



© FWWe Y

BMBF-Fördermaßnahme „CLIENT II – Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen“

RAIN

Zukunftsfähige Technologien und Dienstleistungen zur Anpassung an den Klimawandel in Hochwasser- und Dürregefährdeten Siedlungsräumen in Ghana

Gemeinsamer Schlussbericht des Verbundvorhabens

Förderkennzeichen: 01LZ1801A-C

Projektlaufzeit: 01.06.2019 – 31.12.2022

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

An Initiative of the Federal Ministry of
Education and Research

CLIENT II
International Partnerships for
Sustainable Innovations



„CLIENT II – Internationale Partnerschaften für
nachhaltige Innovationen“

Verbundvorhaben

RAIN

Zukunftsfähige Technologien und Dienstleistungen
zur Anpassung an den Klimawandel in Hochwasser-
und Dürregefährdeten Siedlungsräumen in Ghana

FKZ 01LZ1801A-C



IMPRESSUM

Verbundkoordination



Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.
Kackertstraße 15 – 17
52072 Aachen
Dr.-Ing. Manuel Krauß
Rona Michaelis, M.Sc.
Matthias Hirt, M.Sc.
Juan Ramirez, M.Sc.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung

IM RAHMEN DES BMBF-PROGRAMMS

An Initiative of the Federal Ministry of Education and Research

CLIENT II
International Partnerships for Sustainable Innovations



BETREUT DURCH



DLR Projektträger

Projektpartner

Deutschland



Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik
Sophie Krüger, M.Sc.
Dr.-Ing. Manfred Lübken
Prof. Dr.-Ing. habil Marc Wichern



Manotura GmbH & Co. KG
Mirjam Westram, M. Sc.
Dipl.-Ing. Michael Schraeder
Philipp Garmann, B. Eng.
Dipl.-Ing. Marc Wieschebrink

Ghana



UNIVERSITY OF GHANA

University of Ghana
Institute for Environment and Sanitation Studies (IESS)
Prof. Christopher Gordon
Adelina Mensah (PhD)



University of Development Studies
Prof. Gordana Kranjac-Berisavljevic
Dr. Zinzoola Bizoola



UNIVERSITY OF GHANA
DEPARTMENT OF AGRICULTURAL ENGINEERING

DAE, Department of Agricultural Engineering
Dr.-Ing. Peace Korshiwor Amoatey



Accra Sewerage Improvement Project (ASIP) as part of the Accra Metro Sewerage Unit (AMSU)
Emanuel Nartey



Envaserv Research Consult
Lloyd Allotey



Kwame Nkrumah University of Science and Technology
Prof. Imoro Braimah

Zitierhinweis

Krauss, M., Michaelis, R., Krüger, S., Westram, M., Lübken, M., Hirt, M., Ramirez, J., Garmann, P., Schraeder, M., Wieschebrink, M., Wichern, M. (2023): Zukunftsfähige Technologien und Dienstleistungen zur Anpassung an den Klimawandel in Hochwasser- und Dürrefährdeten Siedlungsräumen in Ghana (RAIN).

Schlussbericht im BMBF-Verbundvorhaben RAIN, Förderkennzeichen 01LZ1801A-C, FiW e.V., Aachen.

Förderkennzeichen:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des BMBF-Programms Client II – Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen unter dem Förderkennzeichen 01LZ1801A-C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<https://www.fiw.rwth-aachen.de/referenzen/rain>
<https://bmbf-rain.net>

Aachen, Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Ergebnisse	3
2.1	Arbeitsplan	3
2.2	Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
2.3	Quantifizierung der Anpassungswirkungen	8
2.4	Arbeitsplan	9
2.5	Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojekts Innovative Dienstleistungen (AP1)	12
2.5.1	AP 1.1 Datenerhebung, Entwicklung von Szenarien zur Einschätzung der Auswirkungen von Hochwasser und Dürre und Auswahl der Pilotgebiete	12
2.5.2	AP 1.2 Erstellung und Verbreitung von Hochwasser- und Dürrevorhersagemodelle	21
2.5.3	AP 1.3 Erstellen von Wasserhaushalts- und Wassermanagementmodellen für die Pilotregionen.....	24
2.5.3.1	Wassermanagementmodell WEAP	24
2.5.3.2	Wasserhaushaltsmodell SWAT	32
2.5.4	AP 1.4 Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in urbanen Regionen	39
2.5.5	AP 1.5 Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in ruralen Regionen	41
2.5.6	AP 1.6 Detaillierte Untersuchungen zur Ermittlung der Anforderungen der unterschiedlichen Nutzergruppen und Anwendungen in einem peri-urbanen Pilotgebiet im Distrikt Adenta, Accra (Bedarfsanalyse)	44
2.6	Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojekte Nachhaltige Technologien (AP2)	53
2.6.1	AP 2.0 Untersuchung von Filtermaterial und Biolight unter Laborbedingungen an der RUB	53
2.6.1.1	Biolight-Versuche	53
2.6.1.2	Untersuchung von Biokohlen als Filtermaterial.....	56
2.6.2	AP 2.1 DE Pandemiebedingt: Aufbau und Test einer modularen Containeranlage in Deutschland.....	73
2.6.3	AP 2.1 Ex-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser im peri-urbanen Raum durch die AWAS-Containeranlage und durch ein geeignetes Biokohle-Filtermaterial in Ghana	75
2.6.3.1	Kleintechnisches Biokohlefiltersystem	75
2.6.4	AP 2.2 In-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser durch das AWAS-BIOLIGHT-OLOID-PYRAMID-System	98
2.6.5	AP 2.3 DE: Pandemiebedingt: Aufbau und Durchführung von Bewässerungsversuchen in Deutschland	98

2.6.5.1	AP 2.3 DE Auswahl der Tropfsysteme.....	98
2.6.5.2	AP 2.3 DE Versuchsanlage in Deutschland.....	100
2.6.5.3	AP 2.3 DE Tropfschläuche im Vorversuch in Neuenkirchen, Deutschland	101
2.6.5.4	AP 2.3 DE Vorversuch Tropfschläuche im Pumpenbetrieb.....	103
2.6.5.5	AP 2.3 DE Vorversuche im Gravitationsbetrieb	108
2.6.5.6	AP 2.3 DE Bewässerungsversuche in Deutschland, Nebenergebnisse	118
2.6.6	AP 2.3 A: Pandemiebedingt: Biofilmanalysen zu den Bewässerungsversuchen von Manotura in Deutschland	121
2.6.7	AP 2.3 Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit aufbereitetem Wasser in Ghana	123
2.7	Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojektes Training und Weiterbildung (AP3) .	129
AP 3.1	Aufklärung und Verhaltenstraining für die lokale Bevölkerung	129
2.7.1	AP 3.2 Trainings- und Workshop-Programm für lokale Interessensvertreter zu „Anpassungen an den Klimawandel“	134
2.7.2	AP 3.3 Weiterbildungsprogramm zur Nutzung des aufbereiteten Wassers in der Landwirtschaft	138
2.8	Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojektes Öffentlichkeitsarbeit, Verteilung der Empfehlungen und Richtlinien (AP4).....	139
2.8.1	AP 4.1 Öffentlichkeitskonzept.....	139
2.8.2	AP 4.2 Benutzerorientiertes Konzept für Informations- und Weiterbildungsmaterialien	140
2.8.3	AP 4.3 Erstellen von Materialien für den PAUWES/ WASCAL- Forschungsplan.....	142
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	144
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	145
5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	146
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	147
8	Anhang	XIV
8.1	1.3 Wasserhaushaltsmodell IST-Zustand	XIV
8.2	1.4 Maßnahmensteckbriefe für das Sakumono-Einzugsgebiet	XVI
8.3	AP 1.5 Maßnahmensteckbriefe für das Nabogo Einzugsgebiet	XX
8.4	AP 2.0: Daten AWAS-Containeranlage (RUB)	XXIX
8.5	AP 2.0: Daten der UV/Vis-Spektrometer aus dem Zulauf (Z) und Ablauf (A) AWAS-Containeranlage (RUB)	XXXII
8.6	Qualitätsanforderungen der US EPA „Guidelines for Water Reuse“ (2012)	XXXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur Ghanas von 1901 bis 2021.	12
Abbildung 2: Projektionen der mittleren Jahrestemperatur in Ghana für unterschiedliche SSP-Szenarien.	13
Abbildung 3: Lage der zwei Pilotgebiete, Sakumono-Becken und Nabogo-Becken, in Ghana.	14
Abbildung 4: Digitale Geländemodelle der Pilotgebiete Sakumono (links) und Nabogo (rechts).	15
Abbildung 5: Bodentypen in Sakumono (links) und Nabogo (rechts).	15
Abbildung 6: Vorhandene Landnutzung in den Pilotgebieten Sakumono (links) und Nabogo (rechts).	15
Abbildung 7: Gewässerquerprofile in Sakumono und Überführung in das hydrodynamische Modell.	16
Abbildung 8: Durchlässe inklusive Abmessungen zur Abschätzung der Querschnittsfläche.	17
Abbildung 9: Intensitäts-Dauerkurve unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Niederschlagsstation Accra-Airport.	17
Abbildung 10: Darstellung der Überflutungsflächen und Wassertiefen eines 5-jährlichen Niederschlagsereignisses (links) und eines 100-jährlichen Niederschlagsereignisses (rechts).	18
Abbildung 11: Darstellung des gemessenen und simulierten Abflusses Q (links) sowie der 26-jährigen simulierten Abflussganglinie an der Nabogo-Messstation. Die gewählten Abflussereignisse mit Wiederkehrzeiten von 1, 5, 10 und 40 Jahren sind grau hervorgehoben.	19
Abbildung 12: Resultierende Überflutungsflächen und Wassertiefen des 40-jährlichen Abflussereignisses (links) sowie Darstellung der Überflutungshäufigkeit im Nabogo-Einzugsgebiet (rechts).	19
Abbildung 13: Datengrundlage und resultierende Hochwasserrisiko-Karte des Sakumono- Einzugsgebietes.	20
Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung des 12-monatigen SPEI-Index von 1990 – 2020 sowie die dazugehörigen Wiederkehrzeiten des Nabogo-Einzugsgebiets.	21
Abbildung 15: Schematische Darstellung des entwickelten Frühwarnsystems inklusive Zuordnung zu standardmäßig erforderlichen Key-Komponenten.	22
Abbildung 16: Potentielles Schema zur Verbreitung der Warnungen des Frühwarnsystems innerhalb der Stakeholder zur potentiell betroffenen Bevölkerung.	23
Abbildung 17: Monatlicher durchschnittlicher Wasserbedarf der Landwirtschaft im Vergleich zum monatlichen Durchschnittsspeicher.	26
Abbildung 18: Deckung der Nachfrage häuslichen Wasserbedarfs im Sakumono- Einzugsgebiet.	27
Abbildung 19: Jährlicher Gesamtabfluss des Sakumono-Einzugsgebiets für die Szenarien 1) Bevölkerungswachstum, 2) Rückgang der Landwirtschaft und 3) Referenzszenario.	29
Abbildung 20: Durchschnittliches monatliches Speichervolumen im Sakumono-Einzugsgebiet für die Szenarien: 1) Klimawandel und 2) Referenzszenario.	30

Abbildung 21: Abdeckung des Bedarfs in der Metropole Tema für die Szenarien 1) Erhöhung der Grundwassernutzung ohne maximale Entnahme und 2) Referenzszenario.....	31
Abbildung 22: Niederschlagsaufzeichnungen [mm] von 2003 bis 2009 der Niederschlagsstation Pong Tamale.....	33
Abbildung 23: Monatliche Zeitreihe von Niederschlag, Abfluss und Evapotranspiration im Nabogo-EZG.....	35
Abbildung 24: Prognose der Entwicklung Landbedeckung im Nabogo-Einzugsgebiet.....	36
Abbildung 25: Monatliche Prognose-Zeitreihe von Niederschlag, Abfluss und Evapotranspiration im Nabogo-EZG.....	37
Abbildung 26: Vergleich des durchschnittlichen Ertrags pro Hektar des Ist-Zustandes und des S-KW.....	38
Abbildung 27: Kulturpflanzen in der Region Greater Accra nach Fläche.....	50
Abbildung 28: Kulturpflanzen in der Northern Region 2018 nach Ghana Statistical Service (2020).....	51
Abbildung 29: Wasserverbrauch in Liter pro Jahr für die Hauptkulturpflanzen (ohne Bewässerung) im Nabogo-Einzugsgebiet.....	51
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Biolightversuche (Biolight li.; Referenzsystem re.).....	53
Abbildung 31: <i>E. coli</i> -Konzentration über die Laufzeit der drei Versuchsdurchläufe.....	54
Abbildung 32: <i>E. coli</i> -Konzentration im Versuch mit der Biolight ohne Stromanschluss.....	55
Abbildung 33: Ausführung (li.) und Technische Zeichnung des low-tech Pyrolysereaktors.....	57
Abbildung 34: Aufbau und Funktionsweise eines Top-lit-updraft gasifier.....	57
Abbildung 35: Temperaturverläufe der Pyrolyse von Maisspindel für das kleintechnische System in Ghana.....	58
Abbildung 36: Temperaturkurven der ersten drei Pyrolysedurchläufe für die Vorversuche in Laborsäulen.....	59
Abbildung 37: Biomassematerialien: Ausgangsmaterial (li.); pyrolysiertes Material (mi.); zerkleinerte Biokohle (re.).....	60
Abbildung 38: REM-Aufnahmen der pyrolysierten Biomassen: a) Kakaoschalen, b) Maisspindeln, c) Maisstroh.....	60
Abbildung 39: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus.....	62
Abbildung 40: Filtersäulentriplikation mit Biokohle gefüllt.....	62
Abbildung 41: Reduktion der Trübung während der ersten Versuchsreihe (KSK 4-8 mm; MSK 4-8 mm).....	65
Abbildung 42: Reduktion der Trübung während der zweiten Versuchsreihe (MSTK 4-8 mm; MSTK 1-4 mm).....	65
Abbildung 43: Reduktion der Trübung während der dritten Versuchsreihe (KSK 1-4 mm; KSK 1-4 mm).....	66
Abbildung 44: Reduktion der Trübung während der dritten Versuchsreihe (KSK 1-4 mm; MSK 1-4 mm; MSTK 1-4 mm bei 0,1 m/h).....	66
Abbildung 45: V1: <i>E. coli</i> - Elimination KSK 4-8 mm und MSK 4-8 mm.....	67

Abbildung 46: V2: <i>E. coli</i> - Elimination MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm.....	67
Abbildung 47: V3: <i>E. coli</i> - Elimination KSK 1-4 mm und MSK 1-4 mm.....	67
Abbildung 48: V4: <i>E. coli</i> - Elimination KSK 1-4 mm, MSK 1-4 mm und MSTK 1-4 mm.....	67
Abbildung 49: Gemittelte <i>E. coli</i> -Eliminationsleistung im Vergleich (li.) und Rangliste (re.)...	68
Abbildung 50: <i>C. perfringens</i> - Elimination KSK 4-8 mm, MSK 4-8 mm, MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm.....	69
Abbildung 51: <i>C. perfringens</i> - Elimination KSK 1.-4 mm, MSK 1-4 mm, KSK 1-4 mm 0,1 m/h, MSK 1-4 mm 0,1 m/h und MSTK 1-4 mm 0,1 m/h.....	69
Abbildung 52: Elimination somat. Coliphagen durch KSK 4-8 mm, MSK 4-8 mm, MSTK 4- 8 mm und MSTK 1-4 mm.....	70
Abbildung 53: Elimination somat. Coliphagen durch KSK 1.-4 mm, MSK 1-4 mm, KSK 1- 4 mm 0,1 m/h, MSK 1-4 mm 0,1 m/h und MSTK 1-4 mm 0,1 m/h.....	70
Abbildung 54: Mess- und Steuerungssystem „BlueBox“+ Spektrometer.....	74
Abbildung 55: Ausschnitt der AWAS-Containeranlage mit PP-Filter und UV-Vis Spektrometersystem.....	74
Abbildung 56: Satellitenaufnahme (Google Earth) des Standortes: links zeigt den Verlauf des Onyasia Stream (blau) durch North Legon sowie die Versuchsfläche (rotes Rechteck) und die Wasserentnahmestelle (rotes Kreuz) und rechts die direkte Umgebung.....	76
Abbildung 57: Abschnitte des Onyasia z.T. mit Einleitung (graue Rohre) von Haushalten....	77
Abbildung 58: Gemüseanbau am Onyasia	77
Abbildung 59: Technische Zeichnung des Biokohle-Filtersystems.....	78
Abbildung 60: Kleintechnisches Biokohle-Filtersystems	78
Abbildung 61: Wasserstandskontrollbehälter mit Schwimmerventil.....	80
Abbildung 62: Unterste Stüttschicht mit Drainagerohr des Feinfilters.....	80
Abbildung 63: Grobfilter nach Befüllung mit Maisspindelbiokohle 4-8 mm	80
Abbildung 64: Feinfilter nach Befüllung mit Maisspindelbiokohle 1-4 mm	80
Abbildung 65: Aufbau des Biokohle-Grobfilters.....	81
Abbildung 66: Aufbau des Biokohle-Feinfilters.....	81
Abbildung 67: Kies für den Filteraufbau.....	81
Abbildung 68: Technische Zeichnung der Filterstufen.....	82
Abbildung 69: Versuchsgelände in der Vorbereitung. Im Vordergrund: Feld für die Bewässerungsversuche, Im Hintergrund: Bau der Gerüste für das Filtersystem.....	83
Abbildung 70: Aufstellung der Gerüste: Metallgerüst mit Betonfundament (li.), Holzgerüste auf begradigter Plattform, um vor Nässe zu schützen	83
Abbildung 71: typischer Ablaufplan exemplarisch für Juli (Parameter: MiBi = mikrobiologisch, chem =chemisch).....	84
Abbildung 72: Schematische Übersicht über die Probenahmestellen an den bewässerten Feldern.....	85
Abbildung 73: Wasserproben von Zulauf, nach dem Grobfilter und vom Ablauf (v.r.n.l.).....	87

Abbildung 74: Konzentrationen von Gesamcoliformen Bakterien, <i>E. coli</i> und <i>C. perfringens</i> als Boxplot	90
Abbildung 75: Zu- und Ablaufkonzentrationen von Gesamt Coliformen Bakterien.	91
Abbildung 76: Zu- und Ablaufkonzentrationen von <i>C. perfringens</i>	91
Abbildung 77: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Filtersystems und des Bewässerungsversuch von <i>E. coli</i>	91
Abbildung 78: Wasserinfiltration in Abhängigkeit von Salzgehalt und Natrium Adsorptionsverhältnis.	94
Abbildung 79: Reduktion von pathogenen Mikroorganismen anhand verschiedener Kombinationen an Maßnahmen für die Einhaltung der gesundheitlichen Ziele (li.). „Verification Monitoring“ (Grenzwerte) für verschiedene Optionen an Wasseraufbereitung und Nutzung	95
Abbildung 80: Grundgerüst der Versuchsanlage im Gewächshaus Neuenkirchen.....	100
Abbildung 81: Versuch Unitechline- Tropfrohr (Netafim) und rechts Perlschlauch	101
Abbildung 82: Vergleich Ausfluss Unitechline im Pumpenbetrieb bei Einfach- und Zweifacheinspeisung in Durchlauf 1 und 2	103
Abbildung 83: Vergleich Ausfluss Unitechline im Pumpenbetrieb bei Einfach- und Zweifacheinspeisung in den Versuchsdurchläufen 3 und 4: Der graue Graph zeigt den Mittelwert aus vier Durchläufen. (= 95% Konfidenzintervall)	104
Abbildung 84: Im Pumpbetrieb: Ausflussverteilung des 100m -Perlschlauches vom 20. bis 21.08.2020 bei 50 L Wassergabe nach exakt horizontaler Ausrichtung (Einfacheinspeisung).....	105
Abbildung 85: Spindelschlauch (Mikrospinne) und Mikroschlauch als zusätzliche Tropfsysteme getestet.....	106
Abbildung 86: Versuchsaufbau des Mikroschlauches im Gravitationsbetrieb.....	107
Abbildung 87: Ergebnisse der Ausflussverteilung des Mikroschlauches	107
Abbildung 88: Ausflussverhalten des Spindelschlauches mit Präzisionstropfer im Pumpenbetrieb.....	108
Abbildung 89: Zusätzlich aufgenommene Tropfsysteme: Aqua-Vlies-Schlauch (Eigenkonstruktion) (li.) und Palaplast-Einzeltropfer (re.).....	108
Abbildung 90: Nahaufnahme des linearen Ausflusses des neuen Perlschlauches	109
Abbildung 91: Wasserverteilung des Perlschlauches im Gravitationsbetrieb vom 10. und 11.03.2021	109
Abbildung 92: Rasch absinkender Ausfluss des Perlschlauches im Gravitationsbetrieb (DL = Durchlauf).	110
Abbildung 93: Obstruktionsgrad des Perlschlauches im freien Wasserspiegel nach 1,4 ³ Durchlauf. N entspricht der Anzahl der Durchläufe, DU dem Verteilungskoeffizienten.	110
Abbildung 94: Gravitationsbasierter Versuchsaufbau Spindelschlauch (Mikrospinne)	111
Abbildung 95: Ausfluss des Spindelschlauches im gravitativen System bei 1 m Auslassabstand (N= Durchlaufanzahl)	112

Abbildung 96: Ausfluss des Mikroschlauchs bei 10 cm Baulänge und 30 cm Emitterabstand im gravitativen System	112
Abbildung 97: Aqua-Vlies-Schlauch: Montiertes Vlies	113
Abbildung 98: Wasserverteilung Aqua-Vliesschlauch im Gravitationsbetrieb ohne Filter (DUa = angepassten Verteilungsindex).....	114
Abbildung 99: Obstruktion des Aqua-Vlies-Tropfschlauchs in der ersten Versuchsreihe ohne Filter. Sedimente auf Vliesplättchen	114
Abbildung 100: Obstruktion des Aqua-Vlies-Tropfschlauchs in der zweiten Versuchsreihe mit Filter. Sedimente auf Vliesplättchen.....	115
Abbildung 101: Verteilungsuniformität des Aqua-Vlies-Tropfschlauches im Gravitationsbetrieb mit Filter.	115
Abbildung 102: Palaplast-Einzeltropfer eingesteckt in 20 mm HDPE-Leitung	116
Abbildung 103: Wasserverteilung des Palaplast-Einzel-Tropfer-Schlauch. Gemessen am 100m- und 30m-Strang (grau).....	117
Abbildung 104: Gravitationsbetrieb Palaplast-Tropfschlauch ca. 2 L h ⁻¹ ; 4 Stränge a 20 m im Parallel-Betrieb mit 20 mm-Rohr	117
Abbildung 105: Verbindung von Bewässerungsdocht mit Adapterstück zur Hautleitung. Detail Bewässerungsdochte.....	119
Abbildung 106: Experimenteller Aufbau zur Wassertemperaturmessung in Flaschen 2022. Pathogenreduktion durch Hitzeeinwirkung	120
Abbildung 107: Wassertemperatur mit maximal 45 °C in Getränkebehältern bei 37,3°C Gewächshaus-Innentemperatur	120
Abbildung 108: Wassertemperatur mit maximal ≥ 55 °C in Getränkebehältern ab 12.00 Uhr bei bis zu 38°C Innentemperatur	121
Abbildung 109: Emitterlabyrinth-Struktur hergestellt von Netafim (Yan et al. 2009).	122
Abbildung 110: Schematischer Versuchsaufbau der Pilotanlage in Ghana und Aufteilung in 3 Versuchsgruppen: Feld 1-3 Evapotranspiration (ET); Feld 4-6 ET & 20 -30 % Leaching Fraction (LF); Feld 6-9 natürlicher Niederschlag	125
Abbildung 111: Anordnung Messbecher zur Ermittlung des Ausflusses der Palaplast-Emitter; Bild (©Agorde, 2022).....	125
Abbildung 112: Schema Leitungsverlauf und Palaplast-Einzelemitter-Schläuche auf den Anbauparzellen	127
Abbildung 113: Salatsetzlinge nach der Pflanzung, Bilder (©Agorde, 2022).....	127
Abbildung 114: Besuch der Reisfelder im Nabogo-Einzugsgebiet.	130
Abbildung 115: Gespräche mit Anwohnerinnen der Gemeinde Nyansheg, Tamale.....	131
Abbildung 116: Delegationsbesuch von Vertreter:innen der Stadt Tamale in Münster.....	131
Abbildung 117: Teilnehmende an dem RAIN Workshop zum Thema „Floods And Droughts in the Nabogo Stream Catchment – Farmer’s Evaluation im Pastoral Center, Tamale.....	132
Abbildung 118: Vertreter:innen der Bäuer:innen der Gemeinde Gushi während der Gruppendiskussion.	133

Abbildung 119: Treffen mit dem Municipal Chief Executive Daniel Alexander Nii-Noi Adumuah der Adenta Municipality und seinem Team im September 2021.	134
Abbildung 120: Austausch mit lokalen Interessensvertretern im landwirtschaftlich geprägten Nabogo-Einzugsgebiet.	135
Abbildung 121: Anwenderschulung zum Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystem im HSD-Headquarter im April 2022.	136
Abbildung 122: Anwenderschulungen mit Vertretern von NADMO in der Bezirksregierung von Adenta.....	137
Abbildung 123: Teilnehmende des Disseminationsworkshop des RAIN-Projekts in Accra..	138
Abbildung 124: Workshop zur Biokohlefilteranlage (li.) durchgeführt von RUB und DAE. ...	139
Abbildung 125: Auszug aus den Schulungsmaterialien für SWAT	140
Abbildung 126: Cover der erstellten Leitfäden.	142

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Arbeitsplan Verbundvorhaben RAIN	3
Tabelle 2: Tabellarischer Soll-Ist-Vergleich der Verbundziele gemäß Vorhabenbeschreibung (Stand 16.09.2021)	6
Tabelle 3: Meilensteintabelle des Gesamtkonsortiums	9
Tabelle 4: SPEI-Klassifizierung	20
Tabelle 5: Kulturpflanzen im Wasserhaushaltsmodell	34
Tabelle 6: Landwirtschaftlich genutzte Flächen im SWAT-Modell	34
Tabelle 7: Wasserbilanz Nabogo EZG IST-Zustand	35
Tabelle 8: Durchschnittlicher Ernteertrag des Nabogo EZG (IST-Zustand)	35
Tabelle 9: Durchschnittliche Jahreswasserbilanz des Nabogo EZG für das S-KW Szenario	36
Tabelle 10: Durchschnittlicher Ernteertrag des Nabogo-EZG im S-KW	37
Tabelle 11: Gegenüberstellung Ernteertrag IST-Zustand und S-KW	38
Tabelle 12: Evaluierte Einzelmaßnahmen für das Sakumono-Einzugsgebiet	41
Tabelle 13: Evaluierte Einzelmaßnahmen für das Nabogo-Einzugsgebiet	43
Tabelle 14: Geeigneter Kompositionsanbau von üblichen Nutzpflanzen in Ghana (Intercropping)	45
Tabelle 15: Wasserbedarf [Liter pro Person pro Tag]	46
Tabelle 16: Trinkwasserverbrauch/-bedarf in den Siedlungen im Nabogo-Einzugsgebiet.	47
Tabelle 17: Hauptwasserbezugsquellen in Adenta	49
Tabelle 18: Hauptanbaupflanzen in den Gemeinden Nabogu, Nakpanzoo, Gushi und Yapalsi. ..	52
Tabelle 19: Tatsächlicher Volumenstrom im Versuch (V1-3).	54
Tabelle 20: Pyrolyseprozessparameter.	58
Tabelle 21: Elementare Zusammensetzung der Biokohlen und Verkohlungsgrad.	59
Tabelle 22: Übersicht Versuchsreihen.	62
Tabelle 23: Übersicht zur Beprobung und Analyse.	64
Tabelle 24: Elimination von CSB und Gesamtstickstoff für die verschiedenen Biokohlen.....	71
Tabelle 25: Laborergebnisse der RUB für die Beprobung der AWAS-Containeranlage.....	73
Tabelle 26: LF, pH-Wert und Trübung gemessen für die Biokohlefilter-Pilotanlage.	87
Tabelle 27: LF, pH-Wert und Trübung gemessen an den Emittern der Tropfschläuche.	88
Tabelle 28: SAR-Werte im Zulauf des Filtersystems und Ablauf der Tropfschläuche.	88
Tabelle 29: Reduktion von TSS, TDS, CSB und Eisen durch das Filtersystem.....	89
Tabelle 30: Reduktion von Stickstoff- und Phosphorverbindungen.....	89
Tabelle 31: Elimination von Mikroorganismen durch die Pilotanlage.	92
Tabelle 32: Richtlinien für die Interpretation der Wasserqualität für die Bewässerung.....	93
Tabelle 33: Mikrobielle Qualitätsanforderung für Trinkwasser der WHO und die nationalen Richtlinien von Ghana.....	96
Tabelle 34: Dimensionierung eines Biokohlefiltersystems.	97
Tabelle 35: Ausgewählte Tropfsystem im Versuch mit Systemaufbau	99

Tabelle 36: Ermittelte Wasserverteilungsuniformität DU auf einem 22 m-Strang und Anschaffungskosten pro Meter	102
Tabelle 37: Im Pumpbetrieb: Vergleich Ausflussverteilungsgenauigkeit (DU) des 100m-Perlschlauches in Einfach- und Zweifacheinspeisung.	105
Tabelle 38 Auswahl der Tropfschlauchsysteme und Ausschlussgrund	122
Tabelle 39: Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse	147
Tabelle 40: Studentische Arbeiten	147
Tabelle 41: Ernteerträge pro Jahr (Ist-Zustand)	XIV
Tabelle 42: Maßnahme Hochwasser I (urban).....	XVI
Tabelle 43: Maßnahme Hochwasser II (urban).....	XVI
Tabelle 44: Maßnahme Hochwasser III (urban).....	XVII
Tabelle 45: Maßnahme Hochwasser IV (urban)	XVII
Tabelle 46: Maßnahme Hochwasser V (urban)	XVIII
Tabelle 47: Maßnahme Hochwasser VI (urban)	XVIII
Tabelle 48: Maßnahme Hochwasser VII (urban)	XIX
Tabelle 49: Maßnahme Dürre I (rural).....	XX
Tabelle 50: Maßnahme Dürre II (rural).....	XX
Tabelle 51: Maßnahme Dürre III (rural)	XX
Tabelle 52: Maßnahme Dürre IV (rural)	XXI
Tabelle 53: Maßnahme Dürre V (rural)	XXI
Tabelle 54: Maßnahme Dürre VI (rural)	XXII
Tabelle 55: Maßnahme Dürre VII (rural)	XXII
Tabelle 56: Maßnahme Dürre VIII (rural)	XXIII
Tabelle 57: Maßnahme Hochwasser I (rural/Tamale)	XXIII
Tabelle 58: Maßnahme Hochwasser II (rural/Tamale)	XXIII
Tabelle 59: Maßnahme Hochwasser III (rural/Tamale)	XXIV
Tabelle 60: Maßnahme Hochwasser IV (rural/Tamale)	XXIV
Tabelle 61: Maßnahme Hochwasser V (rural/Tamale)	XXV
Tabelle 62: Maßnahme Hochwasser VI (rural/Tamale)	XXV
Tabelle 63: Maßnahme Hochwasser VII (rural/Tamale)	XXVI
Tabelle 64: Maßnahme Hochwasser VIII (rural/Tamale)	XXVI
Tabelle 65: Maßnahme Hochwasser VIII (rural/Tamale)	XXVI
Tabelle 66: Maßnahme Hochwasser X (rural/Tamale)	XXVII
Tabelle 67: Maßnahme Hochwasser XI (rural/Tamale)	XXVII
Tabelle 68: Maßnahme Hochwasser XII (rural/Tamale)	XXVIII
Tabelle 69: Maßnahme Hochwasser XIII (rural/Tamale)	XXVIII
Tabelle 70: Maßnahme Hochwasser XIV (rural/Tamale).....	XXVIII
Tabelle 71: Messwerte zur Kalibrierung der UV/VIS-Sonden and der AWAS-Anlage (05.10.2021 und 13.10.2021).....	XXIX

Tabelle 72: Qualitätsanforderungen der US EPA „Guidelines for Water Reuse“XXXVII

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AP	Arbeitspaket
CAS	Chemical Abstracts Service
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project 6
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DEM	Digital Elevation Model
DU	Verteilungsuniformität
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EW	Einwohner
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEWS	Forecast Early Warning System
FF	Fine Filter
GIS	Geoinformationssystem
GSS	Ghana Statistical Service
HDPE	Hart-Polyethylen, High-density polyethylene
HRU	Hydrologic Response Unit
HSD	Hydrologic Services Department, Hydrological Service Department
IBC	Intermediate Bulk Container
KSK	Kakaoschalenkohle
LF	Leitfähigkeit
MCE	Municipal Chief Executive
MSK	Maisspindelkohle
MSTK	Maisstrohkohle
MTDP	Medium term development plan
NADMO	National Disaster Management Organisation, National Disaster Management Organization
NBS	Nature-Based-Solutions
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PE	Polyethylen
REF-S	Referenzszenario
REM	Rasterelektronenmikroskop
RF	Roughing filter
RUB	Ruhr-Universität-Bochum
SAR	Sodium adsorption ratio
S-BW	Szenario Bevölkerungswachstum
S-E-GWN	Szenario Erhöhung der Grundwassernutzung durch Privathaushalte
S-KW	Szenario Klimawandel
SPEI	Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index
SPI Index	Standardized Precipitation Index
S-RL	Szenario Rückgang der Landwirtschaft
SSP-Szenarien	Shared Socioeconomic Pathways Szenarien
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
TDS	Total Dissolved Solids
TLUD	Top-lit-updraft gasifier
US EPA	U.S: Environmental Protection Agency
WEAP	Water Evaluation and Planning System
WLC	water level control tank



1 Zusammenfassung

Das ghanaisch-deutsche Verbundvorhaben RAIN (Vorhabensbeschreibung Stand 16.09.21) beschäftigt sich mit der Reduzierung der Vulnerabilität und der Erhöhung der Resilienz urbaner, peri-urbaner und ländlicher Gemeinden gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels (Starkniederschläge, Hochwasserereignisse, langanhaltende Trockenperioden) in ausgewählten Pilotregionen (Sakumono-Einzugsgebiet (Accra) und Nabogo-Einzugsgebiet, nahe Tamale). Durch die Kombination eines Frühwarnsystems mit Wassermanagement-, Oberflächenwasserbehandlungs- und Bewässerungskonzepten sowie Aus- und Fortbildungsmaßnahmen für einzelne Bevölkerungsgruppen und Entscheidungsträger soll eine nachhaltige Wassernutzung ermöglicht werden.

Im Verbundprojekt RAIN wurden verschiedene Technologien, Dienstleistungen und Empfehlungen entwickelt. Diese tragen dazu bei, die Anpassungsfähigkeit verschiedener Akteure in Ghana an die Folgen des Klimawandels zu erhöhen

In Arbeitspaket 1 wurden wichtige Informationen über die Untersuchungsgebiete und deren Charakteristika, wie z.B. die vorherrschenden Wassernutzergruppen und deren Wasserverbrauch bzw. -bedarf, erhoben. Darüber hinaus wurden historische und zukünftige Klimaszenarien einschließlich Hochwasser und Dürre in den Gebieten analysiert bzw. entwickelt. Diese dienten im Projektverlauf der Entwicklung des Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystems für die beiden Pilotregionen, der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten und der Entwicklung von Wassermanagementsystemen und -konzepten. Ebenso flossen die in Arbeitspaket 1 gesammelten Informationen sowie erste Ergebnisse der Untersuchungen von Biokohle als Filtermaterial unter Laborbedingungen aus Arbeitspaket 2 in die Entwicklung eines Biokohlefiltersystems für Oberflächenwasser für den sicheren Einsatz in der Landwirtschaft ein. Daneben wurden Bewässerungsschläuche und Komponenten für eine wasserverlustarme Bewässerung unter Laborbedingungen (Gewächshaus) getestet. In einer abschließenden Phase des Arbeitspaketes 2 wurde das entwickelte Biokohlefiltersystem mit dem entwickelten Bewässerungssystem gekoppelt und unter realen Bedingungen in Ghana getestet. Die Arbeiten der Arbeitspakete 1 und 2 sind eingebettet in ein kontinuierliches Aus- und Weiterbildungsprogramm des Arbeitspaketes 3. In diesem Programm wurde die lokale Bevölkerung in den Pilotgebieten für den Klimawandel sensibilisiert und Erfahrungen ausgetauscht. Darüber hinaus wurden Anwenderschulungen für die entwickelten Systeme (Frühwarnsystem und Biokohlefiltersystem) für lokale Stakeholder durchgeführt. Alle durchgeführten Projektarbeiten waren in das Konzept der Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 4) integriert.

Das Projekt hat Vorhersagemodelle mit Frühwarnfunktion für die lokalen meteorologischen Auswirkungen des Klimawandels (Dürre, Starkregen und Hochwasser) für die beiden Pilotregionen entwickelt. Darüber hinaus wurden Wassermanagementkonzepte zur Reduzierung von Überschwemmungsrisiken und zur Verbesserung der Wasserverfügbarkeit für den häuslichen und landwirtschaftlichen Bedarf einschließlich Wasseraufbereitung und -verteilung erstellt. Außerdem wurde ein Biokohlefiltersystem für Oberflächenwasser mit angeschlossenem verlustminderndem Bewässerungssystem für landwirtschaftliche Flächen entwickelt.

Die weitere Nutzung der Pilotanlage eines Biokohlefiltersystems zur Behandlung von verschmutztem Oberflächenwasser einschließlich des angeschlossenen Bewässerungssystems für Forschungs- und Lehrzwecke erfolgt durch das Department of Agricultural Engineering (DAE) der University of Ghana und das Accra Sewage Improvement Project (ASIP). Manotura (Aquatechnik) plant, das entwickelte Anlagenkonzept für die Bewässerung in Modul-Sets (Speichereinheit mit mechanischem Filter, Tropfereinheit) zu zerlegen. Die Markteinführung in Deutschland ist für 2024 geplant. Das Wasserhaushaltsmodell des Nabogo-Einzugsgebietes wird im Rahmen einer Dissertation eines Mitarbeiters der University for Development Studies in Tamale weitergeführt und verbessert. Ziel ist es, das bereits entwickelte Maßnahmenkonzept des RAIN Projektes für den ländlichen Raum zu integrieren und zu verbessern. Durch eine Doktorandin des Institute for Environment and Sanitation Studies (IESS) der University of Ghana wird die Wasserqualität der Wasserrückhaltebecken im Zusammenhang mit der lokalen Wassernutzung weiter untersucht.

2 Ergebnisse

2.1 Arbeitsplan

Das Gesamtziel des ghanaisch-deutschen Verbundvorhabens RAIN (Vorhabenbeschreibung Stand 16.09.21) ist die Verminderung der Vulnerabilität und die Erhöhung der Resilienz der urbanen, peri-urbanen und ruralen Kommunen gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels (Starkregenfälle, Hochwasserereignisse, langanhaltende Dürreperioden) in ausgewählten Pilotregionen. Dies wurde exemplarisch in den Pilotregionen Sakumono-Einzugsgebiet und Nabogo-Einzugsgebiet umgesetzt.

Das Vorhaben ist in fünf Arbeitspakete (AP) gegliedert - AP0 Projektmanagement, AP1 Innovative Dienstleistungen, AP2 Nachhaltige Technologien, AP 3 Training und Weiterbildung sowie AP4 Öffentlichkeitsarbeit und Verteilung der Empfehlungen und Richtlinien.

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit der Institutionen Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH e.V. (FiW), Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum (RUB), AWAS International GmbH (bis April 2022, anschließend Insolvenz), Manotura GmbH und dem Institute for Environment and Sanitation Studies (IESS) der University of Ghana, der Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) und Envaserv Consult Research (ERC) in Zusammenarbeit mit HKV Consultants (HKV) im Unterauftrag des FiW und der University of Development Studies (UDS) in Tamale als Implementierungspartner in der Northern Region durchgeführt. In Tabelle 1 ist der Arbeitsplan des Verbundvorhabens dargestellt. Hervorgehoben sind die Institutionen, die die jeweiligen Arbeitspakete koordinieren.

Tabelle 1: Arbeitsplan Verbundvorhaben RAIN

Nr.	Arbeitspaket	Partner D	Partner G
AP0 Projektmanagement und Projektkommunikation			
0.1	Projektkoordination & -steuerung	FiW	
0.2	Organisation von Veranstaltungen, Projektvernetzung & Außer-darstellung	FiW, alle	alle
0.3	Projektberichte sowie wissenschaftliche und populärwissenschaftliche Publikationen	FiW, alle	alle
AP1 Innovative Dienstleistungen			
1.1	Entwicklung von historischen und zukünftigen Szenarien zur Einschätzung der Auswirkungen von Hochwasser und Dürre	FiW (UA HKV), FiW	ERC
1.2	Erstellung und Verbreitung von Hochwasser- und Dürrevorhersagemodellen	FiW (UA HKV), FiW	ERC
1.3	Erstellung von Wasserhaushalts- und Wassermanagementmodellen für die Pilotregionen	FiW, FiW (UA HKV)	KNUST, IESS
1.4	Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten	FiW	IESS

	Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in urbanen Regionen (Sakumono Einzugsgebiet, Accra)		
1.5	Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in ruralen Regionen (Nabogo Einzugsgebiet, nahe Tamale)	FiW	KNUST
1.6	Bedarfsanalyse der Wassernutzergruppen (Distrikt Adenta, Accra, peri-urban)	FiW, RUB	IESS, KNUST
AP2 Nachhaltige Technologien			
2.0	Untersuchung von Biokohlen als Filtermaterial und Erprobung von Biolight unter Laborbedingungen an der RUB.	RUB	
2.1	Ex-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser im peri-urbanen Raum durch die AWAS-Containeranlage und durch ein geeignetes Biokohle-Filtermaterial in Ghana.	AWAS, RUB	IESS
2.1	Pandemiebedingt: Aufbau und Test der modularen AWAS-Containeranlage in Deutschland	AWAS, RUB	
2.1	Pandemiebedingt: Beprobung der Zu- und Abflüsse der modularen Containeranlage in Deutschland (Teil des Aufstockungsantrags der RUB)	RUB, AWAS	
2.2	In-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser durch das <i>AWAS-BIOLIGHT-OLOID-PYRAMID-System</i>	AWAS, RUB	KNUST
2.3	Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit aufbereitetem Wasser in Ghana	Manotura, RUB	IESS
2.3	Pandemiebedingt: Aufbau und Durchführung von Bewässerungsversuchen in Deutschland	Manotura, RUB	
2.3	Pandemiebedingt: Biofilmanalysen zu den Bewässerungsversuchen von Manotura in Deutschland (Teil des Aufstockungsantrags der RUB)	RUB, Manotura	
AP3 Training und Weiterbildung			
3.1	Aufklärung und Verhaltenstraining für die lokale Bevölkerung	FiW, FiW (UA HKV)	IESS, KNUST, ERC
3.2	Produktschulung und Trainings- und Workshop-Programm für lokale Interessensvertreter zu „Anpassungen an den Klimawandel“ und „Wasseraufbereitungsanlagen“	FiW, FiW (UA HKV), RUB, AWAS	IESS
3.3	Weiterbildungsprogramm zur Nutzung des aufbereiteten Wassers in der Landwirtschaft	Manotura, RUB	IESS, KNUST
AP4 Öffentlichkeitsarbeit, Verteilung der Empfehlungen und Richtlinien			
4.1	Öffentlichkeitskonzept	FiW	IESS, KNUST
4.2	Informations- und Weiterbildungsmaterialien	FiW, RUB	IESS, KNUST
4.3	Erstellen von Materialien und Leitfäden, Unterstützung beim PAUWES/ WASCAL Forschungsplan	FiW, RUB	IESS, KNUST

Durch die Pandemie und insbesondere aufgrund der daraus resultierenden Einschränkungen der praktischen Tätigkeiten vor Ort haben sich Verzögerungen im Arbeitsplan des Konsortiums ergeben. Das Vorhaben wurde auf Grund Verzögerungen wegen Reisebeschränkungen auf

Grund COVID-19 kostenneutral bis zum 31.12.2022 (FIW) bzw. 31.10.2022 (RUB, Manotura) verlängert.

2.2 Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Alle neun Erfolgskriterien des Verbundprojekts zu Projektende wurden in Zusammenarbeit mit den ghanaischen Projektpartner erfüllt (vgl. Vorhabenbeschreibung vom 16.09.2021, S.21ff):

1. Eingangsparameter (Szenarien) für die Vorhersagemodelle für urbane und rurale Gebiete liegen vor.
2. Hochwasser- und Dürrevorhersagemodelle zur Bewertung der zukünftigen Auswirkungen durch Hochwasser und Dürre sind einsatzbereit.
3. Ergebnisse der Bedarfsanalyse der Wassernutzergruppen für ausgewählte urbane und rurale Gebiete liegen vor.
4. Wasserbewirtschaftungskonzepte für urbane und rurale Gebiete wurden erarbeitet.
5. Erprobte Frühwarnsysteme in Kombination mit Bewirtschaftungskonzepten und Wasseraufbereitungs- bzw. Bewässerungssysteme für rurale und urbane Gebiete sind im Einsatz.
6. Potenzielle Betreiber der Pilotanlagen für Betrieb, Instandhaltung und Wartung der Pilotanlagen nach Abschluss des Projektes sind geschult (während der Installation in AP 2 und durch Schulungs- und Trainingsprogrammen in AP 3).
7. Lokale Bevölkerung und Interessengruppen (z.B. Community Leader, Behörden und Genossenschaften) sind für Hochwasser- und Dürreerisiken sensibilisiert.
8. Empfehlungen und Leitfäden für Behörden und staatliche Einrichtungen, Umweltverbände und Unternehmen, Ausbildungsstätte und Hochschulen sowie für die lokale Bevölkerung wurden erstellt.
9. Materialien (z.B. Audio-Visuelle-Beiträge für die Lehre) für den PAUWES- und WASCAL-Forschungsplan sind erstellt und in die Lehrpläne der Studiengänge der PAUWES integriert.

Hinsichtlich Punkt 5 wird angemerkt werden, dass die Systeme an die Stakeholder übergeben wurden und das Frühwarnsystem auch vom HSD getestet wurde. Inwieweit diese dauerhaft im Einsatz sind, liegt im Ermessen der jeweiligen Verwaltungen. Die in Punkt 9 aufgeführten Materialien wurden PAUWES und WASCAL zur Nutzung zu Verfügung gestellt. Inwiefern diese genutzt werden bzw. in die Lehrpläne integriert werden obliegt den jeweiligen Institutionen.

Das vorzeitige Ausscheiden der Firma AWAS aus dem Projekt wegen Insolvenz zum 21.04.2022 hatte folgende Auswirkungen auf die Zielerreichung des Gesamtkonsortiums. Die AWAS-Containeranlage (AP 2.1) wurde 2020 in Deutschland aufgebaut und getestet.

Aufgrund der pandemischen Lage und der Insolvenz wurde die Anlage nicht in Ghana getestet. Die in-situ Aufbereitung von Oberflächengewässer durch das AWAS-Biolight-OLOID-PYRAMID-System wurde nicht umgesetzt. Des Weiteren wurden bezüglich der AWAS-Systeme keine Workshops durchgeführt und Weiterbildungsmaterialien erstellt. Den Autoren liegen die Ergebnisse der von AWAS durchgeführten Arbeiten nicht vor und sind somit nicht Bestandteil dieses Berichts. Vorarbeiten und Untersuchungen, die von Verbundpartnern durchgeführt wurden und mit den Arbeiten von AWAS in Zusammenhang standen, sind Bestandteil dieses Berichts.

Aufgrund der Pandemie und der Koordinationsreise im Oktober 2021 ergaben sich Änderungen in der Partnerkonstellation. Um eine Erreichung des Gesamtziels des Vorhabens in der verbliebenen Projektlaufzeit zu ermöglichen, wurden, in Abstimmung mit dem Projektträger, die Untersuchungsstandorte von drei (Accra, Kumasi, Nabogo/Northern Region) auf zwei (Accra, Nabogo/Northern Region) reduziert. Für die Aufbereitungs- und Bewässerungssysteme (AP2) konnte in unmittelbarer Nähe der University of Ghana in Accra ein Standort auf dem Gelände einer öffentlichen Kläranlage gefunden werden. Hier bestanden geeignete Voraussetzungen für eine umfassende Betreuung, einen gesicherten Betrieb und die Durchführung von Schulungen. Mit dem Wegfall des Standorts in Kumasi übernahmen das IESS der UG in Zusammenarbeit mit der University of Development Studies (UDS) in Tamale/Northern Region als Implementierungspartner die Aufgaben der KNUST. Die UDS kann eine mehrjährige Erfahrung im Nabogo-Einzugsgebiet vorweisen. Somit übernahmen, in Abstimmung mit dem Projektträger, die IESS und die UDS die Aufgaben der KNUST ab Oktober 2021.

Im BMBF-geförderten Verbundprojekt konnte das ghanaisch-deutsche Konsortium das Gesamtziel des Verbundes vollständig und drei weitere Ziele mit Einschränkungen erreichen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Tabellarischer Soll-Ist-Vergleich der Verbundziele gemäß Vorhabenbeschreibung (Stand 16.09.2021)

Verbundziele gemäß Vorhabenbeschreibung	Erreichungsgrad (vollständig erreicht, teilweise erreicht, nicht erreicht)	Erläuterungen (zur Zielerreichung, damit Erreichungsgrad nachvollziehbar wird)
Gesamtziel des Verbundes Verminderung der Vulnerabilität und die Erhöhung der Resilienz der urbanen, peri-urbanen und ruralen Kommunen gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels (Starkregenfälle, Hochwasserereignisse, langanhaltende Dürreperioden) in zwei ausgewählten Pilotregionen	vollständig erreicht	Die Erfolgskriterien des Verbundprojektes zu Projektende wurden erfüllt.

Verbundziele gemäß Vorhabenbeschreibung	Erreichungsgrad (vollständig erreicht, teilweise erreicht, nicht erreicht)	Erläuterungen (zur Zielerreichung, damit Erreichungsgrad nachvollziehbar wird)
<p>Teilziel des Verbundes Erkenntnisse zur Bewirtschaftung von Wasserressourcen gewinnen, die die regionalen und nationalen Wasserbewirtschaftungspläne durch einen Bottom-up Ansatz ergänzen können.</p>	teilweise erreicht	<p>Wasserhaushaltsmodelle und Wassermanagementmodelle für die Einschätzung des aktuellen Zustandes der beiden Untersuchungsregionen wurden erstellt. Wasserbedarfsanalysen und der Einfluss informeller Siedlungen auf die Oberflächenwasserqualität wurden inklusive der Variabilität der Wasserqualität untersucht.</p> <p>Es wurde ein angepasstes Reinigungsverfahren zur Behandlung von verunreinigtem Oberflächenwasser entwickelt und die Leistungsfähigkeit untersucht. Weitere Systeme wurde auf Grund des Wegfalls der Firma AWAS nicht umgesetzt.</p> <p>Ein Einzeltropfer-Schlauchsystem wurde erfolgreich in Ghana eingesetzt. Das vereinfachte Dochttopfschlauchsystem und der Aqua-Vlies-Schlauch konnten nicht bis zur Einsatzfähigkeit entwickelt werden, da die Verklebungen nicht dicht und funktional hergestellt werden konnten.</p>
<p>Teilziel des Verbundes Verbesserung der Chancen der beteiligten deutschen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, an der künftigen umweltseitigen Entwicklung in Westafrika mitzuwirken.</p>	teilweise erreicht	<p>Auf Seiten der Forschungseinrichtungen konnte eine Verbesserung der Chancen gewährleistet werden. Aus Unternehmenssicht (Manotura) konnten keine belastbaren Kontakte und Initiativen in der Projektlaufzeit über das Projektkonsortium hinaus aufgebaut werden. Die Forschungsergebnisse (Mantura) bilden den Grundstock für weitere Entwicklungen für den deutschen Markt.</p>
<p>Teilziel des Verbundes Identifikation im Kontext des Projektes von weiteren relevanten Forschungsgebieten um das Pan-African-University Institute for Water and Energy (PAUWES) bei der Implementierung der Afrika-Strategie des BMBF zu unterstützen</p>	teilweise erreicht	<p>Durch die Covid-Pandemie und die starken Reisebeschränkungen in den Jahren 2020 und 2021 konnte der Kontakte zu PAUWES nicht gehalten werden. Nichtsdestotrotz konnten mit dem WACWISA der University for Development Studies in Tamale im Kontext des Projektes weitere relevante Forschungsgebiete identifiziert werden. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts RAIN inklusiver aller Dokumentationen und Modellierungen wurden PAUWES zu Verfügung gestellt, um diese zu unterstützen.</p>

2.3 Quantifizierung der Anpassungswirkungen

Die Anpassungswirkung der entwickelten Technologien und Dienstleistungen kann wie folgt quantifiziert werden:

Technologie / Dienstleistung	Anpassungswirkung	Quantifizierung
Hochwasserfrühwarnsystem	Erhöhung der Resilienz für Bewohner im Sakumono-Einzugsgebiet und im Nabogo-Einzugsgebiet gegenüber Hochwassergefahren.	Das HSD kann in Zusammenarbeit mit NADMO im Nabogo-EZG etwa 10.000 Einwohner und in der Adenta Municipality im Sakumono EZG etwa 95.000 Einwohner von Hochwassergefahren warnen.
Dürrefrühwarnsystem	Erhöhung der Dürresilienz der Kleinbauern im Nabogo-EZG.	Das HSD kann Kleinbauern, die eine Fläche von etwa 225.000 ha bewirtschaften, vor Dürregefahren warnen.
Biokohlefilter gekoppelt mit Tröpfchenbewässerung	Erhöhung der Verfügbarkeit von hygienisch sicherem Bewässerungswasser bei höherer Bewässerungseffizienz.	Bauern im Sakumono-Einzugsgebiet können kostengünstig Filter bauen und mit Tröpfchenbewässerung bewässern. Potentielle Nutzer wurden geschult.
Wassermanagementkonzepte	Erhöhung der Resilienz für Bewohner im Sakumono-Einzugsgebiet und im Nabogo-Einzugsgebiet gegenüber Dürre und Wasserknappheit.	Bezirksregierungen und lokale Chefs können mit Hilfe der Universitäten Dürrepläne ausarbeiten, um Wasser in den Regenzeiten zu speichern.

2.4 Arbeitsplan

Besonders betroffen von den Verzögerungen waren die Implementierungen in Ghana und die dazugehörige Validierung der Ergebnisse. Um die Arbeiten in der verbliebenen Projektlaufzeit logistisch zu vereinfachen, wurden in Kumasi keine Untersuchungen durchgeführt, sondern sich auf die Standorte Accra und Tamale beschränkt. Die Vor-Ort-Biofilter-Versuche der RUB sowie die Bewässerungsversuche von Manotura konnten von Mai 2022 bis August 2022 in East Legon in unmittelbarer Nähe der University of Ghana in Accra, auf dem Gelände einer öffentlichen Kläranlage umgesetzt werden. Hier bestanden geeignete Voraussetzungen für eine umfassende Betreuung und einen gesicherten Betrieb während der Durchführung. Im August 2022 erfolgte auch die geplante Anwenderschulung am gekoppelten Biokohlefilter-Bewässerungssystem mit lokalen Interessenvertretern. Ebenso betroffen waren die Datensammlung für die Modelle aus Arbeitspaket 1. Diese konnten final erst im November 2022 abgeschlossen werden. Es konnte im November ein Workshop mit lokalen Bauern in Nabogo durchgeführt werden. Dieser hat viele wichtige Informationen für das Wasserhaushaltssystem geliefert. Auch bei der Übergabephase an die lokalen Partner sowie den Schulungen kam es zu Verzögerungen.

Ende September 2022 konnte ein gemeinsamer Disseminationsworkshop mit allen Partnern und Interessenvertretern in Accra durchgeführt werden. Die Übergabe der Projektergebnisse an die ghanaischen Partner konnte im Dezember 2022 erfolgen.

In Tabelle 3 sind die Meilensteine des Gesamtkonsortiums inklusive ihres Erreichungszeitraums aufgeführt.

Tabelle 3: Meilensteintabelle des Gesamtkonsortiums

MS	Meilenstein (MS)	Projektmonat geplant	Projektmonat erreicht
AP0 Projektkoordination und Kommunikation			
0.1	Projektstart, Eingangsbestätigung	1	1
0.2	Kooperationsvertrag	2	2
0.3	Auftakttreffen mit den deutschen Partnern	4	4
0.4	Kick-Off-Workshop Ghana	5	5
0.5	Workshop AP1 in Ghana mit beteiligten nationalen & internationalen Partnern	5	5
0.6	Jahresberichte der KMU	7,19,31	7,19,31,43
0.7	Workshop AP2 in Ghana mit beteiligten nationalen & internationalen Partnern	28	39
0.1	Projektstart, Eingangsbestätigung	1	1
0.8	Gesamtverbundbericht	13, 25, 37	13, 25, 43

MS	Meilenstein (MS)	Projektmonat geplant	Projektmonat erreicht
0.10	Mid-term-Workshop in Ghana	28	Meilenstein in Absprache gestrichen, da weder 2020 noch 2021 Workshops durchgeführt werden konnten
AP1 Innovative Dienstleistungen			
1.1	Konzept für Datenerhebung erstellt	9	9
1.2	Pilotregionen ausgewählt und Absprachen mit Anwendungspartnern / Nutzer getroffen	9	30
1.3	Datenerhebung durchgeführt und abgeschlossen	28	42
1.4	Bedarfsanalyse der Wassernutzergruppen (Haushalte, Landwirtschaft und Industrie)	28	41
1.5	Entwicklung von Szenarien zur Einschätzung der Auswirkungen von Hochwasser und Dürre (für urbanes und rurales Pilotgebiet)	27	27
1.6	Erstellen von Hochwasser- und Dürrevorhersagemodelle	27	43
1.7	Wasserhaushaltsmodelle für beide Pilotregionen erstellen	28	41
1.8	Prüfung von Szenarien zur Einschätzung der Auswirkungen von Hochwasser und Dürre für beide Pilotregionen	28	42
1.9	Wasserbewirtschaftungskonzept Nabogo-Einzugsgebiet (Nahe Tamale)	31	41
1.10	Wasserbewirtschaftungskonzept Sakumono-Einzugsgebiet (Accra)	31	41
AP2 Nachhaltige Technologien zur Aufbereitung von Oberflächenwasser			
2.0	Ergebnisse Laborversuche	16 (Biolight)	16
		27 (Biokohlefilter)	33
2.1DE	Modulare Containeranlage AP 2.1 ist in DE erprobt	24 (Versuchsdurchführung)	24
		24 (Analyse mit Sonde)	33
2.3 DE	Bewässerungsversuche in DE	24	34
2.1	Geplante Technik und Behandlungskonzepte für AP 2.1, 2.2 und 2.3 festgelegt	28 (Pläne liegen vor)	32
		28 (Einfuhr- und Zoll für Malitäten geklärt)	32
2.3	Pilotanlage AP 2.1 (modulare Containeranlage und Materialuntersuchung im Biokohlefilter)	29	06/22
2.4	Pilotanlage AP 2.2	29	Ausgehend von Ergebnissen aus AP 2 und wg. Insolvenz AWAS wurde keine Umsetzung in Ghana verfolgt.
2.5	Bewässerungssystem AP 2.3	29	Aufbau 23.05.2022 Fertigstellung 26.05.2022 Erster Betrieb 31.05.2022
2.6	Pilotanlagen AP 2.1 erprobt	34	40
2.7	Pilotanlage AP 2.2 erprobt	34	Ausgehend von Ergebnissen aus AP 2 und wg. Insolvenz AWAS wurde keine Umsetzung in Ghana verfolgt..
2.8	Bewässerungssystem AP 2.3 erprobt	34	41 Versuchsbericht 18.09.2022

MS	Meilenstein (MS)	Projektmonat geplant	Projektmonat erreicht
AP3 Training und Weiterbildung			
3.1	Konzept für das Trainingsprogramm	34	37
3.2	Anwenderschulung Frühwarnsystem	34	35
3.3	Aufklärungskurs zum Thema Klimawandel für lokale Interessensvertreter	34	9, 40, 42
3.4	Produktschulung und Trainingskurs für Benutzer für Pilotanlagen aus AP 2.1 und 2.2. (Wasseraufbereitungsanlagen)	34	39
3.5	Produktschulung und Trainingskurs für Benutzer für Bewässerungssystem aus AP 2.3	34	39
AP4 Öffentlichkeitsarbeit, Verteilung der Empfehlungen und Richtlinien			
4.1	Abgestimmtes Konzept für die Erstellung, des Layouts und der Verteilung	28	37
4.2	Handlungsempfehlungen für lokale Behörde und Interessenvertreter	30	42
4.3	Unterrichtsmaterialien für den PAUWES-Forschungsplan	34	43
4.4	Unterrichtsmaterialien für den WASCAL-Forschungsplan	34	43

2.5 Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojekts Innovative Dienstleistungen (AP1)

2.5.1 AP 1.1 Datenerhebung, Entwicklung von Szenarien zur Einschätzung der Auswirkungen von Hochwasser und Dürre und Auswahl der Pilotgebiete

Wie die meisten Länder Westafrikas ist Ghana in besonderer Weise von den Folgen des globalen Klimawandels betroffen. Insbesondere meteorologische Extremereignisse wie intensiver Niederschlag (konvektiver und advektiver Art) oder langanhaltende Dürre stellen enorme Herausforderungen für die Bevölkerung dar. Historische Aufzeichnungen der durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur zeigen seit den 1990er Jahren einen ansteigenden Trend, wobei die Jahre 2019 und 2021 zu den wärmsten Jahren seit Beginn der Wetteraufzeichnung zählen. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur Ghanas von 1901 bis 2021 auf Basis aggregierter Beobachtungsdaten.

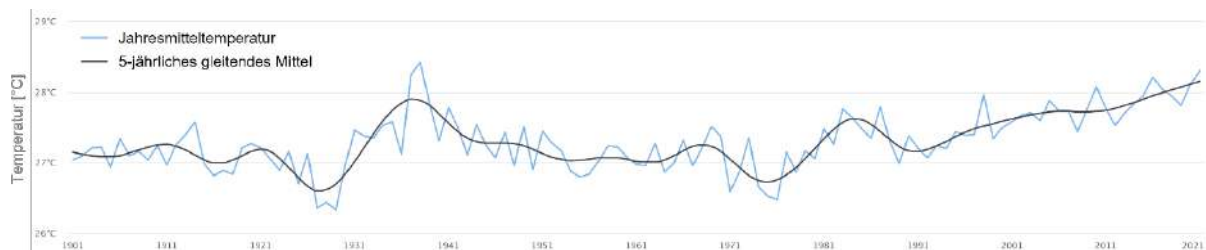


Abbildung 1: Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur Ghanas von 1901 bis 2021. Modifiziert nach (The World Bank Group 2023).

Analog zum globalen Mittel prognostizieren Klimaprojektionen des internationalen Klimamodellvergleichsprojekts CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project 6*), die als Grundlage für den sechsten Sachstandberichts des Weltklimarats (IPCC AR6) herangezogen wurden, für alle definierten *Shared Socioeconomic Pathways* Szenarien (SSP-Szenarien) einen z.T. deutlichen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur in Ghana bis zum Jahr 2100. Abbildung 2 zeigt die Projektionen der mittleren Jahrestemperatur in Ghana für die unterschiedlichen SSP-Szenarien des CMIP6-Projektes bis 2100, inklusive der Schwankungsbereiche der verschiedenen Klimamodelle.

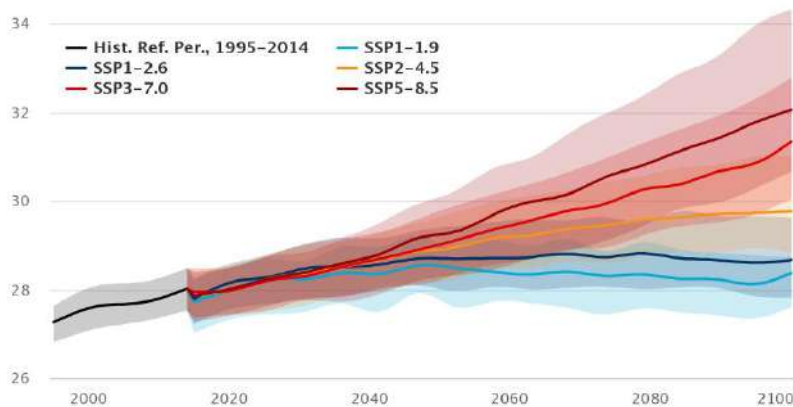


Abbildung 2: Projektionen der mittleren Jahrestemperatur in Ghana für unterschiedliche SSP-Szenarien. Modifiziert nach (The World Bank Group 2023).

Basierend auf dem Zusammenhang, dass wärmere Luft potentiell mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann und als Folge dessen – abhängig von regionalen Gegebenheiten – zu längeren Trockenheit oder intensiveren Niederschlägen führen kann, wurde die Landnutzung als weiteres Kriterium zur Auswahl der Pilotgebiete im Projekt genutzt. Da die Landnutzung gleichzeitig Bevölkerungsdichte und Versiegelungsgrad impliziert, dient sie somit auch als Indikator der Exposition der Regionen hinsichtlich potentiellen Hochwassergefahren und -risiken bei extremen Niederschlagsereignissen. Im Rahmen des Projektes wurde daher das Sakumono-Becken als Repräsentant eines dicht besiedelten sowie teilweise versiegelten, urbanen Gebietes gewählt, und das Nabogo-Becken als Repräsentant eines vorwiegend landwirtschaftlich geprägten Areal mit geringer Bevölkerungsdichte und dünner Siedlungsstruktur. Beide Pilotregionen waren in der Vergangenheit mit Hochwasser- und Dürreereignissen konfrontiert, wobei in Sakumono Hochwasserereignisse und im Nabogo-Einzugsgebiet Dürren gravierendere Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung hatten. Die Lage der zwei Pilotgebiete in Ghana ist in Abbildung 3 dargestellt.

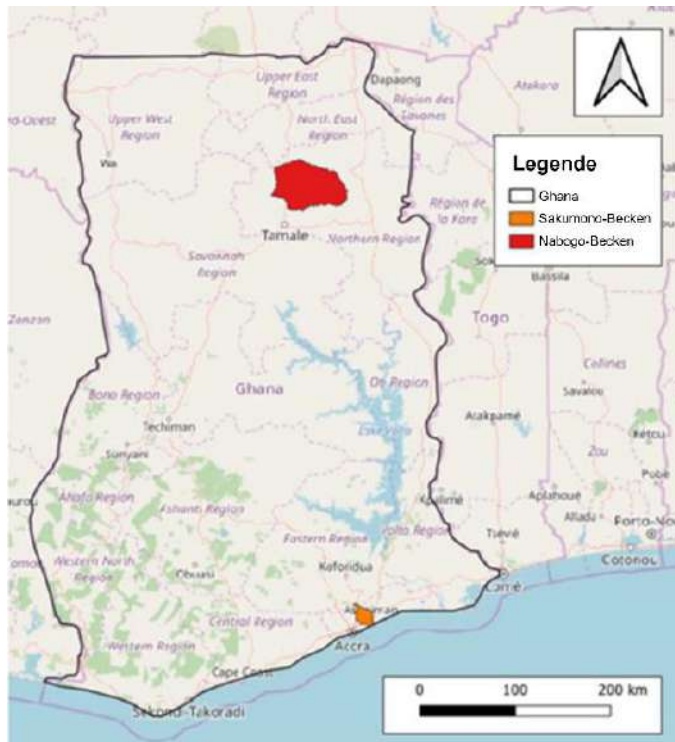


Abbildung 3: Lage der zwei Pilotgebiete, Sakumono-Becken und Nabogo-Becken, in Ghana.

Für den Aufbau der hydrologischen und hydraulischen Modelle zur Hochwasser- und Dürrevorhersage werden im Folgenden jeweils die hydrologischen Einzugsgebiete der Gewässer als Modellregion, resp. Pilotregion bezeichnet. Auf dieser Ebene erfolgt die Beurteilung der aktuellen und zukünftigen Überflutungs- und Dürregefährdung. Der Aufbau und die Implementierung der End-to-End-Vorhersagesysteme beziehen sich im Gegensatz dazu auf die administrativen Grenzen, die nur einen Teil des hydrologischen Modellgebiets abdecken, da hierzu die direkte Kommunikation und der Austausch mit der lokalen Administration notwendig ist. Für diese Gebiete erfolgt auch die Bewertung der Vulnerabilität gegenüber der Hochwasser- und Dürregefahren sowie die Untersuchung potentieller Anpassungsmaßnahmen.

Zum Aufbau der hydrologischen und hydraulischen Modelle für die Pilotregionen wurde eine Vielzahl geographischer, atmosphärischer und weiterer Daten recherchiert. Neben digitalen Geländemodellen beinhaltet dies u.a. Daten zu Landnutzung, Bodentyp, Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Evapotranspiration, Gewässerverläufe, -querprofile und Durchlässe. Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4 bis Abbildung 8) geben einen Überblick über die genutzten Daten.

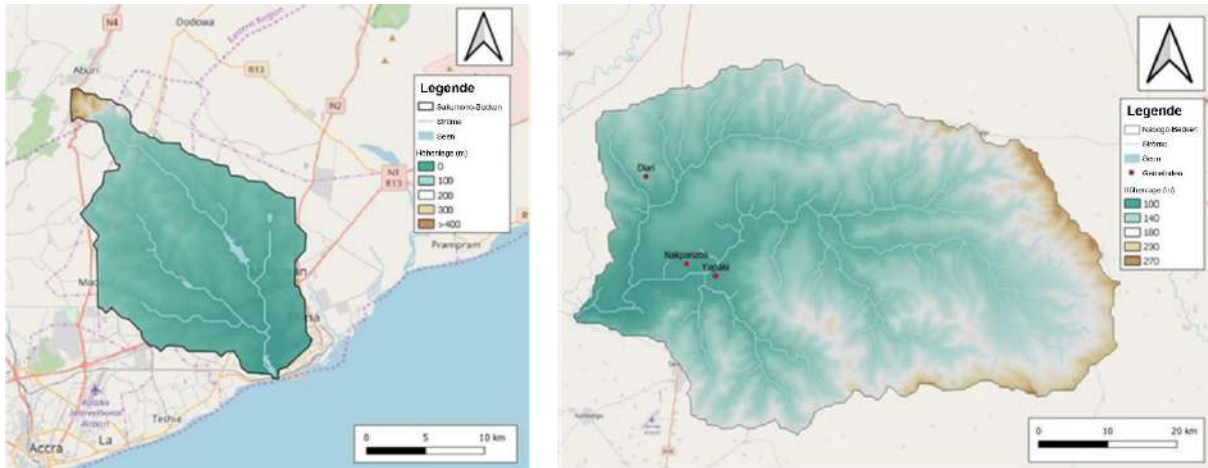


Abbildung 4: Digitale Geländemodelle der Pilotgebiete Sakumono (links) und Nabogo (rechts). Datenquelle: Airbus WorldDEM4Ortho, Version 1.4 (AIRBUS 2018).

