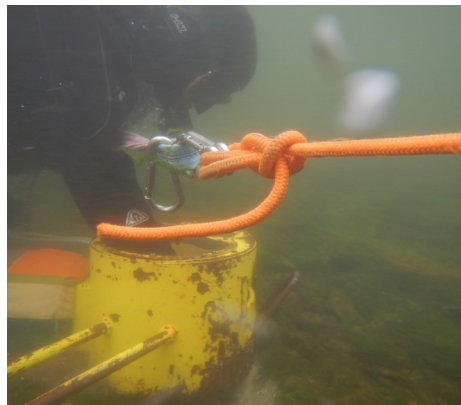

Biologische Untersuchungen der Limmat 2020



Kurzbericht

Äusserer Aspekt, pflanzlicher Bewuchs, Kieselalgen,
Makrozoobenthos sowie Umwelt-DNA (eDNA)

Untersuchungen vom 16. - 20. März 2020

Bericht Nr. 1947-B-02
Datum Entwurf: 21.12.2020
Datum Endfassung: 28.1.2021

Impressum

Auftraggeber

Kanton Aargau

Departement Bau, Verkehr und Umwelt. Abteilung für Umwelt, Sektion Abfallwirtschaft, Altlasten, Umweltlabor und Oberflächengewässer

Entfelderstrasse 22, 5001 Aarau

Lukas De Ventura

Kanton Zürich

Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL

Gewässerschutz, Oberflächengewässerschutz

Hardturmstrasse 105, 8005 Zürich

Patrick Steinmann

Auftragnehmer

AquaPlus AG, Gotthardstrasse 30, CH-6300 Zug

Hydra AG, Lukasstrasse 29, CH-9008 St. Gallen

Projektleitung

Barbara Imhof, AquaPlus AG

John Hesselschwerdt, Hydra AG

Feld-, Tauch und Laborarbeiten

John Hesselschwerdt, Boris Unger, Stefan Pfannschmidt, Uta Mürle, Hydra AG

Yvonne Bernauer, Margrit Ensner Egloff, Joachim Hürlimann, AquaPlus AG

eDNA

ID-Gene, Avenue de Sécheron 15, 1202 Genf

Kurzbericht

Christa Gufler, Joachim Hürlimann, AquaPlus AG

John Hesselschwerdt, Hydra AG

Fotos auf der Titelseite

Links: Sicherung des Tauchers sowie Probenahme des Makrozoobenthos unter Wasser, rechts: Probenahme der Kieselalgen sowie abgekratzte Steine.

Bilder der Hydra AG und AquaPlus AG

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Ausgangslage und Auftrag	1
2	Material und Methoden	1
3	Limmattal und Einflussfaktoren auf die Gewässerbiologie der Limmat	2
4	Resultate und Diskussion	4
4.1	Äusserer Aspekt	4
4.2	Pflanzlicher Bewuchs	5
4.3	Kieselalgen	7
4.4	Wasserwirbellose (Makrozoobenthos)	9
4.5	Umwelt-DNA (eDNA)	13
5	Fazit	14
6	Literaturverzeichnis	16

1 Ausgangslage und Auftrag

Das 2010 begonnene Monitoring wurde auf die gesamte Limmat unterhalb des Zürich-sees ausgeweitet

Die Gewässerschutzfachstelle des Kantons Aargau beschloss im Jahr 2010 an zwei Messstellen der Limmat (Wettingen, Turgi) koordinierte biologische Untersuchungen durchzuführen (AquaPlus 2010, Hydra 2010). Im Jahr 2020 wurde die Untersuchung an den beiden Messstellen wiederholt sowie durch die Gewässerschutzfachstelle des Kantons Zürich um drei Messstellen erweitert (Werdhölzli, Kloster Fahr, Oettwil a.d.L.). Die vorliegenden Untersuchungen führten die beiden auf Gewässerökologie spezialisierten Firmen AquaPlus AG, Zug und Hydra AG, St. Gallen mit folgenden fachlichen Verantwortlichkeiten durch:

- AquaPlus AG, Zug (Projektleitung, Sondenmessungen, Äusserer Aspekt, pflanzlicher Bewuchs, Kieselalgen)
- Hydra AG, St. Gallen (Makrozoobenthos, Taucharbeiten, eDNA-Probenahme).

Der folgende gemeinsam erstellte Kurzbericht enthält die wichtigsten Kernaussagen der beiden Fachberichte Phytobenthos (AquaPlus 2020a) sowie Makrozoobenthos inkl. dem Thema Umwelt-DNA (Hydra 2020).

