

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildungsverzeichnis | XIX |
| Tabellenverzeichnis | XXV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Hintergrund der Arbeit | 2 |
| 1.2 Zielstellung und Struktur der Dissertation | 3 |
| 2 Grundlagen der Unterdruckentwässerung | 5 |
| 2.1 Funktionsprinzip und technisches Regelwerk | 6 |
| 2.2 Projektbeispiele für Schwarzwasserunterdrucksysteme | 10 |
| 2.3 Der Stoffstrom Schwarzwasser | 11 |
| 2.4 Zusammenfassung | 17 |
| 3 Chemische Prozesse im Schwarzwasser | 19 |
| 3.1 Schwarzwasser in Unterdruckentwässerungssystemen | 19 |
| 3.1.1 Schwarzwasserzusammensetzung | 20 |
| 3.1.2 Feststoffe aus chemischen Umsetzungen | 22 |
| 3.1.3 Komplexbildungen | 23 |
| 3.2 Modellschwarzwasser | 25 |
| 3.2.1 Zusammensetzung der Modelllösung | 25 |
| 3.2.2 Vergleich von Modell- und nativem Schwarzwasser | 27 |
| 3.3 Auswirkungen der Harnstoffhydrolyse | 28 |
| 3.4 Zusammenfassung | 29 |
| 4 Modellierung der physikalischen und chemischen Prozesse im Schwarzwasser | 31 |
| 4.1 Grundlagen | 32 |
| 4.1.1 Löslichkeit und Kristallisation | 32 |
| 4.1.2 Besonderheiten bei der Verwendung thermodynamischer Modelle | 35 |
| 4.1.3 Stoffausträge über die Gasphasen | 35 |
| 4.2 Modellerstellung und -validierung | 38 |
| 4.2.1 Flüssigphase | 38 |
| 4.2.2 Gasphase | 41 |
| 4.3 Einflussfaktoren der Feststoffbildung im Schwarzwasser | 43 |
| 4.3.1 Einfluss der Spülwassermenge | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2 | Einfluss der Spülwasserzusammensetzung | 47 |
| 4.3.3 | Einfluss des Systemdruckes | 48 |
| 4.4 | Zusammenfassung | 51 |
| 5 | Grundlagen der Bildung von Ablagerungen und Inkrustationen | 53 |
| 5.1 | Klassifizierung von Inkrustationsarten | 54 |
| 5.1.1 | Stofftrennung | 54 |
| 5.1.2 | Phasenwechsel | 56 |
| 5.1.3 | Biogenes Wachstum | 59 |
| 5.2 | Bildungsprozesse bei der Mineralinkrustation | 60 |
| 5.2.1 | Abiotische Bildung | 60 |
| 5.2.2 | Biotische Bildung | 61 |
| 5.3 | Auftreten von Inkrustationen in abwasserführenden Systemen | 63 |
| 5.4 | Maßnahmen gegen Inkrustationen | 65 |
| 5.5 | Zusammenfassung | 68 |
| 6 | Untersuchungen an Unterdruckentwässerungssystemen | 69 |
| 6.1 | Auftreten von Inkrustationen in Unterdrucksystemen | 70 |
| 6.1.1 | Material und Methoden | 70 |
| 6.1.2 | Ergebnisse und Diskussion | 73 |
| 6.2 | Untersuchung des Probenmaterials | 77 |
| 6.2.1 | Mikroskopische Untersuchungen | 78 |
| 6.2.2 | Röntgendiffraktometrie | 79 |
| 6.2.3 | Chemische/ physikalische Untersuchungen | 81 |
| 6.3 | Wechselwirkung von Ablagerungen und Harnstoffhydrolyse | 83 |
| 6.4 | Zusammenfassung | 85 |
| 7 | Inkrustationsprozess unter Verwendung von Einzelsubstanzen | 87 |
| 7.1 | Bildung organischer Inkrustationen | 88 |
| 7.1.1 | Material und Methoden | 88 |
| 7.1.2 | Ergebnisse | 89 |
| 7.2 | Bildung anorganischer Inkrustationen | 92 |
| 7.2.1 | Material und Methoden | 92 |
| 7.2.2 | Ergebnisse | 94 |
| 7.3 | Kombination von Partikel- und Kristallinkrustation | 97 |
| 7.3.1 | Vorgehen | 97 |
| 7.3.2 | Validierung der Methode | 98 |
| 7.4 | Zusammenfassung | 100 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 8 | Schwarzwasser innerhalb von Unterdrucksystemen | 103 |
| 8.1 | Halbtechnische Versuchsanlage | 103 |
