

# Einfluss der Migrationsgeschwindigkeit von Gewässerbettformen auf die Sauerstoffdynamik in der hyporheischen Zone

Philipp Wolke (Berlin), Yoni Teitelbaum, Chao Deng (Negev), Jörg Lewandowski (Berlin) und Shai Arnon (Negev)

## Zusammenfassung

Die Sauerstoffverteilung und -aufnahme in der hyporheischen Zone reguliert verschiedene redoxabhängige Reaktionen und beeinflusst die Habitatbedingungen. Obwohl feinkörnige Sedimente in Bächen und Flüssen häufig in Bewegung sind, konzentrieren sich die meisten biogeochemischen Studien auf stagnierende Sedimente. Um den Einfluss unterschiedlicher Bettformgeschwindigkeiten auf die Sauerstoffdynamik und -aufnahme in sandigen Flussbetten zu beurteilen, führten wir Experimente in einem Laborgerinne durch. Die Sauerstoffdynamik wurde hierbei mit planaren Sauerstoffoptoden gemessen. In stationären Gewässerbettformen war die sauerstoffhaltige Zone muschelförmig aufgrund des Einströmens sauerstoffhaltigen Wassers an der Luvseite der Gewässerbettform und aufsteigendem anoxischen Wasser auf der Leeseite. Die zunehmende Bettformgeschwindigkeit führte, neben dem allmählichen Verschwinden der anoxischen Aufstiegszone und einer Abflachung der Grenzfläche zwischen oxischer (bewegter Bereich des Bettes) und anoxischer Zone (stationärer Bereich des Bettes), zu einer Verringerung der Sauerstoffaufnahme aufgrund verringerter Aufenthaltszeiten. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Berücksichtigung von Prozessen, die mit der Bettformmigration zusammenhängen, für das Verständnis der Biogeochemie der hyporheischen Zone von Bedeutung sind und bei der Planung von Maßnahmen zur Zustandsverbesserung von Fließgewässern berücksichtigt werden sollten.

Schlagwörter: Sauerstoffdynamik, Gewässerbett, hyporheische Zone, Sauerstoff, Sedimente, Sauerstoffaufnahme

DOI: 10.3243/kwe2021.05.002

## Abstract

### Impact of bed form celerity on oxygen dynamics in the hyporheic zone

Oxygen distribution and uptake in the hyporheic zone regulate a variety of redox-sensitive reactions and influence habitat conditions. Even though fine-grain sediment is often in motion in streams and rivers, most biogeochemistry studies focus on stagnant sediment. In an effort to assess the impact of different bed form celerity on oxygen dynamics and uptake in sandy riverbeds, researchers conducted experiments in a laboratory channel. Oxygen dynamics were measured using surface oxygen sensors. The oxygenated zone in stationary beds had a conchoidal shape because of inflow of oxygenated water on the windward side of the bed form and upwelling anoxic water at the lee side. Along with the gradual disappearance of the upwelling anoxic zone and flattening of the interface between the oxic (moving area of the bed) and the anoxic (stationary area of the bed) zones, growing bed celerity also led to a reduction in volumetric oxygen uptake rates due to shortened residence times. The results indicate that taking account of processes related to bed form migration is important for understanding the biogeochemistry of hyporheic zones and when planning measures to improve watercourse status.

Key Words: oxygen dynamics, water bed, hyporheic zone, oxygen, sediment, oxygen uptake

## 1 Einleitung

Die hyporheische Zone (HZ) spielt eine wichtige Rolle bei verschiedenen physischen, chemischen und biologischen Prozessen in Bächen und Flüssen [1,2]. Die HZ wird oft als der Bereich im Flussbett charakterisiert, in dem die Fließpfade des Flusswassers in das Sediment eindringen und nach einer gewissen Zeit und Strecke im Untergrund wieder im Oberflächenwasserkörper enden [3]. Der Wasserfluss durch die HZ wird

hyporheischer Austausch genannt. In der HZ kommt es zur Mischung von Flusswasser und Grundwasser, was steile chemische Gradienten zur Folge hat. Dadurch wird die HZ zu einem hoch reaktiven Bereich, in dem intensive, mikrobiell katalysierte chemische Umsatzprozesse stattfinden [2, 4, 5]. Dazu gehören die Umwandlung von Metallverbindungen und Nährstoffen sowie der Abbau von Schadstoffen [6–9]. Das Verständnis für

die Prozesse in der HZ findet Anwendung im Management von Wasserressourcen und der Flussrenaturierung [10, 11].

Gelöster Sauerstoff ist eine Schlüsselsubstanz in der HZ. Er ist ein Indikator für Transportprozesse und den biogeochemischen Stoffumsatz und reguliert die Redoxzonierung im Flussbett. Der Sauerstofffluss durch die Sediment-Wasser-Grenze in das Sediment und somit die Ausdehnung der sauerstoffhaltigen Zone im Sediment wird stark von der Flussbetttopografie, Fließgeschwindigkeit und Sauerstoffverbrauchsrate reguliert [12, 13]. In sandigen Flussbetten, welche beispielsweise typisch für das Norddeutsche Tiefland sind, findet der hyporheische Austausch primär durch Gewässerbettformen (hier als Bettformen bezeichnet) statt. Aufgrund ihrer ubiquitären Verbreitung haben sie oftmals den größten Beitrag an hyporheischen Austausch und den damit assoziierten biogeochemischen Prozessen in Flüssen [14]. Die Treiber für den Wasserfluss durch die HZ sind Variationen des hydraulischen Gradienten an der Sediment-Wassergrenze, welche durch über die Bettformen fließendes Oberflächenwasser verursacht werden. Dieser advective Porenwasserfluss wird „advective pumping“ genannt [15].

