

# Publizierbarer Endbericht

gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

## A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
<b>Kurztitel:</b>	PURIFY
<b>Langtitel:</b>	Effects of desiccation on the self-purification capacity of headwater streams: Consequences for the stream management
<b>Zitiervorschlag:</b>	Weigelhofer, G., Wildt, D. & M. Tritthart (2021) Effects of desiccation on the self-purification capacity of headwater streams: Consequences for the stream management. Final report of the ACRP10 project PURIFY (2018-2021). Lunz, Vienna.
<b>Programm inkl. Jahr:</b>	ACRP10, 2017
<b>Dauer:</b>	3,5 Jahre
<b>KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:</b>	Ass.Prof. Priv.-Doz. Dr. Gabriele Weigelhofer
<b>Kontaktperson Name:</b>	Ass.Prof. Priv.-Doz. Dr. Gabriele Weigelhofer
<b>Kontaktperson Adresse:</b>	WasserCluster Lunz – Biologische Station GmbH Dr. Carl Kupelwieser Promenade 5, A-3293 Lunz am See
<b>Kontaktperson Telefon</b>	07486 20060 40
<b>Kontaktperson E-Mail:</b>	gabriele.weigelhofer@wcl.ac.at
<b>Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):</b>	Universität für Bodenkultur, IWHW, Ass.Prof. Priv.-Doz. DI Dr. Michael Tritthart, Wien University of Barcelona, Lect.Prof. Dr. Daniel von Schiller, Spanien TU Brandenburg, Apl. Prof. Dr Michael Mutz, Deutschland
<b>Schlagwörter:</b>	Intermittent flow, biofilms, biogeochemical processes, hydro-dynamic modelling, water quality
<b>Projektgesamtkosten:</b>	249.532,- €
<b>Fördersumme:</b>	249.532,- €
<b>Klimafonds-Nr:</b>	B769828
<b>Erstellt am:</b>	14.12.2021

## B) Projektübersicht

### 1 Kurzfassung

Während der letzten 30 Jahre nahm die Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden in Europa stark zu. Als Folge davon sind österreichische Fließgewässer zunehmend von Trockenphasen betroffen, während derer es über mehr oder weniger ausgedehnte Strecken zu einer Unterbrechung des Oberflächenabflusses kommt (intermittierende Gewässer). Die Austrocknung kann mikrobielle Gemeinschaften schädigen, die Ressourcenverteilung in den Sedimenten verändern und dadurch die natürliche Selbstreinigungskraft und die Wasserqualität von Fließgewässern beeinträchtigen. Trotz zahlreicher Studien ist das Wissen über die Auswirkung von Trockenheit auf Gewässerfunktionen insbesondere in gemäßigten Klimazonen marginal. Zudem fehlen Strategien für ein nachhaltiges Management von intermittierenden Fließgewässern. Das Projekt PURIFY zielte darauf ab, die Forschung über intermittierende Fließgewässer in Österreich voranzutreiben und österreichischen Behörden Daten und Werkzeuge für ein nachhaltiges Management derselben bereitzustellen. Im Detail verfolgten wir folgende Ziele:

- Die Untersuchung der kurz- bis langzeitigen Folgen von Trockenperioden auf die Gewässerstrukturen und -funktionen, die für die Wasserqualität von intermittierenden Fließgewässern in Österreich entscheidend sind
- Eine Analyse der möglichen Auswirkungen von Austrocknung und Wiedervernässung auf die Selbstreinigungskapazität der Sedimente
- Die Identifikation von Faktoren, die die Resilienz bzw. Vulnerabilität der Gewässer gegenüber Trockenheit bestimmen
- Eine Modellierung der möglichen Folgen von Trockenperioden für die biogeochemische Prozesse in intermittierenden Gewässern
- Die Entwicklung eines Ratgebers für das Gewässermanagement, der Risikofaktoren für eine mögliche Verschlechterung der Wasserqualität aufzeigt und Vorschläge für ein Monitoring derselben anbietet

Die Untersuchungen teilten sich auf drei Arbeitspakete (AP) auf. In AP2 wurden die kurz- bis langzeitigen Folgen von Trockenperioden auf die Wasserqualität und die biogeochemischen Prozesse in intermittierenden Bächen mittels Freilandbeprobungen untersucht. In den Jahren 2018-20 wurden jeweils 10-12 intermittierende und perennierende Bäche mit unterschiedlicher stofflicher Belastung in Südost-Kärnten, Südburgenland, Südsteiermark und Niederösterreich beprobt. Wasser- und Sedimentproben wurden vor und während der Trockenperiode entnommen und hinsichtlich Nährstoffkonzentrationen, mikrobieller Biomasse und Aktivitäten (u.a. Respiration, Nährstoffaufnahme) analysiert. Die trockenen Sedimente aus intermittierenden Bächen zeigten ähnliche Bakteriendichten, Chlorophyll-a Konzentrationen und enzymatische Aktivitäten wie die nassen Sedimente aus perennierenden Bächen, während die Respiration, die Ammoniumaufnahme und die Fotosyntheseeffizienz signifikant

reduziert waren. Die hohe Resistenz der mikrobiellen Gemeinschaften gegenüber der Austrocknung wurde auf die relativ hohe Restfeuchte von meist >5% zurückgeführt, die selbst nach einer 3-monatigen Trockenphase in den Sedimenten zu messen war. Mikrobielle Gemeinschaften können in diesem dünnen Wasserfilm überleben und ihre Biomasse aufrechterhalten. Im Gegensatz dazu ändern sich der Transport und die Verfügbarkeit von Sauerstoff, Nährstoffen und organischem Material in trockenen Sedimenten, wodurch sich auch biogeochemische Prozesse verändern. In einigen perennierenden Bächen waren im Sommer bei reduzierter Wasserführung zudem hohe Nährstoffbelastungen zu messen, die möglicherweise auf eine Rücklösung aus dem Sediment bei erhöhten Wassertemperaturen und fehlenden Verdünnungseffekten zurückgeführt werden können.

Im AP3 untersuchten wir mittels kontrollierter Laborversuche die Auswirkung von Austrocknung und Wiedervernässung auf die Aufnahmekapazität von Sedimenten für Nährstoffe und gelösten Kohlenstoff in intermittierenden und perennierenden Bächen. Die Aufnahme durch Aufwuchsalgen an der Sedimentoberfläche wurde in Fließrinnen simuliert, jene von Bakterien im Sedimentkörper (Hyporheal) in Sediment-Rohren. Nach einer Adaptationsphase im Labor wurden beide Systeme drainiert und nach einigen Wochen kontrolliert wiedervernässt. Vor und nach der Trockenphase wurden Aufnahmeexperimente mit Nährstoffen und organischem Material durchgeführt und die mikrobielle Aktivität erfasst. Aufwuchsalgen sowohl von intermittierenden als auch von perennierenden Bächen zeigten signifikant reduzierte Fotosyntheseaktivitäten und Nährstoffaufnahmen nach der Trockenphase, die sich auch innerhalb der Nachuntersuchungsphase von zwei Wochen nicht erholten. Die hyporheischen Sedimente zeigten unmittelbar nach Wiedervernässung einen kurzen, aber hohen Puls an freigesetzten Nährstoffen und gelöstem organischen Kohlenstoff. Die Nährstoffaufnahme war für einige Tage reduziert, erholte sich aber rasch. Intermittierende und perennierende Bäche unterschieden sich nicht. Die Experimente bestätigten die Freilanduntersuchungen, indem sie eine generell hohe Resistenz und Resilienz von bakteriellen Biofilmen gegenüber Austrocknung und Wiedervernässung zeigten.

In AP4 wurde ein 2-dimensionales hydrodynamisches Modell (RSim-2D) für drei Gewässerstrecken entwickelt, um die Veränderungen von biogeochemischen Funktionen bei unterschiedlichen Wasserständen abzubilden. Die Simulationen wurden für 3-4 Abflüsse mit und ohne Beschattung durchgeführt und mit den Respiationsdaten verschnitten. Die Modelle zeigten eine reduzierte CO<sub>2</sub> Produktion mit abnehmendem Durchfluss, wobei der Effekt durch eine fehlende Beschattung noch verstärkt wird.