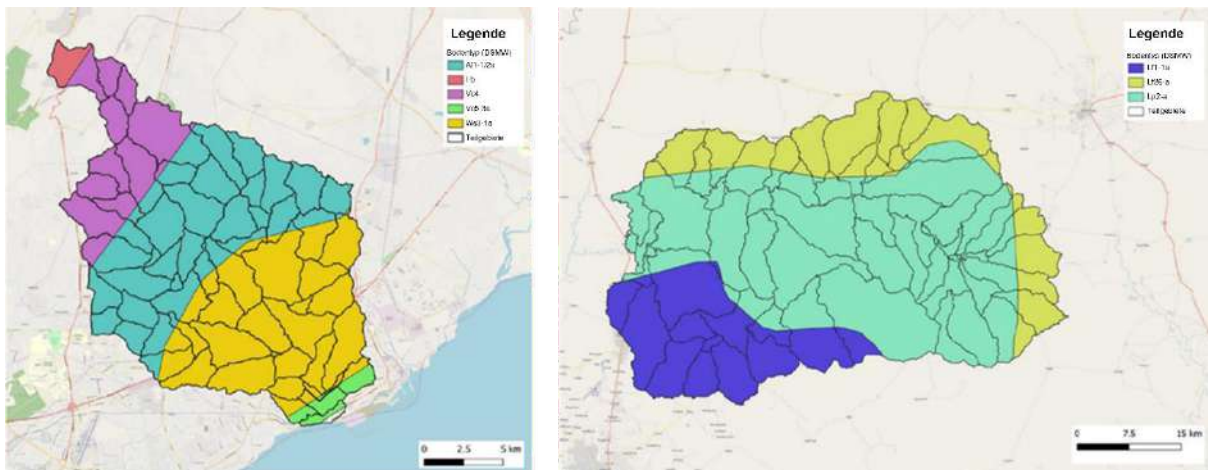


Abbildung 5: Bodentypen in Sakumono (links) und Nabogo (rechts). Sakumono ist von Lithosolen, chromhaltigen Vertisolen und Planosolen geprägt, während Nabogo eisenhaltige Luvisole aufweist. Datenquelle: Digital Soil Map of the World (FAO UNESCO 1977).

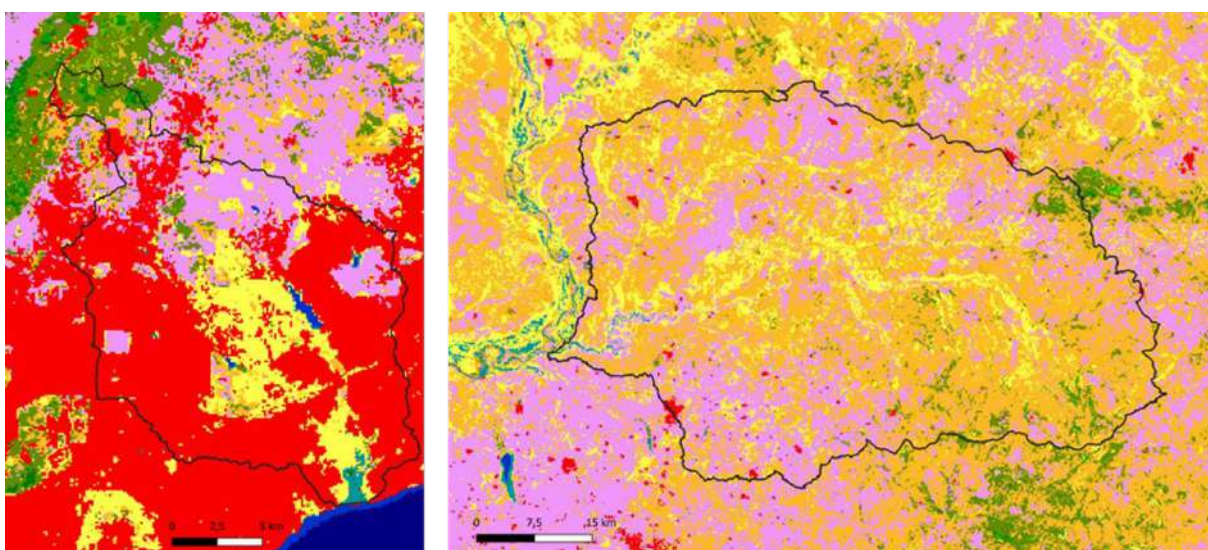


Abbildung 6: Vorhandene Landnutzung in den Pilotgebieten Sakumono (links) und Nabogo (rechts). Datenquelle: Copernicus Global Land Cover Map 2019 (Buchhorn et al. 2020).

Die Gewässernetze in den Einzugsgebieten wurden in GIS auf Basis der digitalen Geländemodelle abgeleitet und anhand von Satelliten-Bildern unterschiedlicher Anbieter qualitativ validiert. Unter der Annahme, dass aktuelle Satellitenbilder eine geringere Fehlerwahrscheinlichkeit bezüglich der Gewässerverläufe aufweisen als aus Satelliten-DEM-Daten abgeleitete Gewässerverläufe, wurde bei größeren Abweichungen eine manuelle Korrektur der Gewässerverläufe vorgenommen. Es wurden Gewässerabschnitte punktuell begangen, um Annahmen bzgl. der Gewässerquerprofile zu treffen. Abbildung 7 gibt einen Überblick über vorherrschenden Gewässerquerprofile sowie deren anschließende Digitalisierung. Maßgebende Durchlässe, wie bspw. Brücken oder Verdolungen, wurden ebenfalls beispielhaft eingemessen und in die hydrodynamischen Modelle überführt (Abbildung 8).

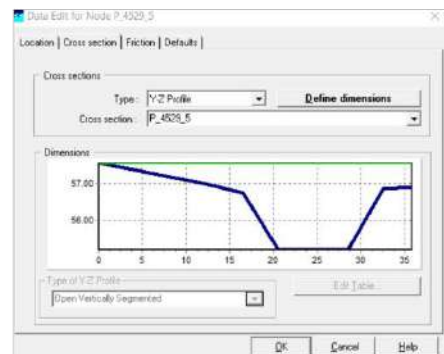
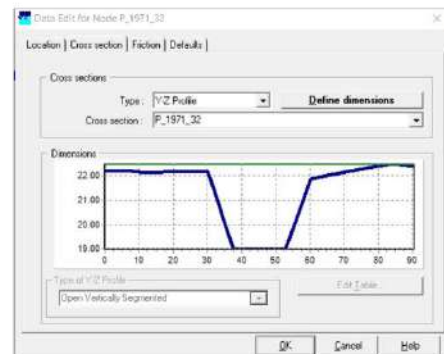
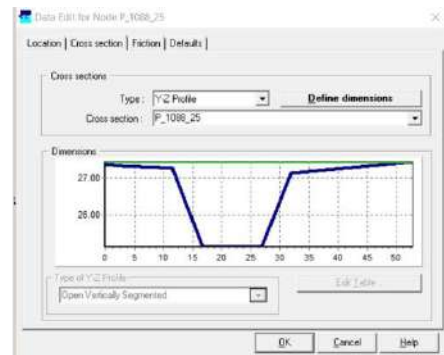


Abbildung 7: Gewässerquerprofile in Sakumono und Überführung in das hydrodynamische Modell.



Abbildung 8: Durchlässe inklusive Abmessungen zur Abschätzung der Querschnittsfläche.

Für die Entwicklung der maßgebenden Szenarien, die als atmosphärische Randbedingungen in die hydrodynamischen und hydrologischen Modelle eingehen, wurden lokale Beobachtungsdaten recherchiert, auf Messdaten von Satelliten und auf Daten aus globalen und regionalisierten Klimamodellen zurückgegriffen.

Für das Sakumono-Becken wurde ein Niederschlags-Abfluss-Modell mit HEC-HMS aufgebaut, um Abflüsse für Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit zu ermitteln. Über ein 1D2D-Sobek-Modell erfolgte die Berechnung resultierender Wasserstände, auf deren Basis die Risikoanalysen für das Pilotgebiet durchgeführt wurden. Es wurden Niederschlagsereignisse mit einer Jährlichkeit von 5, 10, 50 und 100 Jahren modelliert (Abbildung 9).

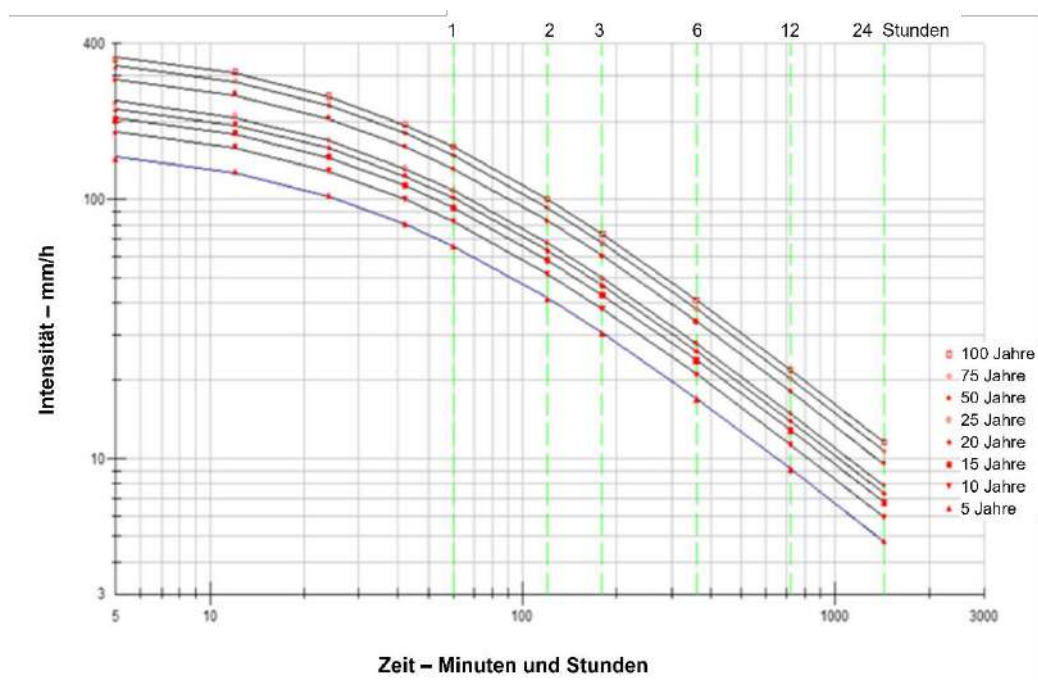


Abbildung 9: Intensitäts-Dauerkurve unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Niederschlagsstation Accra-Airport. Zur Verfügung gestellt von Ghana Meteorological Agency.

Der Abbildung 10 können beispielhaft die resultierenden Wasserstände eines 5- und 100-jährlichen Niederschlagsereignisses im Sakumono-Becken entnommen werden.

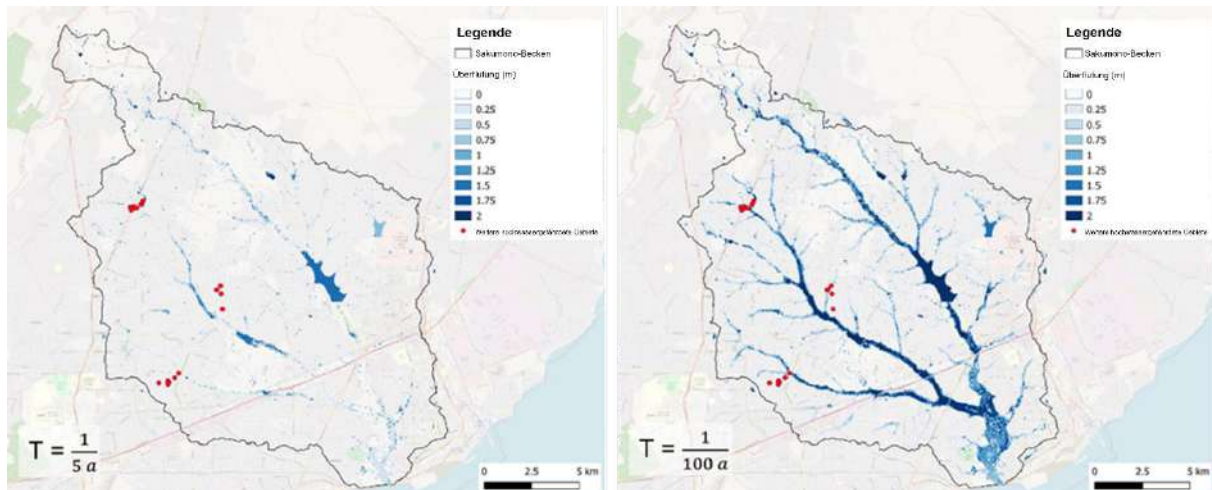


Abbildung 10: Darstellung der Überflutungsflächen und Wassertiefen eines 5-jährlichen Niederschlagsereignisses (links) und eines 100-jährlichen Niederschlagsereignisses (rechts).

Der Modellaufbau für das Nabogo-Becken unterscheidet sich deutlich von dem des Sakumono-Beckens. Die große Fläche des hydrologischen Einzugsgebietes erfordert die Betrachtung größerer Zeitskalen, wodurch der Einfluss weiterer hydrologischer Prozesse zunimmt, wie bspw. Verdunstung und Versickerung. Da die Wasserstände im Nabogo-Becken über mehrere Monate zu- oder abnehmen, wurde das Niederschlags-Abflussmodell *Sacramento* für das Design maßgebender Abfluss-Szenarien gewählt. Das *Sacramento*-Modell wurde aus dem *Stanford Watershed-Modell* abgeleitet und ist ein häufig verwendetes Konzept zur Modellierung von Niederschlägen und Abflüssen. Es beschreibt die mathematischen Gleichungen, die für jeden Prozess bei der Umwandlung von Niederschlägen in einen Abfluss in einen Fluss gelten. Im Gegensatz zum Sakumono-Becken wurden keine eventbasierten Niederschlagszenarien untersucht, sondern eventbasierte Abflussszenarien. Um Abflussszenarien höherer Jährlichkeiten zu untersuchen, wurde auf Basis meteorologischer Messdaten und Wasserstanddaten des Nabogo-Unterlaufs ein gekoppeltes Sacramento–1D-SOBEK-Modell aufgebaut, kalibriert und validiert. Anschließend wurde anhand historischer Daten der Wasserstand am Ausfluss des Beckens für einen Zeitraum von 26 Jahren modelliert, der wiederum extremwertstatistisch ausgewertet wurde, um Abflussevents unterschiedlicher Jährlichkeiten extrahieren zu können. Abbildung 11 illustriert die Modellgüte anhand der Gegenüberstellung gemessener und modellierter Abflusswerte und die modellierte 26-jährliche Abflussganglinie an der Nabogo-Messstation im Unterlauf des Flusses. Es konnte ein Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) Index von 0,7 erreicht werden, der als „einigermaßen gut“ gewertet wird. Der Standort der Nabogo-Messstation kann Abbildung 12 entnommen werden. Es wurde jeweils der jährliche Maximalabfluss ermittelt und die Weibull-Verteilung zur Beschreibung des maximalen Abflusses als Funktion der Wiederkehrperiode angewendet. Die Abfluss-Ereignisse mit Wiederkehrperioden, die am nächsten an 1, 5, 10 und 40 Jahren liegen, wurden ausgewählt, um als Input für das 1D2D-gekoppelte SOBEK-Modell

verwendet zu werden. Infolge der verfügbaren Länge der Niederschlagsdaten beträgt die maximal mögliche Wiederkehrperiode etwa 40 Jahre. Die gewählten Abflussereignisse sind somit 1989, 1992, 1999 und 2007.

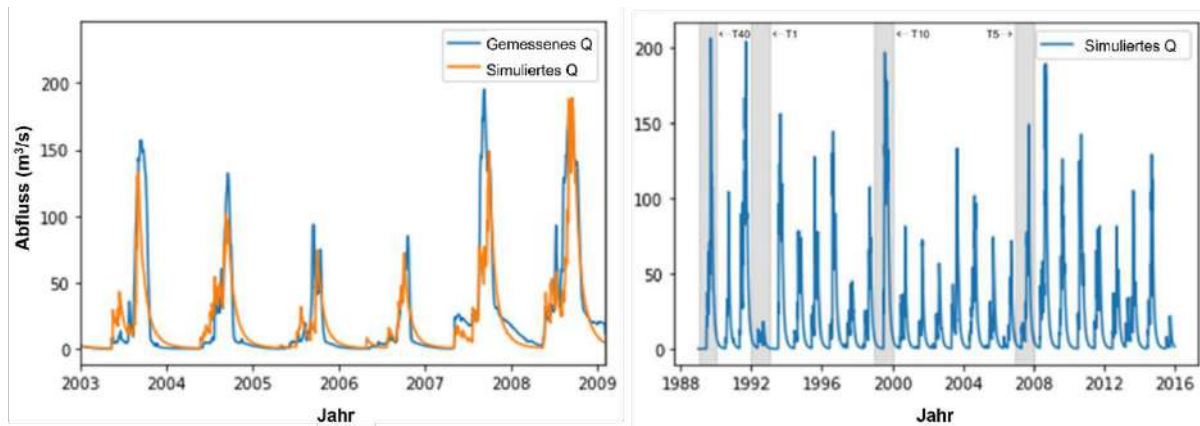


Abbildung 11: Darstellung des gemessenen und simulierten Abflusses Q (links) sowie der 26-jährigen simulierten Abflussganglinie an der Nabogo-Messstation. Die gewählten Abflussereignisse mit Wiederkehrzeiten von 1, 5, 10 und 40 Jahren sind grau hervorgehoben.

Die Simulation der ausgewählten Abflussereignisse im gekoppelten 1D2D-SOBEK-Modell führte zur Bestimmung der resultierenden Überflutungsflächen und Wassertiefen sowie zur Ermittlung der Überflutungsgefährdung im Nabogo-Becken. Die Überflutungsflächen des 40-jährlichen Abflussereignisses und die statistische Häufigkeit einer Überflutung im Nabogo-Einzugsgebiet sind in Abbildung 12 dargestellt.

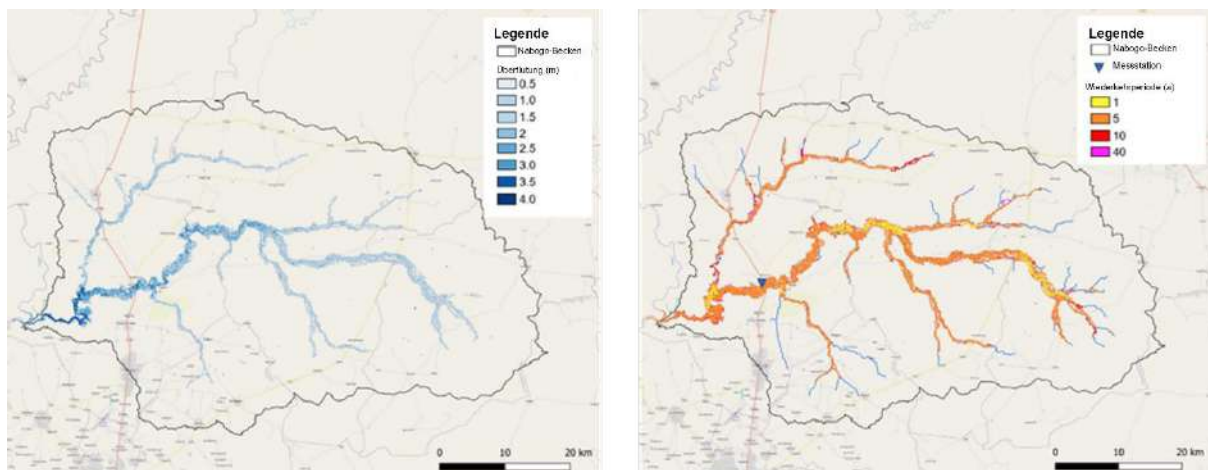


Abbildung 12: Resultierende Überflutungsflächen und Wassertiefen des 40-jährlichen Abflussereignisses (links) sowie Darstellung der Überflutungshäufigkeit im Nabogo-Einzugsgebiet (rechts).

Zur Ermittlung des Hochwasserrisikos innerhalb der Einzugsgebiete sowie der jeweiligen Vulnerabilität wurde die Datengrundlage um Informationen zu Landnutzungskategorien, Gebäuden und Infrastruktur sowie Bevölkerungsdichte erweitert, wobei sich der Detaillierungsgrad zwischen den Pilotgebieten unterscheidet. Im Pilotgebiet Sakumono konnte bspw. auch die Gebäudenutzung in die Bewertung der Vulnerabilität integriert werden (z.B.

Krankenhaus, Schule, etc.), während sich die Analysen in Nabogo auf die vorhandene Landnutzung und Infrastruktur beschränken.

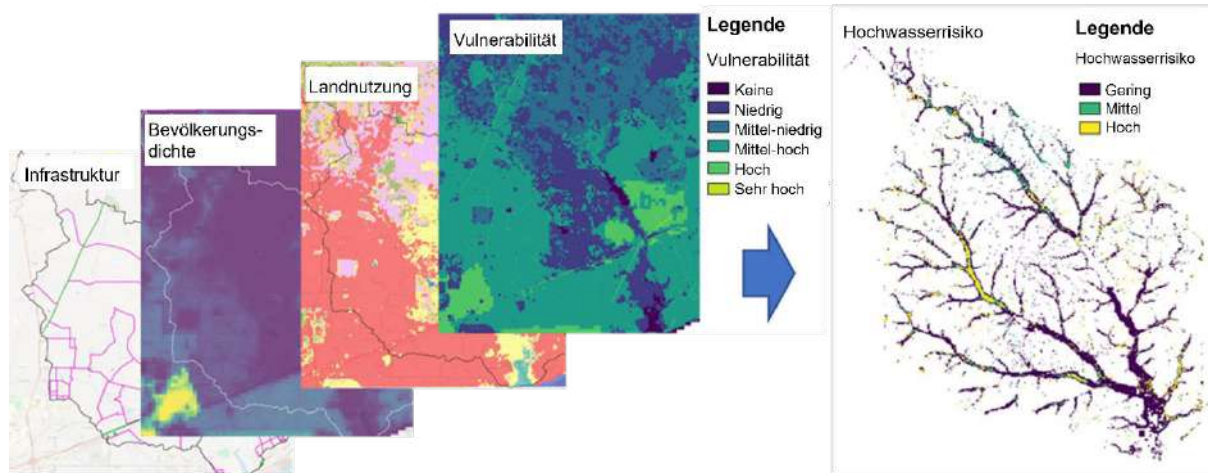


Abbildung 13: Datengrundlage und resultierende Hochwasserrisiko-Karte des Sakumono-Einzugsgebietes.

Analog wurde auch für das Nabogo-Einzugsgebiet eine Hochwassergefahren- und -risikokarte erstellt.

Zur Analyse der Dürresituation im Nabogo-Einzugsgebiet und Implementierung in das Dürrefrühwarn-System wurde der Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) genutzt. Der multiskalige Dürreindex bewertet die Schwere einer Dürre nach ihrer Intensität und Dauer. Zur Berechnung werden monatliche oder wöchentliche Niederschlagsdaten sowie Daten zur potenziellen Evapotranspiration herangezogen, um eine vereinfachte klimatische Wasserbilanz darzustellen (Vicente-Serrano et al. 2010). Der SPEI wird mit folgender Formel berechnet:

$$\text{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}$$

wobei C_0 , C_1 und C_2 sowie d_1 , d_2 und d_3 Konstanten darstellen: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, und $d_3 = 0,001308$. $W = -2 \ln(P)$ und stellt die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines Wasserüberschusses oder -defizits dar.

Der SPEI wurde als Indikator für Dürre verwendet, da die Menge der benötigten Datenmenge begrenzt ist, und er somit gut in einem Vorhersagesystem angewendet werden kann. Um zukünftige Dürren im Vorhersagesystem klassifizieren zu können, werden Wiederkehrzeiten berechnet. Infolge unzureichender Langzeit-Messdaten im Einzugsgebiet wurde auf den *SPEIbase* Datensatz zurückgegriffen (*SPEIbase* v2.6 2018). Der globale Datensatz mit einer räumlichen Auflösung von $0,5^\circ$ stellt den SPEI für den Zeitraum 1901 bis 2018 zur Verfügung und wurde auf Basis monatlicher Niederschlagsdaten sowie der abgeschätzten potentiellen Evapotranspiration nach dem Penman-Monteith-Ansatz berechnet.

Tabelle 4: SPEI-Klassifizierung nach McKee et al. (1993).

SPEI Index	Klassifizierung
------------	-----------------

> -0.5	Keine Dürre
-1.0 bis -0.5	Leicht trocken
-1.5 bis -1.0	Mäßig trocken
-2.0 bis -1.5	Stark trocken
< -2.0	Extrem trocken

Der SPEI wurde auf einer Zeitskala von 1, 3, 6, 12, 18 und 24 Monaten verwendet, um künftige Dürretrends bewerten zu können. Ein Beispiel für den SPEI auf einer Zeitskala von 12 Monaten ist für das Nabogo-Einzugsgebiet in Abbildung 14 dargestellt. Positive Werte (blau) deuten auf eine überdurchschnittlich feuchte Periode hin, während negative Werte Dürreperioden anzeigen.

Um das Ausmaß einer Dürre in zukünftigen Situationen einzuschätzen zu können, wurden die Wiederkehrzeiten in Nabogo anhand der Formel $T = a * e^{b * SPEI}$ beschrieben, wobei T die Wiederkehrzeit und a und b Konstanten darstellen. Eine Darstellung der resultierenden Kurve sowie der Datengrundlage ist ebenfalls in Abbildung 14 dargestellt.

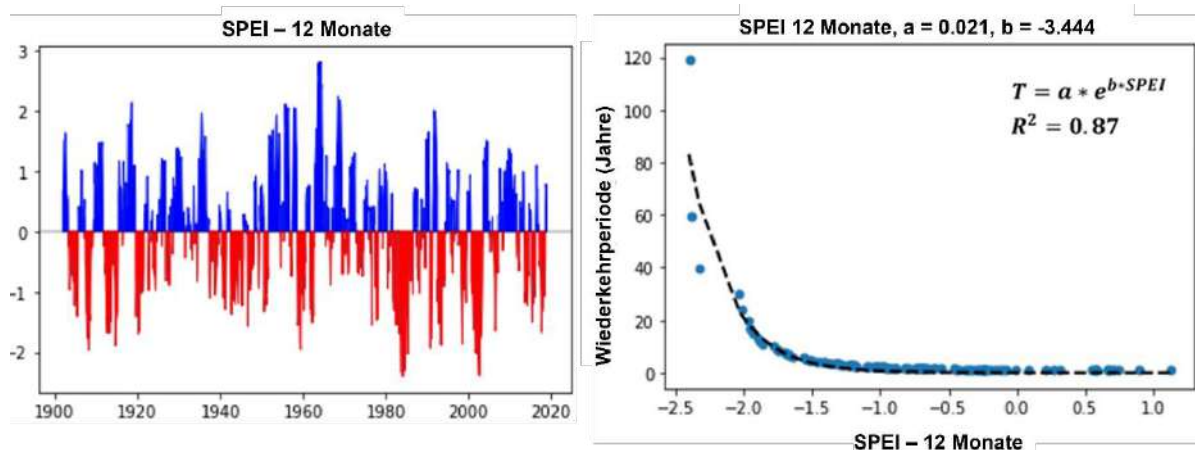


Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung des 12-monatigen SPEI-Index von 1900 – 2020 sowie die dazugehörigen Wiederkehrzeiten des Nabogo-Einzugsgebiets.

Zur nachfolgenden Vorhersage von Dürren wird der SPEI jeweils auf Grundlage von Niederschlags- und Verdunstungsdaten berechnet, die aus Messdaten sowie Vorhersagen zusammengesetzt werden. Ein anschließender Vergleich der berechneten SPEI mit den auf Basis der historischen Daten abgeleiteten Wiederkehr-Funktionen für die unterschiedlichen Zeitskalen, erlaubt die Bewertung der Dürresituation und etwaige Klassifizierung der Dürren.

2.5.2 AP 1.2 Erstellung und Verbreitung von Hochwasser- und Dürrevorhersagemodelle

Das erstellte Frühwarnsystem ist in der Lage, Hochwasser in den Pilotgebieten Nabogo und Sakumono sowie Dürren im Pilotgebiet Nabogo vorherzusagen. Für diese Vorhersage wurde ein Delft-FEWS-System eingerichtet, das verschiedene Datenprodukte kombiniert und deren Import/Download automatisiert. Die Daten werden aufbereitet, zusammengeführt und in die

unterschiedlichen hydrodynamischen, hydrologischen und statistischen Modelle eingespeist. Die Modellergebnisse werden zurück in das FEWS-System importiert und mit Warnstufen verglichen. Die Ergebnisse werden sowohl in FEWS, einem Expertensystem, als auch in einem Online-Dashboard visualisiert. Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung des Gesamtsystems.

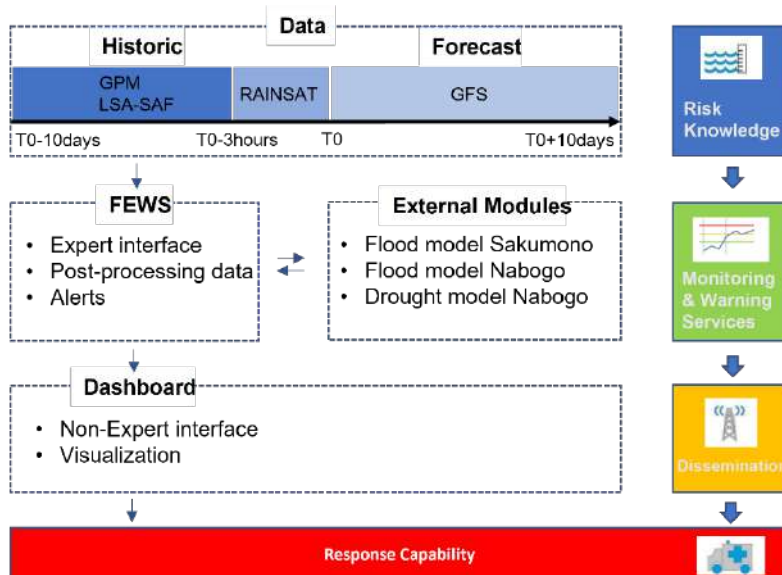


Abbildung 15: Schematische Darstellung des entwickelten Frühwarnsystems inklusive Zuordnung zu standardmäßig erforderlichen Key-Komponenten.

Zur Bewertung der Performance des Gesamtsystems wurde ein Vergleich mit Messdaten, Hindcast-Daten und Berichten über Überflutungen und Dürren aus lokalen Medien für das Jahr 2022 durchgeführt. Im Sakumono-Becken wurden am 05. Juni 2022 Überflutungen in der *Spintex Road* im Sakumono-Einzugebiet (CitiNewsroom 2022) verzeichnet. Da die gemessenen und vorhergesagten Niederschlagssummen einem 2-jährlichem Niederschlagsereignis entsprachen und unterhalb des gewählten Schwellenwertes von fünf Jahren lagen, wurde keine Warnung ausgegeben. Die ausbleibende Warnung war somit zwar korrekt, allerdings könnte in dieser Hinsicht in Abstimmung mit den Stakeholdern über eine Absenkung des Alarm-Schwellenwertes diskutiert werden, um vor vergleichbaren Überflutungsereignissen in Zukunft warnen zu können. Ein weiteres Überflutungsereignis im Sakumono-Becken konnte im Jahr 2022 nicht festgestellt werden.

Im Nabogo-Becken wurde im Juli 2022 über hohe Niederschlagssummen in regionalen Medien berichtet (Reliefweb 2022b), die im FEWS-System erkannt und als 10-jährliches Abflussereignis klassifiziert werden konnten. Da keine näheren Informationen über resultierende Schäden recherchiert werden konnten, kann keine fundierte Empfehlung hinsichtlich einer Anpassung der Schwellenwerte gegeben werden.

Die zur Bewertung der Dürresituation im Nabogo-Becken berechneten SPEI lagen in 2022 für alle Berechnungszeiträume (1 bis 24 Monate) überwiegend im positiven Bereich, was auf überdurchschnittlich feuchte Bedingungen hinweist. Im FEWS-System zeigen insbesondere

die Monate Mai und Juni steigende SPEI-Trends, was sich mit Berichten regionaler Medien über überdurchschnittlich niederschlagsreiche Monate deckt (Reliefweb 2022b, 2022a). Der niedrigste SPEI-Wert zeigt der 12-monatige SPEI im Dezember 2021 mit einem Wert von -1,0, was einem Wiederkehrintervall von 0,65 Jahren entspricht. Der ausgewählte Validierungszeitraum entspricht somit einer feuchten Periode, was sich auch in der Performance des Frühwarnsystems widerspiegelt.

Entgegen der ursprünglich geplanten Installation des FEWS-Systems auf einem Server des Hydrologic Services Department (HSD), musste das System infolge eines lokalen Hardware-Defekts auf einem Server in den Niederlanden aufgesetzt werden. Der lokalen Administration der Adenta Municipality, dem HSD und der National Disaster Management Organisation (NADMO) wurden daraufhin Zugänge zum System eingerichtet. Zu Projektende wurden alle relevanten Systemkomponenten inklusive Installationshinweise und Leitfäden auf portablen Datenträgern an die lokalen Partner übergeben.

In Absprache mit den oben genannten lokalen Stakeholdern im Sakumono- und Nabogo-Einzugsgebiet wurde entgegen der Planung während der Antragstellung des Projektes von einer Implementierung des Frühwarnsystems als „End-to-End“-Lösung vorerst abgesehen. Infolge der pandemiebedingten Projektverzögerungen konnten mit den lokalen Stakeholdern erst zu einem späten Zeitpunkt Schulungen und Trainings zur Funktion und Handhabung des Frühwarnsystems durchgeführt werden. Als Folge dessen fehlte zu Projektende nach beidseitigem Verständnis die notwendige Routine in der Handhabung des Systems, die für eine „End-to-End“-Implementierung notwendig ist. Um das Vertrauen der Bevölkerung in das System infolge etwaiger Fehl-Warnungen nicht zu verlieren, wurde sich darauf geeinigt, vorerst Erfahrung mit dem System als „Experten-Tool“ auf administrativer Ebene zu sammeln, bevor der nächste Schritt zu einer „End-to-End“-Implementierung durch die Stakeholder selbstständig vorgenommen wird. Eine Verbreitung der Warnungen zu potentiell betroffenen Bürgern könnte bspw. anhand des in Abbildung 16 vorgeschlagenen Schemas erfolgen.

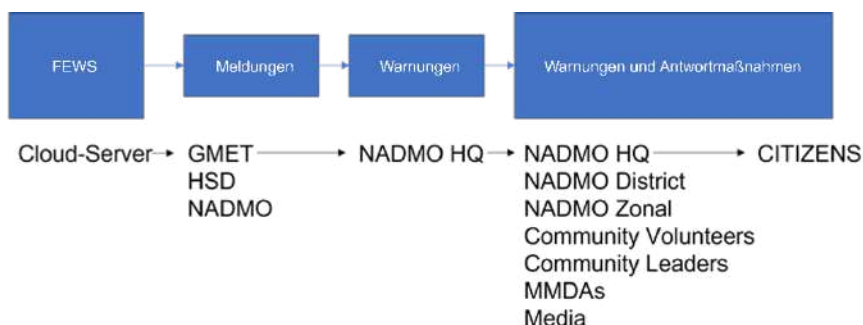


Abbildung 16: Potentielles Schema zur Verbreitung der Warnungen des Frühwarnsystems innerhalb der Stakeholder zur potentiell betroffenen Bevölkerung.

2.5.3 AP 1.3 Erstellen von Wasserhaushalts- und Wassermanagementmodellen für die Pilotregionen

Es wurden ein Wasserhaushaltsmodell im Nabogo-Einzugsgebiet und ein Wassermanagementmodell im Sakumono-Einzugsgebiet erstellt.

2.5.3.1 Wassermanagementmodell WEAP

WEAP (Water Evaluation and Planning System) ist eine Software, die ein Abbild des betrachteten Gebietes mitsamt seiner Oberflächengewässer, dem Grundwasser, Wasserentnahmen und -verbraucher, Nutzungseinschränkungen zum Schutz der Umwelt, Verschmutzungsquellen und Aufbereitungsanlagen darstellen kann. Mit Hilfe des Programms können wasserrelevante Prozesse wie Oberflächenabfluss, Infiltration, Evapotranspiration, Bewässerungsbedarf, Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser und Wasserqualität dargestellt werden. WEAP kann für verschiedene Wassersysteme verwendet werden, z. B. für kommunale und landwirtschaftliche Systeme, einzelne Einzugsgebiete oder komplexe grenzüberschreitende Flusssysteme. (Sieber und Purkey 2015)

Modellaufbau

Das Sakumono-EZG hat in den letzten Jahren einen rapiden Urbanisierungsprozess durchlaufen (Owusu 2013), die Landwirtschaft ist aber immer noch der größte Wasserverbraucher. Für dieses Einzugsgebiet wurde das erste Bilanzjahr auf 2010 (die aktuellen Zensusdaten) und das letzte Bilanzjahr auf 2032 festgelegt. Insgesamt wurde das Einzugsgebiet in zehn Teilgebiete mit einem Hauptfluss für jedes Teilgebiet unterteilt. Es wurden fünf Standorte häuslichen Bedarfs erstellt, einer für jeden im Einzugsgebiet gelegenen Distrikt. Außerdem wurden elf Standorte landwirtschaftlichen Bedarfs erstellt, einer für jedes Teilgebiet und zwei für das Teilgebiet Sakumono 1. Es wurden zehn Flüsse angelegt. Ein Grundwasserknoten wurde für das gesamte Einzugsgebiet definiert, um die Grundwassernutzung darzustellen. Schließlich wurden fünf weitere Versorgungsquellen implementiert, eine für jeden Standort häuslichen Bedarfs, um die externe Wasserversorgung zu simulieren, die aus Quellen außerhalb des Einzugsgebiets stammt.

Im Modell wurde die Bodenfeuchtigkeitsmethode gewählt, um die Hydrologie des Einzugsgebiets zu simulieren. Mit dieser Methode können die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen untersucht werden.

Datengrundlage

Aufgrund der dünnen Datenlage von lokal erhobenen Daten musste zur Erstellung des aktuellen Bilanzierungszeitraums (engl. current accounts) und des Referenzszenarios u.a. auf Fernerkundungs-, Satelliten- und Literaturdaten zurückgegriffen werden.

Die Landnutzungsdaten wurden aus dem Datensatz des WEAP-Modells und dem ESA-CCI-LC-Datensatz übernommen. Bei der Eingabe der Niederschlagsdaten waren Messdaten aktuellen Bilanzierungszeitraum verfügbar. Für andere Klima- und Bodenparameter musste jedoch auf Satellitendaten zurückgegriffen werden. Daten zur Bestimmung des Wasserbedarfs für die Landwirtschaft und die Privathaushalte sind an Berichte des Ghana Statistical Service (2022) angelehnt. Der jeweilige Crop-Koeffizient (K_c) nach FAO wurde verwendet. Die Ermittlung der möglichen Speicherkapazität der Reservoirs wurde mit Hilfe einer Grundflächenberechnung in einem Geoinformationssystem und auf Grundlage von Fachliteratur zur Schätzung der Tiefe abgeschätzt.

Szenarientwicklung

Neben dem Referenzszenario¹ wurden im WEAP-Modell für das Sakumono-Einzugsgebiet weitere Szenarien entwickelt. Diese Szenarien wurden in Zusammenarbeit mit den lokalen Partnern und Experten für Wassermanagement entwickelt. Dabei ergaben sich folgende Szenarien, die in dem Modell berücksichtigt wurden:

- Bevölkerungswachstum mit und ohne Rückgang der Landwirtschaft
- Klimawandel (Temperaturanstieg und Niederschlagsrückgang)
- Steigende Grundwassernutzung für den häuslichen Bedarf

Ergebnisse der gegenwärtigen Bedingungen (aktueller Bilanzierungszeitraum und Referenzszenario)

Derzeit wird der größte Teil des im Sakumono-Einzugsgebiet verfügbaren Wassers für die Landwirtschaft verwendet. Die Haushalte nutzen meist externe Wasserquellen von außerhalb des Einzugsgebiets. In den Modellergebnissen wird deutlich, dass der größte, ungedeckte Wasserbedarf der Landwirtschaft in den Teilgebieten Landwirtschaft Sakumono 2 und Sakumono 5 zu verzeichnen ist (zwischen 5 und 33 Mio. Kubikmeter bzw. 6 und 12 Mio. Kubikmeter pro Jahr). Aus diesem Grund fokussiert sich die konzeptionelle Entwicklung von Wasserversorgungs- oder Bedarfsmanagementstrategien auf diese Teilgebiete.

¹ Der aktuelle Bilanzierungszeitraum bilden die Grundlage für die Erstellung eines Referenzszenarios für den Projektzeitraum in der Zukunft. Das Referenzszenario wird immer automatisch von WEAP erstellt.

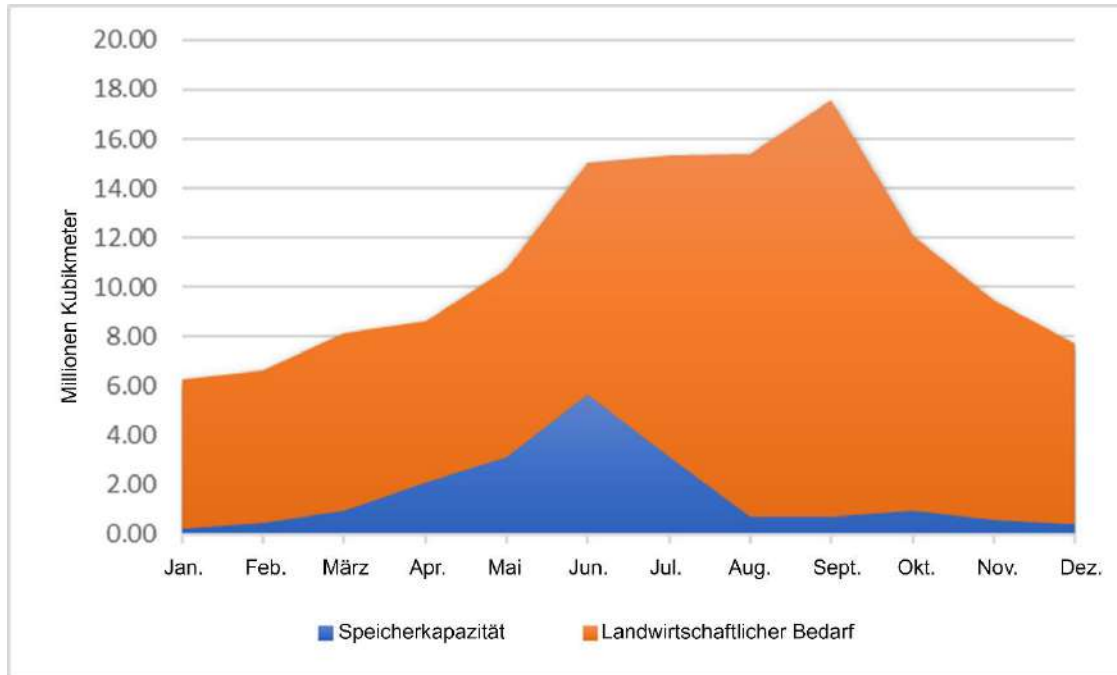


Abbildung 17: Monatlicher durchschnittlicher Wasserbedarf der Landwirtschaft im Vergleich zum monatlichen Durchschnittsspeicher.

Weiter zeigen die Berechnungen, dass der höchste Wasserbedarf in der Landwirtschaft direkt nach der Regenzeit (Mai bis Juli) in den Monaten Juli bis Oktober auftritt. Im Modell wird deutlich, dass die Speicherkapazität der Reservoirs im Einzugsgebiet nicht ausreicht, um den Bedarf der Landwirtschaft zu decken (Abbildung 17). Der monatliche Durchschnitt des gesamten landwirtschaftlichen Wasserbedarfs liegt deutlich über dem monatlichen Durchschnitt des gesamten Speichervolumens (Abbildung 17). Der Höchstwert ist etwa 3,5-mal höher (17 Mio. zu 5 Mio. Kubikmeter). Wird jedoch der Wasserdurchfluss in den verschiedenen Teilgebieten betrachtet, ist dort ausreichend Wasser verfügbar (insbesondere während der Regenzeit), das gespeichert werden kann. Hierfür ist allerdings eine Erhöhung der Speicherkapazität nötig.

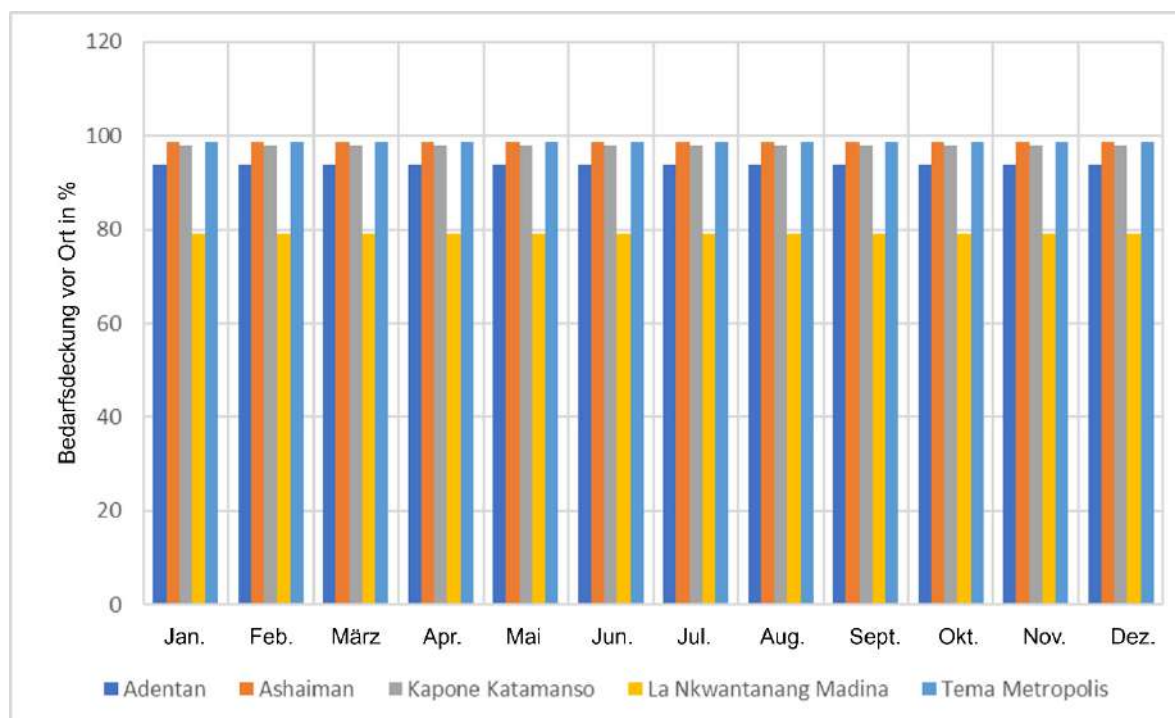


Abbildung 18: Deckung der Nachfrage häuslichen Wasserbedarfs im Sakumono-Einzugsgebiet.

Bei der Betrachtung des häuslichen Wasserbedarfs im Einzugsgebiet fällt auf, dass die fünf betrachteten Gebiete unter den derzeitigen Bedingungen eine gute Deckung aufweisen. Zwischen knapp 80 % und 99 % des Wasserbedarfs für die Versorgung von Haushalten werden gedeckt (siehe Abbildung 18). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der häusliche Bedarf derzeit größtenteils aus externen Quellen von außerhalb des Einzugsgebiets gedeckt wird, sodass es keinen Konflikt mit der Landwirtschaft um die Nutzung der Wasserressourcen gibt. Vergleicht man die monatlichen Durchschnittswerte über den gesamten Zeitraum (22 Jahre), so weist die Stadt La Nkwantanang mit rund 79 % den niedrigsten Deckungsgrad auf. Alle anderen Städte haben einen Deckungsgrad von 94 % und mehr. Dies deutet darauf hin, dass die Wasserversorgung für den häuslichen Gebrauch im Einzugsgebiet relativ gut gewährleistet ist. Dennoch sollten die Behörden die Zuverlässigkeit der externen Wasserquellen und den prognostizierten Anstieg der Nachfrage in der Region prüfen, um entsprechend planen zu können.

Wenn die landwirtschaftlichen Flächen in Zukunft in ihrer jetzigen Größe bestehen bleiben sollen, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Landwirtschaft nachhaltig zu gestalten, wie z. B.: 1) Anwendung wassersparender Bewässerungstechnologien (z. B. Tropf- und Sprinklerbewässerung); 2) Erhöhung der Speicherkapazität der Reservoirs (Bau neuer Reservoirs oder Erhöhung der Tiefe der vorhandenen Reservoirs); 3) Wiederverwendung von Haushaltsabwässern in der Landwirtschaft. Aufgrund der hohen Energie- und Pumpkosten sollten Grundwasserressourcen nicht für Bewässerungszwecke genutzt werden, bis die Effizienz der Bewässerungsmethode verbessert wird. Diese Option sollte nur für die

Wasserversorgung der Haushalte zur Verfügung stehen. Es könnte aber auch Potenzial bestehen, Wasser während der Regenzeit im Boden zu speichern (künstliche Grundwasseranreicherung) und bei Bedarf in die landwirtschaftlichen Gebiete zu leiten.

Szenario: Bevölkerungswachstum und Rückgang der Landwirtschaft (S-BW-RL)

Der Großraum Accra (Greater Accra) ist durch eine der höchsten Bevölkerungswachstumsraten in Ghana gekennzeichnet (Ghana Statistical Service 2021b). Insbesondere Satellitenstädte, wie die Gemeinden des Sakumono-Einzugsgebiets, werden stark wachsen (Österreichisches Bundesministerium Arbeit und Wirtschaft 2022). Daher wird auch der häusliche Wasserbedarf steigen. Um diese Effekte zu simulieren, wurde das Szenario für das „**Bevölkerungswachstum**“ (S-BW) erstellt. Alle ursprünglichen Eingabewerte aus der Bilanzierung wurden beibehalten. Die einzige Ausnahme ist das jährliche Aktivitätslevels des Standortes für den Wasserbedarf der Haushalte. Als Bevölkerungswachstumsrate für das gesamte Einzugsgebiet wurden 4,4 % angesetzt. Diese sind angelehnt an die Bevölkerungswachstumsrate des Bezirks Adenta (Adentan Municipal Assembly 2021).

Da die landwirtschaftliche Fläche im Sakumono-Einzugsgebiet in Zukunft aufgrund des Urbanisierungsdrucks ebenfalls zurückgehen könnte, wurde in einem weiteren Szenario eine hohe Verstädterungsrate von 90,5 % im gesamten Großraum Accra angenommen. Die städtischen und landwirtschaftlichen Flächen sind die flächenmäßig größte Landbedeckungskategorien im aktuellen Bilanzierungszeitraum für das Jahr 2010. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass die wachsende städtische Fläche die Flächen der Landwirtschaft verdrängt. Um dies zu simulieren, wurde das Szenario mit der Bezeichnung „**Rückgang der Landwirtschaft**“ (S-RL) erstellt.

Es wird für jedes Teilgebiet ein linearer Rückgang der landwirtschaftlichen Fläche bis zum Jahr 2030 angenommen. Im Jahr 2030 sind nur 10 % der ursprünglichen landwirtschaftlichen Fläche im System vorhanden. Diese geht mit der hohen Urbanisierungsrate von 90,50 % einher, die ebenfalls im Jahr 2030 voraussichtlich erreicht wird.

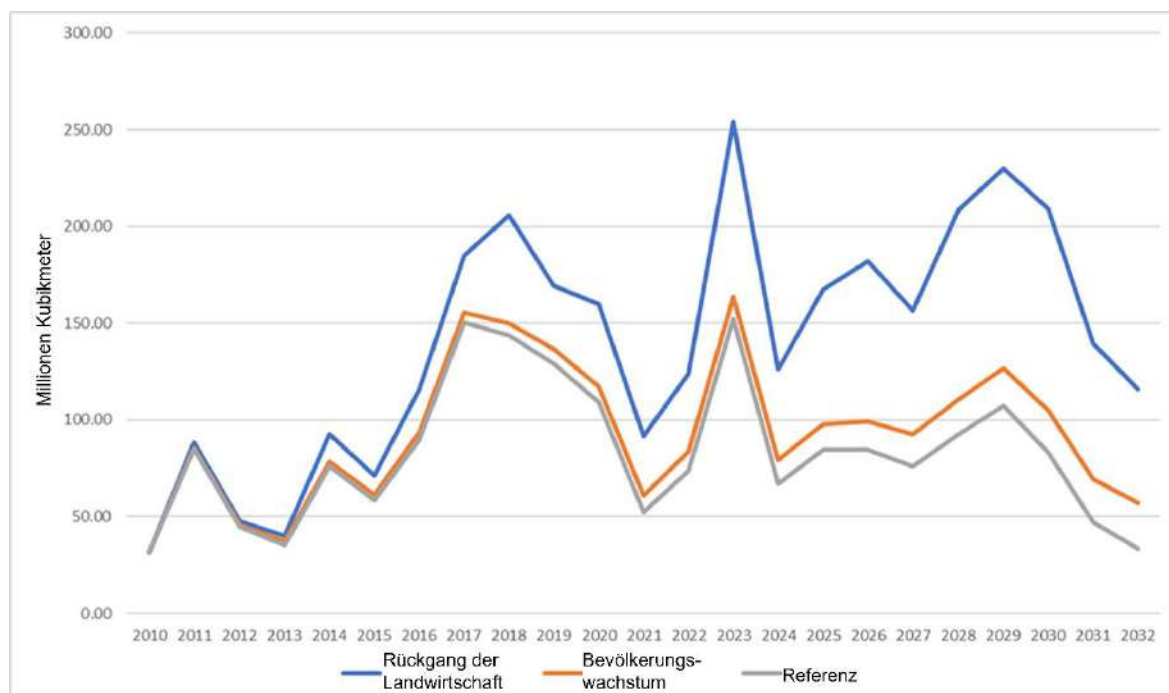


Abbildung 19: Jährlicher Gesamtabfluss des Sakumono-Einzugsgebiets für die Szenarien 1) Bevölkerungswachstum, 2) Rückgang der Landwirtschaft und 3) Referenzszenario.

Vergleicht man den jährlichen Gesamtabfluss des Sakumono-Einzugsgebiets zwischen den Szenarien 1) Bevölkerungswachstum (S-BW), 2) Rückgang der Landwirtschaft (S-RL) und 3) Referenzszenario (REF-S), so zeigt sich deutlich, dass sich die ersten beiden Szenarien positiv auf die Wasserbilanz des Einzugsgebiets auswirken (Abbildung 19). Vor allem im Szenario des Rückgangs der Landwirtschaft ist mehr Wasser verfügbar als unter den derzeitigen Bedingungen. Die positiven Auswirkungen auf die Wassermenge nehmen zu, je weiter die Szenarien in die Zukunft gehen, bis zum letzten Jahr des Modells (mit nur 10 % landwirtschaftlicher Fläche und dem höchsten Wert für die Bevölkerung). Wenn die landwirtschaftlichen Flächen in diesem Verhältnis reduziert werden, könnten in Zukunft mehr als 100 Mio. Kubikmeter Wasser zur Verfügung stehen. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass selbst, wenn nur die Bevölkerung zunimmt (Szenario des Bevölkerungswachstums), weiterhin ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Der häusliche Bedarf wird durch externe Wasserquellen gedeckt und die Rückflüsse aus den städtischen Gebieten im Einzugsgebiet verbleiben (eine Wasseraufbereitung wäre erforderlich).

Klimawandelszenario (S-KW) (Temperaturanstieg und Niederschlagsrückgang)

Grundlage dieses Szenarios ist die von der KfW Entwicklungsbank und dem Climate Service Center Germany (GERICS) entwickelte aktualisierte Version der Climate-Fact-Sheets für Ghana. Diese basieren auf dem 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2014). Für die Jahresmitteltemperatur im Untersuchungsgebiet wird eine höchst wahrscheinliche Spanne von +0,8 bis +1,7°C bis 2030 erwartet. Analog dazu wird für die jährlichen Gesamtniederschläge im Untersuchungsgebiet mit einer Bandbreite von -4 bis

+10 % bis 2030 gerechnet. In Anbetracht dessen wurden die ungünstigsten Bedingungen (Worst-Case-Szenario) für die Wasserversorgung gewählt:

- Anstieg der Temperatur um 1,7°C bis zum Jahr 2030
- Rückgang der Niederschläge um 4 % bis zum Jahr 2030

Die Ergebnisse der Simulationen des Klimawandelszenario (S-KW) zeigen, dass das Klima zumindest kurzfristig (bis 2032) keine große Rolle für die Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet spielt. Vergleicht man sowohl den jährlichen Gesamtabfluss als auch die Gesamtspeicherung in den Reservoirs mit dem Referenzszenario, so ist fast keine Veränderung zu beobachten, wie Abbildung 20 zeigt:

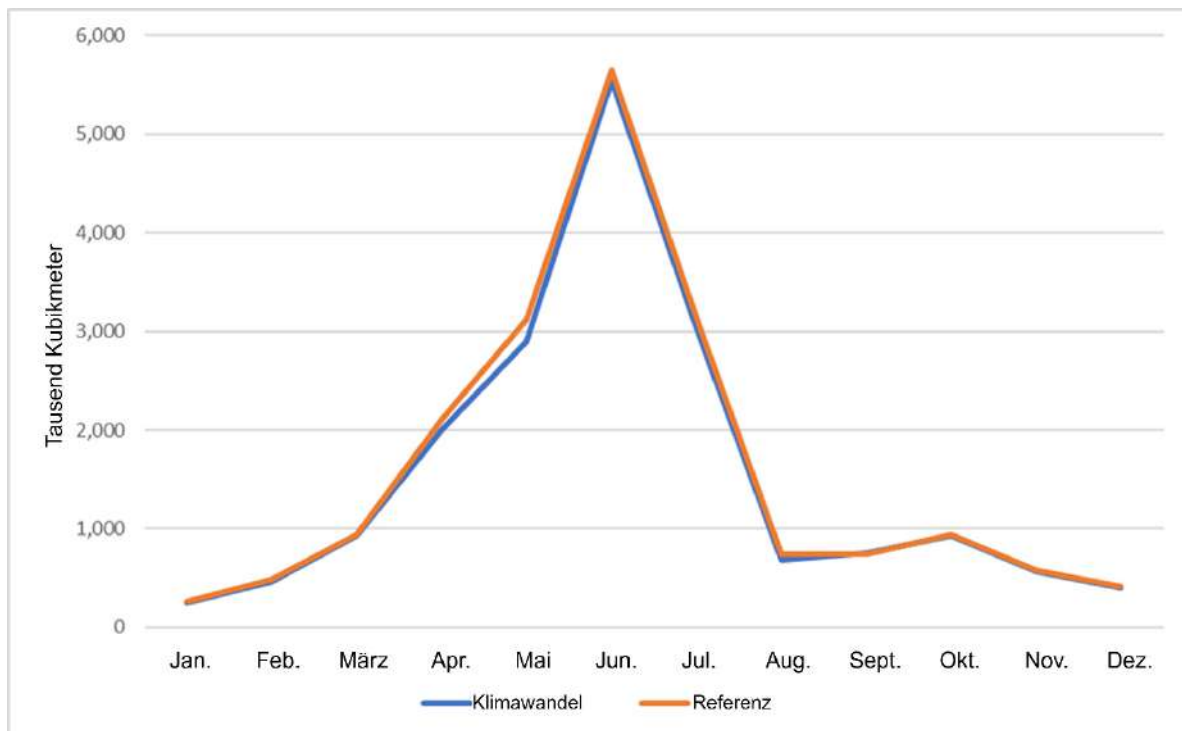


Abbildung 20: Durchschnittliches monatliches Speichervolumen im Sakumono-Einzugsgebiet für die Szenarien: 1) Klimawandel und 2) Referenzszenario.

Szenario Erhöhung der Grundwassernutzung durch Privathaushalte (S-E-GWN)

Ziel des Szenarios "Erhöhung der Grundwassernutzung" ist es, die Möglichkeit einer verstärkten Grundwasserentnahme für die Versorgung der Städte im Sakumono-Einzugsgebiet zu analysieren. Derzeit stammt der größte Teil der Wasserversorgung für Haushalte aus externen Wasserquellen (Ghana Water Company Limited). Dem aktuellen Bilanzierungszeitraum und Referenzszenario kann entnommen werden, dass diese den Wasserbedarf momentan decken. Aufgrund der Abhängigkeit von externen Quellen, die durch potentielle Mengen- oder Qualitätsprobleme oder Wassernutzungskonflikte durch erhöhten Bedarf in anderen Regionen außerhalb des Einzugsgebiets problematisch werden kann, wird die Möglichkeit Grundwasser zu nutzen in Erwägung gezogen (S-E-GWN).

Für den ersten Durchlauf dieses Szenarios wurden für das Grundwasser die gleichen Parameter wie in den aktuellen Bilanzierungszeitraum beibehalten. Es wurden lediglich die maximalen Durchflüsse für die Leitungen angepasst, um zu simulieren, dass es keine physischen Beschränkungen für die Grundwassernutzung in den fünf Gebieten gibt. Die Wassermenge, die aus externen Quellen stammt, wurde auf null gesetzt, um zu untersuchen, ob die Grundwasservorkommen in der Region den Bedarf der Privathaushalte bei Wegfall der externen Wasserquellen decken können.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Wasserversorgungsgrad der Bevölkerung abnimmt. Abbildung 21 zeigt die Bedarfsdeckung der Metropole Tema, die den größten Wasserverbrauch im Sakumono-Einzugsgebiet hat. Im Vergleich mit dem Referenzszenario, bei dem die Bedarfsdeckung mit 98 % konstant sehr hoch bleibt, nimmt die Bedarfsdeckung mit der ausschließlichen Nutzung von Grundwasser stetig ab, bis diese 65 % beträgt.

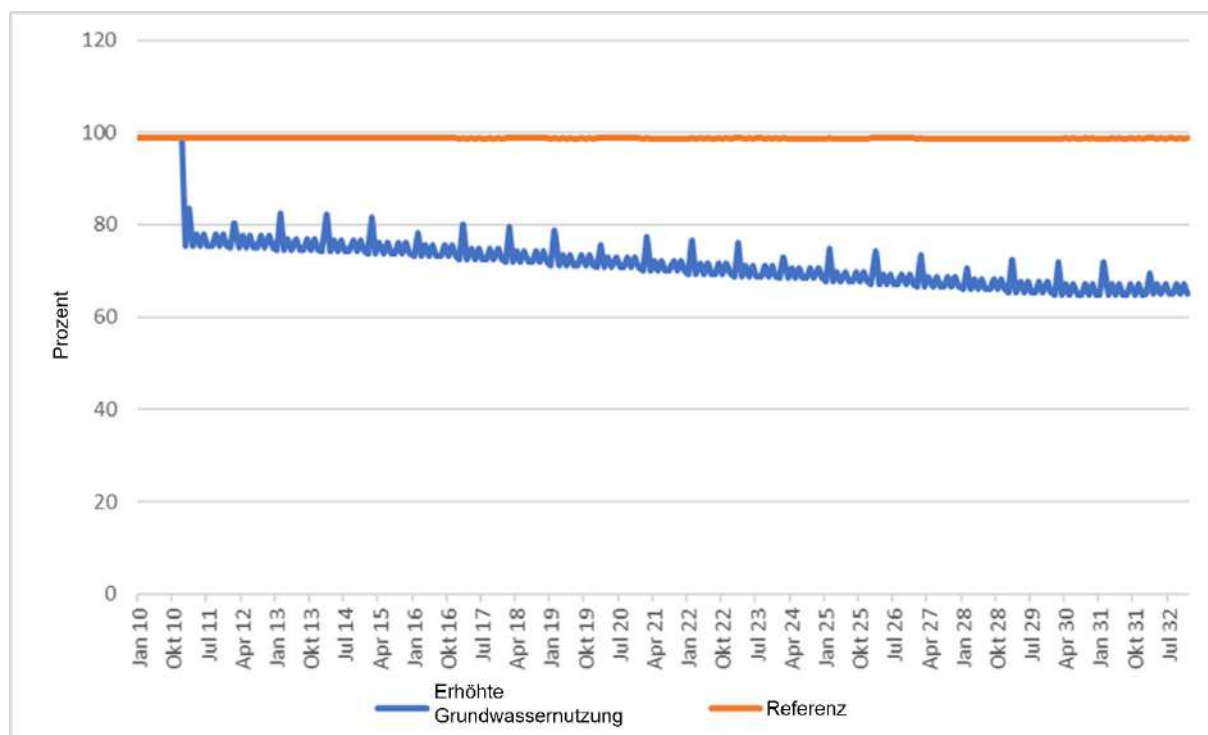


Abbildung 21: Abdeckung des Bedarfs in der Metropole Tema für die Szenarien 1) Erhöhung der Grundwassernutzung ohne maximale Entnahme und 2) Referenzszenario.

Fazit

Die Ergebnisse des WEAP-Modells zeigen, dass ein Großteil des Wassers im Sakumono-Einzugsgebiet derzeit durch die Landwirtschaft genutzt wird. Die kleinen Reservoirs im Einzugsgebiet besitzen eine unzureichende Speicherkapazität, um die landwirtschaftlichen Gebiete zu versorgen, sodass ein Wasserdefizit für die landwirtschaftliche Nutzung besteht. Da keine Abflussdaten vorliegen, ist das Modell nicht kalibriert und muss als Prinzipmodell betrachtet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das in den verschiedenen Teilgebieten vorhandene Oberflächenwasser momentan ungenutzt ins Meer abfließt.

Der Versorgungsgrad der Haushalte mit Wasser aus externen Quellen ist hoch bis sehr hoch. Dies kann sich aber, wie im Szenario S-E-GW deutlich wurde, ändern, sofern externe Wasserquellen „versiegen“ und auf lokale Ressourcen ausgewichen wird. Hier besteht ein begrenztes Substitutionspotential.

Die Ergebnisse der alternativen Szenarien zeigen, dass das größte Potenzial für Wassereinsparungen im Einzugsgebiet in der Verringerung der bewässerten Flächen liegt. Siedlungsgebiete könnten mit den Wasserressourcen des Einzugsgebiets versorgt werden, wenn die Wasserversorgung der Landwirtschaft reduziert wird. Dies kann jedoch zu einer Versorgungsknappheit führen, da gerade in der urbanen Landwirtschaft viele Selbstversorger sind (Obosu-Mensah 2002). Um dies zu vermeiden, ist es sinnvoll, dass die lokalen Behörden effiziente Bewässerungstechnologien (Tropfbewässerung, Sprinklerbewässerung) und die Wiederverwendung von Wasser fördern. So kann durch die Minimierung der Wasserverlusts auch der Wasserbedarf durch die Landwirtschaft gesenkt werden (Darouich et al. 2014).

Es wird angenommen, dass der Klimawandel kurzfristig kein Problem für die Wasserverfügbarkeit in der Region darstellt. Die Nutzung von Grundwasser für die Versorgung von Haushalten sollte nicht als nachhaltige Alternative betrachtet werden, da die natürliche Anreicherungs- und Entnahmerate zu gering ist, um die gesamte Bevölkerung im Einzugsgebiet zu versorgen.

2.5.3.2 Wasserhaushaltsmodell SWAT

Für das rurale Pilotgebiet (Nabogo-Einzugsgebiet) wurde eine Wasserhaushaltsmodellierung mit SWAT durchgeführt. Anders als das urbane Untersuchungsgebiet gibt es im Nabogo-Einzugsgebiet wenige Siedlungen, die zudem eine geringe Einwohnerdichte haben (Abbildung 6). Die Siedlungen machen nur ca. 1 % der gesamten Gebietsfläche aus. Vorherrschend sind hier die Flächentypen Landwirtschaft (59 %) und Grünland (29 %). Sie machen annähernd 90 % der Gesamtfläche aus. Da die Landwirtschaft, mit knapp drei Fünfteln, die meiste Fläche beansprucht, liegt die Vermutung nahe, dass ihre Bewirtschaftung einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Wasserreserven in diesem Gebiet hat. Daher steht diese nicht nur im Modellszenario des Ist-Zustands, sondern auch für die Prognosen im Vordergrund. So unterscheiden sich die Zukunftsszenarien für das ländliche Untersuchungsgebiet bis auf Szenario **S-KW** von denen des urbanen Einzugsgebiets.

Eingangsdaten

Zur Abgrenzung des Wassereinzugsgebiets wurde das WorldDEM™ mit einer Auflösung von 12*12 m und einer Höhengenaugigkeit von 2 m (relativ) bzw. 4 m (absolut) von Airbus verwendet. Über die Topographie wurden die Flussläufe im System ermittelt. Anschließend wurden anhand von Landnutzungs- bzw. Bedeckungsdaten sowie der Bodendaten der Digital

Soil Map of World die hydrologischen Reaktionseinheiten (engl. Hydrologic Response Units (HRU)) bestimmt (FAO UNESCO 1977; Zanaga et al.). Hierbei wurden folgende Schwellenwerte für die Einteilung der HRUs ausgewählt: für Landnutzung 7 %, für Boden 10 % und für Hangneigung 50 %. Aufgrund der geringen Menge an Messdaten in Bezug auf die klimatischen Daten (Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Temperatur, relative Feuchtigkeit, Solarstrahlung) wurde für die Parameter Windgeschwindigkeit, Temperatur, relative Feuchte und Solarstrahlung auf die CFSR Global Weather Data for SWAT 1979-2014 zurückgegriffen. Bei den CFSR-Daten handelt es sich um ein Reanalyseprodukt der dritten Generation (National Center for Atmospheric Research). Die Niederschlagsdaten beruhen auf Niederschlagsmessungen von der Messtation Pong Tamale (Abbildung 22). Für diese Messtation liegen verlässliche Daten für den Zeitraum 2001 bis 2009 vor. Jahr 2001 bis 2002 werden als Aufwärmphase genutzt. Daher beläuft sich der Modellzeitraum für das Ist-Modell auf die Jahre 2003 bis 2009.