Sandige und schluffige Flussbetten sind sehr anfällig für Scherkräfte und mobil unter Fließbedingungen, die typischerweise in Bächen und Flüssen auftreten. Die Geschwindigkeit des Betts kann beispielsweise in Form der Bettformmigrationsgeschwindigkeit charakterisiert werden. Während der Bettformmigration werden Sedimentpartikel von der Luvseite der Gewässerbettformen zur Leeseite transportiert und dort anschließend wieder sedimentiert. In dem neu entstandenen Porenraum wird dabei Flusswasser eingefangen. Dieser physikalische Transportprozess wird „turnover“ genannt und stellt eine Form des hyporheischen Austauschs dar [15]. Die beiden Formen des hyporheischen Austauschs „advective pumping“ und „turnover“, finden während der Bettformmigration simultan statt. Es resultieren daraus veränderte Fließpfade durch das Sediment und Verweilzeitverteilungen des Porenwassers im Sediment im Vergleich zu einem stationären Bett, bei dem nur „advective pumping“ auftritt. Die Bettformmigrationsgeschwindigkeit kann somit einen großen Einfluss auf die Menge an Sauerstoff haben, welche Mikroorganismen und Redoxprozessen zur Verfügung steht [16–19].

Trotz des potenziellen Einflusses von Bettformmigration auf die ökologischen und biogeochemischen Prozesse in der HZ existieren kaum Studien zu dieser Thematik, da Untersuchungen deutlich schwieriger als bei stationären Bettformen durchzuführen sind. Die Sauerstoffdynamik während der Bettformmigration wurde bisher nur in wenigen Modellierungsstudien [16, 18, 20] und zwei experimentellen Studien im marinen Bereich untersucht [21, 22]. Nach unserer Kenntnis fand bisher kein kontrolliertes Experiment zur Bettformmigration in einem Fließgewässer mit Sandbett und kleinen Bettformen statt. Das Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss der Bettformmigrationsgeschwindigkeit auf die Sauerstoffdynamik und Sauerstoffverbrauchsrate in migrierenden Bettformen zu quantifizieren.

## 2 Materialien und Methoden

### 2.1 Versuchsaufbau, Bedingungen und Ansatz

Die Experimente wurden in einem rezirkulierenden Experimentalgerinne von 260 cm Länge und 29 cm Breite durchge-

führt. Der Wasserfluss wurde von einer Pumpe mit steuerbarer Pumprate angetrieben und dabei von einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (SITRANS F M, MAG 5100 W Siemens, Nordborg, Dänemark) gemessen. Die Wassertemperatur wurde im System durch einen Kühler konstant bei 24–25 °C gehalten. Im Experiment wurden natürliches, gesiebtes Sediment (2 mm Siebweite) aus den oberen 10 cm des Yarqon Flusses in Zentral-Israel und deionisiertes Wasser genutzt. Der Fluss zeichnet sich durch die Einleitung von geklärtem Abwasser aus und weist eine vergleichbare Charakteristik wie viele Bäche und Flüsse des Norddeutschen Tieflands auf [8].

Insgesamt wurden elf Experimente unter verschiedenen Fließbedingungen durchgeführt (Tabelle 1). Jede Fließbedingung wurde dupliziert und dabei als Set 1 und Set 2 gekennzeichnet, um zeitliche Veränderungen im System zu identifizieren. Nur die Fließgeschwindigkeit von 0,32 m s<sup>-1</sup> wurde dreimal wiederholt. Die Messung der Sauerstoffverteilung mit planaren Sauerstoffoptoden (VisiSensTD, Presens GmbH, Deutschland) stellte den Kern jedes Experiments dar. Die Optoden wurden an die Scheibe des Experimentalgerinnes geklebt und deckten einen Bereich von 10 × 15 cm ab. Das Wirkprinzip der Sauerstoffmessung mit planaren Optoden basiert auf dem dynamischen „Quenchen“ (Fluoreszenzlöschung) einer Indikatormolekülsubstanz in der Anwesenheit von Sauerstoff. Der große Vorteil dieser nicht invasiven Methode gegenüber konventionellen Sauerstoffmessungen ist, dass sie keinen Sauerstoff verbraucht und hochauflösende Bilder der Sauerstoffverteilung im Sediment liefert [23]. Jedes Experiment dauerte drei bis vier Stunden, bei dem alle fünf bis 11 Minuten eine Sauerstoffmessung durchgeführt wurde. Die Bettformmorphodynamik wurde mit Zeitraffer-Digitalfotos quantifiziert, dabei wurden die Bettformgeschwindigkeit und -länge bestimmt. Die Bettformhöhe wurde hingegen mit einem akustischen Doppler-Geschwindigkeits-ADV-Profiler (Nortek Vectrino II Profiler, Norwegen) ermittelt. Die Parameter Temperatur, pH, Sauerstoffsättigung und Leitfähigkeit wurden vor und nach jeder Sauerstoffmessung gemessen (WTW, Multi 3320, Deutschland). Nach jedem Experiment wurde die Fließgeschwindigkeit für die nächste Messung eingestellt und ein Tag gewartet, damit sich das System an die neuen Fließbedingungen anpassen konnte. Nach Abschluss aller Sauerstoffmessungen wurde der hyporheische Austausch unter allen Fließbedingungen mit 19 Salztracer-Experimenten quantifiziert [24]. Dies erlaubte eine Quantifizierung des Sauerstoffs, der in die HZ einströmt. Nach Abschluss aller Experimente wurden Sedimentproben aus dem bewegten und unbewegten Teil des Betts entnommen und jeweils die Porosität, Korngrößenverteilung sowie der Anteil organischen Materials bestimmt.