Das Projekt zeigt, dass Biofilme, die für die Selbstreinigung von Gewässern verantwortlich sind, derzeit in Österreich aufgrund einer hohen Restfeuchte in den Sedimenten nur wenig durch intermittierende Bedingungen beeinträchtigt sind. Extremes Niedrigwasser in Verbindung mit hohen Temperaturen kann jedoch zu massiven Nährstofffreisetzungen aus dem Sediment und einer internen Eutrophierung führen. Zukünftige Projekte sollten sich auf die Wirkungen von Niedrigwasser, Erwärmung und Standortfaktoren auf das Freisetzungspotential von Gewässersedimenten für Nährstoffe konzentrieren.

## 2 Executive Summary

Over the past thirty years, the frequency and duration of droughts has increased dramatically across Europe, exposing Austrian streams to increasing pressure from periodic desiccation during which surface water flow is disrupted (intermittency). Desiccation may harm the microbial biofilm community and alter the resource supply in the sediments, thus impairing the self-purification capacity and reducing the water quality of the affected streams. Despite a current boom in intermittent rivers' research in Mediterranean and arid regions, knowledge about the effects of intermittency on stream functions is still marginal especially in temperate regions and strategies for the assessment and sustainable management of intermittent streams are lacking. The project PURIFY aimed to advance intermittent stream research in Austria and support environmental authorities in the protection and management of intermittent streams by setting the following objectives:

- Analysing the medium- to long-term effects of intermittent flow on stream ecosystems' structures and functions determining the water quality of intermittent streams in Austria
- Quantifying potential effects of desiccation on the self-purification capacity of stream sediments and identifying factors responsible for the resistance and resilience to desiccation
- Modelling potential consequences of drought for the water quality and related ecosystem functions in selected streams in Austria
- Developing a guideline for water management authorities to assess the risks of a possible deterioration of water quality due to droughts

The data collection was divided between three work packages (WP). In WP2, we investigated the medium- to short-term effects of intermittent flow on the water quality and the biogeochemical processes in intermittent stream reaches via field sampling. We selected 10-12 low to moderately polluted intermittent and perennial stream reaches, respectively, in Carinthia, Burgenland, Styria, and Lower Austria. Water and sediments from the benthic and the hyporheic zone were sampled before and during the dry phase and analysed for nutrient and organic matter concentrations, microbial biomass, and the activity of the biofilms (e.g. respiration, mineralisation, nutrient uptake). Dry sediments from intermittent reaches showed similar bacterial abundances, chlorophyll-a concentrations, and enzymatic activities as wet sediments from perennial reaches, while respiration rates, ammonium uptake rates, and photosynthetic efficiencies were lower in dry sediments. Thus, biofilm processes were more affected than biofilm structures. We attribute the high resistance of structures to the fact that the temperate climate and shading helped to maintain a relatively high water content > 5% even after several months of desiccation in which the biofilm communities were able to survive. In contrast, unsaturated conditions in the sediments changed the supply with oxygen, nutrients, and organic matter, thus affecting biogeochemical processes. Interestingly, we observed high nutrient concentrations in the remaining stream water of perennial reaches during drought, probably due to

nutrient release from sediments under increased water temperature and lack of dilution.

In WP3, we looked more closely into the effects of drying and rewetting on the nutrient and organic matter uptake capacity of the sediment surface and the hyporheic zone of intermittent and perennial study reaches via laboratory experiments with flumes (for benthic epilithic biofilms) and sediment perfusion cores (for hyporheic biofilms). After an adaptation phase, both systems were dried out and rewetted under controlled conditions. Before and after the dry period, we performed nutrient and organic matter uptake experiments and measured microbial activities and abundances. The algal biofilms of both intermittent and perennial reaches showed significantly reduced photosynthetic activities and nutrient uptake capacities which did not recover within the two weeks recovery phase. The hyporheic sediments showed a short, but significant release of nutrients and organic carbon immediately upon rewetting. Nutrient uptake was reduced for some days after rewetting, but usually recovered within one week. Intermittent and perennial reaches did also not differ significantly in their response to drying. Thus, the experiments confirmed the field data by demonstrating high resistance and resilience of stream sediments to drying and rewetting.

In WP4, two-dimensional hydrodynamic models (RSim-2D) of three representative study reaches were developed to analyse changes in biogeochemical functions at different discharges. Simulations were carried out for three to four different discharges and the hydrodynamic models were blended with CO<sub>2</sub> production data of WP2. The models showed reduced CO<sub>2</sub> production for lower discharges, whereby the effect increased when assuming a reduction of the shading provided by the vegetation cover of the streambed.

The project shows that stream biofilms responsible for water purification are hardly harmed by even prolonged intermittent flow conditions in Austrian streams due to the relatively high remaining moisture content in the sediments. However, low flow conditions during summer may impair the water quality due to nutrient release from the sediments. Further research should focus on the interactive effects of low flow and increased water temperatures on the nutrient release potential of the sediments and its significance for the water quality under different environmental conditions.

### 3 Hintergrund und Zielsetzung

Ausgedehnte Trockenperioden im Zuge des globalen Klimawandels breiten sich zunehmend in Europa aus und sind wahrscheinlich eine der größten Herausforderung für unsere Umwelt im 21. Jahrhundert (Lake 2003; Ledger et al. 2012; IPCC 2014). Die Wasserknappheit bedroht den ökologischen Zustand und die Funktionsfähigkeit unserer Bäche und Flüsse (Vörösmarty et al. 2000), da immer mehr ursprünglich permanent wasserführende Fließgewässer über mehr oder weniger große Abschnitte zeitweise austrocknen (intermittierende Gewässer) (Datry et al. 2014; Sabater et al. 2016). Wasserentnahmen für Bewässerung, ausgedehnte Drainagierung landwirtschaftlicher Flächen und der Verlust an

natürlichen Wasserrückhaltezone im Einzugsgebiet verschlechtern die Situation weiter (Kaletová et al. 2019).

Eine der wichtigsten Ökosystemdienstleistungen von Gewässeroberläufen ist deren Fähigkeit, Nährstoffe und organisches Material aus dem Umland aufzunehmen, zu transformieren und zu speichern und so die Basis für eine gute Wasserqualität in den Unterliegern zu schaffen (Peterson et al. 2001). Diese natürliche Selbstreinigungskapazität kann durch Austrocknung jedoch reduziert werden, indem die für die Stoffaufnahme zuständigen Mikroben geschädigt und die biogeochemischen Prozesse verändert werden (Marxsen et al. 2010; Febria et al. 2012; Timoner et al. 2012, 2014; Sabater et al. 2016; Von Schiller et al. 2017). Trotz der relativ großen Anzahl an Studien über intermittierende Gewässer in trockenen Regionen im letzten Jahrzehnt (Datry et al. 2011; von Schiller et al. 2011; Bernal et al. 2013; Romaní et al. 2013) ist bis dato wenig über den Einfluss von Trockenheit auf die biogeochemischen und mikrobiologischen Prozesse in Gewässersedimenten und den Konsequenzen für die Wasserqualität, insbesondere in gemäßigten Klimazonen, bekannt (Marxsen et al. 2010; Ledger et al. 2012). Angesichts der erhöhten Wahrscheinlichkeit von Trockenperioden in der Zukunft ist es jedoch für das Gewässermanagement unbedingt notwendig, die Auswirkungen von Austrocknung auf die Strukturen und Prozesse zu kennen, die für die Selbstreinigung und damit für die Wasserqualität verantwortlich sind. Zudem benötigen Manager eine Methode um das Risiko einer Wasserqualitätsverschlechterung aufgrund zunehmender Trockenperioden abschätzen zu können und besonders vulnerable Bereiche identifizieren zu können.