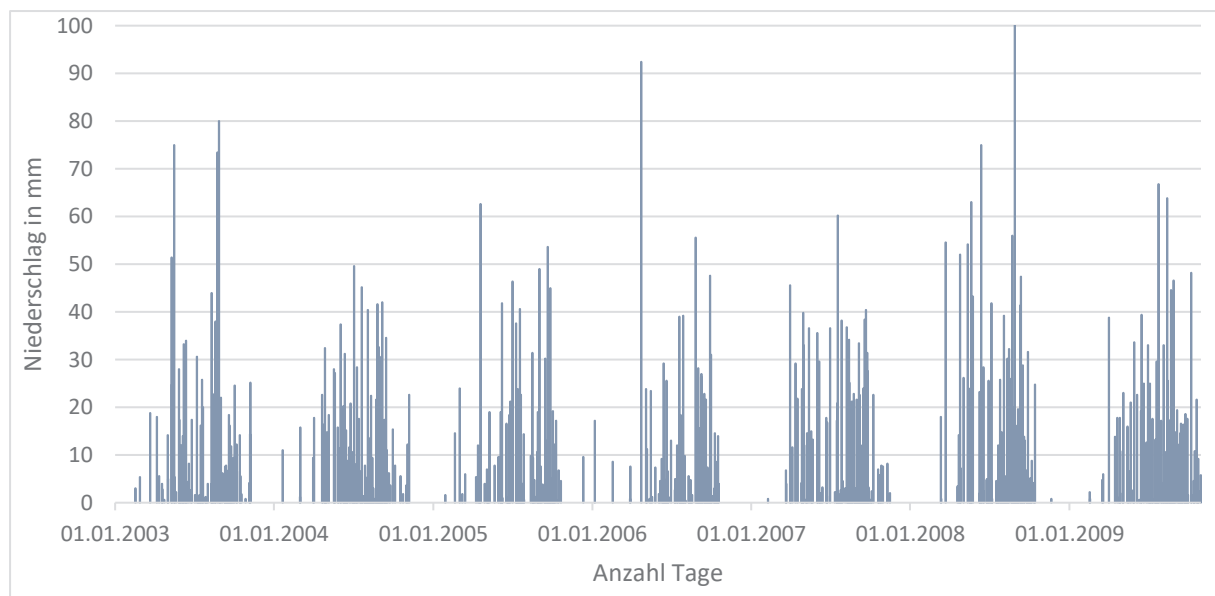


Abbildung 22: Niederschlagsaufzeichnungen [mm] von 2003 bis 2009 der Niederschlagsstation Pong Tamale.

Im Modell wurde die Curve-Number(CN)-Methode zur Bestimmung des Abflussbeiwertes herangezogen. Hierfür wurde die SCN-Einteilung der Landnutzungstypen nach United States Soil Conservation Service (1992) vorgenommen. Für die Bestimmung der Rauigkeitsbeiwerte (Manning's n) der Oberflächen wurde Choi und Ball (2002) herangezogen. Zur Bestimmung der Evapotranspiration im Modell wurde die Methode nach Penman/Monteith genutzt. Tabelle 5 zeigt die im Modell hinterlegten Kulturpflanzen mit ihrem Flächenanteil. Diese sind abgeleitet aus dem Workshop im November 2022 mit Kleinbauern aus Nabogo und dem Berichten des Statistical Service Ghana. Die übrige landwirtschaftliche Fläche im Modell wurde wie in Tabelle 6 dargestellt charakterisiert.

Tabelle 5: Kulturpflanzen im Wasserhaushaltsmodell

Gemeiner Name	SWAT Code	Taxonomischer Name	Pflanzentyp	Anbaufläche [ha]	%-Fläche
Mais	CORN	Zea mays L.	Einjährig, warm	29.980	10,5
Reis	RICE	Oryza sativa L.	Einjährig, warm	17.635	6,2
(Perl-)Hirse	PMIL	Pennisetum glaucum L.	Einjährig, warm	14.108	4,9
Sojabohne	SOYB	Glycine max L., Merr.	Einjährige, warme Hülsenfrucht	14.108	4,9
Augenbohne	CWPS	Vigna sinensis	Einjährige, warme Hülsenfrucht	15.871	5,6
Erdnüsse	PNUT	Arachis hypogaea L.	Einjährige, warme Hülsenfrucht	14.108	4,9

Tabelle 6: Landwirtschaftlich genutzte Flächen im SWAT-Modell

Name	SWAT Code	Grundlage der Pflanzenwachstumswerte	Pflanzentyp	Anbaufläche [ha]	%-Fläche
Weitere landwirtschaftlich genutzte Flächen	AGRL	Sorghum-Hirse	Einjährig, warm	70.542	24,7

Zur Plausibilisierung des Modells wurde geprüft, ob der Wasserhaushalt mit den eingegebenen Parametern schlüssig ist. Es wurden die Wasserbilanzen des Gebietes über den Modellierungszeitraum dargestellt und auf Plausibilität geprüft. Zusätzlich wurde eine durchschnittliche Wasserbilanz für das System errechnet, das mit einem ähnlichen System verglichen wurde.

Ergebnisse und Schlüsse aus dem IST-Modell

Die durchschnittliche Gesamtwasserbilanz für das Nabogo-Einzugsgebiet von 2003 bis 2009 ist Tabelle 7 zu entnehmen. Die Bilanz spiegelt über den Gesamtmodellierungszeitraum die charakteristischen Trocken- und Regenzeiten (Mai bis Oktober) wider (Abbildung 23). Dabei lässt sich feststellen, dass die Jahre 2005 und 2006 die trockensten Jahre des Betrachtungszeitraums sind. Das feuchteste Jahr hingegen war 2008. In diesem Jahr sind durchschnittlich 40 % mehr Niederschlag gefallen als im trockensten Jahr 2006. Außerdem hat es in 2008 knapp 30 % mehr geregnet als in 2004. 2004 entspricht dem Median. Der Verdunstungsanteil liegt im Modellierungszeitraum pro Jahr zwischen 99 % (2004) und 84 % (2008). Abflusswirksam werden zwischen 8 % (2008) und 1 % (2004) des Gesamtniederschlags.

Tabelle 7: Wasserbilanz Nabogo EZG IST-Zustand

Niederschlag [mm]	Abfluss [mm]	Perkolation [mm]	Evatranspiration [mm]	Seitlicher Zufluss zum Gewässer [mm]
1060	39	38	892	0

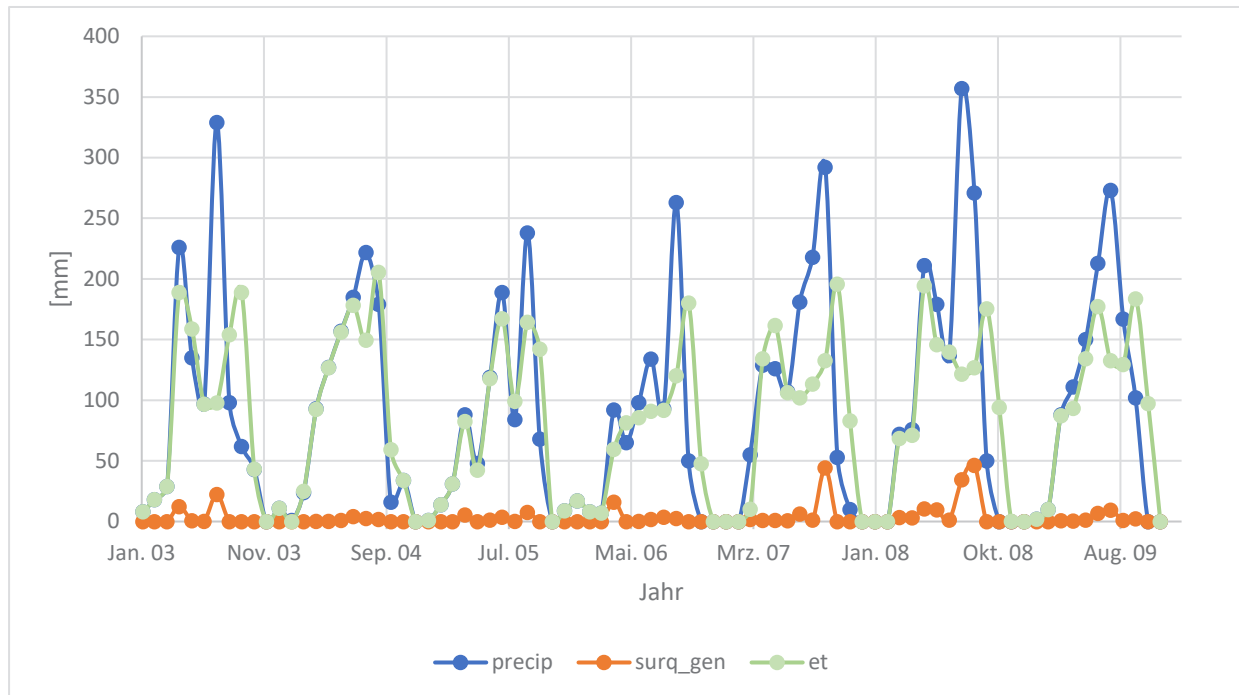


Abbildung 23: Monatliche Zeitreihe von Niederschlag, Abfluss und Evapotranspiration im Nabogo-EZG

Die Erntefläche im Ist-Zustand liegt bei 176.354 ha. Davon fallen über den Modellzeitraum (2003 bis 2009) knapp 1.510.664 t Ernteertrag in Summe an. Das entspricht im Durchschnitt ca. 1 t/ha a Ertrag. Für Mais sind das im Durchschnitt knapp 4 t/ha, für Reis 1 t/ha und für Sojabohnen ebenfalls ca. 1 t/ha. Für Augenbohnen, Perlhirse und weitere agrarwirtschaftlich genutzte Flächen beträgt der durchschnittliche Ertrag 0,1 t/ha; für Erdnüsse liegt er bei 0,3 t/ha (Tabelle 8). Im Anhang sind die Ernteerträge pro Jahr in Tabelle 41 aufgeführt.

Tabelle 8: Durchschnittlicher Ernteertrag des Nabogo EZG (IST-Zustand)

Kulturpflanze	Erntefläche (ha)	Ertrag (t/a)	Ertrag (t/ha a)
Mais	29.980	149.923	3,89
Reis	17.635	23.183	1,02
Sojabohne	14.108	22.279	1,23
w. agrawirt. Fläche	70.542	11.548	0,13
Augenbohne	15.872	2.389	0,12
Erdnuss	14.108	4.785	0,26

Kulturpflanze	Erntefläche (ha)	Ertrag (t/a)	Ertrag (t/ha a)
(Perl-)Hirse	14.108	1.702	0,09

Prognoseszenarien

Landbedeckungsentwicklung bis 2032

Die durchgeführten Prognosen zur Bedeckungsänderung von 2016 bis 2032 bei einer gleichbleibenden linearen Entwicklung machen deutlich, dass im Einzugsgebiet Nabogo die landwirtschaftlichen Flächen die 2020 noch bestehenden Freiflächen verdrängen werden (Abbildung 24). Dies wird zu einer Zunahme des Wasserbedarfs in der Region führen. Zusätzlich wird die Region vulnerabler für Dürren bzw. Wasserknappheit.

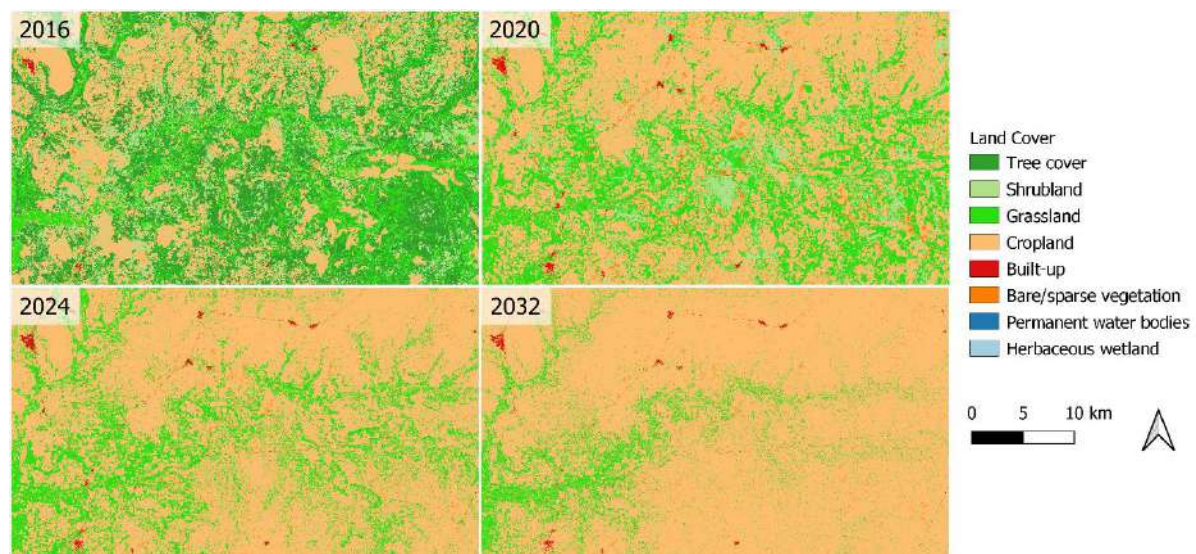


Abbildung 24: Prognose der Entwicklung Landbedeckung im Nabogo-Einzugsgebiet

Klimawandel-Szenario (S-KW)

Für das S-KW Szenario wurde eine durchschnittliche Niederschlagsabnahme von 4 % angenommen. Zusätzlich wurde von einer Temperaturzunahme von 1,7 °C bis zum Jahr 2032 ausgegangen. Grundlage dieses Szenarios war die von der KfW Entwicklungsbank und dem Climate Service Center Germany (GERICS) Alle anderen Modellparameter, wie z.B. Anbausorten, blieben unverändert.

Die durchschnittliche Jahreswasserbilanz des Nabogo-EZG für die sieben Prognosejahre ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Durchschnittliche Jahreswasserbilanz des Nabogo EZG für das S-KW Szenario

Niederschlag [mm]	Abfluss [mm]	Perkolation [mm]	Evatranspiration [mm]	Seitlicher Zufluss zum Gewässer [mm]
777	26	12	740	0

Die Prognosebilanz spiegelt über den Gesamtmodellierungszeitraum die charakteristischen Trocken- und Regenzeiten (Mai bis Oktober) wider (Abbildung 23). Dabei lässt sich feststellen, dass die Prognosejahre PJ1 und PJ2 die trockensten Jahre des Betrachtungszeitraums sind. Das feuchteste Jahr hingegen war PJ4. In diesem Jahr sind durchschnittlich 40 % mehr Niederschlag gefallen als im trockensten Prognosejahr PJ2. Allerdings hat es in PJ4 nur knapp 2 % mehr geregnet als in PJ5. Dieses ist das Prognosejahr mit dem zweitmeisten Niederschlag. PJ3 entspricht dem Median. Der Verdunstungsanteil liegt im Modellierungszeitraum pro Jahr zwischen 99 % (PJ1/PJ2) und 93 % (PJ4).

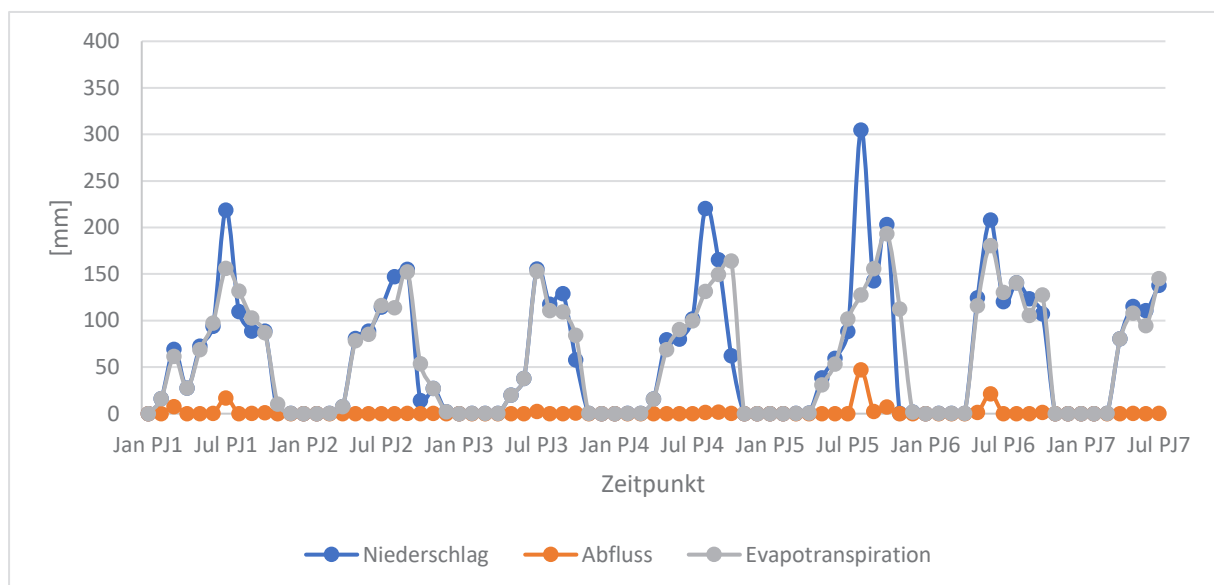


Abbildung 25: Monatliche Prognose-Zeitreihe von Niederschlag, Abfluss und Evapotranspiration im Nabogo-EZG

Die Erntefläche des S-KW beträgt durchschnittlich 176.351 ha. Es fallen über den Modellzeitraum (PJ1 – PJ6) insgesamt 127.659 Tonnen Ernteertrag an, also 0,85 t/ha a. Für Mais sind es etwa 3,7 t/ha, für Reis 0,8 t/ha; für Sojabohnen ca. 1,1 t/ha. Bei Augenbohnen und Perlhirse liegt dieser Wert ca. 0,1 t/ha. Für Erdnüsse liegt er bei 0,2 t/ha (Tabelle 10). Im Anhang sind die Ernteerträge pro Jahr in Tabelle 41 aufgeführt.

Tabelle 10: Durchschnittlicher Ernteertrag des Nabogo-EZG im S-KW

Kulturpflanze	Erntefläche (ha)	Ertrag (t/a)	Ertrag (t/ha a)
Mais	29.980	110.685	3,69
Reis	17.635	14.356	0,81
Sojabohne	14.108	15.922	1,13
Weitere agrawirt. Fläche	70.541	4.379	0,06
Augenbohne	15.871	802	0,05
Erdnuss	14.108	2.198	0,16
(Perl-)Hirse	14.108	590	0,04

Fazit

Die Temperaturerhöhung von 1,7 °C sowie der Niederschlagsrückgang um 4 % wirken sich deutlich auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet aus. Dies hat Einfluss auf den Ertrag der angebauten Kulturpflanzen in der landwirtschaftlich geprägten Region. So ist ein Ertragsrückgang fast aller Anbaupflanzen zu verzeichnen (Tabelle 11 und Abbildung 26). Am stärksten betroffen sind Augenbohne und Perlhirse. Bei Perlhirse kommt es zu einem Ertragsrückgang von 56 % und bei Augenbohne von 58 %. Insgesamt kommt es zu einem durchschnittlichen Rückgang des Ernteertrages von 12 % für das gesamte Gebiet.

Tabelle 11: Gegenüberstellung Ernteertrag IST-Zustand und S-KW

Kulturpflanze	Ertrag (t/ a)		Ertrag (t/ha a)		Änderung [%]
	2003-2009	PJ1-PJ6	2003-2009	PJ1-PJ6	
Mais	149.923	110.685	3,89	3,69	-5
Reis	23.183	14.356	1,02	0,81	-21
Sojabohne	22.279	15.922	1,23	1,13	-8
Augenbohne	2.389	802	0,12	0,05	-58
Perlhirse	1.702	590	0,09	0,04	-56
Erdnuss	4.785	2.198	0,26	0,16	-38
w. landwirt- Fläche	11.548	4.379	0,13	0,06	-54
Gesamt	215.809	148.936	6.74	5.94	-12

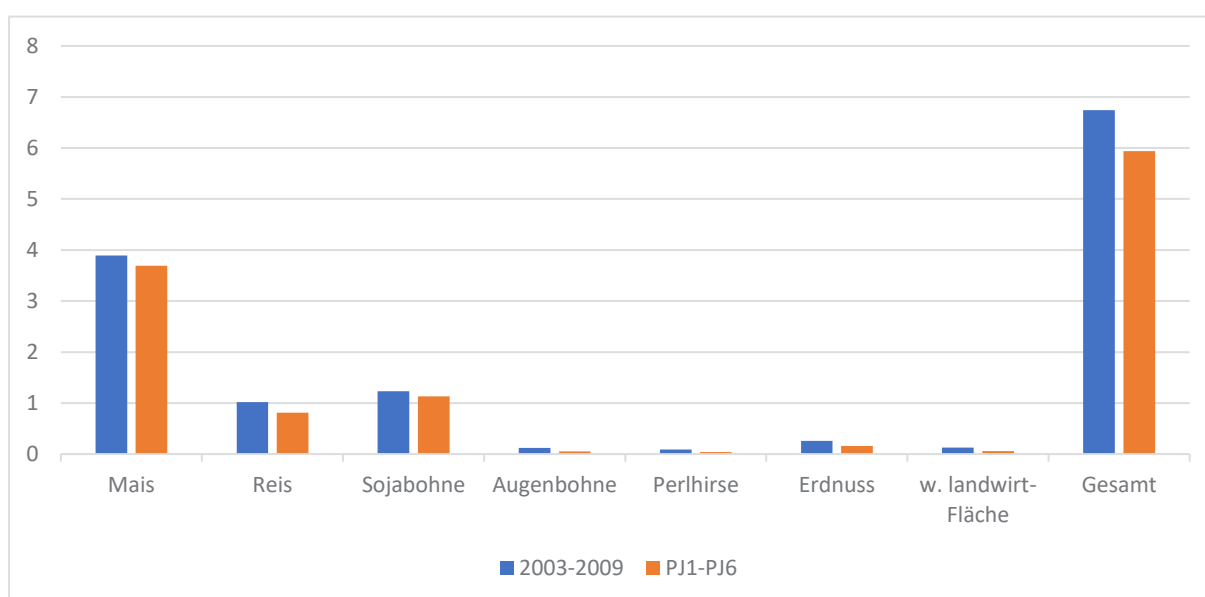


Abbildung 26: Vergleich des durchschnittlichen Ertrags pro Hektar des Ist-Zustandes und des S-KW

Wird die Entwicklung des Ertrags der unterschiedlichen Kulturpflanzen über den Betrachtungszeitraum verglichen (2003-2009 und PJ1-PJ6), so wird die oben beschriebene Tendenz noch deutlicher. Zu berücksichtigen ist, dass beide Modellszenarien ohne Bewässerung ausgeführt wurden, da Stakeholderworkshops in der Region ergeben haben, dass nicht großflächig bewässert wird. Sollte dieses Prinzip beibehalten werden, so ist in Anbetracht des Klimawandels mit einem nicht zu vernachlässigenden Ernteverlust zu rechnen. Zusätzlich ist darauf hinzuweisen, dass eine flächendeckende, wenn auch wassersparende Bewässerung, die sich entwickelnde Wasserknappheit verschärfen wird. Konzepte zur Erhöhung der Resilienz des Nabogo-EZG gegenüber dem Klimawandel werden in Kapitel 2.5.5 erläutert.

2.5.4 AP 1.4 Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in urbanen Regionen

Es wurde ein sechsstufiges Konzept zur Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung im Untersuchungsgebiet Sakumono, Accra, gemeinsam mit den ghanaischen Partnern erarbeitet. Zur Konzepterstellung werden folgende Bearbeitungsschritte durchgeführt:

1. Identifizierung von Bedürfnissen und Zielen

Es ist essentiell, die Bedürfnisse und Ziele der beteiligten Parteien zu identifizieren. Relevante Stakeholder und Interessenvertreter können im urbanen Raum die Stadtverwaltung, Wasserversorgungsunternehmen, Anwohner und andere Interessengruppen sein. Es gilt dabei zu identifizieren, welche Herausforderungen es bei der Wasserbewirtschaftung in urbanen Gebieten gibt und welche Ziele das Konzept erreichen sollte. Durch diesen Schritt wird sichergestellt, dass das Konzept den Anforderungen der involvierten Parteien gerecht wird. So kann mögliches Konfliktpotential minimiert werden.

2. Analyse des bestehenden Systems

Eine Analyse des bestehenden Wassermanagements hilft dabei, die Stärken und Schwächen des aktuellen Systems zu identifizieren. Dazu gehören aktuell im Untersuchungsgebiet eingesetzte Wasserbehandlungs- und Ableitungsmethoden, und die Probleme, die dabei auftreten.

3. Gefahrenermittlung, Risikoabschätzung und Festlegung von Bewirtschaftungszielen

Mit Hilfe wasserwirtschaftlicher Modellierung soll analysiert werden, was bei bestimmten Niederschlagsszenarien im Einzugsgebiet passiert. Auf der Grundlage von Schritt 2 und der Gefahrenermittlung wird eine Risikoabschätzung mit zugehörigem

Schadenspotential ermittelt. Anschließend werden in Rücksprache mit der Kommune Bewirtschaftungsziele und besonders schützenswerte Infrastruktur identifiziert.

4. Entwicklung von Maßnahmenplänen

Zur Identifizierung neuer Maßnahmen, Standorte oder Anpassung bereits bestehender Standorte im Untersuchungsgebiet ist es notwendig, Charakteristiken, die dieser Standort aufweisen soll, zu formulieren und anhand dieser die Standorte auszuwählen. Für Bereiche und Objekte, bei welchen Risiken erkennbar sind und die das definierte Bewirtschaftungsziele verfehlen, sind Maßnahmen erforderlich, um das jeweilige Risiko entsprechend zu reduzieren

- Einbeziehung von Stakeholdern in die Konzeptentwicklung
- Identifizierung von Standorten/Aufstellung der Maßnahmen

5. Umsetzungsplan

Erarbeitung eines konkreten Umsetzungsplans für das entwickelte Konzept. Dieser sollte Arbeitsschritte und einen Zeitplan für die Implementierung enthalten.

6. Evaluierung

Nach der Implementierung des Konzepts sollte eine Evaluierung stattfinden, um die Wirksamkeit des Konzepts zu bewerten und zu ermitteln, ob weitere Anpassungen erforderlich sind.

Die im RAIN Projekt entwickelten Konzepte umfassen die Schritte 1 bis 4. Eine Implementierung war im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen.

Es wurden Einzelmaßnahmen gemeinsam mit den Interessenvertretern (NADMO, HSD, Adenta Municipality) und den Partnern (IESS UG und Envaserv Consultant) für den mehrstufigen Ansatz evaluiert und bewertet (Tabelle 12). Es werden dabei Maßnahmen für folgende Bereiche unterschieden: Informationsvorsorge, Verhaltensvorsorge, Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz, Hochwasser/Starkregen, Flächenvorsorge/-management, Wassermanagement sowie städtebauliche Vorsorge. Zusätzlich wurden Aspekte zum räumlichen Wirkungsgrad, Grundlagen für die Umsetzung, Wirkungszeitraum, mögliche Synergien und Konflikte betrachtet. Die vollständigen Maßnahmensteckbriefe sind im Anhang unter 8.2 einzusehen.

Des Weiteren wurde eine modellbasierte Evaluierung einzelner Maßnahmen durchgeführt, um die Effekte der Maßnahmen in einem größeren Zusammenhang bewerten zu können. Eine Erhöhung der Kapazität der Rückhalteräume bewirkt eine Verbesserung der Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit einer möglichen Vertiefung der Speicher. Die Nutzung von Tröpfchenbewässerung hat in etwa dieselbe Auswirkung wie eine Eintiefung der Reservoirs um 2 Meter. Eine Eintiefung von 5 m ermöglicht bspw. eine durchgehende Abdeckung des Bewässerungsbedarfs von etwa über 75%.

Tabelle 12: Evaluierte Einzelmaßnahmen für das Sakumono-Einzugsgebiet

Klimawirkung	Kategorie	Maßnahme
Hochwasser/ /Starkregen	Informations- /Verhaltens- Risikovorsorge und	Hochwassergefahren- und -risikokarten
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz	Abflusshindernisse an Engstellen vermeiden und beseitigen
Hochwasser/ Starkregen	Technische Vorsorge/Schutz	(Hochwasser-)Frühwarnsystem
Hochwasser/ Starkregen	Informations- /Verhaltens- Risikovorsorge und	(Hochwasser-) Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Hochwasser/ Starkregen	Flächenvorsorge/- management, Städtebauliche Vorsorge	Berücksichtigung von Hochwasserrisiken in der Stadtplanung
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge Technische Vorsorge/Schutz	Errichtung und Unterhaltung Regenrückhaltebecken
Hochwasser/ Starkregen	Informations- /Verhaltens- Risikovorsorge und	Sensibilisierung der Bevölkerung zur Eigenvorsorge
Hochwasser/ Dürre	Wassermanagement	Erhöhung der Speicherkapazität von Rückhalteräumen
Dürre	Wassermanagement	Aufbereitung verunreinigter Rohwässer zu Bewässerungswasser
Dürre	Wassermanagement	Nutzung von Tröpfchenbewässerung in der Landwirtschaft
Dürre	Wassermanagement	Nutzung regionaler Grundwasserressourcen als Trinkwasser

2.5.5 AP 1.5 Konzept zur intelligenten Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung in ruralen Regionen

Es wurde ein sechsstufiges Konzept zur Bewirtschaftung von vernetzten Regenrückhalteräumen zur Hochwasserprävention und Rohwasserbereitstellung im Untersuchungsgebiet Nabogo, nahe Tamale gemeinsam mit den ghanaischen Partnern, erarbeitet. Im Hauptfokus dabei standen die Themen: Landwirtschaft, Hochwasser, Dürre und Wasserversorgung. Zur Konzepterstellung wurden im Vorfeld folgende Bearbeitungsschritte durchgeführt:

1. Identifizierung von Bedürfnissen und Zielen

Es ist essentiell, die Bedürfnisse und Ziele der beteiligten Parteien zu identifizieren. Relevante Stakeholder und Interessenvertreter können im urbanen Raum die Stadtregierung, Wasserversorgungsunternehmen, Anwohner und andere Interessengruppen sein. Es gilt dabei herauszufinden, welche Herausforderungen es bei der Wasserbewirtschaftung in urbanen Gebieten gibt und welche Ziele das Konzept erreichen sollte. Durch diesen Schritt wird sichergestellt, dass das Konzept den

Anforderungen der involvierten Parteien gerecht wird. So kann mögliches Konflikt- und Widerstandspotential minimiert werden

2. Analyse des bestehenden Systems

Eine gründliche Analyse des bestehenden Wassermanagements hilft dabei die Stärken und Schwächen des aktuellen Systems zu identifizieren. Dazu gehören aktuell im Untersuchungsgebiet eingesetzte Wasserbehandlungs- und Ableitungsmethoden aber auch die aktuellen Probleme, die dabei auftreten.

3. Gefahrenermittlung, Risikoabschätzung und Festlegung von Bewirtschaftungszielen

Mit Hilfe wasserwirtschaftlicher Modellierung soll analysiert werden, was bei bestimmten Niederschlagsszenarien im Einzugsgebiet passiert. Auf der Grundlage von Schritt 2 und der Gefahrenermittlung, wird eine Risikoabschätzung mit zugehörigem Schadenspotential ermittelt. Anschließend werden darauf in Rücksprache mit der Kommune Bewirtschaftungsziele und besonders schützenswerte Infrastruktur identifiziert.

4. Entwicklung von Maßnahmenplänen

Zur Identifizierung neuer Standorte oder Anpassung bereits bestehender Standorte im Untersuchungsgebiet, ist es notwendig, Charakteristik, die dieser Standort aufweisen soll, zu formulieren und anhand dieser die Standorte auszuwählen. Für Bereiche und Objekte, bei welchen Risiken erkennbar sind und die das definierte Bewirtschaftungsziele verfehlen, sind Maßnahmen erforderlich, um das jeweilige Risiko entsprechend zu reduzieren

- Einbeziehung von Stakeholdern in die Konzeptentwicklung
- Identifizierung von Standorten/Aufstellung der Maßnahmen

5. Umsetzungsplan

Erarbeitung eines konkreten Umsetzungsplans für das entwickelte Konzept. Dieser sollte Arbeitsschritte und einen Zeitplan für die Implementierung enthalten.

6. Evaluierung

Nach der Implementierung des Konzepts sollte eine Evaluierung stattfinden, um die Wirksamkeit des Konzepts zu bewerten und zu ermitteln, ob weitere Anpassungen erforderlich sind.

Die entwickelten Konzepte umfassen die Schritte 1 bis 4. Eine Implementierung war im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen.

Es wurden Einzelmaßnahmen gemeinsam mit den Interessenvertretern wie lokalen Farmern der Gemeinden Yaplasi, Gushie, Nabogo, Nakapanzoo und Yipala, den Experten der University for Development Studies, Anwohnenden in überflutungsgefährdeten Bereichen in Tamale und dem ghanaischen Partnern IESS UG in einem mehrstufigen Ansatz überführt,

evaluiert und bewertet (Tabelle 13). Es werden dabei Maßnahmen zur Informationsvorsorge, Verhaltensvorsorge, Eigenschutz, Eigenschutz-Akutmaßnahme, Bewältigungsmaßnahme, Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz, Hochwasser/Starkregen, Flächenvorsorge-/management sowie städtebauliche Vorsorge, Landwirtschaft, Dürrevorsorge, unterschieden. Zusätzlich wurden Aspekte zum räumlichen Wirkungsgrad, Grundlagen für die Umsetzung, Wirkungszeitraum, mögliche Synergien und Konflikte betrachtet.

Des Weiteren wurde eine modellbasierte Evaluierung der Maßnahmen durchgeführt, um die Effekte der Maßnahmen in einem größeren Zusammenhang bewerten zu können. Die vollständigen Maßnahmensteckbriefe sind im Anhang unter Tabelle 49 bis Tabelle 70 einzusehen.

Tabelle 13: Evaluierte Einzelmaßnahmen für das Nabogo-Einzugsgebiet

Klimawirkung	Kategorie	Maßnahme
Dürre/ Trockenperiode	Wasserwirtschaft	Stautufen im Fluss
Dürre/ Trockenperiode	Landwirtschaft	Bewässerungssysteme
Dürre/ Trockenperiode	Dürre Landwirtschaft	Förderung wassersparender Anbaumethoden
Dürre/ Trockenperiode	Informations-, Verhaltens- und Risikovorsorge	Sensibilisierung der Bevölkerung und lokaler Bauern für wassersparendes Verhalten
Dürre/ Trockenperiode	Wassereinsparung	Bau von Wasserauffanganlagen und -reservoirs
Dürre/ Trockenperiode	Dürre Wassereinsparung	Dürrevorbereitungspläne
Dürre/ Trockenperiode	Technische Vorsorge/Schutz	(Dürre-)Frühwarnsystem
Dürre/ Trockenperiode	Informations-, Verhaltens- und Risikovorsorge	(Dürre-) Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Dürre/ Trockenperiode	Eigenschutz Bauvorsorge	Bauliche Eigenschutzmaßnahmen, wie bspw. Regenwassersammlung und -Speicherung für Trockenperioden
Dürre/ Trockenperiode	Akutmaßnahme	Verteilung von Hilfsgütern
Dürre/ Trockenperiode	Akutmaßnahme	Eigentum aus der Gefahrenzone bringen
Dürre/ Trockenperiode	Flächenvorsorge/- management, Städtebauliche Vorsorge	Berücksichtigung von Dürrierisiken in der Stadtplanung
Dürre/ Trockenperiode	Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge	Sensibilisierung der Bevölkerung zur Eigenvorsorge
Dürre/ Trockenperiode	Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge	(Hochwasser-)Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Hochwasser/ Starkregen	Technische Vorsorge/Schutz	(Hochwasser-)Frühwarnsystem

Klimawirkung	Kategorie	Maßnahme
Hochwasser/ Starkregen	Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge	Hochwassergefahren- und -risikokarten
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz	Entwässerungs- und Abwassersystem
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge	Sicherstellung eines funktionsfähigen zentralen Entsorgungssystem
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung Technische Vorsorge/Schutz	Einrichtung von Pufferzonen entlang des Flusses
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung Technische Vorsorge/Schutz	Bau von Stützmauern
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung	Förderung von Bodenschutzmaßnahmen
Hochwasser/ Starkregen	Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung	Hochwasserfonds

2.5.6 AP 1.6 Detaillierte Untersuchungen zur Ermittlung der Anforderungen der unterschiedlichen Nutzergruppen und Anwendungen in einem peri-urbanen Pilotgebiet im Distrikt Adenta, Accra (Bedarfsanalyse)

Analyse möglicher Anbaukulturen

Ziel bei der Auswahl der Anbaukulturen, ist die Steigerung der flächenbezogenen Erträge und der durchgehende Anbau von Nutzpflanzen über das gesamte Jahr, um die Versorgung mit Nahrungsmitteln sicher zu stellen und Ernteverluste in Trockenzeiten zu verhindern. Der Fokus liegt auf Kulturen mit geringem Wasserbedarf, hohem und dichtem Feinwurzelanteil, die in Verbindung mit Bewässerung für die Farmer wirtschaftlich sind. Darüber hinaus sind die Bedingungen der Regen- und Trockenzeit zu berücksichtigen.

Im Kompositionsanbau werden zwei bis drei Pflanzengattungen gemeinsam angebaut (Intercropping, Tabelle 14). Diese zielführende Kombination verschiedener Nutzpflanzen auf einer Anbaufläche mündet in der effizienten Landnutzung, der Wasserressourcen und der Nährstoffe. Die Pflanzen profitieren durch gegenseitige Verschattung, Senkung der Blattoberflächentemperatur und Transpiration. Bei Bewässerung mit behandeltem nährstoffreichem Wasser ergibt sich durch Konkurrenz ein verstärktes Wachstum der Pflanzen und Pflanzenwurzeln. Der Bodenraum wird durch Pflanzenwurzel der verschiedenen Gattungen unterschiedlich tief durchwurzelt und optimal erschlossen. „Mais, Sonnenblumen, Bananen, Sorghum, Cassava, Süßkartoffeln lassen sich in Komposition mit [...rankenden...] Bohnen anbauen, wobei die Mais-Bohnen Komposition am häufigsten vorkommt“ (Wortmann 1998). „Als zweite Kultur haben Kapuzinerkresse, Kürbis und Hausbohnen keine Auswirkungen auf den Maisertrag und die Pflanzenhöhe“ (Schulz et al. 2020). In der Trockenzeit ist

beispielsweise der Hirse-Anbau oder in Regenzeiten eine Mischkultur aus Mais und hitzetoleranten rankenden Bohnensorten geeignet, da diese Pflanzengattungen an die jeweiligen Randbedingungen gut angepasst sind. Im Gegensatz zu Wurzelgemüsen und bodennahe wachsenden Kulturpflanzen ist der Eintrag von Pathogenen über das Gießwasser auf Feldfrüchte und nutzbare Pflanzenteile von hochwachsenden Kulturen deutlich geringer. Im Sinne des Gesundheitsschutzes der Bauern und Konsumenten sind sie zu bevorzugen.

Tabelle 14: Geeigneter Kompositionsanbau von üblichen Nutzpflanzen in Ghana (Intercropping)

	selektiert rankende, hitzetolerante Bohnen	Kapuzinerkresse, Kürbis, Hausbohne	Monokultur	Jahreszeit
Hirse allg.			+	Trockenzeit
Sorghum	++	+	++	Regenzeit /Trockenzeit
Mais	++	+	+	Regenzeit, bedingt Trockenzeit
Sonnenblumen	++	+	++	Regenzeit
Cassava	+	+		Regenzeit
Kochbanane	+	+		Regenzeit
Süßkartoffeln		+ (-)		Regenzeit
Lauchzwiebeln			+ (-)	Regenzeit
Salat			+ (-)	Regenzeit

Als Anbaukultur in Ghana wurde Kopf-Salat ausgewählt, der sich nach maximal 75 Tagen erntereif entwickelt und damit zeitlich im Rahmen der Pilotphase von Mai bis August 2022 lag. In Accra werden 40 % des Salates aus anderen Ortschaften importiert. Insofern trägt der gesteigerte Salatanbau im Ort zur Vermeidung von Transporten und damit dem Umweltschutz bei.

Identifizierung und Bedarfsanalyse unterschiedlicher Wassernutzergruppen

Zur zielführenden Verknüpfung der Wasserhaushalts- und -managementmodellierung mit den Aufbereitungsmethoden ist es von essentieller Bedeutung, die unterschiedlichen Nutzergruppen und ihre Ansprüche an das System in einem Wassereinzugsgebiet zu kennen. Typische Wassernutzergruppen können Haushalte, Landwirtschaft und Industrie sein. Sie alle haben unterschiedliche Mengen- und Qualitätsansprüche an das zu nutzende Wasser. Vorhandene Nutzergruppen und ihrer Bedürfnisse tragen maßgeblich zur Dimensionierung der Wasseraufbereitungsanlage bei. Zusätzlich haben sie Einfluss auf den Anspruch an den Wassergütegrad, den die Aufbereitungsanlage erreichen muss.

Das Nabogo-Einzugsgebiet ist rural geprägt. Es liegt in der Region Northern, weshalb diese die Grundlage für den ruralen Wasserbedarf darstellt. Das Einzugsgebiet Sakumono hingegen

stellt mit der dort gelegenen Stadt Accra den urbanen Raum da, weshalb im Folgenden die Region Greater Accra als Referenz für den urbanen Raum dargestellt wird. Im Sakumono-Einzugsgebiet liegt der peri-urbane Verwaltungsbezirk Adenta.

Die Wasserkonflikte zwischen den Nutzergruppen Haushalt und Landwirtschaft spielen eine große Rolle, darum wird in dieser Bedarfsanalyse in die Benutzergruppen „Haushalte“ und „Landwirtschaft“ untergliedert.

Haushalte

Der häusliche Wasserbedarf setzt sich zusammen aus dem Bedarf an Trinkwasser und Wasser, für andere häusliche Zwecke wie Waschen oder Kochen. Der tägliche Wasserbedarf pro Person ist dabei von der jeweiligen Siedlungsgröße abhängig und steigt mit zunehmender Urbanisierung an (Tabelle 15).

Tabelle 15: Wasserbedarf [Liter pro Person pro Tag]. Quelle: Water Resources Commission (2009)

Siedlungsgröße	Kategorie	2008	2015	2020
< 5.000	rural	35	35	35
5.000 – 15.000	urban	55	65	75
15.000 – 50.000	urban	85	85	90
> 50.000	urban	105	110	115

Bei den Werten handelt es sich um Planungsgrößen, die den Wasserbedarf für institutionelle und industrielle Zwecke inkludieren. (Water Resources Commission 2009)

In den Distrikten im Sakumono-Becken sind Siedlungen mit mehr als 50.000 Einwohnern vorzufinden (Ghana Statistical Service 2013, 2010a, 2021a), die somit im Jahr 2020 einen Bedarf von knapp 115 Liter/Person pro Tag aufweisen. Der städtische Wasserversorger GWLC gibt für 2010 einen Wert von knapp 56 Liter/Person und Tag an.

Die Gesamtsiedlungsfläche von Nabogo macht mit einer Fläche von knapp 18 km² etwa 1 % der Gesamtfläche des Nabogo-Einzugsgebietes aus. Die Siedlungen sind ländlich geprägt. Das gesamte Gebiet weist eine Bevölkerungsdichte von ca. 73 EW/km² auf. Keine der vier untersuchten Siedlungen weist mehr Einwohner als 5.000 Einwohner auf und somit kann von einem Wasserbedarf pro Person von 35 l/d ausgegangen werden (Water Resources Commission 2009). Für alle Siedlungsflächen im gesamten Einzugsgebiet kann daher von einem täglichen Wasserverbrauch bzw. -bedarf von knapp 7.174.000 l/d ausgegangen werden. Der genaue Wasserverbrauch/-bedarf pro Fokusgemeinde inkl. Einwohnerzahl und -dichte in Nabogo (Nabogo, Nakpanzoo, Gushi, Yapalsi) ist Tabelle 16 zu entnehmen (WorldPop und Bondarenko 2020; Bondarenko et al. 2020).

Tabelle 16: Trinkwasserverbrauch/-bedarf in den Siedlungen im Nabogo-Einzugsgebiet.

Gemeinde	Einwohner	Einwohnerdichte [EW/km ²]	Wasserbedarf/-verbrauch [l/d]
Nabogo	1.608	553	56.280
Nakpanzoo	1.363	248	47.705
Gushi	2.282	270	79.870
Yapalsi	834	139	29.190
Gesamt	6.087	303	213.045
Nabogo EZG	204.987	73	7.174.545

Bezugsquellen Adenta

Leitungswasser wird in der Greater Accra Region von 14,8 % als Trinkwasserressource und zu 82 % als Wasserressource für den häuslichen Bedarf genutzt. Die meisten Haushalte nutzen jedoch einen Anschluss außerhalb ihrer Wohnung bzw. bei ihren Nachbarn. Es wird berichtet, dass selbst in Gebieten mit Zugang zum Leitungsnetz die Versorgung unberechenbar und unzuverlässig ist. Laut Amankwaa et al. (2014) ist GWLC in der Lage nur etwa 50 % der Bevölkerung in der Greater Accra Region mit Wasser zu versorgen. Aus Daten der Volks- und Wohnungszählung 2010 geht hervor, dass die nördlichen Bezirke des Beckens einen wesentlich geringeren Anschluss an eine leitungsgebundene Wasserversorgung haben als die südlichen Bezirke der Greater Accra Region. In Adenta im Nordwesten nutzen 26,9 % der Haushalte leitungsgebundenes Wasser, während es in Tema im Süden 90,8 % sind (Ghana Statistical Service 2010a). Die zweitwichtigste Quelle für Trinkwasser ist abgepacktes Wasser in Beuteln sog. Sachet-Water. In der Greater Accra Region verwenden 27,9 % der Haushalte hauptsächlich dieses Wasser, wohingegen es im ruralen Norden (Region Northern) nur knapp 0,6 % sind (Ghana Statistical Service 2014). Durch die geringere Versorgung durch Leitungswasser ist die Verwendung von Sachet-Water in den nördlichen Bezirken mit 53,6 % in Adenta höher im Vergleich zu 6,5 % in Tema (Ghana Statistical Service 2010a, 2010e) Im Gegensatz zu Sachet-Water ist der Verbrauch von Flaschenwasser sehr gering und liegt in der gesamten Greater Accra Region bei 1,1 %. Sowohl das Sachet-Water als auch das in Flaschen abgefüllte Wasser werden als Trinkwasser und nicht für Haushaltszwecke verwendet (Ghana Statistical Service 2014).

Eine weitere, wenn auch eher kleinere Wasserressource, welche hauptsächlich für den häuslichen Gebrauch und weniger als Trinkwasser genutzt wird, ist Wasser aus Tankwagen oder von Händlern. In der Greater Accra Region wird dieses zu fast 3 % als Haupttrinkwasserquelle und zu kann 6 % als Hauptwasserquelle für den sonstigen Gebrauch angegeben. In der Region Greater Accra wird Grundwasser über Bohrlöcher und Brunnen nur

zu 1,0 % als Haupttrinkwasserquelle und zu 3,2 % als Hauptquelle für sonstige Zwecke verwendet (Ghana Statistical Service 2014).

Wasser aus Flüssen und stehenden Oberflächengewässern nimmt in der Urbanen Region Greater Accra bei der häuslichen Wasserversorgung, sowohl als Trink- als auch als Nutzwasser, nur einen kleinen Teil (< 1 %) ein. Aus dem District Analytical Report für Adenta geht hervor, dass die Haushalte in der Trockenzeit eher Wasser aus den Wasserreservoirs nutzen, während sie in der Regenzeit selbst Regenwasser sammeln. (Ghana Statistical Service 2010a).

Ergebnisse semistrukturierter Befragungen in Adenta

Mit Hilfe von semi-strukturierten Befragungen wurde die Wassernutzung von Haushalten in Adenta ermittelt werden. Für diese Studie wurde eine Stichprobe (168) von Anwohner:innen rund um die Wasserreservoirs in Adenta befragt. Die Umfrageergebnisse zu Haupt- und bevorzugter Wasserquelle der Anwohner:innen in Adenta ist der Bezug von Wasser aus Wassertankwagen (25 %), gefolgt von Leitungswasser (21 %) und Wasser aus Brunnen oder Bohrlöchern (18 %). Aktuell nutzen 13 % der Befragten das Wasser aus Wasserreservoirs in Adenta (Tabelle 17).

Tabelle 17: Hauptwasserbezugsquellen in Adenta.

Wasserherkunft	Anzahl	Prozent
Regenwasser	10	5,9%
Brunnen/Bohrlöcher	30	1,9%
Leitungswasser	36	21,4%
Wasserreservoir	22	13,1%
Wassertankwagen	42	25%
Keine der oben genannten	28	16,7%
Total	168	100%

Weiter ergab die Studie, dass die Anwohnenden mehrheitlich einen Wasserverbrauch von knapp 100 bis 200 Liter pro Tag (63 % der Befragten) haben. In Bezug auf das Reservoirwasser gaben 9 %, an gelegentlich darauf zurückzugreifen, 34 % nutzen das Wasser ca. einmal pro Woche und 63 % der Befragten verwenden das Wasser täglich für ihre Belange. Zur Verwendung der Reservoirwasser gaben die Befragten an, dass es bei der Rinderzucht (4 %) und bei Bauaktivitäten (4 %) genutzt wird. Außerdem wird es für häusliche Belange wie Abwasch oder Körperhygiene (10 %), Bewässerung und Anbau von Kulturpflanzen (36 %) sowie für den Fischfang und die Fischzucht (42 %) genutzt. Die Bevölkerungsanteile, die kein Reservoirwasser verwenden, äußerten hauptsächlich Bedenken wegen der sanitären Bedingungen im Umfeld der Reservoirs (34 %) und der schlechten Wasserqualität der Reservoirs (22 %). Nichtsdestotrotz besteht mit 88 % unter den Befragten die Bereitschaft, (mehr) Reservoirwasser für den häuslichen und landwirtschaftlichen Gebrauch zu nutzen, sollte dieses zuvor aufbereitet werden. Zusätzlich ergab die Untersuchung, dass rund 85 % der Befragten auch bereit wären, für das behandelte Reservoirwasser zu bezahlen.

Die Befragten wurden gebeten anzugeben, ob das Teichwasser für häusliche Zwecke wie Kochen, Baden, Trinken usw. oder für nicht-häusliche Nutzungen wie Landwirtschaft und Bewässerung, industrielle Tätigkeiten, Erholung, Hochwasserschutz usw. verwendet werden sollte. Hierbei ergab sich, dass über 75% der Befragten die Verwendung des Reservoirwassers für nicht trinkbare Zwecke vorziehen würden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bereitschaft der Nutzung von aufbereitetem Reservoirwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung innerhalb der Nutzergruppen in dem Bezirk Adenta einen Bedarf und Berechtigung für die Entwicklung einer kostengünstigen Aufbereitungs- und Bewässerungsanlage signalisiert. Kostengünstig, da die Anwohnenden angaben, nicht mehr als 50 bis 60 Pesewas zahlen zu wollen.

Landwirtschaft Adenta

Im Bezirk Adenta macht der Ackerbau 88,9 % der gesamten landwirtschaftlichen Aktivitäten der Haushalte aus und auch in den anderen Bezirken liegen die Anteile zwischen 70 % und 80 % (Ghana Statistical Service 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e). Da der Ackerbau somit im Sakumono-Becken die am häufigsten ausgeführte Form der Landwirtschaft ist, beschränkt sich die Wasserbedarfsanalyse auf diese.

Der erforderliche Wasserbedarf für den Ackerbau hängt von der Art der Kulturen, der Anbaufläche und den Klima- und Bodenbedingungen in der Region ab. Der Ghana Statistical Service differenziert in seinen Statistiken nach Kulturarten und Regionen in Ghana. Aus dem von ihm veröffentlichten „Production of Agriculture Statistics“ geht hervor, dass in der gesamten Greater Accra Region hauptsächlich Mais, Reis und Maniok angebaut werden (Abbildung 27). Ihr durchschnittlicher Wasserverbrauch im Sakumono-Einzugsgebiet liegt für Mais 349,6 mm/a, für Reis bei 537 mm/a, und für Maniok bei 422,61 mm/a (berechnet mit dem CROPWAT).

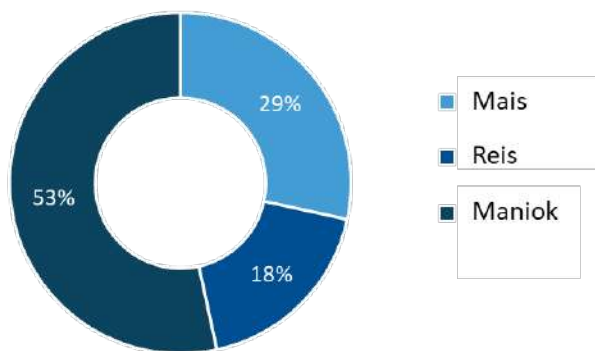


Abbildung 27: Kulturpflanzen in der Region Greater Accra nach Fläche (Ghana Statistical Service 2023)

Im MEDIUM TERM DEVELOPMENT PLAN (MTDP) für den Bezirk Adenta wird neben Schädlingen, Krankheiten und der zunehmenden Verstädterung jedoch vor allem eine zuverlässige und sichere Wasserquelle als größte Herausforderung für die Landwirtschaft genannt (Government of Ghana, Ministry of Local Government, Rural Development and Environment 2012).

Landwirtschaft Nabogo

In Nabogo machen über die Hälfte der Gesamtfläche die landwirtschaftliche Nutzfläche aus. Die dominierende landwirtschaftliche Praxis ist dabei der Ackerbau mit 59 %. Hauptanbaukulturpflanzen sind laut dem Ghana Statistical Service (2020) (GSS), zurückgeführt auf die Anbaufläche, Yamwurzel, Mais, Maniok und Erdnuss (Abbildung 28). Diese Werte beziehen sich auf das Gebiet der Northern Region im Jahr 2018. Damals beinhalteten die Daten noch Savannah Region und Upper East, die heute eigenständige Regionen sind.

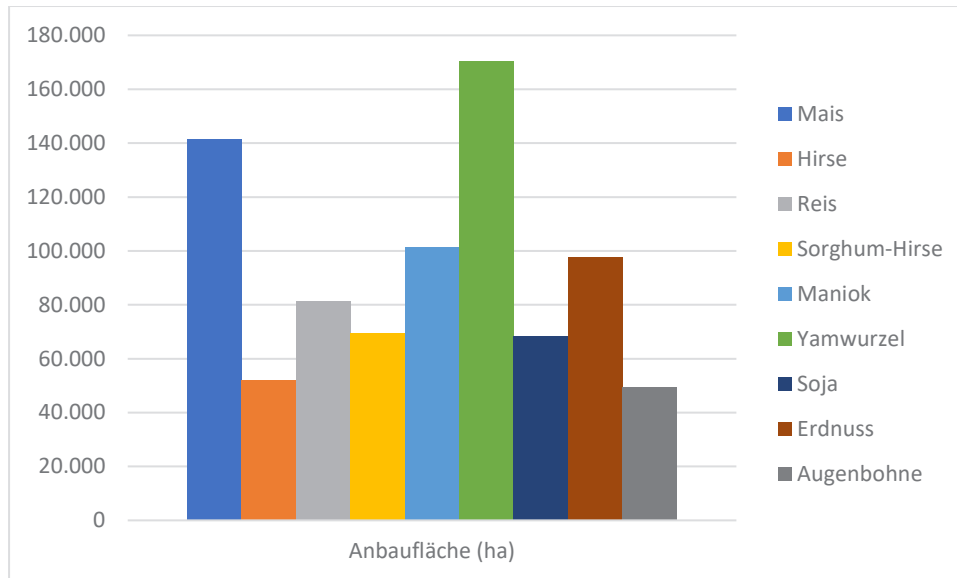


Abbildung 28: Kulturpflanzen in der Northern Region 2018 nach Ghana Statistical Service (2020)

Wird von einem ähnlichem Anbauverhalten in der Northern Region nach 2018 ausgegangen, lässt sich ein Wasserverbrauch in Liter pro Jahr für die Hauptkulturpflanzen (ohne Bewässerung) im Nabogo-Einzugsgebiet ermitteln (Abbildung 29); bei einer anteiligen Flächenverteilung von Mais 17 %, Hirse 8 %, Reis 10 %, Sorghum-Hirse 9 %, Maniok 13 %, Yamwurzel 18 %, Soja 8 %, Erdnüsse 8 % und Augenbohnen 9 %.

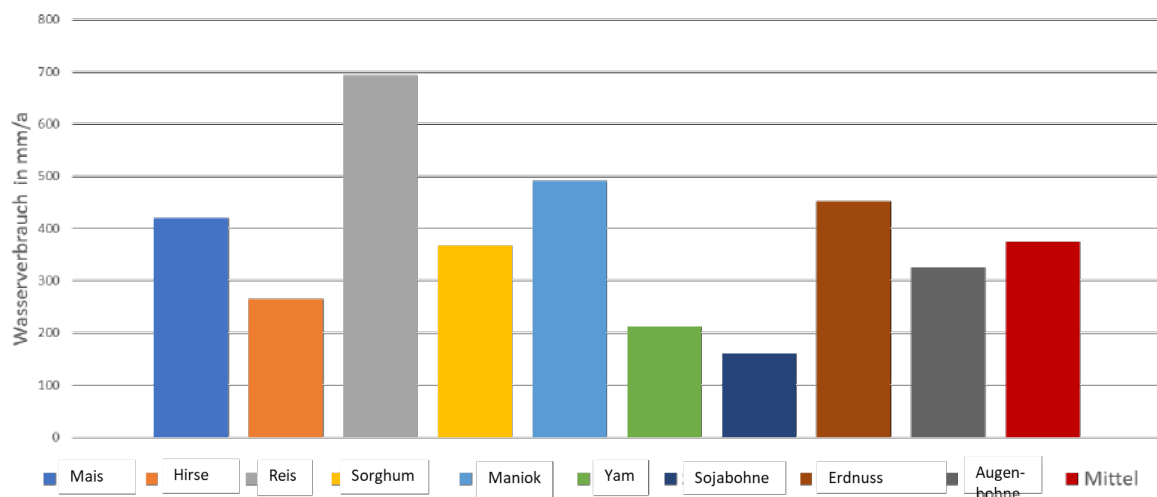


Abbildung 29: Wasserverbrauch in Liter pro Jahr für die Hauptkulturpflanzen (ohne Bewässerung) im Nabogo-Einzugsgebiet.

Über Befragungen in den Gemeinden Nabogo, Nakpanzoo, Gushi und Yapalsi konnten die Hauptanbaukulturen im Nabogo-Einzugsgebiet identifiziert werden. Die Bauern dieser Gemeinden bauen hauptsächlich Reis, Mais, Hirse und Erdnüsse sowie Sheanüsse an. Außerdem werden noch Soja, Augenbohnen, Johannisbrotbaum, lokale Trauben und Mangos angebaut (Tabelle 18).

Tabelle 18: Hauptanbaupflanzen in den Gemeinden Nabogu, Nakpanzoo, Gushi und Yapalsi.

Anbaukultur	Nabogo	Nakpanzoo	Gushi	Yapalsi
Reis	x	X	x	x
Mais	x	X	x	-
Hirse	-	X	-	-
Yamwurzel	-	-	x	-
Erdnüsse	x	X	x	-
Soja	x	-	x	-
Augenbohnen	-	-	-	-
Sheanüsse	x	X	x	x
Johannisbrotbaum	x	X	x	-
lokale Trauben	-	X	-	-
Mangos	x	-	-	-

2.6 Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojekte Nachhaltige Technologien (AP2)

2.6.1 AP 2.0 Untersuchung von Filtermaterial und Biolight unter Laborbedingungen an der RUB

In AP 2.0 wurden zwei unterschiedliche Techniken zur Elimination von pathogenen Keimen in verunreinigtem Wasser untersucht. Das Biolight ist eine entwickelte Technologie des Partners AWAS, deren Wirksamkeit in Kurzversuchen von der Ruhr-Universität-Bochum (RUB) getestet wurde. Als weiteres Verfahren wurden alternative Filtermaterialien, Biokohlen unterschiedlichen Ursprung, als Einsatz in der Langsamfiltration in Säulenexperimenten untersucht

2.6.1.1 Biolight-Versuche

Das Biolightsystem der Firma AWAS wurde im Sommer 2020, nachdem die Schließung der RUB aufgrund der Covid-Pandemie aufgehoben worden war, auf die Eliminationsleistung für den Indikatororganismus *E. coli* untersucht. Die Versuchsparameter wurden von AWAS vorgegeben. Der Partner AWAS hat zwei Versionen der Biolight entwickelt, die im Rahmen des Projektes getestet wurden. Die Spezifikation der Biolight sind von der Firma AWAS zu beziehen.

Versuchsaufbau und Durchführung

Untersucht wurde die Biolight-Technologie (Versionen: 1. Quarzglas; 2. ohne Stromanschluss) im parallelen Betrieb mit einem baugleichen Referenzsystem ohne integriertem Biolight. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 30 dargestellt.

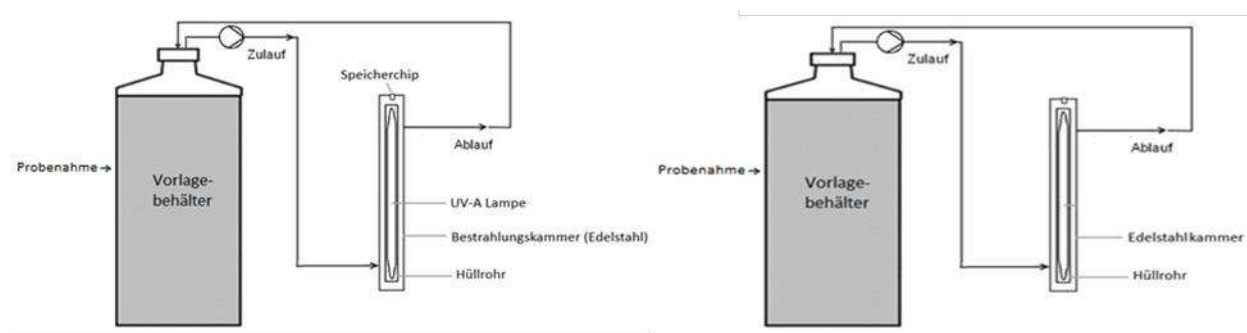


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Biolightversuche (Biolight li.; Referenzsystem re.).

Folgende Versuchsbedingungen wurden von AWAS vorgegeben:

- Kreislaufsystem
- Testlösung: 1:4 verdünntes kommunales Abwasser
- Testvol.: 100 L
- Volumenstrom: 525 ± 20 L/h (vgl. Tabelle 19)

- Mind. Versuchsdauer: 5-fache Rezirkulation

Als Testwasser wurde Abwasser aus dem Ablauf des Sandfanges der kommunalen Kläranlage Bochum-Ölbachtal in einer Verdünnung von 1:4 verwendet. Diese wurde im Vorlagebehälter angesetzt und dann mittels Pumpe in das Biolightsystem und von dort aus zurück in den Vorlagebehälter geleitet und somit im Kreislauf geführt. Die Versuche zum Quarzglas-Biolight wurden dreifach durchgeführt. Die Versuchsdurchführung zur Biolight ohne Stromanschluss erfolgte in einfacher Durchführung.

Tabelle 19: Tatsächlicher Volumenstrom im Versuch (V1-3).

Volumenstrom Q [L/h]		
	Anlage 1: Biolight	Anlage 2 Referenzsystem
V1	534	537
V2	544	552
V3	531	539
Mittlere Q	537	543

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zu den Versuchen mit dem Quarzglas-Biolight in dreifacher Durchführung sind in Abbildung 31 abgebildet. Sie zeigen die Konzentrationsverläufe von *E. coli* im Biolight und im Referenzsystem. Die Ergebnisse zeigen eine maximale *E. coli*-Reduktion von 1,5 \log_{10} -Stufen, während das Referenzsystem eine Reduktion von 1,6 \log_{10} -Stufen aufwies bei insgesamt 7 Tagen Laufzeit (V3). Die mittlere Eliminationsleistung des Biolightsystems wich in den drei Durchläufen nur minimal (Größenordnung innerhalb der Messunsicherheit) von der Leistung des Referenzsystems ab. Insofern war kein signifikanter Unterschied zwischen dem Biolight und dem Referenzsystem festzustellen. Das bedeutet, dass das Biolight keine Wirkung auf *E. coli* hat und die verzeichnete Abnahme an *E. coli* nicht auf das Biolight zurückzuführen ist. Der Rückgang der *E. coli*-Konzentration ist daher auf herkömmliche Absterbeprozesse, bedingt durch die Abnahme an zu verstoffwechselnden Substanzen, zurückzuführen.

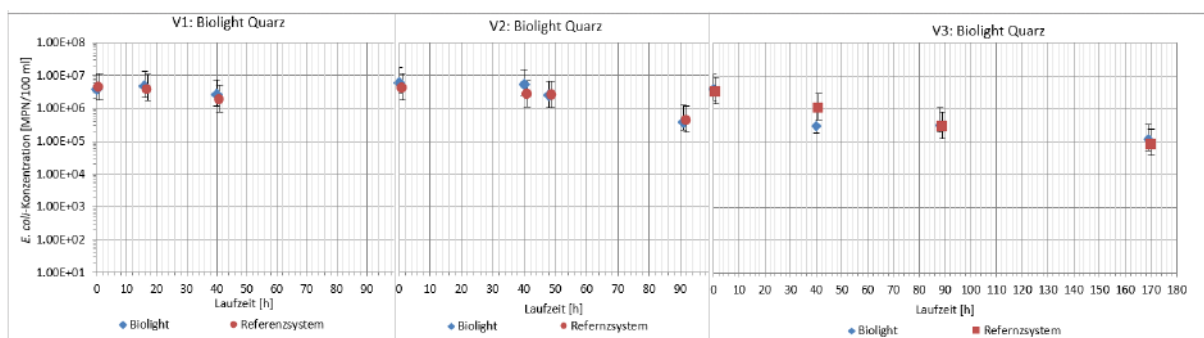


Abbildung 31: *E. coli*-Konzentration über die Laufzeit der drei Versuchsdurchläufe.

Die einfache Versuchsdurchführung zum Biolight ohne Stromanschluss zeigte eine Differenz von 0,07 \log -Stufen am letzten Versuchstag zwischen dem Biolight und dem Referenzsystem

(Abbildung 32). Insofern konnte keine signifikante Eliminationsleistung auf *E. coli* durch die untersuchten Biolightsysteme festgestellt werden.

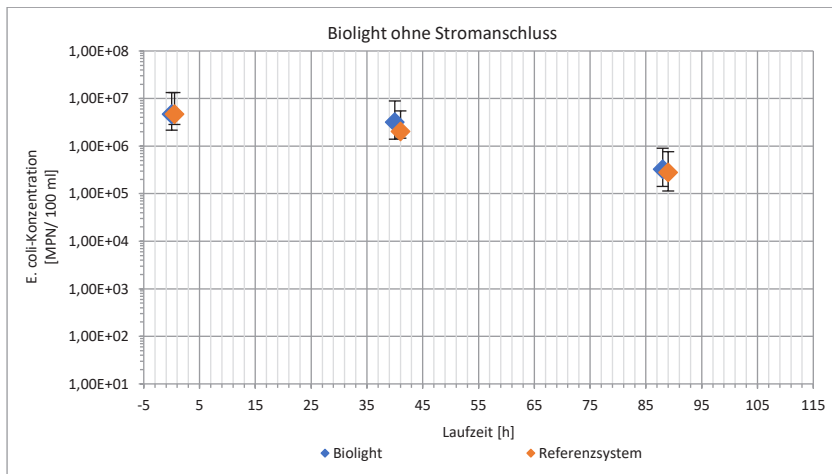


Abbildung 32: *E. coli*-Konzentration im Versuch mit der Biolight ohne Stromanschluss.

2.6.1.2 Untersuchung von Biokohlen als Filtermaterial

Der Fokus der Forschung der RUB in diesem Projekt lag auf Untersuchungen über den Einsatz von lokalen und nachhaltigen Filtermaterialien in Form von Biokohle. Der Begriff "Biokohle" umfasst sämtliche karbonisierte Biomassen. Im europäischen Raum wird der Begriff aufgrund des Worts „bio“ im Namen kritisch gesehen, da die hergestellte „Bio“-kohle meist nicht nach der europäischen und schweizerischen Bioverordnung zertifiziert ist. Im deutschsprachigen Raum wird insofern oftmals der Begriff „Pflanzenkohle“ genutzt. Im internationalen Gebrauch ist die Bezeichnung „Biochar“ üblich, weshalb im Projekt als direkte Übersetzung aus dem Englischen der Begriff Biokohle verwendet wurde.

Biokohle ist definiert als kohlenstoffreiches Material, das durch Pyrolyse pflanzlicher Biomasse, in Sinne der Nachhaltigkeit vorzugsweise in Form von lokal verfügbaren organischen Reststoffen wie Maisspindeln, Kokosnussschalen oder Reishülsen, hergestellt wird. Die Pyrolyse ist ein thermischer Abbauprozess, der unter sauerstoffarmen Bedingungen stattfindet. Pflanzliche Biomasse besteht hauptsächlich aus Hemicellulose, Cellulose, Lignin und aschebildenden Mineralien. Unter hohen Temperaturen zersetzen sich die Bestandteile der Biomasse. Die Depolymerisation kann mit zunehmender Temperatur in vier Stufen unterteilt werden: Feuchtigkeitsverdampfung, Hemizellulosezersetzung (220 °C - 315 °C), Zellulosezersetzung (314 °C - 400 °C) und Ligninabbau (160 °C - 900 °C). Zu den pyrolytischen Produkten gehören feste Produkte (Biokohle), flüssige Produkte (Bioöl) und gasförmige Produkte (Synthesegas) (Yang 2004).