### 2.2 Datenanalyse

Bildverarbeitungsmethoden aus der Programmbibliothek OpenCV<sup>1)</sup> wurden in einem selbst entwickelten Pythonprogramm verwendet, um die topographische Information der Sediment-Wasser-Grenze aus dem digitalen Bild zu extrahieren und mit den räumlichen Sauerstoffsättigungsinformationen der kalibrierten Optodenbilder zu kombinieren (siehe Fließschema Anhang A (Abbildung A2) in Wolke et al. [25]). Dies erlaubte die Unterscheidung von Bereichen mit Oberflächen-

1) <https://opencv.org/>

Exp. No. / Set No.	Fließgeschwindigkeit (m s <sup>-1</sup> )	Bettformhöhe (cm) <sup>1</sup>	Bettformgeschwindigkeit (m h <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	Wassertiefe (cm)	Temp. (°C)	LF (μS cm <sup>-1</sup> )	Trübung (NTU)
1/1	0.16	1.50 (N/A)	0.000 (N/A)	14.2	24.9	291	62
7/2	0.16	1.94 (N/A)	0.000 (N/A)	14.2	24.3	339	189
3/1	0.25	1.13 (0.42)	0.035 (0.000)	13.8	24.9	322	126
8/2	0.25	1.13 (0.42)	0.049 (0.000)	13.7	24.1	345	137
4/1	0.28	1.37 (0.51)	0.140 (0.004)	14.2	24.4	326	141
9/2	0.29	1.37 (0.51)	0.135 (0.006)	13.9	24.8	355	308
2/1	0.32	1.38 (0.46)	0.394 (0.110)	14.2	24.5	299	267
5/1	0.32	1.38 (0.46)	0.275 (0.045)	14.2	24.4	331	230
10/2	0.33	1.38 (0.46)	0.375 (0.105)	13.9	24.2	359	375
6/1	0.36	1.41 (0.60)	0.699 (0.287)	14.3	24.4	335	311
11/2	0.37	1.41 (0.60)	0.644 (0.080)	13.8	24.6	362	478

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften des Wassers und Sediment während der Experimente (verändert aus [25]), 1 Standardabweichung in Klammern

wasser und Sediment. Anhand der vorprozessierten Bilder konnte die Größe und mittlere Sauerstoffsättigung der sauerstoffhaltigen Zone in hoher Auflösung (Pixelgröße 15.625 μm<sup>2</sup>) bestimmt werden, hier definiert durch einen Schwellenwert von 15 % Sauerstoffsättigung.

Die volumetrische Sauerstoffverbrauchsrate  $R$  (μmol l<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) des Porenwassers wurde mit zwei verschiedenen Methoden, der „maximum uptake“ Methode und „delta“ Methode, berechnet. Die Methoden basieren auf dem durchschnittlichen hyporheischen Austausch und der mittleren Sauerstoffkonzentration im zweidimensionalen Bereich des porösen Mediums, weshalb sie verlässlichere Ergebnisse liefern als zuvor genutzte eindimensionale Ansätze. Der „maximum uptake“ Methode liegt die Annahme zugrunde, dass sämtlicher Sauerstoff, der mit dem hyporheischen Austausch in den Porenraum transportiert wird, auch aufgebraucht wird und kein Sauerstoff mit aufsteigenden Fließpfaden zurück in das Oberflächenwasser gelangt. Bei der „delta“ Methode liegt hingegen die Annahme zugrunde, dass nur ein gewisser Anteil des Sauerstoffs, der mit dem hyporheischen Austausch in den Untergrund gelangt, auch aufgebraucht wird und der Rest wieder dem Oberflächenwasser zugefügt wird. Abschließend wurde die sogenannte „flushing time“ (Spüldauer) berechnet, die eine Annäherung an die Aufenthaltszeit des Wassers im sauerstoffhaltigen Bereich liefert. Eine detaillierte Darlegung der Berechnungen kann Wolke et al. [25] entnommen werden.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Eigenschaften von Wasser und Sediment

Die Trübung des Oberflächenwassers erhöhte sich mit der Fließgeschwindigkeit von 62 NTU unter stationären Bedingungen bis auf 478 NTU bei der maximalen Fließgeschwindigkeit von 0.37 m s<sup>-1</sup> (Tabelle 1). Die Leitfähigkeit war ebenfalls nicht konstant und erhöhte sich graduell von 291 μS cm<sup>-1</sup> auf 362 μS cm<sup>-1</sup> während der zweiwöchigen Experimentalkampagne. Der pH-Wert und die Sauerstoffsättigung des Oberflächenwassers waren hingegen relativ stabil und schwankten von 8.1 mg l<sup>-1</sup> bis 8.2 mg l<sup>-1</sup> bzw. von 92.8 % bis 98.7 %.

Der Vergleich zwischen dem beprobten Sediment im bewegten und dem darunter befindlichen unbewegten Bereich des Betts zeigt, dass Kornsortierungseffekte auftraten, die einen Einfluss auf die Sedimentcharakteristik hatten. Das bewegte Sediment wies eine gegenüber dem unbewegten Sediment leicht erhöhte Porosität (36 % vs. 33.6 %, t-Test  $p > 0.05$ ) und einen leicht verringerten Mediankorndurchmesser (0.264 mm vs. 0.298 mm) auf. Die hydraulische Leitfähigkeit war in beiden Bereichen nahezu identisch ( $4.62 \cdot 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>). Von großer Bedeutung ist der signifikant geringere Anteil organischer Substanz im bewegten Bereich des Betts im Vergleich zum darunter befindlichen unbewegten Teil (1.38 % vs. 1.05 %, gepaarter t-Test  $p < 0.05$ ,  $n = 10$ ).

Die berechneten Bettformgeschwindigkeiten und mittleren Bettformhöhen während jedes Experimentaldurchlaufs sind in Tabelle 1 dargestellt. Es wurde beobachtet, dass die Bettformgeschwindigkeiten trotz gleicher Fließbedingungen zeitlich variabel sein können. Einige Bettformen beschleunigten oder verringerten ihre Geschwindigkeit zu bestimmten Zeitpunkten. Dies zeigt sich u. a. in der erhöhten Standardabweichung bei den höheren Bettformgeschwindigkeiten (Tabelle 1). Eine konkrete Erklärung für dieses Verhalten liegt nicht vor.

Bei stationären Bettformen wurde beobachtet, dass sich in Suspension befindendes Feinmaterial in einer sehr dünnen Lage an der Sediment-Wasser-Grenze ablagerte. Die mittlere Bettformhöhe stieg von 1.13 cm bei langsamer auf 1.37 cm bei mittlerer Bettformgeschwindigkeit (0.04 m h<sup>-1</sup> und 0.14 m h<sup>-1</sup>) an. Dieser Anstieg ist jedoch geringer als die innerhalb jeder Fließbedingung beobachteten Höhenvariation, was sich in der hohen beobachteten Standardabweichung von 0.42 bis 0.60 cm äußert.