| 8.2 | Bau- und betriebstechnische Einflüsse auf die Bildung von Inkrustationen | 106 |
| 8.2.1 | Luft:Wasser-Verhältnis | 106 |
| 8.2.2 | Einfluss der Rohrtemperatur | 111 |
| 8.2.3 | Einfluss des Rohrmaterials | 112 |
| 8.3 | Versuche zur Beseitigung von Inkrustationen | 115 |
| 8.3.1 | Material und Methoden | 115 |
| 8.3.2 | Ergebnisse und Diskussion | 116 |
| 8.4 | CFD-Strömungssimulation | 120 |
| 8.4.1 | Grundlagen der Computational fluid dynamics | 121 |
| 8.4.2 | Modellerstellung | 123 |
| 8.4.3 | Modellvalidierung | 124 |
| 8.4.4 | Transportverhalten im Unterdrucksystem | 128 |
| 8.4.5 | Fließgeschwindigkeiten | 130 |
| 8.4.6 | Übertragbarkeit der Simulation auf die Bildung von Inkrustationen | 131 |
| 8.5 | Zusammenfassung | 133 |
| 9 | Zusammenfassung und Auswirkungen auf die Bemessung und den Betrieb | 135 |
| 9.1 | Modellvorstellung des Bildungsprozesses | 135 |
| 9.2 | Qualitative Zusammenfassung der Einflussfaktoren | 136 |
| 9.3 | Bau- und betriebstechnische Verminderungs- und Vermeidungskonzepte | 137 |
| 9.4 | Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Systeme | 139 |
| 9.5 | Ausblick | 140 |
| | Literaturverzeichnis | 141 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Schema des HAMBURG WATER Cycle [®] , aus HWC (2014) | 2 |
| 1.2 | Schematischer Aufbau und Struktur der Arbeit | 3 |
| 2.1 | Schematische Zusammenhang zwischen Durchflussmenge und Fließgeschwindigkeit bei Entwässerung mittels Freigefälle (oben) und Unterdruck (unten) | 7 |
| 2.2 | Schematische Darstellung der Schmutzwasser Unterdruckentwässerung | 8 |
| 2.3 | Schematische Darstellung der Schwarzwasser Unterdruckentwässerung | 9 |
| 2.4 | Einfluss der Harnstoffhydrolyse auf gelöste Substanzen im Urin, aus Udert (2003) | 12 |
| 2.5 | Einfluss der Spülwasserhärte auf die Calcium- und Magnesiumkonzentration im Schwarzwasser | 17 |
| 3.1 | Schwarzwasseranalysen aus Siedlungsgebieten und Betriebsgebäuden | 21 |
| 3.2 | Prozentuale Ausfällung von Calcium, Magnesium und Phosphor im Schwarzwasser vergleichend zu den Ausfällungen bei der Verwendung von Reinsubstanzen | 23 |
| 3.3 | Qualitativer Nachweis komplexierender Verbindungen im Schwarzwasser durch erhöhter ionenchromatographischer Retention . | 24 |
| 3.4 | Vergleich der relativen Konzentrationsbereiche von Modell- und nativem Schwarzwasser | 27 |
| 3.5 | Auswirkung der Harnstoffhydrolyse auf den Stoffstrom Schwarzwasser im Vergleich zum Stoffstrom Urin | 28 |
| 3.6 | Konzentrationen und pH-Wert während der Harnstoffhydrolyse im Modellschwarzwasser | 29 |
| 4.1 | Schematischer Aufbau eines Löslichkeit-Temperatur-Diagramms aus: Schwister (2010), verändert | 33 |
| 4.2 | Schematische Darstellung der Kristallisationsprozesse | 34 |
| 4.3 | Validierung der Simulationsergebnissen der pH-Werte bei der Harnstoffhydrolyse mit Messwerten | 39 |
| 4.4 | Änderungen der gelösten Ca, Mg und P Konzentrationen im Labor sowie im Modell | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.5 | Gemessener und modellierter Stickstoffaustrag über die Gasphase mit steigendem Luft:Wasser Verhältnis bei 50 kPa, pH 8,0 | 42 |
| 4.6 | Sättigungsindizes in Schwarzwasser in Abhängigkeit von der Harnstoffhydrolyse | 43 |
| 4.7 | Fällungspotentiale im Schwarzwasser in Abhängigkeit von der Harnstoffhydrolyse | 44 |