Je nach Prozessbedingungen wird die Pyrolyse von langsamer bis schneller Pyrolyse unterschieden, welche jeweils eine unterschiedliche Verteilung an Produkte aufweisen. Bei der langsamen Pyrolyse ist der Anteil an festen Produkten höher als bei den anderen Formen der Pyrolyse. Aufgrund der thermischen Zersetzung und der dadurch entstehenden porösen Struktur ist die spezifische Oberfläche der Kohle größer als die ihres pflanzlichen Edukts, was eine Anwendung als Filtermaterial ermöglicht. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Biokohle hängen dabei hauptsächlich vom Ausgangsmaterial und den Prozessbedingungen der langsamen Pyrolyse wie Temperatur, Erhitzungsrate und Verweilzeit ab, die sich auch auf den Ertrag und die Qualität des Produkts auswirken (Quicker und Weber 2016).

2.6.1.2.1 Biokohleherstellung

Ein low-tech/low-budget Pyrolysereaktor (Abbildung 33) wurde im Herbst 2020 gebaut und damit Biokohle aus Maisspindeln, Maisstroh und Kakaoschalen hergestellt. Für den Bau des Pyrolysereaktors wurden Materialien, die kostengünstig und weltweit verfügbar sind, wie beispielsweise gebrauchte Metallfässer, genutzt.

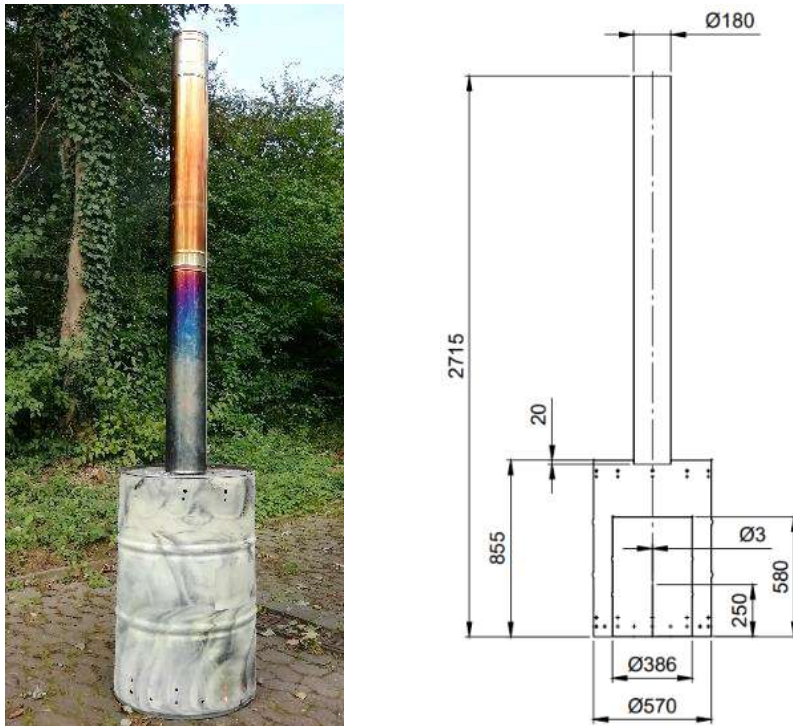


Abbildung 33: Ausführung (li.) und Technische Zeichnung des low-tech Pyrolysereaktors.

Bei dem Pyrolysereaktor handelt es sich um ein Zweikammer-System, ausgeführt als Top-lit-updraft gasifier (TLUD), wobei sich in der inneren Kammer die zu pyrolysierende Biomasse befindet und in der äußeren Kammer Brennmaterial (Reststoffe z.B. Äste) für die Wärmezufuhr. Abbildung 34 zeigt die grundlegende Funktionsweise des Systems.

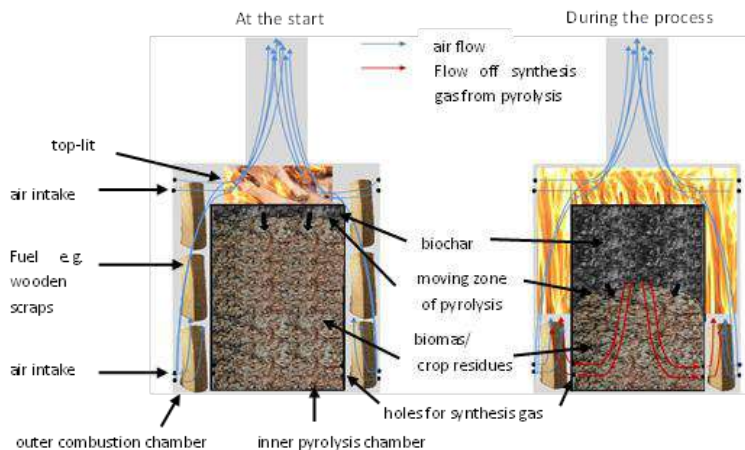


Abbildung 34: Aufbau und Funktionsweise eines Top-lit-updraft gasifier.

Zusätzlich wurde zur Messung der Temperatur ein Thermoelement (Mantelthermoelement Typ K, otom® Group GmbH) mittig ins Innere der Pyrolysekammer eingeführt. Die Temperaturverläufe für die Pyrolyse von Maisspindel sind in Abbildung 35 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Prozessparameter ist in Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Pyrolyseprozessparameter.

	Max. Prozesstemp.	Durchschnitts-Temp.	Gesamtzeit über 400 °C	Gesamtprozessdauer	Max. Aufheizrate	Durchschnittl. Aufheizrate	Feststoffausbeute
	[°C]	[°C]	[min]	[min]	[°C/min]	[°C/min]	[%]
Minimum	525	129	33	110	21	7	22
Mittelwert	638	284	68	220	58	14	26
Maximum	792	448	115	360	172	26	42

Mit einer maximalen Aufheizrate im Mittel von 58°C/min, einer Pyrolysedauer >1 h und einer Feststoffausbeute zwischen 22 und 42 % lässt sich dieses Verfahren der langsamen Pyrolyse zuordnen. Die langsame Pyrolyse weist unter den Pyrolyseprozessen die höchste Feststoffausbeute auf und ist somit die angestrebte Form der Pyrolyse in der Biokohleherstellung.

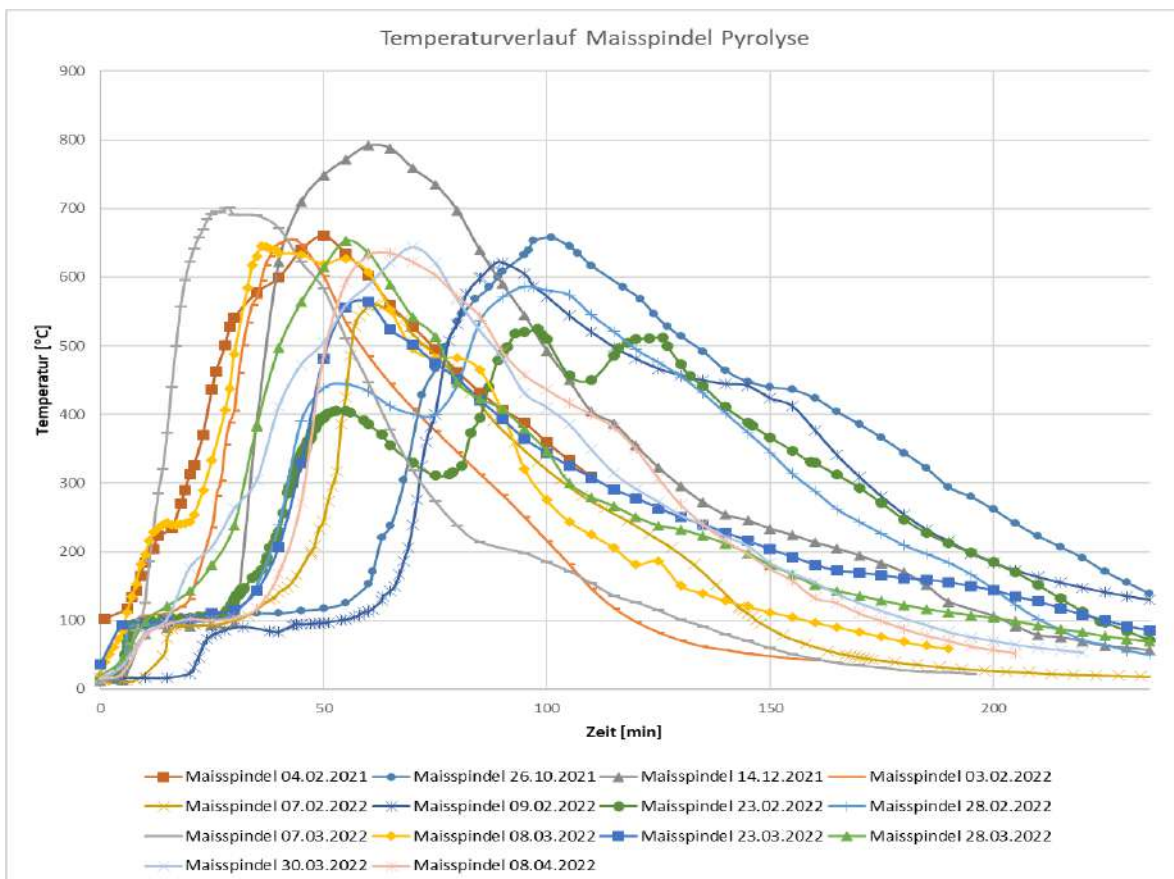


Abbildung 35: Temperaturverläufe der Pyrolyse von Maisspindel für das kleintechnische System in Ghana.

Charakterisierung der hergestellten Biokohle

In Verbindung mit einer Bachelorarbeit „Herstellung und Charakterisierung von Biokohle für den Einsatz als Filtermaterial in der Wasseraufbereitung“ wurde eine detaillierte Untersuchung für die ersten drei Pyrolyseversuche vorgenommen. Die Temperaturkurven dieser Durchläufe

sind in Abbildung 36 dargestellt. Das Edukt, das Zwischenprodukt sowie das Produkt des Biokohleherstellungsprozesses dieser Versuche ist in Abbildung 37 gezeigt.

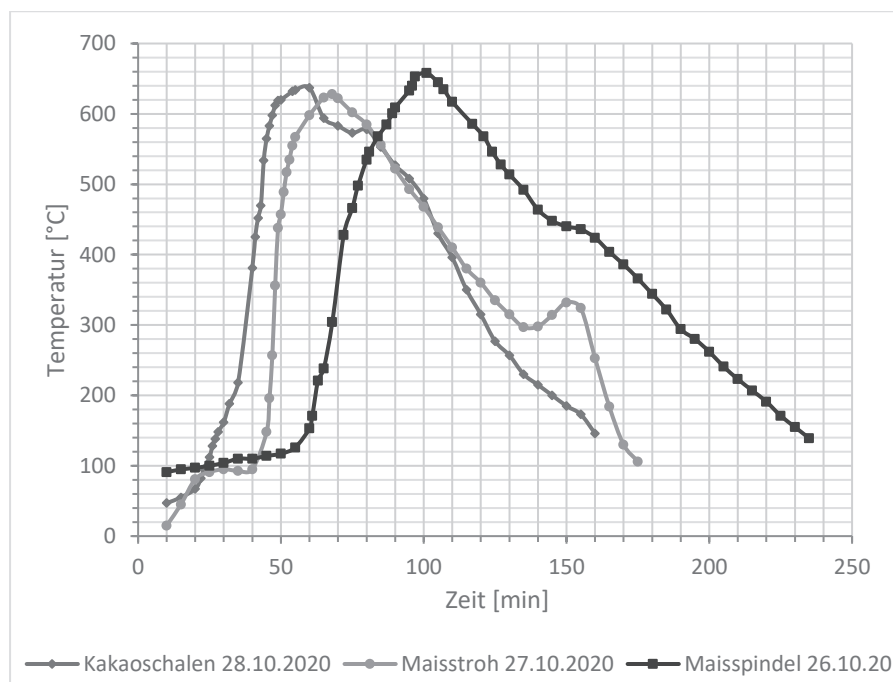


Abbildung 36: Temperaturkurven der ersten drei Pyrolysedurchläufe für die Vorversuche in Laborsäulen.

Nach der Pyrolyse weist die Biokohle die Grundstruktur der Ausgangsbiomasse auf, weshalb die Biokohle durch Zerkleinerung und Siebung auf die Fraktionen 1-4 mm und 4-8 mm für den Einsatz als Filtermaterial weiteraufbereitet wird (Abbildung 37). Die Biokohle aus dem ersten Ansatz jedes Ausgangsmaterials wurde auf ihre elementare Zusammensetzung untersucht und darüber der Verkohlungsgrad bestimmt (H/C_{gesamt}). Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 aufgeführt:

Tabelle 21: Elementare Zusammensetzung der Biokohlen und Verkohlungsgrad.

	C [wt%]	H [wt%]	S [wt%]	H/C [mol/ mol] ¹	O calculated [wt%] ²	O _{calc} /C [mol/mol] ^{*1}
Cocoa Husks	64,6	1,8	0,41	0,34	11,4	0,13
Maize Straw	49,9	1,3	0,18	0,31	23,1	0,35
Maize Cobs	76,3	1,6	0,12	0,25	11,0	0,12

^{*1} H/C_{org} ($C_{\text{org}} = C - (CO_2 - C)$; CO_2)
^{*2} O calculated = 100 wt% - C wt% - H wt% - S wt% - ash content wt% (EBC 2020)

Das H/C-Verhältnis liegt zwischen 0,25 (Maisspindelkohle) und 0,34 (Kakaoschalenkohle). H/C-Verhältnisse von größer als 0,7 lassen auf nicht-kondensierte aromatische Strukturen schließen, welche eine geringere Stabilität aufweisen. Da die H/C-Verhältnisse der produzierten Biokohlen deutlich unterhalb von 0,7 liegen (European Biochar Foundation (EBC)), kann auf einen guten Verkohlungsprozess und eine hohe Stabilität der Kohle

geschlossen werden. Die Oberflächenmorphologie der Biokohlen wurde mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) (ZEISS Gemini2 Merlin; FESEM; ZEISS, Oberkochen, Germany) betrachtet, um die mikroskalige Struktur zu identifizieren (Abbildung 38).

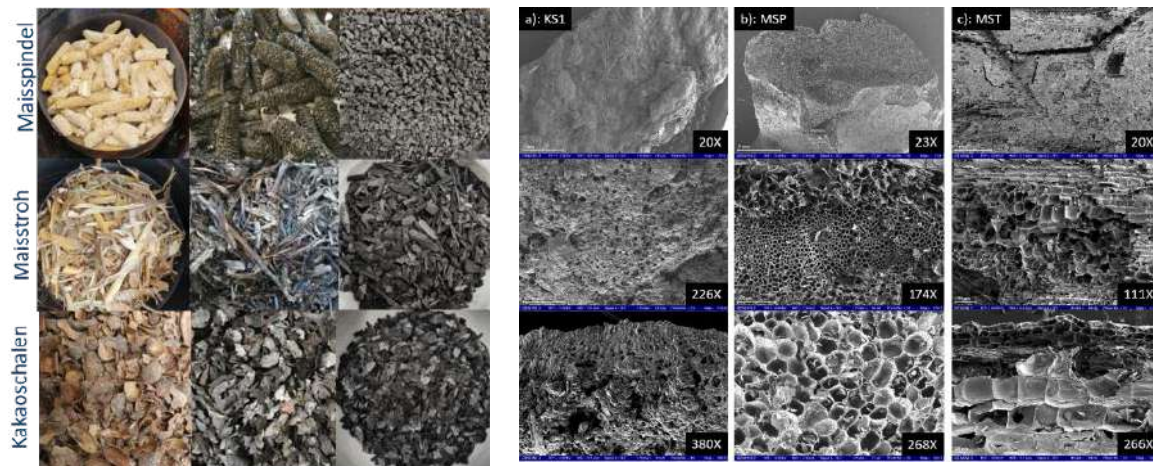


Abbildung 37: Biomassematerialien: Ausgangsmaterial (li.); pyrolysiertes Material (mi.); zerkleinerte Biokohle (re.).

Abbildung 38: REM-Aufnahmen der pyrolysierten Biomassen: a) Kakaoschalen, b) Maisspindel, c) Maisstroh.

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass die pflanzlichen Zellmorphologien während des Pyrolyseprozesses (max. 678°C) erhalten bleiben. Insbesondere die Bruchkanten zeigen die Zellstrukturen, welche bei der Maisspindelkohle am ausgeprägtesten sind. Bei der Maisstrohkohle sind die ursprünglichen Zellen an den Bruchkanten etwas stärker zerstört und wirken instabiler als die der anderen Kohlen. Die Kakaoschalen weisen eine geringere Fläche an Bruchkanten auf, dafür zeigt die ungebrochene Oberfläche amorphe Strukturen mit Porenöffnungen.

Alle Materialien weisen im Inneren eine poröse, schwammartige Struktur und somit eine relativ große Oberfläche auf. Dies legt eine Eignung als Filtermaterial nahe, wobei diese ersten Beobachtungen auf eine bessere Eignung der Maisspindelkohle hindeuten. Die Filterleistung der Biokohle wurde im Weiteren durch Säulenversuche im Labor untersucht.

2.6.1.2.2 Filtersäulenversuche

Auf dem Versuchsgeländer des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der RUB wurden von Anfang 2021 bis Anfang 2022 mehrwöchige Filtersäulenversuche im Labor mit den vorab hergestellten Biokohlen durchgeführt. Es fanden vier Versuchsdurchläufe statt (Tabelle 22Tabelle 22). In dem ersten Versuchsdurchlauf wurden die Materialien Kakaoschalenkohle (KSK) und Maisspindelkohle (MSK) im Korngrößenbereich zwischen 4-8 mm getestet. In dem zweiten Versuchsdurchlauf erfolgte die Untersuchung von Maisstrohkohle (MSTK) in den Korngrößenbereichen 14 mm und 4-8 mm. Im dritten Versuch wurden die Materialien MSK und KSK 1-4 mm getestet. Der vierte Versuchsdurchlauf betrachtete MSK, MSTK und KS in der Fraktion 1-4 mm unter einer veränderten Filtergeschwindigkeit.

Versuchsaufbau und Betriebsparameter

Die Filtermaterialuntersuchung erfolgte in einer Versuchsanlage bestehend aus einer Vorlage, in der sich das Testwasser befand und aus mehreren senkrecht an einem Gerüst befestigten Glassäulen (ID 5 cm), die mit dem zu untersuchenden Filtermaterial gefüllt wurden. Die Filtersäulen wurden mittels Pumpen (Watson Marlow, Modell 205S und Modell 323S) von oben mit dem Testwasser aus der Vorlage beschickt. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 39 und Abbildung 40 zu entnehmen. Die Filtersäulen aus den ersten drei Versuchsdurchläufen wurden mit einer Filtergeschwindigkeit von 0,05 m/h betrieben. In Abhängigkeit von der Schüttungsporosität (0,57-0,75) lag die berechnete Aufenthaltszeit in der Filtersäule zwischen 9,3 und 10,3 h.

In den ersten drei Versuchen wurde die Untersuchung der Biokohlen zur statistischen Absicherung als Säulentriplikat ausgeführt. Der vierte Versuch erfolgte in einfacher Durchführung. Der Filterbettaufbau in den Glassäulen bestand aus einer Stützschiicht aus Kies, bestehend aus 6 cm grobem Kies, gefolgt von 6 cm feinem Kies, und 30 cm Biokohle. Auf die Biokohleschiicht wurden 2 cm des feinen Kiesel gelegt, um ein Aufschwimmen der Biokohle zu verhindern.

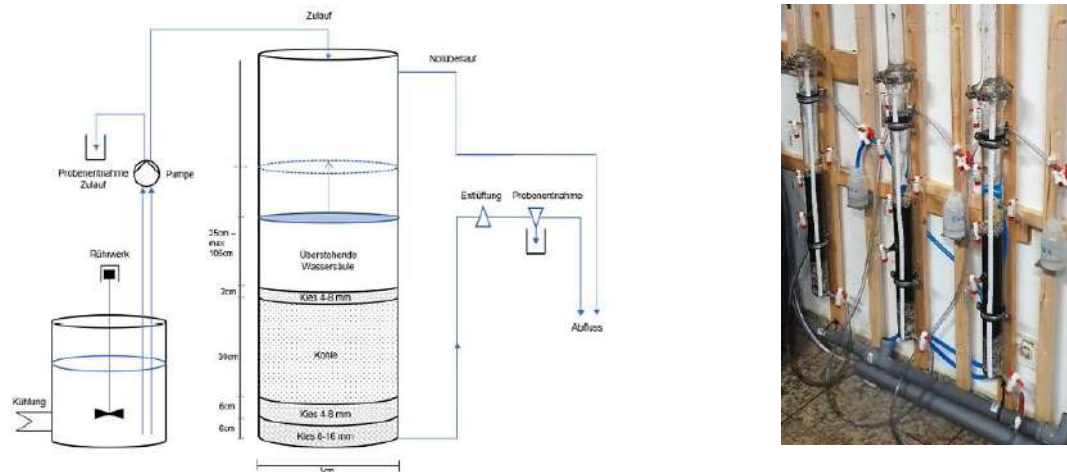


Abbildung 39: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus.

Abbildung 40: Filtersäulentriplikal mit Biokohle gefüllt.

Versuchsdurchführung

Die Filtersäulenversuche fanden auf der Versuchsanlage Ölbachtal des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum im Zeitraum von März 2021 bis Februar 2022 statt. Insgesamt wurden dabei drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Materialien unter gleichenden Betriebsparametern und eine Versuchsreihe mit veränderten Betriebsparametern durchgeführt.

Tabelle 22: Übersicht Versuchsreihen.

	Filtermaterial	Ausführung	Filtergeschwindigkeit
1. Versuchsreihe	<ul style="list-style-type: none"> Maisspindelkohle 4-8 mm Kakaoschalenkohle 4-8 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Filtersäulen-Triplikal Filtersäulen-Triplikal 	0,05 m/h
2. Versuchsreihe	<ul style="list-style-type: none"> Maisstrohkohle 4-8 mm Maisstrohkohle 1-4 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Filtersäulen-Triplikal Filtersäulen-Triplikal 	0,05 m/h
3. Versuchsreihe	<ul style="list-style-type: none"> Maisspindelkohle 1-4 mm Kakaoschalenkohle 1-4 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Filtersäulen-Triplikal Filtersäulen-Triplikal 	0,05 m/h
4. Versuchsreihe	<ul style="list-style-type: none"> Maisspindelkohle 1-4 mm Kakaoschalenkohle 1-4 mm Maisstrohkohle 1-4 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Filtersäule-Einfach Filtersäule-Einfach Filtersäule-Einfach 	0,1 m/h

Bei den ersten drei Versuchsreihen handelt es sich um eine Materialvergleichsstudie, die das Ziel verfolgte, die Eliminationsleistung der drei unterschiedlichen Materialien und zwei verschiedenen Fraktionsgrößen zu vergleichen und das geeignetste Material für eine Pilotstudie in Ghana zu identifizieren. Durch den vierten Versuch wurde das Verhalten der Filtermaterialien bei einer erhöhten Belastung betrachtet.

Der Fokus bei der Filtermaterialuntersuchung lag auf dem Rückhalt von pathogenen Mikroorganismen. Die eingestellte Zulaufbelastung orientiert sich an die Keimbelastung von ghanaischem Oberflächengewässer und offenen Regenkanälen. Die Literaturrecherche zeigt, dass diese saisonal und nutzungsbedingt sehr variabel sind. Für die Versuche wurde deswegen eine mittlere Belastung für *E. coli* mit 10^4 - 10^5 kbe/100 mL zugrunde gelegt. Dafür wurde kommunales Abwasser aus dem Ablauf des Sandfangs der Kläranlage Ölbachtal in Bochum für 12-24 h sedimentiert und mit Leitungswasser im Verhältnis 1:10 verdünnt. Somit lag die *E. coli*-Konzentration im Zulauf der Filterversuche im Mittel bei $2,15 \times 10^5$ MPN/100 mL (Median: $1,56 \times 10^5$ MPN/100 mL). Für möglichst stabile Bedingungen wurde das Testwasser im Vorlagebehälter mittels Rührwerks homogenisiert und auf 4-5°C gekühlt. Das Testwasser wurde im ersten Versuch jeden zweiten Tag (2–3 mal pro Woche) erneuert, in den anderen Versuchen zweimal pro Woche an festen Tagen erneut und der Vorlagebehälter gereinigt. Einmal pro Woche, einen Tag nachdem frisches Testwasser angesetzt wurde, wurden die Filtersäulen beprobt und auf mehrere Parameter hin analysiert.

Für die Untersuchung auf *E. coli* wurden sterile Proben vom Ablauf jeder Säule, sowie eine Zulaufprobe aus dem Vorlagebehälter genommen. Die Analyse erfolgte mit Hilfe der MUG/EC Methode von BioRad. Vom Ablauf von einer exemplarischen Säule des Triplikats, bzw. von jedem Ablauf bei einfacher Ausführung (4. Versuch) sowie vom Zulauf wurden sterile Proben für die Untersuchung auf *Clostridien perfringens* und somatische Coliphagen durch das Hygiene-Institut des Ruhrgebiets (Gelsenkirchen, Deutschland) genommen. Eine großvolumige Zulaufprobe sowie Ablaufproben jeder Säule wurde über einen Zeitraum von zwei bis fünf Stunden gesammelt und jeweils ein Aliquot auf die Leitfähigkeit, den pH-Wert und die Trübung untersucht. Der Rest der Proben wurde eingefroren (-18°C) und am Ende der Versuchsreihe wurden der chemische Sauerstoffbedarf, Nitratstickstoff und Gesamtstickstoff für Anfang, Mitte und Ende der Versuchsreihe analysiert.

Der Betrieb der Filtersäulen wurde überwacht, indem der Volumenstrom regelmäßig mittels Ausliterns bestimmt wurde und die Höhe des Überstandswassers und die Schmutzdeckenentwicklung beobachtet wurde. Die Zulaufschläuche wurden regelmäßig mit einer 1:10-verdünnten NaClO-Lösung (CAS-Nummer der unverdünnten NaClO-Lösung: 7681-52-9;) gespült, um sich bildenden Biofilm und abgesetzte Feststoffe zu entfernen und ein Zusetzen der Schläuche zu verhindern.

Tabelle 23 zeigt eine Übersicht über die Beprobung und Analyse.

Tabelle 23: Übersicht zur Beprobung und Analyse.

	Beprobungsintervall	Gegenstand	Methode	Durchgeführt von
<i>E. coli</i>	Wöchentlich	alle Säulen	MUG/EC von BioRad GmbH nach DIN EN ISO 9308-3 und DIN EN ISO 7899-1	Labor RUB
<i>C. perfringens</i>	Wöchentlich,	festgelegter Vertreter jedes Triplikats	DIN EN ISO 14189:2016-11	Hygiene-Institut des Ruhrgebiets
Somatische Coliphagen	Wöchentlich	festgelegter Vertreter jedes Triplikats	DIN EN ISO 10705-2 (K17) (2002-01)	Hygiene-Institut des Ruhrgebiets
Trübung	Wöchentlich	alle Säulen	DIN EN ISO 7027	Labor RUB
CSB	Stichprobe: Beginn, Mitte und Ende der Versuchsreihe	alle Säulen	ISO 6060-1989, DIN 38409-H41-H44	Labor RUB
Nitrat-Stickstoff	Stichprobe: Beginn, Mitte und Ende der Versuchsreihe	alle Säulen	DIN 38405 D9-2, ISO 23696-1	Labor RUB
Gesamtstickstoff	Stichprobe: Beginn, Mitte und Ende der Versuchsreihe	alle Säulen	EN ISO 11905-1, ISO23697-1	Labor RUB

Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel wird die Rückhalteleistung der verschiedenen Biokohlematerialien für die untersuchten Schadstoffe dargestellt und diskutiert. Der Fokus liegt dabei auf die mikrobiologischen Parameter *E. coli*, *C. perfringens* und somatische Coliphagen. Zur Differenzierung wird bei den Ergebnissen des vierten Versuchs mit erhöhter Filtergeschwindigkeit gegenüber der Materialstudie aus den ersten drei Versuchsreihen diese in der Bezeichnung mit aufgenommen.

Zunächst wird auf das Verhalten der verschiedenen Biokohlen hinsichtlich des Rückhaltes von Fest- und Schwebstoffen, ausgedrückt durch den Parameter Trübung, eingegangen.

Die Trübung war im Zulauf aufgrund der Zusammensetzung des verdünnten Abwassers mit 3,2 NTU im Mittel sehr niedrig. Trotz der geringen Belastung mit Trübstoffen konnten die Biokohlefilter eine Verbesserung des Filtrats erzielen, sodass im Ablauf die Trübung im Durchschnitt unter 1 NTU lag. In Abbildung 41 bis Abbildung 44 ist die Reduktion über die Versuchszeiträume dargestellt. Die höchste Reduktion der Trübung von ca. 80 % wurde von der feineren Fraktion der Biokohlen aus Maisspindeln und Kakaoschalen erreicht, die in der dritten Versuchsreihe untersucht wurden. Die gröbere Fraktion der Biokohlen wies im allgemeine eine schlechtere Reduktion der Trübung auf, was auf größere Hohlräume in der Filterschüttung des größeren Materials schließen lässt.

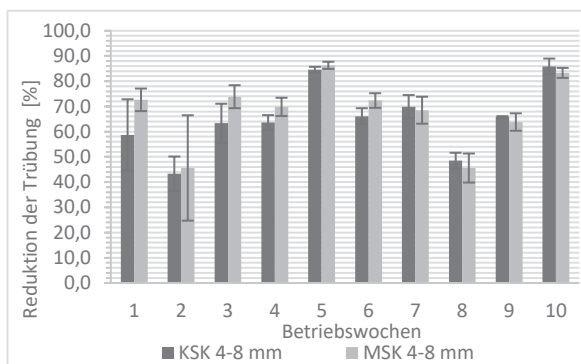


Abbildung 41: Reduktion der Trübung während der ersten Versuchsreihe (KSK 4-8 mm; MSK 4-8 mm).

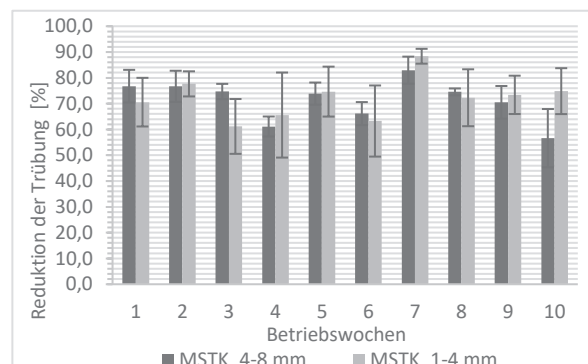


Abbildung 42: Reduktion der Trübung während der zweiten Versuchsreihe (MSTK 4-8 mm; MSTK 1-4 mm).

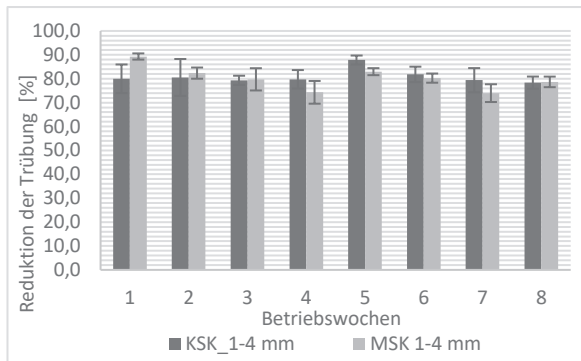


Abbildung 43: Reduktion der Trübung während der dritten Versuchsreihe (KSK 1-4 mm; MSK 1-4 mm).

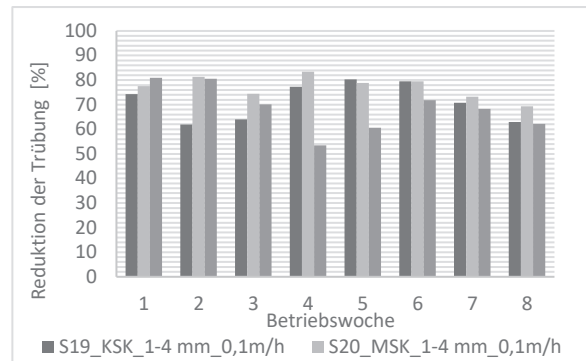


Abbildung 44: Reduktion der Trübung während der dritten Versuchsreihe (KSK 1-4 mm; MSK 1-4 mm; MSTK 1-4 mm bei 0,1 m/h).

In Abbildung 45 bis Abbildung 48 werden die erreichten Eliminationsleistungen für *E. coli* über die Versuchsdauer dargestellt. Für die untersuchten Biokohlen konnte im arithmetischen Mittel über die Triplikate und den Versuchszeitraum eine *E. coli*-Elimination zwischen 1,46 log₁₀-Stufen (MSTK 4-8 mm) und 2,84 log₁₀-Stufen (MSK 1-4 mm) bestimmt werden. Im zweiten Versuchsdurchlauf ist eine stärkere Streuung der Eliminationsleistung zwischen den Triplikaten festzustellen. Dies könnte mit einem beobachteten Auftreten von Protozoen (Hüpfertlinge) in einzelnen Filtersäulen in Zusammenhang stehen. Die Protozoen ernährten sich von Bestandteilen der Schmutzdecke und führten so zu einem Abbau dieser. In den Versuchsreihen drei und vier konnten ebenfalls im Verlauf eine geringe Anzahl an Hüpfertlingen beobachtet werden, was jedoch keine sichtbaren Auswirkungen auf die Schmutzdecke hatte.

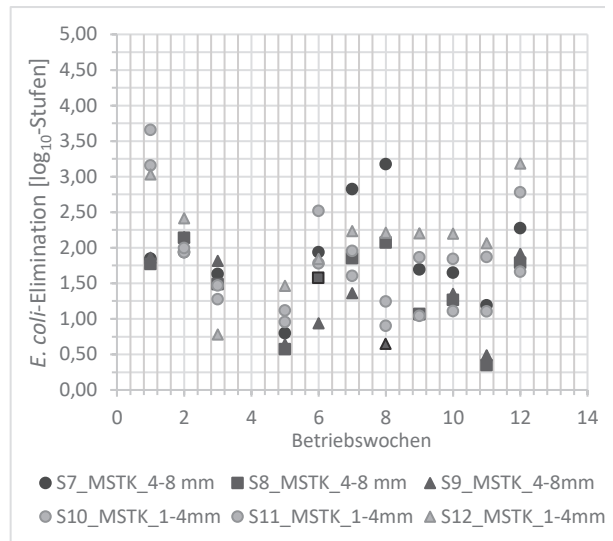
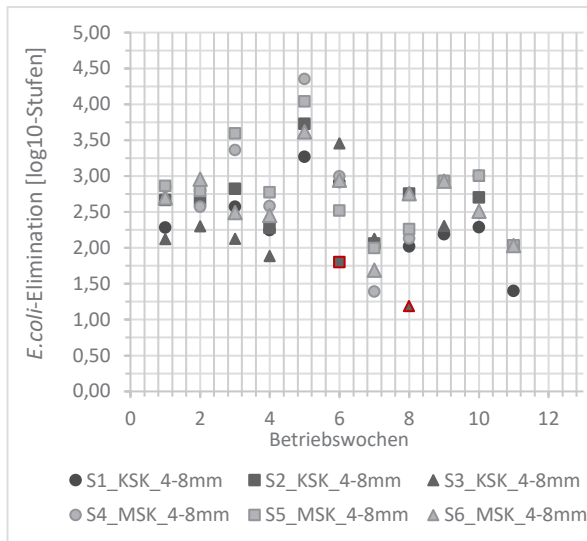


Abbildung 45: V1: *E. coli*- Elimination KSK 4-8 mm und MSK 4-8 mm.

Abbildung 46: V2: *E. coli*- Elimination MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm.

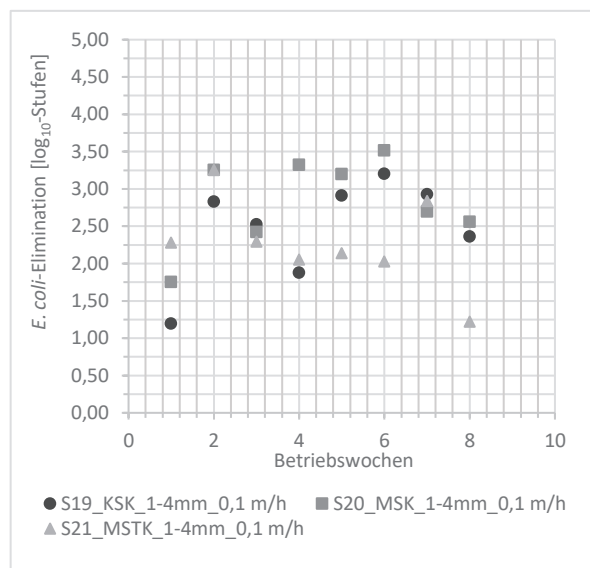
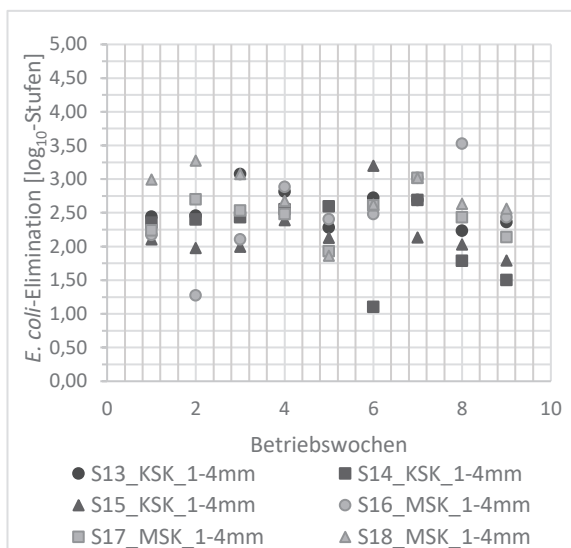


Abbildung 47: V3: *E. coli*- Elimination KSK 1-4 mm und MSK 1-4 mm

Abbildung 48: V4: *E. coli*- Elimination KSK 1-4 mm, MSK 1-4 mm und MSTK 1-4 mm

Die Eliminationsleistungen der einzelnen Säulen über die Versuchszeiträume zeigen keinen signifikanten Trend, aus dem sich eine Langezeitaussage bezüglich der Standzeit treffen ließe. Zusätzlich zu den zeitlichen Verhalten der Filtersäulen ist die Rückhalteleistung der einzelnen Materialien und ihrer Fraktion von Interesse. Dafür wurden die Eliminationsraten über die Säulentriplicate und den Zeitraum gemittelt und grafisch in Abbildung 49 entsprechend der Leistung dargestellt.

Dabei zeigt sich, dass der höchste mittlere Rückhalt von *E. coli* durch das Filtermaterial MSK 1-4 mm bei einer Filtergeschwindigkeit von 0,1 m/h erreicht wurde - gefolgt von MSK 4-8 mm und MSK 1-4 mm bei einer Filtergeschwindigkeit von 0,05 m/h. Insgesamt konnte durch alle

Materialien ein signifikanter Rückhalt von *E. coli* erreicht werden. Ein signifikanter Unterschied in der Rückhaltleistung in Abhängigkeit von der Filtergeschwindigkeit zeigt sich hier nicht. Entgegen der Erwartung wurden bei höheren Filtergeschwindigkeiten und somit geringeren Aufenthaltszeiten mitunter die besseren Ergebnisse erzielt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Versuche zeitversetzt und mit realem Abwasser stattfanden, welches Schwankungen unterliegt. Dadurch ergeben sich auch für die Versuchsreihen Unterschiede in den Versuchsbedingungen, was auch das Verhalten des Filters beeinflussen kann. Zudem wurde die vierte Versuchsreihe nicht als Säulentriplikate durchgeführt, wodurch die Ergebnisse einer stärkeren Unsicherheit unterliegen. Diese Unterschiede können dazu geführt haben, dass bei der höheren Filtergeschwindigkeit höhere Eliminationsleistungen vorliegen. Im Wesentlichen weisen die Daten jedoch in erster Linie darauf hin, dass bei der höheren Filtergeschwindigkeit die Materialien eine ähnliche Leistung erzielen können. Auch ergibt sich hinsichtlich der unterschiedlichen Biokohlen eine ähnliche Rangfolge wie bei der geringeren Filtergeschwindigkeit. Die besten Ergebnisse erzielte die Maisspindelkohle gefolgt von der Kakaoschalenkohle. Die schlechteste Reinigungsleistung wies auch hier die Maisstrohkohle auf.

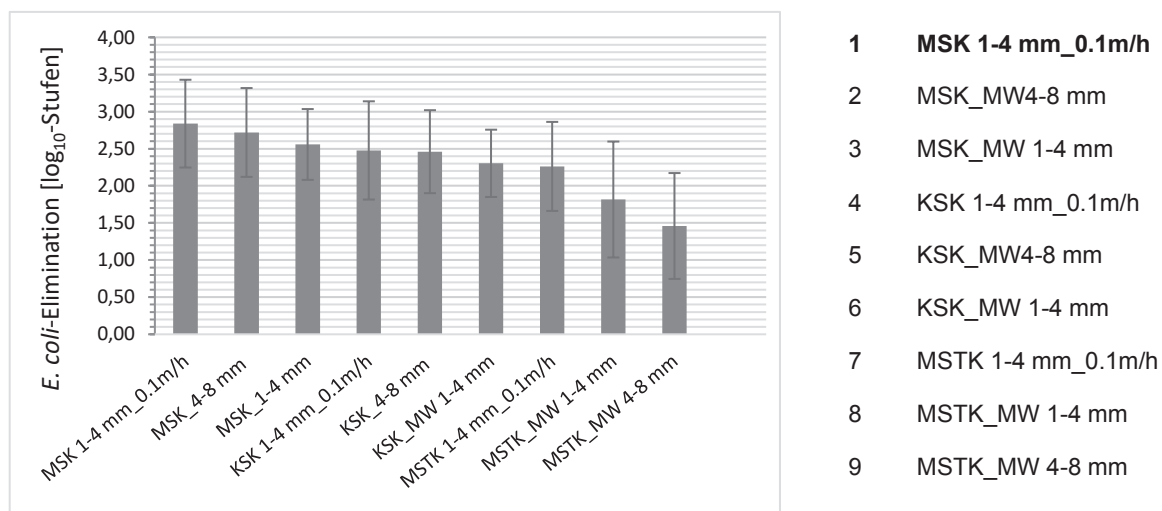


Abbildung 49: Gemittelte *E. coli*-Eliminationsleistung im Vergleich (li.) und Rangliste (re.).

Die Elimination von somatischen Coliphagen und *Clostridium perfringens* wurde exemplarisch an jeweils einer Säule von jedem Triplikat untersucht. Das stäbchenförmige anaerobe Bakterium *Clostridium perfringens* ist ein Wunderreger und außerdem eine häufige Ursache für bakterielle Lebensmittelvergiftungen, weshalb eine Elimination von Relevanz für eine spätere Nutzung als Bewässerungswasser ist. Zudem bildet es widerstandsfähige Sporen aus, welche länger in der Umwelt nachgewiesen werden können als beispielsweise *E. coli*. aus dem Grund wird *C. perfringens* als Indikator für Protozoen (z.B. Cryptosporidium- und Giardia-Oozysten) betrachtet (Stelma 2018). *C. perfringens*-Sporen sind zudem kleiner als Protozoen-

Zysten und Bakterien und können als Indikator für die Effizienz des Filtrationsprozesses angesehen werden.

In den vorliegenden Versuchen konnte die höchste durchschnittliche Elimination von 2,01 \log_{10} -Stufen mit der MSTK 1-4 mm erreicht werden. Die gröbere Körnung 4-8 mm der MSTK wies im Gegensatz dazu mit einer mittleren Reduktion von 1,14 \log_{10} -Stufen die niedrigste Eliminationsleistung auf (Abbildung 50 und Abbildung 51). Im Gegensatz zu den dem Parameter *E. coli* ergibt sich keine eindeutige Materialempfehlung. Jedoch handelt es sich bei den drei Materialien mit dem besten Rückhalt, MSTK 1-4 mm, KSK 1-4 mm und MSK 1-4 mm, um die feinere Fraktion der getesteten Kornfraktionen bei der niedrigeren Filtergeschwindigkeit. Hier lässt sich somit postulieren, dass die Korngröße bei der Elimination von *C. perfringens* von größerer Relevanz ist als bei *E. coli*. Das kann mitunter anhand der Größe erklärt werden. Der Durchmesser von *E. coli* beträgt 1,1–1,5 μm und die Länge 2,0–6,0 μm dagegen sind die widerstandsfähigen Sporen von *C. perfringens* deutlich kleiner bei 0,6 μm Durchmesser und 0,8 μm Länge (Orsburn et al. 2008).

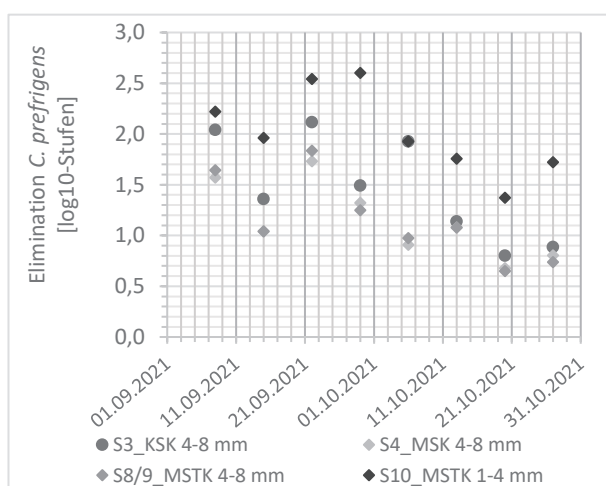


Abbildung 50: *C. perfringens*- Elimination KSK 4-8 mm, MSK 4-8 mm, MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm.

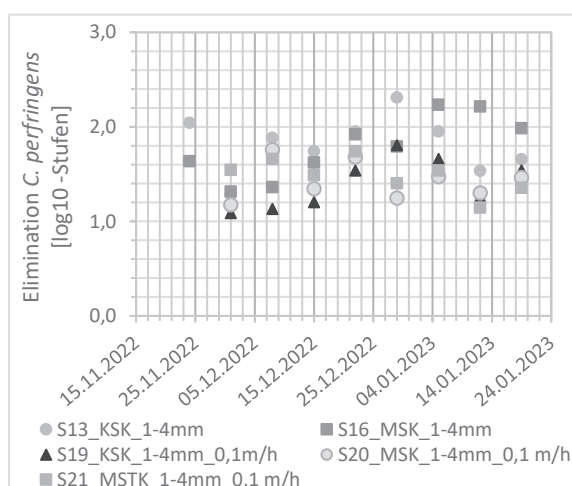


Abbildung 51: *C. perfringens*- Elimination KSK 1-4 mm, MSK 1-4 mm, KSK 1-4 mm 0,1 m/h, MSK 1-4 mm 0,1 m/h und MSTK 1-4 mm 0,1 m/h.

Somatische Coliphagen gehören zu den Bakteriophagen, wobei es sich um eine Gruppe von Viren handelt, die Bakterien und Archaeen infiziert und sich darin vermehrt. Für Menschen stellen Bakteriophagen kein direktes Gesundheitsrisiko dar. So infizieren Coliphagen nur coliforme Bakterien wie *E. coli*. Somatische Coliphagen werden neben F-spezifischen Coliphagen als Indikator für fäkale Verschmutzung genutzt. Da somatische Coliphagen morphologisch ähnlich zu Enteroviren sind, können sie zudem für die Betrachtung der Eliminationsleistung von Enteroviren in der Wasseraufbereitung hinzugezogen werden¹.

Der Rückhalt der somatischen Coliphagen wurde für die Versuchsreihen exemplarisch an einer Säule aus den Triplikaten und an den Einzelsäulen aus der vierten Versuchsreihe

betrachtet. Anhand der erreichten Elimination über den Versuchszeitraum, welche in Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt ist, ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Für die Materialien KSK 4-8 mm, MSK 4-8 mm, MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm ist die Elimination zu Beginn am höchsten, fällt dann die nächsten vier Wochen ab und steigt danach wieder. Auffallend dabei ist, dass alle Säulen sich gleich verhalten, weshalb wahrscheinlich ist, dass äußere Gründe dafür verantwortlich sind. Bei den anderen Materialien schwanken die Eliminationsleistungen deutlich mehr. Die Materialien KSK 1-4 mm 0,1 m/h, MSK 1-4 mm 0,1 m/h und MSTK 1-4 mm 0,1 m/h weisen im Vergleich miteinander auch einen ähnlichen Verlauf auf. Der maximale Rückhalt für die somatischen Coliphagen mit durchschnittlich 1,02 log₁₀-Stufen wurde mit dem Material MSTK 1-4 mm erzielt. Die niedrigste Eliminationsleistung lag bei 0,45 log₁₀-Stufen bei MSTK 4-8 mm. MSTK 1-4 mm und MSTK 4-8 mm wiesen entsprechend auch bei *C. perfringens* die beste und schlechteste Leistung auf. Für die anderen Materialien zeigt sich jedoch ein anderes Verhalten. Die zweitbeste Elimination wird von dem Material KSK 4-8 mm erzielt, gefolgt von MSK 1-4 mm und MSTK 1-4 mm_0,1 m/h.

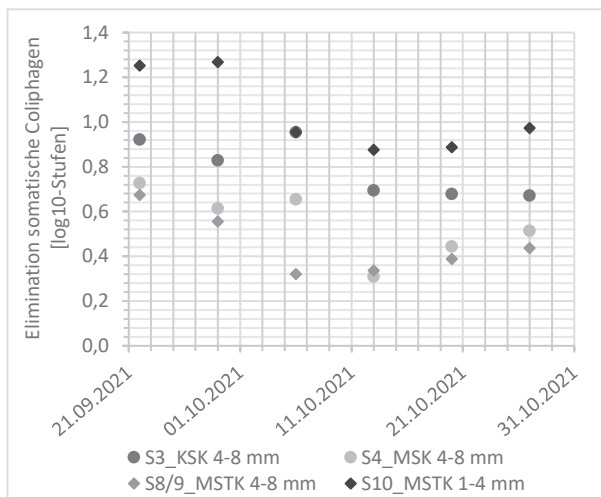


Abbildung 52: Elimination somat. Coliphagen durch KSK 4-8 mm, MSK 4-8 mm, MSTK 4-8 mm und MSTK 1-4 mm.

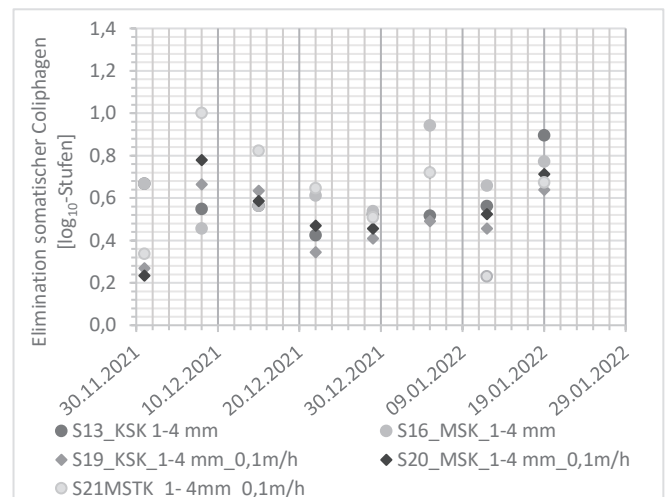


Abbildung 53: Elimination somat. Coliphagen durch KSK 1-4 mm, MSK 1-4 mm, KSK 1-4 mm 0,1 m/h, MSK 1-4 mm 0,1 m/h und MSTK 1-4 mm 0,1 m/h.

In Tabelle 24 ist der Rückhalt, der durch die verschiedenen Biokohlen für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und Gesamtstickstoff erreicht wurde, aufgeführt. Es liegen Daten für jede Säule zu Beginn, Mitte und Ende der Versuchsreihe vor.

In der Tabelle sind die berechneten Werte für den Rückhalt der Säulentriplikate als arithmetischer Mittelwert zusammengefasst. Die Elimination von CSB liegt zwischen 2 und 60 %, wobei bei allen Materialien, außer MSTK 1-4 und 4-8 mm, der Rückhalt über den Versuchszeitraum deutlich zunimmt und die größten Werte am Ende bestimmt wurden. Über den gesamten Zeitraum weist MSK 1-4 mm im Schnitt mit 53 % den höchsten Rückhalt auf

gefolgt von KSK 1-4 mm mit sieben Prozentpunkten weniger. Den schlechtesten Rückhalt von ca. 22 % erzielten die Materialien MSTK 1-4 mm und MSTK 4-8 mm vor. Da bei MSTK 1-4 mm bei erhöhter Filtergeschwindigkeit ebenfalls ein verbesserter Rückhalt über die Versuchsdauer zu beobachten ist, ist es nicht auf das Material zurückzuführen. Vielmehr kann der beobachtete Schmutzdeckenabbau durch die Protozoen in den Säulen von MSTK 1-4 mm und MSTK 4-8 damit in Verbindung gebracht werden.

Zwischen Zulauf und Ablauf geht die Gesamtstickstoffkonzentration zwischen ca. 9 und 60 % zurück, was bedeutet, dass Denitrifikation im System stattfindet. Eine zunehmende Tendenz des Rückhalts über den Versuchszeitraum ist nicht zu erkennen. Im Schnitt erzieht das Material MSK 4-8 mm mit 48 % den größten und KSK 1-4 mm mit 17 % den niedrigsten Rückhalt. Bei MSK 1-4 mm liegt der mittlere Rückhalt bei ca. 27 %. Im Gegensatz zu den anderen Parametern, ist es bei den Stickstoffverbindungen jedoch nicht das Ziel diesen aus dem Wasser zu entfernen, da dieser ein Pflanzendünger ist und in dem folgenden Pilotversuch das behandelte Wasser zur Bewässerung in der urbanen Landwirtschaft genutzt werden soll.

Tabelle 24: Elimination von CSB und Gesamtstickstoff für die verschiedenen Biokohlen.

	Betriebszeit	KSK 4-8 mm [%]	MSK 4-8 mm [%]	MSTK 4-8 mm [%]	MSTK 1-4 [%]	KSK 1-4 mm [%]	MSK 1-4 [%]	KSK 1-4 mm [%]	MSK 1-4 mm [%]	MSTK 1-4 mm [%]
CSB	Anfang	1,86	39,69	28,62	24,58	39,58	45,21	12,50	18,75	6,25
	Mitte	26,20	39,60	13,33	15,56	47,65	53,14	35,29	41,76	29,41
	Ende	49,56	47,01	25,77	28,18	53,59	60,51	47,69	62,31	61,54
Gesamter Stickstoff	Anfang	18,24	30,19	18,10	11,43	27,00	32,67	43,00	45,00	27,00
	Mitte	60,85	59,09	22,51	29,87	17,83	30,23	41,86	26,74	32,56
	Ende	33,23	54,79	16,39	16,39	9,05	19,05	30,00	15,71	31,43

Fazit

Die Laborversuche in Form von Filtersäulen zur Untersuchung der Eignung von Biokohle produziert aus drei verschiedenen Biomassen und in zwei Fraktionen vorliegend, haben gezeigt, dass Biokohle für die Behandlung von mit Abwasser verschmutzten Oberflächenwasser Potential hat. Mit einer Elimination von *E. coli* von über 2,5 log-Stufen (> 99,7 %) konnte eine deutliche Hygienisierung des Wassers erzielt werden. Die Reduktion von *C. perfringens* und somatischen Coliphagen, war zwar geringer aber immer noch signifikant.

Hinsichtlich der Parameter Trübung, CSB und *E. coli* waren die Eliminationsleistung von der Maisspindelkohle am besten, insbesondere der Fraktion 1-4 mm. *C. perfringens* und somatische Coliphagen wurden von der feineren Fraktion der Maisstrohkohle am besten zurückgehalten, jedoch zeigte auch die Maisspindelkohle 1-4 mm hier gute Leistungen.

Insofern stellt die Maisspindelkohle insgesamt das Leistungsstärkste Material dar, weshalb es für den Einsatz in der Pilotanlage am vielversprechendsten ist. Zudem hat sich für die Filtergeschwindigkeit von 0,1 m/h gegenüber 0,05 m/h kein signifikanter Leistungsabfall gezeigt, sodass der Pilotversuch mit der höheren Filtergeschwindigkeit ausgelegt werden kann, um so bei gleichbleibender Filterfläche mehr Wasser für den Bewässerungsversuch produzieren zu können.

2.6.2 AP 2.1 DE Pandemiebedingt: Aufbau und Test einer modularen Containeranlage in Deutschland

In AP 2.1 A wurden von der RUB die Datenerhebung der AWAS-Container-Anlage bei einem kontinuierlichen Betrieb der Anlage über mehrere Wochen vorgenommen. Dabei wurden der Zu- und Ablauf der Anlage auf *E. coli* und Coliforme Bakterien, sowie dem Schwermetall Eisen, acht Mal durch ein beauftragtes Labor vor Ort analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 aufgeführt und an AWAS übermittelt worden. Aufgrund der Insolvenz von AWAS und dem Ausscheiden als Projektpartner entfällt die detaillierte Auswertung und Interpretation der Ergebnisse durch die Firma AWAS.

Tabelle 25: Laborergebnisse der RUB für die Beprobung der AWAS-Containeranlage.

Elimination von Mikroorganismen der AWAS-Containeranlage						
Einheit	KBE/100 mL					
Methode	TrinkwV 2001 (2015-11)					
>	oberhalb der Bestimmungsgrenze					
<	unterhalb der Bestimmungsgrenze					
Datum	Zulauf			Ablauf		
	Coliforme Bakterien KBE/100 mL	E. coli KBE/100 mL	Eisen mg/L	Coliforme Bakterien KBE/100 mL	E. coli KBE/100 mL	Eisen mg/L
30.09.2021	8.90E+05	2.50E+05	0.52	2.00E+05	2.00E+05	0.19
07.10.2021	4.50E+05	1.60E+05	0.067	7.00E+04	3.20E+04	0.037
12.10.2021	2.00E+05	4.80E+04	0.69	6.20E+04	1.20E+04	0.2
14.10.2021	1.30E+05	2.70E+04	0.45	1.30E+04	3.10E+03	0.13
19.10.2021	3.20E+05	1.20E+05	0.99	1.00E+04	5.00E+02	1.83
21.10.2021	2.40E+05	1.00E+04	0.54	2.00E+05	5.90E+04	0.11
26.10.2021	2.00E+05	3.80E+04	0.52	1.09E+03	1.90E+02	0.21
28.10.2021	4.50E+04	1.20E+03	0.38	5.60E+03	1.20E+03	0.23
Mittelwert	3.09E+05	9.33E+04	0.54	7.94E+04	4.38E+04	0.39
Standardabw.	2.64E+05	8.77E+04	0.28	8.64E+04	7.21E+04	0.64
Standardabw. [%]	85	94	51	109	165	165

Physikalische & chemische Parameter: Kalibrierdaten aus Labor und UV/Vis-Sondendaten

Im April 2021 wurde das UV/Vis-Sondensystem der Firma GO Systemelektronik erfolgreich in der AWAS-Containeranlage installiert (Abbildung 54; Abbildung 55). Aufgrund von verschiedenen Veränderungen, die AWAS an der Anlage in den folgenden Monaten vornahm,

konnte zuerst keine Kalibrierung des Systems erfolgen, da die Kalibrierung spezifisch auf die vorhandene Wassermatrix erfolgt. Darüber hinaus ergab die Analyse im Labor der Siedlungswasserwirtschaft von Wasserproben aus dem Pufferteich eine sehr geringe Belastung an verschiedenen chemischen und physikalischen Parametern. Niedrige Werte erschweren die exakte Kalibrierung der Sonde. Verschiedene Lösungsmöglichkeiten, z.B. externe Kalibrierung oder Nutzung eines anderen Abwasserstroms, wurden erwogen und diskutiert. Letztendlich erfolgte eine Kalibrierung der Sonde unter den bereits gegebenen Bedingungen vor Ort zu Zeiten, als die Anlage im Nominalzustand ohne Unterbrechung lief. Dafür wurden insgesamt über zwei Tage verteilt (05. und 13. 10.2021, Anhang 8.4) 50 Proben genommen und anschließend im Labor nach genormten Methoden auf $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, CSB, AFS (Abfiltrierbare Stoffe) und TDS (Total Dissolved Solids) analysiert. Direkt vor Ort erfolgte die Bestimmung der Trübung. Die Ergebnisse dieser Laboranalysen wurden zur Kalibrierung der Sonden verwendet. Witterungsbedingt wurde der Anlagenbetrieb im November eingestellt. Eine Validierung bzw. Betrachtung der Güte der Sondendaten war aus dem Grund nicht möglich und hätte einen längeren Betrieb benötigt. Für die UV/Vis-Sonden liegen Messdaten für drei Wochen Anlagenbetrieb vor. Die Graphen können dem Anhang 8.5 entnommen werden. Eine Auswertung und Interpretation der Daten unterliegt AWAS.



Abbildung 54: Mess- und Steuerungssystem „BlueBox“+ Spektrometer (GO Systemelektronik GmbH).



Abbildung 55: Ausschnitt der AWAS-Containeranlage mit PP-Filter und UV-Vis Spektrometersystem.

2.6.3 AP 2.1 Ex-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser im peri-urbanen Raum durch die AWAS-Containeranlage und durch ein geeignetes Biokohle-Filtermaterial in Ghana

2.6.3.1 Kleintechnisches Biokohlefiltersystem

Nachdem die RUB in den vergangenen Arbeitspaketen Versuche zur Biokohleherstellung und Filterleistung verschiedener Biokohlen im Labor durchgeführt hat, wurden die nötigen Erkenntnisse gewonnen, um im Jahr 2022 eine Pilotanlage in Ghana aufzubauen und einen Biokohlefilter unter realen Bedingungen und in Verbindung mit einer direkten Nutzung des behandelten Wassers in der Bewässerung über ein Tropfschlauchsystem (AP 2.2) zu testen. Aus den Voruntersuchungen in AP 2.0 zur Wasseraufbereitung mittels Biokohle durch die RUB und zum Bewässerungssystem durch Manotura haben sich folgende für die Filteranlage relevante Bedingungen ergeben:

- Biokohlematerial: Maisspindelkohle
- Stüttschicht und Fixierungsschicht: Kies
- Filtergeschwindigkeit: 0,1 m/h
- Vorbehandlung durch Sedimentation
- Auslass des Speichertank auf 1 m Höhe, um genügend Vordruck für das Bewässerungssystem zu erzeugen
- Aufbereitung von 300 L pro Tag für die Bewässerung

Ein weiteres Ziel ist es, das System als low-budget und low-tech System aufzusetzen, um damit eine Zugänglichkeit für die intendierten Nutzer, urbane Kleinbauern, zu ermöglichen. Daraus ergeben sich zudem folgende Bedingungen:

- Platzsparend, da es im städtischen Umfeld eingesetzt werden soll
- Stromloser Betrieb → gravitationsgetrieben
- Einsatz lokal verfügbarer Materialien zum Bau der Pilotanlage

Neben den Bedingungen an die Anlage gab es noch weitere Bedingungen an den Versuchsstandort in Ghana. Diese wurden Ende 2021 formuliert und Anfang 2022 mit den ghanaischen Partner besprochen, wodurch diese einen geeigneten Versuchsstandort finden konnten. Im Frühjahr 2022 wurde sich auf die Feldversuche vorbereitet, sodass Ende April die RUB nach Ghana reiste, um das Biokohlefiltersystem zu bauen und in einem mehrwöchigen Versuchsbetrieb zu untersuchen. Diese Praxisphase in Ghana ging bis Anfang August.

Standort

Die Pilotanlage wurde im Stadtteil Legon in Accra, Ghana aufgebaut und betrieben. Der Partner Accra Sewage Improvement Project (ASIP) stellte dort eine Fläche ihres gesicherten Geländes für den Aufbau der Pilotanlage zur Verfügung. Das Wasser wurde aus dem Fluss Onyasia entnommen, welcher durch North Legon verläuft und in einem der Hauptflüsse Accras, dem Odaw River mündet. Die folgenden Satellitenbilder zeigen den Verlauf des Onyasia Bachs vom Teich im Botanischen Garten aus, bis er in den Odaw River mündet. Zudem ist die Entnahmestelle (Abbildung 56) an der Oriental Str. mit einem roten Kreuz markiert sowie die Versuchsfläche auf dem Gelände der *Legon Sewage Treatment Plant* mit einem roten Rechteck markiert.

North Legon ist ein Wohnviertel mit einigen kleinen Geschäften, Restaurants und Imbissen und grenzt an das Gelände der *University of Ghana* und den botanischen Garten sowie die Abwasseraufbereitungsanlage *Legon Sewage Treatment Plant*. Diese leitet die mittels Abwasserteichanlage gereinigten Abwässer in den Onyasia Stream ein. Zusätzlich konnten entlang des Flusses eine Vielzahl von Einleitungen von Abwasser aus Haushalten und auch Restaurants festgestellt werden (Abbildung 57), die zu einer Verschmutzung des Flusses führen. Dennoch wird das Wasser des Flusses zur Bewässerung von kleinen Anbauflächen von Gemüse und Getreide genutzt, wie in Abbildung 58 zu sehen ist.



Abbildung 56: Satellitenaufnahme (Google Earth) des Standortes: links zeigt den Verlauf des Onyasia Stream (blau) durch North Legon sowie die Versuchsfläche (rotes Rechteck) und die Wasserentnahmestelle (rotes Kreuz) und rechts die direkte Umgebung



Abbildung 57: Abschnitte des Onyasia z.T. mit Einleitung (graue Rohre) von Haushalten (S. Krüger).



Abbildung 58: Gemüseanbau am Onyasia (verläuft entlang der Bananenbäumen rechts) (S. Krüger).

Aufbau und Funktionsweise

Unter Berücksichtigung der anfangs aufgeführten Bedingungen wurde die Filtrationsanlage als 5-stufiger Behandlungskette konzipiert, bestehend aus einer Vorlage (1), einem Wasserstandskontrolltank (2), einem Biokohle-Grobfilter (3), einem Biokohle-Feinfilter (4) und einem Wasserspeicher (5) für das behandelte Wasser. Die Anlage ist schematisch in Abbildung 59 dargestellt, und eine Fotografie der realen Anlage ist unter Abbildung 60 aufgeführt.

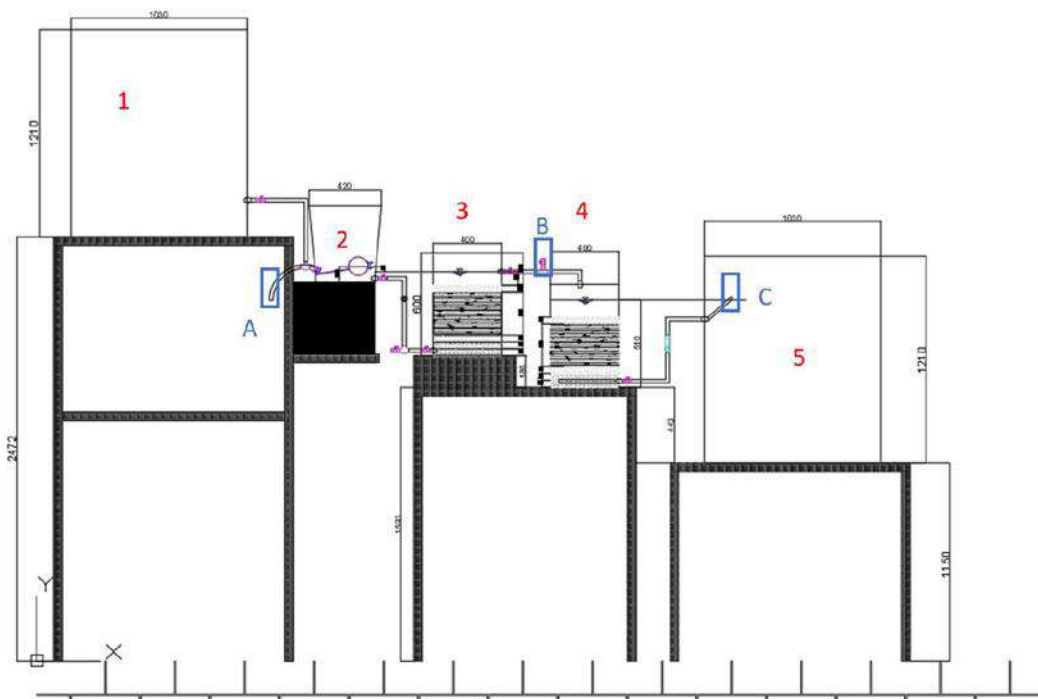


Abbildung 59: Technische Zeichnung des Biokohle-Filtersystems.



Abbildung 60: Kleintechnisches Biokohle-Filtersystems (S.Krüger).

Die erste und die letzte Stufe dienen vorrangig der Wasserspeicherung, wofür jeweils ein schwarzer 1000-Liter-Polytank® zum Einsatz kam. Poly tanks dieser Größe haben einen Durchmesser von 1,05 m und eine Höhe von 1,21 m. Der Auslass der Vorlage befand sich etwa 5 cm über dessen Boden, um zu verhindern, dass sedimentierte Stoffe in das System gespült werden. Zusätzlich wurde ein Filtersieb im Inneren der Vorlage vor dem Auslass installiert, um das Eindringen von Feststoffen in das System zu reduzieren.

Die zweite Einheit der Behandlungsanlage stellt der Wasserstandskontrolltank (WLC, water level control tank) dar. Er hatte ein Gesamtvolumen von 40 L. Das Hauptmerkmal dieser Stufe ist das eingebaute Schwimmventil (s. Abbildung 61), das einen konstanten Wasserstand sicherstellte, um die hydraulische Belastung auf die Filterstufen zu kontrollieren. Neben diesen beiden praktischen Funktionen fungieren beide Einheiten auch als Sedimentationsraum und somit als eine Vorbehandlung des Wassers.