Die Ziele des Projekts PURIFY waren daher, die Forschung über intermittierende Gewässer in Österreich voranzutreiben und österreichischen Behörden Daten und Werkzeuge für ein nachhaltiges Management von intermittierenden Gewässern bereitzustellen. Im Detail verfolgten wir folgende Ziele:

- Die Untersuchung der kurz- bis langzeitigen Folgen von Trockenperioden auf die Gewässerstrukturen und -funktionen, die für die Wasserqualität von intermittierenden Fließgewässern in Österreich entscheidend sind
- Eine Analyse der möglichen Auswirkungen von Austrocknung und Wiedervernässung auf die Selbstreinigungskapazität der Sedimente
- Die Identifikation von Faktoren, die die Resilienz bzw. Vulnerabilität der Gewässer gegenüber Trockenheit bestimmen
- Eine Modellierung der möglichen Folgen von Trockenperioden für die biogeochemische Prozesse in intermittierenden Gewässern
- Die Entwicklung eines Ratgebers für das Gewässermanagement, der Risikofaktoren für eine mögliche Verschlechterung der Wasserqualität aufzeigt und Vorschläge für ein Monitoring derselben anbietet

## 4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

### **AP2: Freilanduntersuchungen von intermittierenden und perennierenden Bächen in den Jahren 2018-2020**

Im **Jahr 2018** wurden sechs perennierende und fünf intermittierende Gewässeroberläufe im Burgenland und in der Steiermark untersucht, die sich bezüglich Gewässergestalt, Wasserqualität und Beschattung ähnlich waren. Alle Gewässer wiesen eine leichte bis mittlere stoffliche Belastung, ein eher feines Sediment (Lehm bis Feinschotter) und einen meist durchgehenden Ufergehölzsaum mit starker Beschattung auf (Abb. 1). Die Daten zeigten selbst nach über 2 Monaten Trockendauer (unterbrochener Oberflächenabfluss) einen unerwartet hohen gravimetrischen Feuchtegehalt von meist 10 % und mehr in den ungesättigten Sedimenten der intermittierenden Gewässer (Feldbacher et al., submitted). Als Folge desselben unterschieden sich intermittierende Gewässer im Frühjahr vor der Austrocknung nicht von perennierenden (keine Langzeitfolgen) und waren auch während der Trockenphase im Sommer nur wenig beeinträchtigt.



Abb. 1: Intermittierende Strecke im Glaunigbach im Sommer (Steiermark)

**Biofilmstrukturen (Biomasse, Zusammensetzung der Gemeinschaft):** Benthische Biofilme (Aufwuchsalgen und Bakterienüberzüge auf Feinsedimenten) zeigten ähnliche Biomassen, lediglich die Pigmentzusammensetzung der Algen unterschied sich signifikant zwischen perennierenden und intermittierenden Gewässern. Während das Carotenoid Fucoxanthin in perennierenden Bächen signifikant höhere Anteile sowohl im Frühjahr als auch im Sommer aufwies, waren die Anteile des Carotenoids Lutein signifikant niedriger. Der relative Anteil aller Carotinoide war generell in perennierenden Bereichen höher als in intermittierenden, ganz im Gegensatz zu anderen Studien aus mediterranen Gewässern. Veränderungen in der Pigmentzusammensetzung sind meist eine

Folge von Stress, wie z.B. eine erhöhte Einstrahlung und erhöhte Temperaturen in ausgetrockneten Gewässerabschnitten aufgrund der fehlenden Pufferwirkung des Wassers. Wir nehmen an, dass in unserer Studie die Effekte der Trockenphase auf die Aufwuchsalgen durch die starke Beschattung der Bäche gemildert wurden, die das Algenwachstum generell in allen Bächen limitierte.

### Biofilmprozesse:

Unter den analysierten Prozessen zeigte die bakterielle Respiration in den Feinsedimenten die höchste Beeinflussung durch die Austrocknung mit Raten, die im Vergleich zu perennierenden Gewässern im Sommer um 50% reduziert waren (Feldbacher et al. submitted). Auch die Fotosyntheseeffizienz der Aufwuchsalgen war in den intermittierenden Bereichen im Sommer deutlich reduziert (Abb. 2). Eine ähnliche, wenn auch deutlich geringere Reduktion der Fotosyntheseeffizienz war allerdings auch bei den perennierenden Gewässern zu beobachten, was ebenfalls darauf hindeutet, dass die Beschattung die Auswirkungen der Austrocknung teilweise überlagerte. Die ungesättigten Feinsedimente in den intermittierenden Bereichen zeigten zudem eine verstärkte Ammoniumfreisetzung unmittelbar nach Wiedervernässung und eine signifikant geringere Ammoniumaufnahme im Vergleich zu gesättigten Sedimenten (Abb. 3).

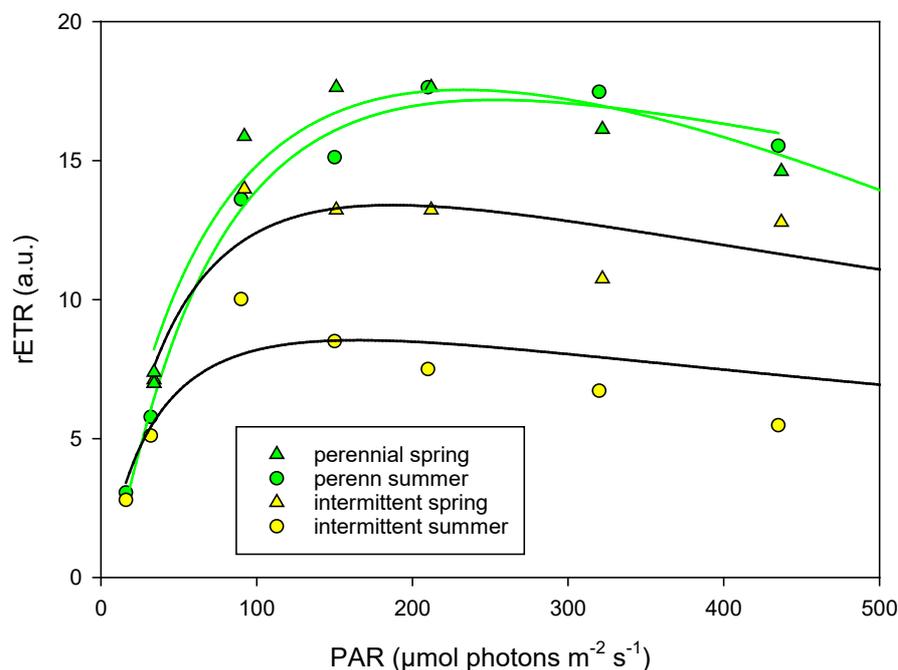


Abb. 2: Fotosynthesekurven (rETR, relative Elektronentransportrate) von Aufwuchsalgen in trockenen (intermittent; schwarze Linie, gelbe Symbole) und wasserführenden (perennial; grüne Linie und Symbole) Gewässerabschnitten im Frühjahr und Sommer 2018.

