

Untersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen auf die mikrobiologische Situation bei der Trink- wasserverteilung

Kurzfassung

Dr. Marcus Rybicki

DVGW Technologiezentrum Wasser - TZW

Dr. Heike Petzoldt

DVGW Technologiezentrum Wasser - TZW

Dr. Michael Hügler

DVGW Technologiezentrum Wasser - TZW

Dr. Johannes Ho

DVGW Technologiezentrum Wasser - TZW

Dr. Andreas Korth

DVGW Technologiezentrum Wasser - TZW

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

Untersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen auf die mikrobiologische Situation bei der Trinkwasserverteilung

Kurzfassung

Juli 2024

DVGW-Förderkennzeichen W 202016

1 Anlass und Zielsetzung

Der globale Klimawandel hat erhebliche Auswirkungen auf viele Bereiche der Umwelt. Häufigere und langanhaltende Hitzeperioden in den Sommermonaten sind eine besonders relevante Klimaveränderung. Diese führen zu einer Erwärmung der Umwelt von der auch die Bodenzonen betroffen sind, in denen die Trinkwasserleitungen verlegt sind. In zwei DVGW-Forschungsprojekten wurde untersucht wie das Trinkwasser in der Verteilung in Deutschland von einer Erwärmung betroffen ist und welche Effekte Wassertemperaturen auf die mikrobiologischen Prozesse im Trinkwasserverteilungssystem haben.

Das Projekt „Untersuchungen zu den Ursachen erhöhter Wassertemperaturen im Trinkwassernetz und Identifizierung von Gegenmaßnahmen“ (W 201904, Akronym: Erhöhte Wassertemperaturen) wurde im Jahr 2023 abgeschlossen. Hauptziele des Projektes waren die Identifizierung der Prozesse der Erwärmung des Trinkwassers im Verteilungssystem, die Erfassung der vorliegenden Wassertemperaturen bei der Verteilung und die Entwicklung von Werkzeugen zur Berechnung von Wasser- und Bodentemperaturen. In diesem Bericht werden die Ergebnisse des Projekts „Untersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen auf die mikrobiologische Situation bei der Trinkwasserverteilung“ (W 202016, Akronym: MibiTemp) zusammengefasst.

Im Rahmen des Projektes wurden neben der Auswertung der Daten von Routinebeprobungen zurückliegender Jahre, umfangreiche mikrobiologische Untersuchungen in Verteilungssystemen von 12 Wasserversorgungsunternehmen durchgeführt. Hierbei wurde die Mikrobiologie in der Wasserphase sowie auch im Biofilm betrachtet. Zudem wurden ergänzende Untersuchungen mit Modellnetzen sowie im Labor durchgeführt.

Die beiden Projekte wurden von 16 Wasserversorgungsunternehmen (WVU) aus verschiedenen Regionen in Deutschland und der Schweiz mit großem Engagement unterstützt. Von den Unternehmen wurden notwendige Daten zur Verfügung gestellt, Messtechnik installiert und mikrobiologische Untersuchungen realisiert. Im Ergebnis ergab sich ein fundiertes Verständnis zum Effekt der Wassertemperatur auf die mikrobiologischen Prozesse bei der Wasserverteilung. Der Umfang der in beiden Projekten generierten Daten besitzt im internationalen Maßstab ein Alleinstellungsmerkmal und ermöglicht der Branche eine wissenschaftlich basierte Diskussion im Hinblick auf die Effekte klimabedingter Veränderungen auf die Trinkwasserversorgung.

2 Material und Methoden

In enger Verzahnung mit dem Projekt „Erhöhte Wassertemperaturen“ wurde bei 12 Wasserversorgungsunternehmen in 13 Trinkwasserverteilungsbereichen Pilotzonen mit nachvollziehbaren hydraulischen Verhältnissen definiert. Grundsätzlicher Ansatz des Messprogrammes war es, entsprechend der Fließrichtung des Trinkwassers in der Verteilung Temperaturmessungen durchzuführen, so dass im Regelfall Messpunkte im Wasserwerk, am Eingang der untersuchten Pilotzone sowie an verschiedenen Punkten innerhalb der Pilotzone, als auch im peripheren Bereich, etabliert wurden. Parallel zu den Temperaturmessungen wurde ein umfangreiches mikrobiologisches Messprogramm in der Wasserphase und im Biofilm mit folgenden mikrobiologischen Parametern durchgeführt:

- Koloniezahlen nach TrinkwV inkubiert bei 22 und 36 °C
- Coliforme Bakterien und *E. coli*
- Enterokokken
- *Pseudomonas aeruginosa*
- *Legionella spp.*
- Aeromonaden
- Gesamtzellzahl, mittels Durchflusssytometrie
- Mikrobiomanalysen