#### 3.2 Dynamik des hyporheischen Austauschs

Der hyporheische Austausch stieg von der langsamsten Fließgeschwindigkeit (stationäres Bett) linear bis zu einem Maximum bei 0.33 m s<sup>-1</sup> (Bettformgeschwindigkeit von 0.35 m h<sup>-1</sup>) an (Abbildung 1). Dieser Trend unterscheidet sich gegenüber Beobachtungen, die bei stationären Bettformen gemacht wurden. Dort nimmt der hyporheische Austausch mit dem Quadrat

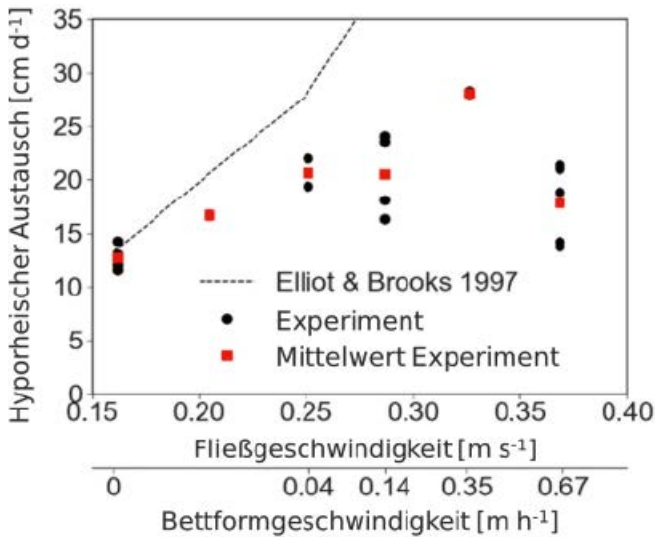


Abb. 1: Beziehung zwischen hyporheischem Austausch, Fließgeschwindigkeit und Bettformgeschwindigkeit (Achse der Bettformgeschwindigkeit nicht skaliert). Die gepunktete Linie zeigt Modellierungsergebnisse für stationäre Bettformen, die nur den Effekt des „advective pumping“ beinhalten. Der vorhergesagte Austausch erhöht sich in linearer Form bis zu  $74 \text{ cm d}^{-1}$  bei einer Fließgeschwindigkeit von  $0.37 \text{ m s}^{-1}$  (Daten nicht dargestellt) (verändert aus [25]).

der Fließgeschwindigkeit zu [26, 27]. Dieser hier beobachtete lineare Zusammenhang wurde noch nicht in früheren Studien erörtert, ist aber vermutlich dem steigenden Einfluss des „turnovers“ zuzuschreiben [15]. Anschließend nahm der hyporheische Austausch wieder ab, was auf die Dominanz von „turnover“ gegenüber „advective pumping“ hindeutet. Dieser Effekt wurde bereits von Bottacin-Busolin und Marion [28] beispielhaft in einer Modellierungsstudie vorhergesagt. Die Variabilität des hyporheischen Austauschs unter den Experimenten mit gleichen Strömungsbedingungen wurde hauptsächlich der experimentellen Messunsicherheit zugeschrieben, deren Einfluss insbesondere bei schnelleren Fließgeschwindigkeiten stärker war. Der hyporheische Austausch wurde zusätzlich modelliert, um Vorhersagen auf der Grundlage des „advective pumping“ zu berechnen. Dabei wurde eine hydraulische Leitfähigkeit von  $4.62 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  zugrunde gelegt. Für ein immobiles Bett waren die Berechnungen den experimentell ermittelten Werten sehr ähnlich, bei zunehmender Bettformgeschwindigkeit wurden die Abweichungen jedoch größer.

### 3.3. Dynamik der Sauerstoffverteilung

Die sauerstoffhaltige Zone hatte bei stationären Bettformen eine muschelartige Form (Abbildung 2A), wie sie auch von Kaufman et al. [12] und von Ahmerkamp et al. [22] beobachtet wurde. Dies ist typisch für rein advektiven hyporheischen Austausch durch „advective pumping“. Eine ausgeprägte Aufstiegszone anoxischen Wassers wurde am Bettformtrog beobachtet, diese nahm jedoch allmählich mit steigender Bettformgeschwindigkeit ab. Dabei wies die Grenzfläche zwischen oxischem und anoxischem Bereich eine unregelmäßige, ausgefranste Form auf (Abbildung 2 B, C). Dieses Muster wird vermutlich durch Dispersionseffekte, fort- oder rückschreitende

Sauerstofffronten oder lokal unterschiedliche Verbrauchsraten verursacht.

Bei hohen Bettformgeschwindigkeiten ( $0.35 \text{ m h}^{-1}$ ) verschwanden die Aufstiegszonen vollständig und die Bettform war gewöhnlicherweise gut mit Sauerstoff versorgt. Eine dünne Übergangszone mit steilem Sauerstoffkonzentrationsgradienten trennt die darunter befindlichen Bereiche ab (Abbildung 2 D, E). Unter diesen Bedingungen ist der Transport von Sauerstoff und anderen Lösungsbestandteilen in den darunter befindlichen Bereich primär auf Dispersion- und Diffusionsprozesse beschränkt [18]. Im Kern der Bettformen mit hoher und sehr hoher Geschwindigkeit ( $0.35 \text{ m h}^{-1}$ ,  $0.67 \text{ m h}^{-1}$ ) finden sich Bereiche mit reduziertem Sauerstoffgehalt, welche auf erhöhte Aufenthaltszeiten des Porenwassers in dieser Region hindeuten (Abbildung 2 D, E). Die beobachteten Muster sind auf den immer geringer werdenden Anteil der advektiven Komponente am hyporheischen Austausch zurückzuführen. Ab einer Bettformgeschwindigkeit von  $0.35 \text{ m h}^{-1}$  dominiert „turnover“ den Porenwasseraustausch.