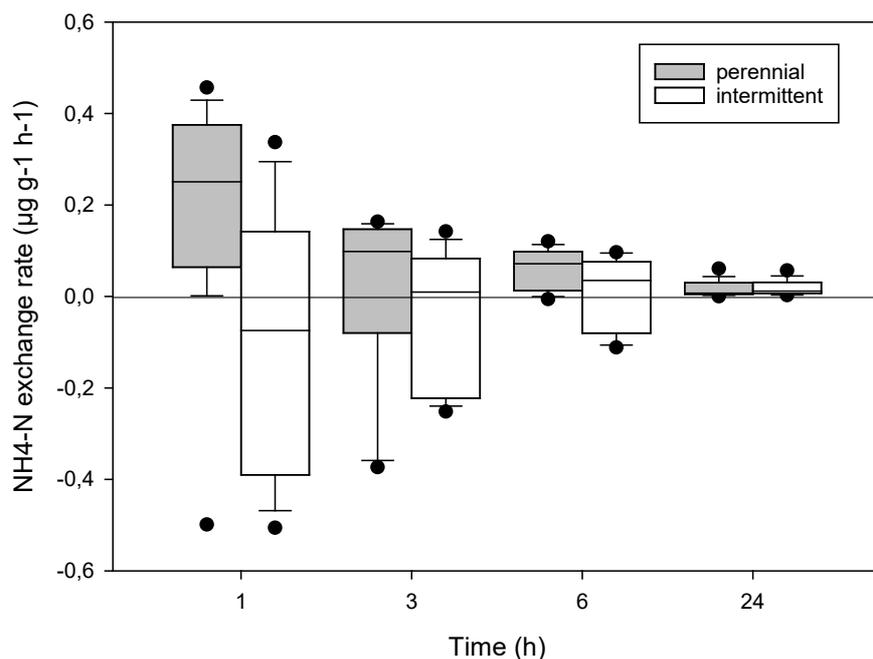


Abb. 3: Ammoniumaufnahme von bakteriellen Biofilmen in Feinsedimenten in trockenen (intermittent) und wasserführenden (perennial) Gewässerabschnitten im Sommer 2018

Im **Jahr 2019** wurde ein Set aus 10 intermittierenden und 10 perennierenden Gewässerstrecken untersucht, wobei die Hälfte der Stellen in jenen Gewässern lagen, die schon 2018 beprobt wurde. Die andere Hälfte der Untersuchungsgewässer wies eine geringe stoffliche Belastung sowie ein eher grobkorniges Sediment (Sand bis Grobschotter) auf und war nur zum Teil beschattet (Abb 4).



Abb. 4: Sucha in Kärnten im Sommer 2019

Feinsedimente wurden im Frühjahr vor der Austrocknung gesammelt und im Labor bis September sanft luftgetrocknet. Zudem wurden im September trockene und überflutete Sedimente zum Vergleich gesammelt (Abb. 5).

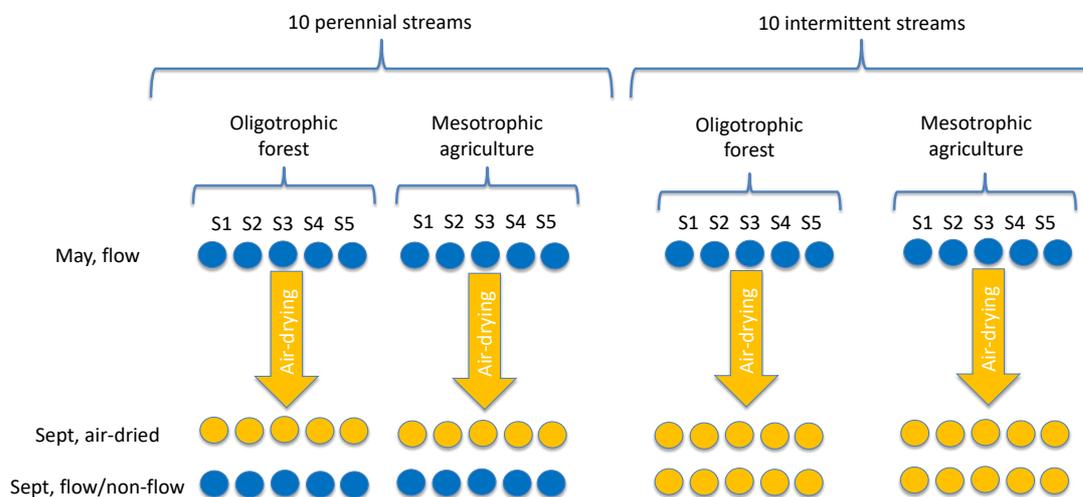


Abb 5: Versuchsschema für die Freilandproben 2019.

Ähnlich wie 2018 zeigten die trockengefallenen Sedimente der intermittierenden Bereiche im Herbst geringere Respirationsraten als die überfluteten Sedimente der perennierenden Bereiche. Die Lufttrocknung im Labor führte zu etwas niedrigeren Feuchtegehalten (3-8%) als im Freiland und noch geringeren Respirationsraten, wobei sich die beiden Gewässertypen nicht unterschieden. Die Respiration war folglich lediglich von der Restfeuchte im Sediment abhängig (Abb. 6). Wie 2018 hatten weder die Labortrocknung noch die natürliche Trocknung im Freiland signifikante Auswirkungen auf Biofilmstrukturen (Bakterielle Abundanzen, Enzyme).

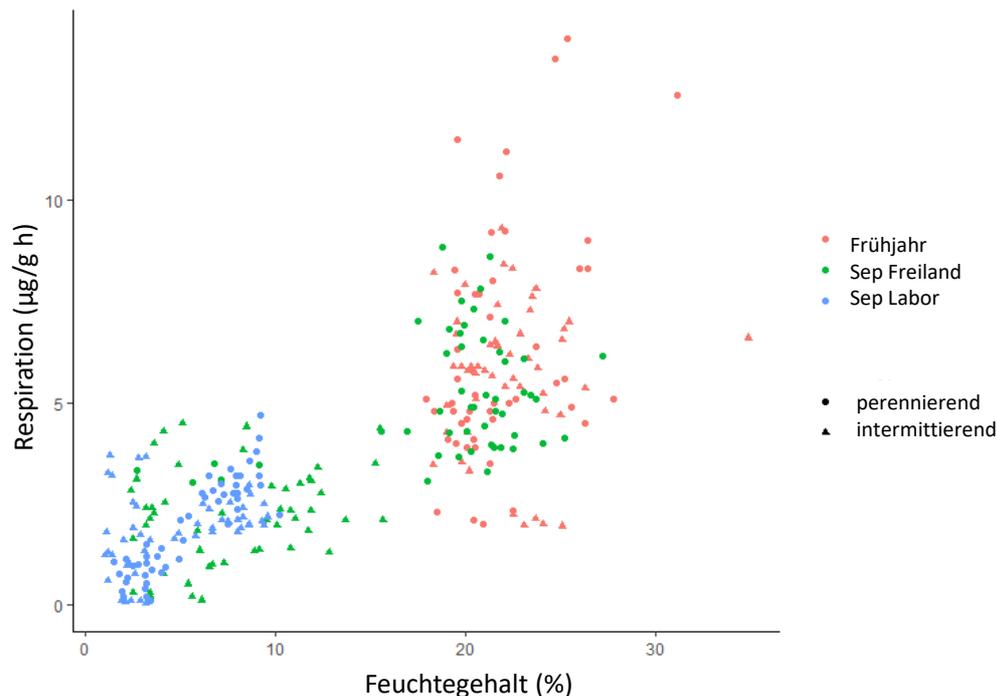


Abb 6: Respirationsraten ( $\mu\text{g CO}_2/\text{g h}$ ) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Über einem Feuchtegehalt von ca. 18% sind die Sedimente gesättigt.

Die Wasserproben von perennierenden Bächen im Sommer 2018 und 2019 zeigten vor allem bei niedrigem Durchfluss teilweise sehr hohe Nährstoffkonzentrationen. Möglicherweise sind diese auf eine Nährstoffrücklösung aus den Sedimenten bei erhöhten Temperaturen und die fehlende Verdünnung zurückzuführen (Weigelhofer & Tritthart, 2019).

### AP 3: Laborexperimente über die Wirkung von Austrocknung und Wiedervernässung 2019

**Feinsedimente:** Feinsedimente aus den o.a. 20 Untersuchungsgewässern wurden in vertikalen, abgedunkelten Sedimentrohren mit geringem Durchfluss im Labor über 2 Wochen adaptiert. Danach wurden die Rohre für 7 Wochen drainagiert und wiedervernässt, wobei die Erholungsphase weitere 2 Wochen lang verfolgt wurde. Vor der Trocknung und nach der Vernässung wurde die Nährstoffaufnahme und -abgabe unter normalen (ambient) und nährstoffangereicherten (Nährstoffzugaben, addition) Bedingungen gemessen. Alle Sedimente zeigten einen kurzen aber hohen Puls an Nährstoffen unmittelbar nach Wiedervernässung, der weniger als einen Tag dauerte (Abb. 7). Die Nährstoffaufnahme war nach der Wiedervernässung geringer als vor der Austrocknung, erholte sich aber meist innerhalb einer bis zwei Wochen.