Hinter dem Wasserstandskontrolltank wurden die beiden Filtrationsstufen eingebaut. Dabei ist die Filterfläche entsprechend der Filtergeschwindigkeit und dem mengenmäßigen Behandlungsziel dimensioniert worden. Das Behandlungsziel der Anlage sind ca. 300 L Wasser pro Tag, um einem konstanten Volumenstrom für die Nutzung in der Tröpfchenbewässerung (AP2.3) bereitzustellen. Die Filtergeschwindigkeit ist mit 0,1 m/h vorgegeben, woraus sich eine benötigte Filterfläche von ca. 0,123 m² bzw. bei einem runden Behälter ein Durchmesser von ca. 40 cm ergibt. Der Volumenstrom der Anlage ergibt sich damit zu 12,57 L/h. Mit einem Durchmesser von ca. 40 cm waren weiße, zylindrische 60-Liter-Polyethylenfässern verfügbar. Diese werden von Entradia Sweden hergestellt, für Lebensmittelverpackungen verwendet und danach auf den Märkten in Ghana weiterverkauft.



Abbildung 61: Wasserstandskontrollbehälter mit Schwimmerventil (R. Voß).



Abbildung 62: Unterste Stüttschicht mit Drainagerohr des Feinfilters (R. Voß).



Abbildung 63: Grobfilter nach Befüllung mit Maisspindelbiokohle 4-8 mm (R. Voß)



Abbildung 64: Feinfilter nach Befüllung mit Maisspindelbiokohle 1-4 mm (R. Voß)

Die erste Filterstufe kann als vertikaler aufwärts durchströmter Grobfilter (roughing filter, RF) eingestuft werden. Die zweite Stufe, Fine Filter (FF) wurde wie auch die Säulenversuche im Labor entsprechend eines Langsamfilters konzipiert. Er wurde von oben mit dem Filtrat des Grobfilters beschickt, welches die Kies- und feine Biokohleschicht durchströmt bevor es über ein Drainagerohr, 3 cm oberhalb des Fassbodens, abfließt (Abbildung 62).

Beide Filterbetten hatten eine Gesamttiefe von 41 cm. Der Aufbau der beiden Filterstufen ist in Abbildung 65 (Grobfilter) und Abbildung 66 (Feinfilter) dargestellt. Beide Filterstufen bestehen, von unten beginnend, aus einer insgesamt 12 cm dicken Kiesschichten mit abnehmendem Durchmesser, einer 25 cm dicken Biokohleschicht und darüber einer weiteren 4 cm dicken Schicht aus dem feinsten Kies. Die oberste Schicht auf der Biokohle verhindert dabei das Aufschwimmen dieser.

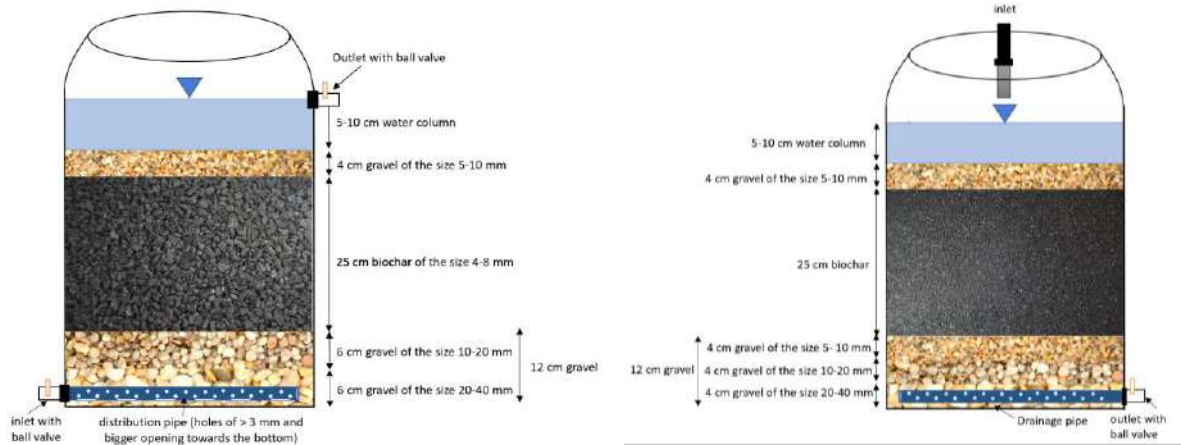


Abbildung 65: Aufbau des Biokohle-Grobfilters.

Abbildung 66: Aufbau des Biokohle-Feinfilters.

Die größte Fraktion bestand aus Kies mit einem Durchmesser von ca. 1 bis 4 cm und einer Porosität von 41 %. Die beiden folgenden hatten Durchmesser zwischen ca. 0,6-1,8 cm und ca. 0,5-1 cm bzw. eine Porosität von 40 % und 39 % (Abbildung 67). Für eine möglichst gleichmäßige Schüttdichte wurden die Filter nach dem Befüllen jeder Schicht leicht gerüttelt.



Quarzkies
Grob 1 bis 4 cm



Quarzkies
Mittel 0,6-1,8 cm



Quarzkies
Fein 0,5-1 cm

Abbildung 67: Kies für den Filteraufbau (S. Krueger)

Die eingesetzte Biokohle wies die folgenden Eigenschaften auf: Die Biokohle der RF-Stufe hatte eine Korngröße von 4-8 mm Durchmesser und eine Porosität von 58,5 %. Die Biokohle für die Feinfiltrationsstufe hatte einen Durchmesser von 1-4 mm und eine Porosität von 56 %. Die Biokohle für dieses Filtersystem wurde in mehreren Chargen in Deutschland Ende 2021 und Anfang 2022 hergestellt. Die Pyrolysebedingungen sind in AP 2.0 beschrieben.

Alle Tanks waren in einer Reihe angeordnet und mit Halbzoll-HDPE-Rohren verbunden. Für einen pumpfreien Betrieb wurde ein Gefälle zwischen den Anlagenstufen vorgesehen, indem unterschiedlich hohe Gerüste aus Metall und Holz zur Erhöhung genutzt wurden. Um eine ausreichende Druckhöhe für die nachgeschaltete Tröpfchenbewässerung zu gewährleisten, wurde die gesamte Behandlungsanlage mehr als einen Meter über dem Boden installiert. Die genauen Höhenunterschiede zwischen den Wasserspiegeln der einzelnen Stufen sind ebenfalls Abbildung 59, Abbildung 65 und Abbildung 68, Abbildung 66 zu entnehmen.

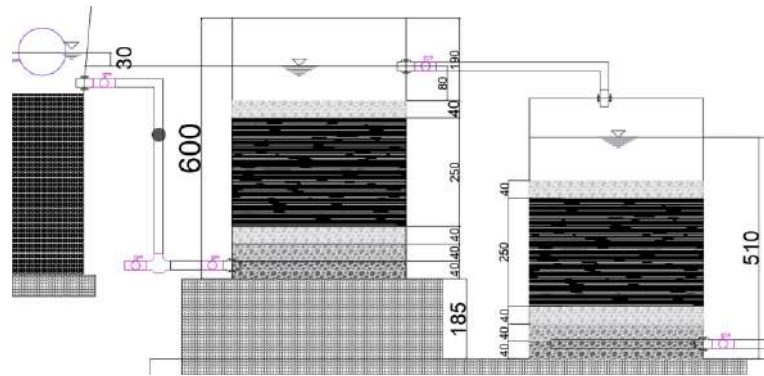


Abbildung 68: Technische Zeichnung der Filterstufen.

Da das System nach dem Befüllen des Vorlagebehälters kontinuierlich ohne Fremdenergie laufen sollte, wurde ein stetig sinkender Wasserstand vorausgesetzt. Das Metallgerüst sah für einen fast leeren Rohwasserspeicher eine minimale Gesamthöhe von 2,67 m vor. Der Wasserstandskontrollbehälter wurde auf einer zweiten Plattform des Metallgerüsts 30 cm darunter platziert. Im Hinblick auf das hydraulische Verhalten ist der Wasserstandskontrollbehälter von starker Relevanz. Durch das eingebaute Schwimmventil wurde ein konstanter Wasserstand im WLC-Behälter erreicht. Somit wurde auch eine konstante Wasserstands Differenz zwischen diesem und der ersten Filtrationsstufe gewährleistet. Bei einer direkten Verbindung zwischen der Vorlage und der Filterstufe hätten sich aufgrund des sinkenden Wasserspiegels in der Vorlage, da diese batchweise gefüllt wurde, der Volumenstrom entsprechend verändert. Zusätzlich wurde ein Muffenschieber in die Verbindungsleitung zwischen WLC-Tank und RF eingebaut. Durch Änderung der Querschnittsfläche konnte der Volumenstrom geregelt und der gewünschte Wert von 12,6 L/h eingestellt werden. Zusätzlich zur Regelung des Absperrschiebers wurde die Wasserstands Differenz zwischen WLC-Tank und RF zur Ermittlung des richtigen Volumenstroms herangezogen. Zu diesem Zweck wurde die Stellung der Schwimmventile während des Betriebs mehrfach angepasst. So schwankte der Wasserstand im WLC-Tank um +/- 2 cm.



Abbildung 69: Versuchsgelände in der Vorbereitung. Im Vordergrund: Feld für die Bewässerungsversuche, Im Hintergrund: Bau der Gerüste für das Filtersystem (R. Voß)



Abbildung 70: Aufstellung der Gerüste: Metallgerüst mit Betonfundament (li.), Holzgerüste auf begradigter Plattform, um vor Nässe zu schützen (R. Voß)

Sowohl der RF als auch der FF wurden auf das höhere Holzgerüst gesetzt. Der RF wurde zusätzlich auf ein kleines Podest gestellt, um die Feinfilterstufe von oben durch den Deckel zu beschicken und somit ausreichend Raum für die Wassersäule zu lassen. Bei höheren Behältern ist dies jedoch nicht notwendig. Hinter der Feinfilteranlage wurde auf dem kleineren Holzgerüst der Wasserspeicher für das behandelte Wasser installiert. Er wurde auf der angestrebten Höhe von 1 m platziert. Somit wurde der Volumenstrom aus dem FF in einer Gesamthöhe von 2,1 m in den Wasserspeicher eingeleitet. Diese Höhe wurde mit einem über zwei Winkel-Verbindungen beweglichen PE-Rohr einstellbar gehalten, wodurch der Wasserstand im Feinfilter kontrolliert werden konnte. Der Wasserstand in der Feinfilterstufe wurde in einer Höhe von 51 cm ab Filterboden und damit etwa 10 cm über der obersten Kiesschicht des Feinfilters eingestellt. Wie in Abbildung 68 zu sehen ist, bot das freie Volumen oberhalb der Überstandswasserschicht in der biologisch aktiven Feinfilterstufe Platz für einen steigenden Wasserspiegel aufgrund des Druckverlustes durch die wachsende biologische Schicht.

In der Verbindungsleitung zwischen der Feinfiltrationsstufe und dem Vorratsbehälter wurde ein Durchflussmesser aus U-PVC von der Firma "HT Connect GmbH und Co. KG" integriert. Um Algenwuchs im lichtdurchlässigen Durchflussmesser zu minimieren wurde eine Abdeckvorrichtung gebaut. Der Zu- und Abfluss jedes Tanks konnte manuell durch den Einbau von Kugelhähnen abgesperrt werden.

Durchführung

Der Bau der Filteranlage wurde Ende Mai 2022 fertiggestellt. Die darauffolgenden Tage wurde das Filterbett gespült. Nach einer Woche Einlaufzeit begann der reguläre Versuchsbetrieb ab dem 29.05.2022 und dauerte bis zum 18.08.2022. Eine Übersicht über den typischen Versuchsbetrieb gibt Abbildung 71F. Dreimal pro Woche wurde Wasser aus dem Onyasia Stream in den Vorlagetank gefüllt. Da das Versuchsgelände sich nicht in direkter Nähe zur

Wasserentnahmestelle befand, wurde das Wasser mit einer mobilen Motorpumpe entnommen, in einen Tank auf einen Pick-up-Truck gepumpt und zum Versuchsgelände befördert, wo es mit Hilfe der Motorpumpe in den Vorlagetank gepumpt wurde. Bei der Motorpumpe handelte es sich um eine Wasserpumpe mit Benzinmotor, Modell 30CX, mit einer Saugleistung von 7 m, einer Leistung von 6,5 PS und einem Durchmesser von 3 Zoll.

2022		Juli				
MONTAG	DIENSTAG	MITTWOCH	DONNERSTAG	FREITAG	SAMSTAG	SONNTAG
27	28	29	30	01	02	03
04 Fetching water	05 5. Sampling MiBi: Filter Filter drums covered in tarp	06 Fetching water	07 6. Sampling MiBi: Filter 6. Sampling chem:Filter	08 Fetching water	09	10
11 Fetching water	12 7. Sampling MiBi: Filter	13 Fetching water	14 8. Sampling MiBi: Filter 7. Sampling chem:Filter 1. Sampling Irrigation	15 Fetching water	16	17
18 Fetching water	19 9. Sampling MiBi: Filter	20 Fetching water	21 10. Sampling MiBi: Filter 8. Sampling chem:Filter 2. Sampling Irrigation	22 Fetching water	23	24
25 Fetching water	26 11. Sampling MiBi: Filter 3. Sampling Irrigation	27 Fetching water	28 12. Sampling MiBi: Filter 9. Sampling chem:Filter 4. Sampling Irrigation	29 Fetching water	30	31

Abbildung 71: typischer Ablaufplan exemplarisch für Juli (Parameter: MiBi = mikrobiologisch, chem =chemisch).

Da der Versuchszeitraum aufgrund Veränderung im Zeitplan aufgrund der Covid-Pandemie während der Regenzeit stattfand, wurde das Wasser aus dem Onyasias Stream im Vorlagetank zusätzlich mit rohem Abwasser vom Zulauf der anaeroben Teiche der Kläranlage Legon im Verhältnis 1:100 gespickt. Dadurch sollten die Verdünnungseffekte, die sich aufgrund des Regens ergeben und zur niedrigeren Belastung der Gewässer während der Regenzeit im Vergleich zur Trockenzeit führen, ausgeglichen werden. Die Bauern benötigen Wasser aus den Bächen und Flüssen in erste Linie während der Trockenzeit, weshalb die Belastung zu der Zeit auch von Relevanz ist. Für die Einschätzung was den typischen Belastungszustand des Onyasias repräsentiert wurde auf Literatur zurückgegriffen (Adomako et al. 2021). Das gemischte Testwasser erbrachte so eine *E. coli*-Belastung von etwa 10^4 KBE/100 mL.

Während der Befüllung des Vorlagetanks wurde der Betrieb kurz gestoppt (im Regelfall < 20 min), ansonsten lief die Anlage über den Versuchszeitraum kontinuierlich.

Der Zu- und Ablauf der Pilotanlage wurde zweimal wöchentlich hinsichtlich *E. coli*, Gesamtcoliforme Bakterien und *C. perfringens* sowie Trübung, Leitfähigkeit und pH-Wert unter Berücksichtigung der Retentionszeit der Filteranlage von ca. 7,5 h beprobt. Einmal wöchentlich wurden Proben am Zu- und Ablauf unter Beachtung der Retentionszeit für die Untersuchung auf chemische Parameter genommen. Im Rahmen der Betriebskontrolle wurde Trübung, Leitfähigkeit und pH-Wert zusätzlich stichprobenartig am Zulauf, Ablauf und zwischen den Filterstufen an weiteren Tag gemessen. Die Probenahmestellen an der Anlage

sind in Abbildung 59 blau hervorgehoben und mit "A B C" beschriftet. Gemäß der Abbildung wurden die Zulaufproben an der Stelle "A" entnommen. Er befindet sich zwischen dem ersten Lagertank und dem WLC-Tank. Der Kugelhahn auf Position "B" wurde für die Entnahme der Proben zwischen RF und FF verwendet. Die Ablaufprobe wird an der Probenahmestelle "C", wo das Filtrat des feinen Biokohlefilters drucklos in den Wasserspeicher läuft, genommen. Nachdem die Tröpfchenbewässerung ab Mitte Juli an die Filteranlage angeschlossen war, wurde auch verteilt auf den restlichen Versuchszeitraum Mischproben von den Emitttern am Anfang, welche sich aus Aliquoten der Proben an den Standorten 1 zusammensetzt, und am Ende der Tropfschläuche, welche sich aus Aliquoten der Proben an den Standorten 2 zusammensetzt, genommen (Abbildung 72). Diese wurden auf *E. coli*, Calcium, Natrium, Magnesium, Trübung, Leitfähigkeit und pH-Wert untersucht.

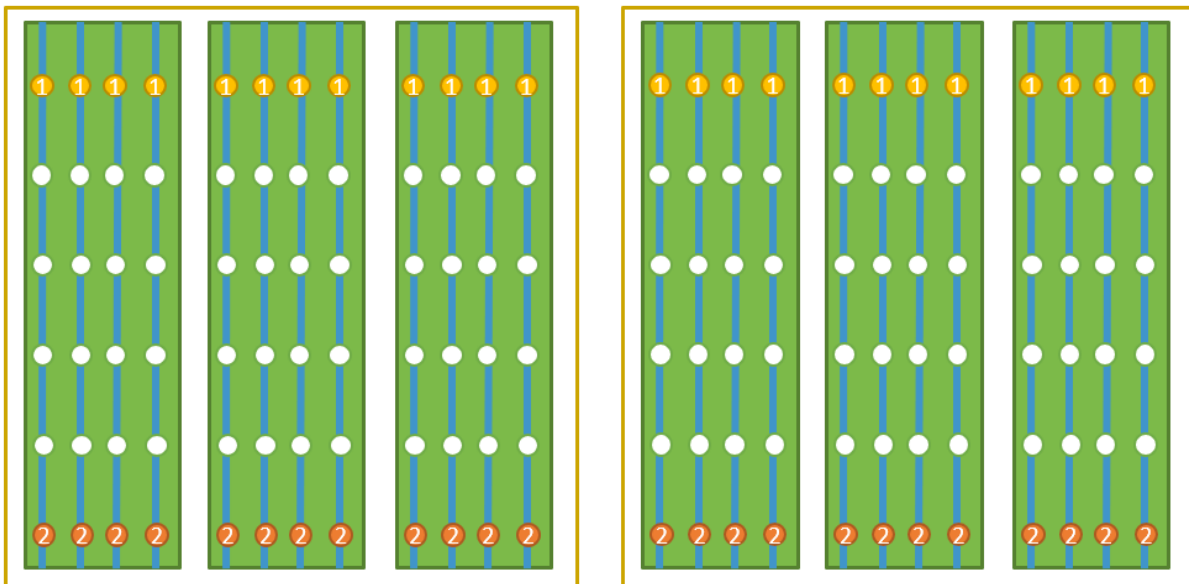


Abbildung 72: Schematische Übersicht über die Probenahmestellen an den bewässerten Feldern. In blau sind die Tropfschläuche eingezeichnet; Kreise stellen die von Manotura untersuchten Emittter dar; farbige Kreise wurden zusätzlich für weitere Parameter durch die RUB beprobt.

Herausforderungen und Anpassungen im Betrieb

Im Versuchsbetrieb ergaben sich einige Herausforderungen, die zu Anpassungen an der Anlage führten und hier kurz aufgeführt werden:

- Im Einlass des Grobfilters sammelte sich innerhalb kurzer Zeit (Stunden bis 3 Tage) organisches Material an, was den Zulauf blockierte und zu einem Abfall des Volumenstroms führte. Durch Öffnen des unteren Ventils zwischen Wasserstandkontrolltank und dem Grobfilter konnte dieser rückgespült und die Ablagerungen entfernt werden. Der Zulauf setzte sich jedoch schnell wieder zu. Während der ersten Betriebszeit wurden mehrere kleineren Anpassungen gemacht, die jedoch nicht den gewünschten Effekt ergaben. Aus dem Grund wurde das Filtermaterial schließlich entfernt und ein Verteilungsrohr installiert, um eine punktuelle Belastung und das dortige

Zusetzen zu vermeiden. Danach wurde die Kiesschicht neu aufgebaut, bestehend aus den beiden gröberen Kiesfraktionen. Der Rest des Filterbetts wurde wie zuvor mit dem alten Material aufgebaut. Dadurch konnte ein etwas stabilerer Volumenstrom erreicht werden, jedoch musste auch hier regelmäßig rückgespült werden.

- Die Filterbehälter waren lichtdurchlässiger als angenommen, was zu einem Algenwachstum in der Wasserüberstandsschicht führte und somit mit der Schmutzdecke interferierte. Dies wurde behoben, indem die Filter mit einer lichtundurchlässigen Plane verkleidet wurden. Danach starben die Algen ab, welche dann entfernt wurden. Hierdurch ergaben sich jedoch veränderte Bedingungen für die Schmutzdecke.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse aus dem Pilotbetrieb des Biokohlefiltersystems und für die Bereitstellung von Bewässerungswasser vorgestellt.

Biokohlefilteranlage

Der pH-Wert, die Leitfähigkeit und Trübung wurde unter der Woche jeden Tag mindestens einmal als Stichproben bestimmt (Tabelle 26). Die Ergebnisse dieser Analysen hinsichtlich der Trübung zeigen, dass eine erhebliche Verringerung der Trübstoffe durch die Pilotanlage erreicht wird (Abbildung 73). Im Zulauf der Anlage liegt die durchschnittliche Belastung bei $31,0 \pm 47,4$ NTU. Nach der ersten Filterstufe liegt die Trübung nur noch bei $9,5 \pm 8,4$ NTU, was bedeutet, dass eine Reduktion von ca. 70 % vorliegt. Dieser Wert liegt unter 10 NTU, welcher als Zielwert in der Langsamsandfiltration vorgeschlagen wird (Huisman 1974). Durch den Grobfilter konnte die Trübung so weit reduziert werden, dass eine weitere Aufbereitung durch einen feineren Filter möglich ist. Die gemessene durchschnittliche Trübung des Ablaufs der Filteranlage, nach dem Biokohle-Feinfilter, beträgt $2,5 \pm 2,1$ NTU. Die zweite Filterstufe eliminiert somit 73 % der Trübstoffe, die den Grobfilter passieren konnten. Beide Filterstufen zeigen somit eine ähnliche relative Eliminationsleistung. Über das gesamte Filtersystem, zwischen Ablauf des Vorlagebehälters (Probestelle A) und Zulauf des Wasserspeichers (Probestelle B) wurde im Durchschnitt eine Trübungsreduktion von 92 % beobachtet.



Abbildung 73: Wasserproben von Zulauf, nach dem Grobfilter und vom Ablauf (v.r.n.l.) (S. Krüger).

Die Leitfähigkeit (LF) im Zulauf liegt im Durchschnitt bei $1047 \mu\text{S}/\text{cm}$. Der Ablaufwert liegt mit $1051 \mu\text{S}/\text{cm}$ etwas oberhalb dem Zulaufwert. Die Differenz ist jedoch sehr niedrig und vernachlässigbar, weshalb daraus zu schließen ist, dass das Filtersystem keinen Einfluss auf die Leitfähigkeit aufweist. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den pH-Wert. Dieser liegt im Zulauf bei 7,7 (bei $27,1^\circ\text{C}$) und im Ablauf bei 7,6 (bei $27,4^\circ\text{C}$). Der pH-Wert verändert sich nicht signifikant und bleibt im neutralen Bereich.

Tabelle 26: LF, pH-Wert und Trübung gemessen für die Biokohlefilter-Pilotanlage.

Arithmetisches Mittel	LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	pH [-]	Trübung [NTU]
Zulauf	1047 +/- 87,5	7.66 +/- 0,2	31.0 +/- 47.2
Nach RF	1048 +/- 90,0	7.64 +/- 0,1	9.5 +/- 8.4
Ablauf (nach FF)	1051 +/- 95,7	7.58 +/- 0,1	2.5 +/- 3.8

Bewässerungssystem

Die Leitfähigkeit am Ablauf der Emitter der Tropfschläuche verändert sich nicht gegenüber den Werten der Filteranlage, jedoch ist ein geringer Anstieg des pH-Wertes zu verzeichnen. Dieser liegt für das Bewässerungswasser bei ca. 8. Die Trübung ist im Vergleich zum Filterablauf an den Emittern höher. Die Proben aus den Emittern am Anfang der Tropfschläuche wiesen 5,4 NTU auf. Am Ende des Tropfschlauches liegt eine Trübung von 4,7 NTU vor (Tabelle 27). Eine Zunahme gegenüber dem Ablauf des Filters kann unter anderem durch Verunreinigung des Wassers im Speichertank kommen. Dieser wurde im Versuchsbetrieb immer wieder geöffnet, um Proben zuziehen oder den Volumenstrom über Auslitern zu bestimmen. Dadurch können Verschmutzungen eingetragen und phototrophe Prozesse, wie beispielsweise das Wachstum von Algen, aufgrund des erhöhten Lichteinfalls, verstärkt worden sein.

Tabelle 27: LF, pH-Wert und Trübung gemessen an den Emittern der Tropfschläuche.

Arithmetisches Mittel	LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	pH [-]	Trübung [NTU]
Emitter_start	1046 \pm 28	7,99 \pm 0,14	5,4 \pm 5,6
Emitters_end	1049 \pm 26	8,01 \pm 0,14	4,7 \pm 3,1

Die Proben aus den Emittern wurde zusätzlich auf Natrium, Kalzium und Magnesium untersucht, um das Natrium-Adsorptionsverhältnis (SAR, Sodium adsorption ratio) zu bestimmen. Der SAR-Wert von Wasser ist ein gängiger Parameter, um die Eignung des Wassers zur landwirtschaftlichen Bewässerung zu prüfen. Der SAR-Wert wird weithin als der wichtigste Faktor angesehen, der bei der Bewertung der möglichen Natriumgefährdung von Bewässerungswasser, das auf einen Boden aufgebracht wird, zu berücksichtigen ist. Höhere Natriumgehalte im Boden- oder Bewässerungswasser führen zu einer Verringerung der Bodenstabilität, der Wasserinfiltrationsraten und einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, dass sich Natrium in toxischen Mengen im Blattgewebe akkumuliert. Im Allgemeinen haben hohe Werte dieses Parameters schädliche Auswirkungen (Sattari et al. 2018). In Tabelle 28 sind die mittleren SAR-Werte, die im Zulauf des Filters und im Ablauf der Tropfschläuche bestimmt wurden, aufgeführt.

Tabelle 28: SAR-Werte im Zulauf des Filtersystems und Ablauf der Tropfschläuche.

	SAR [-]		
Zulauf Filter	3,64	\pm	17,2 %
Ablauf Emitter	3,32	\pm	18,0 %

Der durchschnittliche SAR-Wert im Ablauf liegt bei 3,3, was gegenüber dem Zulauf eine Abnahme um 8,7 % darstellt. Der Filter wirkt sich somit leicht positiv auf die Qualität des Wassers bei einer Nutzung in der landwirtschaftlichen Bewässerung aus.

Biokohlefilteranlage

Zusätzlich zu den physikalischen Parametern wurden auch ausgewählte chemische Stoffe bestimmt. In den folgenden Tabellen (Tabelle 29 und Tabelle 30) ist die durchschnittliche Eliminationsleistung des Filtersystems zusammengefasst.

Für den Parameter TDS zeigt sich, dass der Filter gelöste Stoffe nicht zurückhält. Die Zulaufbelastung durch TDS liegt im Mittel bei 705 mg/L und im Ablauf bei 700 mg/L. Dies deckt sich mit den Ergebnissen für die Leitfähigkeit, da TDS und Leitfähigkeit miteinander korrelieren. Die mittlere Konzentration von CSB im Zulauf liegt bei 60 mg/L und wird durch den Filter auf 37 mg/L reduziert. Der CSB wurde somit um ca. 39 % eliminiert. Bei Eisen lag der Rückhalt bei 13 % bei einer hohen Standardabweichung, sodass im Ablauf eine mittlere Konzentration von 0,12 mg/L vorliegt.

Da das Wasser für die Bewässerung eingesetzt werden soll, ist ein Rückhalt von Nährstoffen nur bedingt gewünscht. Im Ablauf wurden im Mittel folgende Konzentrationen bestimmt: Gesamt-Phosphor 1,14 mg/L; Ortho-Phosphat 0,74 mg/L; Ammonium- Stickstoff 0,01 mg/L; Nitrat- Stickstoff 2,9 mg/L und Gesamtstickstoff 1,74 mg/L. Phosphorverbindungen wurden nur geringfügig abgebaut mit bis zu 10 %, jedoch wurden Stickstoffverbindungen um 47 % eliminiert, was bedeutet, dass eine teilweise Nitrifikation und Denitrifikation im Filtersystem stattfinden.

Tabelle 29: Reduktion von TSS, TDS, CSB und Eisen durch das Filtersystem.

	Total Suspended Solids (TSS) %	Total Dissolved Solids (TDS) %	Chemischer Sauerstoff (CSB) %	Eisen %
arithm. Mittel	34,9	-0,9	39,2	12,9
Standardabw.	37,6	5,2	28,9	66,8

Tabelle 30: Reduktion von Stickstoff- und Phosphorverbindungen.

	Ammonium-Stickstoff %	Nitrat-Stickstoff %	Gesamtstickstoff %	Gesamt-Phosphor %	Ortho-Phosphat %
arithm. Mittel	16,7	43,6	47,3	10,3	4,9
Standardabw.	25,8	46,4	55,3	21,0	28,6

Mikrobiologie

Biokohlefilteranlage

Die Ergebnisse, die für die drei mikrobiologischen Parameter, Gesamt Coliforme Bakterien, *E. coli* und *C. perfringens*, bestimmt wurden, sind in Abbildung 74 zusammengefasst. Die Konzentrationsverläufe über den Versuchszeitraum sind in den darauffolgenden Graphen dargestellt.

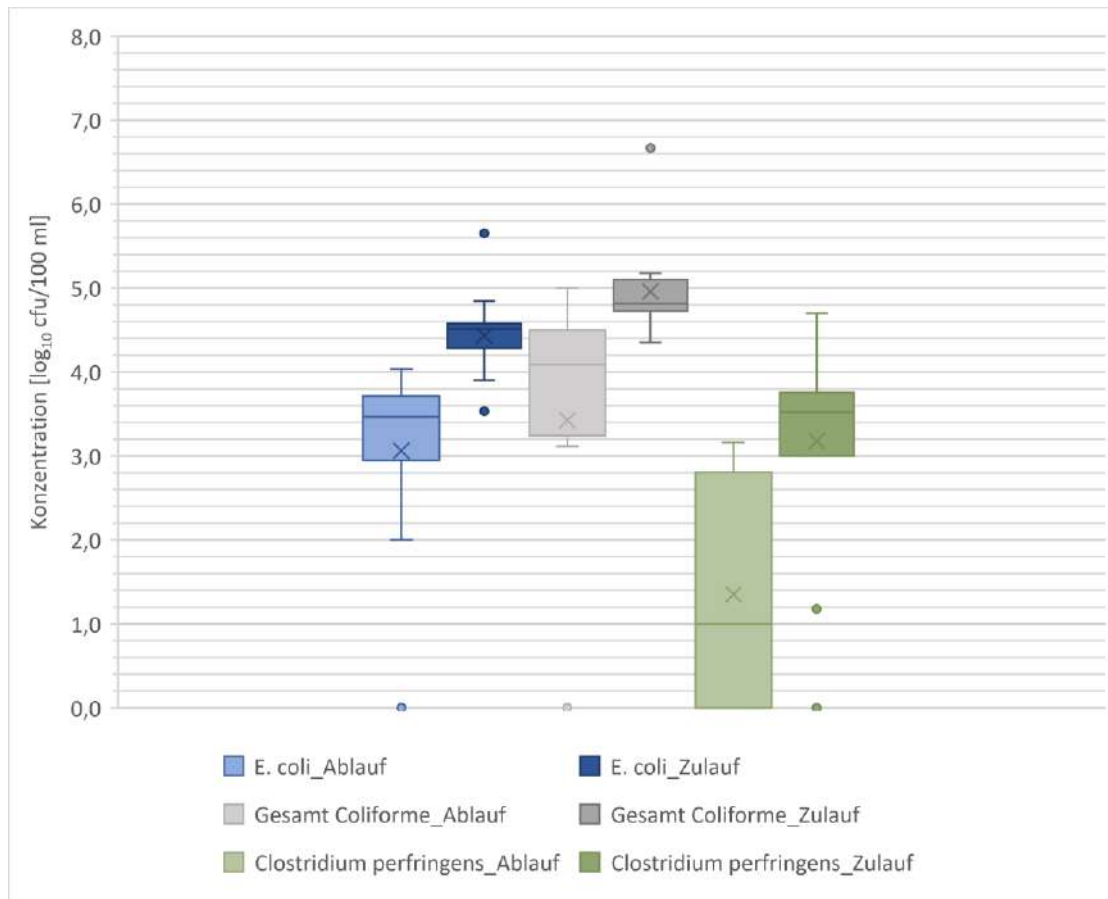


Abbildung 74: Konzentrationen von Gesamtcoliformen Bakterien, *E. coli* und *C. perfringens* als Boxplot (Unplausible Daten, die beispielsweise durch Probenvertausch im Labor entstanden sein könnten, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen).

In den Zulaufproben wurden im Durchschnitt die höchsten Belastungen mit Gesamtcoliforme Bakterien festgestellt. Ihr Mittelwert im Zulauf betrug $3,6 \cdot 10^4$ KBE/100 ml. Die *E. coli*-Konzentration war im Durchschnitt etwas niedriger und betrug im Mittel $5,4 \cdot 10^4$ KBE/100 ml. Bei den Nachweisen von *C. perfringens* wurde eine mittlere Konzentration von $6,4 \cdot 10^3$ KBE/100 ml im Zulauf gemessen. Die Konzentrationen im Ablauf liegen im Durchschnitt für Gesamtcoliforme Bakterien bei $2,4 \cdot 10^4$ KBE/100 ml, für *E. coli* bei $3,1 \cdot 10^3$ KBE/100 ml und für *C. perfringens* bei $3,5 \cdot 10^2$ KBE/100 ml (Abbildung 75 bis Abbildung 77).

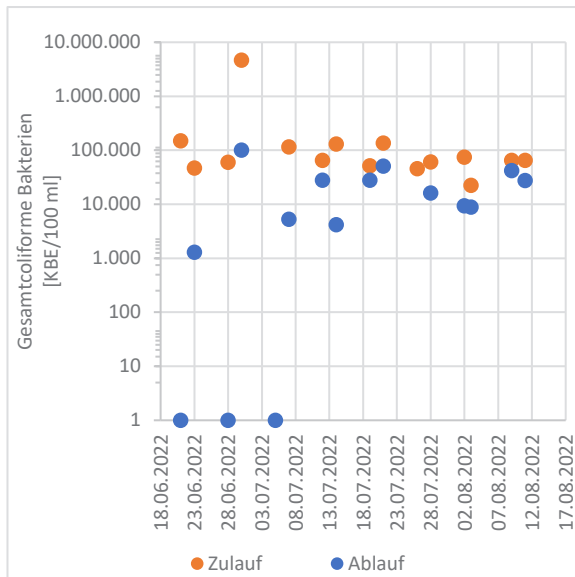


Abbildung 75: Zu- und Ablaufkonzentrationen von Gesamt Coliformen Bakterien.

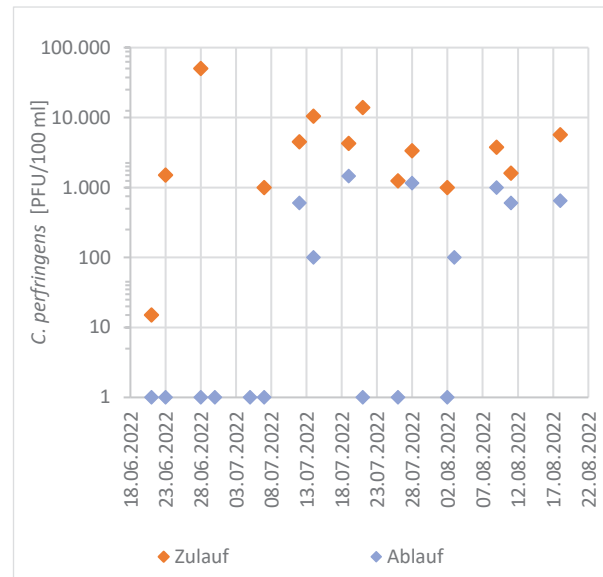


Abbildung 76: Zu- und Ablaufkonzentrationen von C. perfringens.

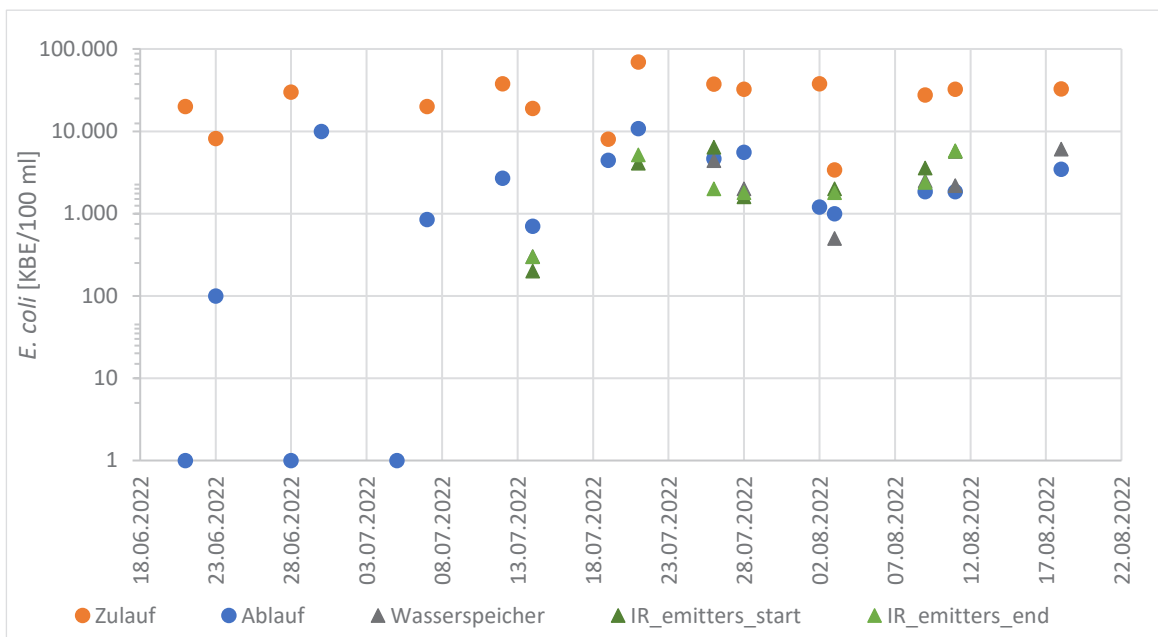


Abbildung 77: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Filtersystems und des Bewässerungsversuch von E. coli.

Tabelle 31 zeigt logarithmischen Werte der Eliminationsleistung zwischen den Probenpaaren von Zulauf und Ablauf unter Berücksichtigung der Retentionszeit. Der mittlere Rückhalt von *C. perfringens* beträgt 2 log-Stufen, was der höchste beobachtete Wert ist. *E. coli* wird durch den Filter um 1,53 log-Stufen eliminiert, gefolgt von Gesamt Coliforme Bakterien mit 1,31 log-Stufen. Die beobachtete Reduktion für alle Mikroorganismenarten in dieser Feldstudie liegt unterhalb der Werte, die für den gleichen Biokohletyp in Laborversuchen erreicht wurden. Dabei handelt es sich um eine häufige Beobachtung, die auf die kontrollierten Bedingungen im Laborversuch im Vergleich zu realen Bedingungen im Feldversuch zurückzuführen ist. Mit einer Reduktion von 1,3 bis 2,0-log Stufen konnte auch unter realen Bedingungen durch die

Pilot-Biokohlefilteranlage für die betrachteten mikrobiologischen Parameter ein signifikanter Rückhalt festgestellt werden.

Tabelle 31: Elimination von Mikroorganismen durch die Pilotanlage.

Elimination log ₁₀ -Stufen	Gesamt Coliforme [log ₁₀ -Stufen]	<i>E. coli</i> [log ₁₀ -Stufen]	<i>Clostridium perfringens</i> [log ₁₀ -Stufen]
Arithmetisches Mittel	1.33	1.53	2.00
Standardabw.	1.57	1.19	1.49

Bewässerungssystem

Zusätzlich zu den Filtersystem wurde anhand von *E. coli* die Qualität des gefilterten Wassers im Wasserspeicher des behandelten Wassers, am Anfang des Emitters und am Ende der Tropfschläuche betrachtet. Im Wasserspeicher wurde eine mittlere Konzentration von $2,6 \cdot 10^3$ KBE/100 ml gefunden. Eine leicht höhere Konzentration von $3,4 \cdot 10^3$ KBE/100 ml wurde in den Proben am Anfang des Tropfschlauches gemessen. In diesen Abschnitt ist die Konzentration um ca. 31 % angestiegen. Am Ende des Tropfschlauches wurden wiederum niedriger Konzentrationen im Bewässerungsversuch bestimmt. Sie liegen im Durchschnitt bei $2,8 \cdot 10^3$ KBE/100 ml. In Bezug auf die Konzentration am Anfang des Tropfschlauches lässt sich somit eine leichte Abnahme von 18 % feststellen. Im Vergleich zur Konzentration im Wasserspeicher ergibt sich eine geringe Zunahme von 7 %. Das bedeutet, dass insbesondere zwischen Wasserspeicher und Anfang der Tropfschläuche eine leichte Wiederverkeimung in den Tropfschläuchen stattfindet, die zu einer erhöhten Belastung des Bewässerungswassers führt.

Einstufung der Wasserqualität für unterschiedliche Nutzungszwecke

Um die sichere Verwendung von aufbereitetem Wasser zu gewährleisten, ist die Einhaltung von Grenzwerten für bestimmte Parameter erforderlich. Unter anderem haben die Weltgesundheitsorganisation (2006), World Health Organization (2017), die US EPA (2012) (Environmental Protection Agency) (2012) und die FAO (1985). Richtlinien für die Verwendung von aufbereitetem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung, städtische Nutzung und Trinkwassernutzung aufgestellt. Diese Richtlinien definieren die Wasserqualität anhand von biologischen, chemischen und technischen Parametern, wie z.B. die maximal zulässige Anzahl von pathogenen Keimen, Schwermetallen oder welchen Wert der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit annehmen sollen. Dabei werden mitunter gesundheitliche, technische und agronomische Qualitätsanforderungen unterschieden, um verschiedene Perspektiven miteinzubeziehen. Auszüge der Richtlinien sind im Anhang aufgeführt.

Laut den Richtlinien der FAO (1985) ist ein **pH-Wert** von Wasser zwischen 6,5 und 8,0 angemessen, um das Wasser als Bewässerungswasser für die landwirtschaftliche Nutzung zu verwenden (Tabelle 32). Die EPA (2012) Richtlinien sind etwas weiter gefasst, laut denen auch ein pH-Wert zwischen 6,0 und 9,0 ausreichend ist. Der pH-Wert im Ablauf des Filters liegt im Durchschnitt bei 7,6 und befindet somit in einem angemessenen Bereich. Die Proben des Wassers aus den Emittoren des Tropfschlauches wiesen im Mittel leicht höhere pH-Werte von 8,0 auf und liegen damit an der oberen Grenze des Bereichs der FAO.

Tabelle 32: Richtlinien für die Interpretation der Wasserqualität für die Bewässerung (Auszug aus „Water quality for agriculture“ FAO, 1985).

Potential Irrigation Problem	Units	Degree of Restriction on Use		
		None	Slight to Moderate	Severe
Salinity (affects crop water availability)²				
EC_w	dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
TDS (or)	mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltration (affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using EC_w and SAR together)³				
SAR – 0 – 3	and EC _w –	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
– 3 – 6	–	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
– 6 – 12	–	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
– 12 – 20	–	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
– 20 – 40	–	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Specific Ion Toxicity (affects sensitive crops)				
Sodium (Na)⁴				
surface irrigation	SAR	< 3	3 – 9	> 9
sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3	
Chloride (Cl)⁴				
surface irrigation	me/l	< 4	4 – 10	> 10
sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3	
Boron (B)	mg/l	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Trace Elements (see Table 21)				
Miscellaneous Effects (affects susceptible crops)				
Nitrogen (NO₃ - N)⁵	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
Bicarbonate (HCO₃)⁶	me/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
(overhead sprinkling only)				
pH		Normal Range 6.5 – 8.4		

² EC_w means electrical conductivity, a measure of the water salinity, reported in deciSiemens per metre at 25°C (dS/m) or in units millimhos per centimetre (mmho/cm). Both are equivalent. TDS means total dissolved solids, reported in milligrams per litre (mg/l).

³ SAR means sodium adsorption ratio. SAR is sometimes reported by the symbol RNa. At a given SAR, infiltration rate increases as water salinity increases. Evaluate the potential infiltration problem by SAR as modified by EC_w. Adapted from Rhoades 1977 and Oster and Schroor 1979.

⁴ For surface irrigation, most tree crops and woody plants are sensitive to sodium and chloride.

⁵ NO₃ - N means nitrate nitrogen reported in terms of elemental nitrogen (NH₄ - N and Organic-N should be included when wastewater is being tested).

me/l – milli equivalent per litre (mg/l ÷ equivalent weight = me/l); in SI units, 1 me/l = 1 milli mol/litre adjusted for electron charge. mg/l – milligram per litre = parts per million (ppm).

Für eine uneingeschränkte Nutzung in der Landwirtschaft sieht die Richtlinie der FAO (1985) eine **Leitfähigkeit** von $\leq 700 \mu\text{S}/\text{cm}$ vor. Diese Anforderung wird von den Ablaufwerten der Filteranlage und der Tropfschläuche nicht erfüllt, da keine Reduktion der Leitfähigkeit durch

den Biokohlefilter beobachtet wurde und die Werte im Zulauf bedingt durch die Einleitung von Abwasser bereits bei über 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegen.

Die EPA (2012) Richtlinien empfehlen eine **Trübung** von ≤ 2 NTU bei Wasser, welches als Bewässerungswasser in der Landwirtschaft oder uneingeschränkt im städtischen Bereich genutzt wird. Die mittlere Trübung im Ablauf des Filters liegt mit 2,5 NTU minimal über diesen Grenzwert. In der Mittelwertbildung werden einzelne hohe Werte stärker berücksichtigt als im Median. Bei Betrachtung des Medians liegt dieser bei 1,6 NTU und zeigt, dass der Filter die Grenzwerte einhalten kann und es nur in einzelnen Fällen, die auch mit einer erhöhten Belastung im Zulauf korreliert, zu einer Überschreitung kommt.

Im Ablauf des Filters wurde eine mittlere **TDS**-Konzentration von 700 mg/L gemessen, welche entsprechend der Richtlinie der FAO (1985) eine eingeschränkte Nutzung in der Landwirtschaft ermöglicht. Zur Bewertung der Ionentoxizität des Wassers sieht die FAO-Richtlinie Grenzwerte für den **SAR**-Wert vor. Bei SAR-Werten unterhalb von 3 gibt es keine Einschränkungen, bei 3-9 liegen leichte bis moderate Einschränkungen vor und bei Werten größer als 9 liegen starke Einschränkungen vor. Der SAR-Wert des Wassers an den Emittern beträgt 3,3 und liegt somit in einem Bereich, wo leichte Einschränkungen (SAR: 3-9) anfallen. Für die Betrachtung der **Infiltration** werden entsprechend (Abbildung 78) die Leitfähigkeit und der SAR-Wert herangezogen. Hier zeigt sich, dass die Wasserqualität im Grenzbereich von „keine Reduktion der Filtrationsrate“ zu „leichte bis moderate Reduktion der Filtrationsrate“ liegt. Demnach ist von keiner relevanten Reduktion der Infiltrationsrate durch das filtrierte Wasser auszugehen.

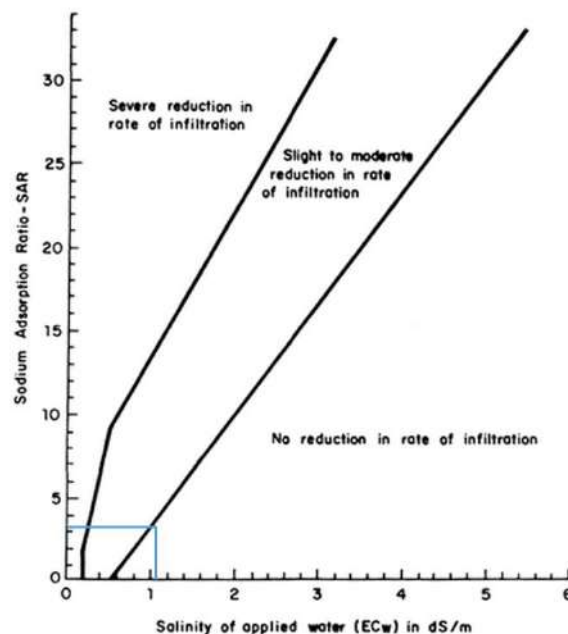


Abbildung 78: Wasserinfiltration in Abhängigkeit von Salzgehalt und Natrium Adsorptionsverhältnis.

Anhand der Richtlinien der WHO (2006) lässt sich die durch die Pilotanlage erreichte Wasserqualität für die Nutzung in der Landwirtschaft unter gesundheitlichen Aspekten

bewerten. Diese geht jedoch von einer höheren Belastung im Zulauf aus und sieht dementsprechend hohe log-Stufen Reduktionen vor (Abbildung 76: Zu- und Ablaufkonzentrationen von *C. perfringens*. Abbildung 79). Aus dem Grund ist es sinnvoll, die Grenzwerte der Konzentrationen für den Ablauf (hier: Verification Monitoring, Abbildung 79, re.) zur Bewertung der Belastung im Ablauf der Kläranlage heranzuziehen.

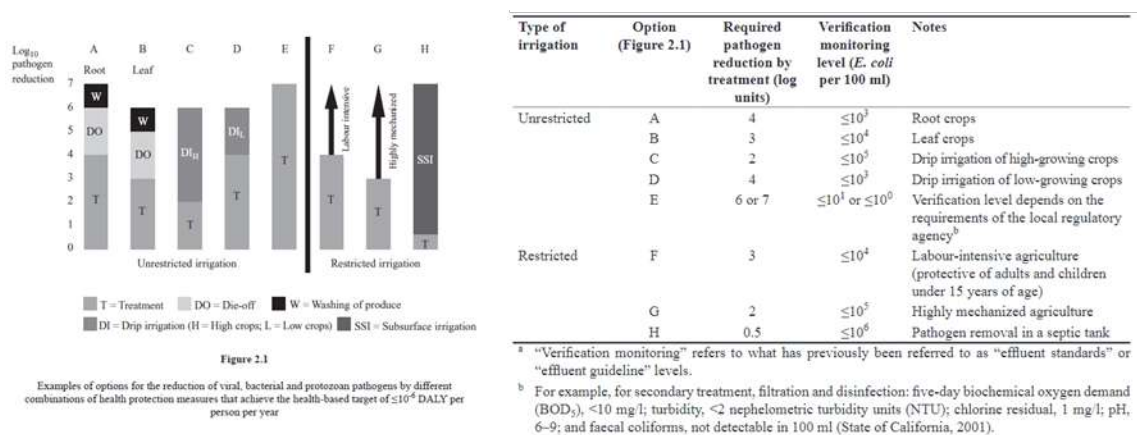


Abbildung 79: Reduktion von pathogenen Mikroorganismen anhand verschiedener Kombinationen an Maßnahmen für die Einhaltung der gesundheitlichen Ziele (li.). „Verification Monitoring“ (Grenzwerte) für verschiedene Optionen an Wasseraufbereitung und Nutzung (WHO 2006) (re.).

Die Biokohlefilter-Pilotanlage erreicht eine mittlere *E. coli*-Konzentration von $3,1 \cdot 10^3$ KBE/100 ml im Ablauf. Der anspruchsvollste Grenzwert von $1 \cdot 10^3$ *E. coli*/100 ml besteht für die uneingeschränkte Bewässerung von Wurzelgemüse sowie von niedrig wachsenden Pflanzen, die über einen Tropfschlauch bewässert werden. Dieser Wert wird von dem gefilterten Wasser leicht überschritten, jedoch wird der Grenzwert für uneingeschränkte Nutzung von $1 \cdot 10^4$ - $1 \cdot 10^5$ *E. coli*/100 ml für Blattgemüse und für Tropfbewässerte hochwachsenden Pflanzen eingehalten. Dasselbe gilt für die eingeschränkte Bewässerung, welche im Gegensatz zur uneingeschränkten Bewässerung, auf Pflanzen zu trifft, die nicht roh verzerrt werden.

Dieser Pilotversuch konnte zeigen, dass eine die Biokohlefilter-Anlage geeignet ist, um mikrobiologisch belastetes Oberflächenwasser für bestimmte landwirtschaftliche Einsatzbereiche als Bewässerungswasser adäquat aufzubereiten. Es ist zudem zu erwarten, dass mit einer Optimierung der Pilotanlage auch die Eliminationsleistung gesteigert werden kann.

In Tabelle 33 sind die Grenzwerte für Trinkwasser der WHO und der Ghana Standards Authority (DGS 175:2021) aufgeführt. Diese sehen für die getesteten Organismen *E. coli*, Gesamtcoliforme Bakterien und *C. perfringens* einen negativen Befund bzw. einen Grenzwert von < 1 Bakterien/100 ml vor. Für einzelne Proben während des Versuchszeitraums konnten keine *E. coli* und *C. perfringens* im Ablauf der Filteranlage gefunden werden. Im Fall von *C. perfringens* wurden in 8 von 16 Proben keine Vorkommen detektiert. In 2 von 16 Proben

wurde kein *E. coli* gefunden. Die durchschnittliche Ablaufwerte liegen jedoch deutlich über den Trinkwassergrenzwerten, insofern ist die erreichte Wasserqualität nicht geeignet für eine Nutzung als Trinkwasser.

Tabelle 33: Mikrobielle Qualitätsanforderung für Trinkwasser der WHO und die nationalen Richtlinien von Ghana (Weltgesundheitsorganisation 2011; Ghana Standard Entwurf 2021) (WHO 2012, (Ghana Standard Entwurf 2021; Weltgesundheitsorganisation 2011))

Faktoren	WHO Trinkwasserrichtlinie	Entwurf: DGS 175:2021
Gesamtkeimzahl, bei 37°C für 48 h	k.A.	500
Gesamtkeimzahl, bei 22°C für 72 h	k.A.	50
<i>E. coli</i> , Anzahl/100ml	Not nachgewiesen	< 1
Gesamt coliforme, Anzahl/100 ml	k.A.	< 1
<i>Clostridium perfringens</i> , Anzahl/100 ml	k.A.	< 1

Für die Wasserwiederverwendung im städtischen Bereich und in der Industrie sind Wasserqualitätsanforderung unter anderen durch die U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) formuliert worden.

Für eine uneingeschränkte städtischer Nutzung dürfen keine fäkalcoliformen Bakterien detektiert werden. Bei einer eingeschränkten Nutzung liegt der Grenzwerte bei maximal 200 fäkalcoliformen Bakterien/ 100 mL. Unter einer uneingeschränkten Nutzung wird eine Wiederverwendung in Gemeinden, in denen der Zugang der Öffentlichkeit nicht eingeschränkt ist, verstanden. Dazu gehört beispielsweise die Wiederverwendung zur Bewässerung von Parks, Golfplätzen, Spielplätzen, Schulhöfen und der Landschaftsgestaltung in Wohngebieten. Andere Beispiele sind Toilettenspülung, Klimaanlage, Bauwesen, Zierbrunnen oder Straßenreinigung. Unter der eingeschränkten Nutzung fällt beispielsweise die Wiederverwendung für die oberirdische Bewässerung von unzugänglichen Flächen wie Verkehrsinseln oder die unterirdische Bewässerung. Die Wasserwiederverwendung in der Industrie weist eine große Variabilität und damit auch spezifische Anforderungen auf, die erfüllt werden müssen. Die Richtlinien der US EPA für einmalige Kühlung und eine rezirkulierende Kühlung sehen für beide Anwendungsfälle ebenfalls einen Grenzwert von maximal 200 fäkalcoliformen Bakterien/ 100 mL vor.

Die US EPA zieht zur Bewertung den Parameter fäkalcoliforme Bakterien heran. Da *E. coli* ein Hauptvertreter der Untergruppe an fäkalcoliformen Bakterien ist, ist eine Abschätzung jedoch möglich. Die Ablaufdaten für *E. coli* zeigen, dass 3 der 16 Beprobungen die Anforderungen der US EPA für die eingeschränkte und industrielle Nutzung in Kühlverfahren erfüllen. Im Durchschnitt sind die Ablaufwerte jedoch zu hoch, um einer städtischen oder industriellen

Nutzung entsprechend den Richtlinien der US EPA hinsichtlich der pathogenen Belastung zu genügen.

Fazit

Die Wasserqualität, die durch die Pilot-Biokohlefilteranlage erreicht wurde, eignet sich am besten für die landwirtschaftliche Bewässerung. Die Keimbelastung konnte so weit reduziert werden, dass verschiedene Formen der Bewässerung und Nutzpflanzenkombination entsprechend der WHO (2006) zulässig sind. Durch geringe Optimierung, wie beispielsweise die Vorschaltung einer weiteren Grobfilterstufe (Kies), um ein Clogging im Zulauf des groben Biokohlefilters zu vermeiden, sollte eine weitere Verbesserung der Eliminationsleistung möglich sein, sodass eine uneingeschränkte Bewässerung gemäß der WHO (2006) mit dem behandelten Wasser möglich ist. In Sinne der Nutzung zur landwirtschaftlichen Bewässerung liegt die größte Herausforderung darin, die Leitfähigkeit zu reduzieren. Diese wird durch das Biokohlematerial nicht reduziert und bedürfte einem zusätzlichen Behandlungsschritt oder Modifikation der Biokohle.

Die Anlage wurde für eine Produktion von 300 L Bewässerungswasser pro Tag bei einer Filtergeschwindigkeit von 0,1 m/h dimensioniert. Diese Auslegung hat sich im Feldeinsatz bewährt. Sie kann jedoch bei einem höheren Durchsatzbedarf verändert werden, indem die Filterfläche angepasst wird. Eine Erhöhung der Filtergeschwindigkeit wird basierend auf den Erfahrungen aus diesem Projekt nicht empfohlen. Die folgende Tabelle 34 zeigt für verschiedene Mengen an benötigtem Wasser die Dimensionierung der Filter bei einer Filtergeschwindigkeit von 0,1 m/h.

Tabelle 34: Dimensionierung eines Biokohlefiltersystems.

Filtergeschwindigkeit	m/h	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
benötigte Wassermenge pro Tag	L/d	200	300	600	700	200
Filterfläche	m ²	0,083	0,125	0,250	0,292	0,083
Durchmesser Filter	m	0,326	0,399	0,564	0,609	0,326

2.6.4 AP 2.2 In-situ Aufbereitung von Oberflächenwasser durch das AWAS-BIOLIGHT-OLOID-PYRAMID-System

Aufgrund der Insolvenz von AWAS und dem Ausscheiden aus dem Projekt können hierzu keine Aussagen gemacht werden

2.6.5 AP 2.3 DE: Pandemiebedingt: Aufbau und Durchführung von Bewässerungsversuchen in Deutschland




2.6.5.1 AP 2.3 DE Auswahl der Tropfsysteme



Im Rahmen der Versuche wurden sechs unterschiedlich Tropfrohrsysteme und zwei Eigenkonstruktionen aus einfachen Materialien getestet (Tabelle 38).

Zur Ermittlung geeigneter Bewässerungssysteme für die Pilotanlage in Ghana wurde in zwei Schritten vorgegangen. Eine erste Versuchsreihe befasste sich mit dem Test ausgewählter Tropfrohre unter Einsatz einer Druckpumpe mit dem Ziel grundlegende Erkenntnisse zu technischen Eigenschaften bei niedrigen Druckverhältnissen im Pumpenbetrieb zu gewinnen. Weiterhin wurde untersucht inwieweit die Tropfschlauchsysteme die technischen Angaben der Hersteller erfüllen und von einer gleichmäßigen Wasserabgabe auszugehen ist. Perspektivisch zielten diese Untersuchungen darauf ab, die Eignung der Bewässerungsschläuche für den Einsatz von Solarpumpen zu prüfen, die im Regelfall nur geringe Betriebsdrücke erzeugen. Der Einsatz von Solarpumpen beschreibt für die Zukunft ein sinnvolles Upgrade der in Ghana errichteten Versuchsanlage. Er entspricht hier jedoch nicht den Anforderungen an ein vereinfachtes Bewässerungssystem, das mit einfachsten Komponenten auskommen soll. Generell ließen sich durch diese vorgeschaltete Versuchsreihe erste Erkenntnisse für die Eignung der Schläuche im Gravitationsbetrieb ableiten.

Die in einem zweiten Schritt durchgeführten Versuche mit den Tropfschlauchsystemen im drucklosen Gravitationsbetrieb, bauten auf die grundlegenden Erfahrungen aus Schritt eins auf und erbrachten die Kernergebnisse für die Konfiguration der Pilotanlage in Ghana.

Tabelle 35: Ausgewählte Tropfsystem im Versuch mit Systemaufbau

Tropfsystem	Systemaufbau	
Unitechline AS (Netafim)	Bewährtes Tropfsystem mit speziellem Kanaldesign des Emitters gegen Einwurzelung. Emitteröffnungen in 30 cm Abstand. Druckkompensiert. Unterirdischer Einbau möglich.	
KleWaDrip-Line (KleWaTec)	Emitter mit konstruktivem Schutz gegen Sedimentation und Kalkausfällung. Emitteröffnung alle 30 cm.	
Spindelschlauch (Mikrospinne)	Zentraler Verbindungsemitter zur Hauptleitung. 4 aufgeklebte Schlaucharme $a \text{ } \varnothing 3 \text{ mm}$ und 80 cm Länge. Als offener Mikroschlauch. 100 cm Montageabstand.	
Mikroschlauch	Flexibles PE-Schlauchmaterial mit Adapterverbindung zur Hauptleitung Montageabstand 30 cm. Offener Auslass über 4 mm Schlauchöffnung.	
Perlschlauch („Schwitzschlauch“; Ecotube Germany)	Durchgehender Schwammgewebeslauch. Wasseraustritt vollflächig über Mantelfläche durch Gewebeporen.	
Palaplast- Einzeltröpfer- Schlauch	Einzelemitter mit Wasserabgabe von 2L / Std. Montageabstand 30 cm Emitter wird auf 3 mm-Bohrung in der Hauptleitung aufgesteckt.	

Tropfsystem	Systemaufbau	
Fleece-Schlauch „aqua-Vlies“ (Eigenentwicklung)	Doppellagiges Vliestampon alle 30 cm mit Clipsen auf 3 mm-Bohrung in Hauptleitung aufgeklemmt.	
Docht-Schlauch (Eigenentwicklung)	Bewässerungsdocht alle 30 cm in Bohrung der Hauptleitung mittels Adapterstück eingeklebt. Adaption zur verbreiteten „Flaschenbewässerung“.	

2.6.5.2 AP 2.3 DE Versuchsanlage in Deutschland

Alle Versuche wurden unter Glas in einem 12,5 x 26 m² großem Versuchsgewächshaus in Neuenkirchen durchgeführt, um valide Messdaten zu erhalten. An beiden Kopfseiten des Glashauses wurde mit 20 m Abstand je ein 30 cm hoher Rohrbügel als Grundgerüst installiert (Abbildung 80). Zwischen den Rohrbügeln wurden fünf parallel geführte Drahtseile 30 cm über dem Boden verspannt. Sie dienten der höhengleichen waagerechten Aufhängung verschiedener Tropfschlauchleitungen in Schleifen mit 100 m Gesamtlänge.



Abbildung 80: Grundgerüst der Versuchsanlage im Gewächshaus Neuenkirchen

Entsprechend konnte das abgegebene Wasser je Emitter unterhalb mittels 500 ml-Messerbechern aufgefangen und die Menge bestimmt werden (Abbildung 81). Zur Bodenvorbereitung und Verbesserung der Infiltration wurde der Oberboden gefräst.

Die Versuchsreihen mit ausgewählten Tropfrohren wurden in den Vorversuchen unter Einsatz einer Druckpumpe und ab März 2021 als Gravitationsanlage drucklos durchgeführt.

Dazu wurde Wasser aus einem örtlich vorhandenen Teichbecken mittels Tauchpumpe in zwei verbundene 1 m³-IBC-Tanks gepumpt. Zwischengeschaltet war im Deckeleinlass ein Grobfilter, der grobe Wasserfrachten zurückhielt. Im zweiten Schritt wurde das Wasser aus den IBC-Tanks außen in zwei IBC-Tanks im Gewächshaus durch eine Pumpe umpumpt. Zur Feinfiltration wurde ein Inline-Filter von Irritec mit einer Standardfilterdichte von 120 µm (0,13 mm) eingesetzt. Der Inline-Filter im Tankauslauf wurde nach jeder Neubefüllung der IBC-Tanks gereinigt. Zur Ermittlung der Daten des Wasserzulaufs wurden hintereinander ein Wasserzähler, ein digitaler Durchflussmesser und ein Manometer installiert.



Abbildung 81: Versuch Unitechline- Tropfrohr (Netafim) und rechts Perlschlauch

Das vorgereinigte Wasser wurde über diese Messeinheit einem 1“-HDPE(Hart-Polyethylen)-Hauptrohr zugeleitet und dann T-förmig auf die Anschlüsse der fünf Teststränge verzweigt. Dort wurden jeweils die werkseitig vorgefertigten Tropfrohrschleifen direkt angeschlossen oder die 18 mm PE-(Polyethylen)Verteilerleitung, in die später die lokalen Emitter in 3 mm-Bohrungen eingesetzt wurden.

2.6.5.3 AP 2.3 DE Tropfschläuche im Vorversuch in Neuenkirchen, Deutschland

In einem ersten experimentellen Durchgang wurden verschiedene Tropfschlauchsysteme in 100 m Schleifen im Pumpbetrieb getestet. Es wurden 50 – 100 L Gießwasser auf die

Schläuche gegeben bzw. eine Betriebszeit von 15 – 30 min zu Grunde gelegt. Alle getesteten Tropfleitungen unterscheiden sich bezüglich ihrer geometrischen Eigenschaften, so dass sie ein unterschiedliches Durchfluss- und Ablagerungsverhalten von Wasserinhaltsstoffen entwickeln. Entsprechend wird die Verteilungsuniformität (DU) beeinflusst.

Die Vorversuche wurden mit den Tropfrohren Unitechline, KleWaDrip und Perlschlauch unter Verwendung einer Druckpumpe mit 9 bar Maximaldruck durchgeführt. Um ein realistisches Szenario aufzubauen, wurde in den Zulauf zum Hauptrohr ein Druckminderer eingebaut, über den sich der Ausgangsdruck zwischen 0,5-1,2 bar einstellen ließ. Daraus ergeben sich erste Erkenntnisse über das Verhalten von Tropfrohrsystemen bei geringem Druck, wie sie in den für Ghana geplanten gravitationsbasierten Bewässerungsanlagen existieren. Ziel war es, bei 0,8-1 bar Ausgangsdruck die Wasserverteilung über den gesamten Schlauchstrang zu ermitteln.

Mehrere Durchläufe wurden mit einseitiger und beidseitiger Rohreinspeisung durchgeführt. Die Ergebnisse sind Tabelle 36 zu entnehmen.

Tabelle 36: Ermittelte Wasserverteilungsuniformität DU auf einem 22 m-Strang und Anschaffungskosten pro Meter

Tropfrohr (Hersteller)	Emitter- abstand	Kosten pro Meter (brutto)	Werksangabe Ausfluss „S“	Emitter „DU“ Verteileruniformität & Bewertung <i>nach</i> Merriam, Keller,(1978) <i>and</i> Watters, Keller (1978) ASAE, 1996a; 1996b
Unitechline (Netafim)	30 cm	1,63 €	2,3 L h ⁻¹	63 – 85 % <i>gut</i>
Perlschlauch (Ecotube Germany)	30 cm	2,05 €	3 – 6 L h ⁻¹ m ⁻¹	35 – 58 % <i>ausreichend</i>
KleWaDrip (KleWaTech)	30 cm	1,25 €	1,4 L h ⁻¹	4 – 19 % (defekt)
Mikroschlauch a Länge 10 cm + Adapter + 18 mm-Verteilerleitung (Teco)	30 cm	1,80 €	-	37 – 63 % <i>ausreichend</i>
Mikrospinne 4-armig + zentraler Präzisionstropfer 4 L h⁻¹	120 cm	3,20 €	4 L h ⁻¹ je Emitterspinne	47 – 96 % <i>zufriedenstellend</i>

+ 18 mm-Verteilerleitung (Netafim)				
---------------------------------------	--	--	--	--

2.6.5.4 AP 2.3 DE Vorversuch Tropfschläuche im Pumpenbetrieb

UnitechLine AS (Netafim)

In den Versuchsdurchläufen wurde Unitechline-Tropfrohr von Netafim in 100 m Stranglänge mit 50 l Wasser beschickt. Dabei wurde für das Unitechline-Tropfrohr die einseitige Einspeisung und beidseitige Einspeisung verglichen, da dies nach gängiger Fachauffassung zu einer markant unterschiedlichen Wasserverteilung führt. Beide Einspeisungsarten wiesen einen linearen Abfall des Ausflusses mit zunehmender Stranglänge auf. Unterschiede zeigten sich nur auf den ersten 25 m, auf denen die Zweifacheinspeisung hinter den Herstellerangaben von $2,3 \text{ L h}^{-1}$ ($7,6 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$) zurückblieb. Auf den verbleibenden 75 m verhielten sich die Ausflüsse der Einspeisungsvarianten nahezu identisch. Die Verteilungsgenauigkeit in den beiden ersten Versuchsdurchgängen war bei der Zweifacheinspeisung nur geringfügig besser (84-87 %) im Vergleich zur Einfacheinspeisung (81-85 %) Abbildung 82. Der Unitechline Tropfschlauch erzielte damit zufriedenstellende bis gute Ergebnisse.

