst viele Proben untersucht werden sollten, wurde ein Industriepartner gesucht und

gefunden, der im Bereich des Siedlungswasserbaus tätig ist. Dessen Mitarbeiter im Außendienst übernahmen die Aufgabe, die Proben zu sammeln. Im Labor des Unternehmens wurden diese Proben analysiert. Dadurch konnten viele Proben mit weiter Streuung gesammelt werden.

7.2 Probenahme

Die Planung und Vorbereitung der Sammlung und Analyse der Proben für die Untersuchung des Rechenguts auf Kläranlagen erfolgte im Rahmen einer Studienarbeit an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Mosbach (früher: Berufsakademie Mosbach)(GRAMLICH, 2007).

Die Mitarbeiter der Firma KUHN GmbH in Höpfigen, die im Außendienst tätig sind (Monteure, Projektleiter, Vertriebsmitarbeiter), erhielten den Auftrag, von möglichst vielen Kläranlagen in Deutschland Rechengutproben aus den Containern zu entnehmen (Abbildung 7-1, folgende Seite) und im Labor des Unternehmens abzugeben. Zu diesem Zweck wurde im Vorfeld eine Schulung der Mitarbeiter durchgeführt. Diese erhielten die Anweisung, zunächst beim jeweiligen Betriebspersonal um eine Erlaubnis zur Entnahme einer Rechengutprobe zu bitten. Bei positivem Bescheid sollte dann eine Probe des vorgefundenen Rechengutes entnommen werden. In der Schulung wurde ausdrücklich vermieden, dem zu sammelnden Rechengut positive oder negative Eigenschaften oder Merkmale zuzuschreiben. Außerdem wurde verlangt, dass eine saubere Dokumentation der Probenahme durch den Mitarbeiter erfolgte, der die Probe entnommen hatte. Nicht zuletzt wurden den Mitarbeitern entsprechende Hinweise zur richtigen Hygiene gegeben.

Zur Probenahme wurden alle Firmenfahrzeuge mit der notwendigen Ausrüstung versehen: Diese bestand aus Datenblättern, verschiedenen Stiften, verschließbaren Kunststoffbeuteln, Einweghandschuhen und einem verschließbaren Kunststoffbehälter, in dem die gefüllten Kunststoffbeutel aufbewahrt werden konnten.

Leider war es nicht möglich, die Proben direkt vor Ort zu untersuchen. Auch eine Kühlung der Proben war nicht möglich. Deshalb wurden die Mitarbeiter angewiesen, die Proben zeitlich so zu entnehmen, dass direkt danach die Fahrt zurück in das Unternehmen angetreten wurde. Dort wurden die Proben zusammen mit der Dokumentation in einem extra dafür im Freien aufgestellten Schrank deponiert.



Abbildung 7-1: Probenahme aus einem Rechengutcontainer

Die Dokumentation der Probenahme erfolgte über ein Datenblatt (Abbildung 7-2). Um systematische Fehler möglichst zu vermeiden, wurde jedes Datenblatt mit einer eindeutigen Probenahmenummer vorab gekennzeichnet. Neben den allgemeinen Daten zu Zeit, Ort und Art des Zuflusses wurden auch die genaue Stelle der Probenahme und eine erste neutrale Beurteilung des Rechenguts nach vorgegebenen Kriterien abgefragt. Jedes Dokument wurde zudem unterzeichnet, so dass eine Rückverfolgung der einzelnen Proben zum Probenehmer und zur Zeit und zum Ort der Probenahme jederzeit möglich war.

<u>Rechengut - Probenahme</u>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: fit-content;"> Nummer: PN 07-00677 </div>	
<p>Wichtig: Bitte das Datenblatt sorgfältig ausfüllen! Unbekannte Daten bitte beim Klärpersonal erfragen! Das „Probenahme-Tütchen“ muss mit der PN-Nummer und dem entsprechenden Zusatz „1“ (Rechengutentnahme nach dem Rechen) oder „2“ (Rechengutentnahme nach der Behandlung) versehen werden (Bsp: PN 07/12345-1). Bei 2 Probenahmen (z.B. bei 2 Rechenstraßen oder bei Entnahme an beiden genannten Stellen) müssen auch 2 Blätter ausgefüllt werden!</p>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Allgemeine Daten</p> <p>Name der Kläranlage: <u>Bad Mergentheim</u></p> <p>PLZ: <u>97990</u> Ort: <u>Bad Mergentheim</u></p> <p>Lufttemperatur: ca. <u>30</u> °C</p> <p>Wetterlage: Schnee () ; Regen () ; Regennachlauf () ; Trockenwetter <input checked="" type="checkbox"/></p> </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Rechengut - Probenahme</p> <p>Stelle der Probenahme: (Bitte ankreuzen!)</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>Farbe: Grau () ; Hellgrau <input checked="" type="checkbox"/> ; Dunkelgrau () ; Braun () ; Hellbraun () ; Dunkelbraun () ; Schwarz ()</p> <p>Konsistenz: Fest gepresst <input checked="" type="checkbox"/> ; Locker/ Feucht () ; Fettig/ Schmierig ()</p> <p>Betriebsstunden:</p> <p>Rechen: _____ h Behandlungsmaschine: _____ h</p> </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Probenehmer</p> <p>Datum: <u>20.6.07</u></p> <p>Name: <u>J. Reichert</u> Unterschrift: <u>Büchtem</u></p> </div>	

Abbildung 7-2: Beispiel eines ausgefüllten Datenblattes

Die zu der Dokumentation gehörenden Kunststoffbeutel wurden ebenfalls gleich bei der Probenahme mit Hilfe eines Faserstiftes mit der entsprechenden Probenahmenummer versehen (Abbildung 7-3). Somit war eine eindeutige Zuordnung zwischen Probe und Dokumentation gegeben.

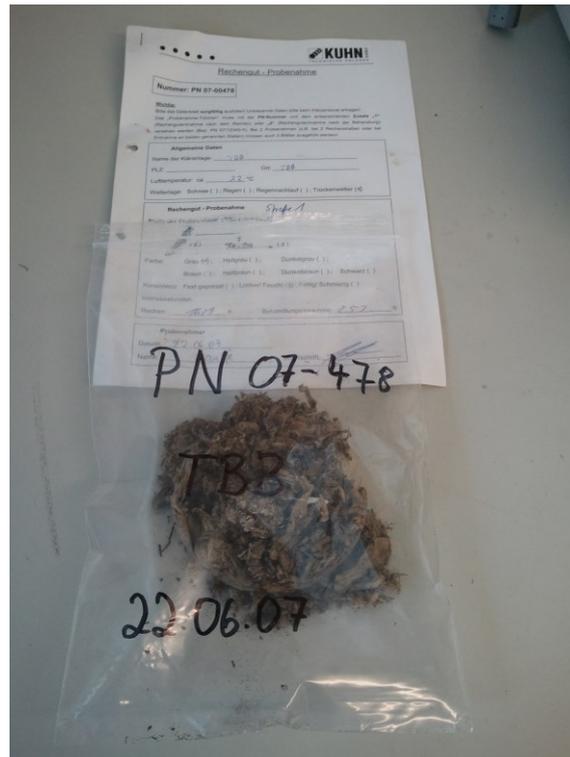


Abbildung 7-3: Vollständig gekennzeichnete und dokumentierte Rechengutprobe

Nachdem im ersten Schritt die Proben gesammelt worden waren, folgte deren Analyse in der Regel am nächsten Tag im Labor der Firma Kuhn. Um zu vermeiden, dass in den Proben der Gärprozess begann, wurden alle Proben so schnell wie möglich getrocknet und dabei auch der Trockenrückstand ermittelt. Die getrockneten Proben wurden gesammelt und für weitere Untersuchungen, zum Beispiel zur Bestimmung des Glühverlusts, verwendet.

Der Trockenrückstand ist in der Praxis einer der wichtigsten Kennwerte von Rechengut. Er gibt Auskunft über die Frage, wie viel Wasser beim Transport mit befördert werden muss (Kapitel 1.2).

Zur Validierung der Ergebnisse und zur Erhebung von möglicherweise relevanten Daten, wie die Art der Kanalisation oder die Zahl der angeschlossenen Einwohner an die Kläranlage, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Umfrage beim Betriebspersonal mit einem Fragebogen gestartet. Um die Gestaltung und den Inhalt des Fragebogens zu testen, wurden zunächst nur wenige Exemplare direkt an das Betriebspersonal verschickt (GRAMLICH 2007: Anhang V). Leider war der Rücklauf sehr gering. Deshalb wurde eine telefonische Nachfrage bzw. Neubefragung begonnen. Aber auch durch diese Interviews

konnten aufgrund der geringen Mitwirkungsbereitschaft seitens des Betriebspersonals nur wenig zusätzliche Daten erhoben werden.

Die mangelnde Mitwirkungsbereitschaft begründete sich sehr oft darin, dass der zuständige Mitarbeiter nicht erreichbar war oder er für die Befragung keine Zeit hatte. Häufig wurde auch die Aussage getroffen, dass die Daten nicht greifbar seien und eine Recherche zu viel Zeit in Anspruch nähme. Es verfestigte sich beim Verfasser nach und nach der Eindruck, dass die genannten Gründe auf großen Vorbehalten oder Misstrauen basieren. Die kontaktierten Personen befürchteten offensichtlich den Missbrauch der Daten oder auch Nachteile für sich beziehungsweise für ihre Anlage, wenn sie möglicherweise negative Daten oder Ergebnisse der Anlage an fremde Dritte weitergeben.

7.3 Analyse der gesammelten Proben

Für die Analyse der gesammelten Rechengutproben standen entsprechende Messgeräte im Labor der Firma Kuhn zur Verfügung. Es wurden auch Wiederholungsanalysen durchgeführt, um die ermittelten Ergebnisse zu überprüfen. Außerdem wurde in Einzelfällen versucht, das Rechengut zu teilen und im Labor des Unternehmens wie auch im Labor der jeweiligen Kläranlage zu untersuchen. Die Vergleichsmessungen ergaben eine gute Übereinstimmung der Analyseergebnisse.

7.3.1 *Trockenrückstand TR*

Der Begriff „Trockenrückstand“ (TR) wird definiert als „der Masseanteil einer Probe, der zurückbleibt, wenn die Probe, (...) einem Trocknungsvorgang bei 105 °C unterzogen wird“ (DIN, 2007a: 5).

Zur Bestimmung des Trockenrückstands wird eine Probe bis zur Massenkonstanz bei 105 °C in einem Tiegel oder einer Schale getrocknet. Die Berechnung des Trockenrückstands erfolgt nach folgender Gleichung (DIN, 2007a: 8):

$$w_{dr} = \frac{(m_c - m_a)}{(m_b - m_a)} \cdot f \quad \text{Gleichung 7.1}$$

Dabei ist w_{dr} der Trockenrückstand der Probe, angegeben als Massenanteil in Prozent (%), m_a die Masse der leeren Schale in Gramm (g), m_b die Masse der Schale mit der Probe in Gramm (g), m_c die Masse der Schale mit der getrockneten Probe in Gramm (g). Der Faktor f dient zu Umrechnung. Ist $f = 100$, wird das Ergebnis als Massenanteil in Prozent (%) angegeben (DIN, 2001a: 8).

7.3.2 Glühverlust GV

Der Glühverlust (GV) wird definiert als „Änderung der Masse als Ergebnis der Erhitzung einer Probe unter festgelegten Bedingungen. Der Glühverlust wird in Prozent des Gewichtes der Trockenmasse angegeben“ (DIN, 2007c: 4).

Der Glühverlust wird durch Glühen in einem Glühofen bestimmt. Dabei wird die getrocknete Probe bei 550 °C bis zur Massenkonstanz geglüht. Die Berechnung des Glühverlustes erfolgt nach folgender Gleichung (DIN, 2007c: 8):

$$W_{LOI} = \frac{m(d) - m(c)}{m(d) - m(a)} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 7.2}$$

Darin ist W_{LOI} der Glühverlust der Probe in Prozent des Trockenrückstandes, $m(d)$ die Masse des Tiegels mit der getrockneten Probe in Gramm, $m(a)$ die Masse des leeren Tiegels in Gramm, $m(c)$ die Masse des Tiegels mit dem Glührückstand in Gramm (DIN, 2007c: 8). Der Faktor 100 dient nur der Umrechnung des Ergebnisses in Prozent. Er wurde hier angegeben, um die Formel genau aus der Norm zu zitieren.

Der Glührückstand W_{ROI} (in Prozent) wird aus dem Glühverlust nach folgender Gleichung berechnet (DIN, 2007c: 9):

$$W_{ROI} = 100 - W_{LOI} \quad \text{Gleichung: 7.3}$$

7.4 Statistische Auswertung

Allein für die Ermittlung des Trockenrückstands von verschiedenen Kläranlagen wurden insgesamt 709 Rechengutproben in Deutschland gesammelt. Zusätzlich wurden 162 Rechengutproben auf der Kläranlage Büsnau entnommen. Alle Proben wurden auf ihren Trockenrückstand analysiert. Die ermittelten Daten wurden statistisch ausgewertet. Zur Berechnung der grundlegenden statistischen Werte (Minimum, Maximum, Median und Konfidenzintervall) wurde bis 2011 das Statistikprogramm IBM SPSS Statistics®, Version 19 (IBM, Armonk, USA) und ab 2011 das Statistikprogramm R, Version 2.13.1 (Open Source Software, The R Foundation for Statistical Computing) verwendet.

Alle Daten wurden der Statistischen Beratungsstelle der Universität Würzburg in Form von Microsoft Excel®-Tabellen (Microsoft Corporation, Redmond, USA) übergeben und dort ausgewertet. Offensichtliche Zuordnungsfehler oder Übertragungsfehler wurden nach einer Plausibilitätskontrolle korrigiert oder eliminiert.

Zur Verdeutlichung von Häufigkeitsverteilungen wurden mehrere Diagrammart verwendet. Die Histogramme zeigen die Häufigkeitsverteilung einer diskreten Variablen wie dem Trockenrückstand. Auf der Abszisse werden die Kategoriengrenzen und auf der Ordinate die Häufigkeiten (absolut oder prozentual) aufgetragen (BORTZ, 1989: 42). Die aus den gleichen Daten gewonnenen Summenlinien-Abbildungen ermöglichen die Ermittlung der kumulierten Häufigkeiten des Trockenrückstands (TIEDE, 2001: 36). Damit kann zum Beispiel die Frage beantwortet werden, welcher Anteil der Proben einen bestimmten Mindest-Trockenrückstand hat. Weiterhin werden die Daten in Form eines Boxplots verwendet. Der Boxplot verdeutlicht die Verteilung der Daten in einer anderen Form. Der Querstrich in der Mitte der Box ist der Median (Zentralwert). Er ist im Gegensatz zum arithmetischen Mittel nicht stark von Ausreißern beeinflusst. Die Box umfasst die mittleren 50% der Beobachtungen. Die Whisker (Ausläufer) markieren die Streuung der Daten. Sie haben maximal die 1,5-fache Länge der Box und enden an einer Beobachtung. Als Ausreißer sind die Beobachtungen definiert, die außerhalb der Whisker liegen. Sie sind mit einem Kreis markiert (DWA, 2004: 42). Das Streudiagramm ist die grafische Veranschaulichung von Wertepaaren. Dabei werden der zeitliche Verlauf auf der Abszisse und der Trockenrückstand auf der Ordinate aufgetragen. So können das allgemeine Wertniveau des Trockenrückstands und gewisse zeitliche Tendenzen der Punktwolke gedeutet werden (TIEDE, 2001: 43) Zur Erzeugung dieser Abbildungen wurde das Statistikprogramm R verwendet (s.o.).

Als Signifikanztests wurden der Wilcoxon-Rangsummen-Test und der Spearman-Rangkorrelation-Test verwendet. Bei beiden Tests wurde ein Signifikanzniveau α von 5 % festgelegt. Mit diesem Niveau wird die Irrtumswahrscheinlichkeit p verglichen. Für $p \leq \alpha$ gilt das Ergebnis als signifikant.

Für die Untersuchung des potenziellen Einflusses einer Umbaumaßnahme auf einer Kläranlage auf den Trockenrückstand wurde der Wilcoxon-Test angewandt, der den gegenseitigen Einfluss zwischen zwei unabhängigen Stichproben ermittelt (Mann-Whitney-U Test). Dabei wird die Rangsumme W gebildet, die es ermöglicht, nicht nur die Richtung sondern auch die Höhe der Differenzen der Stichproben festzustellen (BORTZ, 2008: 256). Die Messwerte müssen numerisch sein. Eine Normalverteilung ist nicht notwendig. Für den Wilcoxon-Test wurde wiederum das Statistikprogramm R verwendet.

Zur Prüfung der Stärke stochastischer Zusammenhänge zwischen dem Trockenrückstand und dem Glühverlust im Rechengut oder dem Einfluss des Umbaus in der Grobrechen auf

die Feinrechen wurde der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient (r_s) verwendet. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist ein statistisches Maß, mit dem man Zusammenhänge zwischen metrischen Variablen beschreiben kann. Sie setzt keine normalverteilten Daten voraus und deckt auch nichtlineare Zusammenhänge auf. Die Enge des Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen charakterisiert der Korrelationskoeffizient r_s . Er kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Ist der Koeffizient nahe ± 1 , so ist ein starker Zusammenhang vorhanden. Werte nahe 0 deuten auf keinen Zusammenhang hin. Ein negativer Wert kennzeichnet eine gegenläufigen, ein positiver Wert einen gleichsinnigen Zusammenhang. Nach Berechnung des Korrelationskoeffizienten, wird im weiteren Verlauf verfolgt, ob sich die ermittelten Werte vom p-Wert unterscheiden, so dass man hierdurch eine Aussage über die Signifikanz des Zusammenhangs zwischen den Variablen treffen kann. (KELLER, 2012). Für den Spearman-Test wurde ebenfalls das Statistikprogramm R benutzt.

7.5 Ergebnisse der Langzeituntersuchungen

Insgesamt wurden 709 Proben aus 167 Kläranlagen zur Auswertung herangezogen und der TR bestimmt. Im folgenden Histogramm (Abbildung 7-4) ist die Verteilung der ermittelten Trockenrückstände dargestellt.