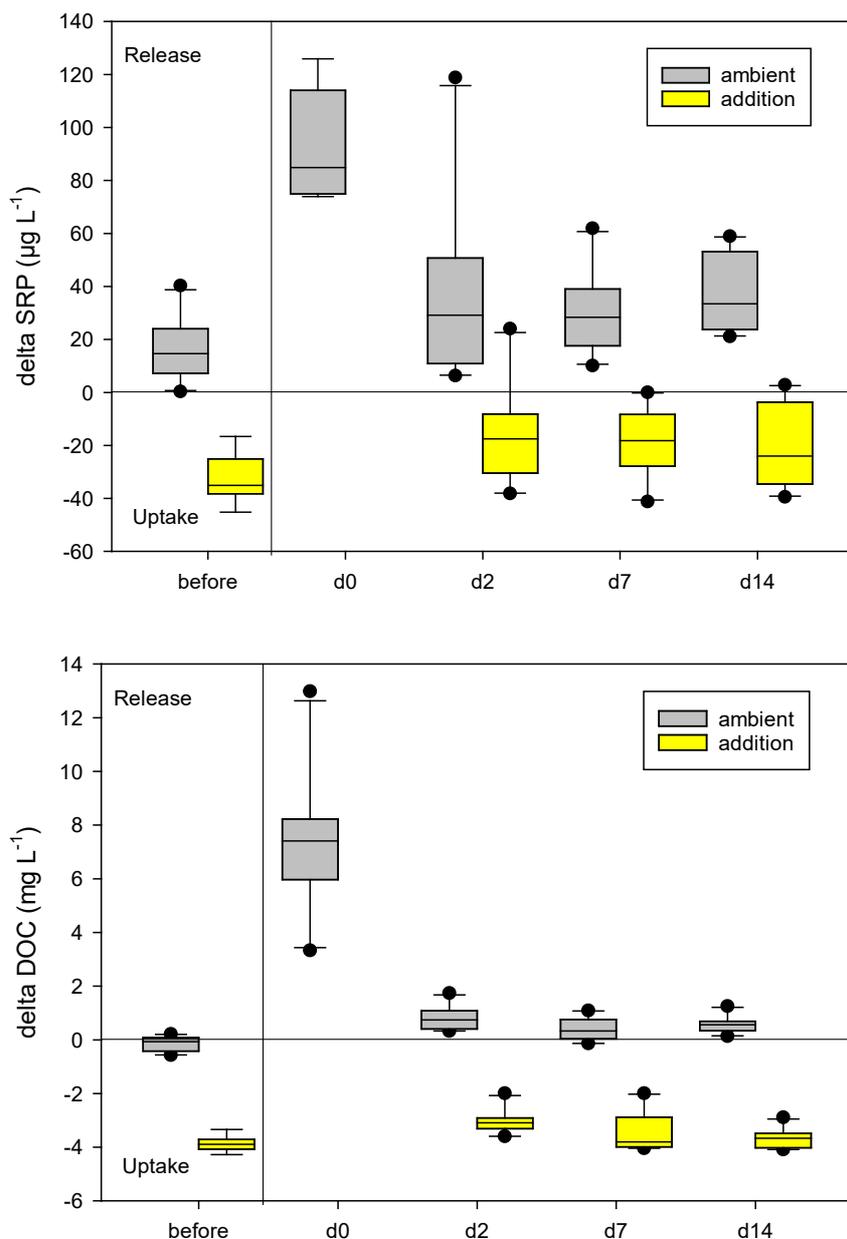


Abb. 6: Aufnahme (Uptake) und Freisetzung (Release) von Phosphor (SRP) und gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) vor der Austrocknung (before) und nach der Wiedervernässung (d0, d2, ... = Tag 0, Tag 2, ...) bei normalen (grau, ambient) und angereicherten (gelb, addition) Bedingungen.

**Aufwuchsalgen:** Aufwuchsalgen auf Steinen wurden in Rinnen über 2 Wochen adaptiert, über 3 Wochen getrocknet und danach wiedervernässt. Die Aufwuchsalgen zeigten eine signifikant reduzierte Fotosynthese und auch eine reduzierte Nährstoffaufnahme nach der Trockenphasen. Algen von offenen Bereichen waren stärker betroffen als jene von beschatteten Bereichen. Innerhalb von 2 Wochen konnte keine Erholung der Algengemeinschaft beobachtet werden.

## AP 4: Hydrodynamische Modellierung

Die hydrodynamischen Modelle zeigen bei allen Gewässern mit Verringerung der Wassermengen eine deutliche Kontraktion bis zur vollkommenen Austrocknung (Abb. 7). Eine Zunahme der nicht überfluteten Bereiche führt für den gesamten Abschnitt zu einer Abnahme der Respiration (gemessen als CO<sub>2</sub> Produktion), wobei diese Abnahme bei Simulation eines fehlenden Uferbewuchses (und einem dadurch geringerem Feuchtegehalt) deutlich stärker ausfällt (Abb.8).

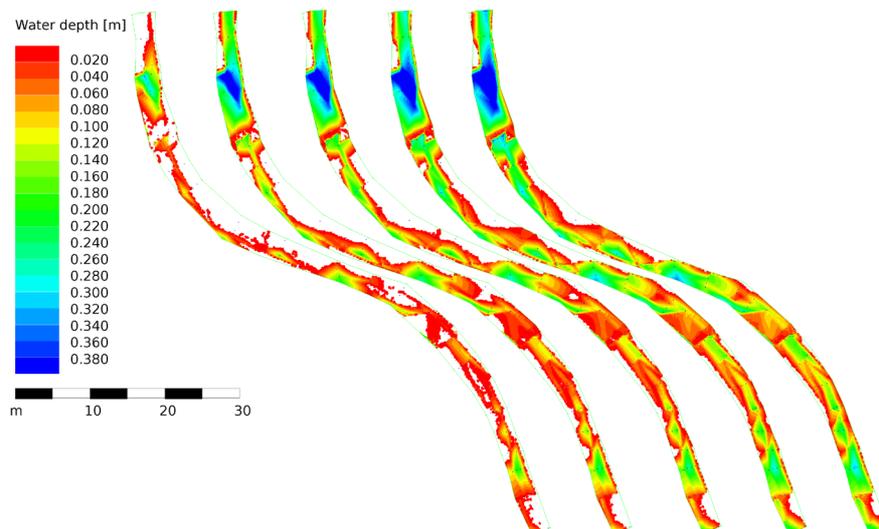


Abb. 7: Wassertiefen in der Sucha bei unterschiedlichen Durchflüssen (von links nach rechts: 3 l s<sup>-1</sup>, 31 l s<sup>-1</sup>, 60 l s<sup>-1</sup>, 127 l s<sup>-1</sup> and 191 l s<sup>-1</sup>)

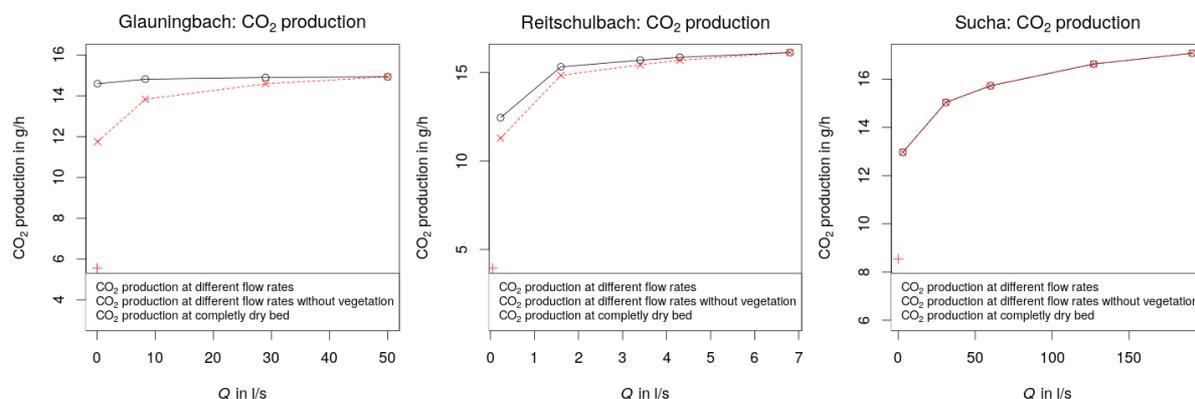


Abb. 8: CO<sub>2</sub> Produktion in den Gewässerstrecken bei unterschiedlichen Szenarien: -o-: CO<sub>2</sub> Produktion bei unterschiedlichen Durchflüssen und beschattetem Bachbett; -x-: Produktion bei unterschiedlichen Durchflüssen und unbeschattetem Bachbett; +: Produktion in einem komplett trockenen Bachbett.