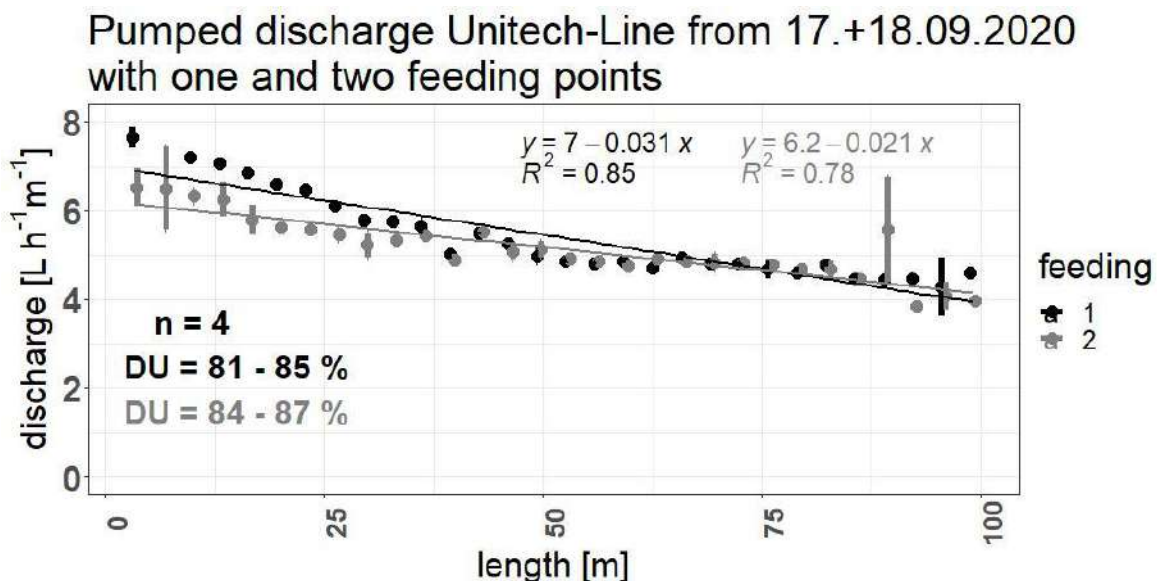


Abbildung 82: Vergleich Ausfluss Unitechline im Pumpenbetrieb bei Einfach- und Zweifacheinspeisung in Durchlauf 1 und 2

Am 18.09.2022 lag der durchschnittliche Ausfluss je Emittter bei $1,64 \text{ L h}^{-1}$. Der vom Hersteller angegebene Wasserabgabewert wurde für beide Varianten im Mittel nur auf den ersten acht Metern (Einfacheinspeisung), beziehungsweise zehn Metern (Zweifacheinspeisung) erreicht. In Versuchsdurchlauf 3 und 4 fiel die Verteilungsgenauigkeit der Zweifacheinspeisung mit 74 - 79 % etwas geringer als bei der Einfacheinspeisung (81 - 85 %) aus. Im Schnitt wurden zwischen Einfacheinspeisung und zweifacher Einspeisung keine wesentlichen Unterschiede

in der Gleichmäßigkeit der linearen Ausflussverteilung erzielt (Abbildung 83).

Pumped discharge Unitech-Line from 18.+21.09.2020 with one and two feeding points

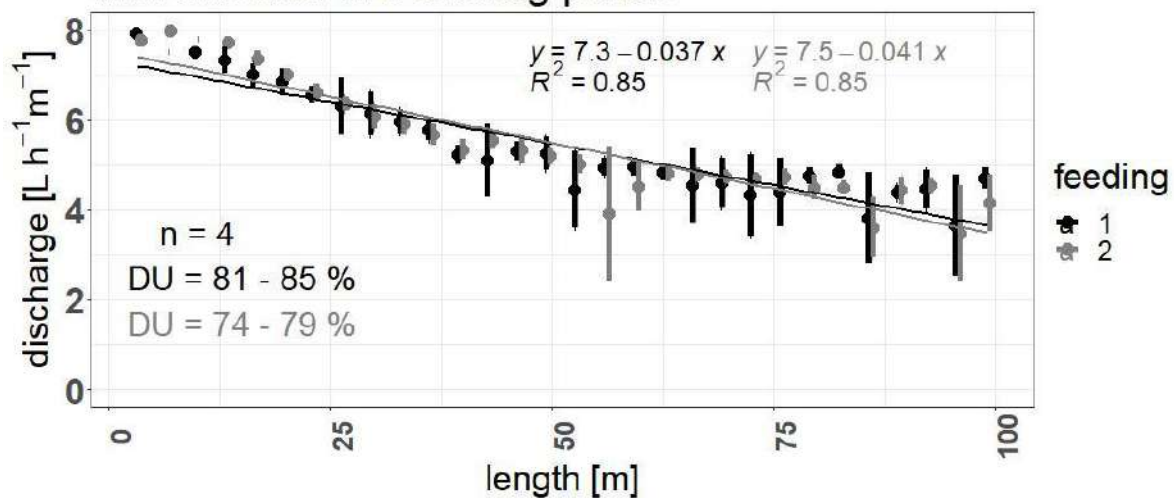


Abbildung 83: Vergleich Ausfluss Unitechline im Pumpenbetrieb bei Einfach- und Zweifacheinspeisung in den Versuchsdurchläufen 3 und 4: Der graue Graph zeigt den Mittelwert aus vier Durchläufen. (= 95% Konfidenzintervall)

Klewadrip

Der KleWaDrip-Tropfschlauch musste nach dem erstem Versuchslauf aufgrund eines Materialdefekts aus der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Das Produkt wurde wegen fortlaufender Qualitätsmängel inzwischen vom Markt genommen. Punktuell eingerissene Emittler resultierten in einer sehr ungleichmäßigen Wasserverteilung und ließen keine wiederholbaren Ergebnisse zu.

Perlschlauch

Der poröse Perlschlauch lieferte im Pumpenbetrieb bei 50 l Wassergabe und sechs bis neun Minuten Betriebszeit eine relativ ungleichmäßige Wasserverteilung, die vor allem zur Strangmitte hin deutlich abnahm (Abbildung 84).

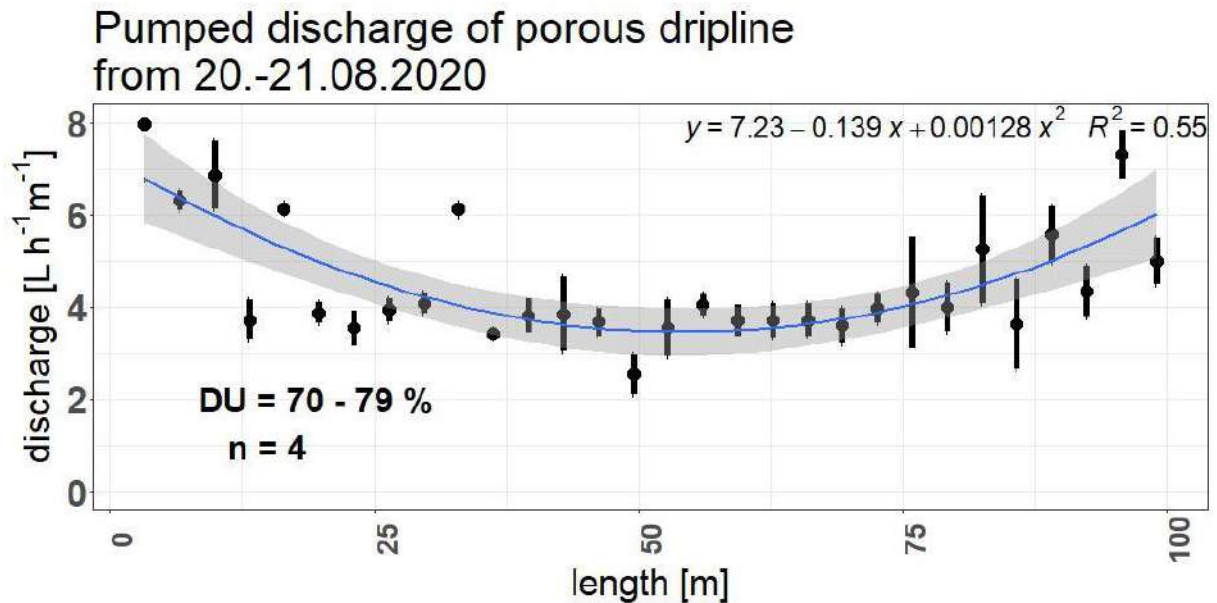


Abbildung 84: Im Pumpbetrieb: Ausflussverteilung des 100m -Perlschlauches vom 20. bis 21.08.2020 bei 50 L Wassergabe nach exakt horizontaler Ausrichtung (Einfacheinspeisung).

Durch Zweifacheinspeisung, der Einspeisung am Beginn und Ende der Tropfleitung, konnten keine signifikanten Verbesserung beim Ausflussverhalten erreicht werden, so dass mit der Einfacheinspeisung weitergearbeitet wurde. Die zugeführte Wassermenge wurde jeweils an der IBC-Tankskala abgelesen. Allerdings war zu beobachten, dass sich mit jedem Durchlauf die Wasserverteilung verschlechterte. Sie fiel von noch zufriedenstellenden 70-79 % auf einen Minimalwert von 37- 59 % ab (Tabelle 37). Grundsätzlich war der Perlschlauch in der Lage über die gesamte Stranglänge Wasser zu emittieren und erfordert einen geringen Vordruck von 0,4 - 0,8 bar laut technischer Spezifikation. Insofern bietet er sich für zukünftige Versuche im Gravitationsbetrieb an.

Tabelle 37: Im Pumpbetrieb: Vergleich Ausflussverteilungsgenauigkeit (DU) des 100m-Perlschlauches in Einfach- und Zweifacheinspeisung.

Datum	Einfacheinspeisung	Zweifacheinspeisung
14.08.2020	45 – 55 %	-
20.-21.08.2020 (nachjustiert)	70 – 79 %	-
24.08.2020	67 – 72 %	-
21.09.2020	-	27 – 58 %
22.09.2020	7 – 49 %	-
24.09.2020	-	32 – 54 %
24. & 25.09.2020	31 – 53 %	-
29.09.2020	31 – 50 %	-
30.09.2020	47 – 53 %	-
01.10.2020	44 %	-
02.10.2020	37 – 59 %	-

Zusatzversuche

Da der KleWaDrip- Tropfschlauch aus der Versuchsreihe ausscheiden musste, wurden zusätzliche Versuche mit Mikroschlauch und Mikrobewässerungsspinnen angesetzt (Abbildung 85).



Abbildung 85: Spindelschlauch (Mikrospinne) und Mikroschlauch als zusätzliche Tropfsysteme getestet.

Zusatzversuch 1: Mikroschlauch

Bei diesem Bewässerungssystem wird als Emitter ein 5 mm PE-Mikroschlauchstück in 10 cm Länge alle 30 cm mittels einer Mikroabgangs-Schelle auf die 18 mm-Hauptleitung aufgesteckt. Der Mikroschlauch zeigte auf den ersten 25 Metern unregelmäßiges und sehr hohes Ausflussverhalten (Abbildung 86).

Im Folgeabschnitt sank der Ausfluss rapide auf null ab. Daher wurde der Bereich für die Ermittlung der Verteilungsgenauigkeit auf die Messpunkte beschränkt, die einen Wert > 0 aufwiesen (DU=49-60 %).

Die beidseitige Einspeisung veränderte die Wasserverteilung im mittleren Bereich grundsätzlich nicht, weswegen von der weiteren Darstellung abgesehen wird. Im Ergebnis war das Mikroschlauchsystem nicht geeignet, da die Wasserverteilung deutlich unzureichend zu bewerten ist (Abbildung 87).



Abbildung 86: Versuchsaufbau des Mikroschlauches im Gravitationsbetrieb.

Pumped discharge of micro tube from 02.12.2020

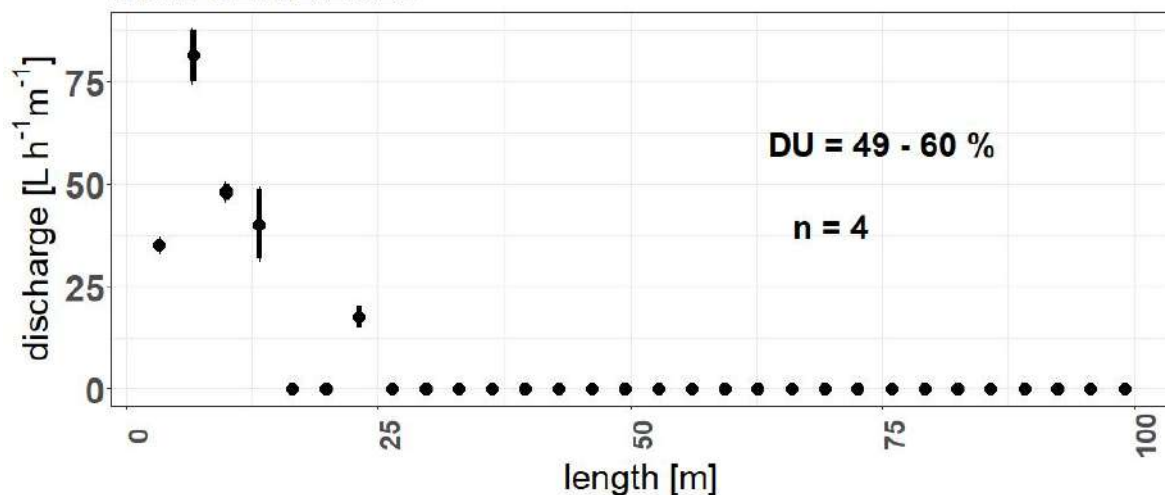


Abbildung 87: Ergebnisse der Ausflussverteilung des Mikroschlauches

Spindelschlauch (Mikrospinne)

Der Spindelschlauch besteht aus einem zentralen Präzisionsemitter, der einen Durchfluss von 4 L h^{-1} zulässt und in Abständen von 120 cm auf die Hauptleitung aufgesteckt wurde. Der Emitter besitzt 4 Abgänge, auf die jeweils 80 cm lange Mikroschläuche mit 3 mm Durchmesser aufgesteckt sind. Das Ausflussverhalten des Spindelschlauches in Kombination mit dem Präzisionsemitter gleicht einer horizontalen Geraden (Abbildung 88). Die Verteilungsgenauigkeit lag bei 96 – 97 %. Als druckbasiertes Bewässerungssystem ist der Spindelschlauch geeignet. Die Herstellerangaben wurden jedoch nicht vollständig erreicht.

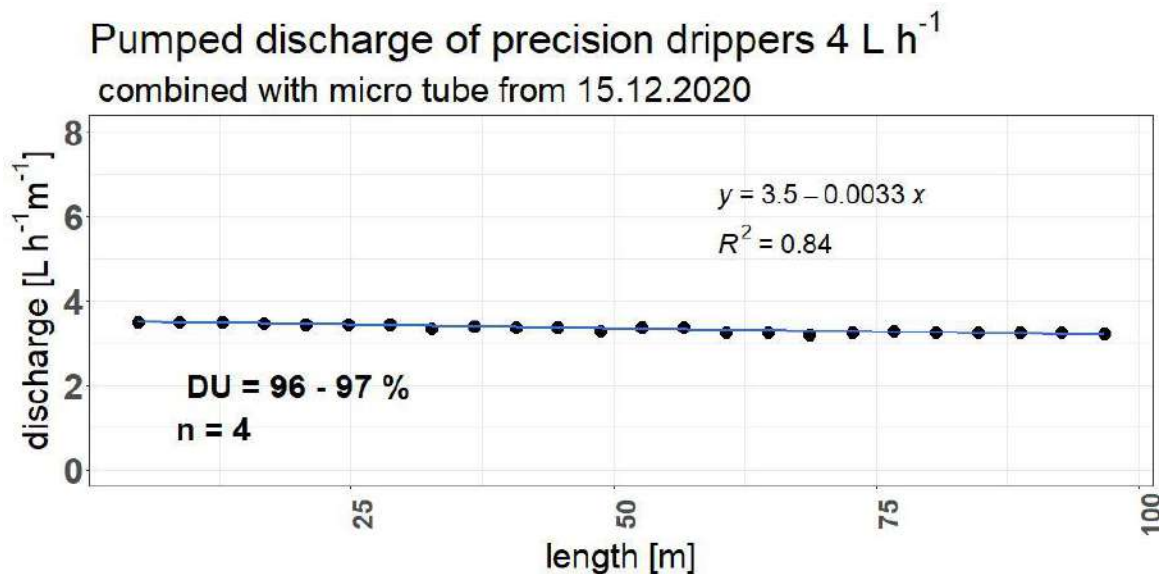


Abbildung 88: Ausflussverhalten des Spindelschlauches mit Präzisionstropfer im Pumpenbetrieb

2.6.5.5 AP 2.3 DE Vorversuche im Gravitationsbetrieb

Für die weiteren Versuche wurde die Anlage am 04.03.2021 als für den Gravitationsbetrieb umgebaut, und die Druckpumpe entfernt. Dazu wurde ein 1 m³-IBC-Tank als Wasserspeicher auf ein Holzgerüst mit einer Standebene 1,0 m über dem Boden aufgestellt. Den Vordruck für die Versuche erzeugte nur die Gravitation. Er stellt sich, je nach Wasserstand im Speicher, theoretisch bei 0,1- 0,2 bar ein. Aufgrund von Reibungsverlusten in Filtern und Messgeräten lag er tatsächlich bei 0,05- 0,1 bar. Der Aufbau dieses Gravitationssystems kommt ohne Pumpe und elektrische Energie aus und ist damit für die Pilotanlage in Ghana prädestiniert. Unter Abwägung der Ergebnisse aus der Vorversuchsreihe im Pumpenbetrieb wurden für die Tests im Gravitationsbetrieb folgende Emitterschläuche ausgewählt:

- Perlschlauch
- Spindelschlauch
- Mikroschlauch
- Aqua-Vlies-Schlauch (Eigenkonstruktion) (Abbildung 89 li.)
- Palaplast-Einzeltropfer (Abbildung 89 re.)

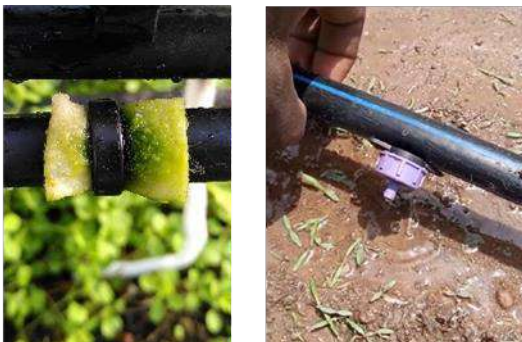


Abbildung 89: Zusätzlich aufgenommene Tropfsysteme: Aqua-Vlies-Schlauch (Eigenkonstruktion) (li.) und Palaplast-Einzeltropfer (re.)

Perlschlauch (Schwitzschlauch)

Für den gravitationsbasierten Betrieb des Perlschlauchs wurden zwei neue Schlauchstränge a 50 m verwendet, um valide Ergebnisse zu erhalten (Abbildung 90). Je Durchlauf wurden 100 L Wasser verabreicht. Bezogen auf die Gesamtdurchlaufmenge des Versuchs von 1,4 m³ Wasser, stieg die Durchlaufzeit für einen Durchgang a 100 L Wasser von 47 min (10.03.2021) auf sechs Stunden 45 min (14.04.2021). Mit jedem Durchlauf reduzierte sich der Durchfluss in der Tropfleitung weiter und fiel rapide ab (Abbildung 91).



Abbildung 90: Nahaufnahme des linearen Ausflusses des neuen Perlschlauches

Ausfluss des Perlschlauches im freien Wasserspiegel vom 10.-11.03.2021

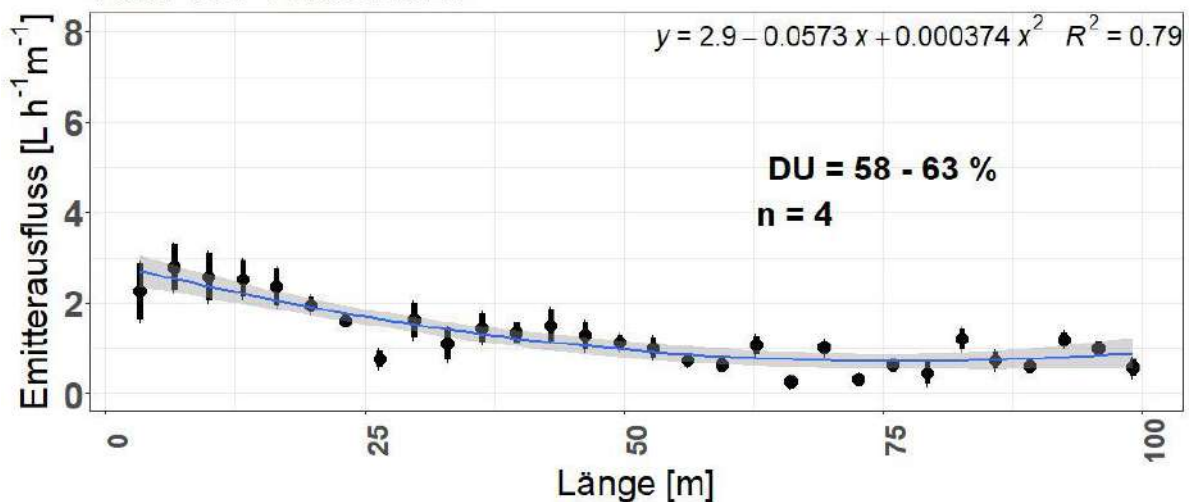


Abbildung 91: Wasserverteilung des Perlschlauches im Gravitationsbetrieb vom 10. und 11.03.2021

Die rasch abfallenden Durchflussraten und Emitterausflüsse bei jedem Versuchsdurchlauf lassen auf ein Kolmatieren der Nanoporen im Freispiegelgerinne schließen, dass in dem verwendeten frachtreichen Teichwassers begründet liegt (Abbildung 92). Der eingesetzte Filter für Partikelgrößen $< 130 \mu\text{m}$ kann Feinanteile nicht ausreichend zurückhalten. Der Obstruktionsanteil betrug daher nach 35 Tagen und Beschickung mit $1,4 \text{ m}^3$ gefiltertem Teichwassers $57,2 - 100,0 \%$ (Abbildung 93). Dieser Obstruktionseffekt wurde verstärkt im Gravitationsbetrieb beobachtet. Ein Spüleffekt durch höheren Druck ist nicht zu beobachten. Aufgrund der rasch einsetzenden Obstruktion ist der Einsatz des Perlschlauchs für die Bewässerung mit mäßig aufbereitetem Wasser nicht geeignet, da konstanter Wasserausfluss nicht erwartet werden kann.

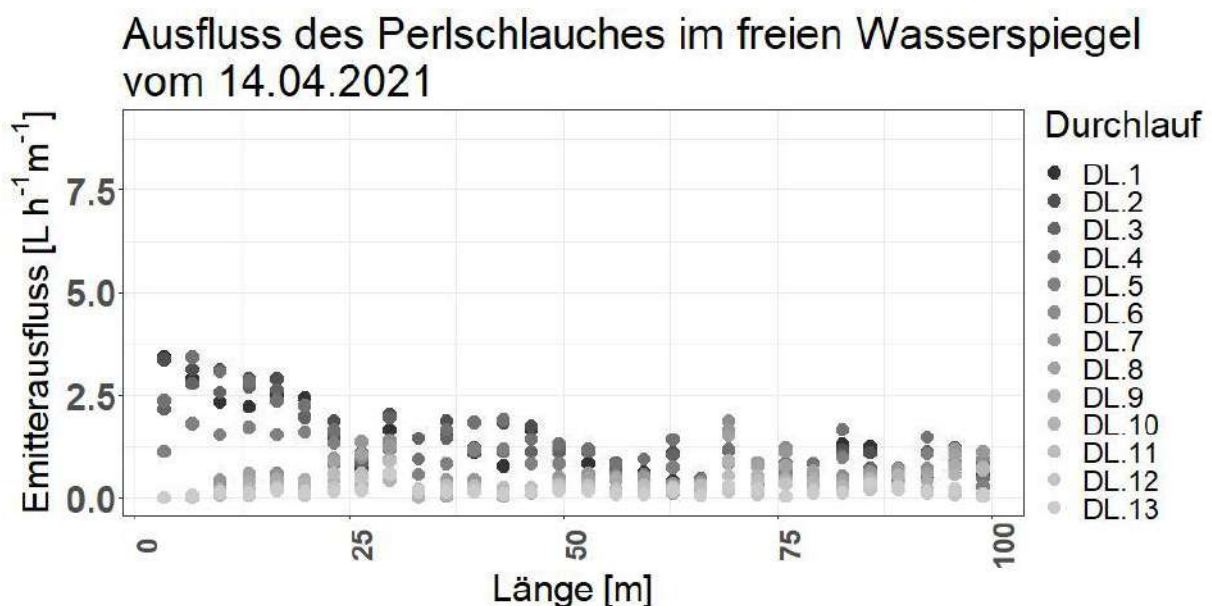


Abbildung 92: Rasch absinkender Ausfluss des Perlschlauches im Gravitationsbetrieb (DL = Durchlauf).

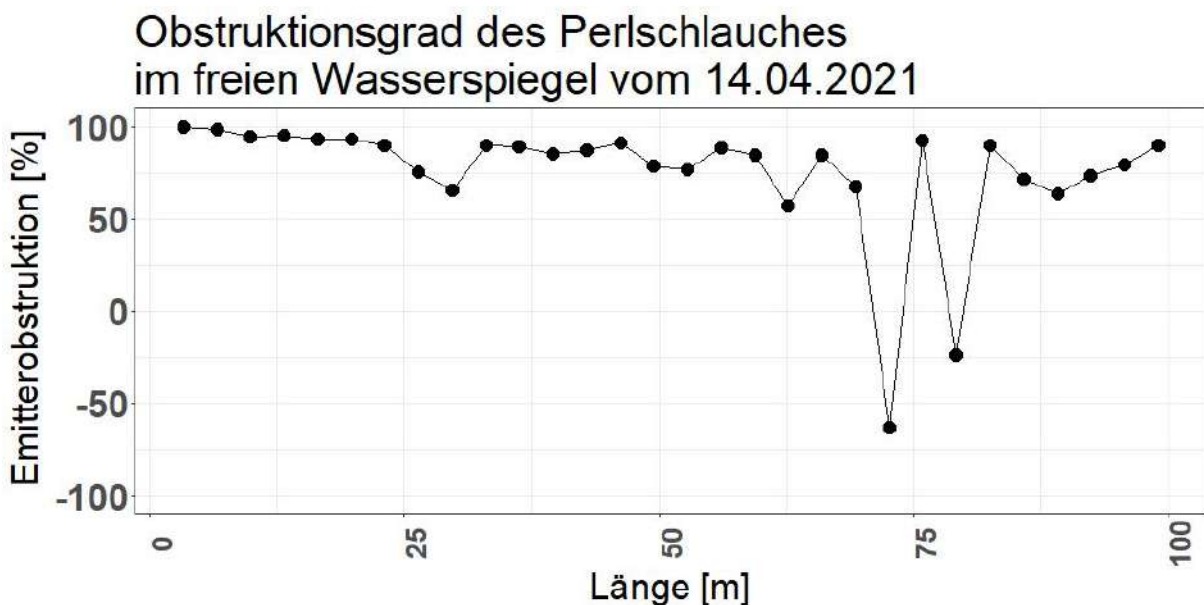


Abbildung 93: Obstruktionsgrad des Perlschlauches im freien Wasserspiegel nach $1,4 \text{ m}^3$ Durchlauf. N entspricht der Anzahl der Durchläufe, DU dem Verteilungskoeffizienten.

Spindelschlauch (Mikrospinne)

Im gravitationsbasierten Versuch mit dem Spindelschlauch wurde der zentrale Präzisionsemitter ersetzt, da der generierte Druck durch reine Gravitation den technischen Mindestdruck des Emitters unterschritt. Zur Verbindung mit dem Hauptrohr wurde stattdessen ein einfaches Adapterstück verwendet, das das Gießwasser ungehindert passieren lässt. Jeweils in Meterabständen wurden die Bewässerungsspinnen auf die Hauptverteilerleitung aufgesteckt (Abbildung 94).

Auf den ersten acht Metern erzeugten die Mikrospinnen gleichmäßige Ausflüsse von $> 2 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$, die danach stetig abfielen, bis bei 20 Metern kein Ausfluss mehr messbar war (Abbildung 95). Die Verteilungsuniformität DU, bezogen auf den vorderen Leitungsabschnitt mit sichtbarem Ausfluss, lag bei 31- 59 % und war damit nur ausreichend. Der Spindelschlauch war ungeeignet für den avisierten Einsatzbereich.



Abbildung 94: Gravitationsbasierter Versuchsaufbau Spindelschlauch (Mikrospinne)

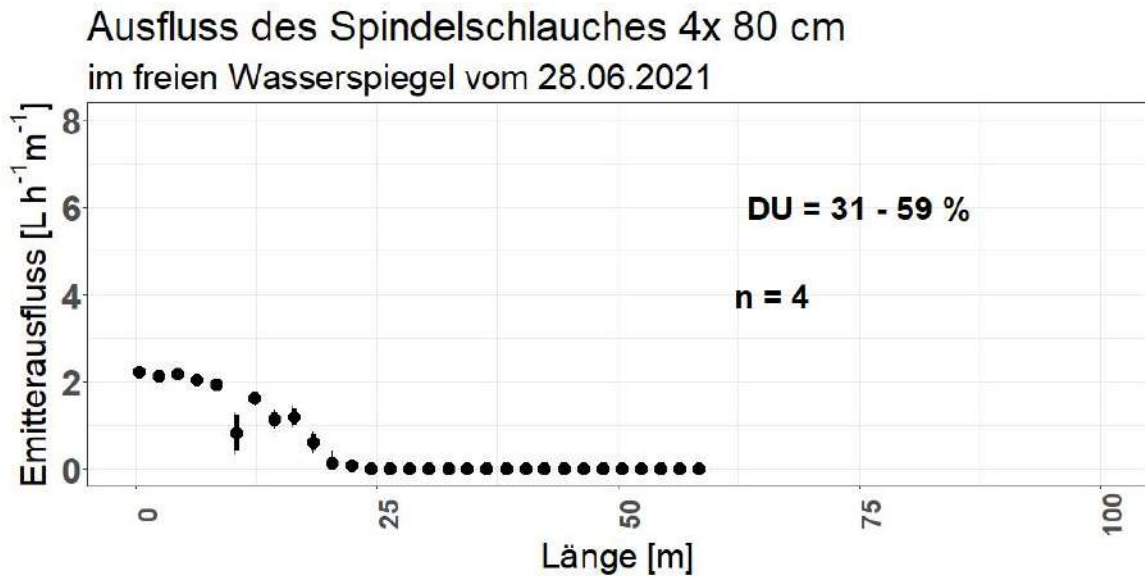


Abbildung 95: Ausfluss des Spindelschlauches im gravitativen System bei 1 m Auslassabstand (N= Durchlaufanzahl)

Mikroschlauch

Der Vorteil des Mikroschlauchs mit 5 mm Durchmesser besteht in seinem hohen Durchflussvermögen. Damit reduziert er das Risiko von Obstruktion deutlich, indem die gesamte Wasserfracht mit ausgeschwemmt wird. Der geringe Reibungswiderstand der Auslassschläuche führte jedoch zu einer hohen Wasserabgabe auf den vorderen 6 Metern, die dann abrupt den Wert Null erreichte (Abbildung 96). Die Verteilungsuniformität von 45-57 % bezieht sich auf den ausflussgenerierenden vorderen Leitungsabschnitt. Da der Mikroschlauch keine gleichmäßige Wasserverteilung lieferte und nur über einen kurzen Front-Abschnitt Wasser emittierte, wurde er als Lösung verworfen.

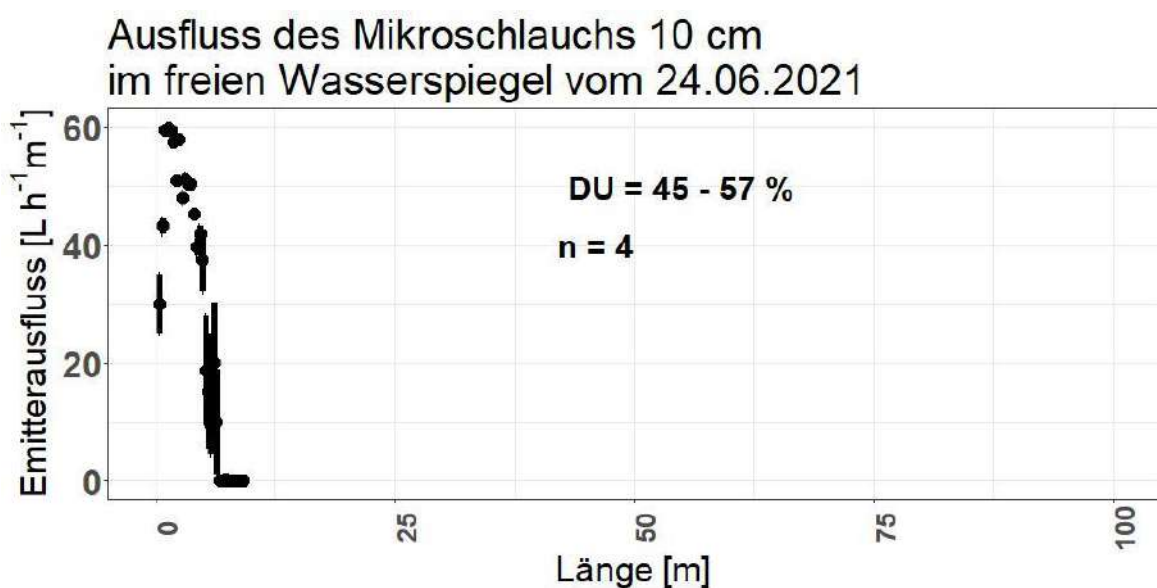


Abbildung 96: Ausfluss des Mikroschlauchs bei 10 cm Baulänge und 30 cm Emitterabstand im gravitativen System

Aqua-Vlies-Schlauch (Eigenkonstruktion)

Die Eigenkonstruktion Aqua-Vlies-Schlauch basierte auf einem gefalteten Bewässerungsvlies-Plättchen von 2 x 5 cm Größe, das mittels Rohrclipsen auf einer 3 mm Bohrung im 18 mm-Hauptrohr fixiert wurden (Abbildung 97). Diese Vliestamponaden wurden so lange justiert, bis sich ein mittlerer Tropf-Ausfluss einstellte. Geprüft wurde die Wasserverteilung mit und ohne vorgeschalteten Filter (120 µm), um die Auswirkungen in Bezug auf Obstruktion zu untersuchen.

Im Betrieb ohne Filter lagen die Ausflusswerte innerhalb des Rohrstrangs auf einem in einem engen Korridor und pendelten um die $0,3\text{L h}^{-1}\text{ m}^{-1}$. Jedoch schwankten die Werte untereinander, so dass sich die gesamte Wasserverteilung inkonstant darstellte (DUa=55 - 62 %; Abbildung 98). Obstruktion verursachte im Versuchsverlauf eine deutliche Abnahme des Gesamtdurchflusses und kontinuierliche Braun- und Grünfärbung der Vliesplättchen. Die Betriebszeit für die Ausbringung von 50 l Wasser betrug in den ersten zwei Messungen 30 min, bei den letzten beiden Messungen zwei Stunden. Auffällig war, dass im ersten Durchlauf der Wasserausfluss im vorderen Leitungsabschnitt, unmittelbar nach dem Einspeisungspunkt, teilweise geringer ausfiel als im letzten Durchlauf. Augenscheinlich spielte die verbesserte Durchfeuchtung der Vliesauflagen eine Rolle.

In der Versuchsvariante mit Filter, war vor allem der Leistungsanfang durch deutliche Sedimentablagerungen auf den Vliestamponaden gekennzeichnet (Abbildung 99, Abbildung 100).

Mit Filter variierten die Ausflusswerte deutlich stärker (DUa= 24 -29 %, Abbildung 101). Als maßgebliche Einflussfaktoren sind der abnehmende Druck zum Leitungsende, die variable Obstruktion und die heterogene Bauweise der Vliestamponaden zu sehen. Hervorzuheben bleibt, dass der Aqua-Vlies-Schlauch über die gesamten 100 Meter Wasser abgab. Im Ergebnis ist das vliesbasierte Schlauchsystem für die praktische Anwendung im Gravitationsbetrieb nicht geeignet, da Wasserfrachten zwangsläufig zu problematischen Ausflusswerten führen.



Abbildung 97: Aqua-Vlies-Schlauch: Montiertes Vlies

Ausfluss des Aqua-Vliestropfschlauches im freien Wasserspiegel ohne Filter vom 14.10.2021

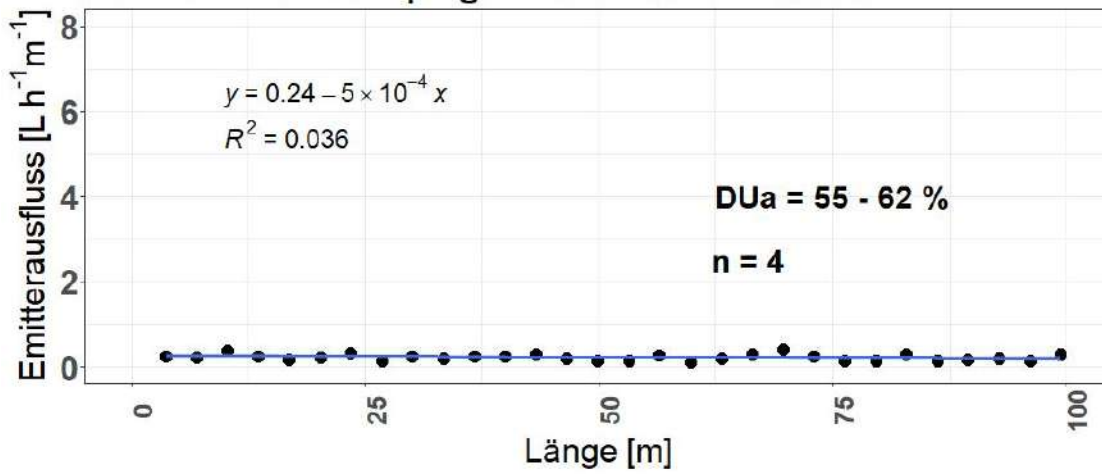


Abbildung 98: Wasserverteilung Aqua-Vliesschlauch im Gravitationsbetrieb ohne Filter (DUa = angepassten Verteilungsindex).

Clogging degree of Aqua-fleece drippers from 08.-14.10.2021

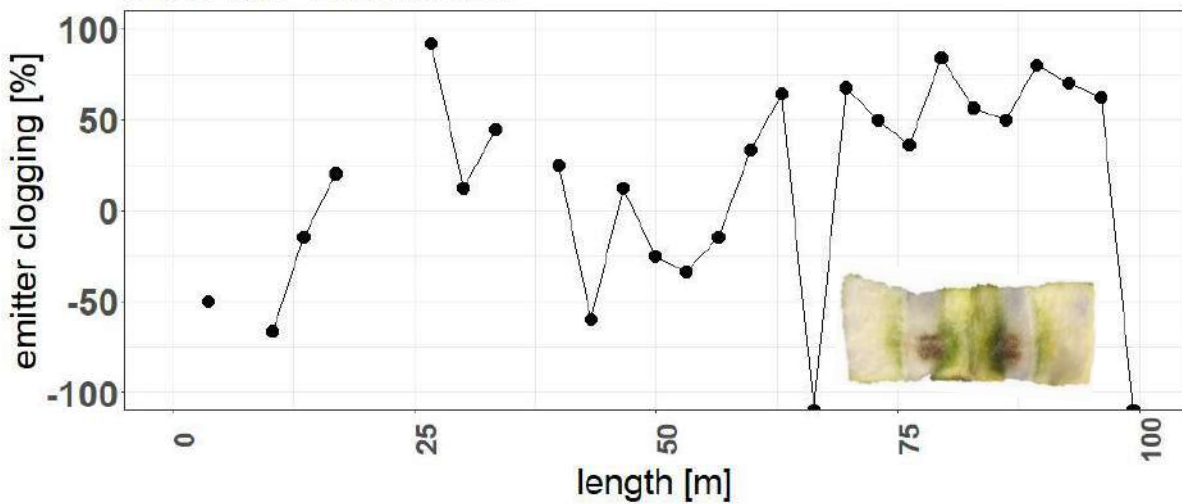


Abbildung 99: Obstruktion des Aqua-Vlies-Tropfschlauches in der ersten Versuchsreihe ohne Filter. Sedimente auf Vliesplättchen

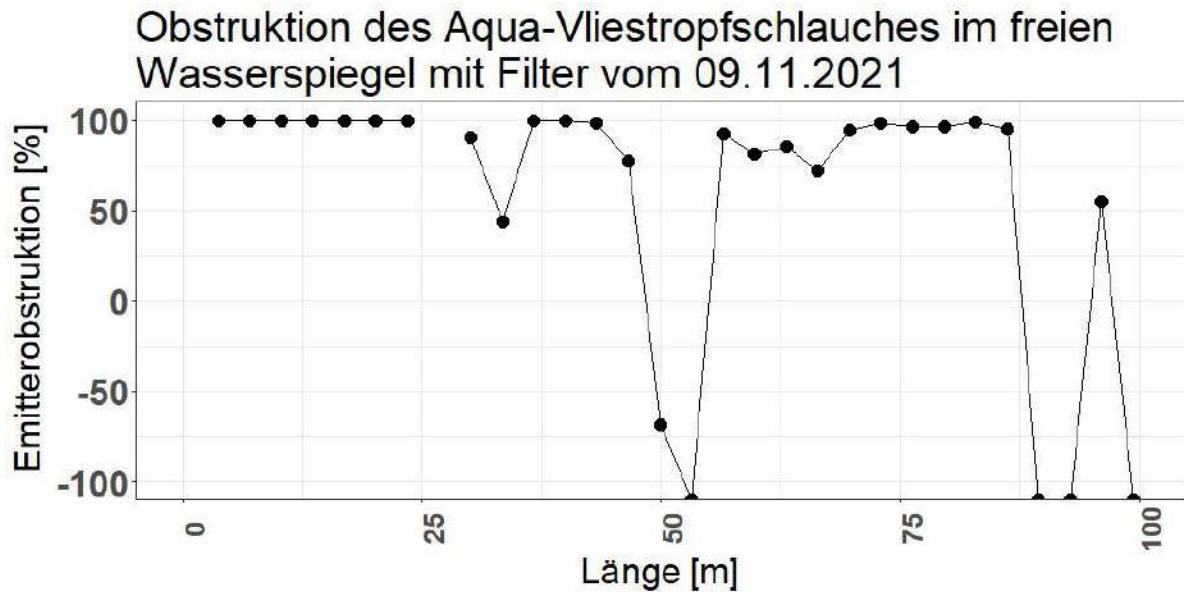


Abbildung 100: Obstruktion des Aqua-Vlies-Tropfschlauchs in der zweiten Versuchsreihe mit Filter. Sedimente auf Vliesplättchen.

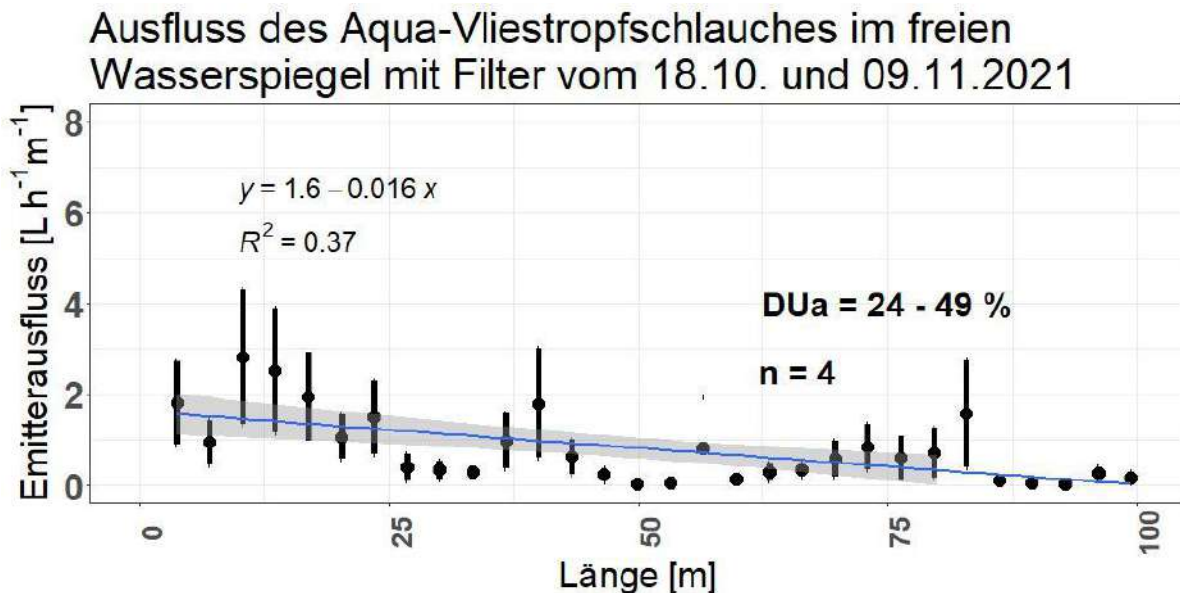


Abbildung 101: Verteilunguniformität des Aqua-Vlies-Tropfschlauches im Gravitationsbetrieb mit Filter.

Palaplast-Einzeltropfer

Dieses System wurde aus einer 16 mm-Hauptleitung aufgebaut, in die alle 30 cm in eine 3 mm-Bohrung ein Palaplast-Einzeltropfer eingesteckt wurde (Abbildung 102). Der druckkompensierte Tropfer ist selbthaltend und realisiert eine Wasserabgabe von 2,0 L h⁻¹. Der Vorteil der Palaplast-Einzeltropfer-Schläuche liegt in der langjährigen Verwendungsmöglichkeit, wenn eine regelmäßige Reinigung erfolgt. Die innenliegende Membran lässt sich aufgrund der Schrauböffnung des Emitters einfach säubern. Sie kann manuell mit Draht und Wasser erfolgen.



Abbildung 102: Palaplast-Einzeltropfer eingesteckt in 20 mm HDPE-Leitung

Die Palaplast-Emitter gelten als beständige Technik, was zur Müllvermeidung beiträgt. Mit Kosten von 1,50 € je Meter ist der Palaplast-Einzeltropfer-Schlauch preiswert und kann sich in Ghana über die Nutzungsdauer schnell amortisieren. Insofern ist diese reversible Technik für den Einsatzzweck geeignet, vergleichsweise umweltfreundlich und auf Dauer kostenschonend.

Der Tropfer-Emitter arbeitet bereits ab einem Druck von 0,1 bar und ist daher im gravitationsbasierten System verwendbar. Entsprechend werden weder Strom noch Pumpe benötigt, was Energie und Betriebskosten einspart. Nachteilig wirkt sich der geringe Betriebsdruck des Gravitationsbetriebs aus, da die Einzeltropfer erst ab einem Betriebsdruck von 0,5 bar eine nachhaltige Druckkompensierung leisten. Die Wasserverteilungseffizienz von Leitungsanfang zum Leitungsende variierte entsprechend.

Im Versuch in Deutschland wurde im ersten Test mit einer Stranglänge von 100 m begonnen. Die Messungen ergaben einen linearen Abfall der Emitterausflüsse auf unter $2 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und einen inakzeptablen DU-Wert von 36-47 % (Abbildung 103). Daher wurde der Strang im Versuchsverlauf auf 30 m verkürzt, sodass sich die Wasserverteilungsuniformität DU mit 64-80% auf ein zufriedenstellendes Niveau verbesserte.

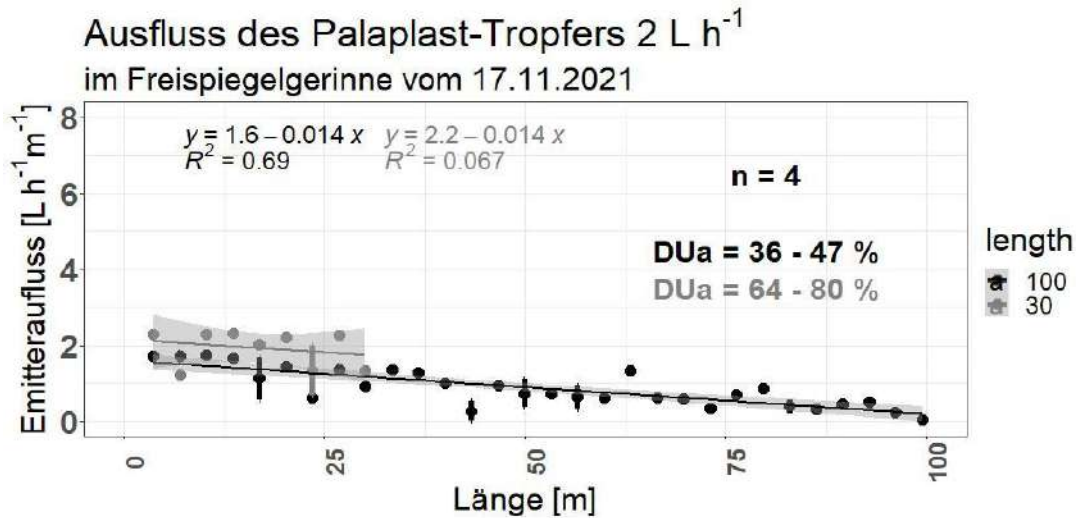


Abbildung 103: Wasserverteilung des Palaplast-Einzel-Tropfer-Schlauch. Gemessen am 100m- und 30m-Strang (grau).

Die zunächst verwendete 1 mm-Hauptleitung hatte offensichtlich negative Auswirkungen auf die Wasserverteilungsgleichheit. Daraufhin wurde ein 20 mm-Hauptleitung installiert, die Reibungsverluste reduzierte, eine größere Wassermenge transportierte und gleichmäßiger verteilte.

Für aussagekräftige Messungen wurden vier Stränge a 20 m parallel betrieben, die so dem späteren Systemaufbau in Ghana entsprachen. Die Wasserabgabe je Tropfer lag nun durchgehend bei ca. $2 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und wies eine zufriedenstellende bis gute Wasserverteilungsuniformität von 76-86 % über die Gesamtstrang auf (Abbildung 104).

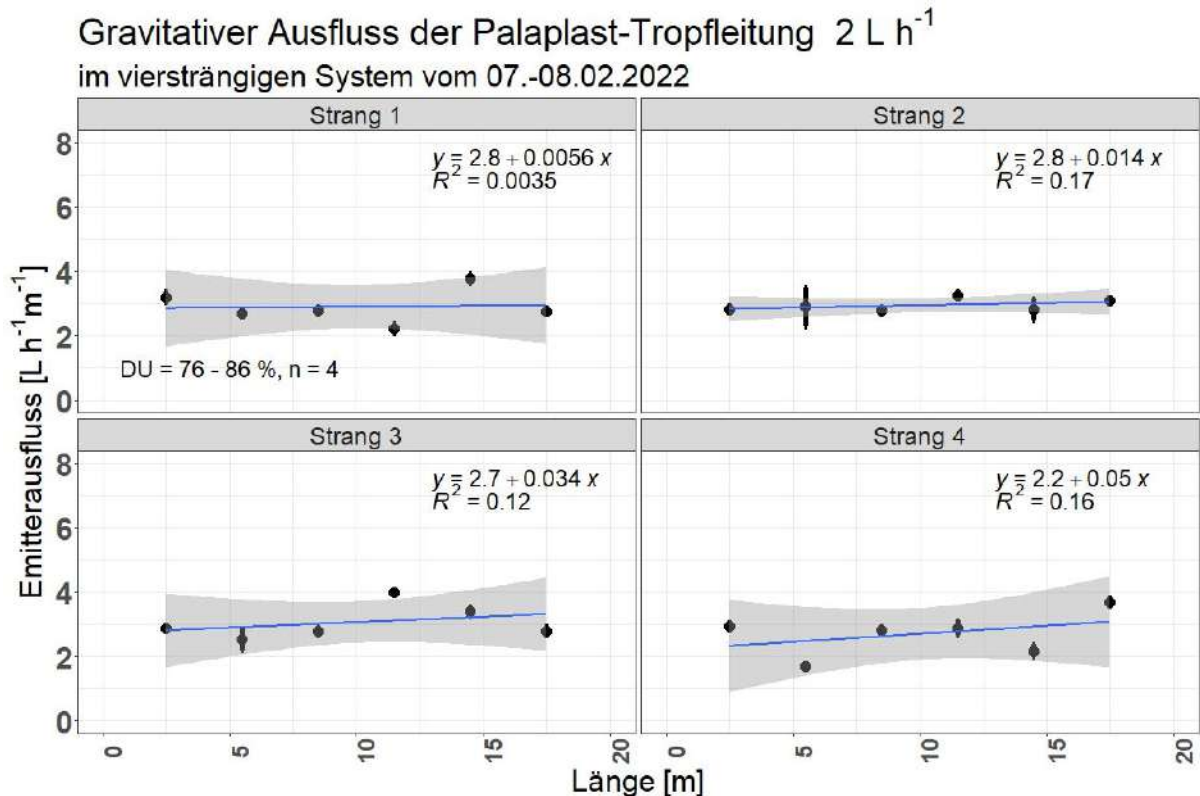


Abbildung 104: Gravitationsbetrieb Palaplast-Tropfschlauch ca. 2 L h^{-1} ; 4 Stränge a 20 m im Parallel-Betrieb mit 20 mm-Rohr

Fazit

In der Abwägung der Parameter liefert das Palaplast-Einzeltropfer-System im Vergleich zu den anderen Tropfschlauchsystemen die besten Ergebnisse. Zufriedenstellende bis gute Ausflusswerte im Gravitationsbetrieb, Obstruktionsbeständigkeit, einfach Reinigungsmöglichkeit und günstige Anschaffungskosten prädestinierten es für den späteren Einsatzzweck im Rahmen der Pilotanlage in Ghana.

Die Wasserverteilung des Unitechline-Schlauchs entsprach nicht vollständig den Angaben des Herstellers. Trotzdem sticht das in der Praxis weit verbreitete Schlauchsystem mit z.T. guten Werten bei der Wasserabgabe hervor. Es ist vor allem für den Einsatz unter Pumpbetrieb geeignet, kann die Anforderungen im Gravitationsbetrieb jedoch nicht ausreichend erfüllen. Entsprechend ist es nur sehr eingeschränkt für die gravitationsbasierte Pilotanlage geeignet bzw. sollte generell nur im Zusammenspiel mit Pumpen zum Einsatz kommen. Der Klewadrip-Schlauch ist aufgrund von Konstruktionsmängeln für den avisierten Einsatzzweck nicht verwendbar, ebenso wie die Eigenkonstruktion Dochtropfschlauch. Ursächlich sind zahlreiche undichte Verbindungen zwischen den Dochten und der Hauptleitungen, die nicht behoben werden konnten. Rein technisch betrachtet, ist der Perlschlauch zweckmäßig für den Betrieb mit und ohne Pumpendruck. Aufgrund des deutlich negativen Obstruktionsverhaltens, kann er jedoch nicht erfolgreich mit belastetem Abwasser betrieben werden. Zunehmend einsetzende Obstruktion führte auch zum Ausschluss der Eigenkonstruktion Aqua-Vlies-Schlauch. Mikro- und Spindelschlauch erreichen einen zu hohen Wasserausfluss auf den ersten Metern und sind nicht in der Lage über die gesamte Stranglänge Wasser zu emittieren. Sie sind entsprechend unbrauchbar für den Einsatz im Pilot-Bewässerungssystem.

2.6.5.6 AP 2.3 DE Bewässerungsversuche in Deutschland, Nebenergebnisse

Versuche Dochtropfschlauch (Eigenentwicklung)

Als zusätzliches Projektziel wurde in Deutschland Versuche mit dem „Dochtropfschlauch“ durchgeführt. Hierbei handelte es sich um eine Anpassung der Bewässerungsanlage an die Gegebenheiten in Ghana aus einfachem Material bestehende Konstruktion leiten textile Dochte das Wasser in den Boden. Das Bewässerungskonzept ist konzeptionell an die verbreiteten Kleinstbewässerungen angelehnt, die aus einer Kombination von Getränkeflaschen und textilen Dochten konstruiert werden. Dieser auf Kapillarkräften beruhende „Docht-Tropfschlauch“ ist in der Lage, bei geringem Druck (< 1 m Wassersäule), über eine größere Tropfschlauchlänge Wasser zu verteilen und zu emittieren. Das Dochtropfschlauchsystem besteht aus einer 20 mm Hauptverteilerleitung. In 30 cm Abständen wurden in den Hauptstrang Pressfit-Adapterstücke in 3 mm Bohrungen eingesteckt und textile 5 mm-Bewässerungsdochte mit Spezialkleber in den Adapter eingeklebt (Abbildung 105). Das Dochtende wurde in den Boden geführt.

Die Versuche zeigen, dass die Dochte auf den ersten Metern der Verteilerleitung zu viel Wasser abgeben. Die Verbindung von Docht und Adapterstück konnte nicht durchgängig dicht hergestellt werden, sodass es im Strangverlauf zu Leckagen und unkontrolliertem Ausfluss kam. Im Versuchszeitraum konnte keine konstant gleichmäßige Bewässerung auf der gesamten Schlauchlänge erreicht werden. Aufgrund der ungleichmäßigen Wasserabgabe wurden keine näheren Daten erhoben und das Konzept verworfen.



Abbildung 105: Verbindung von Bewässerungsdocht mit Adapterstück zur Hautleitung. Detail Bewässerungsdochte

Nebenergebnis „Wasser-Desinfektion mit Flaschen und Flaschenbewässerung“

In einfachen Vorversuchen im Gewächshaus in Deutschland wurden zusätzlich Erkenntnisse über die thermische Behandlung von keimbelastetem Wasser gewonnen (Abbildung 106). Durch Einwirkung von UV-Strahlung und hohen Temperaturen kommt es zu einer Reduktion von Pathogenen im Wasser.

An 33 Tagen wurden im Gewächshaus Lufttemperaturen ≥ 40 °C gemessen, die sich über die Monate Mai bis September verteilen. Die Temperaturbedingungen waren vergleichbar zu den meteorologischen Verhältnissen in Ghana. Sie reichten aus, um in den Getränkeflaschen Wassertemperaturen von 45°C und im Maximum von bis zu 55° zu erreichen, die zu einer partiellen Desinfektion führen (Abbildung 106 und Abbildung 107). Die Sonneneinstrahlung und Umgebungstemperatur bewirkten eine akkumulierende Wärmeabsorption in den Flaschen. Am 21.06.2022 um 16:00 Uhr erreichten, bei vollständig geschlossenem Gewächshaus, 65 % der Flascheninhalte eine Temperatur über oder gleich 55 °C (Abbildung 108). Die Flaschen wurden mit einem im Boden eingedichteten Mikroschlauch-Stück getestet,

das mit einem Stopfen verschlossen war. Dieser Aufbau wäre als Basismodul für die Verbindung mit einer Bewässerungsanlage vorstellbar. Besonders effektiv war die Erwärmung in braunen Weinflaschen.



Abbildung 106: Experimenteller Aufbau zur Wassertemperaturmessung in Flaschen 2022. Pathogenreduktion durch Hitzeeinwirkung

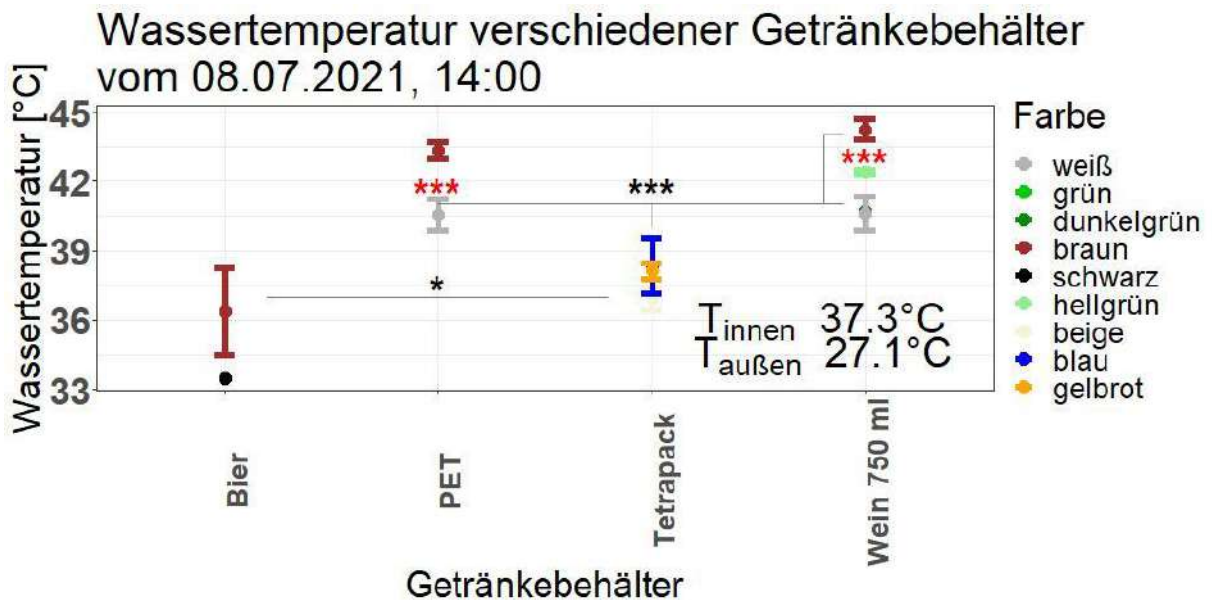


Abbildung 107: Wassertemperatur mit maximal 45 °C in Getränkebehältern bei 37,3°C Gewächshaus-Innentemperatur

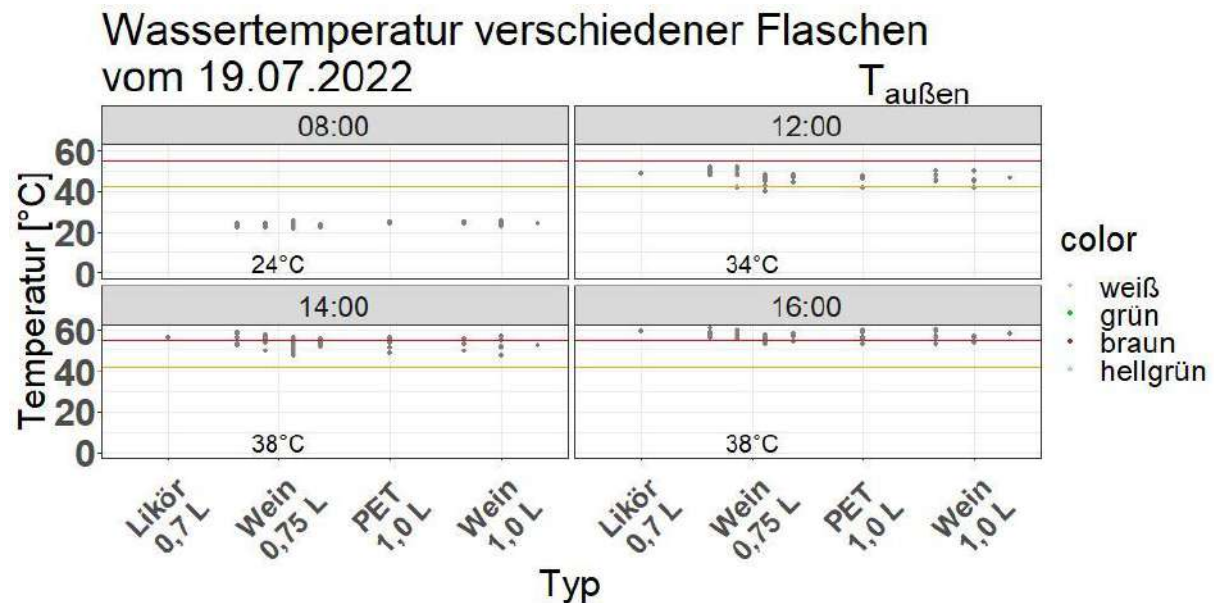


Abbildung 108: Wassertemperatur mit maximal $\geq 55\text{ °C}$ in Getränkebehältern ab 12.00 Uhr bei bis zu 38 °C Innentemperatur

Zweckmäßig ist diese simple Aufbereitungstechnologie an heißen, wolkenfreien Tagen und kann zur zusätzlichen Behandlung von Wasser aus Speichertanks genutzt werden, das häufig einem raschen Qualitätsverlust unterliegt. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen wäre es folgerichtig, im großen Maßstab Möglichkeiten der temperaturabhängigen Desinfektion von Gießwasser zu prüfen. Dunkle Speicher-Behälter oder Kreislaufsysteme mit dunklen Rohrleitungsschlägen sind ein denkbarer Ansatz, um eine Erhitzung über 55 °C zu erreichen, wie sie in Deutschland bereits zur Erwärmung von Kleinbadebecken Anwendung findet.

2.6.6 AP 2.3 A: Pandemiebedingt: Biofilmanalysen zu den Bewässerungsversuchen von Manotura in Deutschland

Auswahl der Bewässerungsmaterialien hinsichtlich Biofilmbildung, Sedimentation und Obstruktion

Obstruktion ist eine zentrale Herausforderung beim Einsatz von Tropfbewässerung. Durch die richtige Schlaucharchitektur lässt sich die Biofilmbildung, Sedimentation und Obstruktion in den Bewässerungsschläuchen begrenzen. Tropfrohemitter werden hauptsächlich durch Sedimente im Wasser und Ausfällungsprozesse beeinträchtigt. Auch die Bildung von Biofilm wirkt sich negativ auf die Wasserabgabe aus. Die Biofilm-Bildung wird maßgeblich durch im Wasser mitgeführtes organisches Material gefördert. Langfristig bestimmt also die Wasserqualität die Funktion der Tropfsysteme. Wasserspeicher sollten daher turnusgemäß gereinigt werden und vorgelagerte Wasserfilter zum Einsatz kommen. Physikalische und biologische Ablagerungen finden vorwiegend im Randbereich der Emitter statt. Trapezförmige angelegte Emitter-Architekturen haben sich als besonders ungünstig herausgestellt, da in den Randbereichen niedrige Fließgeschwindigkeiten vorherrschen, die Ablagerungen begünstigen. Im Umkehrschluss tragen schmale Durchgänge zu weniger Ablagerung bei.

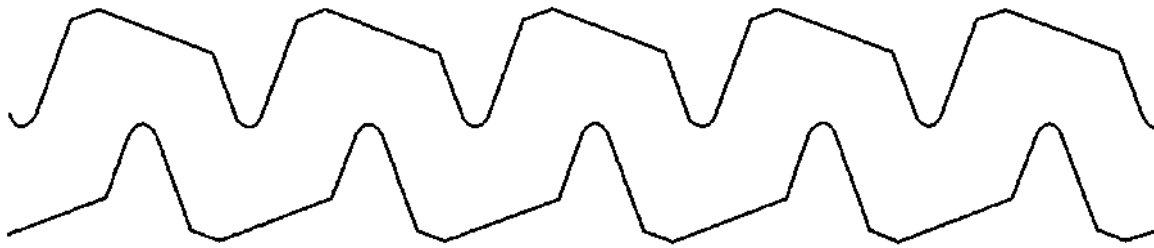


Abbildung 109: Emitterlabyrinth-Struktur hergestellt von Netafim (Yan et al. 2009).

Abbildung 109 zeigt das Schema einer günstigen Labyrinth-Struktur, die Obstruktion reduziert. Bei der Testung sieben verschiedener Emittersorten wiesen die druckkompensierten in-line Emittlern nach 204 h den geringsten Biofilm-Besatz auf (Zhou et al. 2013). Druckkompensierte Systeme, wie der Palaplast-Einzel-Emitter, sind demnach von Biofilm weniger betroffen.

In der Versuchsphase war die eingehende Untersuchung der Palaplast-Einzel-Tropfer hinsichtlich des Biofilms nicht möglich, da sie aufgrund der Form und Größe nicht mikroskopiert werden konnten. Der Biofilm ließ sich nicht schadlos ablösen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass niedrige Investitionskosten ein wichtiger Faktor für die Bauern in Ghana sind. Zu bevorzugen sind daher einfach konstruierte Tropfsysteme, die über Gravitation betrieben werden können, wenig obstruktionsanfällig und kostengünstig sind. Daran anknüpfend wurden für die Vorversuche in Deutschland 5 mm Mikroschlauch und Mikrospinnen mit 3 mm Schläuchen ausgewählt. Obstruktion liegt bei diesen Schläuchen kaum vor, da keine Strukturen existieren, die sie begünstigen. Frachtstoffe werden ausgeschwemmt. Der Unitechline-Tropfschlauch wurde ausgewählt, da er druckkompensiert arbeitet und ein spezielles Kanaldesign im Emitter besitzt. Dieser reduziert Ablagerungen und Biofilmbildung. Der Perlschlauch wurde aufgrund seines geringen technischen Betriebsdrucks in die Versuchsreihen aufgenommen. Seine Porenstruktur prädestinierte ihn jedoch für Sedimentation und Biofilmbildung. Schon nach kurzer Zeit reduzierte sich die Wasserabgabe erheblich und die Wassererteilung wurde ungleichmäßig. Die Eigenkonstruktionen Aqua-Vlies- und Dochtschlauch waren ebenfalls empfänglich für Biofilm bzw. Sedimentation, dies zeigte sich insbesondere auf den Vliestamponaden durch Verfärbungen. Im Gegensatz dazu, existieren im druckkompensierten Palaplast-Einzeltröpfersystem zwar verwinkelte Emitterstrukturen, die jedoch einfach manuell gereinigt werden können. Dieses System kam zusätzlich mit dem geringen Betriebsdruck aus. Durch diese Eigenschaften qualifizierte sich das Einzeltröpfer-Konzept für die Pilotanlage in Ghana.

Nachfolgende Tabelle stellt die Auswahlkriterien und die Bewertung der unterschiedlichen Bewässerungskonzepte dar.