| 4.8 | Veränderung der Fällungspotentiale im Schwarzwasser in Abhängigkeit von der Spülwassermenge | 45 |
| 4.9 | Absolute Mengen an Ausfällungen bezogen auf einen Liter Urin im Vergleich zur Fällung in Urintransportleitungen | 46 |
| 4.10 | Einfluss der Spülwasserhärte auf das Fällungspotential im Schwarzwasser | 47 |
| 4.11 | Kohlenstoff- und Stickstoffausträge von Schwarzwasser über die Gasphase bei unterschiedlichen Systemdrücken | 48 |
| 4.12 | Zusammenhang zwischen Harnstoffhydrolyse und Kohlendioxidaustrag | 49 |
| 4.13 | Fällungspotential in Abhängigkeit zur Harnstoffhydrolyse sowie zum Systemdruck | 50 |
| 5.1 | Bewegungsmechanismen von Feststoffen in einer Strömung nach Guichard und Moucel (1992) zitiert in Ristenpart (1995) | 55 |
| 5.2 | Löslichkeit unterschiedlicher Calciumphosphat-Phasen in Abhängigkeit vom pH-Wert sowie Calciumkonzentration in Lösung bei 25 °C; konstantes Ca zu PO ₄ -Molverhältnis nach Koutsoukos et al. (1980), verändert | 58 |
| 5.3 | Löslichkeitskurve von Magnesiumammoniumphosphat in Abhängigkeit des pH-Wertes aus Doyle und Parsons (2002), verändert | 59 |
| 5.4 | Biofilmbildung in Wassersystemen nach Flemming (2011), verändert | 61 |
| 5.5 | REM Aufnahme eines inkrustierten Biofilms: Urease-produzierende Bakterien sowie anorganische Inkrustationen (aus: Kleinen und Laube (2007) | 62 |
| 5.6 | Kanalreinigungsgeräte aus Panse und Panse (1915) | 66 |
| 6.1 | Inspektionskameras: links RI1320SLC; rechts Kanal TV-Kamera MINI3000 | 71 |
| 6.2 | Bewertungskategorien für die Beurteilung der Ablagerungsmengen durch die mittlere prozentuale Bedeckung der Rohrrinnenwandung (hier grau oder schwarz) mit Ablagerungen (hier gelb oder weiß) . . . | 72 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.3 | Bewertungsmethodenschema zur Identifizierung von Einflüssen am Beispiel eines seitlichen Leitungsanschlusses | 73 |
| 6.4 | Beispiele einer qualitativen Auswertung der Videoinspektion von Unterdruckleitungen hinsichtlich des Auftretens von Inkrustationen . | 74 |
| 6.5 | Lokale Veränderung der Inkrustationsmengen in Abhängigkeit von bau- und betriebstechnischen Einflussgrößen | 75 |
| 6.6 | Beispiele von Schwarzwasserunterdruckleitungen mit sichtbarer Inkrustierung | 77 |
| 6.7 | Mikroskopische Aufnahmen von Inkrustationen unterschiedlicher Betriebsalter | 78 |
| 6.8 | Vorkommende Mineralien der untersuchten Inkrustationen | 80 |
| 6.9 | Semiquantitative Analyse der mineralischen Zusammensetzung von Inkrustationen | 81 |
| 6.10 | Glühverlust von Inkrustationen und Betriebsdauer des jeweiligen Systems | 82 |
| 6.11 | Zusammenhang zwischen Calcium und Magnesium der Inkrustationen sowie des im jeweiligen System eingesetzten Spülwassers | 83 |
| 6.12 | Änderung des pH-Wertes im Schwarzwasser infolge der Harnstoffhydrolyse in freier Lösung sowie an bestehenden Inkrustationen | 84 |
| 7.1 | Versuchsaufbau zur Bildung von organischen Inkrustationen auf Testkörpern | 89 |
| 7.2 | Mikroskopische Aufnahmen der Inkrustationskörper vor (links) und nach einer diskontinuierlichen Benetzung mit Modellschwarzwasser (rechts) bei 20-facher Vergrößerung | 90 |
| 7.3 | Inkrustationsmenge bei kontinuierlicher und intermittierender Benetzung im Modellschwarzwasser | 90 |