Die Hauptuntersuchungen erfolgten in den Jahren 2021 und 2022, weitere Einzeluntersuchungen in ausgewählten Netzen im Jahr 2023. Als Probenahmepunkte für das Netzmessprogramm standen geeignete Armaturen zur Verfügung. Für die Biofilmuntersuchungen wurden 32 Biofilmmonitore durch das TZW gebaut und bei Wasserversorgern installiert. Die Monitore bestanden aus trinkwasserzugelassenen Materialien und beinhalteten zwei Fließstrecken, die im Inneren mit Rohrsegmenten aus PVC (trinkwasserzugelassen) oder EPDM (Nährstoffabgabe, nicht trinkwasserzugelassen) bestückt waren.

Neben den Messungen in Trinkwassernetzen erfolgten außerdem ergänzte Untersuchungen im Labor zur Vermehrung von Aeromonaden sowie Versuche mit Trinkwassermodellnetzen mit kontrollierteren Randbedingungen. Auf diese Ergebnisse wird im vorliegenden Kurzbericht nicht weiter eingegangen. Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht umfassend dargestellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Wassertemperaturen

Die Erwärmung des Trinkwassers wird schon bei der Auswertung vorhandener Temperaturdaten der Wasserversorger erkennbar. Neben saisonalen Temperaturschwankungen, die den Temperaturbereich von 20 °C und in den letzten Jahren auch 25 °C erreichten, zeigte sich ein genereller signifikant positiver Trend der Wassertemperatur mit einer Temperaturerhöhung von etwa 0,1 K pro Jahr (Abbildung 3-1). Dieser Wert korrespondiert mit Untersuchungen aus Österreich¹, bei denen eine Zunahme von 0,2 K/a errechnet wurde.

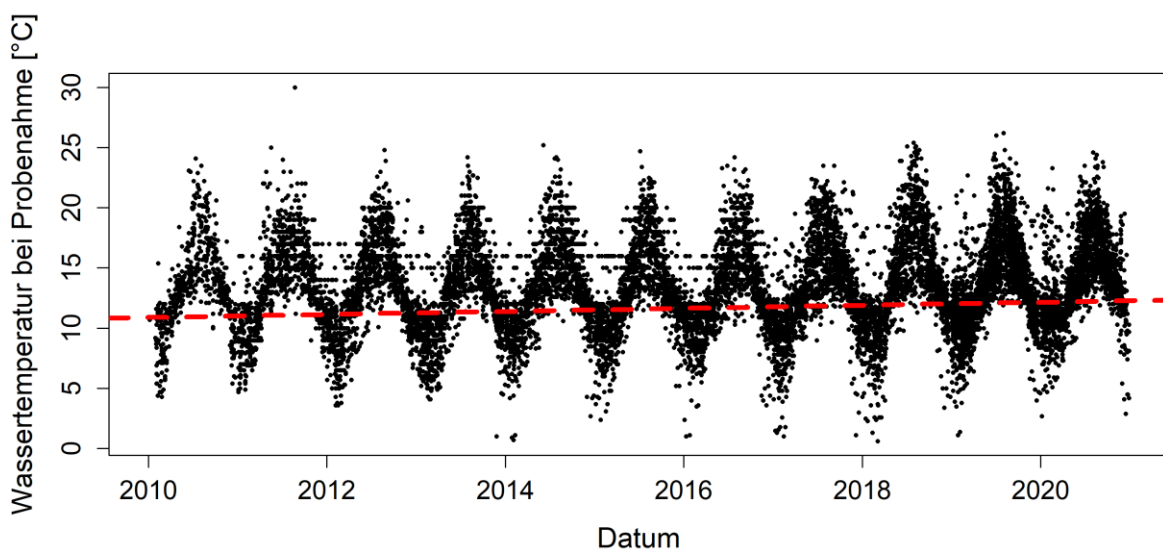


Abbildung 3-1: Verlauf der Wassertemperaturen seit 2010 aus den Routinemessprogrammen der Wasserversorger. Die Trendlinie (rot) zeigt den generellen Effekt über die Zeit und ergibt sich durch linearer Regression der Wassertemperaturen gegen das Datum ($p < 0.001$) unter Berücksichtigung der spezifischen Varianz der jeweiligen Zone ($p < 0.001$).