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- Unser Projekt zeigt, dass Bäche in gemäßigten Klimazonen im Allgemeinen eine relative hohe Restfeuchte auch bei längeren Trockenperioden aufrechterhalten können, welche die aquatischen mikrobielle Gemeinschaften intakt und aktiv erhält. Veränderungen im Transport von Nährstoffen und Gasen

in ungesättigten Flusssedimenten können jedoch die biogeochemischen Prozesse verändern bzw. einschränken, die für die Selbstreinigungskraft der Gewässer notwendig sind. Unser Projekt zeigt, dass die Stoffaufnahmekapazität der Sedimente nach der Trockenperiode signifikant reduziert ist. Allerdings erholen sich vor allem bakterielle Umsetzungsprozesse rasch und derzeit sind weder für bakterielle noch für Algengemeinschaften Langzeitfolgen der Austrocknung beobachtbar.

- Der hohe Feuchtegehalt selbst bei langanhaltender Trockenheit ist teilweise auf das gemäßigte Klima zurückzuführen, welches in den Nächten durch Tau zu einer Befeuchtung der Sedimente führt. Des Weiteren hilft Beschattung durch Ufergehölze die Feuchtigkeit im System zu halten. Ufergehölze sind somit eine gute Maßnahme um die Wirkung von Trockenperioden zumindest auf biogeochemische und mikrobiologische Prozesse gering zu halten. Schlussendlich sind Gewässer mit einem höheren Feinsedimentanteil weniger einer kompletten Austrocknung ausgesetzt als jene mit gröberem Sediment.
- Im Gegensatz zu Bakteriengemeinschaften sind Algenaufwüchse aufgrund ihrer Exponiertheit an der Oberfläche von Steinen stärker von einem fehlenden Oberflächenabfluss betroffen. Algen zeigten eine reduzierte Fotosyntheseaktivität und -effizienz sowie eine reduzierte Stoffaufnahme während und nach der Trockenperiode. Die Reduktionen waren deutlicher in gut entwickelten Biofilmen von sonnenexponierten Stellen als in jenen Bereichen, in denen Beschattung das Algenwachstum stark einschränkte. Tatsächlich fanden wir Anzeichen dafür, dass Lichtmangel die Auswirkungen von Austrocknung überlagern kann. Wir schließen daraus, dass sonnenexponierte Bereiche in Gewässern weniger resistent gegenüber Trockenperioden sind als beschattete Bereiche und daher besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.
- Eine kritische Erhöhung der Konzentrationen von Nährstoffen und gelöstem organischen Material konnte vor allem in der Kontraktionsphase im Sommer beobachtet werden, bei der hohe Wassertemperaturen und ein massiv verringerter Durchfluss wahrscheinlich zur Freisetzung von Stoffen aus den Sedimenten führen. Diese Stofffreisetzungen führen zur internen Eutrophierung und Sauerstoffzehrung und belasten somit die Gewässer und ihre Gemeinschaften (Insekten, Krebse, Fische) in einer ohnehin kritischen Zeit. Weitere Studien bezüglich möglichen Stofffreisetzungen bei Erwärmung und Niedrigwasser bei Trockenperioden sind zu empfehlen.
- Im Gegensatz zu anderen internationalen Studien konnten wir keine Unterschiede zwischen intermittierenden und perennierenden Gewässern bezüglich ihrer Resistenz und Resilienz gegenüber Austrocknung feststellen. Gegenwärtig sind keine sichtbaren Adaptationen von mikrobiellen Gemeinschaften intermittierender Gewässer im Vergleich zu jenen perennierender Gewässer an Trockenperioden zu beobachten.
- Anhand dieser Ergebnisse schließen wir, dass sowohl bereits intermittierende als auch derzeit noch perennierende Fließgewässer in trockenen Gegenden in Österreich, die einem hohen Risiko von Niedrigwasser und

Austrocknung ausgesetzt sind, verstärkt beobachtet und geschützt werden sollten, um eine Verschlechterung des ökologischen Zustands zu vermeiden oder zumindest einzuschränken. Dabei sollten vor allem jene Bereiche berücksichtigt werden, die laut unserer Studie besonders gefährdet sind. Dazu zählen kleine Fließgewässer ohne durchgehenden beidseitigen Ufergehölzsaum und mit stofflicher Vorbelastung.

- Zu den Risikofaktoren für eine Verschlechterung der Wasserqualität zählen (1) die Mobilisierung von Altlasten aus den Sedimenten aufgrund von Nass-Trockenzyklen, (2) die Mobilisierung von Altlasten aus den Sedimenten aufgrund von extremen Niedrigwasserabflüssen und Erwärmung, (3) die Einschränkung der Selbstreinigung durch Austrocknung und (4) die Einschränkung der Selbstreinigung durch Mehrfachbelastungen. Gefährdet sind daher vor allem unregelmäßig trockenfallende Gewässer(-abschnitte) und permanent wasserführende kleine Fließgewässer mit geringem Durchfluss ohne Beschattung sowie mit stofflicher Vorbelastung aus Kläranlagen und diffusen Quellen. Als Indikatoren für eine Risikoabschätzung einer Verschlechterung der Wasserqualität wird empfohlen, den Sauerstoffverbrauch der Sedimente (ähnlich dem BSB5) sowie das Freisetzungspotential der Sedimente für Nährstoffe und organischem Kohlenstoff in ein Monitoring einzubinden sowie die Wasserqualität bei Niedrigwasserabfluss zu analysieren.

## C) Projektdetails

### 6 Methodik

Im Projekt wurde ein flächiger Top-down Ansatz (Freilandbeprobungen in einer größeren Anzahl an Gewässern mit unterschiedlichem geologischen Untergrund, Sedimentbeschaffenheit und Verschmutzung, Vergleich von intermittierenden mit perennierenden Strecken) mit einem Bottom-up Ansatz (Laborversuche) kombiniert, um einerseits Mechanismen unter kontrollierten Bedingungen im Detail zu studieren und andererseits auf Ökosystemebene validieren zu können.

Bei den **Freilandbeprobungen** wurde 2018 zunächst ein Set von intermittierenden und perennierenden Bächen aus der Steiermark und dem Burgenland beprobt, die einem beschatteten feinkörnigen Gewässertyp entsprachen. 2019 wurden intermittierende und perennierende Bäche aus Kärnten und Niederösterreich dazu genommen, die einem wenig beschatteten grobkörnigen Gewässertyp entsprachen. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse leichter verallgemeinert werden. Alle Gewässerabschnitte wurden jeweils einmal vor der Austrocknung und einmal während der Austrocknung (mind. 1,5 Monate ohne oberflächlichen Abfluss) beprobt. Dadurch konnten folgende Vergleiche durchgeführt werden: (1) intermittierend und perennierend im Frühjahr zur Analyse von etwaigen Langzeitfolgen; (2) intermittierend im Sommer (trocken) im Vergleich zum Frühjahr (wasserführend) und zu perennierenden im Sommer (wasserführend) um unmittelbare Folgen der Austrocknung zu analysieren; (3)

perennierend Sommer versus Frühjahr als Referenz, um Aussagen über jahreszeitliche Veränderungen zu erhalten. Es wurden sowohl Feinsedimente für hauptsächlich bakterielle Biofilme und Steine für hauptsächlich Aufwuchsalgen (Algendominierte Biofilme) untersucht, wobei die Feinsedimente aus der Sedimentoberfläche (Benthal) und 30 cm Sedimenttiefe (Hyporheal) stammten. Damit wurde gewährleistet, dass alle wichtigen Biofilmgemeinschaften untersucht wurden.