| 7.4 | Schematische Darstellung der Inkrustation von Testkörpern unter Laborbedingungen | 94 |
| 7.5 | Testkörper nach Versuchen zur anorganischen Inkrustierung durch Suspensionskristallisation (1), zeitgleich mit der Harnstoffhydrolyse (2) sowie unter Einbezug eines Biofilms (3) | 95 |
| 7.6 | Inkrustationsmengen sowie Summe der Calcium-, Magnesium-, Phosphor- und Ammoniumverbindungen | 95 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.7 | Aufbau der automatisierten Laboranlage zur Inkrustierung von Testkörpern | 97 |
| 7.8 | Versuchsablauf der Inkrustationsversuche unter Laborbedingungen . . | 98 |
| 7.9 | Aufnahmen der Testkörper nach der Partikelinkrustation (links) sowie Kristallinkrustation (rechts) | 99 |
| 7.10 | Vergleich der anorganischen Fraktion von synthetischen und nativen Inkrustationen | 99 |
| 8.1 | Halbtechnische Versuchsanlage zur Untersuchung der Inkrustationsbildung in Rohrleitungssystemen der Unterdruckentwässerung | 104 |
| 8.2 | Fließschema der halbtechnischen Versuchsanlage | 104 |
| 8.3 | Versuchsablauf der Inkrustationsversuche in der halbtechnischen Versuchsanlage | 106 |
| 8.4 | Druckverlauf innerhalb des Unterdrucksystems (24 h, Wochentag) . . | 107 |
| 8.5 | Eingetragene Luftmenge in ein bestehendes Unterdrucksystem mit Nachweis von Undichtigkeiten | 108 |
| 8.6 | Veränderung der Leitungsinkrustierung in Abhängigkeit von Betriebszeit und Luft:Wasser-Verhältnis | 109 |
| 8.7 | Unterdruckleitung nach 5 Jahren Regulärbetrieb (oben) sowie nach 6 Monaten mit Undichtigkeiten | 110 |
| 8.8 | Beheizter Leitungsabschnitt (links) sowie resultierende Inkrustationen nach 8 Wochen (rechts) | 111 |
| 8.9 | Inkrustierte Unterdruckleitung aus HDPE mit Einbauten aus Metall . . | 112 |
| 8.10 | Versuche zur mechanischen Reinigung mittels Hochdruckspülung . . | 116 |
| 8.11 | Ergebnisse der chemischen Reinigung | 117 |
| 8.12 | Ergebnisse der mechanischen Reinigung mittels Crushed Ice | 118 |
| 8.13 | Vor und nach der mechanischen Reinigung mittels Hochdruckspülung. | 119 |
| 8.14 | Schematische Darstellung des CFD Modells | 123 |
| 8.15 | Teilabschnitte der halbtechnischen Versuchsanlage (rechts) sowie des erstellten CFD-Modells (links) | 124 |
| 8.16 | Vergleich des Strömungsverlaufes innerhalb einer DN 40 Unterdruckleitung sowie der CFD Simulation | 125 |
| 8.17 | Modellierter und gemessener Lufteintrag in ein Unterdrucksystem infolge eines Spülvorganges | 127 |
| 8.18 | Beispiel einer vernetzten Geometrie für die CFD Simulation | 128 |

| | | |
|------|--|-----|
| 8.19 | CFD Simulation des Transportverhalten der Luft- (weiß) und Wasserphase (schwarz) in einer Unterdruckleitung DN 75, Darstellung gestaucht | 129 |
| 8.20 | Simulierte Fließgeschwindigkeiten der beiden Phasen Luft und Wasser innerhalb eines Unterdrucksystems | 130 |
| 8.21 | Turbulente Vermischung der Luft- und Wasserphase während des Transportes | 131 |
| 8.22 | DN 50 Unterdruckleitung mit Ablagerungen | 132 |
| 8.23 | CFD Modell und einwirkende Wandschubspannung auf die obere und untere Rohrinnefläche | 132 |
| 9.1 | Modellvorstellung des Bildungsprozesses von Inkrustationen in Schwarzwasserunterdrucksystemen | 135 |
| 9.2 | Einflussgrößen bei der Bildung von Inkrustationen (qualitativ) | 137 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Projektbeispiele für Schwarzwassersysteme im Siedlungsbereich | 11 |