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erfassten Wassertemperaturen bestätigten diesen Trend. Im Sommer 2021, der mit einer Sommerdurchschnittstemperatur von 17,9 °C der kühlfte Sommer der letzten 5 Jahre war, wurden über den Sommer an ca. 25 % der untersuchten Messpunkte Tagesspitzentemperaturen über 20 °C gemessen. Wassertemperaturen über 25 °C blieben im Jahr 2021 die Ausnahme. Bereits im darauffolgenden Sommer 2022, mit einer Sommerdurchschnittstemperatur von 19,2 °C, stieg der Anteil von Messstellen mit Spitzentemperaturen über 20 °C auf ca. 50 %. Auch der Anteil an Messstellen mit über 25 °C nahm deutlich zu. Entsprechend sind Wassertemperaturen über 20 °C und über 25 °C bereits heute in Verteilungsnetzen Realität (Abbildung 3-2).

¹ C. Schönher, P. Proksch, D. Kerschbaumer, C. Fiedler, M. Zunabovic-Pichler, E. Mayr, R. Perfler, "Auswirkung von erhöhten Wassertemperaturen bei der Trinkwassergewinnung, -speicherung und -verteilung", Abschlussbericht, Universität für Bodenkultur Wien - Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, 2021.

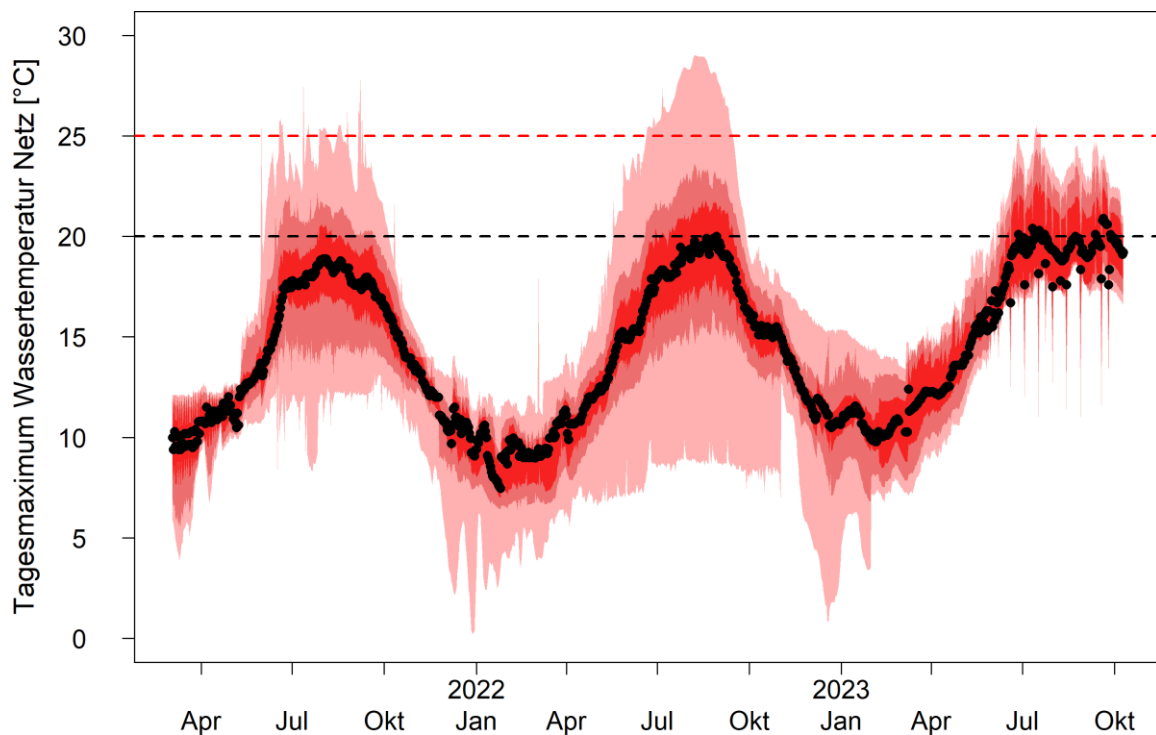


Abbildung 3-2: Verteilung der gemessenen maximalen täglichen Trinkwassertemperatur über alle Messpunkte und WVU. ● Minimum-Maximum, ● 10-90% Perzentil, ● 25-75% Perzentil, ● Median.

3.2 Mikrobiologische Untersuchungen in Trinkwassernetzen

Insgesamt zeigte das umfangreiche Messprogramm auch in den Zeiten erhöhter Wassertemperaturen stabile mikrobiologische Verhältnisse in der Trinkwasserverteilung. Nachfolgend sind die Ergebnisse ausgewählte Parameter kurz dargestellt.