2 Material und Methoden

Tauchergestützte Aufnahmen gemäss etabliertem Verfahren für grosse Flüsse

Für die biologische Untersuchung grosser Flüsse gibt es für die Schweiz keine standardisierte Untersuchungs- und Bewertungsmethode nach Modulstufenkonzept. Daher wurde das am Hochrhein entwickelte und an anderen grossen Flüssen erfolgreich angewandte tauchergestützte Verfahren angewandt (Hydra 2017). Mit diesem Verfahren wird ein Vergleich der Resultate der grossen Flüsse gewährleistet.

Erhebungen von Flora und Fauna an fünf Messstellen mit je fünf Teilmessstellen vom linken zum rechten Ufer

Die biologischen Untersuchungen der Limmat wurden vom 16. bis 20. März 2020 an fünf Messstellen (Werdhölzli, Kloster Fahr, Oettwil a.d.L, Wettingen, Turgi) durchgeführt (Abbildung 1). Jede Messstelle wurde mit fünf Teilmessstellen im Transekt von links nach rechts beprobt (Uli: Ufer links, Mli: Mitte links, Mi: Mitte, Mre: Mitte rechts, Ure: Ufer rechts). Die mittleren drei Teilmessstellen waren nicht wasserseitig, die Probenahme erfolgte durch einen Taucher der Firma Hydra AG.

Die Feldaufnahmen, welche durch die Unternehmen AquaPlus AG und Hydra AG in diesem Kurzbericht abgehandelt werden, umfassten Aufnahmen des Äusseren Aspektes (BAFU 2007a), des pflanzlichen Bewuchses (Thomas & Schanz 1976), der Kieselalgen (BAFU 2007b), des Makrozoobenthos (Hydra 2017) und der Umwelt-DNA (eDNA).

Berichterstattung in zwei getrennten Fachberichten

Eine detailliertere Beschreibung der Untersuchungsmethoden wie auch der Beschreibung der fünf Probenahmestellen können den Fachberichten entnommen werden.

3 Limmattal und Einflussfaktoren auf die Gewässerbiologie der Limmat

Das Limmattal begrenzt den Raum der Limmat und ist zugleich Erholungsraum für die Stadtbevölkerung

Die Gewässerökologie der Limmat wird stark durch den Zürichsee, die zahlreichen Wehranlagen, die fast durchgehend beeinträchtigte Ökomorphologie sowie den zahlreichen und dichten Siedlungen bestimmt

Die Limmat erstreckt sich vom Zürichsee bis zur Mündung in die Aare auf einer Länge von 36 km. Das durchflossene Limmattal umfasst flächenmässig dominierend die beiden Lebensraumtypen Stadt- und Siedlungslandschaft sowie bei Würenlos zu einem geringen Flächenanteil den Typ ackerbaugeprägte Hügellandschaft des Mittellandes. Das Limmattal und damit auch die Limmat wird damit sehr stark geprägt durch eine Vielzahl von anthropogenen Tätigkeiten. Die folgenden Einflussfaktoren sind in der Limmat für die Ausprägung der Gewässerbiologie von grosser Bedeutung (siehe auch Abbildung 1, Angaben gemäss BAFU GIS 2020):