Tabelle 38 Auswahl der Tropfschlauchsysteme und Ausschlussgrund

System	Auswahlgrund	Bemerkung / Ausschluss
--------	--------------	------------------------

Unitechline AS (Netafim)	Bewährtes Tropfsystem mit speziellem Kanaldesign des Emitters (Obstruktion). Druckkompensiert. Unterirdischer Einbau möglich.	Funktioniert im Pump-Betrieb. Gravitationsbasiert zu geringer Druck für gleichmäßigen Wasserausfluss, auch bei Mehrfacheinspeisung.
KleWaDrip-Line	Emitter mit konstruktivem Schutz gegen Sedimentation, speziell gegen Kalkausfällung.	Produktionsfehler: Risse an Emittlern. Produkt nicht mehr am Markt Test nicht fortgesetzt.
Spindelschlauch (Mikrospinne)	Auslass je Anschluss 4 Schlaucharme <i>a</i> 3 mm in 80 cm Länge (verengt, ähnlich Mikroschlauch)	Wasserabgabe zu ungleichmäßig (mit und ohne Emitter). nur geringe Baulänge möglich
Mikroschlauch	Auslass über 4 mm Schlauch-öffnung. Geringer Reibungswiderstand Eignung für Hanglagen (wg. Abnahme Ausfluss zum Ende). Einfache Konstruktion. Unempfindlich gegen Frachten/ Obstruktion	Wasserabgabe zu ungleichmäßig, nur geringe Baulänge möglich
Schwitzschlauch (Perlschlauch)	Wasseraustritt über Schwamm-gewebe. Sehr einfache Konstruktion.	Wasserabgabe zu ungleichmäßig. Verschluss durch Obstruktion.
Palaplast-Einzeltropfer-Schlauch	Einzelemitter 2L / Std. Druckkompensiert. Reinigungsfähig und reversibel. Arbeitet mutmaßlich mit geringem Betriebsdruck. Geringe Kosten.	Bestes System im Test bei 30 m Baulänge ca. 2L/ h je Tropfer. Danach linearer Abfall. Ab 50 m Baulänge noch 1l/ h je Tropfer.
Fleece-Schlauch „aqua-Vlies“ (Eigenentwicklung)	Einsatz regional verfügbarer Materialien. Geringe Kosten.	Wasserabgabe zu ungleichmäßig. Baulänge bis 100 m. Starker Biofilm/.& Obstruktion
Docht-Schlauch (Eigenentwicklung)	Einsatz regional verfügbarer Materialien. Adaption zu bekannter Flaschenbewässerung mit Docht. Geringe Kosten.	Wasserabgabe zu undichte Verbindungen Funktion nicht zufriedenstellend.

2.6.7 AP 2.3 Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit aufbereitetem Wasser in Ghana

Pilotanlage in Ghana

Die Pilotanlage wurde im Mai 2021 in Dzorwoulou, Region Accra montiert. Dzorwoulou liegt am Fluss Onyasia, an dem sich die „Legon-Kläranlage“ befindet. Anlagenbetreiber ist der ASIP. Auf dem umzäunten und bewachten Gelände der Kläranlage, die aus den anliegenden akademischen Instituten der University of Ghana (UG) und einem Krankenhaus gespeist wird, wurden die Versuchsanlagen aufgebaut. Am Onyasia wurden im ersten Halbjahr 2018 bereits Untersuchungen zur Wasserqualität in Zu- und Ablauf sowie flussauf- und abwärts der Aufbereitungsanlage durchgeführt. Die Verwendung von behandeltem Abwasser leistet einen entscheidenden Beitrag zur Einsparung von Düngestoffen, da den Pflanzen über das Gießwasser kontinuierlich Nährstoffe zugeführt werden. Die Mikronährstoffe gelangen direkt an die Pflanzenwurzel und sind weniger von Auswaschung betroffen. Es kommt zu einer deutlichen Steigerung der Entwicklung der Pflanzenphysiologie und einer Ertragssteigerung.

Die Humusdeckschicht der Versuchsfläche wurde im Vorfeld bereits abgetragen, um ein realistisches Szenario analog zur Beschaffenheit tropischer Böden mit landwirtschaftlicher Nachnutzung zu simulieren. Zur Verbesserung der Infiltration und zur Pflanzvorbereitung wurde das Stück gepflügt. Die

Bodenansprache ergab einen lehmigen Sand bis sandigen Lehm, was zu einem guten Infiltrationsverhalten des Bodens führt. Gleichzeitig ist dieser leichte Bodentyp anfällig für das Ausschwämmen von Düngestoffen. Ganzjährig durchgehender und gemischter Anbau (Intercropping) begrenzt den Verlagerungsprozess und dämmt die Bodenerosion ein. Darüber hinaus kann die Wasser- und Nährstoffhaltekapazität, sowie der Humusanteil durch Mulchung und Kompostgaben optimiert werden. Urbane Komposte sind häufig durch hohe pH^o-Werte gekennzeichnet, die die vom Grundsatz her eher sauren tropischen Böden in den alkalischen Bereich verschieben. Hohen pH-Werten, die auf der Versuchsanlage mit pH 8,2 ermittelt wurden, sollte durch Kalkung entgegengewirkt werden. Begleitend sind die Feldstreifen mit Entwässerungsgräben bzw. Drainagen zu umgeben, um in der Regenzeit die Nährstoffabschwämmung zu reduzieren.

Covid-19-bedingt verblieb nur eine kurze Laufzeit für die Pilotphase in Ghana, so dass als Kulturpflanze aufgrund ihrer kurzen Entwicklungsphase Salat aufgepflanzt wurde, der in maximal 75 Tagen bis zur Ernte reift. Salat wird in Dzorwoulou überwiegend aus dem Umland importiert. Durch Entfallen von Transportwegen können Emissionen eingespart werden.

Technischer Aufbau der Anlage

Die Pilotanlage in Ghana besteht aus insgesamt neun Feldern Auf sechs dieser Felder wurde die Bewässerungsanlage installiert, wobei jeweils drei Feldstreifen als Kontrollparzellen fungierten, die nur Regenbeaufschlagt wurden (Abbildung 110).

Jedes Anbaufeld ist 1,2 m breit und 20 m lang. Je Feld wurden parallel angeordnete vier Stränge aus 20 mm-HDPE(High-density polyethylene)-Tropfschlauch á 20 m Länge fixiert. In einer Linie angeordnet und in Abständen von 30 cm wurden Palaplast-Einzeltropfer (2 L/h-1) in 3 mm Bohrungen eingesteckt. Für die späteren Messungen wurden unter einigen der Palaplastemitter rasterartig 24 Gruben ausgehoben und 500 ml bzw. 800 ml Messbecher eingesenkt (Abbildung 111).

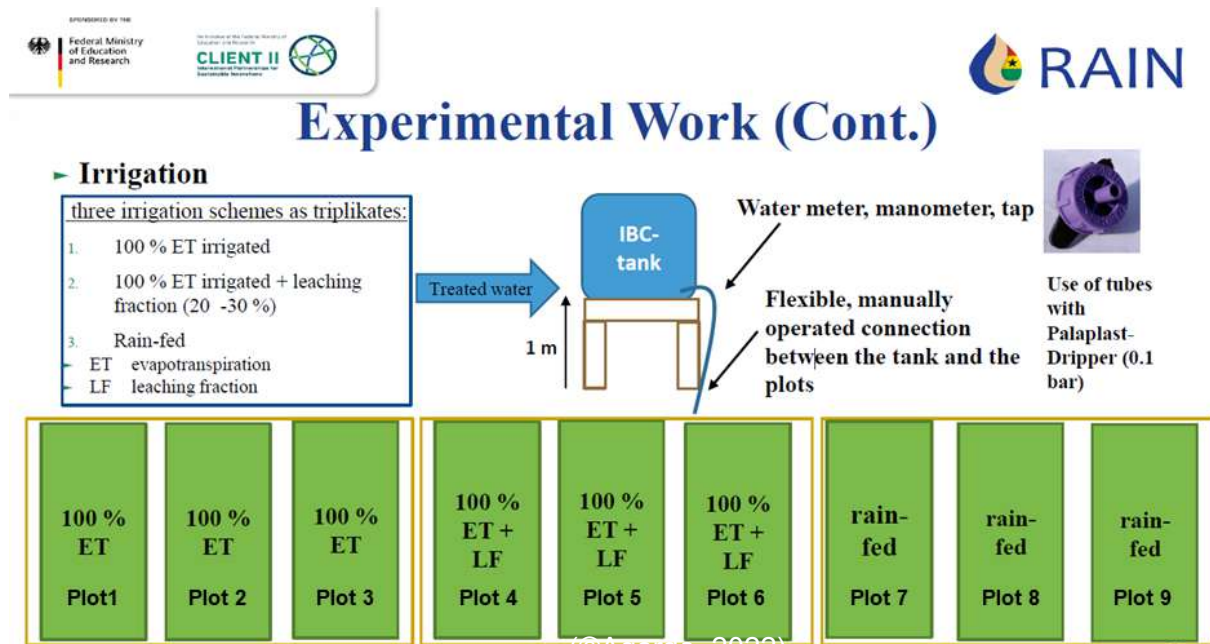


Abbildung 110: Schematischer Versuchsaufbau der Pilotanlage in Ghana und Aufteilung in 3 Versuchsgruppen: Feld 1-3 Evapotranspiration (ET); Feld 4-6 ET & 20 -30 % Leaching Fraction (LF); Feld 6-9 natürlicher Niederschlag



Abbildung 111: Anordnung Messbecher zur Ermittlung des Ausflusses der Palaplast-Emitter; Bild (©Agorde, 2022)

Als Ausgangswasserreservoir diente ein IBC(Intermediate Bulk Container)-Tank mit 1 m³ Rauminhalt auf einem 2,0 m hohen Stahlgerüst, in den zuvor antransportiertes unbehandeltes

Bachwasser gepumpt wurde. Über eine Abfolge von Filtereinrichtungen, die von der RUB entwickelt wurden, gelangte das behandelte Abwasser zum Vorlagebehälter. Dieser 1 m³-Behälter wurde auf einem Holzgerüst in 1,0 m Höhe platziert und lieferte den Vordruck für die gravitationsbasierte Bewässerung. An den Tankanschluss wurden ein mechanischer 120 µm-Filter, eine Hauswasseruhr, ein Manometer und ein Absperrhahn für Messungen angeschlossen. Über ein 32 mm-HDPE-Rohr als mobile Zuleitung, gelangt das Gießwasser zu den sechs Einzelfeldern und wurde dort für die Bewässerung auf die vier Einzelstränge aufgeteilt. Jedes Anbaufeld wurde für die Dauer der Bewässerung jeweils nacheinander über eine mobile Rohrleitung an den Vorlage-Tank angeschlossen und beschickt (Abbildung 112).



Abbildung 112: Salatsetzlinge nach der Pflanzung, Bilder (©Agorde, 2022)

Die Auspflanzung der Salatsetzlinge erfolgte am 19.07.2022 auf allen sechs zu bewässernden Feldern und den drei Kontrollparzellen. Zur ersten Bodendurchfeuchtung wurden alle Felder mit je 65 l Wasser versorgt (Abbildung 113).

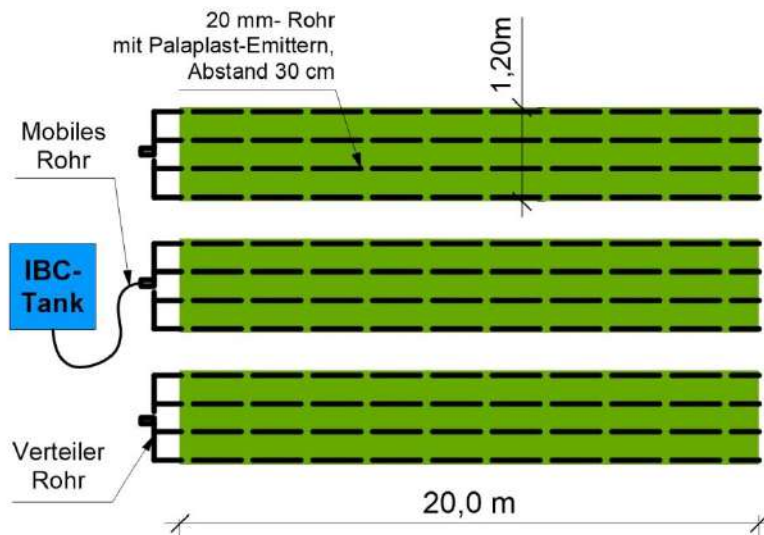


Abbildung 113: Schema Leitungsvorlauf und Palaplast-Einzelemittler-Schläuche auf den Anbauparzellen



Abbildung 114: Salatsetzlinge nach der Pflanzung, Bilder (©Agorde, 2022)

Der tägliche Wasserbedarf der Anbaufläche richtet sich nach der Größe und dem Anspruch der jeweiligen Kulturpflanze. Das FiW übermittelte Angaben der Bewässerungsmengen für die gängigsten Anbaukulturen in Ghana. Da keine Maximalwerte für die Evapotranspiration verschiedener Kulturpflanzen verfügbar waren, wurde mit Durchschnittswerten gerechnet. Die von der DWA geforderte Empfehlung von 50 % Leaching fraction (LF) wurde nicht verwendet, stattdessen wurde der Auswaschwasserbedarf berechnet. Die durchschnittliche Leitfähigkeit des Bodens lag bei $1,0955 \text{ dS m}^{-1}$. Entsprechend dem ermittelten Gesamtwasserbedarf von ca. 300 L d^{-1} , wurden die Parzellen 1 bis 3 mit je 42 L d^{-1} und die Feldstreifen vier bis sechs mit je 65 L d^{-1} versorgt. Die Wassergaben erfolgten fünf Wochen lang zwischen dem 19.07.2022 bis zur Salat-Ernte am 31.08.2022.

Ziel der Versuchsanlage war das Monitoring des Aufbereitungswassers und des Einflusses bei 100% ET (Evapotranspiration) und 100 % ET mit 20- 30 % LF (Leaching fraction). Außerdem die Funktionsprüfung der Palaplasttropfer-Leitung im Gravitationsbetrieb mit aufbereitetem Abwasser, sowie die Auswirkung auf die Entwicklung der Anbaukultur.

2.7 Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojektes Training und Weiterbildung (AP3)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 „Training und Weiterbildung“ wurden insgesamt zwei Anwenderschulungen zu Hochwasser- und Dürreführwarnsystem und zur Nutzung des gekoppelten Biokohlefiltersystem mit nachgeschalteter Bewässerung durchgeführt. Außerdem wurden in beiden Untersuchungsgebieten Stakeholder Workshop zur Sensibilisierung für den Klimawandels mit Anwohner:innen, Kleinbauer:innen und Verwaltungskräfte geführt.

AP 3.1 Aufklärung und Verhaltenstraining für die lokale Bevölkerung

In den Untersuchungsgebieten wurden verschiedene Gesprächsrunden und Workshops zur Aufklärung und Verhaltenstraining durchgeführt. Prinzipiell ist das Bewusstsein für den Klimawandel bei allen Bevölkerungsgruppen auf Grund der aktuellen Dürre- und Hochwasserereignisse sehr hoch. Schwerpunkt der Maßnahmen waren die Arbeiten mit der Bevölkerung im Nabogo-Einzugsgebiet.

Nabogo-Einzugsgebiet

Im September 2021 konnte das FiW begleitet mit der University for Development Studies erste Gespräche mit Bauern im Nabogo-Einzugsgebiet führen. Bei diesen Gesprächen wurden Informationen über die Struktur der Orte, Anbaumethoden, Dürre- bzw. Hochwasserereignisse und Wasserverwendung erhoben. Dazu zählte der Einsatz von chemischen Düngermitteln wie Glyphosat und die Art der Bewässerung der Felder. In den Überflutungsgebieten des Nagobos wird intensiver Reisanbau betrieben (Abbildung 114). Die Anbauperiode des Reises startet kurz vor der beginnenden Regenzeit. Außerdem war es möglich, einen Einblick in die Probleme der Bauern zu erhalten. So sind die Reisbauern seit ungefähr zehn Jahren mit dem Problem des sogenannten „Wild Rice“ konfrontiert. Einer invasiven Reissorte, die sich unter ihren angebauten Reis mischt und diesen verdrängt. Neben Reis sind weitere Anbauprodukte im Nabogo-Einzugsgebiet Mais, Soja und Sheanussbäume.



Abbildung 115: Besuch der Reisfelder im Nabogo-Einzugsgebiet.

Mit Anwohner:innen, die in überflutungsgefährdeten Bereichen in Tamale leben, wurde über Hochwasserereignisse gesprochen. Bei diesem Austausch ging es um die Überflutungssituation und den Gefahren, die sie bei einer Überflutung ausgesetzt sind, den Gründen der Überflutungen und die Veränderung der Intensität und Ausprägung der Überflutungen. Des Weiteren konnte Einblick in ihre Bewältigungsstrategien zum Umgang mit Hochwasserereignissen gewonnen werden. In Abhängigkeit von ihrer geographischen Lage und ihrem Einkommen gehen die Betroffenen unterschiedlich mit den Überflutungen um. Viele Bewohner:innen verlassen ihre Häuser nicht, wenn das Wasser in ihren Häusern knöchelhoch steht. In den ärmeren Gemeinden trocknen sie ihren Hausrat nach einer Überflutung vor dem Haus. Elektrische Geräte wie Fernseher werden an der Zimmerdecke angebracht. In reicheren Gegenden verlassen die Bewohner ihre Häuser zu Regenzeit und kehren erst in der Trockenzeit zurück. Zusätzlich schützen sie ihre Häuser mit kleinen Flutmauern. An einigen Orten wird das Überflutungsproblem noch verstärkt, da der Plastikmüll Durchflüsse verstopft. Im April/Mai 2022 wurden erneut Gespräche mit einem Master-Studierenden der IESS mit betroffenen Anwohner:innen aus den Gemeinden Nyansheg und Jisonayili in Tamale gesprochen (Abbildung 115). In diesen Gesprächen wurde deutlich, wie sie die Risikosituation einschätzen. Bei diesen Gesprächen wurde deutlich, dass nicht nur der Klimawandel für ihre Lage verantwortlich ist, sondern auch das massive Bevölkerungswachstum und ein Mangel an koordinierter Stadt- und Gebäudeplanung. So berichteten einige Frauen, dass die Bebauung ihr Lage verschlimmert hätte. Gebäude seien in die natürlichen Fließwege der Bäche gebaut worden und hätten diese dadurch geändert. Nun sind Häuser mit Überflutungshöhen von 60 bis 90 cm betroffen, die vor 10 bis 15 Jahre nicht oder nur leicht überflutet wurden. Es kam und kommt immer noch zu einer Verlagerung der überflutungsgefährdeten Wohngebiete. Sie begründen die Bauentwicklung mit einer Wissenslücke zwischen den Verwaltungsmitarbeiter:innen, die das Land verkaufen, denen die

es kaufen und den bereits dort lebenden Anwohner:innen. Die Anwohner:innen sind sich darüber bewusst, dass die fehlenden Entwässerungsstrukturen, nicht nur zum Verlust ihres Viehs und Eigentums führt sondern auch zum Verlust von Menschenleben. Von der Regierung erhalten sie oft nur wenig bis keine Hilfe. Bei Überschwemmungen behelfen sie sich oft mit Sandsäcken. Ein weiteres Problem ist, dass in dieser Region viele Häuser aus Lehm gebaut sind, dieser kann einsturzgefährdet werden, sobald er sich mit Wasser vollgesogen hat. Ebenfalls wird deutlich, dass die Überflutungen und ihre Auswirkungen innerhalb der letzten drei Jahre erheblich zugenommen haben. Viele Menschen versuchen ihre Häuser zu schützen und stellen sie auf Stelzen. Ein weiteres Problem ist, dass das Abwassersystem nicht funktioniert. Sie laufen über und verunreinigen das Wasser. So erleiden oft Kinder nach starken Überflutungen Magen-Darm-Infektionen, da sie das verunreinigte Wasser trinken.



Abbildung 116: Gespräche mit Anwohnerinnen der Gemeinde Nyansheg, Tamale.

Im Juni 2022 bestand durch die Klimapartnerschaft zwischen der Stadt Münster und der Stadt Tamale die Möglichkeit eines Austausches mit Interessenvertretern der Stadt Tamale (Abbildung 116). Im Rahmen eines Delegationsbesuchs in Münster durch die Vertreter der Stadt Tamale wurde die Hochwasser- und Dürresituation in Tamale und das angrenzende Nabogo-Einzugsgebiet und die entwickelten RAIN Technologien und Dienstleistungen vorgestellt.



Abbildung 117: Delegationsbesuch von Vertreter:innen der Stadt Tamale in Münster.

Im November 2022 konnte im Namen des RAIN Projektes ein Workshop zum Thema „Floods And Droughts in the Nabogo Stream Catchment – Farmer’s Evaluation“ mit lokalen Bauern der Gemeinden Nabogo, Yapalsi, Gushi und Nakpanzo im Nabogo-Einzugsgebiet durchgeführt werden (Abbildung 117). Begleitet wurde der Workshop vor Ort durch Vertreter:innen der University for Development Studies Tamale. In dem Workshop wurde in interaktiver Kleingruppenarbeit Fragen zu den Themenbereichen angewendete Landmanagementpraktiken; mögliche Gründe für die Veränderungen im Nabogo-Einzugsgebiet; natürliche Ressourcen, die der Gemeinde zur Verfügung stehen; Aufgabenverteilung von Frauen und Männern; Auswirkungen von Dürren und Überschwemmungen auf das verfügbare Land; Konflikte in Verbindung mit dem, Zugang zu und dem Besitz von natürlichen Ressourcen; lokale Vorhersagen für Hochwasser- und Dürrejahre; gegenwärtige Anbaumethoden und die fünf wichtigste Kulturpflanzen in der jeweiligen Gemeinde diskutiert (Abbildung 118).

Die Ergebnisse der Gruppenarbeit wurden diskutiert, dokumentiert und in Form von Vorschlägen, Anregungen und Empfehlungen durch den Berichterstatter, der gleichzeitig als Gruppenleiter fungierte, für das weitere Vorgehen präsentiert. So konnten viele hilfreiche Informationen zur Wahrnehmung der Bauern in Bezug auf den Klimawandel und ihr Anpassungsfähigkeit gewonnen werden und diese auch in diesen Themen geschult werden. Zusätzlich konnten die wichtigsten Kulturpflanzen in der Region ermittelt werden.



Abbildung 118: Teilnehmende an dem RAIN Workshop zum Thema „Floods And Droughts in the Nabogo Stream Catchment – Farmer’s Evaluation im Pastoral Center, Tamale.



Abbildung 119: Vertreter:innen der Bäuer:innen der Gemeinde Gushi während der Gruppendiskussion.

Sakumono-Einzugsgebiet

Anlässlich der Ghana-Reise im September 2021 fand ein Austausch mit Vertreter:innen der Adenta Municipality und deren Municipal Chief Executive (MCE) statt (Abbildung 119). Hierbei wurde die Notwendigkeit eines funktionsfähigen und verständlichen Hochwasserfrühwarnsystem in Adenta diskutiert. Ebenfalls wurde über die Gründe für Adentas Überschwemmungsrisiko gesprochen. Es wurde deutlich, dass die massiven Überschwemmungen nicht allein durch Starkregenereignisse in Adenta hervorgerufen werden, sondern durch Starkregen im Liefergebiet des Sakumo zu Hochwasser führen. Ein weiterer Verstärkungsfaktor sind verblockte Leitungs- und Entwässerungssysteme. Des Weiteren wurde gemeinsam das Konzept für das End-To-End-Warnsystem ausgearbeitet: Der Überflutungsalarm wird an den zuständigen NADMO-Mitarbeiter:in gesendet. Er soll als Multiplikator fungieren und die Warnung an ausgewählte Personen verbreiten. Es wurde sich darauf geeinigt, dass für die Rettung von Menschenleben im Überflutungsfall ein mehrstufiger Ansatz notwendig ist. Dieser Ansatz soll folgende Aspekte enthalten:

- Erhöhung des Bewusstseins der potentiell Betroffenen
- Frühwarnung
- Notfallrettung
- Nachbereitung der Überschwemmungen

Der MCE sieht es als eine seiner Kernaufgaben an in die Hochwasserprävention zu investieren, um die Nachsorgekosten gering zu halten. Darüber hinaus ist sich die Municipality darüber bewusst, dass der voranschreitende Klimawandel einen Einfluss auf das Leben in seinem Stadtteil hat. Die Oberflächengewässer in Adenta wurden bisher häufig für Urban Farming und Aquaponic-Anlagen genutzt. Aufgrund dieser Nutzung wurde der Gewässergütezustand, mit besonderem Augenmerk auf dem Nitrifizierungsgrad, der Gewässer diskutiert.



Abbildung 120: Treffen mit dem Municipal Chief Executive Daniel Alexander Nii-Noi Adumuah der Adenta Municipality und seinem Team im September 2021.

Im April 2022 wurde ein weiterer Workshop mit den lokalen Interessenvertretern der Gemeindeverwaltung Adenta, Accra durchgeführt. Bei diesem Treffen waren neben dem MC auch ein Vertreter der NADMO, des Landwirtschaftssektors sowie des Bauministeriums der Gemeinde anwesend. Im Verlauf des Treffens konnten folgende Aspekte diskutiert werden:

- Gewässerqualität der Oberflächengewässer in Adenta in Zusammenhang mit den Forschungsergebnissen einer Doktorandin der University of Ghana
- Wasserver- und Abwasserentsorgung in informellen Siedlungen in Adenta als Teil einer Masterarbeit einer Studierenden der University of Ghana

Außerdem standen die aktuellen Umweltprobleme, mit denen die Gemeinde konfrontiert ist, im Vordergrund. So wurde das Freilegen von versandeten Entwässerungskanälen diskutiert, um einen sicheren Abfluss von Regenwasser zu gewährleisten. Auch wurde das illegale Siedeln auf überflutungsgefährdeten Flächen und mögliche Lösungsansätze debattiert. Darüber hinaus wurde die Rolle des Gesetzesgebers in Bezug auf den Schutz von Oberflächengewässern besprochen.

2.7.1 AP 3.2 Trainings- und Workshop-Programm für lokale Interessensvertreter zu „Anpassungen an den Klimawandel“

Zum Auftakt des Projektes fand ein Austausch mit der lokalen Administration der Adenta Municipality zu hochwasserinduzierten Folgen in der Pilotregion statt. Dem Workshop wurden die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung vorgestellt und validierte sowie potentielle Veränderungen hinsichtlich des Überflutungsgeschehens infolge Klimaveränderungen, aber auch demographischen und städtebaulichen Trends, diskutiert. Als potentielle Maßnahme zur Reduzierung von Überflutungen im städtischen Bereich wurde unter anderem eine Stärkung des Abfallsektors identifiziert, da eine Vielzahl der städtischen Entwässerungsinfrastruktur durch Feststoffe wie Abfall blockiert ist.

Ebenso wurden im Nabogo-Einzugsgebiet kleinere Workshops mit lokalen Interessensvertretern zu Klimaveränderungen und etwaigen Anpassungsmaßnahmen stattgefunden, die überwiegend aus dem Bereich des Agrarsektors stammten. Die Mehrheit der Teilnehmenden war bis dato nur geringfügig von Überflutungen betroffen (z.B. Abschwemmungen auf Feldern infolge Starkregen), allerdings stellen regelmäßiger sowie intensivere Dürren zunehmend eine Herausforderung für die Bevölkerung dar. Negative Auswirkungen treten vor allem im landwirtschaftlichen Bereich als Ernteeinbußen oder sogar Missernten auf. Ebenso führen Verschiebungen des regionalen Regenregimes zu Verlust von Saatgut, was finanziellen Verlust und in der Subsistenzlandwirtschaft Nahrungsmittelknappheit bedeutet. Abbildung 120 zeigt Teilnehmende der Gesprächsrunde während eines Feldbesuchs im Februar 2020.



Abbildung 121: Austausch mit lokalen Interessensvertretern im landwirtschaftlich geprägten Nabogo-Einzugsgebiet.

Nach Fertigstellung und Implementierung des Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystems für die beiden Pilotregionen Sakumono und Nabogo wurde eine Anwenderschulung mit Vertretern der staatlichen Behörden der National Disaster Management Organization (NADMO) und dem Hydrological Service Department (HSD) durchgeführt. Die Teilnehmenden wurden in den Aspekten des Betriebs und der Wartung des Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystems geschult (Abbildung 121). Dabei wurde ihnen die Datenherkunft, der ins Modell eingehenden Regendaten und ihre Verknüpfung mit anderen Einflussparametern wie digitalem Geländemodell und aktueller Wettervorhersage sowie dem SPI Index erläutert. Außerdem wurden die Teilnehmenden in den Punkten Hosting, Betrieb und Verständnis der Warnung sowie Illustration der Warnungen geschult.



Abbildung 122: Anwenderschulung zum Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystem im HSD-Headquarter im April 2022.

In Zusammenarbeit mit Unterauftragnehmer HKV konnten im April 2022 zwei Anwenderschulungen mit Vertretern von NADMO der Bezirksregierung von Adenta durchgeführt werden. Vermittelt wurde der praktische Umgang mit den Hochwasser- und Dürrevorhersagemodellen. Darüber hinaus wurden mit NADMO und anderen offiziellen Akteuren im Adenta-Distrikt (Municipal Chief Executive, Assembly man etc.) die bereits eingesetzten Methoden zur Verbreitung von Warnungen und die notwendigen Anforderungen an ein zielgerichtetes Frühwarnsystem diskutiert (Abbildung 121). Zusätzlich wurde die allgemeine Funktionsweise des entwickelten Frühwarnsystems vorgestellt. Die Teilnehmer:innen diskutierten auch die Arten von Warnungen, die möglichen Visualisierungen und den Umgang mit Unsicherheiten. Im zweiten Teil des Workshops wurde die Gestaltung des End-to-End-Frühwarnsystems für das Hochwasser- und Dürrefrühwarnsystem mit den Leitfragen/Themen: Informationsart, Informationsform, Art der Verbreitung, Umgang mit Unsicherheiten, Reaktionsmaßnahmen und Bewertung mit den Teilnehmenden debattiert (Abbildung 122).

Ende April 2022 wurde mit Studierenden der University for Development Studies ein zweiteiliger Workshop in Zusammenarbeit mit HKV durchgeführt. Im Vordergrund standen hier bei Wasserhaushaltsmodelle, Nature-Based-Solutions (NBS) zur Entmanganung und Enteisenung sowie eine allgemeine Einführung in die Hochwasser- und Dürrevorhersage und das Hochwasserrisikomanagement. Zusätzlich bekamen die Teilnehmenden einen Einblick in die Funktionen des entwickelten Dürre- und Hochwasserfrühwarnsystems und dessen Daten- und Modellpflege.



Abbildung 123: Anwenderschulungen mit Vertretern von NADMO in der Bezirksregierung von Adenta.

Eine weitere Schulung gab es für die Studierenden der University for Development Studies im September 2022. Die Teilnehmenden wurden im Umgang mit der Wasserhaushaltsmodellsoftware SWAT (Soil & Water Assessment Tool) am Beispiel des Wassermanagements im Nabogo-Einzugsgebiet geschult.

Im September 2022 wurde der Disseminationsworkshop des RAIN-Projekts in Accra mit Gästen aus verschiedenen Verwaltungen in Accra, dem Hydrologischen Dienst, dem Nationalen Amt für Katastrophenmanagement, dem Accra Sewerage Improvement Project (ASIP) sowie Experten aus dem Agrarsektor durchgeführt (Abbildung 123). Dieser Workshop befasste sich mit den Ergebnissen des RAIN-Projekts in den Bereichen integriertes Wassermanagement, Frühwarnsysteme für Überschwemmungen und Dürren, Aufbereitung von Oberflächenwasser und Bewässerung mit diesem Wasser. Alle Themen wurden von den anwesenden Gästen in Bezug auf den weiteren Nutzen der Ergebnisse für die anwesenden Akteure diskutiert.

Darüber hinaus fand eine Podiumsdiskussion statt, die vom stellvertretenden Direktor der Nationalen Organisation für Katastrophenmanagement (NADMO), Frank Aggry, Dr. Joycelyn Quansah vom Fachbereich Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der Universität Ghana und Dr. Evans Asenso vom Fachbereich Agrartechnik der Universität Ghana geleitet wurde. Zu den diskutierten Themen gehörten die vorgestellten Hochwasservorhersagen und ihre Durchführbarkeit im Sakumono-Einzugsgebiet, die vorgestellten Wasseraufbereitungstechnologien und ihre weiteren Anwendungen sowie mögliche Hindernisse für die Anwendung der Tröpfchenbewässerung.

Darüber hinaus hatten drei der am Projekt beteiligten Studenten der University of Ghana die Gelegenheit, ihre Projekt- und Masterarbeiten sowie Forschungsergebnisse ihrer Dissertationen vorzustellen



Abbildung 124: Teilnehmende des Disseminationsworkshop des RAIN-Projekts in Accra.

2.7.2 AP 3.3 Weiterbildungsprogramm zur Nutzung des aufbereiteten Wassers in der Landwirtschaft

Ein Anwenderworkshop zum Biokohlefiltersystem und Tröpfchenbewässerungssystem wurde am 02. August 2022 gegen Ende der Versuchsphase in Ghana an den Pilotanlagen abgehalten (Abbildung 124). Der Workshop wurde von der RUB koordiniert und zusammen mit dem Department of Agricultural Engineering (DAE), UG organisiert. Der Workshop wurde zweisprachig, in Englisch und in der lokalen Amtssprache Twi, abgehalten, um sicherzustellen, dass auch Interessenten mit begrenzten Englischkenntnissen teilnehmen können.

Nach der Begrüßung der Teilnehmer übernahm der Partner DAE die Einleitung in das Thema, indem auf die Probleme bezüglich der Wasserqualität von Oberflächenwasser im städtischen Raum und die damit einhergehenden gesundheitlichen Risiken bei einer Nutzung zur Bewässerung in der urbanen Landwirtschaft eingegangen wurde. Darauf folgten die beiden Hauptthemen des Workshops: (1) Biokohlefilteranlagen für die Aufbereitung von belastetem Bewässerungswasser und (2) gravitationsgetriebene Tropfbewässerungssystem mit dem aufbereiteten Wasser. Dabei stellte der deutsche Partner RUB auf Englisch die Produktion von Biokohle und vorrangig die Filteranlage vor und erklärte die Betriebs- und Funktionsweise. Der Partner Manotura übernahm die englische Erläuterung zu den Bewässerungs- und Anbauversuchen. Der ghanaische Partner übersetzte konsequent die Workshopinhalte in Twi. Bei den Teilnehmern handelte es sich um lokale Kleinbauern sowie um Interessenvertreter aus dem Bereich der Wasseraufbereitung. Im Rahmen des Workshops wurde die in AP 4 erstellten Leitfäden für die Pilotanlagen an die Teilnehmer verteilt. Im Anschluss an den Workshop wurde über dem gemeinsamen Mittagessen sich noch weiter ausgetauscht und die

Zeit für das Networking genutzt. Das Feedback war hier sehr positiv. Es wurde unter anderem das Interesse geäußert, sich an Pilotversuchen zu beteiligen bzw. künftig zu kollaborieren. Durch den Workshop wurden die Teilnehmer auf die Thematik Risiko durch belastetes Bewässerungswasser sensibilisiert und Lösungsansätze in Form der Pilotanlage aufgezeigt. Zudem wurden die Teilnehmer im Bau und Betrieb solcher Anlagen unterrichtet. Als weiterer Punkt hat der Workshop dazu beigetragen, ghanaische Akteure untereinander zu vernetzen, woraus sich neue Vorhaben ergeben können.



Abbildung 125: Workshop zur Biokohlefilteranlage (li.) durchgeführt von RUB und DAE.

2.8 Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojektes Öffentlichkeitsarbeit, Verteilung der Empfehlungen und Richtlinien (AP4)

2.8.1 AP 4.1 Öffentlichkeitskonzept

Während der Projektlaufzeit (2019 bis 2022) war das RAIN-Verbundprojekt im Internet präsent. Es wurde neben der Projektseite (<https://bmbf-rain.net/>) auch die Projektseite RAIN auf der Client-II Webseite (<https://www.bmbf-client.de/projekte/rain>) gepflegt und regelmäßig mit neuen Inhalten und Erkenntnisse zum Projektfortschritt versorgt. Zusätzlich wurden diese Meldungen und Artikel auch über die FiW-Webseite in der Rubrik „Aktuelles“ (<https://www.fiw.rwth-aachen.de/aktuelles-veranstaltungen/aktuelles>) und über den LinkedIn-Kanal des FiWs verbreitet. Außerdem wurde im Rahmen besonderer Ereignisse und bevorstehender Veranstaltungen ein Newsletter verschickt.

Als Informationsmaterial wurden für Messen und Tagungen sowie weitere Veranstaltungen (Workshops etc.) Projekt-Factsheets, Roll-Ups, Poster und Präsentation erstellt.

Des Weiteren wurde das Projekt und seine Ergebnisse im Verlauf des Projektes auf Fachtagungen wie dem World Water Forum im Senegal 2022 und im Rahmen der IESS Conference im Oktober 2022 vorgestellt. Weitere Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften wie „Wasserwirtschaft“, „Wasser und Abfall“ und „MDPI WATER“ sind geplant (2024).

2.8.2 AP 4.2 Benutzerorientiertes Konzept für Informations- und Weiterbildungsmaterialien

Im Rahmen von AP 4.2 wurden Leitfäden und Weiterbildungsmaterialien zu den einzelnen Teilvorhaben verfasst und den Partnern und Stakeholdern zu Verfügung gestellt.

In die entstanden Leitfäden sind neben Ergebnissen aus Versuchen und Modellierungen auch Workshop-, Schulungs- und Diskussionsergebnisse mit den ghanaischen Partnern und Stakeholdern eingegangen.

Neben den Leitfäden zu den Themen „Water Management“, „Water Reuse“ und „Irrigation“ sind weitere Handouts, Guidelines und Anleitungen entstanden. Die Guidelines und Anleitungen enthalten u.a. Informationen zur zielgerichteten Nutzung der Wassermanagementsoftware WEAP und der Wasserhaushaltsmodellierungsoftware SWAT in den Untersuchungsgebieten, Anleitungen zur Datenaufbereitung in Geoinformationssystemen (ArcGIS und QGIS) (Abbildung 125).

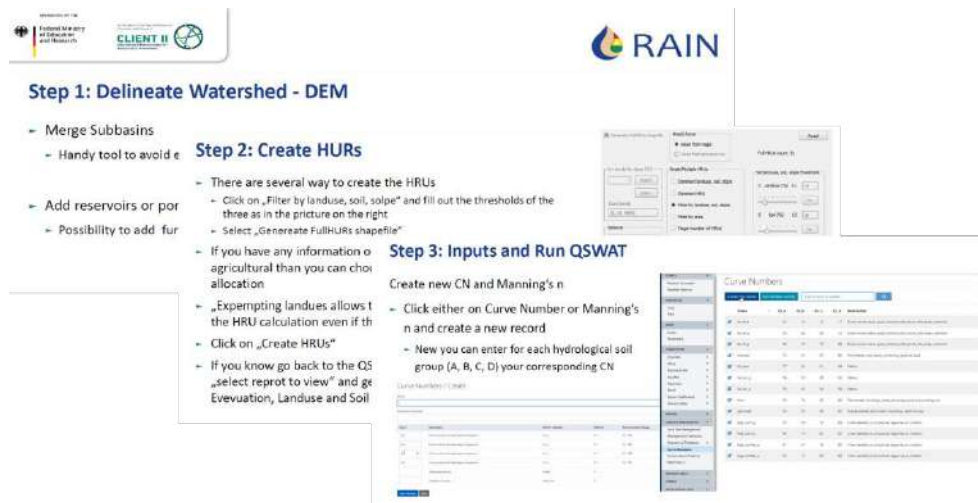


Abbildung 126: Auszug aus den Schulungsmaterialien für SWAT

In Rahmen dieses Projekts wurde sich ausführlich mit internationalen Richtlinien und Leitfäden in Bereich Wasserwiederverwendung auseinandergesetzt. Folgende Liste führt die wichtigsten Richtlinien und Leitfäden auf:

Richtlinien

- WHO: *Guidelines for the Safe Use of Wastewater in Agriculture*, WHO 2006; <https://www.who.int/publications/i/item/9241546832>
- WHO: *Guidelines for drinking-Water Quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*, WHO 2017; <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- FAO: *Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage Paper No. 29*, FAO 1985; <https://www.fao.org/3/t0234e/T0234E00.htm#TOC>
- FAO: *Wastewater treatment and use in agriculture - FAO irrigation and drainage paper 47*, 1992; <https://www.fao.org/3/T0551E/T0551E00.htm>

- Australia: Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks 2006; <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water>
- US EPA: Guidelines for Water Reuse 2012; <https://www.epa.gov/waterreuse/guidelines-water-reuse>
- Europäische Union *Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge*, 2017; <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/abe4a99e-f4ef-11e7-be11-01aa75ed71a1/language-en>
- Europäische Union VERORDNUNG (EU) 2020/741 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2020.177.01.0032.01.ENG&toc=OJ%3AL%3A2020%3A177%3ATOC

Anleitungen und Leitfäden für Wasserwiederverwendung

- FAO: *On farm practices for the safe use of water in urban and peri-urban horticulture*, FAO (2012) <http://www.fao.org/3/a-i3041e.pdf>
- WHO *Water Safety Plan Manual (WSP)* (2009), file:///C:/Users/julange/Downloads/9789241562638_eng.pdf
- WHO *Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-Water*, WHO (2017) <https://apps.who.int/iris/handle/10665/258715>
- WHO *Sanitation Safety Planning Manual (SSP)* (2015) <https://apps.who.int/iris/handle/10665/171753>
- WHO *Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA)* WHO 2016; <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565370>
- *Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox* (Website); <https://sswm.info/catalogue>
- US EPA *Wastewater Technology Fact Sheets* (Website); <https://www.epa.gov/septic/wastewater-technology-fact-sheets>

Diese Leitfäden sind sehr umfangreich und bedienen die Zielgruppe von staatlichen Einrichtungen und NGO's. Aus dem Grund wurde bei der Erstellung der Leitfäden ein technischer Ansatz, der Anwender, Ausbildungsstätten und Hochschulen fokussiert gewählt. Insofern wurden im Rahmen der Tätigkeiten in AP4.2 von der RUB insgesamt drei technische Leitfäden rund um die Wasseraufbereitung über Biokohlefiltration geschrieben. Die ersten zwei Leitfäden widmen sich dem Bau eines low-tech Pyrolysereaktors und der Herstellung von Biokohle in diesem Pyrolysereaktor. Der dritte Leitfaden gibt eine Anleitung wie ein low-tech Biokohlefilter gebaut und betrieben wird. Bei den Leitfäden wurde unter anderen bewusst auf

den Einsatz von grafischen Elementen gesetzt, um die Inhalte allgemein zugänglich zu machen. In Abbildung 126 sind die Cover der Leitfäden abgebildet.

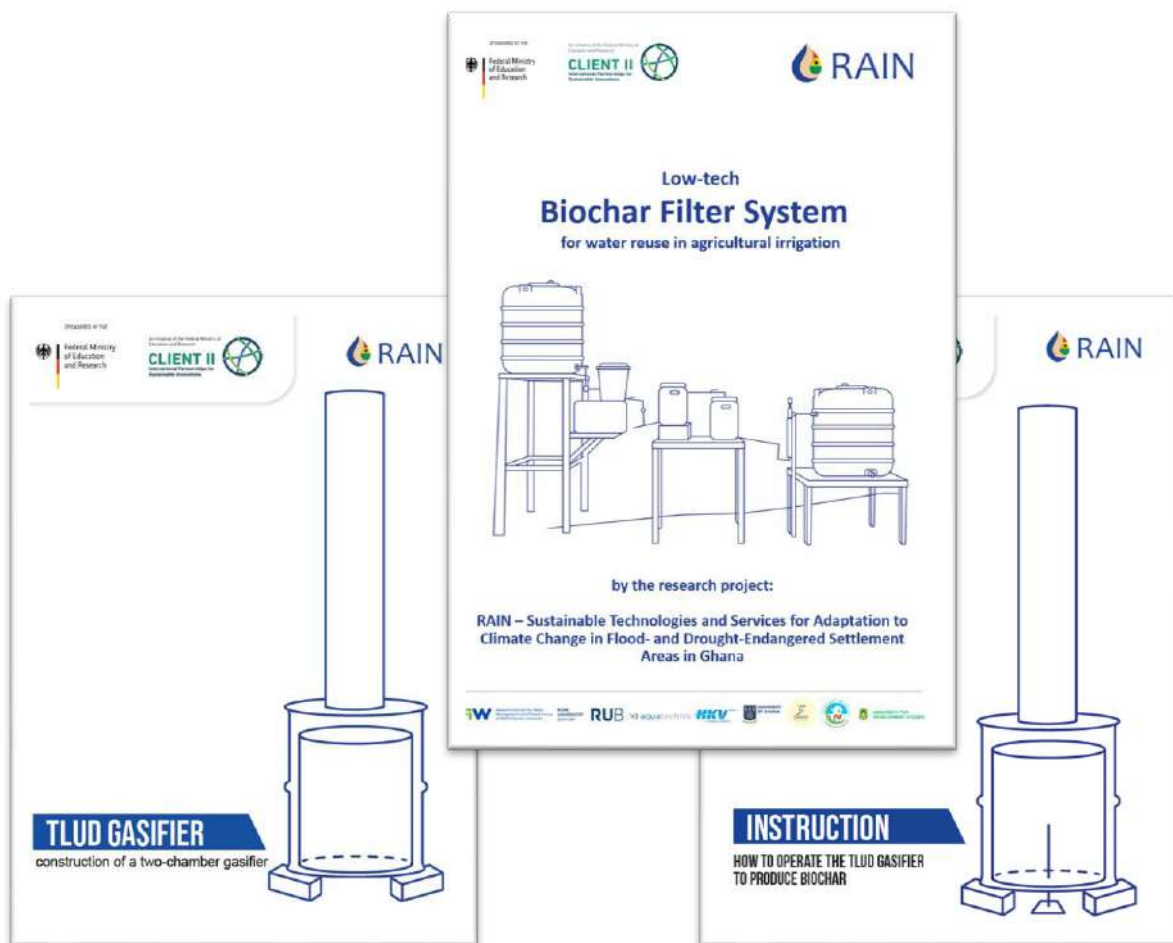


Abbildung 127: Cover der erstellten Leitfäden.

2.8.3 AP 4.3 Erstellen von Materialien für den PAUWES/ WASCAL-Forschungsplan

Von der RUB wurde ein Demonstrationsvideo zum Aufbau eines Biokohlefiltersystems erstellt. Zudem wurde ein Skript für Durchführungen von Praktika an den Pilotanlagen verfasst.

Folgende Materialien wurden für den PAUWES/ WASCAL Forschungsplan erstellt:

- Leitfaden „Low-tech Biochar Filter System for water reuse in agricultural irrigation“ mit folgenden Inhalten:
 - Instruction: How to operate the TLUD gasifier to produce biochar
 - TLUD gasifier: Construction of a two-chamber gasifier
- Leitfaden „Manual Palaplast-Einzeltropfer-Bewässerung (Palaplast-Single-Drip-Irrigation Manual) mit folgenden Inhalten
 - Introduction
 - Components

- System scheme
- Assembly
- Operation

- Leitfaden „Guideline Water Management“ mitfolgenden Inhalten
 - Sustainable Water Management (SWM)
 - Urban Water Development
 - Agricultural Water Development
 - Software-based Water Management
 - Risk Management in Water Management
 - Urban Water Management (UWM) in Ghana
 - Rural Water Management (RWM) in Ghana
 - Stakeholder Involvement

- Einführungs- und Schulungsunterlagen für die Nutzung von WEAP „Introduction into WEAP“ sowie einem WEAP User Guide

- Einführungs- und Schulungsunterlagen für die Nutzung von SWAT „Introduction into SWAT“

- Einführungs- und Schulungsunterlagen für die Nutzung von GIS inkl. eines Testdatensatzes

- Schulungsunterlagen für die entwickelte Frühwarnsysteme inkl. eines User Guides

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises des **FiW** handelt es sich um die Position 0831 (Gegenstände bis 400 €), die Position 0835 (Vergabe von Aufträgen (UAN)), Position 0846 (Dienstreisen) und die Position 0850 (Gegenstände/Investitionen >400 €). Durch die Covid-Pandemie in 2020/2021 konnten einige projektrelevante Aufgaben nicht wie geplant durch Projektmitarbeitende vor Ort durchgeführt werden, weswegen Anpassungen erforderlich waren und es im Projektverlauf zu Umwidmungen zwischen den einzelnen Ausgabenpositionen kam. Trotz der erforderlichen Anpassungen konnte die bewilligte Zuwendungssumme eingehalten werden.

Bei den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises von **aquatechnik Manotura GmbH & Co KG** handelt es sich um die Position 0813 (Materialkosten) Position 0837 (Personal inkl. Gemeinkosten) und die Position 0838 (Reisekosten), sowie 0850 (sonstige unmittelbare Vorhabenkosten). Die Corona-Pandemie erforderten auch hier Umstrukturierungen des Arbeitsplans. Dies führte zu Umschichtungen zwischen den verschiedenen Ausgabenpositionen. Trotz der Anpassungen konnte die bewilligte Zuwendungssumme eingehalten werden.

Zu den Ausgabenpositionen der **RUB** gehörten die Position 0824 (Personalausgaben), die Position 0831 (Gegenstände bis 400 €), die Position 0835 (Vergabe von Aufträgen), die Position 0843/0838 (sonstige allg. Verwaltungsausgaben), die Position 0846 (Dienstreisen) und die Position 0850 (Gegenstände/Investitionen >400 €). Aufgrund der COVID-19 Pandemie ist es im Verlauf des Projektes wiederholt zu Verzögerungen gekommen. Da die gesundheitliche Sicherheitslage im Projektverlauf unsicher war, konnten zunächst keine Reisen nach Ghana erfolgen, sodass die Bearbeitung des Projekts in Deutschland erfolgen musste. Aus diesem Grund wurde ein Aufstockungsantrag gestellt, der zusätzliche Vorversuche in Deutschland vorsah. Im ursprünglichen Projektantrag war vorgesehen, dass sämtliche Analysen durch die Projektbearbeiterin an der RUB erfolgen. Aufgrund der veränderten Arbeits- und Zeitpläne, die sich auch auf Grund veränderter Gegebenheiten und Möglichkeiten in Ghana ergaben, war dies jedoch nicht mehr im vollen Umfang möglich, sodass in ausgewählten Fällen eine Analyse in externen Laboren vorgesehen wurde. Dies wurde mit dem Projektträger abgesprochen und Mittel, die für Labormaterialien geplant waren, für die Vergabe von Aufträgen umgewidmet. Für die Erreichung sämtlicher Ziele wurde coronabedingt eine kostenneutrale Verlängerung des Durchführungszeitraumes beantragt und bewilligt. Die jeweils angepassten Kosten- und Zeitpläne wurden eingehalten.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das gemeinnützige Forschungsinstitut **FiW** verfolgt als gemeinnütziger Verein ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige Zwecke. Der Verein finanziert sich ausschließlich aus Drittmitteln. Eine Grundförderung des Landes steht dem FiW lediglich in Form einer betragsmäßig begrenzten und im Einzelnen nachweispflichtigen Fehlbedarfsförderung zu, die ausschließlich für nicht projektgeförderte Ausgaben eingesetzt werden darf. Eine weitere Grundfinanzierung aus Bundes- oder sonstigen Mitteln besteht nicht. Über Eigenmittel zur Finanzierung von Personal- oder sonstigen Ausgaben eigener Projekte und in diesem Fall dieses Projektes verfügt das FiW nicht. Das Vorhaben kann folglich nicht durch anderweitige Mittel, Zuwendungen oder Aufträge öffentlich finanziert werden. Technische oder wirtschaftliche Risiken sind für das FiW nicht erkennbar.

Der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass das FiW während der Projektlaufzeit (2019-2022) eine Fehlbedarfsförderung des Landes Nordrhein-Westfalen erhalten hat. Diese finanziert ausschließlich Ausgaben, die nicht durch eine Projektfinanzierung gedeckt sind. Die Förderung ist betragsmäßig limitiert und muss jedes Jahr erneut beantragt und bewilligt werden. Die Ausgaben des beantragten Vorhabens werden durch diese nur gedeckt, wenn keine Kostendeckung gegeben und diese nachweisbar ist.

Die geleisteten Arbeiten der **RUB** entsprachen dem gemäß Vorhabenbeschreibung geplanten Umfang. Coronabedingt kam es zu zeitlichen Anpassungen, die in Art und Umfang zur Erfüllung der beschriebenen Aufgaben notwendig waren. Die Angemessenheit wurde durch die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele bestätigt

Der **Industriepartner aquatechnik Manotura GmbH & Co KG** trug mit seinem Eigenmittelbeitrag in Höhe von 55.515,72 € wesentlich zum Gelingen des Vorhabens bei. Ohne die beantragte Zuwendung ist es dem Industriepartner trotz der politischen Stabilität und verschiedener unternehmensfreundlicher Reformen nicht möglich, das notwendige Personal für die Planung, Durchführung und Evaluation von Demonstrationsvorhaben zur Verfügung zu stellen. Die Zuwendung seitens des BMBF wurde benötigt, um die mit den Demonstrationsvorhaben verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risiken zu kompensieren.

Manotura GmbH & Co KG entwickelt permanent die automatischen Bewässerungssysteme weiter und produziert Eigenprodukte, um die Technik noch effizienter, komfortabler und bedienungsfreundlich gestalten. Dieses ist mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verbunden. Das RAIN-Projekt trug dazu bei, innovative Bewässerungssysteme in einem kürzeren Zeitraum zu entwickeln und auf ihre Praxistauglichkeit zu testen, als es ohne eine zusätzliche Förderung möglich gewesen wäre.

Alle durchgeführten Arbeiten im Projekt wurden unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Mittelverwendung durchgeführt.

5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Kein relevanter Fortschritt auf dem Gebiet bekannt.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

In Tabelle 39 sind die bereits erfolgten wie die geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse des Projektes RAIN zu entnehmen. In Tabelle 40 sind die, im Rahmen des Projektes, durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten einsehbar.

Tabelle 39: Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Art der Publikation	Titel	Verlag/Messe/Tagung	Beteiligte	Jahr	Status
Vortrag	Projektpräsentation	WACEE Accra, Ghana	FiW RUB Manotura	2019	erfolgt
Vortrag	Projektpräsentation	COP 25 in Madrid	FiW	2019	erfolgt
Zeitungsartikel	Neues Projekt RAIN entwickelt nachhaltige Wasserbewirtschaftungskonzepte für Ghana	EUWID Fachmedien	FiW	2020	erfolgt
Vortrag & Paper	Strengthen Climate Change resilience in Ghana by combining numeric and water management models	Book of Abstracts der ENCLIMAH 2022	FiW	2022	erfolgt
Vortrag	Projektpräsentation	World Water Forum Dakar Senegal	FiW	2022	erfolgt
Vortrag	Projektpräsentation	Delegationsbesuch der Stadt Tamale in Münster	FiW	2022	erfolgt
Vortrag & Paper	Biochar filter reduces surface water contamination in Ghana: A field study	Book of Abstracts der ENCLIMAH 2022	RUB	2022	erfolgt
Vortrag	Online Showcase: Stakeholder Involvement in the Development of Floods-Early-Warning-Systems and Water Reuse	World Water Week	FiW	2023	geplant
Paper	Informal Settlements and Pollution Behaviour in the Adentan Municipality, Accra	Noch nicht bekannt	FiW e.V. UG	2023	Geplant
Paper	Workshop Report: Floods and Droughts in The Nabogo Stream Catchment – Farmer’s Evaluation	Noch nicht bekannt	FiW e.V. UDS	2023	Geplant
Paper	Vorstellung Projektergebnisse	Fachzeitschrift „Wasserwirtschaft“	FiW e.V.	2023	Geplant
Paper	Vorstellung Projektergebnisse	Fachzeitschrift „Wasser und Abwasser“	FiW e.V.	2024	Geplant

Tabelle 40: Studentische Arbeiten

Autor:in	Begleitendes Institut	Betreuer:in	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr
Amegashie, D.S.	IESS, UG FiW e.V.		Pondwater Contribution To Sustainable Water Supply In Ghana: A Case Of Adentan Municipality	Masterarbeit	2022
Siegert, L.	RUB	Krüger, S.	Evaluierung von unterschiedlichen Biokohlen als Filtermaterial zur Hygienisierung von	Masterarbeit	2022

Autor:in	Begleitendes Institut	Betreuer:in	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr
			pathogenbelastetem Wasser zur Wiederverwendung als Bewässerungswasser		
Terwort, J.	RUB	Krüger, S.	Untersuchung von zwei Filtermaterialien im Säulenversuch zur Entfernung ausgewählter Krankheitserreger aus kontaminiertem Wasser für die Wiederverwendung in der landwirtschaftlichen Bewässerung	Bachelorarbeit	2022
Muehlenbruch, L.	RUB	Krüger, S.	Untersuchung verschiedener Biokohlen als Filtermaterial zur Hygienisierung von kontaminiertem Bewässerungswasser in Kombination mit einem Beitrag zur Umsetzung eines kleintechnischen Filtersystems	Bachelorarbeit	2022
Klaus, P.	RUB	Krüger, S.	Konzeptionierung, Planung und Konstruktion eines dezentralen kleintechnischen Biokohle- Filtersystems für die Aufbereitung fäkalbelasteter Oberflächengewässer für die Wiederverwendung als Bewässerungswasser	Projektarbeit	2022
Benit, M.	ISA, RWTH Aachen FiW e.V	Michaelis, R.	Potentialanalyse von Rückhalteräumen als Präventionsmaßnahme gegen Überflutungen und zur Wasserspeicherung für Bewässerungswasser in Ghana	Bachelorarbeit	2021
Günther, J.	ISA, RWTH Aachen FiW e.V	Krauß, M. Ramirez, J.	Potential analysis for the agricultural use of treated surface water in Ghana	Masterarbeit	2021
Dahlem, T	EMR, RWTH FiW e.V.	Krauß, M. Ramirez, J.	Untersuchung von Grenzen und Chancen der Wasserqualitätsmodellierung von Oberflächengewässern als Input für Wassermanagementpläne am Beispiel eines Einzugsgebietes in Ghana	Masterarbeit	2021
Annan, E.	IESS, UG FiW e.V	Michaelis, R.	Informal Settlements And Pollution Behaviour In The Adentan Municipality, Accra	Masterarbeit	2021
Marquardt, L.	RUB	Krüger, S.	Einsatz von Biokohle aus Maisspindeln und Kakaoschalen als Filtermaterial für die Aufbereitung von verunreinigtem Bewässerungswasser - eine Bewertung der Filterleistung	Bachelorarbeit	2021
Ronsiek, T.	ISA, RWTH Aachen FiW e.V	Tabatabaei, S.	Evaluation of Methods for Model-based Integration of Local Measures into Regional and National Water Management Plans in Ghana	Bachelorarbeit	2020
Ludwig, S.	FH Aachen FiW e.V.	Tabatabaei, S., Wermter, P.	Beurteilung von Chancen und Grenzen der Modellanpassung am Beispiel eines Wasserhaushaltmodells in Accra	Masterarbeit	2020
Shahapurkar, S.	FiW e.V	Tabatabaei, S.	Development of an IoT-based sensor network of self-developed	Masterarbeit	2020

Autor:in	Begleitendes Institut	Betreuer:in	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr
			climate stations for the collection of environmental data in Africa		
Korn, F.	RUB	Krüger, S.	Herstellung und Charakterisierung von Biokohle für den Einsatz als Filtermaterial in der Wasseraufbereitung	Bachelorarbeit	2020
Wedding, A-C	ISA, RWTH Aachen FiW e.V.	Tabatabaei, S.	Entwicklung eines Wasserhaushaltsmodells für urbane und rurale Wassereinzugsgebiete in Ghana	Bachelorarbeit	2019
Basit, A.W.	IESS, UG FiW e.V	Michaelis, R.	Pollution from Informal Settlement in flood prone areas and preventive measures in the Tamale Metropolis	Masterarbeit	laufend
Iddrisu, A.	IESS, UG FiW e.V	Krauß, M. Michaelis, R.	Exploring Reservoirs- A Water Resource Assessment For The Sakumo And Nabogu Basins	Dissertation	laufend
Blege, P.K.	UDS FiW e.V.	Krauß, M. Michaelis, R.	Validation of a Water Balance Model in the Nabogu catchment	Dissertation	laufend
Jagenlauf, J.	RUB	Krüger, S.	Pilot study on a farm-scale Biochar Filtration System for the Treatment of polluted Surface water for Irrigation in peri-urban Agriculture in Ghana	Bachelorarbeit	2022
Napoga Nin-Yenle, P.	RUB UG	Krüger, S. Amoatey, P.	Pilot Testing of Biochar Filter for Improving Polluted Surface Water Quality for Irrigation	Projektarbeit	2022

Ausblick auf weitere Arbeiten und Verwertung

Biokohlefiltersystem und Bewässerungssystem in Ghana

Die in AP2.1 gebaute Pilotanlage eines Biokohlefiltersystem zur Behandlung verschmutzter Oberwässer und das angeschlossene Bewässerungssystem ist an die ghanaischen Partner, das Department of Agricultural Engineering der University of Ghana und das Accra Sewage Improvement Project, übergeben worden. Diese planen, die Pilotanlage gemeinsam zur weiteren Forschung zu nutzen. Von Seiten der DAE besteht Interesse Fördergelder zu beantragen, um die Forschungsinhalte dieses Projektes weiterzuführen. Zudem sollen die Pilotanlagen im Sinne der Lehre für studentische Projekt- und Abschlussarbeiten genutzt werden. ASIP plant mithilfe des Biokohlefiltersystems, das über deren Teichkläranlage aufbereitete, kommunale Abwasser weiter zu reinigen, um eine bessere Wasserqualität für den landwirtschaftlichen Anbau zu erreichen. Zudem wurde durch das Projekt bei ASIP Interesse an Biokohle als Filtermaterial geweckt. Sie planen, diese weiter zu untersuchen für einen großtechnischen Einsatz in Form einer nachgeschalteten Behandlung des Wassers aus den Schönungsteichen der Teichkläranlage, um so die Ablaufwerte vor Einleitung in den Vorfluter zu verbessern.

7 Literatur

- Adentan Municipal Assembly (2021): Composite budget for 2021-2024, programme based budget estimates for 2021.
- Adomako, A. B.; Yirenya-Tawiah, Dzidzo; Nukpezah, Daniel; Abrahamya, Arpine; Labi, Appiah-Korang; Grigoryan, Ruzanna et al. (2021): Reduced Bacterial Counts from a Sewage Treatment Plant but Increased Counts and Antibiotic Resistance in the Recipient Stream in Accra, Ghana-A Cross-Sectional Study. In: *Tropical medicine and infectious disease* 6 (2). DOI: 10.3390/tropicalmed6020079.
- AIRBUS (2018): WorldDEM4Ortho Technical Product Specification Version 1.4.
- Amankwaa, Ebenezer; Owusu, Alex; Owusu, George; Eshun, Fatima (2014): Accra's Poverty Trap: Analysing Water Provision in Urban Ghana. In: *Journal of Social Science and Policy Implication* 2, S. 69–89.
- Bondarenko, Maksym; Kerr, David; Sorichetta, Alessandro; Tatem, Andrew; WorldPop (2020): Census/projection-disaggregated gridded population datasets for 51 countries across sub-Saharan Africa in 2020 using building footprints.
- Buchhorn, Marcel; Lesiv, Myroslava; Tsendbazar, Nandin-Erdene; Herold, Martin; Bertels, Luc; Smets, Bruno (2020): Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. In: *Remote Sensing* 12 (6), Artikel 1044. DOI: 10.3390/rs12061044.
- CFSR Global Weather Data for SWAT 1979-2014: Soil & Water Assessment Tool. Online verfügbar unter <https://swat.tamu.edu/data/cfsr>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Choi, K.-S.; Ball, J. E. (2002): Parameter estimation for urban runoff modelling. In: *Urban Water* 4, S. 31–41.
- CitiNewsroom (2022). Online verfügbar unter <https://citinewsroom.com/2022/06/parts-of-accra-flooded-again-after-downpour/>, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Climate Service Center Germany (GERICS): Climate-Fact-Sheet Ghana. Online verfügbar unter https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_fact_sheets/index.php.en, zuletzt geprüft am 13.04.2023.
- Darouich, Hanaa M.; Pedras, Celestina M.G.; Gonçalves, José M.; Pereira, Luís S. (2014): Drip vs. surface irrigation: A comparison focussing on water saving and economic returns using multicriteria analysis applied to cotton. In: *Biosystems Engineering* 122, S. 74–90. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.03.010.
- European Biochar Foundation (EBC): European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Arbaz, Switzerland.

- FAO: Single crop coefficient. Online verfügbar unter [https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm#chapter%206%20%20%20etc%20%20%20single%20crop%20coefficient%20\(kc\)](https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm#chapter%206%20%20%20etc%20%20%20single%20crop%20coefficient%20(kc)), zuletzt geprüft am 13.04.2023.
- FAO (1985): Water wuality for agriculture. irrigation and drainage paper 29, rev. 1.
- FAO UNESCO (1977): Soil map of the World - Volume VI, Africa. Online verfügbar unter <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?>
- Ghana Standard Entwurf (2021): DGS 175:2021 Water Quality – Specification for drinking water.
- Ghana Statistical Service (2010a): 2010 Population and Housing Census. District Analytical Report: Adentan Municipality, Accra.
- Ghana Statistical Service (2010b): 2010 Popultaion & Housing Censuns - District Analytical Report - Ashaiman Municipality.
- Ghana Statistical Service (2010c): 2010 Popultaion & Housing Censuns - District Analytical Report - Kpone Katamanso District.
- Ghana Statistical Service (2010d): 2010 Popultaion & Housing Censuns - District Analytical Report - La Nkwantanang-Madina Municipality.
- Ghana Statistical Service (2010e): 2010 Popultaion & Housing Censuns - District Analytical Report - Tema Metropolitan.
- Ghana Statistical Service (2013): 2010 Population & Housing Census. National Analytical Report.
- Ghana Statistical Service (2014): 2010 Population & Housing Census Report - Urbanisation.
- Ghana Statistical Service (2020): Production of Agriculture Statistics.
- Ghana Statistical Service (2021a): 2021 Population Housing Census. Field Officer's Manual.
- Ghana Statistical Service (2021b): Ghana 2021 Population and Housing Service Volume 1. Preliminary Report.
- Ghana Statistical Service (2022): Ghana 2021 Population and Housing Census. General Report Volume 3M. Water and Sanitation.
- Ghana Statistical Service (2023): Agriculture & Environment Data. Online verfügbar unter https://statsghana.gov.gh/nationalaccount_macros.php?Stats=MjM3NTIyNzgZMy44ODU=/webstats/985rp49861, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Ghana Water Company Limited: Source of water supply to the region. Online verfügbar unter <https://www.gwcl.com.gh/tema/>, zuletzt geprüft am 04.05.2023.
- Government of Ghana, Ministry of Local Government, Rural Development and Environment (2012): Adentan Municipal Assembly. Medium-term development plan (2010-2013).
- Huisman, L. (1974): Slow sand filtration. Geneva: World Health Organization.

- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- McKee, T. B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CL, 17-22.01.1993, S. 179–183.
- National Center for Atmospheric Research: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Online verfügbar unter <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Obosu-Mensah, Kwaku (2002): Changes in Official Attitudes Towards Urban Agriculture in Accra. In: *African Studies Quarterly* 6 (3).
- Orsburn, Benjamin; Melville, Stephen B.; Popham, David L. (2008): Factors contributing to heat resistance of *Clostridium perfringens* endospores. In: *Applied and environmental microbiology* 74 (11), S. 3328–3335. DOI: 10.1128/AEM.02629-07.
- Österreichisches Bundesministerium Arbeit und Wirtschaft (2022): Top Länder und Megatrends in Subsahara Afrika. Chancen für die österreichische Wirtschaft.
- Owusu, George (2013): Coping with Urban Sprawl: A Critical Discussion of the Urban Containment Strategy in a Developing Country City, Accra. In: *Planum. The Journal of Urbanism* 26 (1).
- Quicker, Peter; Weber, Kathrin (Hg.) (2016): Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4812023>.
- Reliefweb (2022a). Online verfügbar unter <https://reliefweb.int/report/mali/west-africa-seasonal-monitor-2022-season-august-update>, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Reliefweb (2022b). Online verfügbar unter <https://reliefweb.int/report/mali/west-africa-seasonal-monitor-2022-season-september-update>, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Sattari, Mohammad Taghi; Farkhondeh, Arya; Patrick Abraham, John (2018): Estimation of sodium adsorption ratio indicator using data mining methods: a case study in Urmia Lake basin, Iran. In: *Environmental science and pollution research international* 25 (5), S. 4776–4786. DOI: 10.1007/s11356-017-0844-y.
- Schulz, Vanessa S.; Schumann, Caroline; Weisenburger, Sebastian; Müller-Lindenlauf, Maria; Stolzenburg, Kerstin; Möller, Kurt (2020): Row-Intercropping Maize (*Zea mays* L.) with Biodiversity-Enhancing Flowering-Partners—Effect on Plant Growth, Silage Yield, and Composition of Harvest Material. In: *Agriculture* 10 (11), S. 524. DOI: 10.3390/agriculture10110524.

- Sieber, Jack; Purkey, David (2015): User guide for WEAP 2015. Stockholm Environment Institute, U.S. Center.
- SPEIbase v2.6. Based on the CRU TS v. 4.03 dataset, extending the temporal range of the SPEIbase up to December 2018 (2018).
- Stelma, Gerard N. (2018): Use of bacterial spores in monitoring water quality and treatment. In: *Journal of water and health* 16 (4), S. 491–500. DOI: 10.2166/wh.2018.013.
- The World Bank Group (2023): Climate Change Knowledge Portal. Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ghana>.
- United States Soil Conservation Service (1992): National engineering handbook. Part 630, Hydrology. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- US EPA (2012): Guidelines for Water Reuse. Online verfügbar unter <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Vicente-Serrano, Sergio M.; Beguería, Santiago; López-Moreno, Juan I. (2010): A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. In: *Journal of Climate* 23, S. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Water Resources Commission, Ghana (2009): ANKOBRA RIVER BASIN - Integrated Water Resources Management Plan.
- Weltgesundheitsorganisation (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. [3. ed.]. Geneva: World Health Organization.
- Weltgesundheitsorganisation (2011): Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf.
- World Health Organization (2017): Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK442376/>.
- WorldDEM™: Airbus. Online verfügbar unter <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8703-worlddem>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- WorldPop; Bondarenko, Maksym (2020): Individual Countries 1km Population Density (2000-2020).
- Wortmann, Charles S. (1998): Atlas of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in Africa. Kampala, Uganda: CIAT, Pan-Africa Bean Research Alliance (CIAT publication, no. 297).
- Yan, Dazhuang; Bai, Zhihui; Mike, Rowan; Gu, Likun; Ren, Shumei; Yang, Peiling (2009): Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing

- reclaimed wastewater. In: *Journal of environmental sciences (China)* 21 (6), S. 834–841. DOI: 10.1016/s1001-0742(08)62349-9.
- Yang, Haiping (2004): Thermogravimetric Analysis-Fourier Transform Infrared Analysis of Palm Oil Waste Pyrolysis. In: *Energy & Fuels* 18 (6), S. 1814–1821.
- Zanaga, Daniele; van de Kerchove, Ruben; Daems, Dirk; Keersmaecker, Wanda de; Brockmann, Carsten; Kirches, Grit et al.: ESA WorldCover 10 m 2021 v200.
- Zhou, Bo; Li, Yunkai; Pei, Yiting; Liu, Yaoze; Zhang, Zhijing; Jiang, Yinguang (2013): Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. In: *Irrig Sci* 31 (6), S. 1251–1263. DOI: 10.1007/s00271-013-0402-4.