Gesamtzellzahl

Zur Erfassung der Veränderung der gesamten Bakteriengemeinschaft über die Wasserverteilung wurde die Gesamtzellzahl mittels Durchflusszytometrie bestimmt. Gegenüber der mikroskopischen Gesamtzellzahlbestimmung können bei diesem Verfahren zusätzlich Zellfraktionen mit hoher Nukleinsäurekonzentration (high nucleic acid – HNA) und niedriger Nukleinsäurekonzentration (low nucleic acid – LNA) differenziert werden, was unter anderem Rückschlüsse auf die Stoffwechselaktivität der Zellen zulässt. Die Ergebnisse der Messungen zeigen ein für das jeweilige WVU spezifische GZZ-Niveau, mit entsprechender Schwankungsbreite. Eine deutliche Veränderung der Gesamtzellzahlen im Laufe der Verteilung zeigte sich nicht. Der Anteil an HNA-Zellen lag in der Regel bei unter 50 % und zeigte keine jahreszeitliche Variation. Die statistische Auswertung der Daten ist in Abbildung 3-3 dargestellt und zeigte weder für die GZZ noch für die HNA-Anteile einen signifikanten Zusammenhang mit der Wassertemperatur. Insgesamt war für den Parameter GZZ somit keine temperaturbedingte Bakterienvermehrung festzustellen.

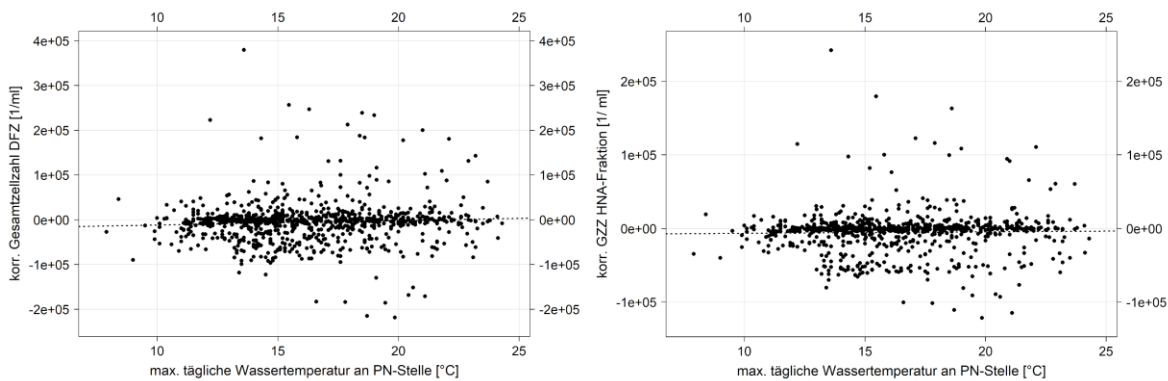


Abbildung 3-3: Gegen den spezifischen Mittelwert des jeweiligen WVU korrigierte GZZ (links) bzw. HNA-Fraktion (rechts) in Abhängigkeit der maximalen täglichen Wassertemperatur an der jeweiligen Probenahmestelle. Die Trendlinie zeigt das jeweilige Regressionsmodell. Der Effekt der Wassertemperatur ist mit einem p-Wert von $p=0,06$ (links) und $p=0,53$ (rechts) nicht signifikant.

Neben der Wasserphase wurde auch die Biofilmbildung in den Versorgungsbereichen mittels GZZ-Bestimmung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Biofilme auf EPDM bedingt durch die Nährstoffabgabe aus dem Material um zwei bis drei log-Stufen höhere Gesamtzellzahlen aufweisen als die Biofilme auf PVC. Die Schwankungsbreite der Gesamtzellzahlen betrug 1×10^4 bis 1×10^6 Zellen/cm² für PVC bzw. 1×10^7 bis 1×10^9 Zellen/cm² für EPDM. Ein deutlicher Effekt der Wassertemperatur zeigte sich für beide Materialien nicht. Für EPDM zeigte sich mit 60 bis 80 % ein höherer Anteil der HNA-Fraktion gegenüber PVC (40 bis 60 % HNA-Anteil). Korrelierend mit der GZZ des Biofilms war auch für die HNA-Fraktion kein Temperatureffekt erkennbar.

Koloniezahlen

Bei den über 800 durchgeführten Messungen in den Versorgungsbereichen waren in über 60 % keine Koloniezahlen nachweisbar. Der Anteil mit Werten < 100 KBE/ml betrug ca. 34 % (KBE 22 °C) bzw. 30 % (KBE 36 °C). Koloniezahlen von ≥ 100 KBE/ml traten nur in wenigen Einzelfällen auf. In der Mehrzahl der untersuchten Versorgungsbereiche war das Befundniveau während der Messungen auf niedrigem Niveau stabil. Nur in Einzelfällen traten mehrfach erhöhte Koloniezahlen über den gesamten Untersuchungszeitraum auf, wobei kein Temperatureffekt vorlag.