Die untersuchten Parameter umfassten einerseits Biofilmstrukturen (organischer Gehalt, bakterielle Abundanzen, Chlorophyll-a, Algenzusammensetzung und Enzymmengen) und andererseits Biofilmprozesse (bakterielle Respiration, Fotosynthese, Nährstoff- und Kohlenstoffumsatz), da bekannt ist, dass Strukturen und Prozesse unterschiedlich (stark) von Austrocknung und Wiedervernässung beeinflusst werden. Da die Austrocknungseffekte stark von der regionalen Wetterlage abhängen (z.B. Frequenz von kurzen Regengüssen, Bewölkung, etc.) und dadurch eine hohe Variabilität in den Trockenzustand einbringen, wurde 2019 parallel zu den Freilandprobennahmen auch eine kontrollierte Austrocknung im überdachten Außenbereich des Instituts durchgeführt.

Zusätzlich wurden die Auswirkungen von Austrocknung und Wiedervernässung in Laborexperimenten sowohl für Aufwuchsalgen als auch für hyporheische Sedimente untersucht. Für die Aufwuchsalgen wurden 0,5 m lange Fließbrinnen aus Plexiglas genommen, die mittels Aquariumpumpen für einen gleichmäßigen, langsamen Durchfluss sorgten. Mit LED Lampen wurde ein Tag-Nacht-Rhythmus simuliert.





Die Feinsedimente wurden in 0,5 m lange Plexiglasrohre (4 cm Durchmesser) gefüllt, die mit einer peristaltischen Pumpe für einen langsamen stetigen Durchfluss sorgten. Die Rohre waren verdunkelt.





In beiden Experimenten wurden die Proben im Frühjahr vor der Austrocknung entnommen, um gleiche Anfangsverhältnisse für alle Gewässer zu garantieren. Die Proben wurden im Labor zwei Wochen lang akklimatisiert. Danach wurden die Proben drainiert, über 3 (Algen) bzw. 9 Wochen (Feinsedimente) ohne Wasserzufuhr stehen gelassen und danach 2 Wochen lang wieder durchflossen. Die längeren Trockenzeiten für die Feinsedimente wurden gewählt, weil diese in den Rohren weniger stark exponiert waren (wie auch im Freiland).

Vor der Austrocknung sowie nach der Austrocknung (unmittelbar, sowie 1, 2, 7 und 14 Tage nach der Wiedervernässung) wurde die Nährstoff- und Kohlenstoffaufnahme oder -abgabe bei der Grundkonzentration sowie während der Einspeisung von Nährstoffen untersucht. Zusätzlich wurde die Fotosynthese der Algen sowie die bakterielle Respiration in den Feinsedimenten gemessen und Biofilmparameter (Chlorophyll-a, Bakteriendichten, organischer Gehalt, etc) aufgenommen.

Für die hydrodynamischen Modelle wurden zunächst 3 ausgewählte intermittierenden Gewässerstrecken geodätisch vermessen und über ein Jahr die Wasserstände mittels installierter Pegel gemessen. Auf Basis dieser Daten wurden stationäre Simulationen für drei bis vier Durchflüsse durchgeführt. Die benetzte Fläche bei jedem Durchfluss wurde in ein GIS kompatibles Shape File exportiert und ihre flächige Ausdehnung ermittelt. Zusätzlich wurde die benetzte Fläche bei Minimalabfluss gemessen, die jener Situation entspricht, bei der nur mehr Pools bestehen. Die Modellergebnisse wurden mit biogeochemischen Prozessen (bakterielle Respiration, Nährstoffaufnahme- und abgabe) verschnitten und für die einzelnen Durchflussszenarien verglichen.

Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Ratgeber für das Gewässermanagement erstellt, der die wichtigsten Ergebnisse des Projekts zusammenfasst,

Risikofaktoren für eine Verschlechterung der Wasserqualität durch Trockenperioden anführt, Vorschläge für Indikatoren für eine Risikoabschätzung macht und (sehr allgemein) auf Maßnahmen zum Schutz intermittierender Gewässer eingeht.

## 7 Arbeits- und Zeitplan

Zu **Projektbeginn** wurde eine Projekt-Webpage erstellt und das Projekt auf den Webpages der Partner präsentiert. Während der gesamten Laufzeit wurden Projektergebnisse auf internationalen Konferenzen und in österreichischen Medien öffentlich gemacht.

Unmittelbar nach **Projektstart** wurden zunächst vergleichbare intermittierende und perennierende Fließgewässer im Burgenland, in Kärnten und in der Steiermark anhand der Angaben der Hydrologischen Dienste der Länder, von wissenschaftlichen Kollegen und der Bevölkerung gesucht. Nachdem 2018 nur in der Steiermark und im Burgenland ausreichend geeignete Gewässerstrecken gefunden wurden, konzentrierten sich die **Freilandbeprobungen und Biofilmanalysen im 1. Projektjahr (2018)** auf diese. Gleichzeitig wurde je ein Gewässer in den drei Bundesländern für die hydrodynamischen Modellierungen ausgewählt. Diese drei Gewässer wurden **geodätisch vermessen**. Basierend auf den Daten wurden erste Simulationen für stationäre Durchflüsse durchgeführt, indem die vermessenen Transekte interpoliert wurden. Zudem wurden Pegelsonden an den drei Gewässern installiert.

Im **2. Projektjahr (2019)** wurden im Frühjahr zu den bestehenden Strecken noch 10 weitere Gewässer in Kärnten und in Niederösterreich gesucht, um einen anderen Gewässertyp in die Untersuchungen einzubinden. Die **Freilandbeprobungen und Biofilmanalysen** wurden in diesen 20 Gewässern weitergeführt bzw. analytisch erweitert und durch **kontrollierte Austrocknungen** ergänzt. Zusätzlich wurden im Sommer 2019 **Laborversuche mit Aufwuchsalgen und Bakterien** in Feinsedimenten über insgesamt 3-4 Monate (inklusive einem Monat Versuchsaufbau und Optimierung) durchgeführt. Im Rahmen einer Kooperation wurden die Feinsedimentversuche durch eine PhD Studentin aus Italien ergänzt, die sich mit Hilfe von <sup>15</sup>N-Nitrateinspeisungen den Stickstoffkreislauf (und im Besonderen die Denitrifikation) ansehen wollte. Für die **hydrodynamischen Modellierungen** musste zunächst das RSim-2D für extreme Niedrigabflüsse adaptiert werden. Nach der Adaptierung wurden anhand der Pegel- und Durchflussdaten für jede Gewässerstrecke 3-4 Durchflusssituationen zwischen Bankful (gesamtes Bachbett benetzt) und maximale Kontraktion (nur mehr einzelne Pools vorhanden) simuliert und die benetzten Flächen berechnet. Diese wurden mit den Daten der mikrobiellen Respiration verschnitten.

Im **3. Projektjahr (2020)** wurden fixierte Sediment- und Biofilmproben aus den beiden Jahren davor analysiert und danach sämtliche Daten getrennt nach Freiland und Versuchen statistisch ausgewertet und miteinander verglichen. Auf Basis dieser Analysen wurden vereinzelt weitere Beprobungen durchgeführt, um die bestehenden Daten bei Bedarf zu ergänzen (z.B. Korngrößenanalysen) bzw. zu

verifizieren. In mehreren Zoom-Meetings mit den Partnern und weiteren involvierten Kolleginnen und Kollegen wurde vereinbart, welche Daten in welcher Form publiziert werden.