- Zürichsee mit nährstoffarmem (mesotrophem) Wasser und einem für Seeausflüsse typisch gedämpftem Abflussregime und wenig Geschiebetrieb.
- Zufluss Sihl als einziger grosser Zufluss mit stark erhöhter Partikelfracht während Hochwasserereignissen.
- Ökomorphologie mit weitgehend verbauten Ufern und zahlreichen Wehranlagen sowie drei grösseren Staubereiche. Auf weiten Strecken gilt der ökomorphologische Zustand der Limmat als stark beeinträchtigt (vor allem Verbau der Ufer und des Böschungsfusses) und nur im Unterlauf sind auch etwas längere Strecken regelmässig bloss wenig beeinträchtigt. Naturnahe Fliesstrecken gibt es nur eine bei Wettingen (300 m Länge). Bei Dietikon befindet sich ein Auengebiet von nationaler Bedeutung (Gebiet Dietikon-Geroldswil, Nr. 400).
Fast alle Zuflüsse in die Limmat sind entweder eingedolt oder weisen eine ökomorphologische Beeinträchtigung auf. Einzig der Furtbach und wenige andere kleine Bäche münden mit naturnahem Zustand in die Limmat. Damit fehlen der Limmat eine Vielzahl von Initiallebensräume und Rückzugsräume. Die Zuflüsse stehen somit als ökologisch wichtige Refugien mehrheitlich nicht zur Verfügung.
- Kläranlagen, respektive die Einleitung von gereinigtem Abwasser mit Zuführung von Nährstoffen und gelöstem organischen Kohlenstoff. Die vier grössten Kläranlagen weisen eine Reinigungskapazität von knapp 1 Mio. Einwohnergleichwerten auf. Sie leiten das gereinigte Abwasser alle in die Limmat ein. Mit der Sihl, der Reppisch und dem Furtbach gelangen weitere gereinigte Abwässer in die Limmat.
- Wasserkraft mit drei grösseren Stauhaltungen und zum Teil kurzfristigen Abflussschwankungen mit Einfluss auf die Strömungsverhältnisse, Geschiebetrieb, Kolmation der Gewässersohle und Sedimentation von Schwebstoffen. Insgesamt weist die Limmat 11 Wasserkraftwerke auf (WFN 2017).
- Siedlungsgebiete mit viel versiegelten Flächen (Häuser, Gewerbe, Industrie) und damit Entlastungen aus der Kanalisation (Mischwasser, Regenwasser).
- Landwirtschaftliche Nutzungen (vor allem Ackerbau und Grünland) mit diffusen Einleitungen.
- Die Limmat wird auch zum Baden und Fischen genutzt, ist Erholungsraum für viele Menschen, speist den Grundwasserstrom im Limmattal und lässt thermische Nutzungen des Limmatwassers zu. Insbesondere die letztgenannte Nutzung kann auch Einfluss auf die Wassertemperatur haben.



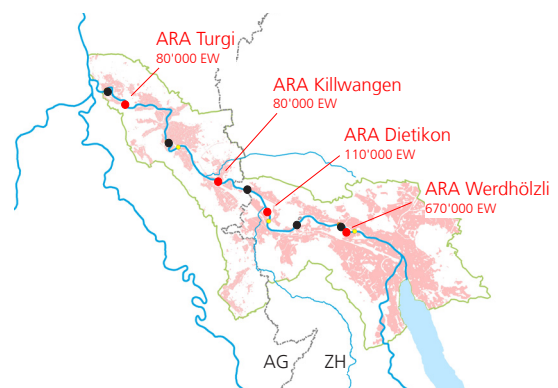
Lage der fünf Probenahmestellen entlang der Limmat.



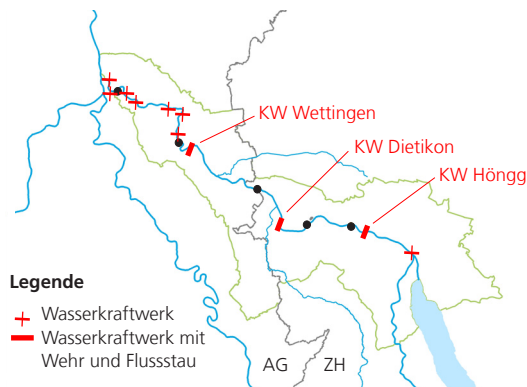
Gewässersystem der Limmat mit wichtigen Zuflüssen.



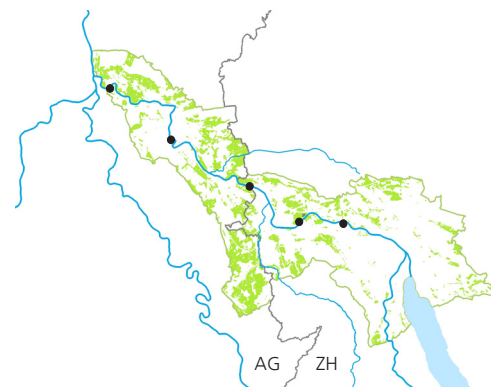
Ökomorphologie sowie Kraftwerke mit Flusstau.



Siedlung (rote Flächen) und grosse Kläranlagen.



Wasserkraftanlagen mit und ohne langen Staustufen.



Landwirtschaft (grüne Flächen) entlang der Limmat.

Abb. 1: Untersuchungsstellen und weiteres Umfeld der Limmat mit Nutzungen im Limmattal. Dargestellt sind die Lage der Probenahmestellen sowie fünf wichtige Einflussfaktoren.