Die Biofilmuntersuchungen zeigen für die Koloniezahlen in den Biofilmmonitoren der WVU ein relativ stabiles Niveau mit gleicher Schwankungsbreite. Einen deutlichen Effekt hat die materialbedingte Nährstoffsituation. Auf PVC lag die Befundhöhe überwiegend in einem Bereich von < 0.01 KBE/cm² (kein Nachweis von Koloniezahlen) bis < 10.000 KBE/cm². Auf EPDM wurden Werte zwischen > 100 KBE/cm² und $< 1 \times 10^7$ KBE/cm² bestimmt. Ein relevanter Effekt der Wassertemperatur war nicht erkennbar (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

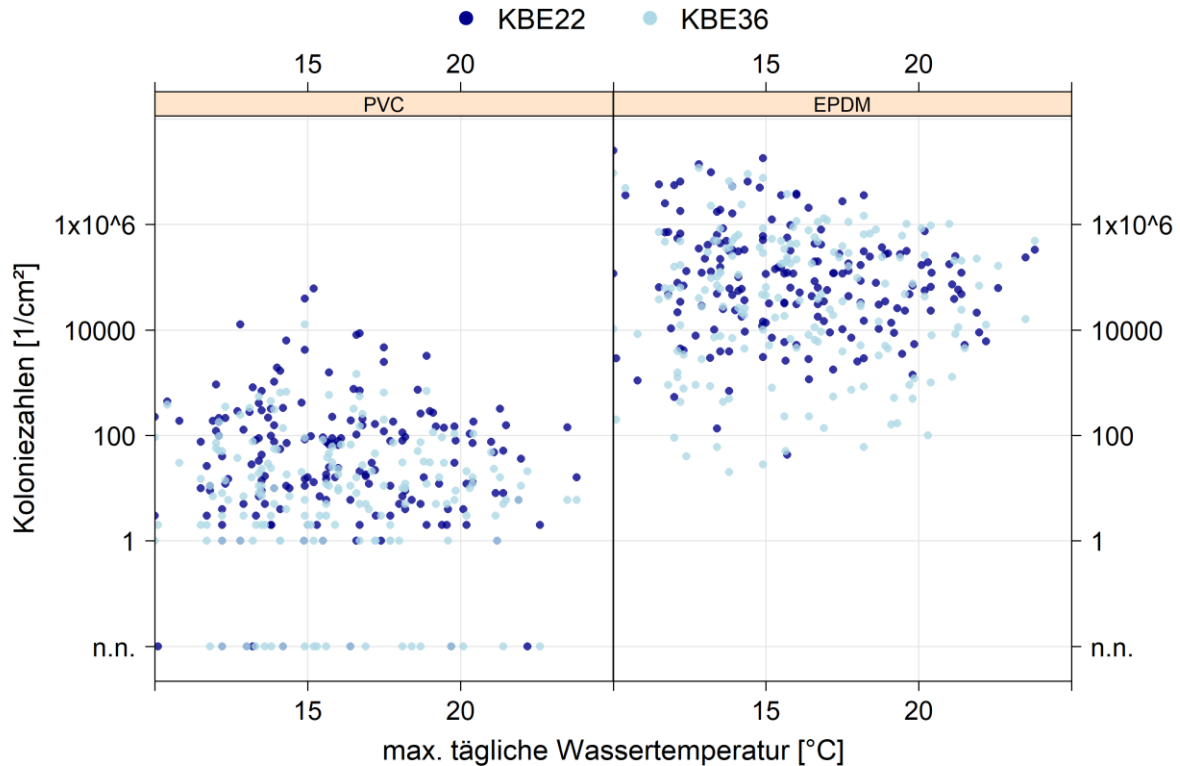


Abbildung 3-4: Koloniezahlen bei 22 und 36°C im Biofilm auf PVC und EPDM-Material in Abhängigkeit der maximalen täglichen Wassertemperatur der jeweiligen Probenahmestelle.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass auch bei erhöhter Wassertemperatur in der Trinkwasserverteilung die Koloniezahlen grundsätzlich in einem stabilen niedrigen Bereich liegen. Eine relevante Zunahme der Koloniezahlen mit steigender Wassertemperatur war weder für die Wasserphase noch für den Biofilm erkennbar.

Coliforme Bakterien und *E. coli*

Escherichia coli wurde in 879 untersuchten Proben nicht nachgewiesen. Für die coliformen Bakterien traten nur wenige Nachweise auf. Der Großteil der insgesamt 44 Nachweise beschränkte sich auf zwei Versorgungsbereichen. In einem dieser Bereiche war bereits vor dem Start des Projektes eine Belastung im Netz bekannt. Bei dem anderen WVU konzentrierten sich die Positivbefunde auf wenige Probenahmestellen, wobei an einer Stelle der Großteil der Nachweise vorlag.

Eine Vermehrung im Biofilm konnte weder für *E. coli* noch für coliforme Bakterien nachgewiesen werden.