Im **Jahr 2021 (3,5 Projektjahr)** wurde auf Basis der Vereinbarungen in unterschiedlichen Teams an der Erstellung der Manuskripte gearbeitet.

## 8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

### Publikationen:

1. Weigelhofer G. & M. Tritthart (2019) Austrocknung von Bächen – eine Gefahr für die Wasserqualität? Österr Wasser- und Abfallw 2019 · 71:385–391. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-0580-2>
2. Pucher M, B Palmia, D Baldan, M Mutz, L Coulson, M Bartoli, T Hein, G Weigelhofer (submitted to Biogeochemistry) Nutrient and DOM retention recovers within days after drying and rewetting in sediment perfusion cores
3. Feldbacher E, D von Schiller, M Mutz, L Coulson, M Tritthart, G Weigelhofer (submitted to Freshwater Biology) Impacts of intermittent flow on benthic biofilm processes and structures in temperate-climate streams
4. Attermeyer K, A Harjung, J Schelker, G Weigelhofer (submitted to Freshwater Biology) Phosphorus can, but does not necessarily stimulate terrestrial carbon degradation in stream hyporheic zones.
5. Coulson L, Feldbacher E, Weigelhofer G (in prep) Similar response of biofilms to drying in perennial and intermittent reaches of temperate-climate streams (Working title)
6. Von Schiller D, et al. (in prep) Effects of intermittent flow on epilithic biofilms of intermittent and perennial temperate-climate streams – a laboratory flumes study (Working title)

### Bachelor-, Master- und PhD-Arbeiten:

1. Kilian Glösl, Dominik Barbi, Serena Tabirca, Valentina Enengl (2020) Untersuchung von Biofilmen von trockenfallenden österreichischen Bächen. SchoolDiploma Thesis, HLUW Yspertal.
2. Charlotta von Bychelberg (2021) Die Auswirkungen saisonaler Austrocknung auf die Nährstoffkonzentration in Fließgewässern. Untersuchung der maximalen Aufnahme von Ammonium in Bachsedimenten im Rahmen des Projekts Purify. Bac-Thesis, Boku.
3. Pia Karbiener (2021) Einfluss der Austrocknung und Wiedervernässung auf die P, N und DOC Aufnahme- und Abgaberrate des Sediments intermittierender Flüsse. Bac-Thesis, Boku.

4. Sophie Ehrlinger (2021) Die maximale Phosphoraufnahmekapazität unter Austrocknung und Wiedervernässung von Sedimenten aus natürlich intermittierenden Bächen. Bac-Thesis, Boku.
5. Stefanie Nikl (2021) Die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf die mikrobielle Respiration von intermittierenden Flüssen (Project RURIFY). Bac-Thesis, Boku
6. Magdalena Senitza (2019) Effects of desiccation on heterotrophic microorganisms in benthic sediments in intermittent streams, MSc Thesis, FH Technikum Wien
7. Jakob Lechner (2019) Effects of desiccation on the self-purification capacity of headwater streams, MSc Thesis, Universität für Bodenkultur Wien, November 2019
8. Lisa-Marie Ziegler (2020) Effects of desiccation on heterotrophic microbial activity in hyporheic sediments, MSc Thesis, Universität für Bodenkultur Wien
9. Beatrice Palmia (2020) Effects of hydrological intermittency on the functioning of lotic ecosystems. PhD Thesis, University of Parma, Italy (mit Beiträgen aus PURIFY).
10. Matthias Pucher (2021) Organic carbon cycling in streams: process understanding and impacts through agriculture and droughts. PhD Thesis, Universität für Bodenkultur Wien. (mit Beiträgen aus PURIFY)
11. Daniel Wildt (2022) Hydrodynamic and Sediment Transport Computational Fluid Dynamics Modelling on Different Scales. PhD Thesis (in finalization), Universität für Bodenkultur Wien. (mit Beiträgen aus PURIFY)
12. Laura Coulson (in prep) Effects of desiccation on biofilms in temperate-climate streams (working title), Universität für Bodenkultur Wien. (mit Beiträgen aus PURIFY)

### **Konferenzbeiträge:**

1. Weigelhofer G, D von Schiller, M Mutz, M Tritthart (2018) Effects of desiccation on the self-purification capacity of headwater streams. 1st Meeting of the Iberian Ecological Society (SIBECOL) from 4-7 February in Barcelona.
2. Weigelhofer, G.; Von Schiller, D.; Mutz, M.; Tritthart, M. (2019): Effects of drought on the self-purification capacity of temperate headwater streams. 11th Symposium for European Freshwater Sciences (SEFS), Zagreb, Croatia, Jun 30 – Jul 5
3. Weigelhofer, G; Ziegler, L; Waberer, M; von Schiller, D; Mutz, M; Tritthart, M; (2019): Effects of drying and re-wetting on biofilm processes in temperate headwater streams. 6th Biennial Symposium of the International Society of River Sciences, SEPT 8-12, 2019, Vienna, AUSTRIA

4. Waberer, M.; Ziegler, L.; Senitza, M.; Hein, T.; Weigelhofer, G.; (2019): Effects of desiccation on benthic and hyporheic microbial activities in temperate streams. [poster] 6th Biennial Symposium of ISRS, Vienna, Austria, Sep 8 – 13
5. Pucher, M.; Hein, T.; Weigelhofer, G. (2020): Nutrient and organic matter retention in the hyporheic zone during drying and re-wetting in a mesocosm experiment. European Geoscience Union (EGU) General Assembly 2020, Vienna, Austria, online, May 4 – 8
6. Weigelhofer, G.; Pucher, M. (2020): Effects of intermittency and land use on the in-stream phosphorus and organic carbon uptake. European Geoscience Union (EGU) General Assembly 2020, Vienna, Austria, online, May 4 – 8
7. Von Schiller, D., Atristain, M., Elosegi, A. & Weigelhofer, G. (2020) Differential responses of biofilms from perennial and intermittent streams to drying. Murcia 26-29th October 2020, online.
8. Posterpresentation am Klimatag 2020 (online)
9. Pucher, M; Palmia, B; Bartoli, M; Baldan, D; Weigelhofer, G; (2021): Effects of drying and rewetting on hyporheic organic matter and nutrient retention in sediment perfusion cores. ASLO Aquatic Sciences Meeting, 22-27 June, 2021, Online (Vienna)
10. Von Schiller, D; Atristain, M; Elosegi, A; Zaraonaindia, A; Weigelhofer, G; (2021): Differential response of biofilms from perennial and intermittent streams to drying. 12th Symposium for European Freshwater Sciences, SFS, 25-30 July, 2021, Online (Dublin)
11. Weigelhofer, G; Pucher, M; (2021): Shading can buffer short- and long-term effects of drying on benthic processes. 12th Symposium for European Freshwater Sciences, SFS, 25-30 July, 2021, Online (Dublin)
12. Tritthart M., Wildt D., Weigelhofer G. (2022) A model-based framework for the estimation of the self-purifying capacity of intermittent streams under a changing climate. IAHR 2021 (postponed to 2022)

### **Medienberichte und Radio-Interviews:**

- Die Presse - Was geht alles den Bach hinunter... (02.05.2020)
- Ö1 - Dimensionen - Wie klimafit sind unsere Bäche? (14.10.2021)
- Ö1 - Radiokolleg - Die Quellen sauberen Wassers (11.10.2021); mit Beiträgen aus PURIFY
- derstandard.at - Dünger und Dürre setzen Grundwasser zu (20.07.2019); mit Beiträgen aus PURIFY
- Tips - Projekte am WasserCluster Lunz (09.08.2018); mit Beiträgen aus PURIFY
- Ö1 - Radiokolleg - Trinkwasser in Österreich (1.2. - 4.2.2021); mit Beiträgen aus PURIFY

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin / der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin / der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.