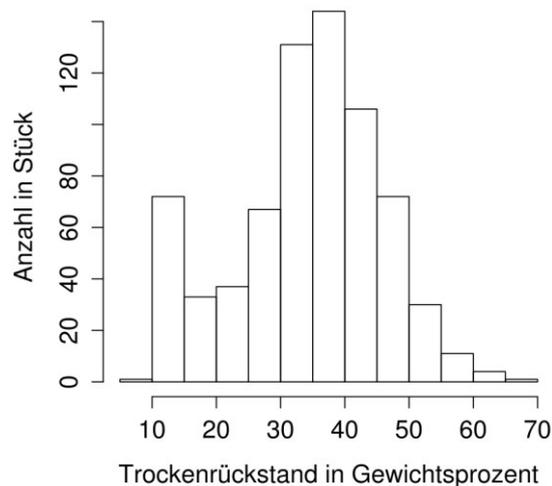


Abbildung 7-4: Histogramm des Trockenrückstands aller Proben (n = 709)

Der Mittelwert des Trockenrückstands ist 34,2 %, die Standardabweichung 11,3 %. Der Median beträgt 35,3 %: Der kleinste Wert ist 9,9 %, der größte Wert 66,7 %. Die Abbildung zeigt eine deutliche bimodale (zweigipflige) Verteilung des TR mit einer Verdichtung im Bereich von 40 % (BORTZ, 1989 S. 44). Die Asymmetrie wird von einer sehr auffälligen Spitze des TR unter 20 % verursacht, deren Ursache in Abbildung 7-8 deutlich wird. Auch aus der Summenlinie (Abbildung 7-5) ist der unregelmäßige Verlauf zu erkennen:

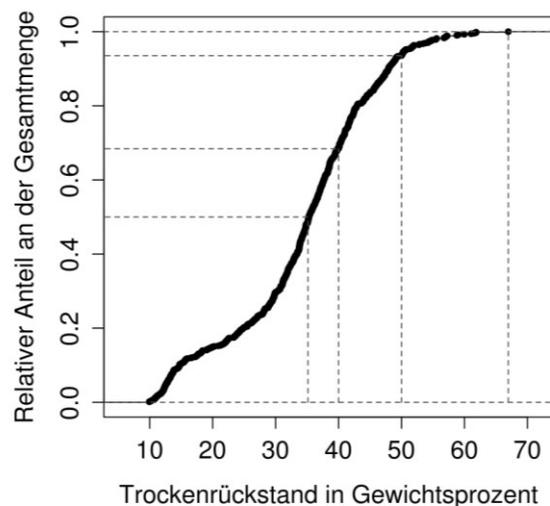


Abbildung 7-5: Summenlinie des TR aller Proben (n = 709)

Die Summenlinie zeigt, dass 50 % der Proben einen Trockenrückstand von 35 % oder kleiner haben. 95 % der Proben haben einen Trockenrückstand von 50 % oder kleiner. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass nur 5 % der Proben einen Trockenrückstand von 50 % oder größer haben. Bei der Untersuchung der jeweiligen Daten wurde festgestellt, dass die Ergebnisse unter 20 % von denjenigen Analysen stammten, die von unbehandelten Proben gemacht wurden. Dieser Zusammenhang ist sehr gut im nachfolgenden Boxplot (Abbildung 7-6) zu erkennen.

Im nachfolgenden Text werden mit dem Begriff „unbehandelt“ die Proben bezeichnet, die direkt vom Rechen beziehungsweise aus den Sammelbehältern von Rechen ohne zusätzliche Behandlung entnommen wurden. Diese Proben wurden bei der Kennzeichnung des Probebeutels mit der Endnummer „1“ versehen. „Behandeltes“ Rechengut ist demnach Rechengut, welches im beziehungsweise nach dem Rechen noch gepresst und/oder vorher gewaschen wurde. Dies wurde durch die Endnummer „2“ gekennzeichnet. Der Entnahmeort wurde auch in der Dokumentation festgehalten. Dadurch konnten Übertragungsfehler zwischen der Probenahme und der Dokumentation sehr schnell aufgedeckt werden.

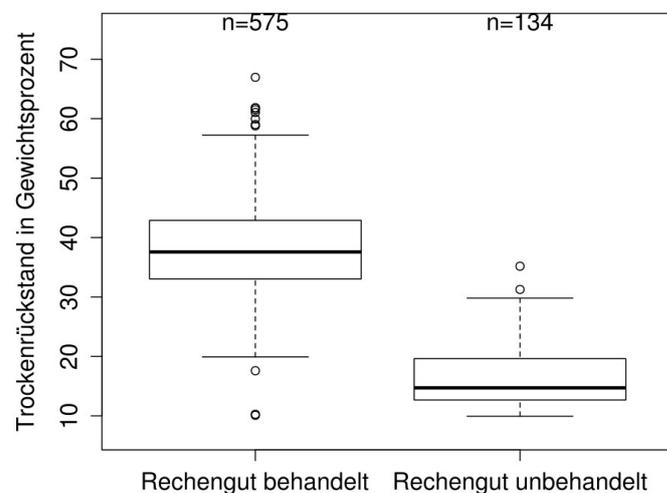


Abbildung 7-6: Boxplot des TR aller behandelten und unbehandelten Proben (n = 709)

In der Abbildung ist auf der linken Seite der Trockenrückstand der behandelten Rechengutproben, rechts der Trockenrückstand der unbehandelten Proben aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Trockenrückstand der behandelten Rechengutproben deutlich höher ist als der TR des unbehandelten Rechenguts. Daraus wird deutlich, dass die Behandlung, also die Entwässerung mit oder ohne Auswaschung, einen sehr guten

Behandlungserfolg mit einem daraus resultierenden stark reduziertem Volumen zur Folge hat.

7.5.1 Unbehandeltes Rechengut

Die $n = 134$ Proben von unbehandeltem Rechengut (18,9 % Prozent) wurden auf insgesamt 43 Kläranlagen gesammelt und der Trockenrückstand analysiert. Nachfolgend werden die zeitliche Verteilung der Einzelergebnisse und deren Trockenrückstände des unbehandelten Rechenguts dargestellt (Abbildungen 7-7 bis 7-10).

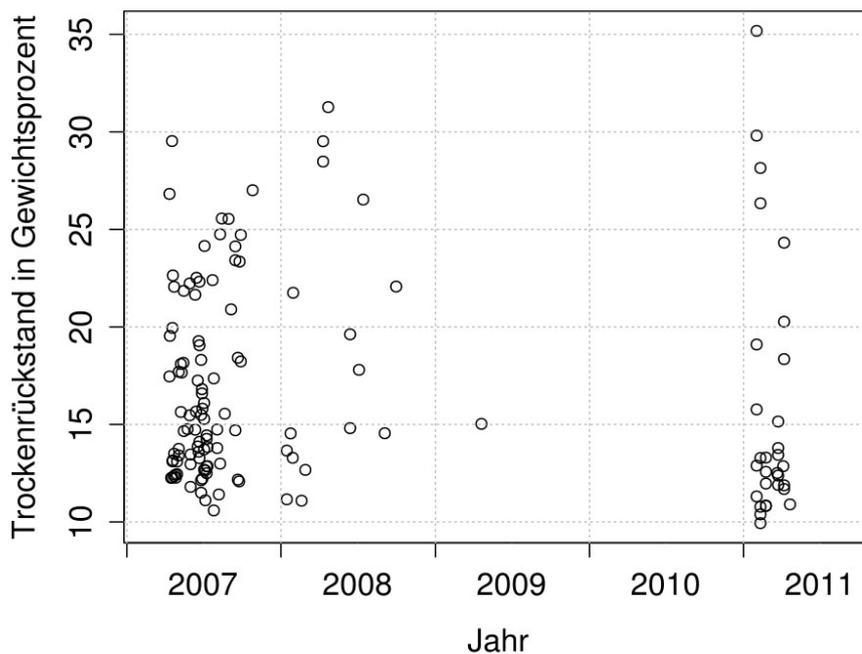


Abbildung 7-7: Streudiagramm des TR aller unbehandelten Proben im Jahresverlauf

Zu Anfang der Untersuchung (2007) wurden viele Proben mit unbehandeltem Rechengut gesammelt. In den Jahren 2009 und 2010 wurden solche Proben jedoch kaum gesammelt. Im Jahr 2011 ergibt sich wieder eine plötzliche Häufung. Bei der Durchsicht der Daten wurde festgestellt, dass in diesem Jahr von einem Mitarbeiter viele Proben gesammelt wurden und er ganz bewusst darauf geachtet hat, Proben sowohl direkt vom Rechen (unbehandelt) wie auch nach der Behandlung zu entnehmen, um eine gleichmäßige Probenanzahl zu erreichen. Deshalb erhöhte sich die Zahl der unbehandelten Proben im Jahr 2011. Der Trockenrückstand des Rechenguts konzentriert sich in einem Band zwischen 10 % und 25 %.

Durch die Probenahmesystematik wurden alle diejenigen Proben den „unbehandelten“ zugeordnet, die dem Rechen entnommen wurden. Bei der Auswertung des obigen

Streudiagramms stellte sich heraus, dass auch Proben mit relativ hohen Trockenrückständen bei den unbehandelten Proben zu finden sind. Bei der Suche nach der Ursache für diese ungewöhnlich hohen Werte wurde festgestellt, dass es sich zumindest in einigen Fällen um Proben von Rechen handelt, die eine Rechengutverdichtung eingebaut hatten. Diese Werte sind deshalb nicht repräsentativ. Da sich aber im Nachhinein dieser Unterschied nicht mehr ausschalten ließ, wurden die Daten wie zugeordnet verwendet. Es ist deshalb aber zu beachten, dass die durchschnittlichen Werte für vollkommen unbehandeltes Rechengut sehr wahrscheinlich etwas niedriger liegen. In der nachfolgenden Abbildung (7-8) wird die Häufigkeitsverteilung des Trockenrückstands von unbehandeltem Rechengut dargestellt.

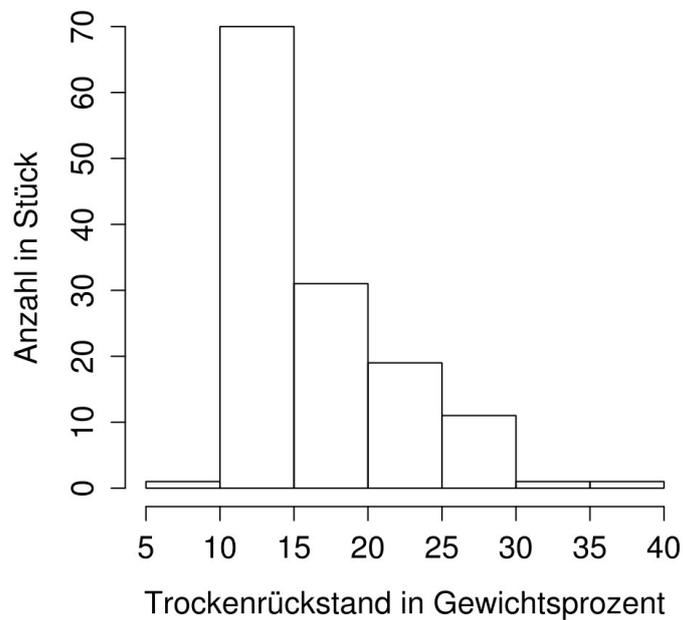


Abbildung 7-8: Histogramm des TR der unbehandelten Proben (n = 134)

Der Mittelwert des Trockenrückstands der unbehandelten Proben ist 16,7 %, die Standardabweichung 5,4 %. Der Median beträgt 14,7 %. Der kleinste Wert ist 9,9 %, der größte Wert 35,2 %.

Die Abbildung zeigt eine linkssteile Verteilung (BORTZ, 1989: 44). Die bei weitem größte Anzahl der Proben weist einen TR zwischen 10 % und 15 % auf. Höhere Werte sind zwar zu finden, deren Zahl nimmt aber mit zunehmendem TR deutlich ab. Zwischen 30 % und 40 % sind nur ganz wenige Proben zu finden. In dieser Teilbetrachtung ist sehr gut zu erkennen, dass die linke Spitze der Gesamtverteilung in Abbildung 7-4, dort nur als kleine Spitze bei ungefähr 10 % Trockenrückstand zu erkennen, von unbehandeltem Rechengut

stammt, weil sich diese Spitze in der Teilbetrachtung in der Abbildung 7-8 sehr deutlich wiederfindet.

In der Summenlinie (Abbildung 7-9) findet sich die linkssteile Verteilung durch den steilen Verlauf bereits ab einem Trockenrückstand von 10 % wieder.

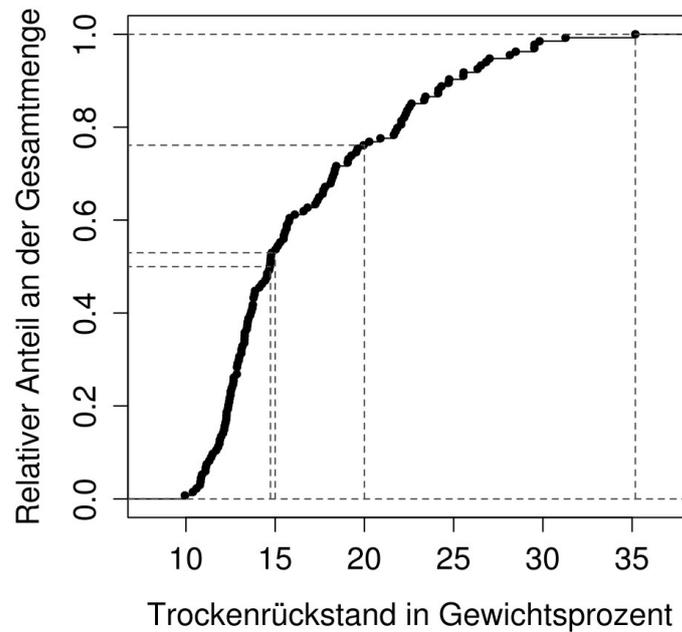


Abbildung 7-9: Summenlinie des TR der unbehandelten Proben (n = 134)

Die Summenlinie zeigt, dass 50 % der Proben einen Trockenrückstand von 14,7 % oder kleiner haben. 75 % der Proben haben einen Trockenrückstand von 20 % oder kleiner. Bei einer Normalverteilung wäre der Beginn der Summenkurve zunächst flacher, bevor ein deutlicher Anstieg erfolgt.

Die zeitliche Verteilung des Trockenrückstands von unbehandeltem Rechengut wird im nachfolgenden Boxplot (Abbildung 7-10, folgende Seite) dargestellt.

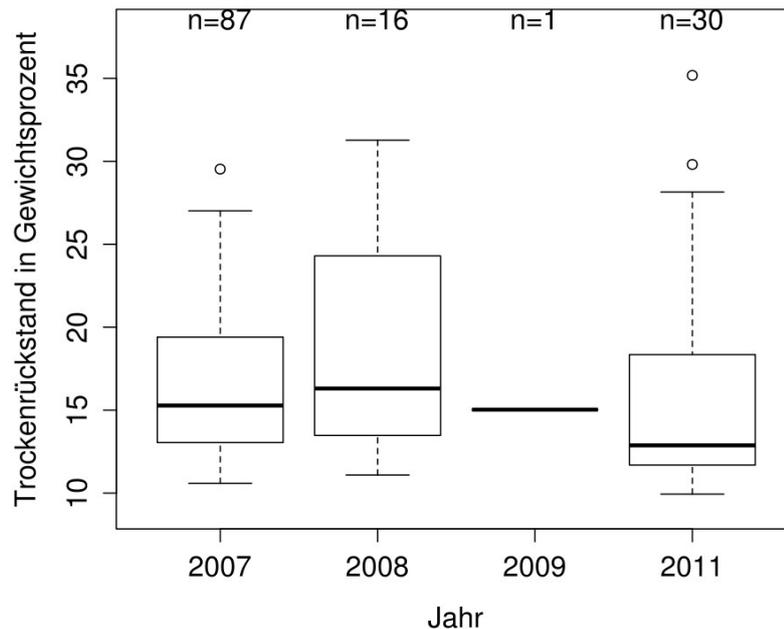


Abbildung 7-10: Boxplot des TR der unbehandelte Proben im Jahresvergleich (n = 134)

Die Abbildung zeigt, dass sich der Trockenrückstand von unbehandeltem Rechengut auch im Jahresvergleich kaum verändert. Dies liegt daran, dass das Rohrechengut üblicherweise sehr lange mit Wasser im Kontakt ist und somit einen sehr hohen Wassergehalt hat. Die Wassersättigung und damit der Wassergehalt von Rechengut sollten deshalb trotz der sehr heterogenen Zusammensetzung in einer recht engen Bandbreite liegen. Eine Veränderung kann nur durch eine Entwässerung durch die Schwerkraft oder durch Verdunstung auf dem Rechen oder im Container erfolgen. Der im Vergleich zu den Vorjahren im Jahr 2011 etwas niedrigere Median kann mit dem Streudiagramm (Abbildung 7-7) erklärt werden, weil in diesem Jahr sehr viele Analysen mit einem niedrigen Trockenrückstand zu finden sind.

7.5.2 Behandeltes Rechengut

Für das behandelte Rechengut wurden $n = 575$ Proben (81,1 %) aus insgesamt 162 Anlagen gesammelt und untersucht. Nachfolgend werden die zeitliche Verteilung der Einzelergebnisse und deren Trockenrückstände des unbehandelten Rechenguts dargestellt (Abbildungen 7-11 bis 7-13).

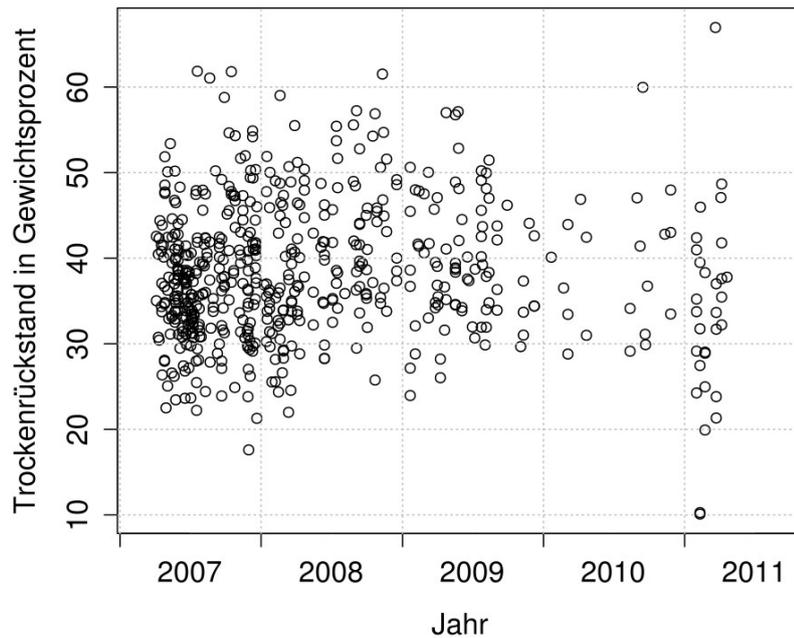
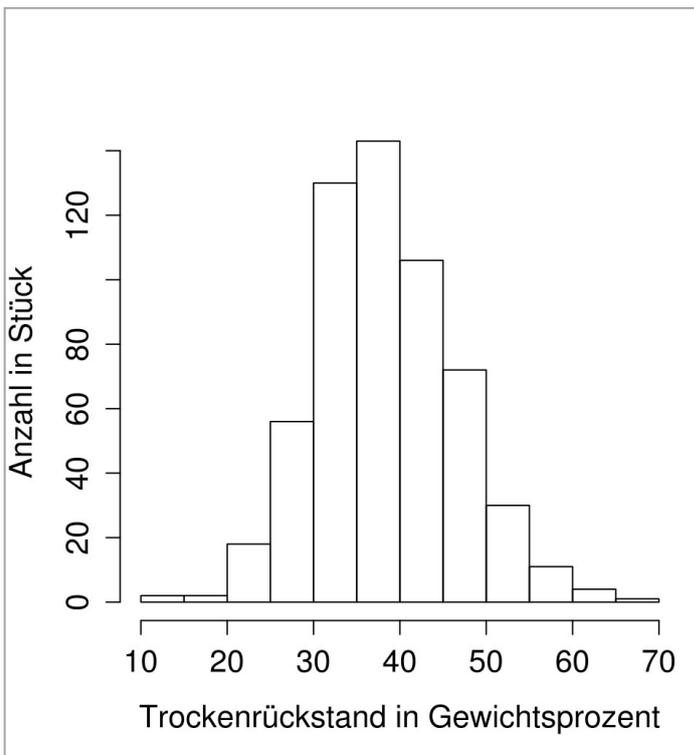


Abbildung 7-11: Streudiagramm des TR von behandeltem Rechengut im Zeitverlauf (n = 575)

Auch in diesem Streudiagramm ist zu erkennen, dass die Zahl der Analysen beim Projektstart im Jahr 2007 sehr hoch war. In den Jahren 2008 und 2009 wurde die Anzahl etwas geringer. Im Jahr 2010 wurden deutlich erkennbar kaum noch Proben gesammelt



und analysiert. Für das Jahr 2011 ist wieder eine höhere Anzahl von Proben festzustellen. Der Trockenrückstand findet sich hauptsächlich in einem Bereich von 25 % bis 50 %.