Weiterhin wurde ein Hysterese-Effekt bei migrierenden Bettformen beobachtet. Die Aufstiegszonen anoxischen Wassers verschwanden und tauchten anschließend bei darauffolgenden Bettformen wieder auf. Dieser Effekt trat auf, wenn eine große Bettform mit einem advektiven Impuls die Redoxkline tiefer in das Bett verschob und anschließend, bis in tiefe Bereiche, mit Sauerstoff versorgtes Sediment hinterließ. Danach folgende kleinere Bettformen waren nicht in der Lage, eine tiefer reichende Fließzelle zu installieren. In der Konsequenz wurde das tiefer-liegende Sediment wieder vom Sauerstoffnachschub abgeschnitten und die aufsteigende Redoxkline erlaubte es, den folgenden Bettformen eine erneute Verbindung von tiefem anoxischem Wassers mit der Oberfläche herzustellen (sie-

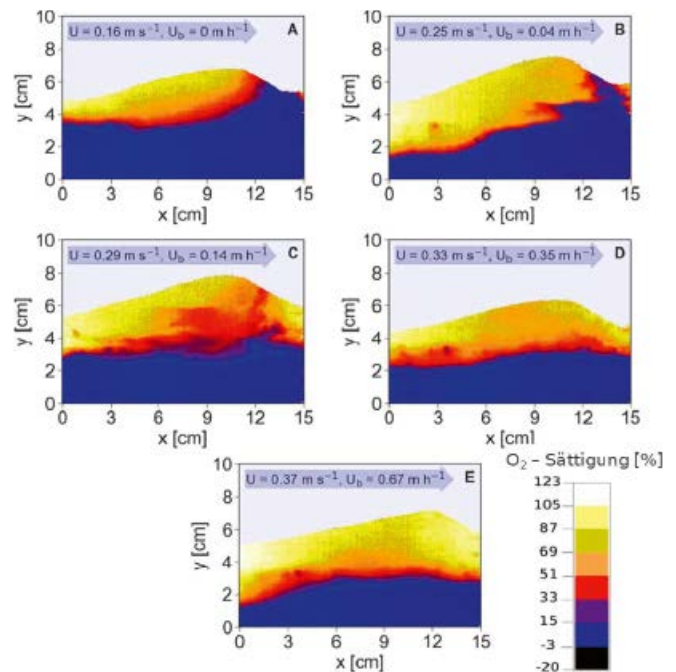


Abb. 2: Optodenbilder zeigen die räumliche Sauerstoffverteilung im Flussbett bei steigender Fließgeschwindigkeit ( $U$ ) und Bettformgeschwindigkeiten ( $U_b$ ), von stationären Bedingungen bis zur schnellsten Bettformgeschwindigkeit (A-E) (verändert aus [25]).

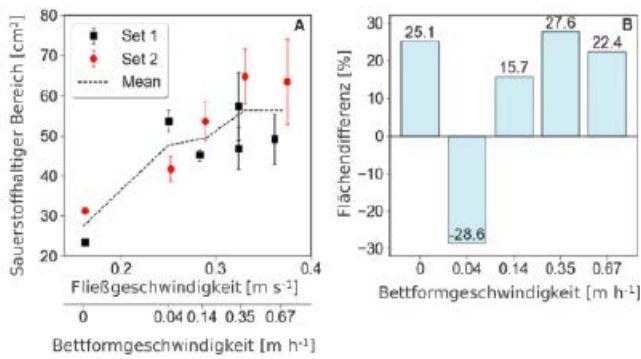


Abb. 3: Visualisierung des räumlichen und zeitlichen Mittelwerts des gesamten sauerstoffhaltigen Bereichs bei verschiedenen Fließ- und Bettformgeschwindigkeiten (A). Jeder Versuchsdurchlauf ist chronologisch als Set 1 und 2 dargestellt. Die gepunktete Linie zeigt den arithmetischen Mittelwert. Die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung. Im Allgemeinen, wie in Abbildung B dargestellt, waren die sauerstoffhaltigen Bereiche in Set 2 größer als in Set 1 außer bei  $0.14 \text{ m h}^{-1}$  (verändert aus [25]).

he Supplementary Material in Wolke et al. [25]). Es wird erwartet, dass die hier beobachtete komplexe räumliche und zeitliche Sauerstoffdynamik eine bedeutende Rolle in redoxabhängigen Reaktionen spielt. In aktuellen Modellierungsstudien wird die stochastische Natur von Bettformen nicht berücksichtigt, wodurch es zur Unterschätzung von Reaktionsraten in Bettformen kommen kann. Kessler et al. [16] schlussfolgerten beispielsweise, dass die Bettformgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf gekoppelte Nitrifizierungs-Denitrifizierungsreaktionen hat.

Die Sauerstoffskala in Abbildung 2 übersteigt leicht 100 % Sättigung (helle Bereiche). Dies liegt an technischen Limitationen der Optodenlichtquelle, die keine vollständig homogene Ausleuchtung in allen Bereichen der Optode gewährleistet. Die Folge ist eine leichte Überschätzung der Sauerstoffsättigung in den Randbereichen der Optode. Dies wurde bei Berechnungen berücksichtigt und korrigiert.

Die mittlere Ausdehnung des sauerstoffhaltigen Sedimentbereichs während der einzelnen Experimente erhöhte sich deutlich, nachdem die Bettformen zu migrieren begannen. Anschließend wurde bei weiterer Geschwindigkeitssteigerung lediglich eine moderate Vergrößerung des oxischen Bereichs beobachtet (Abbildung 3A). Interessanterweise war unter jeder Experimentalbedingung die sauerstoffhaltige Zone beim ersten Experimentaldurchlauf kleiner als beim zweiten Durchlauf (Abbildung 3B). Das Experiment mit geringer Bettformgeschwindigkeit ( $0.04 \text{ m h}^{-1}$ ) stellt jedoch eine Ausnahme dar, da eine ungewöhnlich große Bettform während des gesamten ersten Experimentaldurchlauf auftrat. Ebenso besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der Ausdehnung der sauerstoffhaltigen Zone und der Trübung des darüber befindlichen Oberflächenwassers (Abbildung 4).