| 2.2 | Einwohnerspezifische Frachten der verschiedenen Teilströme | 14 |
| 2.3 | Beispiel einer theoretische Schwarzwasserkonzentration resultierend aus einwohnerspezifischen Frachten | 15 |
| 2.4 | Schwarzwasserkonzentrationen: Theoretische Konzentrationen aus Frachten vergleichend zu Literaturangaben | 16 |
| 3.1 | Untersuchte Unterdruckentwässerungsanlagen für Schwarzwasser | 19 |
| 3.2 | Übersicht der verwendeten Analysemethoden | 20 |
| 3.3 | Schwarzwasserkonzentrationen: Analysen aus Siedlungsgebieten sowie Literaturangaben aus: (Wendland, 2008; Alp, 2010; Pinnekamp und Dorgeloh, 2008; Zeeman et al., 2008; Tervahauta et al., 2014; Graaff et al., 2010) | 21 |
| 3.4 | Suspendierte Fällungsprodukte im Schwarzwasser | 22 |
| 3.5 | Zusammensetzung des Modellschwarzwassers (1 Liter) | 26 |
| 4.1 | Ausgangszusammensetzung der modellierten Wasserphase | 39 |
| 4.2 | Luftzusammensetzung nach Roedel und Wagner (2011) (links) und verwendete Randbedingungen (rechts) der Gasphase | 41 |
| 5.1 | Löslichkeitsprodukte der Polymorphe und Pseudopolymorphe von Calciumcarbonat bei 25 °C zusammengefasst in Neumann (2008) | 56 |
| 5.2 | Löslichkeitsprodukte verschiedener Calciumphosphate bei 25 °C aus Dorozhkin und Epple (2002), ergänzt durch Neumann (2008) | 57 |
| 6.1 | Untersuchte Unterdruckentwässerungsanlage | 69 |
| 6.2 | Bauliche Mängel im Kodiersystem nach DIN-EN:13508-2 (2011) | 71 |
| 6.3 | Zusammensetzung der anorganische Fraktion (n = 10) | 82 |
| 7.1 | Übersicht der Versuche zur Inkrustation mit anorganischen Substanzen | 93 |

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen

| | |
|------|------------------------------------|
| ACP | Amorphes Calciumphosphat |
| CDHA | Calciumdefizitäres Hydroxylapatit |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| CFD | Computational fluid dynamics |
| EW | Einwohnerwerte |
| GV | Glühverlust |
| HAP | Hydroxylapatit |
| HWC | HAMBURG WATER Cycle® |
| IAP | Ionenaktivitätsprodukt |
| NASS | Neuartige Sanitärsysteme |
| OCP | Octacalciumphosphat |
| SI | Sättigungsindex |
| SW | Schwarzwasser |
| SWUD | Schwarzwasserunterdrucksysteme |
| TC | Gesamter Kohlenstoff |
| TIC | Gesamter anorganischer Kohlenstoff |
| TOC | Gesamter organischer Kohlenstoff |
| TS | Trockensubstanzgehalt |
| UDS | Unterdrucksystem |
| GV | Glühverlust |
| XRD | Röntgendiffraktometrie |
| °dH | Grad deutscher Härte |

Formelzeichen

| | | |
|--------------------|-----------------------|--|
| $c_{\alpha,\beta}$ | $[mol/l_i]$ | Stoffkonzentration α in Phase β |
| c | $[J/kg * K]$ | spezifischen Wärmekapazitäten |
| E_W | $[bar]$ | Sättigungsdampfdruck über Wasser |
| kH' | $[-]$ | Stoffspezifische Henrykonstante |
| K_L^a | $[mol^n/l^n]$ | Löslichkeitsprodukt |
| k | $[mm]$ | Absolute Materialrauheit |
| $n_{i,ges}$ | $[mol]$ | Gesamte Stoffmenge i im System |
| pK_L | $[-lg(mol^n/l^n)]$ | Löslichkeitsprodukt |
| P_s | $[kPA]$ | Systemdruck |
| R | $[bar * L/(K * mol)]$ | Universale Gaskonstante |
| V_β | $[l]$ | Volumen der Phase β |
| κ | $[W/(^{\circ}C * m)]$ | Wärmeleitfähigkeit |
| λ | $[-]$ | Rohrreibungszahl |
| τ | $[N/m^2]$ | Wandschubspannung |
| ΔH | $[kcal/kmol]$ | Lösungsenthalpie |