In nebenstehender Abbildung (7-12) wird die Häufigkeitsverteilung des Trockenrückstands von behandeltem Rechengut dargestellt.

Abbildung 7-12: Histogramm des TR der behandelten Proben (n = 575)

Der Mittelwert des Trockenrückstands der behandelten Proben ist 38,3 %, die Standardabweichung 8,0 %. Der Median beträgt 37,6 %: Der kleinste Wert ist 10,1 %, der größte Wert 66,7 %.

Die Abbildung zeigt eine symmetrische Normalverteilung. Die bei weitem größte Anzahl der Proben weist einen TR zwischen 30 % und 45 % auf.

In dieser Teilbetrachtung ist sehr gut zu erkennen, dass die rechte Spitze der Gesamtverteilung in Abbildung 7-4, vom behandelten Rechengut stammt, weil sich diese Spitze in der Teilbetrachtung in der Abbildung 7-12 sehr deutlich wiederfindet.

In der Summenlinie (Abbildung 7-13) bildet sich eine symmetrische Verteilung ab.

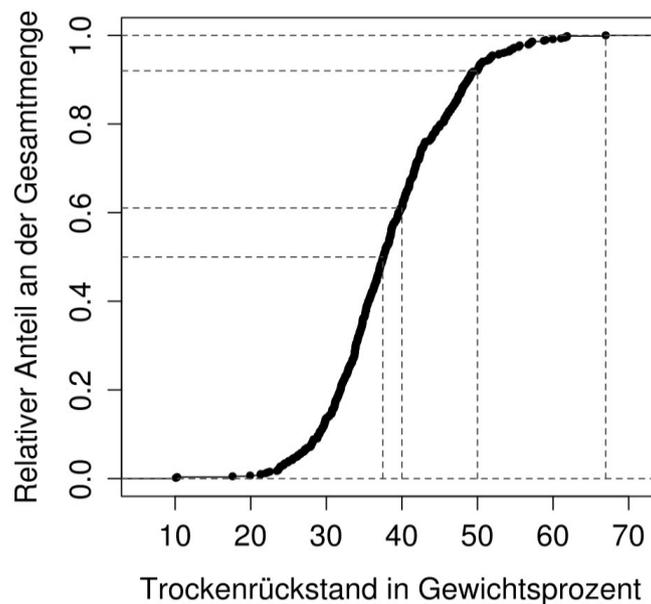


Abbildung 7-13: Summenlinie des TR der behandelten Proben (n = 575)

Die Summenlinie zeigt, dass 50 % der Proben einen Trockenrückstand von 37,6 % oder kleiner haben. 62 % der Proben haben einen Trockenrückstand von 40 % oder kleiner, 92 % der Proben haben einen Trockenrückstand von 50 % und kleiner.

Auch für das behandelte Rechengut wird der Trockenrückstand im Jahresvergleich analysiert (Abbildung 7-14, folgende Seite).

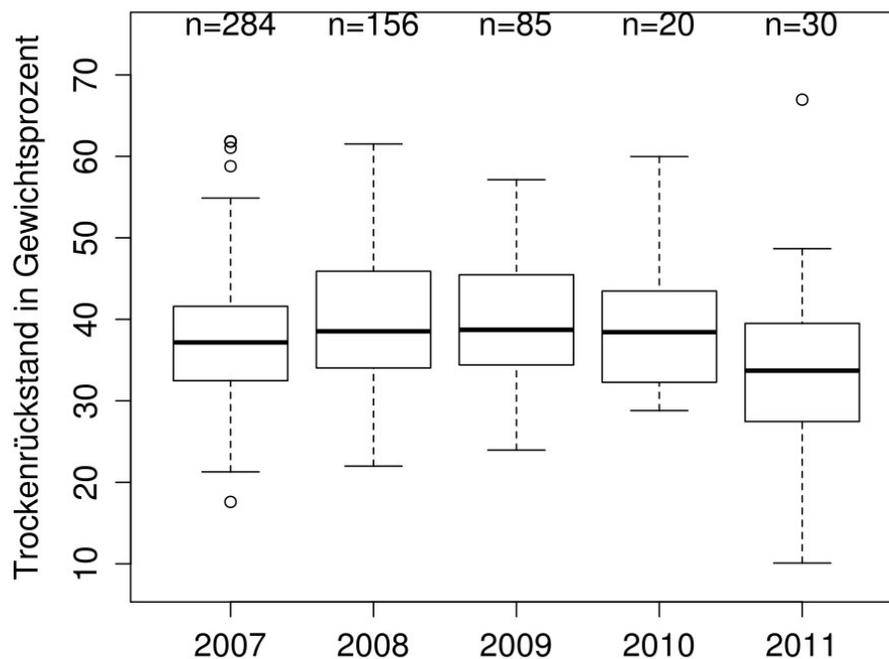


Abbildung 7-14: Boxplot des TR der behandelten Proben nach Jahren (n = 575)

Die Abbildung zeigt, dass sich auch der Trockenrückstand von behandeltem Rechengut im Jahresvergleich kaum verändert. Dies liegt wohl daran, dass die eingesetzten Maschinen zur Entwässerung ein gleichmäßiges Ergebnis erzielen können. Der Median in den Jahren 2007 bis 2010 liegt zwischen 37,2 % und 38,4 %. Er fällt im Jahr 2011 auf 33,7 % ab, der Trockenrückstand ist also abgesunken. Dieses Resultat kann mit dem Streudiagramm (Abbildung 7-11) erklärt werden. Dort finden sich auch beim behandelten Rechengut sehr viele Analysen mit einem niedrigen Trockenrückstand.

7.5.3 Regionale Verteilung

In Deutschland gibt es eine recht eindeutige räumliche Trennung der Entwässerungssysteme. Während in den Bundesländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Bremen, Hamburg und Berlin die Trennkanalisation überwiegt, ist in den restlichen Bundesländern die Mischkanalisation dominierend (DESTATIS, 2009b: 20). Deshalb ist es angebracht, die gesammelten Proben dahingehend zu untersuchen, ob sich der „Deutsche Mischwasseräquator“, also die einzelnen Bundesländer, im Trockenrückstand der Proben widerspiegelt (BROMBACH, 2013: 1048). Dazu wurden von n = 568 Proben von behandeltem Rechengut (80 %) die Trockenrückstände sortiert. Um den Aufwand hierfür

zu reduzieren, wurde als Sortierkriterium die erste Ziffer der Postleitzahl (0-9) verwendet. Diese Ziffern entsprechen nicht exakt den Grenzen der Bundesländer. Aber die Zusammenfassung der ersten Postleitzahlziffern 1, 2 und 3 für das Trennsystem bildet die Grenze der Entwässerungssysteme hinreichend genau ab.

Der nachfolgende Boxplot (Abbildung 7-15) zeigt den Trockenrückstand in Abhängigkeit der ersten Ziffer der Postleitzahl.

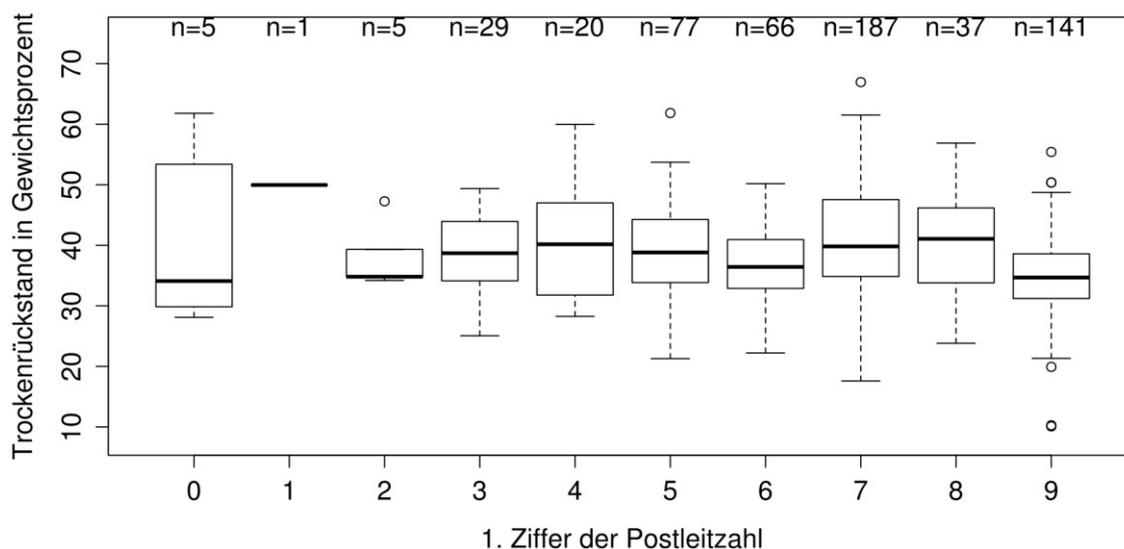


Abbildung 7-15: Verteilung des TR von behandelten Proben nach der Postleitzahl (n = 575)

Die Anzahl der gesammelten Proben in den einzelnen Postleitzahlgebieten schwankt sehr stark. Im Postleitzahlgebiet 1 wurde nur eine einzige Probe gesammelt, während in den Gebieten 7 und 9 $n = 187$ beziehungsweise $n = 141$ Proben gesammelt wurden. Damit sind die Daten der Postleitzahlgebiete mit sehr kleiner Anzahl statistisch nicht aussagefähig. Der Grund für den Schwerpunkt in den Postleitzahlgebieten 7 und 9 ist eindeutig die räumliche Nähe dieser Gebiete zum Stammsitz des Industriepartners (Kapitel 7.2).

Der Median des Trockenrückstands von behandeltem Rechengut bewegt sich zwischen 34,7 % (9) und 41,1 % (8). Der Mittelwert ergab sich zwischen 35,0 % (9) und 40,6 % (7). Die dazugehörige Standardabweichung betrug 6,7 % (9) beziehungsweise 8,5 % (7). Bei der Überprüfung der Daten wurde festgestellt, dass im Postleitzahlgebiet 9 eine Anlage relativ häufig untersucht wurde, deren Rechengutbehandlung nur sehr stark schwankende Trockenrückstände erreichte. Aufgrund der niedrigen Anzahl von analysierten Proben

wurden bei der obigen Betrachtung die Ergebnisse der Postleitzahlgebiete 0, 1 und 2 nicht berücksichtigt.

Leider ist wegen der Überschneidung der Postleitzahlgebiete mit den Grenzen der Bundesländer und vor allen Dingen wegen der geringen Datenbasis in manchen Gebieten keine eindeutige Zuordnung möglich. Eine Auswertung nach der Art der Kanalisation ist folglich ebenfalls ausgeschlossen.

7.5.4 Jahreszeit

Eine weitere Auswertung der gesammelten Daten galt der Frage, ob die erreichten Trockenrückstände jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Dazu wurde ebenfalls ein Boxplot (Abbildung 7-16) erstellt.

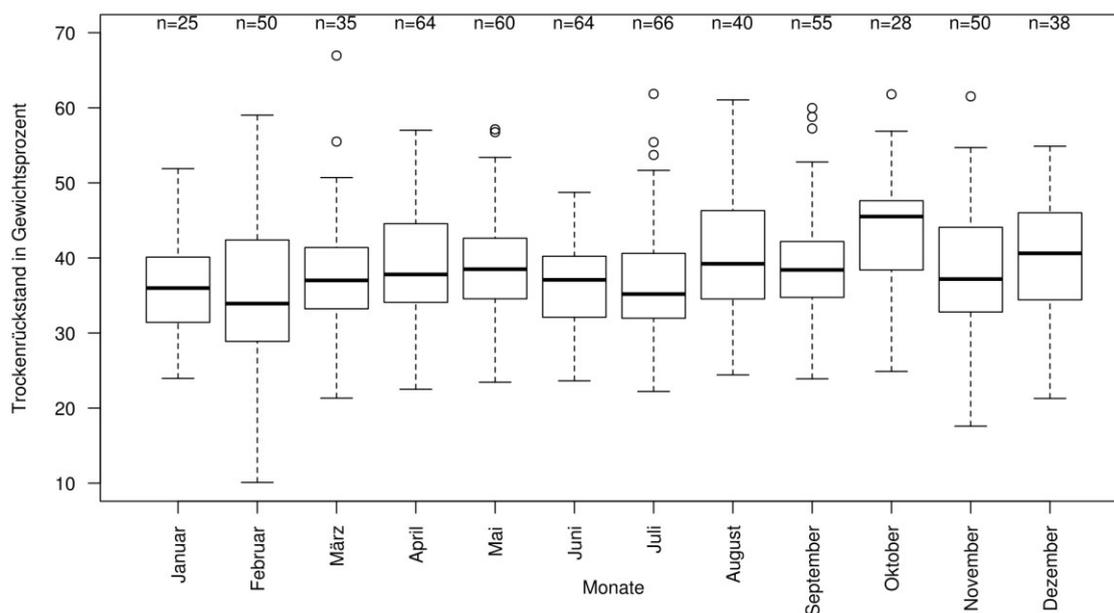


Abbildung 7-16: Boxplot der Verteilung des TR nach Monaten (n = 575)

Die Proben wurden über das Jahr verteilt gesammelt. Es gibt aber im Vergleich der Monate deutliche Abweichungen bei der Anzahl der gesammelten Proben. Auch der Trockenrückstand der Rechengutproben (behandelt) bewegte sich in einem recht engen Korridor um den Median von 37,1 %. Die einzige Auffälligkeit bei den Werten ist der etwas erhöhte Trockenrückstand im Monat Oktober mit einem Median von 45,5 %. Möglicherweise wurde diese Erhöhung durch viel Laub im Rechengut verursacht. Es wurde jedoch keine Möglichkeit gefunden, diesen Zusammenhang zu verifizieren.

7.5.5 Diskussion der Ergebnisse der Langzeituntersuchung

Die in der Langzeituntersuchung gesammelten Proben von unbehandeltem Rechengut (Kapitel 7.5.1) hat im Mittel einen Trockenrückstand von 16,7 %, der Median betrug 14,7 %. Die meisten Proben hatten dabei einen Trockenrückstand zwischen 10 % und 15 %. Dies entspricht den im Kapitel 2.2 genannten Werten von BRANNER (2013: 311). Da aber in dieser Gruppe auch Messwerte von 25 % und darüber festgestellt wurden, ergibt sich insgesamt eine linkssteile Verteilung. Hier ist zu vermuten, dass bei den sehr hohen Werten ein Fehler in der Dokumentation vorliegt oder der Wassergehalt der Proben zum Beispiel durch Verdunstung deutlich vermindert wurde. Grundsätzlich wird das Auftreten solcher Werte durchaus positiv bewertet, weil sich dadurch möglicherweise erkennen lässt, dass bei den Probenahmen nicht gezielt nach bestimmten Kriterien gesammelt wurde.

Der Median des Trockenrückstands der einzelnen Jahre war, mit Ausnahme einer Absenkung im Jahr 2011, 15 % oder leicht darüber. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass im Jahr 2011 nur ganz wenige Anlagen gezielt ausgewählt und dort Proben entnommen wurden. Damit zeigt das Ergebnis für 2011 keine zufällige Verteilung.

Beim behandelten Rechengut (Kapitel 7.5.2) konnte eine Normalverteilung des Trockenrückstands gefunden werden. Im Mittel ergab sich ein Trockenrückstand von 38,3 %. Der Median betrug 37,6 %. Die meisten Proben hatten dabei einen Wert zwischen 30 % und 45 %. Auch dieser Wert entspricht den in Kapitel 2.2 dokumentierten Werten von Nicke (2003: 35 und 37). Die bei dieser Verteilung gefundenen unteren Extremwerte könnten darauf zurückzuführen sein, dass Proben ohne Behandlung als solche nach Behandlung gekennzeichnet wurden. Die sehr hohen Werte können beim Zusammentreffen günstiger Randbedingungen wie Trockenwetter und sehr gute Auswaschung auftreten. Auch hier war der Trockenrückstand im Jahr 2011 etwas niedriger und kann durch die nicht zufällige Auswahl erklärt werden.

Für das behandelte Rechengut konnte aber kein Zusammenhang zur Region (Kapitel 7.5.3) und damit zum Entwässerungssystem gefunden werden. Auch ein jahreszeitlicher Einfluss (Kapitel 7.5.4) war, mit Ausnahme des Monats Oktober, nicht festzustellen.

Der Schwachpunkt dieser Untersuchung ist die Probenahme auf der Kläranlage. Es ist nicht auszuschließen, dass systematische Fehler enthalten sind. Die Auswahl einer Probe aus dem Rechengutcontainer unterliegt vielen zufälligen Faktoren. Ist zum Beispiel ein Container gerade geleert, so befindet sich keine Probe im Container; dann kann nur eine

Probe aus dem Pressrohr entnommen werden. Ist nur eine singuläre Entleerung im Container, so greift man automatisch zu dieser Probe. Ist der Container voll, wird man dort eine Probe nehmen, wo man am einfachsten herankommen kann. Dabei sind bewusste wie unbewusste Handlungsmuster des Probenehmers denkbar. Durch den Einsatz von vielen verschiedenen Probenehmern wurde versucht, diese Fehlerquelle möglichst gering zu halten. Allerdings können die Ergebnisse der Analyse schon bei der Wahl der Probe aus dem Container stark beeinflusst worden sein.

Zusätzlich ist die Konzentration der Sammelstellen in einem größeren Radius um den Unternehmenssitz in Süddeutschland ein Schwachpunkt dieser Untersuchung. Die Verifizierung der Daten durch eine Umfrage wurde angestrebt, konnte aber mangels Beteiligung der Befragten nicht durchgeführt werden. Auch konnte eine über den Versuchszeitraum nachlassende Zahl an gesammelten Proben verzeichnet werden. Die Ursache ist sehr wahrscheinlich die nachlassende Motivation der Mitarbeiter des Industriepartners, diesen Zusatzaufwand weiter zu betreiben. Im Jahr 2011 wurden die Anzahl der Proben zwar noch einmal leicht erhöht, blieb aber insgesamt auf einem niedrigen Niveau (Kapitel 7.5.1 und 7.5.2),

7.6 Ergebnisse des Lehr- und Forschungslabors Bünsau

Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben liegen vom LFKW Bünsau sehr genaue Analysedaten zum Rechengut vor (MAURER, 2012). Zur Analyse von Trockenrückstand und Glühverlust wurden aus jedem, zur Abfuhr bereitgestellten Container, eine Probe entnommen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Datenaufbereitung zum Trockenrückstand und zum Glühverlust sowie deren Zusammenhänge aus den Jahren 2009 bis 2011 ausgewertet und diskutiert.

7.6.1 Veränderung des TR und des GV

Bedingt durch den Umbau zum Ende des Jahres 2009, bei dem die Grobrechen mit einer Spaltweite von 30 mm durch Grobrechen mit einer Spaltweite von 25 mm ersetzt wurden und durch den gleichzeitigen Einsatz einer Rechengutwaschpresse für diese Grobrechen, veränderte sich der Trockenrückstand des untersuchten Rechenguts der Grobrechen und der Feinrechen. Zunächst werden die Auswirkungen des Umbaus von Trockenrückstand und Glühverlust auf die Grobrechen dargestellt.