Legionellen

Insgesamt wurden bei 850 Wasserproben in 14 Fällen Legionellen nachgewiesen. Die Hälfte der Befunde resultierte aus einer Probenahmestelle, die durch eine Trinkwasserinstallation beeinflusst und damit nicht repräsentativ für das Trinkwassernetz war. Bei den anderen Nachweisen handelte es sich um Einzelbefunde, wobei in sieben Fällen der technischen Maßnahmewertes von 100 KBE/100 ml überschritten wurde. Die Identifikation der Befunde ergab im Regelfall *Legionella non-pneumophila*. Einmalig wurde auch *Legionella pneumophila* SG 1

in einem Netz nachgewiesen. Die Ergebnisse bestätigen damit grundsätzlich, das Vorhandensein von Legionellen in der Trinkwasserverteilung, jedoch zeigte sich keine signifikante Vermehrung in Zeiten erhöhter Wassertemperatur. Insgesamt bestätigen die Erkenntnisse aus den Untersuchungen die im Rahmen des DVGW-Projektes „Legionellen Kaltwasser“ entwickelten Modellvorstellungen zu Vermehrung von Legionellen im Trinkwasser.

Weitere mikrobiologische Parameter

Auch bei den weiteren untersuchten Parametern waren keine Korrelationen der Befunde mit der Wassertemperatur erkennbar. Häufig lag nur eine sehr geringe Befundhäufigkeit im Monitoring vor, so dass keine statistische Auswertung möglich war. So wurden Enterokokken in 853 Proben im Monitoring nur einmal nachgewiesen. Auch die Auswertung von 794 *Pseudomonas aeruginosa* Untersuchungen ergab nur 5 positive Befunde. Eine Zunahme der Befundhäufigkeit bei höheren Wassertemperaturen wurde im Projekt nicht beobachtet.

Die im Projekt in Deutschland erstmalig systematisch untersuchten Aeromonaden traten bei allen teilnehmenden WVU in unterschiedlicher Befundhöhe auf. In Deutschland sind Aeromonaden im Trinkwasser bisher nicht reguliert, treten aber mitunter als Nebenbefunde bei der Bestimmung coliformer Bakterien mittels Membranfilter-Verfahren nach DIN EN ISO 9308-1 auf CCA-Nährmedium auf. Einige Spezies der Aeromonaden wie z.B. *Aeromonas hydrophila* besitzen außerdem Pathogenitätsfaktoren. Die Ergebnisse zeigen, dass Aeromonaden in unterschiedlichen Konzentrationen im Großteil der Trinkwassernetze vorkommen und in den meisten Fällen bereits im aufbereiteten Wasser der Wasserwerke vorhanden waren. Ein Effekt der Wassertemperatur auf die Befunde im Wasserkörper und Biofilm war aus den Daten nicht ableitbar.

Mikrobiomanalysen

Ähnlich wie bei der Bestimmung der Gesamtzellzahl erfolgt auch durch die Analyse der mikrobiologischen Gemeinschaft (Mikrobiomanalyse) eine Betrachtung der Gesamtheit der Bakterien in einer Wasser- bzw. Biofilmprobe. Im Rahmen des Projektes wurde eine gezielte 16S rRNA-Sequenzierung der mikrobiellen Gemeinschaft in Wasser- und Biofilmproben mittels Illumina Next Generation Sequencing (NGS) durchgeführt.

Zum Vergleich des Mikrobioms im Wasser über verschiedene Probenahmestellen und WVU hinweg, wurde die Beta-Diversität der Proben mittels Jaccard-Distanzen ermittelt. In Abbildung 3-7 sind die verschiedenen Proben entsprechend ihrer WVU-Zugehörigkeit dargestellt. Die Proben der einzelnen WVU bilden deutliche Cluster, was zeigt, dass die Artenverteilung innerhalb der Netze der WVU größtenteils sehr ähnlich ist. Im zeitlichen Verlauf zeigten sich bei den gleichen Probenahmestellen nur geringfügige Änderungen in der Zusammensetzung der Phyla und somit eine generelle Stabilität des Mikrobioms.