### 3.4 Sauerstoffflüsse und Aufnahmearten

Der Sauerstofffluss in das Sediment wurde mit der in Wolke et al. [25] erläuterten Methode aus dem mittleren hyporheischen Austausch (Abbildung 1) und der Sauerstoffkonzentration des Oberflächenwassers berechnet. Die mit der „delta“ Methode

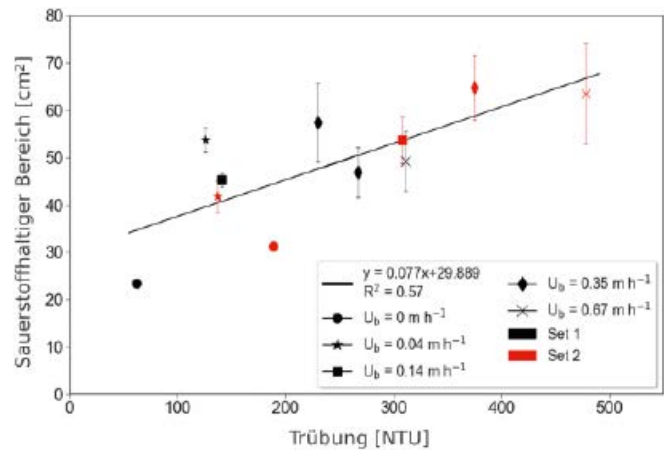


Abb. 4: Beziehung zwischen sauerstoffhaltigem Bereich und Oberflächenwassertrübung. Die Versuchsbedingungen, gekennzeichnet durch ihre Bettformgeschwindigkeit, werden zusätzlich in Set 1 und 2 (erster und zweiter Durchlauf mit gleicher Bettformgeschwindigkeit) unterteilt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen an (verändert aus [25]).

berechneten Sauerstoffaufnahmearten waren wesentlich niedriger als die der „maximum uptake“ Methode (Abbildung 5 A, B). Die mit der „maximum uptake“ Methode berechneten Raten sind nahezu identisch mit denen aus der Studie von De Falco et al. [29], in der ebenfalls Sediment aus dem Yarqon Fluss genutzt, aber die Sauerstoffmessung mit einer Elektrode durchgeführt wurde. Die Sauerstoffaufnahmearten zeigen in beiden Modellansätzen einen abnehmenden Trend mit steigender Fließgeschwindigkeit und der daran geknüpften Bettformgeschwindigkeit. Die Nutzung zwei verschiedener Berechnungsansätze ist notwendig, da die Annahme, dass der gesamte in den Untergrund eingetragene Sauerstoff aufgebraucht wird, nicht in allen Systemen gültig ist. Dies trifft im Besonderen zu, wenn eine sehr hohe Porenwassertauschrate oder geringe mikrobielle Aktivität vorliegt. Im marinen Bereich, mit geringen Reaktionsraten, wurde ermittelt, dass nur  $\sim 25 \%$  des Sauerstoffs während der Untergrundpassage aufgebraucht wird [16]. Solch ein Systemverhalten, wird mit der „delta“ Methode berücksichtigt. Da die vielen verschiedenen möglichen Fließpfade in jeder Bettform jeweils unterschiedliche Aufenthaltszeiten des Wassers in der hyporheischen Zone zur Folge haben, ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Sauerstoffaufnahmearten zwischen den Werten der beiden Berechnungsmethoden liegt.

Die bereits erwähnte Größenänderung der sauerstoffhaltigen Zone in Abbildung 3 zieht eine erhöhte Sauerstoffaufnahmearten in den Experimentergebnissen von Set 1 nach sich. Da hyporheischer Austausch, Sauerstoffflüsse und die Größe der sauerstoffhaltigen Sedimentzone von der Bettformgeschwindigkeit in komplexer Weise beeinflusst werden, variierten die Sauerstoffaufnahmearten ebenfalls und korrelierten negativ mit längerer „flushing time“ (Abbildung 5 C, D).

Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass es wichtig ist Partikelmobilisierungs- und Ablagerungseffekte zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere im Fall von migrierenden Bettformen. Wir beobachteten, dass der Gehalt an Partikeln im Oberflächenwasser sich unmittelbar auf die Sauerstoffdynamik und Aufnahmearten in der HZ auswirkte (Abbildung 4 und 5). Ein

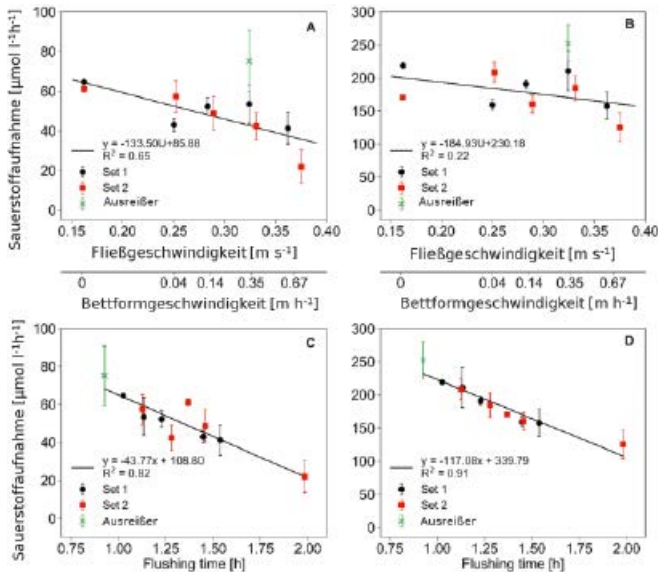


Abb. 5: Sauerstoffaufnahme unter verschiedenen Fließ- und Bettformgeschwindigkeiten und „flushing times“ des sauerstoffhaltigen Bereichs. Die „delta“ Methode (A, C) basiert auf der Annahme, dass ein Teil des Sauerstoffs aus der HZ zurück in das Oberflächenwasser transportiert wird. Die „total uptake“ Methode (B, D) basiert auf der Annahme, dass sämtlicher Sauerstoff im Untergrund aufgebraucht wird. Die Standardabweichungen sind als Fehlerbalken dargestellt. Der Ausreißer stellt den ersten Experimentaldurchlauf mit Bettformmigration dar, bei dem sich das System vermutlich noch nicht im Gleichgewicht befand (verändert aus [25]).