Grobrechen

Durch den Einsatz der Rechengutwaschpresse auf dem LFKW Bünsau veränderte sich der Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen erheblich. Nachfolgend werden die zeitliche Verteilung der Einzelergebnisse der Rechengutanalysen ($n = 75$) und deren Trockenrückstände dargestellt (Abbildung 7-17).

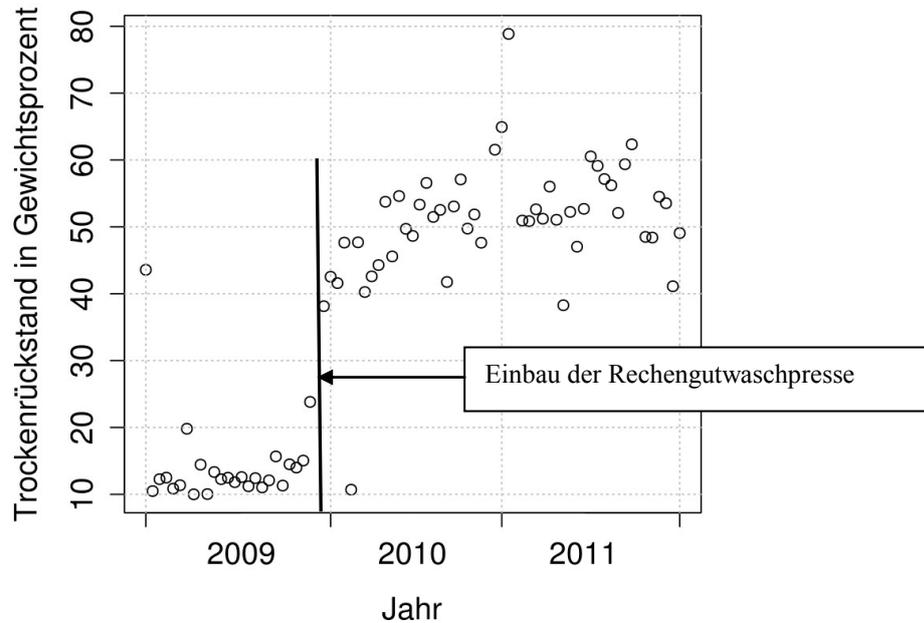


Abbildung 7-17: Streudiagramm des TR der Grobrechen (n = 75)

In diesem Streudiagramm ist zu erkennen, dass die Zahl der Analysen im Beobachtungszeitraum recht konstant war. Der Trockenrückstand ist bis zum Umbau zum Ende des Jahres 2009 sehr niedrig. Ab dem Jahr 2010 ist er, bedingt durch den Einbau der Rechengutwaschpresse, auf einem deutlich höheren Niveau. Dadurch wurden der Wassergehalt und die Masse deutlich verringert (Kapitel 5.4).

Die Veränderung des Trockenrückstands der Grobrechen vor und nach dem Umbau wird im nachfolgenden Boxplot (Abbildung 7-18, folgende Seite) dargestellt.

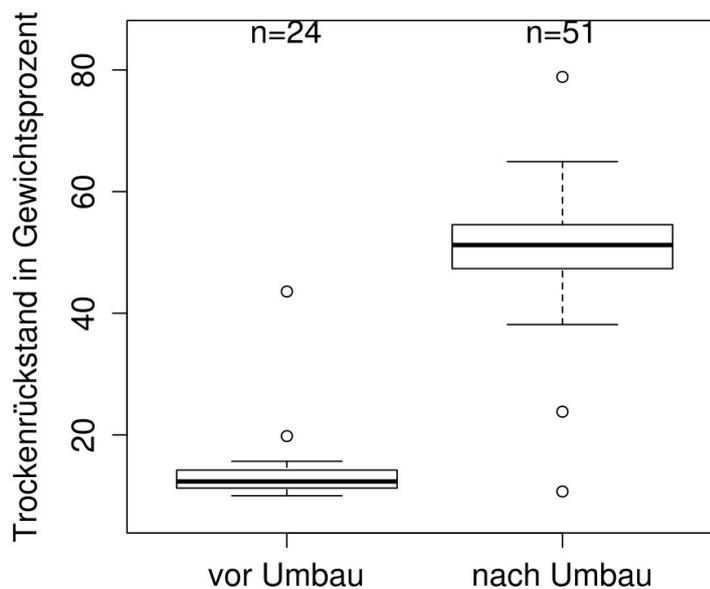


Abbildung 7-18: Boxplot des Trockenrückstandes der Grobrechen (n = 75)

In der Abbildung ist auf der linken Seite der Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen vor dem Umbau, rechts der Trockenrückstand nach dem Umbau aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Trockenrückstand vor dem Umbau deutlich niedriger war als nach dem Einbau der Rechengutwaschpresse. Dieser Einfluss wurde mit dem Wilcoxon-Test (Kapitel 7.4) untersucht und ist statistisch hoch signifikant ($W = 30$; $p < 0,001$)

Der Mittelwert des Trockenrückstands vor dem Umbau ($n = 24$) ist 14,0 %, die Standardabweichung 6,6 %. Der Median beträgt 12,3 %: Der kleinste Wert ist 10,0 %, der größte Wert 43,6 %. Die Ursache für diesen extrem hohen Wert konnte nicht nachvollzogen werden. Nach dem Umbau war der Mittelwert des Trockenrückstands 50,1 %, die Standardabweichung 10,0 % ($n = 51$). Der Median beträgt 51,2 %. Der kleinste Wert ist 10,7 %, der größte Wert 78,9 %. Auch hier konnte die Ursache für die beiden letztgenannten Extremwerte nicht gefunden werden.

Der Glühverlust, also der organische Anteil der Proben, wurde durch den Austausch der Rechen und den Einsatz einer Waschpresse für das Rechengut der Grobrechen ebenfalls beeinflusst. Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse zum Glühverlust des Rechenguts der Grobrechen dargestellt (Abbildung 7-19, folgende Seite).

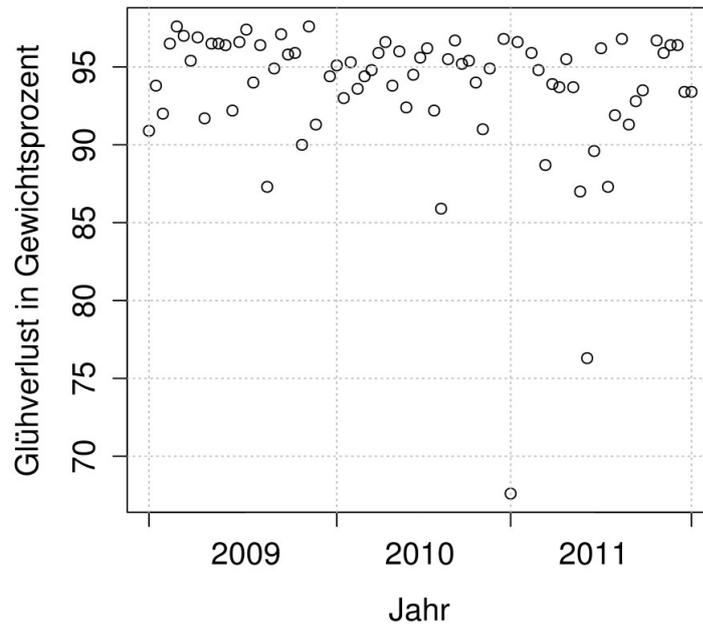
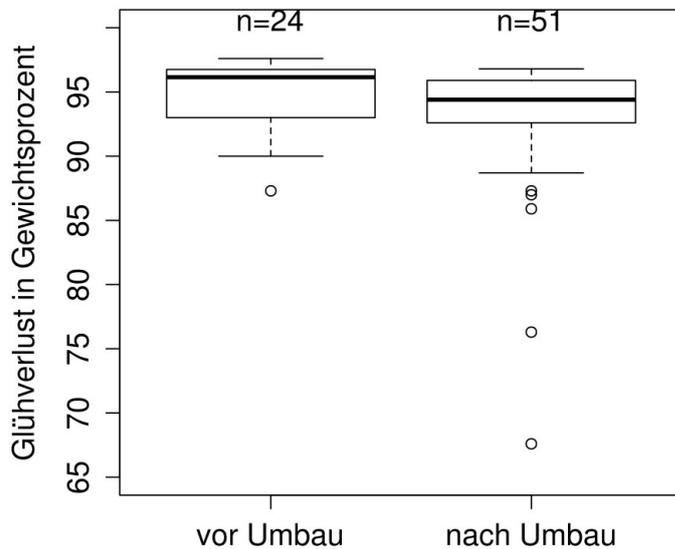


Abbildung 7-19: Streudiagramm des GV der Grobrechen (n = 75)

In diesem Streudiagramm ist die Zahl der Analysen im Beobachtungszeitraum genau wie beim Trockenrückstand $n = 75$. Daran ist zu erkennen, dass jede Containerfüllung auf den

Trockenrückstand und den Glühverlust analysiert wurde. Eine Veränderung des Glühverlusts des Rechenguts der Grobrechen nach dem Umbau ist nur schwer zu erkennen.



Die Veränderung des Glühverlusts des Rechenguts der Grobrechen vor und nach dem Umbau wird im nebenstehenden Boxplot (Abbildung 7-20) dargestellt.

Abbildung 7-20: Boxplot des Glühverlustes des Rechenguts der Grobrechen (n = 75)

In der Abbildung ist auf der linken Seite der Glühverlust des Rechenguts der Grobrechen vor dem Umbau, rechts der Trockenrückstand nach dem Umbau aufgetragen. Es ist durch diese Art der Darstellung zu erkennen, dass der Glühverlust vor dem Umbau etwas höher ist als nachher. Dieser Einfluss wurde mit dem Wilcoxon-Test (Kapitel 7.4) untersucht und ist statistisch signifikant ($W = 809,5; p = 0,025$)

Der Mittelwert des Glühverlusts vor dem Umbau ($n = 24$) ist 94,9 %, die Standardabweichung 2,7 %. Der Median beträgt 96,2 %: Der kleinste Wert ist 87,3 %, der größte Wert 97,6 %. Nach dem Umbau war der Mittelwert des Glühverlusts 93,5 %, die Standardabweichung 5,1 % ($n = 51$). Der Median beträgt 94,4 %: Der kleinste Wert ist 67,6 %, der größte Wert 96,8 %.

Durch den Einsatz der Rechengutwaschpresse veränderte sich der Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen erheblich. Ob dieser Umbau auch Auswirkungen auf die Feinrechen hatte, wird nachfolgend untersucht.

Feinrechen

Nachfolgend werden die zeitliche Verteilung der Einzelergebnisse der Rechengutanalysen des LFKW Büsnau ($n = 75$) und deren Trockenrückstände dargestellt (Abbildung 7-21).

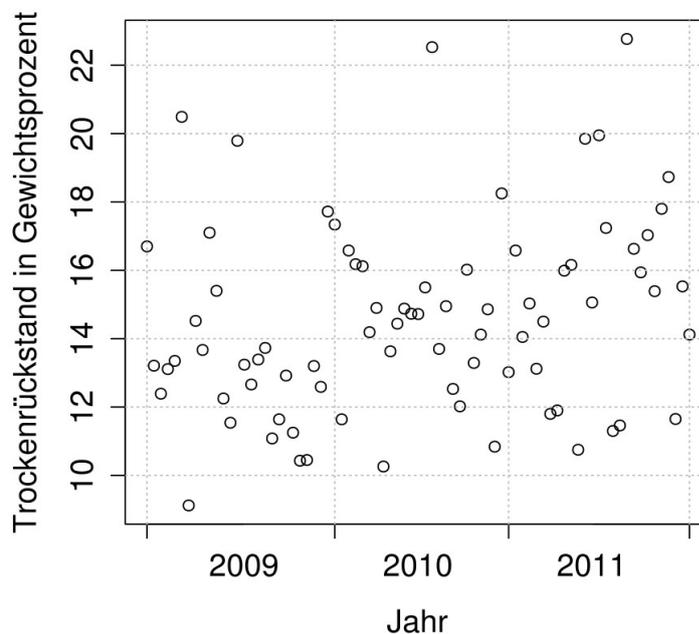


Abbildung 7-21: Streudiagramm des Trockenrückstands des Rechenguts von den Feinrechen im Zeitverlauf (n = 75)

In diesem Streudiagramm ist die Zahl der Analysen von Rechengut der Feinrechen im Beobachtungszeitraum $n = 79$. Eine Veränderung des Trockenrückstands nach dem Umbau ist nur schwer zu erkennen.

Die Veränderung des Trockenrückstands der Feinrechen vor und nach dem Umbau wird im nachfolgenden Boxplot (Abbildung 7-22) in anderer Form dargestellt.

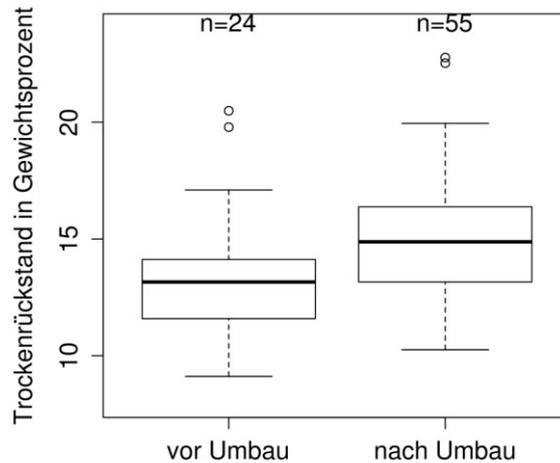


Abbildung 7-22: Boxplot des TR der Feinrechen (n = 75)

Der auftretende Effekt des Umbaus auf die Feinrechen ist erst mit der Darstellung in Abbildung 7-22 ersichtlich. In der Abbildung ist auf der linken Seite der Trockenrückstand des Rechenguts der Feinrechen vor dem Umbau, rechts der Trockenrückstand nach dem Umbau aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Trockenrückstand vor dem Umbau deutlich niedriger ist als nach dem Einbau der neuen Grobrechen. Obwohl an den Feinrechen keine bauliche Veränderung vorgenommen wurde, hat sich folglich der Trockenrückstand des Rechenguts verändert. Dieser Einfluss wurde mit dem Wilcoxon-Test (Kapitel 7.4) untersucht und ist statistisch signifikant ($W = 422,5$; $p = 0,01$).

Der Mittelwert des Trockenrückstands vor dem Umbau ($n = 24$) ist 13,5 %, die Standardabweichung 2,8 %. Der Median beträgt 13,2 %. Der kleinste Wert ist 9,1 %, der größte Wert 20,5 %. Nach dem Umbau war der Mittelwert des Trockenrückstands 15,0 %, die Standardabweichung 2,7 % ($n = 55$). Der Median beträgt 14,9 %. Der kleinste Wert ist 10,2 %, der größte Wert 22,8 %. Der Glühverlust des Rechenguts der Feinrechen wurde durch den Austausch der Grobrechen und den Einsatz einer Waschpresse für die Grobrechen möglicherweise ebenfalls beeinflusst.

Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse zum Glühverlust des Rechenguts der Feinrechen dargestellt (Abbildung 7-23).

In diesem Streudiagramm ist die Zahl der Analysen im Beobachtungszeitraum genau wie beim Trockenrückstand $n = 79$. Eine Veränderung des Glühverlusts der Grobrechen nach dem Umbau ist durch die Häufung der niedrigeren Werte ab 2010 zu erkennen.

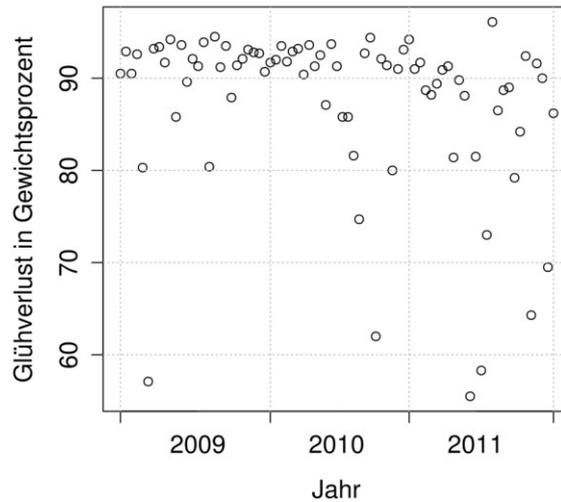


Abbildung 7-23: Streudiagramm des Glühverlustes des Rechenguts der Feinrechen im Zeitverlauf (n = 79)

Die Veränderung des Glührückstands des Rechenguts der Feinrechen vor und nach dem Umbau wird im nachfolgenden Boxplot (Abbildung. 7-24) dargestellt.

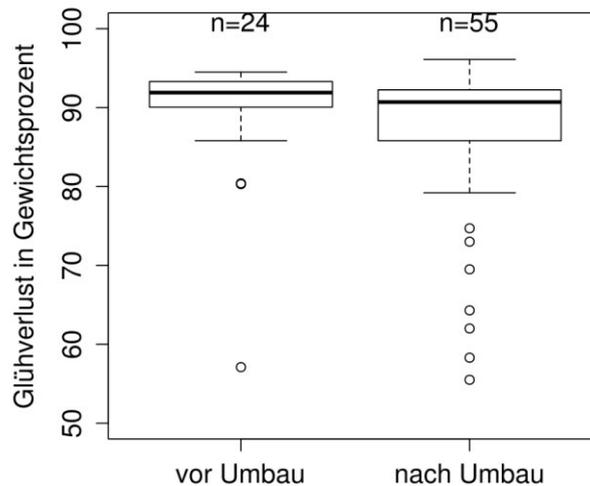


Abbildung 7-24: Boxplot des Glühverlustes des Rechenguts der Feinrechen (n = 79)

In der Abbildung ist auf der linken Seite der Glühverlust des Rechenguts der Feinrechen vor dem Umbau, rechts der Glühverlust nach dem Umbau aufgetragen. Es ist wiederum durch diese Art der Darstellung zu erkennen, dass der Glühverlust vor dem Umbau etwas höher ist als nachher. Dieser Einfluss wurde mit dem Wilcoxon-Test (Kapitel 7.4) untersucht und ist statistisch nicht signifikant ($W = 838$; $p = 0,058$).

Der Mittelwert des Glühverlusts vor dem Umbau ($n = 24$) ist 89,5 %, die Standardabweichung 7,9 %. Der Median beträgt 91,9 %: Der kleinste Wert ist 57,1 %, der größte Wert 94,5 %. Für den sehr niedrigen Extremwert konnte keine plausible Erklärung gefunden werden. Nach dem Umbau war der Mittelwert des Glühverlusts 86,7 %, die Standardabweichung 9,4 % ($n = 55$). Der Median beträgt 90,7 %: Der kleinste Wert ist 55,5 %, der größte Wert 96,1 %. Die auffällige Häufung von niedrigen Extremwerten konnte auch in diesem Fall nicht aufgeklärt werden.

7.6.2 Korrelation zwischen TR und GV

Im Weiteren wird die Frage behandelt, ob es eine Korrelation zwischen dem Trockenrückstand und dem Glühverlust gibt. Damit soll geklärt werden, ob durch die Entwässerung des Rechengutes auch mineralische Anteile ausgewaschen werden.

Bei den Grobrechen wurde weder vor noch nach der Umstellung eine signifikante Korrelation zwischen dem Trockenrückstand und dem Glühverlust des Rechenguts gefunden (vor Umbau: $r_s = -0,084$, $p = 0,697$; und nach Umbau: $r_s = -0,039$, $p = 0,784$).

Das Ergebnis der Korrelationsanalyse zwischen dem Trockenrückstand und dem Glühverlust des Rechenguts der Feinrechen ist in Abbildung 7-25 auf der folgenden Seite dargestellt.