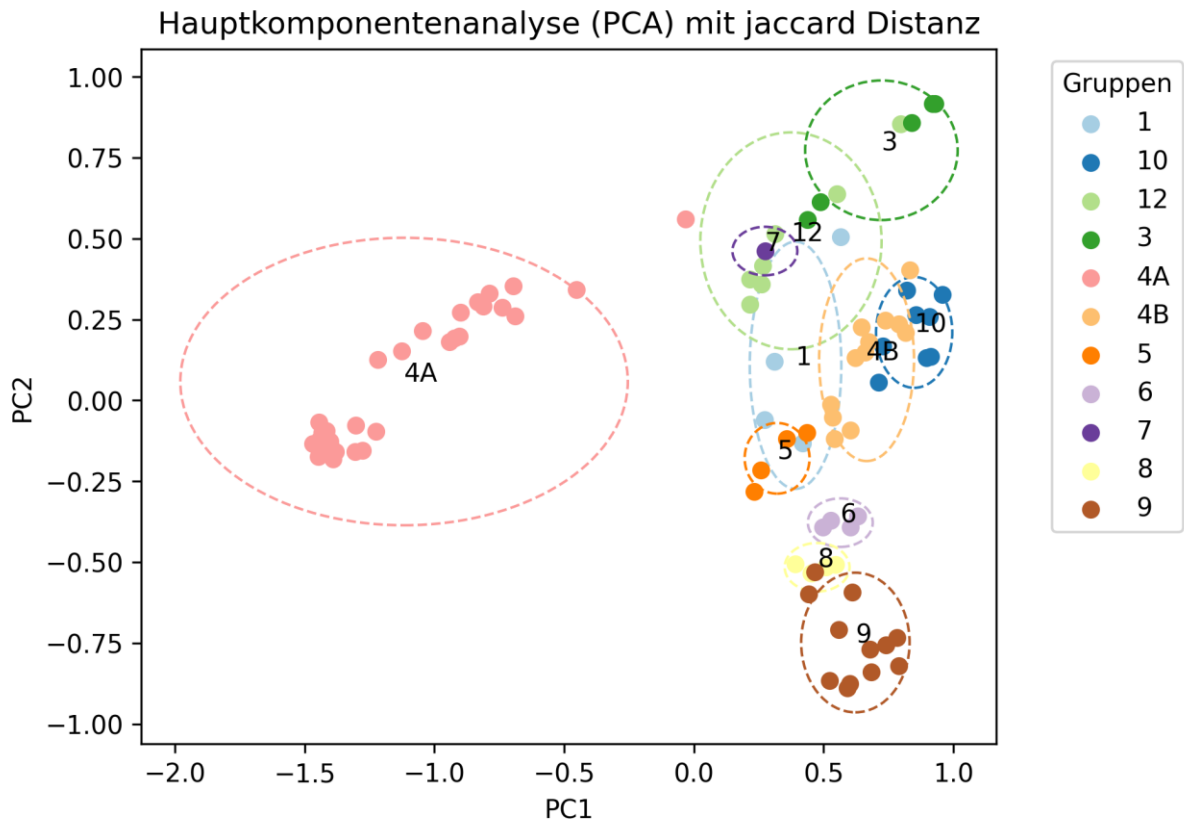


Abbildung 3-5: Ähnlichkeit des Mikrobioms der Untersuchten Wasserproben der WVU (Gruppen) dargestellt als Beta-Diversität (Jaccard-Distanz) nach Dimensionsreduzierung mittels Hauptkomponentenanalyse.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Fragestellung des Effektes erhöhter Wassertemperaturen auf die Mikrobiologie in der Trinkwasserverteilung wurde umfangreich untersucht. Die vorliegenden Daten umfassen langjährige Datenreihen von Routineuntersuchungen der Wasserversorgungsunternehmen, ein umfangreiches Messprogramm für die Wasserphase und den Biofilm bei 11 Wasserversorgungsunternehmen in verschiedenen Regionen in Deutschland sowie einem Wasserversorgungsunternehmen in der Schweiz, Laborversuche sowie Untersuchungen mit Trinkwassermodellnetzen. Es ist kein Projekt zur Fragestellung der Trinkwassertemperatur bekannt, das auf eine vergleichbar umfangreiche Datenbasis zurückgreifen kann, um entsprechende Schlussfolgerungen für die Trinkwasserversorgung abzuleiten.