Austrag von Feinmaterial aus dem Sediment hatte eine Vergrößerung des sauerstoffhaltigen Bereichs im Untergrund und eine Abnahme der Sauerstoffaufnahme zur Folge. Dies zeigte sich auch daran, dass die obere, bewegte Sedimentlage gegenüber dem darunter befindlichen Sediment an organischer Substanz verarmte (1.05 % vs. 1.38 % Anteil organische Substanz). Nach Abnahme der Fließgeschwindigkeit und Bettformgeschwindigkeit kam es zu einer Ablagerung des Feinmaterials, wodurch es zu veränderten Fließpfaden wegen der Kolmation des Porenraums kommen kann. Außerdem können, durch den erhöhten Gehalt organischer Substanz, Zonen intensiverer mikrobieller Aktivität geschaffen werden. Der Ablagerungsbereich des Materials variiert dabei mit Fließ- und Bettformgeschwindigkeit und kann einerseits unmittelbar am Einströmungsbereich nahe der Sediment-Wassergrenze lokalisiert sein [30] oder sich andererseits an der Grenzfläche zwischen unbewegtem und bewegtem Teil des Betts befinden [31].

### 5 Schlussfolgerung

Diese Studie hat in einer Serie von hochkontrollierten Gerinne-Experimenten gezeigt, dass die Bettformmigrationsgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Dynamik der Sauerstoffverteilung und -aufnahme in der HZ hat. Der Transport von Sauerstoff in das Bett war rein advektiv bei stationären Bettformen und änderte sich mit steigender Bettformgeschwindigkeit graduell hin zu einem durch Sedimentumlagerung dominierten System. Dies resultierte in einem größeren sauerstoffhaltigen Sedimentvolumen, aber nicht zwangsläufig in einem größeren Sauerstofffluss in das Sedi-

ment. Da die Sauerstoffaufnahme von einer Kombination aus sauerstoffhaltigem Sedimentvolumen, Biomasse und Sauerstofffluss abhängt, hatte eine steigende Bettformgeschwindigkeit eine Reduktion der Sauerstoffaufnahme zur Folge. Teilweise ist dies auf das Auswaschen und die Ablagerung von Feinpartikeln zurückzuführen, welche unter anderem aus organischem Material bestehen. Die Ergebnisse dieser Studie implizieren, dass mit Bettformmigration assoziierte Prozesse in zukünftigen Modellierungen von Prozessen im Flussbett berücksichtigt werden sollten. Die Modellierung von Prozessen in Flussbetten findet zunehmend Anwendung in der Flussgebietsmodellierung. Die hier dargestellten Erkenntnisse haben eine besondere Relevanz für die deutschen Fließgewässertypen mit einem sandigen Bett und können bei der Planung von Maßnahmen zur Verbesserung Sohlstruktur oder Renaturierung Berücksichtigung finden.

Die Forschung wurde von der Israel Science Foundation (grant 682/17) und vom Young Scientist Exchange Program des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und Israeli Ministry of Science, Technology and Space (MOST) im Rahmen der Deutsch-Israelischen Kooperation in Wassertechnologieforschung (Stipendium YSEP-122) unterstützt. Es handelt sich bei diesem Artikel um eine ins Deutsche übersetzte und gekürzte Fassung des im Jahr 2020 unter dem Titel „Impact of bed form celerity on oxygen dynamics in the hyporheic zone“ im MDPI Journal *Water* erschienenen Open Access Artikels (doi: 10.3390/w12010062).

### Literatur

- [1] Boulton, A.J.; Findlay, S.; Marmonier, P.; Stanley, E.H.; Valett, H.M. *The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers*. Annu. Rev. Ecol. Syst. 1998, 29, 59–81.
- [2] Boano, F.; Harvey, J.W.; Marion, A.; Packman, A.I.; Revelli, R.; Ridolfi, L.; Wörman, A.; *Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications*. Rev. Geophys. 2014, 52, 603–679.
- [3] Harvey, J.W.; Bencala, K.E.; *The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchment*. Water Resour. Res. 1993, 29, 89–98.
- [4] Cardenas, M.B.; *Hyporheic zone hydrologic science: A historical account of its emergence and a prospectus*. Water Resour. Res. 2015, 51, 3601–3616.
- [5] Fischer, H.; Kloep, F.; Wilzcek, S.; Pusch, M.T.; *A river's liver: Microbial processes within the hyporheic zone of a large lowland river*, Biogeochemistry 2005, 76, 349–371.
- [6] Gandy, C.J.; Smith, J.W.N.; Jarvis, A.P.; *Attenuation of mining-derived pollutants in the hyporheic zone: A review*. Sci. Total Environ. 2007, 373, 435–446.
- [7] Jaeger, A.; Posselt, M.; Betterle, A.; Schaper, J.; Mechelke, J.; Coll, C.; Lewandowski, J.; *Spatial and temporal variability in attenuation of polar organic micropollutants in an urban lowland stream*. Environ. Sci. Technol. 2019, 53, 2383–2395.
- [8] Schaper, J.L.; Posselt, M.; Mccallum, J.L.; Banks, E.W.; Hoehne, A.; Meinikmann, K.; Shanafield, M.A.; Batelaan, O.; Lewandowski, J.J.; *Hyporheic exchange controls fate of trace organic compounds in an urban stream*. Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 12285–12294.
- [9] Nagorski, S.A.; Moore, J.N.; *Arsenic mobilization in the hyporheic zone of a contaminated stream*. Water Resour. Res. 1999, 35, 3441.
- [10] Boulton, A.J.; Datry, T.; Kasahara, T.; Mutz, M.; Stanford, J.A.; *Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains*. J. N. Am. Benthol. Soc. 2010, 29, 26–40.