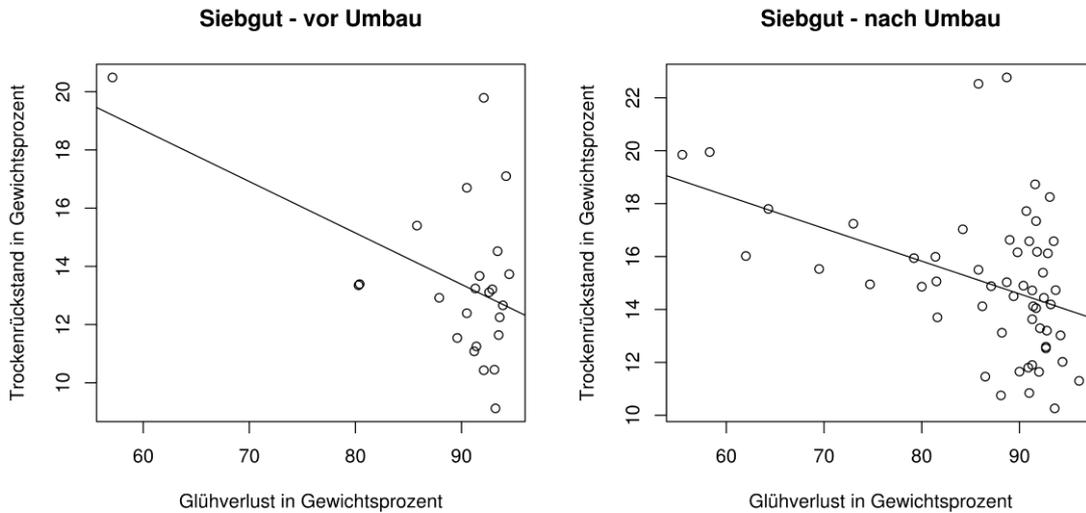


Abbildung 7-25: Korrelation von TR und GV in der Feinrechenanlage vor und nach dem Umbau

Für die Feinrechen wurde für die Daten vor dem Umbau ebenfalls keine Abhängigkeit gefunden ($r_s = -0,170$, $p = 0,427$). Nach der Umstellung wurde eine signifikante Korrelation festgestellt ($r_s = -0,395$, $p = 0,003$), also ein leichter negativer, aber nicht zufälliger, Zusammenhang. Das heißt, dass eine Verminderung des Trockenrückstandes von Rechengut der Feinrechen eine Erhöhung des Glühverlustes von Rechengut an den Feinrechen zur Folge hat.

7.6.3 Korrelation von GV und TR des Rechenguts zwischen Grob- und Feinrechenanlage

Gegenstand einer weiteren Untersuchung war eine mögliche Korrelation von Glühverlust beziehungsweise Trockenrückstand zwischen Grob- und Feinrechenanlage. Damit sollte untersucht werden, ob sich die beiden Rechenarten jeweils beeinflussen.

Beim Glühverlust wurde keine Korrelation zwischen den beiden Rechenanlagen gefunden (vor dem Umbau: $r_s = -0,098$, $p = 0,649$; nach dem Umbau: $r_s = 0,153$, $p = 0,285$).

Das Ergebnis der Korrelationsanalyse des Trockenrückstands der Rechenanlagen ist nachfolgend dargestellt (Abbildung 7-26, folgende Seite).

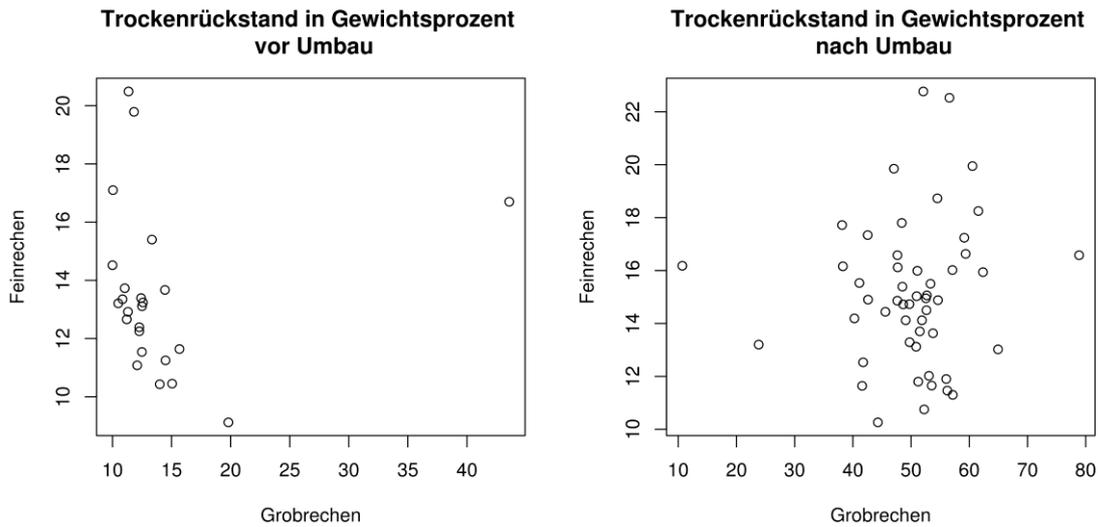


Abbildung 7-26: Korrelation des TR von Grob- und Feinrechen. Die Darstellung mittels Trendlinie basierend auf der linearen Regression ist aufgrund des Ausreißers nicht sinnvoll.

Beim TR wurde nach der Umstellung ebenfalls kein Zusammenhang gefunden ($r_s = 0,062$, $p = 0,668$). Vor der Umstellung wurde ein negativer, mäßig signifikanter Zusammenhang festgestellt ($r_s = -0,424$, $p = 0,039$). Wurde also vor dem Umbau der Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen kleiner, wurde der Trockenrückstand des Rechenguts der Feinrechen größer und umgekehrt.

7.6.4 Diskussion Lehr- und Forschungsklärwerk Büsnau

Durch die detaillierte Analyse und Dokumentation der Daten von Rechengut auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk Büsnau konnten die Auswirkungen des Einbaus eines Grobrechens mit geringerer Spaltweite und einer Waschpresse auf den Trockenrückstand und den Glühverlust ausgewertet werden. Beide Veränderungen hatten erhebliche Auswirkungen auf den Rechengutanfall. Insbesondere die Waschpresse erhöhte den Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen erheblich. Auch der Trockenrückstand des Rechenguts der Feinrechen hat sich erhöht, obwohl keine baulichen Veränderungen an diesen Rechen vorgenommen wurden (Kapitel 7.6.1). Die in Büsnau vorgefundenen Daten entsprechen ebenfalls den Ergebnissen von Branner (2013) und Nicke (2003) in Kapitel 2.2.

Während die in Kapitel 5.4 beschriebenen Veränderungen bei der Rechengutmenge durch die veränderte Spaltweite des Rechens zu erklären ist, kann die Veränderung beim

Trockenrückstand eindeutig auf den Einsatz der Rechengutwaschpresse zurück geführt werden.

Die Verbesserung des Trockenrückstands von Rechengut vom Feinrechen ist dadurch zu erklären, dass durch die Verringerung des Stababstands am Grobrechen weniger Rechengut am Feinrechen ankommt. Durch die geringere Menge kann die in den Feinrechen integrierte Rechengutwäsche eine bessere Auswaschung erreichen.

Die Ergebnisse des Glühverlusts entsprachen zunächst nicht den Erwartungen. Es wurde vermutet, dass durch die geringere Spaltweite des Grobrechens mehr mineralische Anteile im Rechengut der Grobrechen zu finden ist. Gefunden wurde aber eine signifikante Reduzierung des Glühverlustes. Dagegen war die Reduzierung des Glühverlustes der Feinrechenstraße nicht signifikant, wenn auch nur knapp ($p = 0,058$).

Zur Erklärung dieses Ergebnisses muss beachtet werden, dass der Glühverlust den organischen Anteil im Verhältnis zur Gesamtmasse darstellt. Der Glührest ist der mineralische Anteil an der Gesamtmasse. Der mineralische Anteil ist gegenüber dem Anteil der Organik aber sehr klein. Wenn Organik ausgewaschen wird, reduziert sich die Menge an Organik, aber auch die Gesamtmasse. Deshalb fällt die Reduzierung der Organik nicht so sehr ins Gewicht. Außerdem ist zu erwarten, dass durch die größere Menge von Rechengut, die wegen der kleineren Spaltweite aus der Grobrechen entnommen wird, auch mehr Sand und damit mehr mineralische Anteile ausgetragen werden. Auch diese Aspekte schlagen sich in der geringen Reduzierung der Organik nieder. Qualitative Untersuchungen zu diesen Zusammenhängen wurden aber auf der Anlage in Büsnau nicht gemacht.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass der Glühverlust auch als organischer Trockenrückstand (oTR) bezeichnet wird. Zur Ermittlung des Glühverlusts ist auf die Einhaltung der vorgegebenen Temperaturen zu achten, da bei zu hohen Temperaturen auch das chemisch gebundene Wasser (Kristallwasser) ausgetrieben werden kann und somit das Ergebnis verfälscht. Außerdem werden in der organischen Chemie die chemischen Verbindungen (mit Ausnahme weniger Verbindungen wie Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid) des Kohlenstoffes untersucht. Mit der umgangssprachlichen Verwendung des Begriffes „Organik“ in der Abwassertechnik, der dem Begriff „organische Chemie“ sehr nahe kommt, werden manchmal fälschlicherweise die leicht auswaschbaren Bestandteile von Rechengut bezeichnet. Dadurch ergeben sich häufig unterschiedliche Aussagen zu Auswaschungsgraden von Organik aus Rechengut.

Nach dem Umbau konnte festgestellt werden, dass zwischen Trockenrückstand und Glühverlust des Rechenguts der Feinrechen eine mäßig signifikante Korrelation besteht. Dieser Zusammenhang könnte durch die Stoßbelastung im Regenwetterfall verursacht werden. Wenn durch die Stoßbelastung das Rechengut eine kürzere Aufenthaltsdauer in der Presszone des Spiralsiebes hat, ist der Wassergehalt des behandelten Rechenguts wegen des notwendigerweise gestiegenen Durchsatzes höher. In diesem Fall ist dann auch der Auswaschungsgrad niedriger und der Glühverlust höher.

Die Untersuchung der Korrelation der Trockenrückstände zwischen den beiden Rechenarten ergab einen mäßig negativen Zusammenhang vor dem Umbau. Warum dieser Zusammenhang zwar vor der Umstellung bestand, aber nicht nach der Umstellung, konnte nicht abschließend geklärt werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass im Regenwetterfall mehr Rechengut zum Feinrechen durchgespült wurde. Dadurch konnte die Entwässerungsstufe insgesamt mehr Wasser aus dem Rechengut auspressen als im Trockenwettermodus. Dass nach dem Umbau kein Zusammenhang mehr besteht, ist wiederum leicht erklärbar, weil der Trockenrückstand des Rechenguts der Grobrechen viel mehr durch die Waschpresse als durch die Verteilung oder durch Regenereignisse beeinflusst ist.

7.7 Zusammenstellung der wichtigsten Zahlen (TR)

In der nachfolgenden Tabelle werden zur besseren Übersicht noch einmal die wichtigsten Zahlen zum Trockenrückstand zusammengestellt.

Tabelle 7-1: Zusammenstellung der wichtigsten Zahlen zum Trockenrückstand

	Bezeichnung TR	Median (%)	arithmetisches Mittel (%) \pm Standardabweichung (%)
Langzeit- untersuchung	unbehandeltes Rechengut	14,7	16,7 \pm 5,4
	behandeltes Rechengut	37,6	38,3 \pm 8,0
LFKW Büsnau	Grobrechen vor Umbau	12,3	14,0 \pm 6
	Grobrechen nach Umbau	51,2	50,1 \pm 10,0
	Feinrechen vor Umbau	13,2	13,5 \pm 2,8
	Feinrechen nach Umbau	14,9	15,0 \pm 2,7

8 ZUSAMMENFASSUNG

Zum Schutz der nachfolgenden Anlagenteile wird auf kommunalen Kläranlagen zum Beginn des Reinigungsprozesses das Rechengut vom Abwasserstrom separiert. Die dabei anfallende Rechengutmasse und deren Trockenrückstand bilden den Gegenstand dieser Arbeit.

Zunächst wurden statistische Daten zur anfallenden Rechengutmasse ermittelt. Zusätzlich wurde das Entwässerungsverhalten von Rechengut im Labor und in einem Feldtest untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt war die Sammlung von Rechengutproben, deren Trockenrückstand analysiert und statistisch ausgewertet wurde. In diesem Zusammenhang konnten auch Rechengutdaten aus dem Klärwerk Büsnau der Universität Stuttgart, die detailliert aufgenommen und dokumentiert wurden, analysiert und statistisch ausgewertet werden.

Zu Beginn der Arbeit wurden Rechengutmenge und Trockenrückstand aus der Literatur zusammengestellt. Zur Darstellung des aktuellen Standes der Technik wurden weiterhin Maschinen zur Entnahme und Behandlung von Rechengut vorgestellt.

Den ersten Schwerpunkt der Arbeit bildet die Zusammenstellung aktueller Daten zur Rechengutmasse. Dabei wird insbesondere die für Vergleichszwecke wichtige spezifische Rechengutmasse betrachtet. Es zeigt sich, dass die bisher häufig verwendete Mengenangabe von $5 - 15 \text{ L} / (E_{EW} \cdot a)$ heute nicht mehr zutreffend ist. Aus den verschiedenen Quellen kann stattdessen die aktuelle Rechengutmasse von $1,1 - 4,0 \text{ kg} / (E_{EW} \cdot a)$ ermittelt werden. Anhand der aufgezeichneten Daten zur Rechengutmasse einer Kläranlage wird in dieser Studie gezeigt, dass die Reduzierung der Spaltweite den Rechengutanfall deutlich erhöht und die Rechengutmasse durch den Einbau einer Rechengutwaschpresse halbiert werden kann. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass der Rechengutanfall von Parametern wie der Größe der Kläranlage oder der Spaltweite abhängig ist. Allerdings sind die vorliegenden Daten nicht fundiert genug, um generelle Aussagen treffen zu können. Es wäre deshalb sehr wichtig, weitere Forschungen in diesem Bereich durchzuführen.

Weiterhin wurden Laborversuche zum Entwässerungsverhalten von Rechengut durchgeführt. Dabei wurden das zeitliche Verhalten sowie Entwässerungsstrategien ausführlich untersucht. Es zeigt sich, dass eine langsame Entwässerung und die mehrfache Wiederholung von Pressvorgängen einen besseren Entwässerungsgrad ergeben. Darüber

hinaus konnte ermittelt werden, dass der Durchflusswiderstand im Rechengut überproportional mit der Verdichtung steigt. Dadurch ergibt sich eine wirtschaftliche Grenze, bei der der Aufwand für die Entwässerung die möglichen Einsparungen übersteigt und damit eine weitere Steigerung nicht mehr sinnvoll ist. Die Scherspannung von gepresstem Rechengut ist ebenfalls von der Verdichtung abhängig, weshalb bei einer hohen Verdichtung hohe Drehmomente und damit entsprechend hohe Motorleistungen vorgehalten werden müssen.

In einem Feldversuch wurde anschließend ein kombiniertes Entwässerungssystem, bestehend aus einer Rechengutwaschpresse und einem Zusatzmodul getestet. Dazu wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren Daten wie die Wirkleistung des Motors einer Rechengutwaschpresse und die erzielten Trockenrückstände aufgezeichnet. Deren Auswertung zeigt, dass die Wirkleistung des Motors den Trockenrückstand gut abbildet. Da der Trockenrückstand von Rechengut selbst als Führungsgröße ausscheidet, kann die Wirkleistung die Aufgabe übernehmen, eine gleichmäßigere Entwässerung des Rechengutes auch bei verschiedenen Betriebszuständen zu erreichen. Der Vergleich mit den Daten aus den Laborversuchen ergibt, dass die real auftretenden Kräfte und Spannungen in den Laborversuchen gut nachgebildet wurden und damit für weitere Untersuchungen genutzt werden können.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse einer groß angelegten Untersuchung zum Trockenrückstand von Rechengut auf Kläranlagen präsentiert. Dazu wurden Rechengutproben nach dem Zufallsprinzip gesammelt und der Trockenrückstand bestimmt. Für unbehandeltes Rechengut wurde ein Trockenrückstand von 16,7 % im Mittel gefunden. Für behandeltes Rechengut ergab die Datenauswertung einen Trockenrückstand von 38,3 % im Mittel.

Die Auswirkungen durch den Einbau neuer Grobrechen mit geringerer Spaltweite und einer Waschpresse für die Grobrechen in eine Kläranlage konnte durch eine detaillierte Dokumentation des Rechenguts sehr gut beobachtet werden. Durch den Umbau erhöhte sich an Grob- und Feinrechen der Trockenrückstand, während die Glühverluste sanken. Es konnte ermittelt werden, dass sich der Umbau an den Grobrechen auch an den Feinrechen signifikant auswirkt, auch wenn dort keine Umbaumaßnahmen stattfinden. Dieser Effekt muss bei solchen Umbaumaßnahmen in Zukunft bereits in der Planungsphase mehr Berücksichtigung finden.