In der vorliegenden Zusammenfassung wurden die wesentlichen Kernergebnisse dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Wassertemperaturen von über 20 °C in den Sommermonaten für viele Wasserversorger in Deutschland und für einen wesentlichen Anteil des Versorgungsnetzes bereits heute Realität ist. Bei bestimmten Randbedingungen, wie geringen Fließgeschwindigkeiten und hohen Oberflächentemperaturen treten in Abhängigkeit von der Dauer von Hitzeperioden auch Wassertemperaturen von über 25 °C auf. In Übereinstimmung mit Forschungsprojekten angrenzender Länder zeigen die Langzeitdatenauswertungen, dass mit einer Zunahme der Wassertemperatur von 0,1 bis 0,2 Kelvin pro Jahr zu rechnen ist. An Hotspots kann der Effekt jedoch auch deutlicher ausfallen. Die umfassend untersuchten Gesamtzellzahlen im Trinkwasser lagen auf einem für den Wasserversorger bzw. Netzbereich spezifischen Niveau von ca. 10^4 bis 10^6 Zellen pro ml. Eine Temperaturbeeinflussung konnte weder für die Wasserphase noch für die Biofilme abgeleitet werden. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Mikrobiomanalysen, die ebenfalls keine relevante Beeinflussung durch die Wassertemperatur aufgezeigt haben. Der für die Überwachung wichtige Parameter Koloniezahl war gegenüber einer Erhöhung der Wassertemperatur robust. Die Werte für die Wasserphase lagen im gesamten Untersuchungszeitraum auf einem für den Trinkwasserverteilungsbereich spezifischen Niveau. Bedingt durch die Aufzehrung von Nährstoffen durch Biofilme während des Transportes, trat auch im vermaschten Netzbereich bei erhöhten Temperaturen keine Aufkeimung des Trinkwassers auf. Die Biofilme selbst waren durch das vorliegende Nährstoffniveau nicht jedoch durch die Temperatur beeinflusst.

Unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen führten erhöhte Wassertemperaturen im Verteilungssystem zu keinen vermehrten Befunden für coliforme Bakterien, Enterokokken, *Pseudomonas aeruginosa* oder Legionellen. Im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen ergaben sich zwar einzelne Befunde, die jedoch mit den spezifischen Bedingungen im Bereich der Beprobungsstelle und nicht mit der Wassertemperatur in Verbindung standen. Eine temperaturbeeinflusste Besiedlung des Biofilms mit coliformen Bakterien, Enterokokken, *Pseudomonas aeruginosa* und Legionellen zeigte sich nicht. Aeromonaden wurden in allen untersuchten Trinkwassernetzen nachgewiesen. Wie bei den Gesamtzellzahlen handelt es sich um die ersten in dieser Form umfassenden Untersuchungen dieses Parameters in Deutschland. Ein Temperatureffekt war nicht erkennbar.

Die Erkenntnisse der Netzuntersuchungen korrelieren mit den Ergebnissen der Datenauswertung und den Untersuchungen in den Modellnetzen.

Im Ergebnis der Schlussfolgerungen ergibt sich folgender Ausblick:

- Die Vermehrungsansprüche von coliformen Bakterien, Enterokokken, *Pseudomonas aeruginosa* und Legionellen, sowie von Bakterien die über den Parameter Koloniezahlen bei 22 °C und 36 °C erfasst werden, wurden bereits in verschiedenen DVGW-Projekten untersucht. Im Ergebnis wurden Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet, die nicht nur im DVGW-Regelwerk, sondern auch in anderen Regelwerken berücksichtigt wurden. Als Ergebnis des Projektes kann festgehalten werden, dass diese Aussagen auch bei höheren Wassertemperaturen ihre Gültigkeit behalten.
- Die Resilienz der Trinkwasserverteilung gegenüber erhöhten Wassertemperaturen unter dem Gesichtspunkt der mikrobiologischen Stabilität im Trinkwassernetz beruht auf den niedrigen Nährstoffgehalten des verteilten Trinkwassers und dem Vorhandensein eines Biofilms, der dem Wasser über die Fließdauer Nährstoffe entzieht. Aus diesem Grund ist auch in Zukunft darauf zu achten ein Trinkwasser mit möglichst niedrigen Nährstoffgehalten zu verteilen. Zu beachten ist hierbei, dass z. B. Klimaeffekte die Situation in für die Trinkwasserversorgung relevante Oberflächengewässer beeinflussen können.
- Nach derzeitiger Einschätzung beeinflusst die Wassertemperatur die Vermehrung von Invertebraten im Trinkwassernetz. Zudem deuten Auffälligkeiten bei Wasserversorgen auf eine Vergesellschaftung von Invertebraten mit coliformen Bakterien hin. Die genauen Zusammenhänge sind derzeit unbekannt und werden vom TZW in einem kürzlich gestarteten DVGW-Projekt untersucht.
- Ein mikrobiologischer Parameter, der zukünftig an Relevanz gewinnen wird, sind die Legionellen. In keinem Fall wurden systematisch Legionellen in den Trinkwassernetzen nachgewiesen, obwohl die Wassertemperaturen punktuell einen Bereich von 25°C überschritten. Es ist davon auszugehen, dass es bislang nicht zu einer relevanten Vermehrung von Legionellen in den Verteilungsnetzen kommt. Allerdings ist nicht ausgeschlossen, dass eine weitere Erwärmung des Bodens und damit des Wassers eine Vermehrung von Legionellen nach sich ziehen könnte. Hierbei sind relevante Faktoren die zunehmende klimabedingte Erwärmung sowie der Ausbau wärmeemittierender Infrastruktur wie z. B. Wärmenetze und Starkstromkabel.