8 Anhang

8.1 1.3 Wasserhaushaltsmodell IST-Zustand

Tabelle 41: Ernteerträge pro Jahr (Ist-Zustand)

Jahr	Name	Erntefläche (ha)	Ertrag(t)	Ertrag(t/ha)
2001	gras	0,00	0,00	0,00
2001	shrb	0,00	0,00	0,00
2001	corn	29980,20	102128,50	3,41
2001	rice	17635,41	16603,52	0,94
2001	soyb	14108,33	25075,01	1,78
2001	agrl	70541,64	5343,97	0,08
2001	cwps	15871,87	999,64	0,06
2001	pnut	14108,33	2563,79	0,18
2001	pmil	14108,33	763,97	0,05
2001	bsvg	0,00	0,00	0,00
2002	gras	0,00	0,00	0,00
2002	shrb	0,00	0,00	0,00
2002	corn	29980,20	93296,17	3,11
2002	rice	17635,41	16221,14	0,92
2002	soyb	14108,33	14449,28	1,02
2002	agrl	70541,64	6185,30	0,09
2002	cwps	15871,87	1409,35	0,09
2002	pnut	14108,33	2025,75	0,14
2002	pmil	14108,33	1208,17	0,09
2002	bsvg	0,00	0,00	0,00
2003	gras	0,00	0,00	0,00
2003	shrb	0,00	0,00	0,00
2003	corn	29980,20	128010,60	4,27
2003	rice	17635,41	19635,90	1,11
2003	soyb	14108,33	15596,04	1,11
2003	agrl	70541,64	9328,85	0,13
2003	cwps	15871,87	1561,12	0,10
2003	pnut	14108,33	3256,47	0,23
2003	pmil	14108,33	1611,06	0,11
2003	bsvg	0,00	0,00	0,00
2004	gras	0,00	0,00	0,00
2004	shrb	0,00	0,00	0,00
2004	corn	29980,20	130521,10	4,35
2004	rice	17635,41	14202,37	0,81
2004	soyb	14108,33	13987,00	0,99
2004	agrl	70541,64	8288,84	0,12
2004	cwps	15871,87	1835,18	0,12
2004	pnut	14108,33	4517,40	0,32

Jahr	Name	Erntefläche (ha)	Ertrag(t)	Ertrag(t/ha)
2004	pmil	14108,33	1350,55	0,10
2004	bsvg	0,00	0,00	0,00
2005	gras	0,00	0,00	0,00
2005	shrb	0,00	0,00	0,00
2005	corn	29980,20	99277,98	3,31
2005	rice	17635,41	16540,92	0,94
2005	soyb	14108,33	14796,74	1,05
2005	agrl	70541,64	3846,52	0,05
2005	cwps	15871,87	488,32	0,03
2005	pnut	14108,33	2869,43	0,20
2005	pmil	14108,33	488,44	0,03
2005	bsvg	0,00	0,00	0,00
2006	gras	0,00	0,00	0,00
2006	shrb	0,00	0,00	0,00
2006	corn	29980,20	90684,05	3,02
2006	rice	17635,41	24436,15	1,39
2006	soyb	14108,33	21084,53	1,49
2006	agrl	70541,64	1780,81	0,03
2006	cwps	15871,87	396,49	0,02
2006	pnut	14108,33	2047,48	0,15
2006	pmil	14108,33	267,79	0,02
2006	bsvg	0,00	0,00	0,00
2007	gras	0,00	0,00	0,00
2007	shrb	0,00	0,00	0,00
2007	corn	29980,20	131243,90	4,38
2007	rice	17635,41	16998,32	0,96
2007	soyb	14108,33	14967,15	1,06
2007	agrl	70541,64	24155,54	0,34
2007	cwps	15871,87	5853,20	0,37
2007	pnut	14108,33	3925,50	0,28
2007	pmil	14108,33	3486,75	0,25
2007	bsvg	0,00	0,00	0,00
2008	gras	0,00	0,00	0,00
2008	shrb	0,00	0,00	0,00
2008	corn	29980,20	145466,10	4,85
2008	rice	17635,41	17169,97	0,97
2008	soyb	14108,33	18189,11	1,29
2008	agrl	70541,64	13354,85	0,19
2008	cwps	15871,87	2465,54	0,16
2008	pnut	14108,33	4904,72	0,35
2008	pmil	14108,33	1347,75	0,10
2008	bsvg	0,00	0,00	0,00
2009	gras	0,00	0,00	0,00
2009	shrb	0,00	0,00	0,00

Jahr	Name	Erntefläche (ha)	Ertrag(t)	Ertrag(t/ha)
2009	corn	29980,20	128830,90	4,30
2009	rice	17635,41	20471,47	1,16
2009	soyab	14108,33	17808,96	1,26
2009	agrl	70541,64	8552,18	0,12
2009	cwps	15871,87	1711,36	0,11
2009	pnut	14108,33	3462,42	0,25
2009	pmil	14108,33	1391,58	0,10
2009	bsvg	0,00	0,00	0,00

8.2 1.4 Maßnahmensteckbriefe für das Sakumono-Einzugsgebiet

Tabelle 42: Maßnahme Hochwasser I (urban)

Maßnahme: Hochwassergefahren- und -risikokarten
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Erstellung und Entwicklung von flächendeckenden Hochwassergefahren- und -risikokarten für Adenta und Sakumono. Geeignet zur besseren Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Behörden. Als Entscheidungs- und Argumentationsgrundlage verwendbar.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, mittelfristig, langfristig
Synergien NADMO Bezirksregierungen Planungsbüro (Planning Office)
Konflikte keine

Tabelle 43: Maßnahme Hochwasser II (urban)

Maßnahme: Abflusshindernisse an Engstellen vermeiden und beseitigen
Kategorie: Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Bei der Dimensionierung von Brücken und beim Verlegen von Leitungen darauf achten, dass Abflusshindernissen (z.B. tiefliegende Brücken oder Engstellen an kleineren Fließgewässern) vorgebeugt wird oder bestehende Abflusshindernisse beseitigt oder modifiziert werden. Engstellen und Abflusshindernisse, wie Treibgut, abgelagerter Sand und Geröll bei Oberflächengewässern und in der Kanalisation können zur Folge haben, dass die Anlagen bei Starkniederschlägen überlastet werden und das anfallende Wasser nicht ableiten können
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier

Bezirk
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum kurz- bis mittelfristig
Synergien Bezirksverwaltung Planning Office
Konflikte keine

Tabelle 44: Maßnahme Hochwasser III (urban)

Maßnahme: (Hochwasser-)Frühwarnsystem
Kategorie: Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Installation eines Hochwasserfrühwarnsystem, das kontinuierlich die meteorologischen Regenvorhersagen für das Einzugsgebiet prüft. Sollte bei einem bevorstehenden Regenereignis Überschwemmungs- und Gefahrenpotential bestehen, so gibt es eine Warnung für den gefährdeten Bereich aus. Nach der Ausgabe der technischen Warnung, muss ein Warnzyklus inkl. Multiplikatoren angeschlossen sein.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Einzugsgebiet
Grundlage für die Umsetzung Technische Installation und geschultes Personal
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung HSD
Konflikte Keine

Tabelle 45: Maßnahme Hochwasser IV (urban)

Maßnahme: Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Erarbeitung eines Warnzyklus, der ausgelöst wird, wenn die Wettervorhersage bzw. das technische Frühwarnsystem einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Nach Auslösen des Zyklus folgt die Auswahl eines oder mehrerer Kommunikationskanäle, vor der Berücksichtigung des lokalen Hintergrundes. Außerdem muss das Übertragungsformat der Warnung gewählt werden. Diese Wahl wird durch den Risikokontext (Schweregrad und Vorlaufzeit) sowie durch die Attribute der Risikowahrnehmung bestimmt. Dann kann eine Warnung sowohl erstellt als auch verbreitet werden.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier
Grundlage für die Umsetzung

Definieren der Schwellenwerte im technischen Frühwarnsystem bei dem der Warnzyklus angestoßen werden soll
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung HSD
Konflikte Keine

Tabelle 46: Maßnahme Hochwasser V (urban)

Maßnahme: Berücksichtigung von Hochwasserrisiken in der Stadtplanung
Kategorie: Flächenvorsorge/-management, Städtebauliche Vorsorge
Beschreibung: Berücksichtigung der Hochwasserrisiken bei der Vergabe von Siedlungsfläche und eventuelle Anpassung von bereits bestehenden Wohnräumen in hochwassergefährdeten Gebieten um diese resilienter zu machen. Ausweisen natürlichen Überflutungsflächen auf denen nicht gebaut werden darf. Hierzu zählt auch die konsequente Durchsetzung dieses Bauverbotes.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirks-/Stadtebene
Grundlage für die Umsetzung Rechtliche Grundlage für den Rückbau informeller Siedlungen ausgewiesenen Überflutungsgebieten
Umsetzungszeitraum mittel- bis langfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Planning Office
Konflikte Siedlungshistorie

Tabelle 47: Maßnahme Hochwasser VI (urban)

Maßnahme: Errichtung und Unterhaltung Regenrückhaltebecken
Kategorie: Bauvorsorge Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Hochwasserrückhaltebecken sind so konzipiert, dass sie ankommende Hochwasserwellen abdämpfen, zwischenspeichern und gedrosselt in den Unterlauf abführen. Sie sind auf bestimmte Abflussereignisse dimensioniert und heute überwiegend als Trockenbecken realisiert.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung

Umsetzungszeitraum fortlaufend
Synergien Bezirksregierung Planning Office
Konflikte Eigentümer, der Grundstücksflächen

Tabelle 48: Maßnahme Hochwasser VII (urban)

Maßnahme: Sensibilisierung der Bevölkerung zur Eigenvorsorge
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Information der Öffentlichkeit über Eigenvorsorge und Verhalten im Hochwasser durch Erstellung/Bereitstellung von Informationsmaterial oder Web-Links zu vorhandenen Informationsmaterialien
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung Keine
Umsetzungszeitraum kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung Schulen
Konflikte Keine

8.3 AP 1.5 Maßnahmensteckbriefe für das Nabogo Einzugsgebiet

Tabelle 49: Maßnahme Dürre I (rural)

Maßnahme: Staustufen
Kategorie: Wasserwirtschaft / Dürremanagement /Bewässerung
Beschreibung: In regelmäßigen Abschnitten werden im Fluss kleinere Querbauwerke eingezogen. Wasser wird lokal aufgestaut und kann für Bewässerungszwecke genutzt werden
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Lokal/Regional
Grundlage für die Umsetzung: Wasserwirtschaftliche Planung, Bewässerungspumpen, Bewässerungssystem Finanzmittel
Umsetzungszeitraum mittelfristig
Synergien Bewässerungssystem;
Konflikte Querbauwerke können Durchgängigkeit für Fische reduzieren und damit geringere Erträge für Fischer induzieren

Tabelle 50: Maßnahme Dürre II (rural)

Maßnahme: Bewässerungssysteme
Kategorie: Landwirtschaft
Beschreibung: Künstliche Bewässerung durch Nutzung von Pumpen, Rohrleitungen und Bewässerungssystemen wie Tröpfchenbewässerung
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Landwirtschaftliche Felder
Grundlage für die Umsetzung Landwirtschaftliche Planung, technische Dimensionierung, Strom, Infrastruktur
Umsetzungszeitraum Mittelfristig
Synergien Förderung wassersparender Anbaumethoden

Tabelle 51: Maßnahme Dürre III (rural)

Maßnahme: Förderung wassersparender Anbaumethoden
Kategorie: Landwirtschaft Dürre
Beschreibung: Der Anbau von trockenheitsresistenten Kulturpflanzen. Kann erstens dazu führen den Wasserverbrauch u.a. für Bewässerung zu reduzieren. Andererseits tragen diese Pflanzen, da sie auch bei größeren Dürren ertragreich sind zur Versorgungssicherheit bei. Auch die Förderung von dürreresistenten Nutzpflanzen und Praktiken der Viehhaltung können dazu beitragen, die Auswirkungen von Trockenperioden zu mildern.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Anbauflächen der Landwirte

Grundlage für die Umsetzung Finanzielle Mittel zum Kauf der Anlagen
Umsetzungszeitraum Kurz- bis langfristig
Synergien Lokale Landwirte Universitäten

Tabelle 52: Maßnahme Dürre IV (rural)

Maßnahme: Sensibilisierung der Bevölkerung und lokaler Bauern für wassersparendes Verhalten
Kategorie: Informations-, Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Insbesondere in Trocken- und Hitzeperioden die Bevölkerung und Landwirtschaft zum sparsamen Umgang mit Wasser aufrufen, z.B. durch verstärkte Verwendung von Brauchwasser. Verhaltensempfehlungen und Tipps zum sparsamen Umgang mit Wasser können auch über z.B. Informationsblätter verbreitet werden.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Wohneinheit Landwirtschaftliche Bewirtschaftungsfläche Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung Möglichkeit der Bevölkerungen und lokalen Bauern die Sensibilisierungsmaßnahmen zu verstehen (Bezug auf Sprachen)
Umsetzungszeitraum Kurz bis langfristig
Synergien Lokale Landwirte Bevölkerung Universitäten

Tabelle 53: Maßnahme Dürre V (rural)

Maßnahme: Bau von Wasserauffanganlagen und -reservoirs
Kategorie: Wassereinsparung
Beschreibung: Um die Auswirkungen von Dürren zu bewältigen, sind Maßnahmen zur Wassereinsparung und -bewirtschaftung erforderlich, wie z. B. der Bau von Wasserauffanganlagen und -reservoirs, Regenwassersammlung und Wasserspeichersysteme. In ihnen kann eine Zwischenspeicherung von Niederschlagswasser von befestigten Flächen erfolgen. Dieses Wasser kann für Dürren vorgehalten werden.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirk Quartier Wohneinheit
Grundlage für die Umsetzung Flächenverfügbarkeit
Umsetzungszeitraum Kurz bis langfristig
Synergien

Lokale Landwirte Bevölkerung Universitäten
--

Tabelle 54: Maßnahme Dürre VI (rural)

Maßnahme: Dürrevorbereitungspläne
Kategorie: Dürre Wassereinsparung
Beschreibung: Die Entwicklung von Dürrevorbereitungspläne ist notwendig, damit rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden können, um die Auswirkungen von Dürren auf die lokalen Gemeinschaften abzumildern. Diese Pläne sollten für die Anwohnenden verständlich und einsehbar sein.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Gemeinden
Grundlage für die Umsetzung keine
Umsetzungszeitraum Kurz bis langfristig
Synergien Lokale Landwirte Bevölkerung Bezirksregierung NADMO

Tabelle 55: Maßnahme Dürre VII (rural)

Maßnahme: Dürrefrühwarnsystem
Kategorie: Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Eine Dürrefrühwarnung aber auch eine Warnung vor Trockenperioden ist sinnvoll. So können die Anwohnenden ihren Wasserverbrauch reduzieren und Wasser für den Hausgebrauch sparen. Sollte eine Dürrevorbereitungsplan vorliegen können sie rechtzeitig die notwendigen Handlungen ausführen. Landwirte können u.a. Wasser für die Bewässerung ihrer Felder zu sparen, um dies im Fall einer langanhaltenden Dürre retten zu können. Bei einer Frühwarnung bzgl. Trockenperiodenwarnung können sie unter Umständen ihren aus Saattermin verschieben.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Gemeinden
Grundlage für die Umsetzung -
Umsetzungszeitraum Kurz bis langfristig
Synergien Lokale Landwirte Bevölkerung

Tabelle 56: Maßnahme Dürre VIII (rural)

Maßnahme: (Dürre-)Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Kategorie: Informations-, Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Erarbeitung eines Warnzyklus, der ausgelöst wird, wenn das Dürrefrühwarnsystem bzw. das technische Frühwarnsystem einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Nach Auslösen des Zyklus folgt die Auswahl eines oder mehrerer Kommunikationskanäle, vor der Berücksichtigung des lokalen Hintergrundes. Außerdem muss das Übertragungsformat der Warnung gewählt werden. Diese Wahl wird durch den Risikokontext (Schweregrad und Vorlaufzeit) sowie durch die Attribute der Risikowahrnehmung bestimmt. Dann kann eine Warnung sowohl erstellt als auch verbreitet werden.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier
Grundlage für die Umsetzung Definieren der Schwellenwerte im technischen Frühwarnsystem bei dem der Warnzyklus angestoßen werden soll
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung HSD

Tabelle 57: Maßnahme Hochwasser I (rural/Tamale)

Maßnahme: Bauliche Eigenschutzmaßnahmen
Kategorie: Eigenschutz Bauvorsorge
Beschreibung: Anwohnende in einem Überflutungsgefährdeten Gebiet können einige Eigenschutzmaßnahmen ergreifen, um die Auswirkung einer Überflutung abzumindern. Sie können ihre Häuser erhöht auf einem Sockel oder Stelzen bauen. Zusätzlich sollten sie kleine Flut-/Schutzmauern um ihre Häuser bauen, um ein Eindringen des Wassers hinauszuzögern
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Wohneinheitsebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, mittelfristig, langfristig
Synergien Anwohnende

Tabelle 58: Maßnahme Hochwasser II (rural/Tamale)

Maßnahme: Verteilung von Hilfsgütern
Kategorie: Akutmaßnahme
Beschreibung: Anwohnende sollten in einem akuten Überflutungsfall Sandsäcke und andere Hilfsgüter zur Verfügung stehen um z. B. ihre Türen und Fenster etc. abzudichten und ein Eindringen des Wassers zu verhindern.

Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Wohneinheitsebene
Grundlage für die Umsetzung Rechtszeitige Aushändigung der Sandsäcke
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, mittelfristig, langfristig
Synergien Anwohnende NADMO

Tabelle 59: Maßnahme Hochwasser III (rural/Tamale)

Maßnahme: Eigentum aus der Gefahrenzone bringen
Kategorie: Akutmaßnahme
Beschreibung: Den Anwohnenden stehen eine Reihe von Abminderungsmaßnahmen zur Verfügung, die sie kurz vor, während oder nach einer Überflutung durchführen können: <ul style="list-style-type: none"> - Hausrat bei/vor Überflutungen auf das Dach bringen - Elektrische Geräte wie Fernseher erhöht anbringen oder falls ein zweites Stockwerk vorhanden ist dort hinbringen
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Wohneinheitsebene
Grundlage für die Umsetzung -
Umsetzungszeitraum Kurzfristig
Synergien Anwohnende

Tabelle 60: Maßnahme Hochwasser IV (rural/Tamale)

Maßnahme: Berücksichtigung von Hochwasserrisiken in der Stadtplanung
Kategorie: Flächenvorsorge/-management, Städtebauliche Vorsorge
Beschreibung: Berücksichtigung der Hochwasserrisiken bei der Vergabe von Siedlungsfläche und eventuelle Anpassung von bereits bestehenden Wohnräumen in hochwassergefährdeten Gebieten um diese resilienter zu machen. Ausweisen natürlichen Überflutungsflächen auf denen nicht gebaut werden darf. Hierzu zählt auch die konsequente Durchsetzung dieses Bauverbotes.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirks-/Stadtebene
Grundlage für die Umsetzung Rechtliche Grundlage für den Rückbau informeller Siedlungen ausgewiesenen Überflutungsgebieten
Umsetzungszeitraum mittel- bis langfristig, fortlaufend
Synergien NADMO

Planning Office
Konflikte
Siedlungshistorie

Tabelle 61: Maßnahme Hochwasser V (rural/Tamale)

Maßnahme: Sensibilisierung der Bevölkerung zur Eigenvorsorge
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Information der Öffentlichkeit über Eigenvorsorge und Verhalten im Hochwasser durch Erstellung/Bereitstellung von Informationsmaterial oder Web-Links zu vorhandenen Informationsmaterialien
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Chiefs Bezirksregierungen

Tabelle 62: Maßnahme Hochwasser VI (rural/Tamale)

Maßnahme: (Hochwasser-)Frühwarnungen als Aspekt der Krisen- und Katastrophenkommunikation
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Erarbeitung eines Warnzyklus, der ausgelöst wird, wenn die Wettervorhersage bzw. das technische Frühwarnsystem einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Nach Auslösen des Zyklus folgt die Auswahl eines oder mehrerer Kommunikationskanäle, vor der Berücksichtigung des lokalen Hintergrundes. Außerdem muss das Übertragungsformat der Warnung gewählt werden. Diese Wahl wird durch den Risikokontext (Schweregrad und Vorlaufzeit) sowie durch die Attribute der Risikowahrnehmung bestimmt. Dann kann eine Warnung sowohl erstellt als auch verbreitet werden.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier
Grundlage für die Umsetzung Definieren der Schwellenwerte im technischen Frühwarnsystem bei dem der Warnzyklus angestoßen werden soll
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung HSD

Tabelle 63: Maßnahme Hochwasser VII (rural/Tamale)

Maßnahme: (Hochwasser-)Frühwarnsystem (technisch)
Kategorie: Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Installation eines Hochwasserfrühwarnsystem, dass kontinuierlich die meteorologischen Regenvorhersagen für das Einzugsgebiet prüft. Sollte bei einem bevorstehenden Regenereignis Überschwemmungs- und Gefahrenpotential bestehen, so gibt es eine Warnung für den gefährdeten Bereich aus. Nach der Ausgabe der technischen Warnung, muss ein Warnzyklus inkl. Multiplikatoren angeschlossen sein.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Einzugsgebiet
Grundlage für die Umsetzung Technische Installation und geschultes Personal
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, fortlaufend
Synergien NADMO Bezirksregierung HSD

Tabelle 64: Maßnahme Hochwasser VIII (rural/Tamale)

Maßnahme: Hochwassergefahren- und -risikokarten
Kategorie: Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Erstellung und Entwicklung von flächendeckenden Hochwassergefahren- und -risikokarten für Tamale und Nabogo. Geeignet zur besseren Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Behörden. Als Entscheidungs- und Argumentationsgrundlage verwendbar.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum Kurzfristig, mittelfristig, langfristig
Synergien NADMO Bezirksregierungen Planungsbüro (Planning Office)

Tabelle 65: Maßnahme Hochwasser VIII (rural/Tamale)

Maßnahme: Entwässerungs- und Abwassersystem
Kategorie: Bauvorsorge, Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Bau von Entwässerungskanälen, um die Funktionalität dieser Systeme auch im Hochwasserfall zu gewährleisten. So führen das Niederschlagswasser sicher ab. Nach ihrer Errichtung muss sichergestellt werden, dass sie nicht Verblocken, da sie ansonsten zu einer Verschlimmerung der Situation beitragen können.

Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirk
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum kurz- bis mittelfristig

Tabelle 66: Maßnahme Hochwasser X (rural/Tamale)

Maßnahme: Sicherstellung eines funktionsfähigen zentralen Entsorgungssystem
Kategorie: Bauvorsorge, Informations-/Verhaltens- und Risikovorsorge
Beschreibung: Sicherstellung eines funktionsfähigen zentralen Entsorgungssystem der Gemeinde/Stadt trägt dazu bei, dass weniger Unrat im Hochwasserfall zu Verblockungen von Abflüssen etc. führen kann. Hierfür ist es notwendig zentrale Sammelstellen in der unmittelbaren Umgebung der Anwohner zu schaffen, die regelmäßig geleert und zu einem zentralen nicht von Hochwasser gefährdeten Platz gebracht werden. Zusätzlich ist die Sensibilisierung der Bevölkerung notwendig. Sie müssen sich darüber im Klaren sein, dass nicht sachgemäß entsorgter Abfall, ihre Situation im Hochwasserfall verschlimmern kann.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirk
Grundlage für die Umsetzung Flächenverfügbarkeit
Umsetzungszeitraum kurz- bis mittelfristig
Synergien Entsorgungsbetriebe Stadtplanung Anwohnende

Tabelle 67: Maßnahme Hochwasser XI (rual/Tamale)

Maßnahme: Einrichtung von Pufferzonen entlang des Flusses
Kategorie: Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Um die Auswirkungen von Überschwemmungen in den Griff zu bekommen, bedarf es einer angemessenen Flächennutzungsplanung und -bewirtschaftung, z. B. durch die Einrichtung von Pufferzonen entlang der Flussufer, in denen nicht gebaut oder Landwirtschaft betrieben werden darf. Die Größe und Lage der Pufferzonen rund, um Flüsse kann mit Hilfe der Hochwassergefahrenkarten ermittelt werden, falls diese welche vorhanden sind.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Quartier Bezirk
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum

kurz- bis mittelfristig
Synergien
Entsorgungsbetriebe
Stadtplanung
Anwohnende

Tabelle 68: Maßnahme Hochwasser XII (rural/Tamale)

Maßnahme: Bau von Stützmauern
Kategorie: Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung Technische Vorsorge/Schutz
Beschreibung: Um die Auswirkungen von Überschwemmungen in den Griff zu bekommen, bedarf es einer angemessenen Flächennutzungsplanung und -bewirtschaftung, z. B. den Bau von Stützmauern, um Gebäude und andere Bauwerke widerstandsfähiger im Überflutungsfall zu machen
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Gebäude
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum kurz- bis mittelfristig
Synergien Stadtplanung

Tabelle 69: Maßnahme Hochwasser XIII (rural/Tamale)

Maßnahme: Förderung von Bodenschutzmaßnahmen
Kategorie: Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung
Beschreibung: Um die Auswirkungen von Überschwemmungen in den Griff zu bekommen, bedarf es einer angemessenen Flächennutzungsplanung und -bewirtschaftung, z. B. die Förderung von Bodenschutzmaßnahmen zur Verringerung der Erosion.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirksebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum kurz- bis mittelfristig
Synergien Stadtplanung

Tabelle 70: Maßnahme Hochwasser XIV (rural/Tamale)

Maßnahme: Hochwasserfonds
Kategorie: Bauvorsorge, Flächennutzungsplanung
Beschreibung:

Um eine akute Notwasserhilfe gewährleisten zu können müssen die Organisationen neben genügend Personal auch genügend finanzielle Ressourcen zur Verfügung haben. Nur so können sie für den Hochwasserfall die nötige Ausrüstung und Hilfsgüter vorhalten.
Räumliche Auflösung/Wirkungsgrad: Bezirksebene Stadtebene
Grundlage für die Umsetzung
Umsetzungszeitraum mittelfristig, langfristig
Synergien NADMO Regierung

8.4 AP 2.0: Daten AWAS-Containeranlage (RUB)

Tabelle 71: Messwerte zur Kalibrierung der UV/VIS-Sonden and der AWAS-Anlage (05.10.2021 und 13.10.2021)

Lfd. Nr	Probenbezeichnung	Trübung (MW)NTU	NO3-N mg/L	NH4-N mg/L	CSB mg/L	AFS mg/L	TDS mg/L
1	AWAS Z:_ 10:17:53_05.10.2021	5.8	1.44	0.789	34.2	8.34	403
2	AWAS A:_ 10:20:45_05.10.2021	4.7	2.48	0.289	20.4	0.57	367
3	AWAS Z:_ 13:10:58_05.10.2021	5.6	1.45	0.86	32.5	9.16	419
4	AWAS A:_ 11:50:13_05.10.2021	2.1	2.1	0.412	22.7	0.79	372
5	AWAS Z:_ 13:42:32_05.10.2021	4.7	1.34	0.913	32.2	6.63	404
6	AWAS A:_ 12:26:43_05.10.2021	1.7	2.07	0.472	22.6	0.53	371
7	AWAS Z:_ 14:15:03_05.10.2021	4.7	1.37	0.947	32.2	6.09	411
8	AWAS A:_ 13:16:35_05.10.2021	1.6	2.01	0.506	23.3	0.66	391
SBR 9	AWAS Z:_ 14:35:47_05.10.2021	7.7	1.81	0.368	37.3	10.64	427
10	AWAS A:_ 13:46:22_05.10.2021	1.6	2.0	0.522	23.6	0.84	385
SBR 11	AWAS Z:_ 14:51:39_05.10.2021	10.5	1.86	0.354	38.2	19.27	417
12	AWAS A:_ 14:19:23_05.10.2021	1.7	1.99	0.55	24.3	0.95	391
13	AWAS Z:_ 15:10:00_05.10.2021	6.8	1.58	0.595	35.4	9.74	426
SBR 14	AWAS A:_ 14:52:42_05.10.2021	2.2	1.86	0.577	24.2	1.23	392
15	AWAS Z:_ 15:25:10_05.10.2021	6.9	1.59	0.601	33.8	8.98	428
16	AWAS A:_ 15:22:49_05.10.2021	1.8	1.81	0.601	23.8	1.42	385

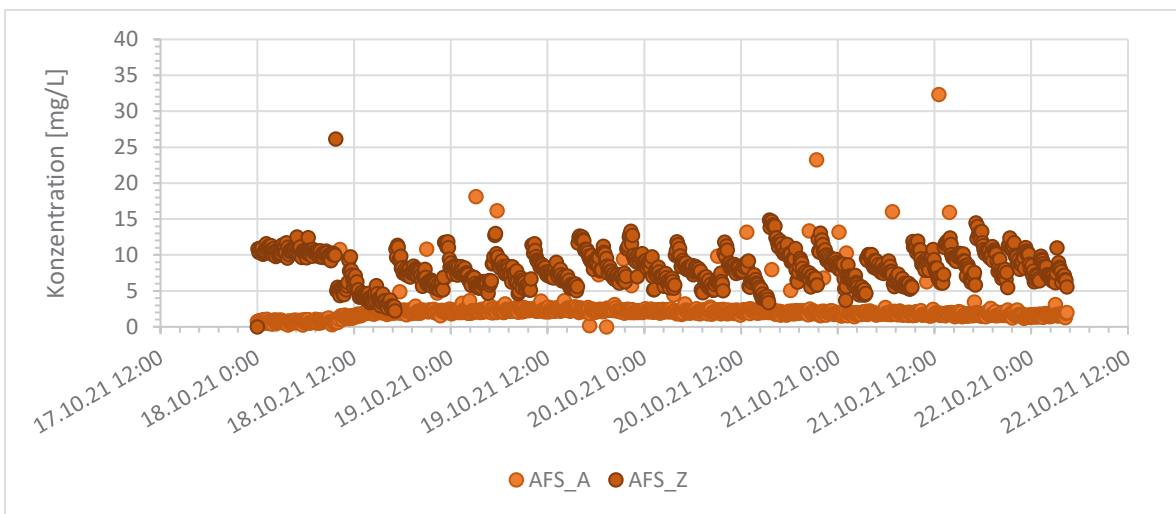
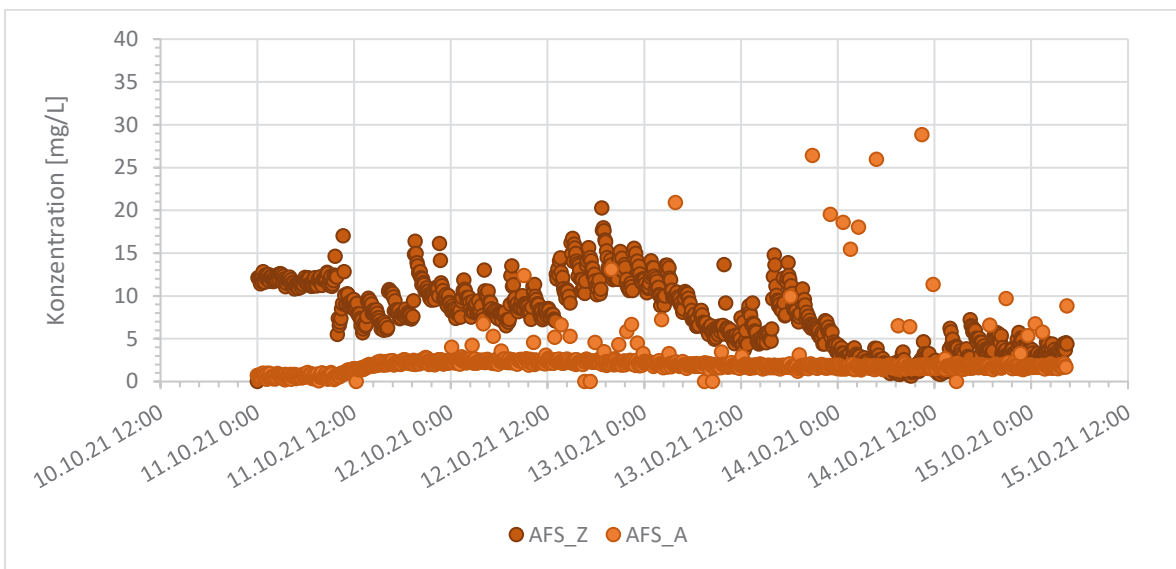
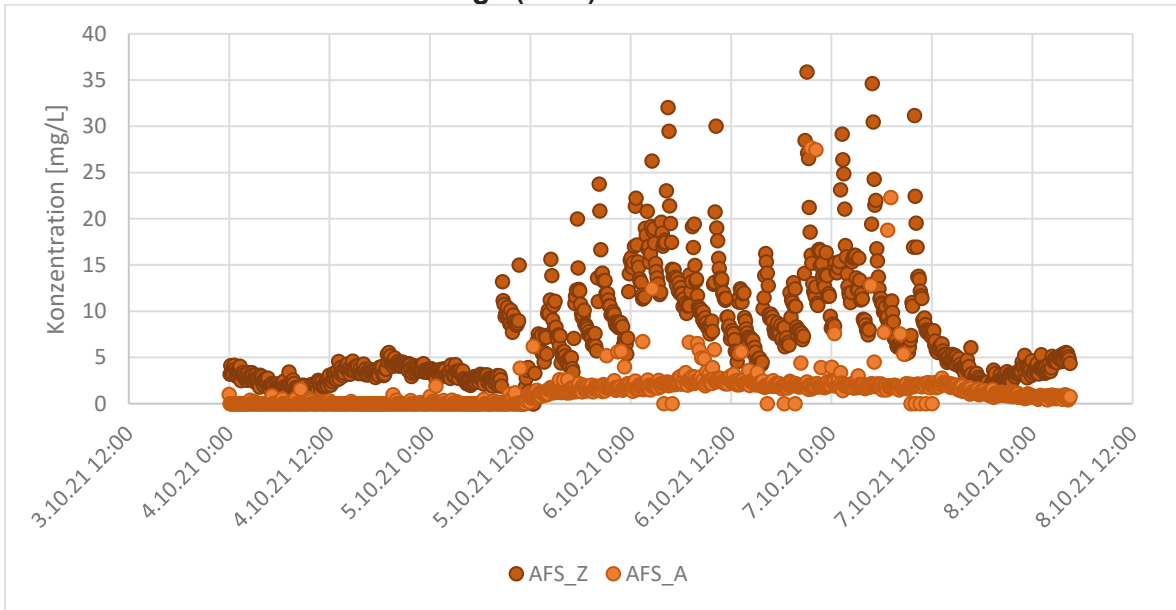
17	AWAS Z:_15:37:13_05.10.2021	6.1	1.58	0.635	34	9.19	415
18	AWAS A:_15:43:55_05.10.2021	1.8	1.83	0.606	23.7	0.90	395
19	AWAS Z:_15:48:51_05.10.2021	5.7	1.63	0.7	35.4	7.26	424
20	AWAS A:_16:05:00_05.10.2021	1.7	1.87	0.601	24.5	1.49	390

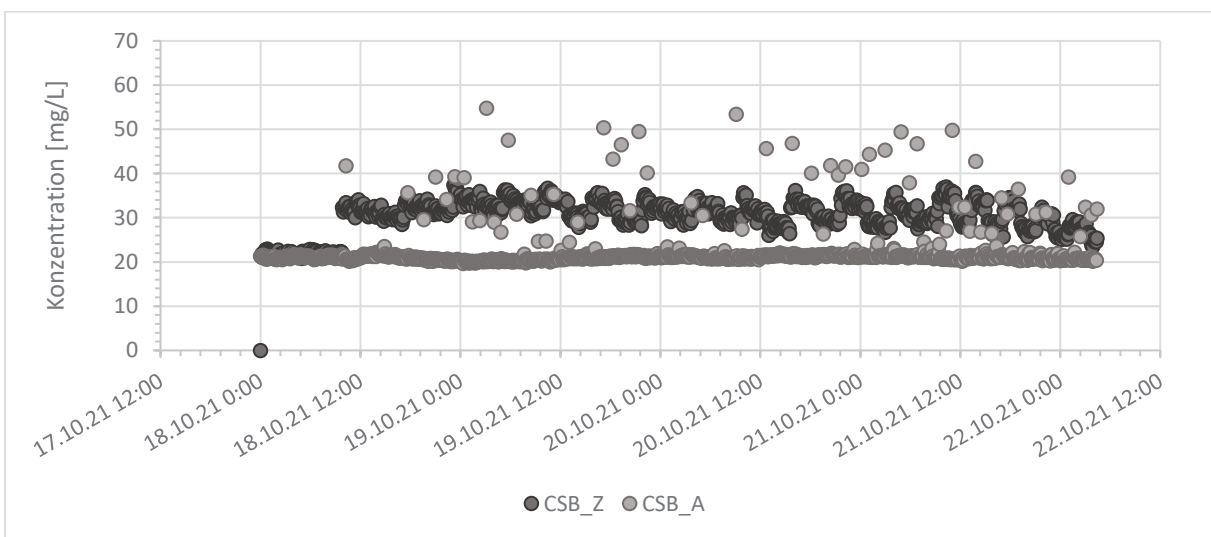
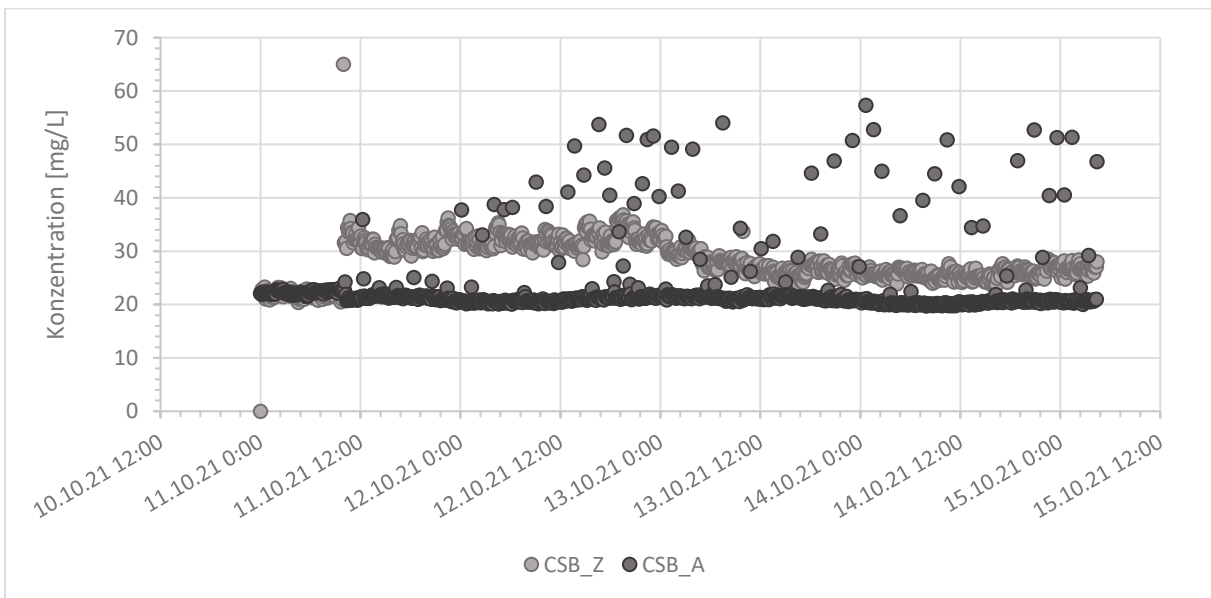
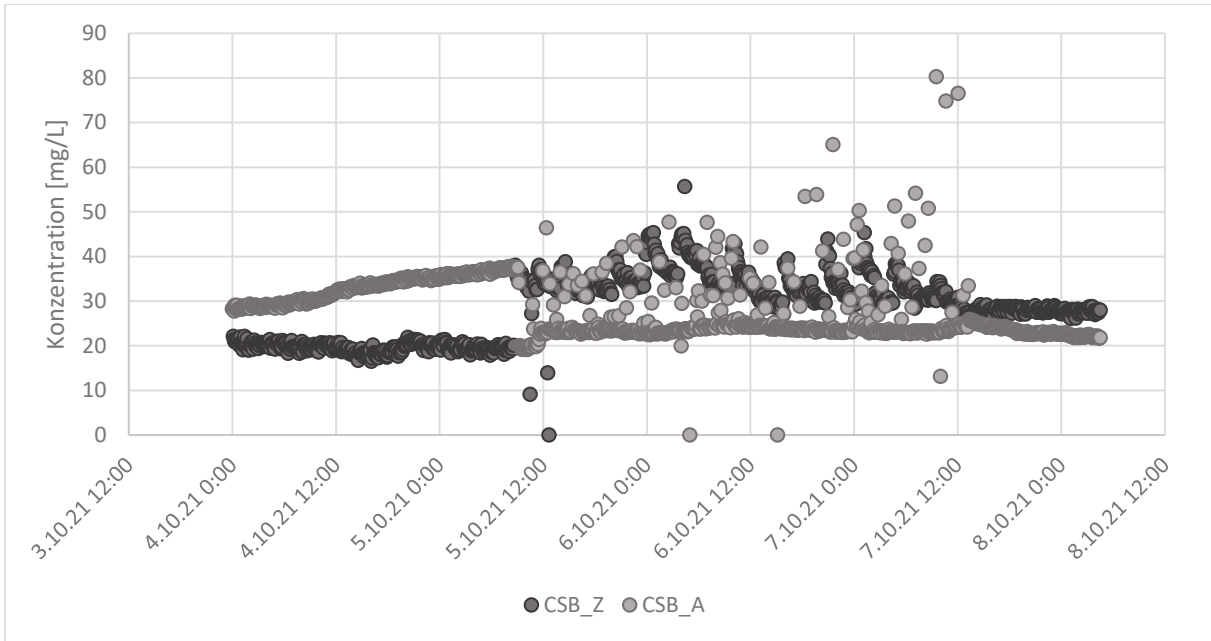
Vorsetzung Tabelle 26: Messwerte zur Kalibrierung der UV/VIS-Sonden and der AWAS-Anlage (05.10.2021 und 13.10.2021)

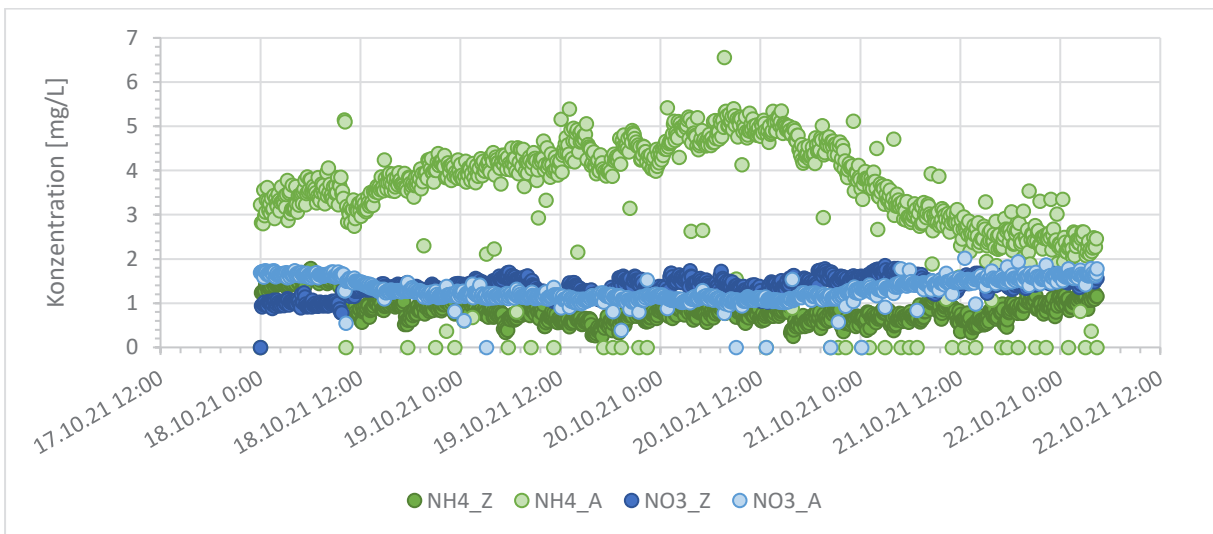
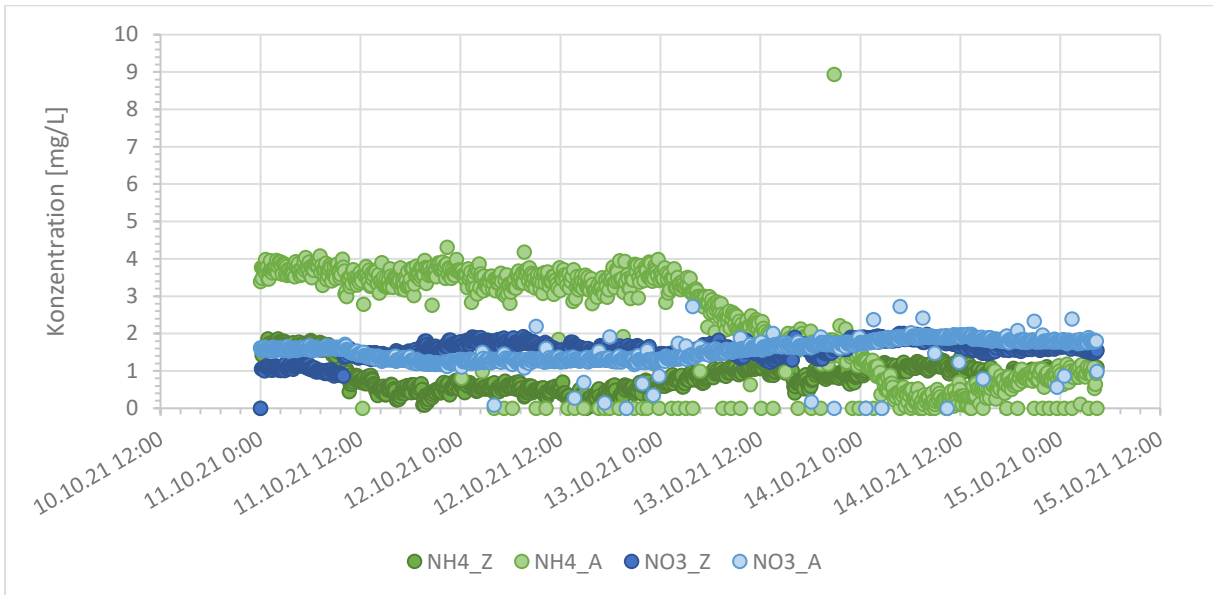
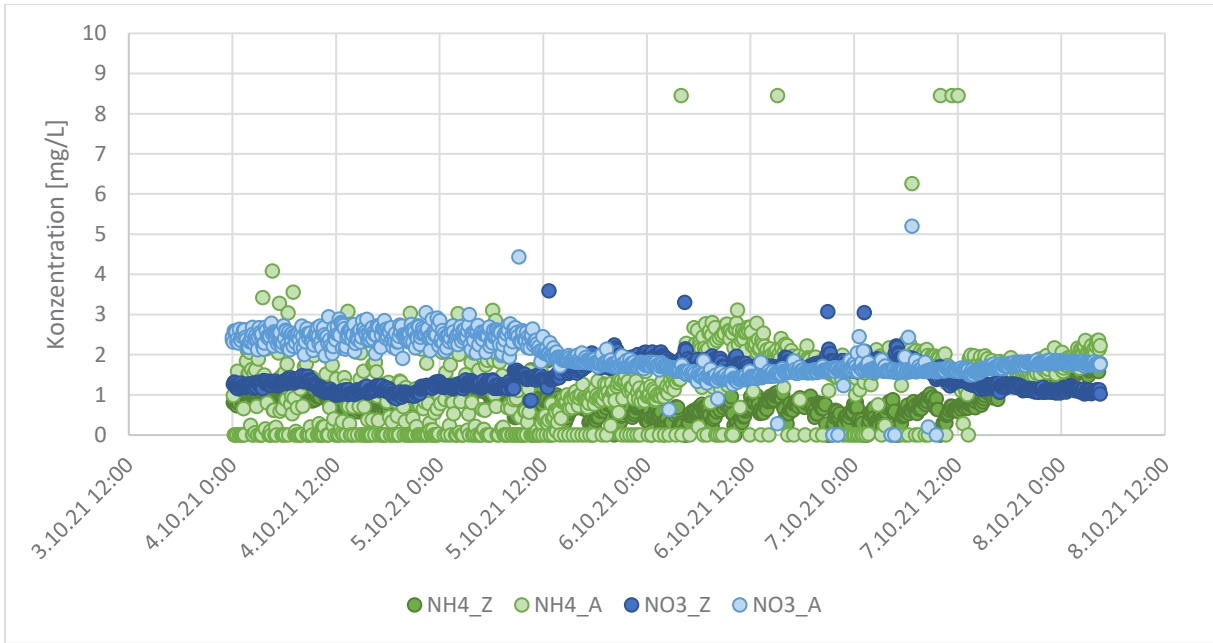
Lfd. Nr	Probenbezeichnung	Trübung	NO3-N	NH4-N	CSB	AFS	TDS
		(MW)NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
21	AWAS Z:_16:19:49_05.10.2021	5.3	1.6	0.704	33.8	6.30	422
22	AWAS A:_16:23:07_05.10.2021	2.1	1.8	0.583	23.1	1.24	389
23	AWAS A:_12:35:09_05.10.2021	1.6	2.02	0.477	18.7	1.26	376
24	AWAS A:_10:33:21_13.10.2021	1.8	1.84	2.17	21.6	1.83	287
25	AWAS Z:_10:30:21_13.10.2021	7.6	1.46	1.78	32.4	12.71	266
26	AWAS A:_10:57:28_13.10.2021	1.4	1.52	2.12	20.9	0.86	281
28	AWAS A:_11:27:37_13.10.2021	1.2	1.68	2.05	23.1	0.75	279
29	AWAS Z:_11:28:15_13.10.2021	6.4	1.63	1.15	27.1	9.58	266
30	AWAS A:_11:57:46_13.10.2021	1.2	1.6	2.02	20.7	0.69	279
31	AWAS Z:_11:58:44_13.10.2022	5.4	1.56	1.2	26.3	8.78	264
32	AWAS A:_12:21:55_13.10.2022	1.1	1.71	1.94	22.8	0.76	279
33	AWAS Z:_12:17:01_13.10.2023	6.0	1.51	1.25	26.1	7.21	264
34	AWAS A:_12:39:59_13.10.2023	1.5	1.73	1.88	21.9	0.75	274
35	AWAS Z:_12:38:20_13.10.2024	5.4	1.52	1.28	26.8	7.58	269
36	AWAS A:_13:04:06_13.10.2024	1.1	1.59	1.79	20	0.85	278
37	AWAS Z:_12:56:40_13.10.2025	5.0	1.37	1.31	25.5	7.11	264
38	AWAS A:_13:19_13.10.2025	1.2	1.61	1.77	20.9	0.92	271
39	AWAS Z:_13:14:54_13.10.2026	4.2	1.34	1.34	26.5	6.32	268
40	AWAS A:_13:40:17_13.10.2026	1.1	1.59	1.71	21.5	0.75	275
41	AWAS Z:_13:36:15_13.10.2027	5.9	1.32	0.496	29.6	7.91	283

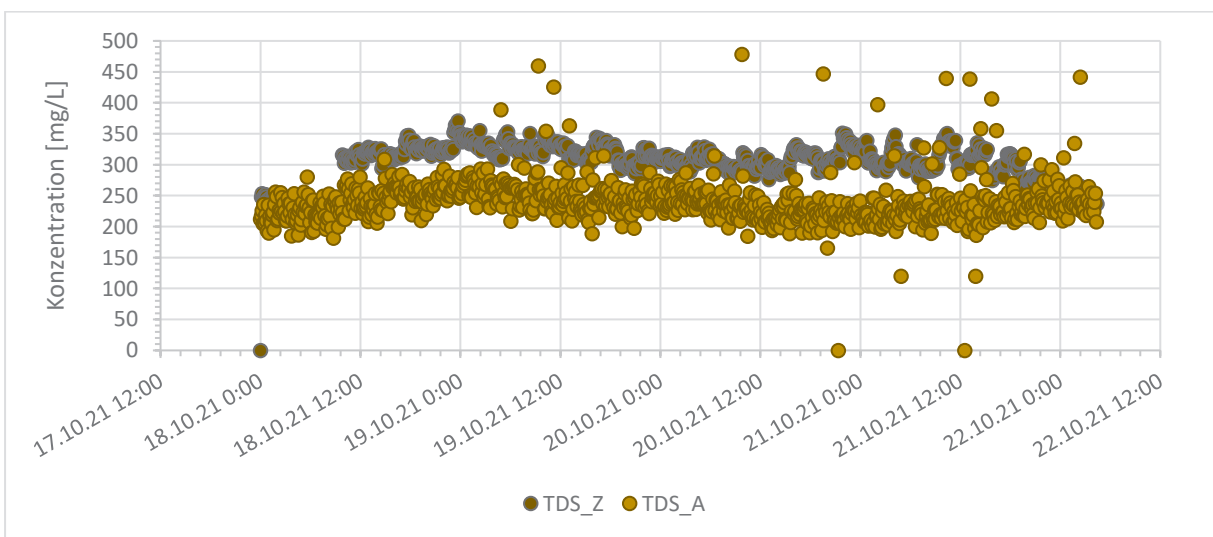
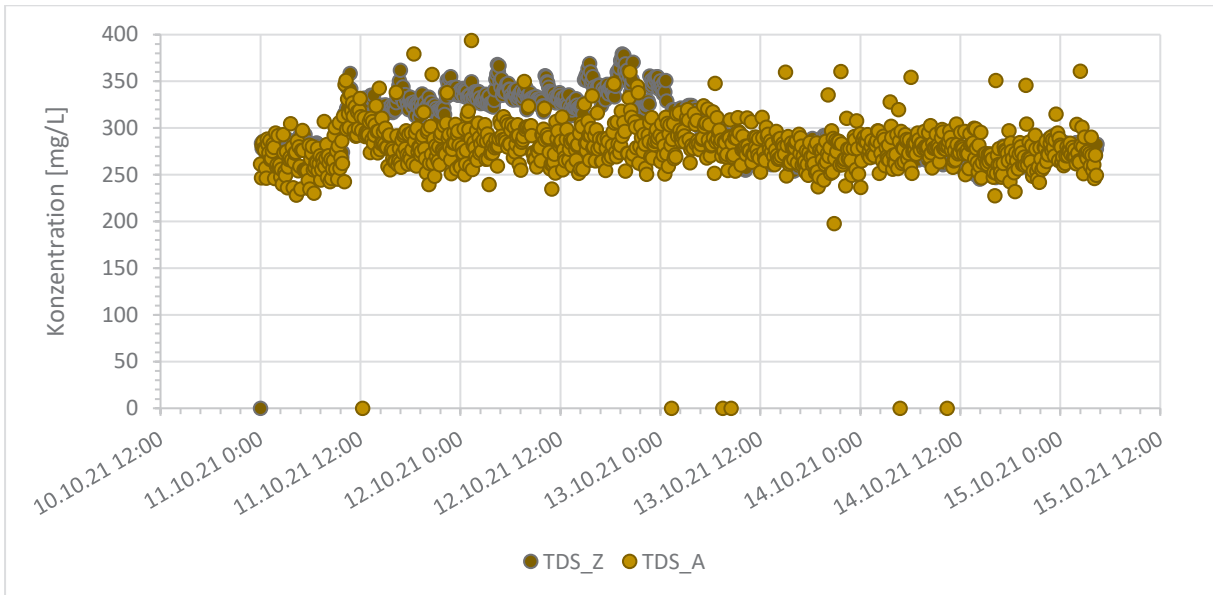
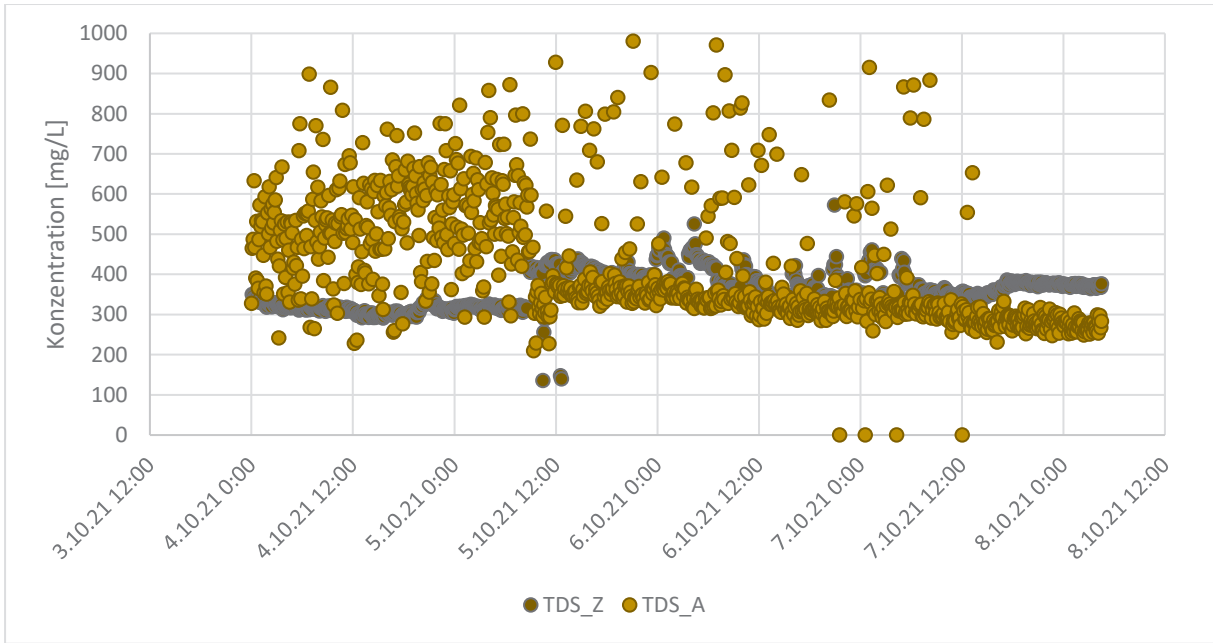
42	AWAS A:_14:04:24_13.10.2027	1.2	1.67	1.68	19.6	1.26	273
43	AWAS Z:_14:00:39_13.10.2028	5.1	1.34	0.593	30.1	7.94	273
44	AWAS A:_14:25:31_13.10.2028	1.5	1.65	1.59	21.5	0.92	276
45	AWAS Z:_14:21:59_13.10.2022	5.3	1.32	0.882	24.9	7.21	259
Lfd. Nr	Probenbezeichnung	Trübung (MW)NTU	NO ₃ -N mg/L	NH ₄ -N mg/L	CSB mg/L	AFS mg/L	TDS mg/L
46	AWAS A:_14:43:35_13.10.2022	1.2	1.68	1.54	20.4	0.73	272
47	AWAS Z:_14:37:13_13.10.2023	5.6	1.34	0.914	24	6.81	278
48	AWAS A:_14:58:40_13.10.2023	1.5	1.74	1.54	22.2	1.71	273
49	AWAS Z:_14:55:30_13.10.2022	4.9	1.42	0.958	24.5	7.10	270
50	AWAS A:_15:49:50_13.10.2022	1.0	1.7	1.39	20	0.70	274
51	AWAS Z:_15:44:16_13.10.2022	4.5	1.38	1.08	25	N/A	271

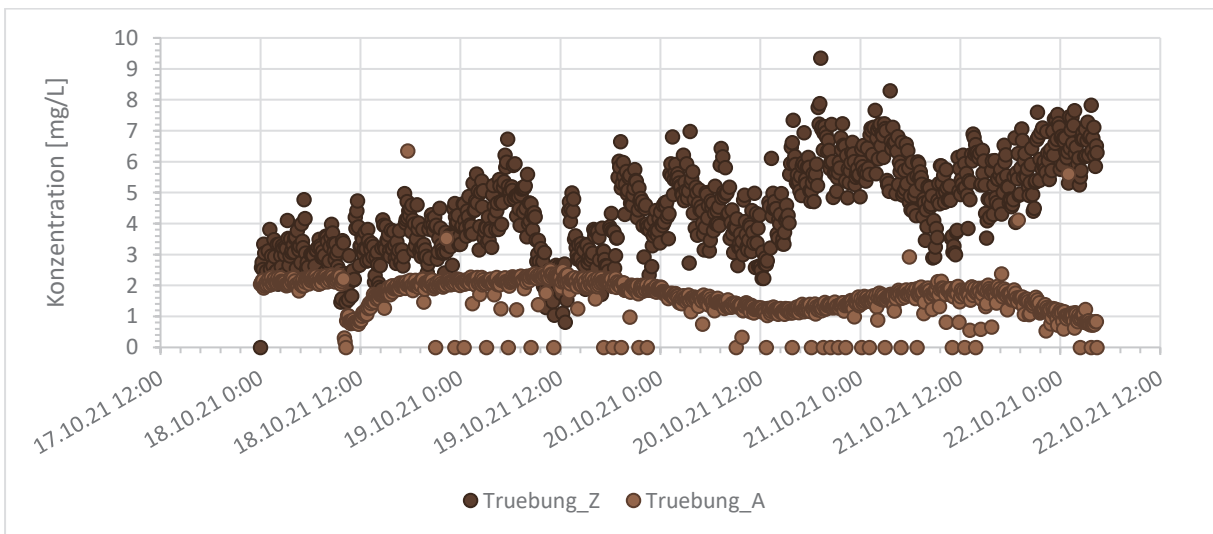
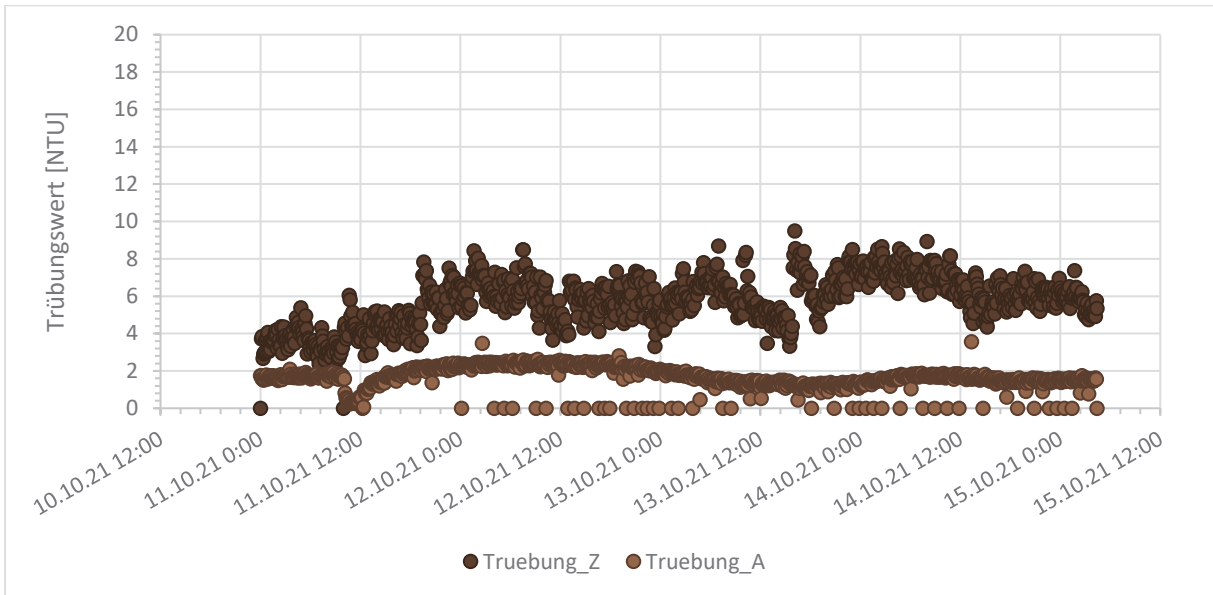
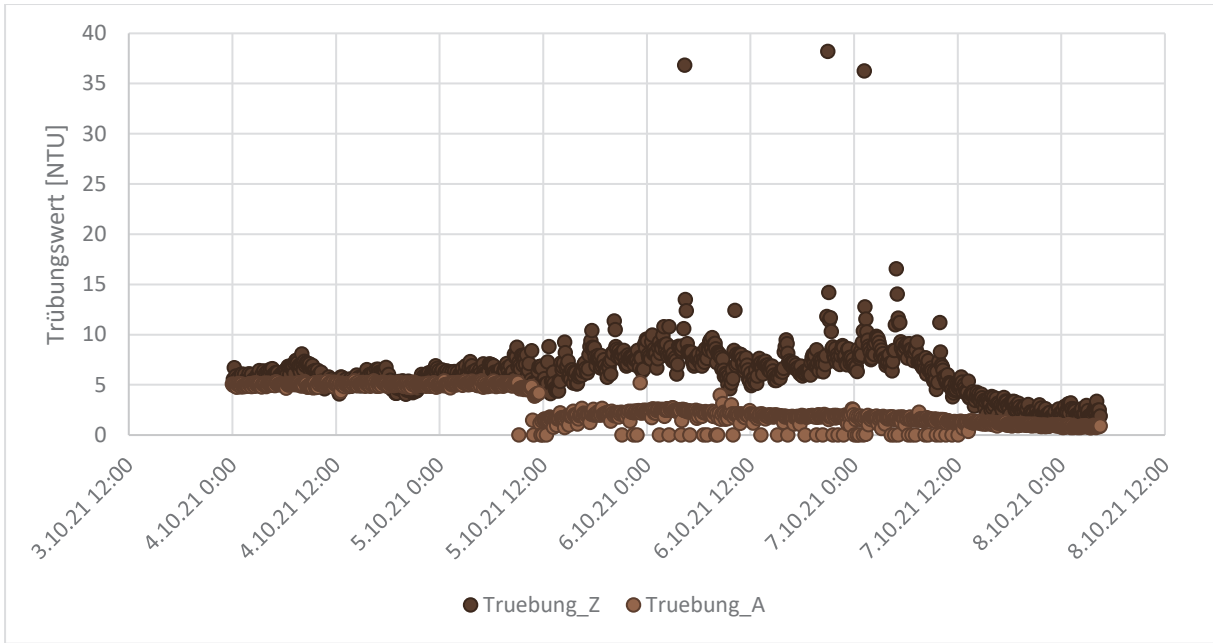
8.5 AP 2.0: Daten der UV/Vis-Spektrometer aus dem Zulauf (Z) und Ablauf (A) AWAS-Containeranlage (RUB)











8.6 Qualitätsanforderungen der US EPA „Guidelines for Water Reuse“ (2012)

Tabelle 72: Qualitätsanforderungen der US EPA „Guidelines for Water Reuse“

Reuse Category and Description	Treatment	Reclaimed Water Quality ²	Reclaimed Water Monitoring
Urban Reuse			
Unrestricted The use of reclaimed water in nonpotable applications in municipal settings where public access is not restricted.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary⁽⁴⁾ Filtration⁽⁵⁾ Disinfection⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 10 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 2 NTU ⁽⁸⁾ No detectable fecal coliform /100 ml ^(9,10) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly Turbidity - continuous Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Restricted The use of reclaimed water in nonpotable applications in municipal settings where public access is controlled or restricted by physical or institutional barriers, such as fencing, advisory signage, or temporal access restriction	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coliform /100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly TSS – daily Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Agricultural Reuse			
Food Crops ¹⁵ The use of reclaimed water for surface or spray irrigation of food crops which are intended for human consumption, consumed raw.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Filtration ⁽⁵⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 10 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 2 NTU ⁽⁸⁾ No detectable fecal coliform/100 ml ^(9,10) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly Turbidity - continuous Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Processed Food Crops ¹⁵ The use of reclaimed water for surface irrigation of food crops which are intended for human consumption, commercially processed.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coli/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly TSS – daily Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Non-Food Crops The use of reclaimed water for irrigation of crops which are not consumed by humans, including fodder, fiber, and seed crops, or to irrigate pasture land, commercial nurseries, and sod farms.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coli/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly TSS – daily Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Impoundments			
Unrestricted The use of reclaimed water in an impoundment in which no limitations are imposed on body-contact.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Filtration ⁽⁵⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 10 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 2 NTU ⁽⁸⁾ No detectable fecal coliform/100 ml ^(9,10) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly Turbidity – continuous Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Restricted The use of reclaimed water in an impoundment where body-contact is restricted.	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coliform/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly TSS – daily Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Environmental Reuse			
Environmental Reuse The use of reclaimed water to create wetlands, enhance natural wetlands, or sustain stream flows.	<ul style="list-style-type: none"> Variable Secondary ⁽⁴⁾ and disinfection ⁽⁶⁾ (min.) 	Variable, but not to exceed: <ul style="list-style-type: none"> ≤30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coliform/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> BOD – weekly SS – daily Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Industrial Reuse			
Once-through Cooling	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coliform/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> pH – weekly BOD – weekly TSS – weekly Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Recirculating Cooling Towers	<ul style="list-style-type: none"> Secondary ⁽⁴⁾ Disinfection ⁽⁶⁾ (chemical coagulation and filtration ⁽⁵⁾ may be needed) 	Variable, depends on recirculation ratio: <ul style="list-style-type: none"> pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l BOD ⁽⁷⁾ ≤ 30 mg/l TSS ≤ 200 fecal coliform/100 ml ^(9,13,14) 1 mg/l Cl₂ residual (min.) ⁽¹¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> Fecal coliform - daily Cl₂ residual – continuous
Other Industrial uses – e.g. boiler feed, equipment washdown, processing, power generation, and in the oil and natural gas production market (including hydraulic)			
Groundwater Recharge – Nonpotable Reuse			
The use of reclaimed water to recharge aquifers which are not used as a potable drinking water source.	<ul style="list-style-type: none"> Site specific and use dependent Primary (min.) for spreading Secondary ⁽⁴⁾ (min.) for injection 	<ul style="list-style-type: none"> Site specific and use dependent 	<ul style="list-style-type: none"> Depends on treatment and use



Projektpartner

Deutsche Partner



Ghanaische Partner



© FiWe V



Zukunftsfähige Technologien und Dienstleistungen zur Anpassung an den Klimawandel in Hochwasser- und Dürrefährdeten Siedlungsräumen in Ghana