LITERATURVERZEICHNIS

ABFABLV 2001 Abfallablagerungsverordnung (2001): *Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen*, vom 20. Februar 2001, BGBl. I S. 305 Stand: zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Dezember 2006, BGBl. I S. 2860

ABFKLÄRV 1992 Klärschlammverordnung (1992): *Klärschlammverordnung*, vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912). Stand: zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 12 des Gesetzes vom 24. Februar 2012, BGBl. I S. 212

ABFRRL 2008 Abfallrahmenrichtlinie (2008): *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*, ABl. EG, Nr. L 312 S.3, 22. November 2008

ABWV 1997 Abwasserverordnung (1997): *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer* in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004, BGBl. I S. 1108, ber. S. 2625. Stand: zuletzt geändert durch Artikel 6 der Verordnung vom 2. Mai 2013, BGBl. I S. 973

ATEX 1994 ATEX-Produktrichtlinie (1994): *Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen*. Amtsblatt der Europäischen Union, L 100. Stand: zuletzt geändert durch Verordnung (EG) Nr. 1025/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012, ABl. L 316 S.26

ATV 1996 Abwassertechnische Vereinigung e.V.(1996): *ATV-Handbuch Klärschlamm*, 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

ATV 1997 Abwassertechnische Vereinigung e.V. (1997): *ATV-Handbuch Mechanische Abwasserreinigung*, 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

ATV 2003a ATV-DVWK-M 369 (2003): *Infrastrukturabfälle: Abfälle aus der Reinigung von Kanälen, Sinkkästen und Regenbecken – Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (Rechen- und Sandfanggut)*, DWA, Hennef

ATV 2003b ATV-DVWK-A 198 (2003): *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*, DWA, Hennef

- AVV 2001** Abfallverzeichnis-Verordnung (2001): *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis* vom 10. Dezember 2001, BGBl. I S. 3379. Stand: zuletzt geändert durch Art. 5 Absatz 22 des Gesetzes vom 24. Februar 2012, BGBl. I S. 212
- BABITT 1925** Babitt, H. (1925): *Sewerage and Sewage Treatment*, 2. Auflage, John Wiley & Sons Incorporated, London
- BARJENBRUCH 2008** Barjenbruch, M. (2008): *Aktueller Stand zur Klärschlamm Entsorgung – Stellungnahme der DWA 2/2008*, TU Berlin, FG Siedlungswasserwirtschaft, Berlin
- BERKNER 1999** Berkner, I. (1999): *Erfahrungen bei der Verwertung von Rechen- und Sandfanggut in der Kompostierung*, KA - Abwasser, Abfall 1999, 46 (10), 1586 – 1601
- BERLIN 2007** Berliner Wasserbetriebe: *Klärwerke Ruhleben*, www.bwb.de/content/language1/downloads/KW-Ruhleben_5-07.pdf Download am 19.07.2007
- BETRICHV 2002** Betriebssicherheitsverordnung (2002): *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes*, vom 27. September 2002, BGBl. I S. 3777. Stand: zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 8. November 2011, BGBl. I S. 2178
- BMU 2011** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): *Kreislaufwirtschaft: Abfall nutzen – Ressourcen schonen*, 3. Auflage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin
- BORTZ 1989** Bortz, J. (1989): *Statistik für Sozialwissenschaftler*, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- BORTZ 2008** Bortz, J.; Lienert, G.; Boehnke, K. (2008): *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik*, 3. Auflage, Springer Verlag
- BRANNER 1996** Branner, W.; Grienberger, J. (1996): *Rechengut- und Sandfangbehandlung zur Reduktion der Entsorgungskosten*, ATV-Schriftenreihe, Band 4, 1996
- BRANNER 2013** Branner, W. (2013): *Robrechengutanfall und Rechengutentsorgungswege in Deutschland*, KA – Abwasser, Abfall 2013, 60 (4), 310 - 315

- BROMBACH 2003** Brombach, H.; Fuchs, S.(2003): *Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch- und Trennkanalisationen*, KA - Abwasser, Abfall 50 (4), 441 - 450
- BROMBACH 2013** Brombach, H. (2013): *Im Spiegel der Statistik: Abwasserkanalisation und Regenbecken in Deutschland*, KA - Abwasser, Abfall 60 (12), 1014 - 1053
- DESTATIS 2009a** Statistisches Bundesamt (2009): *Umwelt, Abfallentsorgung 2007*, Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden
- DESTATIS 2009b** Statistisches Bundesamt (2009): *Umwelt, Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007*, Fachserie 19 Reihe 2.1, Wiesbaden
- DESTATIS 2010** Statistisches Bundesamt (2010): *Umwelt, Abfallentsorgung 2008*, Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden
- DESTATIS 2012** Statistisches Bundesamt (2012): *Umwelt, Abfallentsorgung 2010*, Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden
- DILLINGER 2011** Dillinger Fabrik gelochter Bleche GmbH: Persönliche Mitteilung am 7.12. 2011
- DIN 1985** DIN 4045 (1985):*Abwassertechnik, Begriffe*, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 1989** DIN 19569 (1989): *Kläranlagen, Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen*, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2001a** DIN EN 12255-3 (2001): *Kläranlagen Teil 3: Abwasservorreinigung*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2001b** DIN EN 12255-10 (2001): *Kläranlagen Teil 10: Sicherheitstechnische Baugrundsätze*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2002a** DIN 19569-2 (2002): *Kläranlagen, Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2002b** DIN 19554 (2002): *Kläranlagen, Rechenbauwerke mit geradem Rechen als Mitstrom- und Gegenstromrechen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

- DIN 2002c** DIN EN 12255-1 (2002): *Kläranlagen Teil 1: Allgemeine Baugrundsätze*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2003** DIN EN 12255-12 (2003): *Kläranlagen Teil 12: Steuerung und Automatisierung*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2007a** DIN EN 14346 (2007): *Charakterisierung von Abfällen – Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes*; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2007b** DIN EN 1085 (2007): *Abwasserbehandlung – Wörterbuch*; Dreisprachige Fassung EN 1085:2007, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DIN 2007c** DIN EN 15169 (2007): *Charakterisierung von Abfall – Bestimmung b des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten*; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- DOEDENS 1984** Doedens, H.; Schübler, H. (1984): *Möglichkeiten der wirtschaftlichen Entsorgung von Rechen- und Siebgut*, Sonderdruck aus: *Wasserwirtschaft*, 74 (2), 1-4
- DOHMANN 1985** Dohmann, M. (1985); *Vom Grobrechen bis zum Feinsieb – Entwicklung der Grobstoffentfernung aus dem Abwasser* – Festschrift des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 60
- DRESDEN 2011** Stadtentwässerung Dresden (unbekannt): *Die Kläranlage Dresden-Kaditz*, Faltblatt für Besucher
- DUNBAR 1912** Dunbar, W.P. (1912): *Leitfaden für die Abwasserreinigungsfrage*, 4. Auflage, Verlag R. Oldenbourg, München, in: Faksimile-Druck der ATV (1998), Verlag GFA, Hennef
- DWA 2004** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2004): *DWA – Themen, Klärschlämme – Inhaltsstoffe und Bewertung*, Hennef
- DWA 2005** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2005): *Stand der Klärschlammbehandlung und –entsorgung in Deutschland*, Hennef

- DWA 2008** DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2006): DWA-Themenheft, *Neuartige Sanitärsysteme*, Hennef
- DWA 2009** DWA-M 380, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2009): *Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, Hennef
- DWA 2013** DWA-M 369, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2013): *Abfälle aus kommunalen Abwasseranlagen - Rechen- und Sandfanggut, Kanal- und Sinkkastengut*, Gelbdruck, Hennef
- DWD 2013** Deutscher Wetterdienst (2013): Wetterdaten der Messstation Öhringen, Download am 04.09.2013, 10:54 Uhr von http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_ummwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fausgabe__monatswerte__node.html%3F__nmn%3Dtrue
- ESCH 1999** Esch, B.; Krüger, G. (1999): *Entsorgung von Kläranlagenrückständen in Deutschland. Ergebnisse einer ATV-Umfrage für 1996*, KA Korrespondenz Abwasser 46 (6) 943 - 952
- FÖRSTER 1999** Förster, G.; Hoff, St. (1999): *Beitrag zur Bemessung von Feinrechen*, KA Korrespondenz Abwasser 46 (10), 1607 - 1610
- FRANKLIN 1746** Franklin, B. (1746): *Poor Richard's Almanack, etc.*, in: Saunders, R. (1977): *Poor Richard: The Almanacks for the Years 1733 - 1758*, Ballantine Books, New York
- FRANTA 1992** Franta, J.; Wilderer, P.A.; Neger, A. (1992): *Mechanische Abwasserreinigung durch Siebung*, KA Korrespondenz Abwasser 39 (6), 907 - 909
- FRÜHLING 1910** Frühling, A. (1910): *Flußverunreinigung und Behandlung städtischer Abwässer (II. Kapitel)*, in: Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Dritter Teil: Der Wasserbau, Vierter Band: Die Entwässerung der Städte, 4. Auflage, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig
- GALLENKEMPER 1999** Gallenkemper, B.; Walter, G. (1999): *Behandlung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus öffentlichen Einrichtungen (Infrastrukturabfälle)*, Labor für Abfallwirtschaft Siedlungswasserwirtschaft Umweltchemie der FH Münster

- GIESECKE 2009** Giesecke, J.; Mosonyi, E. (2009): *Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb*, Springer-Verlag, Berlin
- GRAMLICH 2007** Gramlich, A. (2007): *Probenahme, Analyse und Auswertung von Rechengut und Kanalsand*, Studienarbeit an der Berufsakademie Mosbach
- GRAMLICH 2008** Gramlich, A. (2008): Technische Zeichnungen, unveröffentlicht
- GREGOR 2009** Gregor, H.; Rupp, W.; Janoske, U.; Kuhn, M. (2009): *Experimentelle und numerische Untersuchung von Rechengut*, unveröffentlicht, Duale Hochschule Baden – Württemberg Mosbach
- GUV 2005** Bundesverband der Unfallkassen (2005): *GUV-I 8594 Beispielsammlung Explosionsschutzmaßnahmen bei der Arbeit im Bereich von abwassertechnischen Anlagen*, München
- HAHN 1987** Hahn, H.H. (1987): *Wassertechnologie, Fällung, Flockung, Separation*, Springer-Verlag Berlin
- HAMBURG 2007** Hamburg Wasser (2007): *Kennzahlen KV Köhlbrandhöft / Dradenau*, Download am 19.11.2007 von http://www.hamburgwasser.de/html/ing/pool/abwasser_in_zahlen_2006.pdf
- HANEKE 2001** Haneke, C. (2001): *Definition und exemplarische Anwendung von Kennzahlen zur Beschreibung und Optimierung des Klärwerkbetriebes*, Inaugural-Dissertation, Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Witten / Herdecke
- HANEKLAUS 2010** Haneklaus, W. (2010): *Die Regelungen zur Abwasserbeseitigung im neuen Wasserhaushaltsgesetz*, KA Korrespondenz Abwasser 57 (8) 786 -790
- HANNOVER 2007** Stadtentwässerung Hannover (2007): *Jahresabschlussbericht 2006*, Download am 19.11.2007 von http://www.hannover.de/stadtentwaesserung/060_unternehmen/010_zahlenfakten06
- HANSSEN 1999** Hanßen, H.: *Rechengutverbrennung in der Verwertungsanlage für Rückstände aus der Abwasserbehandlung (VERA)*, KA Korrespondenz Abwasser 46 (10), 1588-1595
- HARDENBERGH 1946** Hardenbergh, W.A.: *Sewerage and Sewage Treatment*, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania

- HILLIGARDT 2001** Hilligardt, D.; Branner, W.; Christ, O. (2001): *Maßnahmen zur Minderung der Geruchsemission von Rechen- und Sandfanggut*, Universität Karlsruhe (TH), Schriftenreihe der ISWW, Band 105, Karlsruhe
- HUBER 1986** Huber, H. (1986): *Huber-Rotamat-Fäkalannahmestation mit integrierter Rechengutpresse*, ATV-Jahreshauptversammlung Stuttgart, Berichte der Abwassertechnischen Vereinigung e.V., Nr. 37
- IMHOFF 1954** Imhoff, K.: *Taschenbuch der Stadtentwässerung*, 15. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, 1954
- IMHOFF 2009** Imhoff, K.; Imhoff K.R.; Jardin, N (2009): *Taschenbuch der Stadtentwässerung*, 31. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag
- KELLER 2012** Keller, D. (2012): *Analyse der neuen Daten von 2009 – 2011*, persönliche Mitteilung vom 09.07.2012
- KIRSCHMER 1926** Kirschmer, O. (1926): *Untersuchungen über den Gefällsverlust an Rechen*, Sonderdruck aus: Thoma, Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Techn. Hochschule München, Heft I.
- KLEFFNER 1976** Kleffner, I.; Müller, P. (1976): *Siebe als Möglichkeit zur Verbesserung und Vereinfachung von Kläranlagen*, KA Korrespondenz Abwasser, 23 (2) 39 - 42
- KNÄPPLE 1999** Knäpple, H.-J.: *Rechtliche Trennung von Abwasser und Abfall*, KA Korrespondenz Abwasser, 46 (10) 1549 - 1553
- KÖLN 2008** Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR: *Großklärwerk Köln-Stammheim*, Download am 26.11.2009 von
http://www.steb-koeln.de/poolfiles/Flyer_Grossklaerwerk_Stammheim_barrierefrei.pdf
- KOLB 2000** Kolb, F: *Abfallverwertung und -entsorgung in der Abwasserbehandlung*, 11. gemeinsames Seminar – Abwassertechnik – in Weimar, Schriftenreihe des Institutes für Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung WAR der TU Darmstadt, Band123, Darmstadt

- KRWG 2012** Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012): *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen* vom 24. Februar 2012 BGBl. I S. 212. Stand: zuletzt geändert durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013, BGBl. I S. 1324
- KUHN 2005** Kuhn GmbH (2005): *Filterstufenrechen*, Prospektblatt, Höpfingen
- KUHN 2008** Kuhn, M. (2008): *Rechengutbehandlung*, 7. Rostocker Abwassertagung, Universität Rostock, Institut für Umweltingenieurwesen, Band 15
- KUHN 2011** Kuhn, M. (2011): *Rechengutanfall und –qualität*, 8. Rostocker Abwassertagung, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Umweltingenieurwesen, Band 31
- KUHN GmbH 2011** Kuhn GmbH (2011): Produktblatt Waschpresse, Höpfingen
- KUHN 2013** Kuhn, M. (2013): *Rechengutanfall und –qualität*, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 60 (1), 30 - 36
- KUPFER 1997** Kupfer, K. (1997): *Materialfeuchtemessung: Grundlagen – Messverfahren – Applikationen – Normen*, Kontakt & Studium, Band 513, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim
- LINSSEN 2001** Linssen, K. (2001): *Abfallwirtschaft beim Niersverband*, Wissenschaftlich – Technische Mitteilungen des Instituts zur Förderung Wassergüte- und Wassermengenwirtschaft e.V., Band 3, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
- MAURER 2012** Maurer, P. (2012): *Jahresbericht 2011*, Universität Stuttgart, Jahresbericht des Lehr- und Forschungskärwerkes Büsnau, Persönliche Mitteilung
- MERGENTHEIM 2007** Stadtverwaltung Bad Mergentheim (2007): *Rechengut und Sand*, Beantworteter Fragebogen, Persönliche Mitteilung
- MERTSCH 1997** Mertsch, V. (1997): *Reststoffe in kommunalen Kläranlagen in NRW – Anfall, Behandlung, Verwertung und Kosten*, 15. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum, Schriftenreihe 33, Siedlungswasserwirtschaft Bochum

- METCALF 1991** Metcalf & Eddy, Inc. (1991): *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, Third Edition, McGraw-Hill, Inc., New York
- MILKOWSKI 2009** Milkowski, N. (2009): *Rechtliche Rahmenbedingungen für die CO-Vergärung in Baden-Württemberg*, DWA Landesverbandstagung Baden-Württemberg, Baden-Baden
- MÖHLE 1934** Möhle, H. (1934): *Absiebanlagen*, in: Brix, J.; Imhoff, Karl; Weldert, R.: *Die Stadtentwässerung in Deutschland*, Zweiter Band, Verlag von Gustav Fischer, Leipzig
- MÜLLER 2009** Müller, K. (2009): *Co-Vergärung und ihre Eingliederung in den Kläranlagenbetrieb*, DWA-Bundestagung, Augsburg
- MÜLLER 2013** Müller, H. (2013) : *Tagesganglinie*, Persönliche Mitteilung, Allfeld
- MÜNCHEN 2007** Stadtentwässerung München (2007): *Die Münchner Stadtentwässerung in Zahlen*, Download am 19.11.2007 von http://www.muenchen.de/cms/prod1/mde/_de/rubriken/rauthaus/35_bau/10_wir/70_mse/40_hintergruende/mse_zahlen_2006.pdf
- NICKE 2003** Nicke, U. (2003): *Rechenanlagen in kommunalen Klärwerken*, in: Hellmann, Dieter-Heinz; Riegler, Günther: *Maschinenteknik in der Abwasserreinigung*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- NRW 2001** Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2001): *Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Teil A: Bestandsaufnahme der Abfallströme der Kläranlagenabfälle in Nordrhein-Westfalen 1998*, Düsseldorf
- PANKRATZ 1995** Pankratz, T.M. (1995): *Screening Equipment Handbook: For Industrial and Municipal Water and Wastewater Treatment*, Second Edition, CRC Press LLC, Boca Raton
- PÖPEL 1980** Pöpel, F. (1980); *Vorlesung „Abwassertechnik II“* an der TH Stuttgart, 1965 in: Haug, H.: *Lehrbuch für Abwassertechnik und Gewässerschutz*, 8. Ergänzungslieferung, Hüthig-Verlag, Ort

- POTTENGEIER 2011** Pottengeier, F. (2011): *Ermittlung eines standardisierten Verfahrens zur quantitativen und qualitativen Beurteilung von kommunalem Rechengut*, in: Branner, Wolfgang: Rohrengutanfall und Rechengutentsorgungswege in Deutschland, KA Korrespondenz Abwasser 60 (4) 310 - 315
- REICHLER 1910** Reichle, C. (1910): *Die Behandlung und Reinigung der Abwässer*, Dissertation an der Königl. Sächs. Technischen Hochschule zu Dresden, Verlag von S. Hirzel, Leipzig
- RÖPER 1981** Röper, R.; Klauke, F. (1981): *Die Feststoffbelastung des Abwassers, ein Abbild der Verbrauchsgewohnheiten*, Korrespondenz Abwasser, 28 (5), 278 – 280
- ROSENWINKEL 2000** Rosenwinkel, K. (2000): *Stellenwert der mechanischen Vorreinigung bei modernen Abwasserbehandlungsverfahren*, in: ATV-DVGW, Kommunale Abwasserbehandlung, ATV-DVGW-Fortbildungskurs für Wassergütwirtschaft und Abwassertechnik, K/2, Kassel
- RUHRVERBAND 2010** Ruhrverband (2009): *Abfallbilanz 2009*, Download am 24.11.2010 von <http://www.ruhrverband.de/abwasser/abfallentsorgung/abfallbilanz-2009/>
- RUPP 2007** Rupp, W. (2007): *Entwicklung und Konstruktion einer Messeinrichtung zur Ermittlung von Stoffdaten von Rechengut*, Studienarbeit an der Berufsakademie Mosbach, Studiengang Maschinenbau – Virtual Engineering, Mosbach
- RUPP 2010** Rupp, W. (2010): *Schraubenkalibrierung*, Persönliche Mitteilung
- SCHAAF 2008** SchAAF, M. (2008): *Entwicklung und Konstruktion einer Versuchsapparatur zur Durchführung von Scherversuchen mit Rechengut*, Studienarbeit an der Berufsakademie Mosbach, Studiengang Maschinenbau – Virtual Engineering, Mosbach
- SCHÄFER 1998** Schäfer, M.; Hoffmann, E. (1998): *Reststoffmanagement auf kommunalen Kläranlagen Teil 2: Integrales Nähr-/Schadstoffmanagement*, gwf Wasser Abwasser, 139 (10), 642 - 645
- SCHÄFER 2009** Schäfer, B.(2009): *Co-Vergärung - Praktische Umsetzung in Baden-Baden*, DWA Landesverbandstagung Baden-Württemberg, Baden-Baden
- SCHANZ 2001** Schanz, W. (2001): *Reststoffe aus Kanalisation und Kläranlage und ihre Verwertung*, Wasserwirtschaftstage des ATV-DVWK Landesverbandes Bayern, Nürnberg

- SCHMIEDER 1997** Schmieder, E. (1997): *Betriebsstörungen auf kommunalen Kläranlagen - Ursachen, Auswirkungen, Vermeidungsstrategien*-, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 96
- SCHNARRENBERGER 2008** Schnarrenberger, M.; Rupp, W. (2008): *Aufbau und Inbetriebnahme einer Messeinrichtung für eine Waschpresse der Firma Kubn GmbH*, Studienarbeit an der Berufsakademie Mosbach, Studiengang Elektrotechnik – Automatisierungstechnik und Maschinenbau – Virtual Engineering, Mosbach
- SCHÜSSLER 1992** Schüßler, H. (1992): *Rechengutwäsche - Versuch einer Bestandsaufnahme*, KA Korrespondenz Abwasser, 39 (9), 1362 – 1369
- SCHÜSSLER 1998** Schüßler, H. (1998): *Umgang mit Rechen- und Sandfanggut*, ATV-Schriftenreihe Abwasser – Abfall – Gewässerschutz 12, ATV-Bundestagung Bremen, 139 - 154
- SCHÜSSLER 2000** Schüßler, H. (2000): *Rechengutzerkleinerung und –verwertung auf der Kläranlage – Alternative zur getrennten Verwertung?*, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 47 (1) 108 – 115
- SCHRAMMEL 1998** Schrammel, A. (1998): *Maschinelle Einrichtungen der mechanischen Vorreinigung*, Fortbildungskurs Biologische Abwasserreinigung, Wiener Mitteilungen Band 145, Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Wien
- SCHRIEFER 2005** Schriefer, T. (2005): *Einsatz von biologisch behandeltem Rechengut, Sandfang und Kebricht im Oberflächenabdichtungssystem der Blockland Deponie Bremen*, in: Melchior, S.; Berger, K. (Hrsg.): *Abfallverwertung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften*, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 56
- SCHWAB 2007** Schwab, J. (2007): *Technologische Weiterentwicklung der Waschpresse KWP*, Projektstudie in Zusammenarbeit mit der Berufsakademie Mosbach, unveröffentlicht
- SEYFRIED 1985** Seyfried, C.F.; Lohse, M.; Schüßler, H.; Bebendorf, G.; (1985): *Vergleich der Reinigungsleistung von Rechen, Sieben und Siebrechen sowie deren Einfluß auf die weiteren Reinigungsstufen*, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 58, Hannover
- SICKELMANN 2010** Sickelmann, M. (2010): *Die Trocknung von Rechengut*, KA-Betriebs-Info 40 (1), 1714 - 1716