- [11] Hester, E.T.; Gooseff, M.N.; *Moving beyond the banks: Hyporheic restoration is fundamental to restoring ecological services and functions of streams*. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 1521–1525.
- [12] Kaufman, M.H.; Cardenas, M.B.; Buttles, J.; Kessler, A.J.; Cook, P.L.M.; *Hyporheic hotmoments: Dissolved oxygen dynamics in the hyporheic zone in response to surface flow perturbations*. Water Resour. Res. 2017, 53, 1–21.
- [13] Reeder, W.J.; Quick, A.M.; Farrell, T.B.; Benner, S.G.; Feris, K.P.; Tonina, D.; *Spatial and temporal dynamics of dissolved oxygen concentrations and bioactivity in the hyporheic zone*. Water Resour. Res. 2018, 2112–2128.
- [14] Gomez-Velez, J.D.; Harvey, J.W.; Cardenas, M.B.; Kiel, B.; *Denitrification in the Mississippi River network controlled by flow through river bedforms*. Nat. Geosci. 2015, 8.
- [15] Elliott, H.; Brooks, N.H.; *Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory*. Water Resour. Res. 1997, 33, 123–136.
- [16] Kessler, A.J.; Cardenas, M.B.; Cook, P.L.M.; *The negligible effect of bed form migration on denitrification in hyporheic zones of permeable sediments*. J. Geophys. Res. 2015, 120, 1–11.
- [17] Elliott, A.H.; Brooks, N.H.; Elliott, H.; Brooks, N.H.; *Transfer of non-sorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments*. Water Resour. Res. 1997, 33, 123–136.
- [18] Ahmerkamp, S.; Winter, C.; Janssen, F.; Kuypers, M.M.M.; Holtappels, M.; *The impact of bedform migration on benthic oxygen fluxes*. J. Geophys. Res. Biogeosciences 2015, 120, 1–14.
- [19] Fischer, H.; Sukhodolov, A.; Wilczek, S.; Engelhardt, C.; *Effects of flow dynamics and sediment movement on microbial activity in a lowland river*. River Res. Applic. 2003, 19: 473–482.
- [20] Zheng, L.; Cardenas, M.B.; Wang, L.; Mohrig, D.; *Ripple effects: bed-form morphodynamics cascading into hyporheic zone biogeochemistry*. Water Resour. Res. 2019, 2018WR023517.
- [21] Precht, E.; Franke, U.; Polerecky, L.; Huettel, M.; *Oxygen dynamics in permeable sediments with wave-driven pore water exchange*. Limnol. Oceanogr. 2004, 49, 693–705.
- [22] Ahmerkamp, S.; Winter, C.; Krämer, K.; Beer, D. de; Janssen, F.; Friedrich, J.; Kuypers, M.M.M.; Holtappels, M.; *Regulation of benthic oxygen fluxes in permeable sediments of the coastal ocean*. Limnol. Oceanogr. 2017, 1935–1954.
- [23] Klein, S.; Worch, E.; Knepper, T.P.; *Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the rhine-main area in Germany*. Environ. Sci. Technol. 2015, 49, 6070–6076.
- [24] Fox, A.; Boano, F.; Arnon, S.; *Impact of losing and gaining stream-flow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune-shaped bed forms*. Water Resour. Res. 2014, 50, 1–13.
- [25] Wolke, P.; Teitelbaum, Y.; Deng, C.; Lewandowski, J.; Arnon, S.; *Impact of bed form celerity on oxygen dynamics in the hyporheic zone*. Water 2020, 12, 62.
- [26] Packman, A.; Salehin, M.; Zaramella, M.; *Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows*. J. Hydraul. Eng. 2004, 130, 647–656.
- [27] Arnon, S.; Gray, K.A.; Packman, A.I.; *Biophysicochemical process coupling controls nitrate use by benthic biofilms*. Limnol. Oceanogr. 2007, 52, 1665–1671.
- [28] Bottacin-Busolin, A.; Marion, A.; *Combined role of advective pumping and mechanical dispersion on time scales of bed form-induced hyporheic exchange*. Water Resour. Res. 2010, 46, 1–12.
- [29] De Falco, N.; Boano, F.; Bogler, A.; Bar-Zeev, E.; Arnon, S.; *Influence of stream-subsurface exchange flux and bacterial biofilms on oxygen consumption under nutrient-rich conditions*. J. Geophys. Res. Biogeosciences 2018, 123, 1–14.
- [30] Fox, A.; Packman, A.I.; Boano, F.; Phillips, C.B.; Arnon, S.; *Interactions between suspended kaolinite Deposition and hyporheic exchange flux under losing and gaining flow conditions*. Geophys. Res. Lett. 2018, 45.
- [31] Hartwig, M.; Borchardt, D.; *Alteration of key hyporheic functions through biological and physical clogging along a nutrient and fine-sediment gradient*. Ecohydrology 2014, 8, 961–975.

## Anzeige

## Unser Expertentipp



## WebSeminar

Die kulturelle und technische Prägung unserer Gewässer

10. Juni 2021  
Online  
110,00 € / 90,00 €\*\*



## DWA-M 517

**Gewässermonitoring – Strategien und Methoden zur Erfassung der physikalisch-chemischen Beschaffenheit von Fließgewässern**  
April 2017  
74 Seiten, A4  
ISBN Print: 978-3-88721-440-1  
ISBN E-Book: 978-3-88721-441-8  
90,00 € / 72,00 €\*



## DWA-M 626-1

**Neobiota – Auswirkungen und Umgang mit wasserwirtschaftlich bedeutsamen gebietsfremden Tier- und Pflanzenarten – Teil 1: Grundlagen**  
Februar 2019  
80 Seiten, A4  
ISBN Print: 978-3-88721-688-7  
ISBN E-Book: 978-3-88721-689-4  
96,50 € / 77,20 €\*

\*! für fördernde DWA-Mitglieder  
\*\*! für DWA-Mitglieder

## Autoren

Philipp Wolke, M.Sc.  
Abteilung Ökohydrologie  
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei  
Müggelseedamm 310  
12587 Berlin

E-Mail: wolke@igb-berlin.de

Yoni Teitelbaum  
Chao Deng  
Shai Arnon  
Zuckerberg Institute for Water Research  
The Jacob Blaustein Institutes for Desert Research  
Ben-Gurion University of the Negev  
84990, Israel

E-Mail: sarnon@bgu.ac.il

Dr. Jörg Lewandowski  
Geographisches Institut  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Rudower Chaussee 16  
12489 Berlin

E-Mail: lewe@igb-berlin.de