- STRATMANN 2010** Stratmann, R., Statistisches Bundesamt (2010): Persönliche Mitteilung vom 2. Februar 2010
- STUTE 2010** Stute, C., Statistisches Bundesamt (2010): Persönliche Mitteilung vom 29. November 2010
- STUTTGART 2007** Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart SES (2007): *Eckdaten Hauptklärwerke Mühlhausen*, Druckschrift der Landeshauptstadt Stuttgart, Tiefbauamt, Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart SES
- TASI 1993** TA Siedlungsabfall (1993): *Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen* vom 14. Mai 1993, BAnz. Nr. 99a vom 29.05. 1993
- TEICHGRÄBER 1997** Teichgräber, B.; Stein, A. (1997): *Kosteneinsparungen bei der Behandlung und Entsorgung von Rechen- und Sandfanggut*, 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik – Schriftenreihe des Institutes für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung WAR der TH Darmstadt, Band102, Darmstadt
- TEICHGRÄBER 1998** Teichgräber, B.; Stein, A. (1998): *Anforderungen an die maschinelle Ausrüstung zur kostengünstigen Behandlung und Entsorgung von Rechen- und Sandfanggut*, 9. gemeinsames Seminar – Abwassertechnik – in Weimar, Schriftenreihe des Institutes für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung WAR der TH Darmstadt, Band108, Darmstadt
- TASI 1993** TA Siedlungsabfall (1993): *Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen* vom 14. Mai 1993, BAnz. Nr. 99a vom 29.05. 1993
- TIEDE 2001** Tiede, M. (2001): *Beschreiben mit Statistik – Verstehen*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München
- THOMPSON 2011** Thompson, B.: Persönliche Mitteilung
- TRITT 1996** Tritt, W.P.; Wulfert-Prahl, K.; Kottmeyer J. (1996): *Kompostierung von Rechengut aus kommunalen Kläranlagen*, KA Korrespondenz Abwasser, 43 (12), 2205 - 2216
- UCKSCHIES 2013** Uckschies, T. (2013): *Auslegung von Feinrechen auf kommunalen Kläranlagen*, Aqua & Gas, No. 2, 2013, 60 - 66

- VDMA 2006** Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (2006): *Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen*, VDMA 34160, Frankfurt, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- WEF 1998** Water Environment Federation (1998): *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Volume 2, Fourth Edition, WEF Manual of Practice No. 8, McGraw Hill, New York
- WEF 2010** Water Environment Federation (1998): *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volume 2: Liquid Treatment Process*, Fifth Edition, WEF Manual of Practice No. 8, McGraw Hill, New York
- WEIGAND 1992** Weigand, S. (1992): *Entwicklung und Erprobung eines Trommeldrehfilters für die Regenwasserbehandlung*, Diplomarbeit an der Fachhochschule Mannheim, Fachbereich Verfahrenstechnik, Mannheim
- WEIMAR 2006** Bauhaus-Universität Weimar (2006): *Abwasserbehandlung*, Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Universitätsverlag Weimar
- WEIMAR 2009** Bauhaus-Universität Weimar (2009): *Abwasserbehandlung*, Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Universitätsverlag Weimar
- WHG 2009** Wasserhaushaltsgesetz (2009): *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts* vom 31. Juli 2009, BGBl. I S. 2585, Stand: zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 8. April 2013, BGBl. I S. 734
- WIESLOCH 2010** Abwasser- und Hochwasserschutzverband Wiesloch (2010): *Umwelterklärung 2010*, Faltblatt, Persönliche Mitteilung
- WIMES 2008** ESR Technology plc (2008): *Water Industry Mechanical and Electrical Specification 5.03 Screens for Sewage Treatment*, ESR Technology, plc., Warrington, UK, 2008
- WRRL 2000** Wasserrahmenrichtlinie (2000): *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*. ABl. EG, Nr. L 327/1, 22.12.2000
- ZIMMERMANN 1968** Zimmermann, E.(1968): *Entfernung und schadlose Beseitigung der bei dem Klärverfahren anfallenden Abfallstoffe*, ATV-Landesgruppentagung am 17.09.1968, Mainz

ANHANG

Literaturstellen Rechengutmenge

Quelle	Rechengutmenge L/(E _{EW} •a)		Originalangabe	Bemerkungen
	min	max		
REICHLE 1910: 13	5,5	18,25	0,015 - 0,05 Liter pro Kopf und Tag	Werte für 2 - 15 mm Durchgang
FRÜHLING 1910: 466	6,4	22,1	6,4 - 22,1 cbm für 1000 Personen und Jahr	Werte für 2 - 5 mm Durchgang
BABBITT 1925: 360	2,5	25	0,1 - 1 cubic yard per million gallons sewage treated	Werte für Feinrechen
MÖHLE 1934: 149	1	3	1 - 3 Liter/Kopf/Jahr	Werte für Grobrechen mit 20 - 70 mm Stabweite
MÖHLE 1934: 149	5	15	5 - 15 Liter/Kopf/Jahr	Werte für Feinrechen mit 5 - 10 mm Stabweite
MÖHLE 1934: 149	10	30	10 - 30 Liter/Kopf/Jahr	Werte für Siebe mit 1 - 3 mm Stabweite
HARDENBERGH 1946: 257	9,5	33	10 - 35 cubic feet per million gallons of sewage	Werte für Feinrechen
IMHOFF 1954.: 92	15	25	15 - 25 L auf den Kopf im Jahr	Siebanlagen mit 3 mm Durchgang
IMHOFF 1954: 93	2	3	2 - 3 L auf den Kopf im Jahr	Grobrechen mit 100 mm Durchgang
IMHOFF 1954: 93	5	10	5 - 10 L auf den Kopf im Jahr	Feinrechen mit 20 mm Durchgang

ZIMMERMANN 1968: 189	5	9	5 - 9 L Rechengut/EJ	2 Anlagen in Wiesbaden
PÖPEL 1980: 9	1	3	1 - 3 l/E•a	Werte für Grobrechen, Vorlesungsmanuskript 1965
PÖPEL 1980: 9	5	15	5 - 15 l/E•a	Werte für Feinrechen, Vorlesungsmanuskript 1965
SEYFRIED 1985: 57	11,7	44,6	11,7 - 44,6 (l/E•a) ungepresst	7 Werte von Sieben mit einer Spaltweite von 0,5 - 6 mm
SEYFRIED 1985: 57	4,2	16,9	4,2 - 16,9 (l/E•a) gepresst	6 Werte von Rechen und Sieben mit einer Spaltweite von 0,5 - 15 mm
SEYFRIED 1985: 87	2,7	7,6	2,7 - 7,6 l/(E d)	4 Werte von Grobrechen mit einer Spaltweite von 20 - 35 mm, Angabe E im Original ist der E_{EW} . Mit hoher Wahrscheinlichkeit Schreibfehler im Original: Angabe nicht pro Tag sondern pro Jahr
SEYFRIED 1985: 87	7,3	76,5	7,3 - 76,5 l/(E a) ungepresst	6 Werte von Sieben mit einer Spaltweite von 1 - 6 mm, Bezeichnung E im Original ist höchstwahrscheinlich der E_{EW}
SEYFRIED 1985: 87	7,4	22,9	7,4 - 22,9 L/(E a) gepresst	3 Werte von Sieben mit einer Spaltweite von 1 - 6 mm, Bezeichnung E im Original ist höchstwahrscheinlich der E_{EW}
DOHMANN 1985: 134	5,5	15,5	5,5 - 15,5 l Rechengut je Einwohner /a	57 Feinrechenanlagen Ruhrverband mit einer Spaltweite von 20 - 30 mm
METCALF 1991: 454	0,47	4,7	0,5 to 5 ft ³ / Mgal	Werte für Grobrechen, Quelle von 1935

METCALF 1991: 454	4,73	28,38	5 to 30 ft ³ / Mgal	Werte für Feinrechen, Quelle von 1935
FRANTA 1992: 908	9	19,1	9 - 19,1 L/(E•a)	5 Werte für Spaltweiten von 2,5 - 25 mm
TEICHGRÄBER 1997: 52	15	15	15 L/EW/a	70 Kläranlagen Lippeverband
MERTSCH 1997: 8	2,65	2,65	..die durchschnittliche Rechengutmenge pro EW betrug 2,65 kg/a	914 Abwasserbehandlungsanlagen in NRW
WEF 1998: 9-13	0,06	11,07	0.06 to 11.7 cu ft/mil.gal	29 Anlagen in den USA
ESCH 1999: 946	6,8	6,8	6,8 l/(EW•a)	Mittelwert aus eine Umfrage von 1011 Anlagen für 1996
GALLENKEMPE R 1999: 4	3,8	3,8	3,8 kg/(E•a)	Fragebogenaktion bei ausgewählten Kommunen
SCHÜBLER 2000: 110	5,17	5,5	155 bis 165 m ³ p.a. bei 30.000 EW	1 Anlage
KUHN 2008: 211	3	3	3 L / E x a	Errechnet aus Angaben des Statistischen Bundesamtes
WEF 2010: 11-7	0,093	18,6	0.74 to 148 L / 1000 m ³	328 Anlagen in den USA
KUHN 2011: 217	1,1	4,0	1,1 bis 4,0 kg/(EW•a)	12 Anlagen, zusätzlich ein Ausreißer mit 0,3 kg/(EW•a)

Literaturstellen Trockenrückstand Rechengut ungepresst

Quelle	Trockenrückstand (Gewichtsprozent)		Originalangabe	Bemerkungen
	min	max		
REICHLER 1910: 12	15	18	Wassergehalt beträgt 82 - 85 Proz.	
FRÜHLING 1910: 467	20	20	Durchschnitt für mittlere Verhältnisse rd. 80% Wasser	
DUNBAR 1912: 236	20	30	Wassergehalt von 70 - 80 %	
BABBITT 1925: 361	10,5	60	40 - 89.5 Per Cent Moisture	18 Anlagen aufgeführt
MÖHLE 1934: 149	10	20	Wassergehalt von 80 - 90 %	Bei Trockensieben
HARDENBERGH 1946: 257	5	10	... Containing 90 to 95 or more per cent of moisture	
IMHOFF 1954: 92	10	15	Wassergehalt ist 85 bis 90 %	Siebanlagen mit 3 mm Durchgang
DOEDENS 1984: 62	8	10	Feststoffgehalt durchschnittlich bei 8 bis 10 %	für Rechengut
DOEDENS 1984: 62	19	19	Feststoffgehalt bis zu 19 %	für Siebgut
SEYFRIED 1985: 57	8,4	18,5	84 - 185 g/kg Feststoffgehalt ungepresst	11 Meßwerte
METCALF 1991: 447	15	25	15 to 25 percent dry solids content	Werte für Grobrechen
BRANNER 1996: 1103	15	30	Wasseranteil von 70 - 85%, je nachdem schon eine Kompaktierung stattgefunden hat oder nicht.	gepresst und ungepresst
WEF 1998: 9-15	10	20	10 to 20 % dry solids	
KOLB 2000: 344	8	12	Rechengut ungepresst im Mittel 8 bis 12% Trockenrückstand (TR)	
HILLIGARDT 2001: 153	15	25	Wasseranteil von 75 bis 85 %	ungepresst
LINSSEN 2001: 8/6	15	15	Unbehandeltes Rechengut enthält etwa 85 % Wasser bzw. 15 % TR	

Anhang II: Literaturstellen Trockenrückstand ungepresst

NICKE 2003: 35	10	15	Feststoffgehalt ohne Entwässerung ca. 10 -15 % TR	
KUHN 2008: 212	17	17	Wassergehalt des Rechengutes im Rechenabwurf im Mittel 83 %	ungepresst
WEF 2010: 11-8	10	20	Unwashed, uncompacted screenings can contain 10 to 20 % dry solids	
Branner 2013: 311	8	12	Feststoffkonzentration von unbehandeltem Rechengut direkt am Rechen	100 Anlagen

Literaturstellen von Trockenrückstand Rechengut gepresst

Quelle	Trockenrückstand (Gewichtsprozent)		Originalangabe	Bemerkungen
	min	max		
ZIMMERMANN 1968: 193	50	60	Wassergehalt von 40 bis 50 %	Rechengut verdichtet
SEYFRIED 1985: 57	23,5	23,5	Feststoffgehalt des gepressten Rechengutes im Mittel 235 g/kg	
HUBER 1986: 896	40	40	Feststoffgehalt von 40% gepresst	Werte für Fäkalannahme- station
SCHÜBLER 1992: 1366	25	40	Durch Einsatz von Pressen kann ein Feststoffgehalt von 25 % - 40 % erreicht werden	
HANSSEN 1999: 1589	22,1	33,6	Trockenrückstand 22,1 - 33,6 %	7 Stichproben aus dem Klärwerk Köhlbrandhöft Süd
ROSENWINKEL 2000: 2-9	25	45	Je nach Entwässerungsgrad schwankt der Wassergehalt zwischen 55-75%	entwässert
KOLB 2000: 344	20	45	Trockenrückstand zwischen 20 und 45% Rechengut entwässert und gewaschen	
HILLIGARDT 2001: 153	40	50	Trockensubstanzgehalte zwischen 40 und 50 %	gewaschen und gepresst
LINSSEN 2001: 8/6	27	27	Im Mittel ein TR von etwa 27 %	Entwässert
SCHANZ 2001: 232	20	50	Erreichbare Feststoffgehalte 20 - 50 %	Gepresst

SCHANZ 2001: 232	40	60	Feststoffgehalte 40 - 60 %	gewaschen und gepresst
NICKE 2003: 35	35	40	Feststoffgehalt ca. 35 - 40 % TR	Behandlung mit Schnecken- pressen
NICKE 2003: 38	35	45	Mindestfeststoffgehalt von ca. 35 %, bei Trockenwetter sind 40 - 45 % TR erreichbar	gewaschen und gepresst
KUHN 2008: 213	37,3	37,3	Mittelwert des Trockenrückstandes TR von Rechengut nach einer Behandlung mit einer Wasch- und Presseinrichtung 37,3 %	Über 300 Proben, gewaschen und gepresst
KUHN 2011: 225	38,3	38,3	Trockenrückstand nach einer Behandlung mit Wasch- und Presseinrichtung im Mittel von 38,3 %	Über 700 Proben, gewaschen und gepresst

Beispiel zur Dokumentation der Versuche an der Z100

Datum	Projekt-Nr.	Messung	Anfangsgewicht	Endgewicht	TR	Presshöhe	Anfangshöhe	Stauchung	Entspannung	Endvolumen	Bemerkung
		Wasser		788,5 ml							KA Walldürn
03.12.2007	PN0700856	Recheng.	1240,4 g	468,2 g	45 %	8,09 mm	96,74 mm	88,65 mm	26 mm	816 cm ³	Regen Außentemp. + 6C
		Wasser		663,4 ml							KA Walldürn
05.12.2007	PN0700858	Recheng.	998,8 g	333,1g	41 %	8,08 mm	66,83 mm	58,75 mm	25 mm	785 cm ³	Regennachlauf Außentemp. + 6°C
		Wasser		702,8 ml							KA Walldürn
06.12.2007	PN0700859	Recheng.	1030,5 g	299,3 g	40 %	8,05 mm	53,82 mm	45,77 mm	17 mm	534 cm ³	Regennachlauf Außentemp. + 7°C
		Wasser		911,8 ml							KA Walldürn
06.12.2007	PN0700860	Recheng.	1202,2 g	260,1 g	49 %	6,97 mm	80,16 mm	73,19 mm	10 mm	314 cm ³	Regennachlauf Außentemp. + 7°C
		Wasser		873,0 ml							KA Walldürn
06.12.2007	PN0700861	Recheng.	1154,0 g	288,6 g	47 %	7,46 mm	62,31 mm	54,85 mm	10 mm	314 cm ³	Regennachlauf Außentemp. + 7°C

Anhang IV: Beispiel zur Dokumentation der Versuche an der Z 100

		Wasser		747,1 ml							BAMosbach
10.12.2007	PN0700863	Recheng.	1120,4 g	306,0 g	54 %	7,47mm	76,37 mm	68,9 mm	17 mm	534 ccm	reines, nasses Papier
		Wasser		748,0 ml							KA Walldürn
11.12.2007	PN0700864	Recheng.	1026,4 g	255,6 g	41 %	6,66 mm	63,11 mm	56,45 mm	14 mm	440 ccm	Regen Außentemp. + 3°C
		Wasser		804,7 ml							KA Walldürn
11.12.2007	PN0700865	Recheng.	1079,7 g	262,2 g	43 %	6,68 mm	55,61 mm	48,93 mm	18 mm	565 ccm	Regen Außentemp. + 3°C
		Wasser		764,1 ml							KA Walldürn
11.12.2007	PN0700866	Recheng.	1039,8 g	241 g	46 %	6,20 mm	62,42 mm	56,22 mm	16 mm	502 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 3°C
		Wasser		645,7 ml							KA Walldürn
12.12.2007	PN0700868	Recheng.	890,6 g	227,6 g	48 %	6,00 mm	55,93 mm	49,93 mm	14 mm	440 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 3°C
		Wasser		669,6 ml							KA Walldürn
12.12.2007	PN0700869	Recheng.	961,3 g	282,1 g	48 %	7,28 mm	63,73 mm	56,45 mm	17 mm	534 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 3°C

Anhang IV: Beispiel zur Dokumentation der Versuche an der Z 100

		Wasser		723,9 ml							KA Walldürn
12.12.2007	PN0700870	Recheng.	1006,5 g	262,8 g	40 %	6,97 mm	71,46 mm	64,49 mm	14 mm	440 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 3°C
		Wasser		790,2 ml							KA Walldürn
12.12.2007	PN0700871	Recheng.	1036,5 g	234,6 g	36 %	6,16 mm	52,73 mm	46,57 mm	12 mm	377 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 3°C
		Wasser		661,0 ml							KA Walldürn
13.12.2007	PN0700872	Recheng.	925,8 g	270,9 g	45 %	7,40 mm	56,71 mm	49,31 mm	14 mm	440 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 6°C
		Wasser		580,8 ml							KA Walldürn
13.12.2007	PN0700873	Recheng.	831,4 g	240,2 g	45 %	6,46 mm	56,48 mm	50,02 mm	15 mm	471 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 6°C
		Wasser		675,9 ml							KA Walldürn
13.12.2007	PN0700874	Recheng.	897,9 g	211,2 g	46 %	5,78 mm	53,64 mm	47,86 mm	13 mm	408 ccm	Regennachlauf Außentemp. + 6°C
		Wasser		615,3 ml							KA Walldürn
17.12.2007	PN0700875	Recheng.	954,4 g	308,7 g	35 %	8,28 mm	55,68 mm	47,40 mm	13 mm	408 ccm	Trockenwetter Außentemp. -2,5°C

Anhang IV: Beispiel zur Dokumentation der Versuche an der Z 100

17.12.2007	PN0700876	Wasser Recheng.	656,9 ml 968,0 g	309,2 g	39 %	8,25 mm	68,11 mm	59,86 mm	15 mm	471 ccm	KA Buchen Trockenwetter Außentemp. -2,5°C
17.12.2007	PN0700877	Wasser Recheng.	516,2 ml 975,0 g	445,9 g	30 %	12,46 mm	58,34 mm	45,88 mm	15 mm	471 ccm	KA Obrigheim Trockenwetter Außentemp. -1°C
18.12.2007	PN0700878	Wasser Recheng.	650,4 ml 973,7 g	301,3 g	41 %	8,07 mm	62,76 mm	54,69 mm	14 mm	440 ccm	KA Walldürn Trockenwetter Außentemp. -4°C
18.12.2007	PN0700879	Wasser Recheng.	644,4 ml 1007,6 g	361,7 g	42 %	9,73 mm	72,71 mm	62,98 mm	15 mm	471 ccm	KA Buchen Trockenwetter Außentemp. -3°C
18.12.2007	PN0700880	Wasser Recheng.	600,8 ml 973,8 g	373,8 g	42 %	9,95 mm	65,59 mm	55,64 mm	14 mm	440 ccm	KA Obrigheim Trockenwetter Außentemp. -1,5°C
19.12.2007	PN0700881	Wasser Recheng.	628,0 ml 1010,8 g	352,8 g	40 %	9,52 mm	64,81 mm	55,29 mm	11 mm	345 ccm	KA Walldürn Trockenwetter Außentemp. -7°C

Anhang IV: Beispiel zur Dokumentation der Versuche an der Z 100

		Wasser		624,1 ml							KA Buchen
19.12.2007	PN0700884	Recheng.	971,4 g	346,6 g	38 %	9,24 mm	70,61 mm	61,37 mm	13 mm	408 ccm	Trockenwetter Außentemp. -6°C
		Wasser		563,4 ml							KA Obrigheim
19.12.2007	PN0700885	Recheng.	985,0 g	428,3 g	37 %	11,67 mm	61,13 mm	49,46 mm	15 mm	471 ccm	Trockenwetter Außentemp -3°C

Kläranlagen-Charakteristik

Im Rahmen einer Untersuchung haben wir festgestellt, dass auch in Fachkreisen sehr wenig über Rechengut und Sand aus Kläranlagen bekannt ist. Deshalb haben wir uns dazu entschlossen, eine aussagekräftige Datenbank zu erstellen. Diese soll ermöglichen, einzelne Anlagen miteinander zu vergleichen, um Rückschlüsse auf das Verhalten unserer Maschinen für die Einlaufgruppe in unterschiedlichen Umgebungen ziehen zu können. Dadurch können wir zukünftig die Maschinen an verschiedenste Anlageneigenschaften besser anpassen. Zu diesem Zweck bitten wir Sie, diesen Fragebogen zur Kläranlagen-Charakteristik sorgfältig auszufüllen. Die Daten werden von uns selbstverständlich streng vertraulich behandelt. Wir würden uns sehr über Ihre Unterstützung freuen.

Allgemeine Daten

Name der Kläranlage: _____

Betreiber: _____

Ansprechpartner: _____

Tel.: _____ Fax: _____

Email: _____

PLZ: _____ Ort: _____

Bundesland: _____

Größe der Kläranlage: _____ EW

Auslastung: _____ EW

Länge Kanalnetz: ca. _____ km

Wichtig:

Die Werte müssen den vorgegebenen Einheiten entsprechend eingetragen werden. Bei zwei vorgegebenen Einheiten muss die nichtverwendete gestrichen werden!

Die Benotung der Zufriedenheit einer Maschine erfolgt nach dem Schulnotenprinzip: 1 – sehr gut, 6 – mangelhaft.

Zulauf

Max. Zulaufmenge: _____ [l/s] ; [m³/h]

Trockenwetterzulauf-Ø: _____ [l/s] ; [m³/h]

Zulauf: Freigefälle () ; Schneckenpumpe () ; Kreiselpumpe () ; Stauraumkanal ()

Besondere Einleiter (z.B. Käserei, Schlachtereier, Firma..., Industrie...): _____

Rechenanlage

Ausführung: Stufenrechen () ; Harken-/Greiferrechen () ; Harkenumlaufrechen () ;

Lochblechumlaufrechen () ; Sonstiges _____

Stababstand (Spaltweite): _____ mm

Kanaltiefe (bezogen auf FFB): _____ m Kanalbreite: _____ m

Maschinenhersteller (falls bekannt): _____

Betriebsstunden: _____ h Baujahr: _____

Anzahl der Rechen: _____ Stück

Zufriedenheit: (1) (2) (3) (4) (5) (6)

Rechengut

Art der Behandlung: Pressen () ; Waschen und Pressen () ;
Sonstiges _____

Hersteller d. Behandlungsmaschine (falls bekannt): _____

Betriebsstunden: _____ h Baujahr: _____

Rechengutmenge pro Monat: ca. _____ [t] ; [m³]
pro Jahr: ca. _____ [t] ; [m³]

Anzahl der Rechengutbehandlungsmaschinen: _____ Stück

Entsorgungswege: Deponie () ; Verbrennung () ; Sonstiges _____

Zufriedenheit: (1) (2) (3) (4) (5) (6)

Herzlichen Dank für Ihre Hilfe. Für Rückfragen stehen wir gerne zur Verfügung!

Maximalwerte der Messungen Kapitel 6 (Feldtest)

Monat	Anzahl Zyklen	Druck in Membrane in 100 kPa	Wirkleistung Motor in kW	Zähler vorwärts in s	Summe Monat vorwärts in s	Zähler rückwärts in s	Summe Monat rückwärts in s	Verhältnis vorwärts zu rückwärts
März 09	766	5,9	4,6	509.856		62.645		
April 09	594	3,86	3,63	578.521	68.665	71.284	8.639	7,95
Mai 09	647	4,56	4,16	653.385	74.864	80.473	9.189	8,15
Juni 09	504	4,72	4,62	707.358	53.973	87.448	6.975	7,74
Juli 09	596	5,2	4,28	773.331	65.973	95.702	8.254	7,99
August 09	419	3,06	4,07	819.002	45.671	101.610	5.908	7,73
September 09	409	4,18	4,94	860.827	41.825	106.896	5.286	7,91
Oktober 09	466	3,49	4,62	924.836	64.009	114.105	7.209	8,88
November 09	587	4,25	5,34	1.003.977	79.141	122.845	8.740	9,06
Dezember 09	449	4,34	5,29	1.082.378	78.401	128.630	5.785	13,55
Januar 10	622	3,48	5,29	1.142.334	59.956	137.124	8.494	7,06
April 10	292	3,04	3,19	1.599.867	457.533	181.384	44.260	10,34
Mai 10	573	3,87	4,09	1.669.061	69.194	189.532	8.148	8,49
Juli 10	445	3,1	4,23	1.789.489	120.428	205.388	15.856	7,60

Anhang VI: Maximalwerte der Messungen Kapitel 6

August 10	600	3,49	4,73	1.847.578	58.089	213.401	8.013	7,25
September 10	451	3,5	4,49	1.899.265	51.687	219.917	6.516	7,93
Oktober 10	527	4,06	5,34	1.948.609	49.344	226.581	6.664	7,40
November 10	428	4,03	5,25	1.996.724	48.115	232.824	6.243	7,71
Dezember 10	636	4	5,35	2.056.242	59.518	241.453	8.629	6,90
Januar 11	926	0,51	5,33	2.224.112	167.870	257.859	16.406	10,23
Februar 11	903	0,23	4,99	2.350.334	126.222	271.098	13.239	9,53
März 11	279	0,13	3,03	2.374.630	24.296	274.691	3.593	6,76
Summe	13045							

Regenmenge Wetterstation Öhringen Kapitel 6 (DWD, 2013)

Station,	DatBeg, DatEnd,	Summe NIEDERSCHLAG in mm,	NIEDERSCHLAG/d max in mm
3761,	20090301, 20090331	88.4,	16.0
3761,	20090401, 20090430	39.5,	18.2
3761,	20090501, 20090531	80.7,	20.7
3761,	20090601, 20090630	47.3,	7.6
3761,	20090701, 20090731	153.2,	21.7
3761,	20090801, 20090831	81.3,	43.4
3761,	20090901, 20090930	18.4,	6.8
3761,	20091001, 20091031	73.6,	15.6
3761,	20091101, 20091130	87.7,	16.0
3761,	20091201, 20091231	90.8,	11.1
3761,	20100101, 20100131	45.7,	7.9
3761,	20100201, 20100229	59.1,	16.7
3761,	20100301, 20100331	44.9,	8.1
3761,	20100401, 20100430	23.6,	7.9
3761,	20100501, 20100531	91.6,	17.5
3761,	20100601, 20100630	43.8,	17.3
3761,	20100701, 20100731	72.9,	19.9
3761,	20100801, 20100831	120.6,	21.4
3761,	20100901, 20100930	51.6,	17.2

Anhang VII: Regenmenge Wetterstation Öhringen Kapitel 6

3761,	20101001,	20101031	50.8,	12.3
3761,	20101101,	20101130	101.9,	15.8
3761,	20101201,	20101231	111.8	24.3
3761,	20110101,	20110131	69.2,	17.1
3761,	20110201,	20110228	19.3,	4.1
3761,	20110301,	20110331	17.6,	7.2

Aus dem Institut für Umweltingenieurwesen
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen

THESEN ZUR DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Wirt.-Ing. (FH)
Michael Kuhn, Höpfingen

Höpfingen, den 05. Dezember 2013

Stand der Wissenschaft

1. Bei Beginn der Arbeit gab es nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zu Rechengut aus kommunalen Kläranlagen. Diese bezogen sich sehr häufig auf eine grundlegende Arbeit von 1985, welche aber nur auf einer geringen Datengrundlage basiert. Durch Veränderungen der Verbrauchergewohnheiten, der Gesetzeslage und der Anlagentechnik haben sich die die Menge und der Trockenrückstand von Rechengut seit dieser Zeit verändert.

Ziel

2. Ziel der Arbeit ist es, aktuelle Daten über die Rechengutmenge und deren Trockenrückstand zu ermitteln. Damit soll der Wissenschaft und der Praxis eine Datengrundlage zur anfallenden Rechengutmasse an die Hand gegeben werden, mit deren Hilfe eine genauere Planung und Auslegung von Anlagen zur Rechengutbehandlung möglich ist. Außerdem sollen die Zusammenhänge bei der Entwässerung von Rechengut ermittelt und dargestellt werden. Dies dient zu einem tieferen Verständnis des Entwässerungsvorgangs von Rechengut. Abschließend soll ermittelt werden, welcher Trockenrückstand auf kommunalen Kläranlagen erreicht wird.

Methoden

3. Zu diesem Zweck wurden folgende Schwerpunkte untersucht:
 - Ermittlung der Rechengutmenge und des Trockenrückstands aus der Literatur
 - Laborversuche zum Entwässerungsverhalten von Rechengut
 - Ermittlung von Entwässerungsdaten im Rahmen eines Feldtests auf einer Kläranlage
 - Sammlung und Analyse von Rechengutproben zur Ermittlung des Trockenrückstands von Rechengut auf Kläranlagen in Deutschland

Hauptaussagen

4. Die spezifische Rechengutmasse beträgt 1,1 – 4,0 kg Rechengut pro Einwohnerwert und Jahr. Die Menge ist von vielen Faktoren wie der Größe der Kläranlage oder der Spaltweite des Rechens abhängig und unterliegt deutlichen zeitlichen Schwankungen.
5. Eine Zuordnung von Rechengutanfall und Entwässerungssystem ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich.
6. Die Verringerung des Stababstandes eines Grobrechens von 30 auf 25 mm auf der untersuchten Anlage erhöht den Rechengutanfall am Grobrechen um 87,5 %.
7. Trotz des Einsatzes eines Grobrechens mit geringerem Stababstand reduzierte sich die Rechengutmasse auf der untersuchten Anlage um 49,8 %, weil zusätzlich eine Rechengutwaschpresse eingebaut wurde.
8. Der Trockenrückstand von Rechengut direkt vom Rechen schwankt zwischen acht und zwölf Prozent der Gesamtmasse. Zur Reduzierung von Volumen und Masse ist eine Entwässerung sinnvoll. Sie beginnt schon beim Transport des Rechenguts durch das Eigengewicht des Wassers. Durch zusätzlich aufgebrauchte Kräfte kann der Trockenrückstand je nach Zusammensetzung bis über 45% gesteigert werden. Die dazu notwendigen Kräfte steigen jedoch überproportional an. Je nach Zusammensetzung des Rechenguts kann dieser Wert aber nicht gesichert erreicht werden.
9. Die Entwässerung gelingt besser, wenn das Rechengut langsam gepresst wird. Dies führt aber zu einer niedrigeren Durchsatzleistung. Mehrere Pressvorgänge ohne Steigerung der Presskraft führen ebenfalls zu einem besseren Entwässerungsergebnis.
10. Nach dem Pressvorgang tritt auch ohne räumliche Ausdehnung eine Entspannung des Rechenguts ein. Die Volumenreduzierung erreicht Werte zwischen 80 % und 90 %.
11. Je stärker das Rechengut gepresst wird, desto kleiner sind die Hohlräume, aus denen das Presswasser aus dem Pressling heraus fließen kann.
12. Die Scherkraft erhöht sich überproportional mit steigender Presskraft.
13. Der Trockenrückstand von Rechengut nach der Entwässerung ist durch dessen heterogene Zusammensetzung nicht konstant. Durch die Variation der bei der

Entwässerung aufgebrauchten Presskräfte kann eine gewisse Beeinflussung des Trockenrückstandes erreicht werden. In der untersuchten Systemkombination können die Wirkleistung des Motors und der Druck in der Nachpresseinrichtung als Indikatoren des Trockenrückstands und als Führungsgröße der Regelungseinrichtung genutzt werden.

14. Gepresstes Rechengut hat für den Trockenrückstand einen Median von 37,6 % und einen arithmetischen Mittelwert von 38,3 % bei einer Standardabweichung von 8,0 %. Ungepresstes Rechengut hat für den Trockenrückstand einen Median von 14,7 % und einen arithmetischen Mittelwert von 16,7 % bei einer Standardabweichung von 5,4 %.
15. Der Trockenrückstand von gepresstem Rechengut ist im Misch- und im Trennsystem ohne signifikanten Unterschied. Eine jahreszeitliche Schwankung ist erkennbar, aber nicht zuordenbar.
16. Wird das Rechengut ausgewaschen, reduziert sich der organische Anteil im Rechengut in geringem Maße.
17. Ausgewaschenes Rechengut lässt sich deutlich besser entwässern.
18. Die maschinellen Veränderungen in der Grobrechenstraße der untersuchten Anlage haben auch einen Einfluss auf den Trockenrückstand und den Glühverlust in der Feinrechenstraße.

Neue Erkenntnisse

19. Die in Abfallbehandlungsanlagen angelieferte Rechengutmenge hat sich in den letzten 30 Jahren reduziert. Auch die spezifische Rechengutmenge ist geringer als die bisher in der Literatur zu finden war. Dies liegt an den veränderten Rahmenbedingungen, insbesondere am gestiegenen Einsatz von Rechengutbehandlungsanlagen. Diese sind sehr häufig Rechengutwaschpressen.
20. Der Trockenrückstand von Rechengut hat sich aus den gleichen Gründen erhöht.
21. Die Wirkleistung von Antriebsmotoren für Rechengutpressen und der Druck in einem Zusatzmodul können als Indikator für den Trockenrückstand genutzt werden.
22. Der Trockenrückstand unterliegt im Jahresverlauf Schwankungen, die aber nicht bestimmten Ursachen zugeordnet werden können.

23. Eine regionale Zuordnung des Trockenrückstands von Rechengut ist nicht möglich.

Beurteilung der Methoden

24. Die absolute und die spezifische Rechengutmenge konnten durch die ermittelten Daten mit guter Genauigkeit bestimmt werden.
25. Rechengut ist sehr heterogen. Deshalb kann die Zusammensetzung einer Probe sehr unterschiedlich sein. Damit muss mit einer hohen Schwankungsbreite der Ergebnisse gerechnet werden.
26. Durch die Laborversuche konnte die Entwässerung von Rechengut gut getestet werden. Die zeitliche Verzögerung bei der Ermittlung des Presswassers spielt für die Datenermittlung keine große Rolle.
27. Die Schraubkraft einer Flanschverbindung konnte nicht ermittelt werden, da nur drei von zwölf Schrauben mit einem Dehnmessstreifen ausgerüstet wurden.
28. Die Messung der Wirkleistung des Antriebsmotors und des Drucks im Zusatzmodul einer Waschpresse erbrachte eine gute Vergleichbarkeit zu den gemessenen Trockenrückständen des Rechenguts.
29. Die Ermittlung des Trockenrückstands von Rechengut aus Kläranlagen war erheblichen Unsicherheiten unterworfen. Durch die zufällige Auswahl der Anlagen und die unbewusste Vorselektion bei der Probenahme und -analyse sind hohe Einzelfehler nicht auszuschließen. Diese Einzelfehler sind allerdings nicht systematisch. Die große Anzahl der Proben wiegt die hohe Streuung in den Daten auf, so dass trotzdem statistisch fundierte Aussagen getroffen werden können und teilweise auch Unterschiede bzw. Zusammenhänge als signifikant nachgewiesen werden können.
30. Die geplante Umfrage konnte vermutlich auf Grund von Unsicherheiten auf der Seite des Betriebspersonals nicht durchgeführt werden.

Ungeklärte Fragen

31. Aus der vorliegenden Arbeit können die folgenden Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten abgeleitet werden:

- Welche Masse an Rohrechengut fällt auf kommunalen Kläranlagen an?
- Welche Masse wird nicht zurückgehalten?
- Welche Auswirkungen hat die nicht zurückgehaltene Masse in den nachfolgenden Anlagenteilen?
- Wie ist die zeitliche Verteilung des Rechengutanfalls?
- Welche Masse von Rechengut aus Kläranlagen werden mit welchem Trockenrückstand auf Abfallbehandlungsanlagen angeliefert? Welche Trockenmasse leitet sich davon ab?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Entwässerungssystem und Rechengutanfall?
- Welche Rechengutmasse wird in Abhängigkeit der Öffnungsgeometrie von Rechen und Sieben zurückgehalten?
- Wie gut ist die Korrelation von Wirkleistung und Trockenrückstand in der beschriebenen Systemkombination?

Allgemeine Bedeutung der Ergebnisse

32. Die Arbeit ermöglicht es, die Maschinen und Anlagen zur Rechengutentnahme und -behandlung besser an den tatsächlichen Rechengutanfall anzupassen.
33. Das beschriebene Zusatzmodul zur Verbesserung der Entwässerungsleistung einer Waschpresse kann zu einer Vergleichmäßigung des Trockenrückstands beitragen.
34. Durch die Laborversuche zur Entwässerung und den Daten aus dem Feldversuch können mathematische Modelle abgeleitet werden. Mit diesen kann eine numerische Simulation erstellt werden. Damit können Veränderungen am Entwässerungsprozess oder Skalierungseffekte am Rechner simuliert werden. Dadurch können aufwendige Versuchsaufbauten auf das absolut notwendige Maß reduziert werden.