Es handelt sich um folgende Einflussfaktoren:

- Zürichsee, die Limmat als Seeausfluss sowie die grössten Zuflüsse Sihl, Reppisch und Furtbach (Abflussdynamik),
- Ökomorphologie mit den drei Staustufen (Verbauungsgrad, Abflussdynamik, Sedimentation, ökologische Nischen),
- Siedlung mit den grossen vier Abwasserreinigungsanlagen (Stoffbelastungen),
- 11 Wasserkraftwerke, wobei drei mit Flusstau (erschwerter Durchgängigkeit, Abflussschwankungen),
- Landwirtschaftsflächen (diffuse Einleitungen).

Ebenso wichtig aber kartographisch nicht dargestellt sind das hohe Verkehrsaufkommen (Strassenabwasser), die thermische Nutzung des Wassers sowie biologische Einflussfaktoren (z. B. Neobiota). Karten gemäss BAFU GIS 2020.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Äusserer Aspekt

Die fliessende Welle und die Gewässersohle sind unterschiedlich stark beeinträchtigt

Der Äussere Aspekt wies vor allem im Bereich der Parameter der Gewässersohle Beeinträchtigungen auf (Abfälle, Geruch im Sediment, Verschlammlung, Eisensulfid, Kolmation). Es handelte sich um leichte bis höchstens mittelstarke Beeinträchtigungen. Die fliessende Welle war bis auf wenig Schaum nicht beeinträchtigt (Tabelle 1).

Die Beeinträchtigungen traten gehäuft ab der Messstelle Oetwil a.d.L. auf, welche sich knapp schon im Bereich der Stauwurzel des Stauraumes Wettingen befand. Ab dieser Stelle wiesen die Ufer regelmässig eine Verschlammlung auf und das Sediment einen fauligen Geruch (z.T. auch nach Kohlenwasserstoffen), Eisensulfid und vereinzelt heterotrophen Bewuchs (Tabelle 1). Die Staustufen, die zeitweise fehlende Dynamik (Winterabfluss, geringe Zahl an Geschiebetrieb), die je nach Ort ausgeglichenen Strömungsverhältnisse und die zum Teil auch sehr flachen und schwach durchströmten Ufer begünstigen die Akkumulation von Partikeln mit der Folge der oben aufgeführten Beeinträchtigungen.

Die Gewässersohle erfüllt die Anforderungen an die ökologischen Ziele gemäss GSchV je nach Parameter nur fraglich

Die Anforderungen an die ökologischen Ziele gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) Anhang 2 wurden hinsichtlich des Äusseren Aspektes bei den Parametern der fliessenden Welle fast durchgehend erfüllt. Bei den Parametern der Gewässersohle war die Erfüllung dieser Anforderungen bei einigen Parametern fraglich. Offenbar werden die Abwässer in den Kläranlagen gut gereinigt und das eingeleitete gereinigte Abwasser in der Limmat stark verdünnt. Die fehlende Geschiebedynamik und die ökomorphologisch beeinträchtigten Ufer dürften Ursachen für die Beeinträchtigungen sein.

Tab. 1: Äusserer Aspekt pro Messstelle im Fließverlauf der Limmat im Jahr 2020. Aufnahmen vom 16. bis 20. März 2020.

Dargestellt sind die Parameter der fliessenden Welle und der Gewässersohle. Für die Darstellung wird jeweils die schlechteste Bewertung pro Messstelle herangezogen.

	Fließende Welle					Gewässersohle						
	Trübung	Verfärbung	Geruch	Trübung	Schaum	Abfälle	Geruch Sediment	Verschlammlung	Abfälle Siedlungsentwässer.	Heterotropher Bewuchs	Eisensulfid	Kolmation
Li_010 Werhölzli	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Li_020 Kloster Fahr	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Li_030 Oetwil a.d.L.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Li_040 Wettingen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Li_050 Turgi	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Erfüllung GSchV:
 ● Klasse 1 Anforderungen erfüllt
 ● Klasse 2 Erfüllung der Anforderungen fraglich
 ● Klasse 3 Anforderungen nicht erfüllt

4.2 Pflanzlicher Bewuchs

Der pflanzliche Bewuchs bestand vor allem aus Algen (12 makroskopisch erkennbare Taxa) und bezüglich Deckung nur zu geringen Anteilen aus Moosen (6 Arten) und Wasserpflanzen (2 Arten).

Fädige Algen prägten den pflanzlichen Bewuchs der Limmat

Die Algen bedeckten mit unterschiedlichen Wuchsformen (gallertig, krustig, häutig, fädig) die Gewässersohle, wobei die fädigen Algen den makroskopischen Eindruck prägten. Die Algenbewuchsdichte erreichte bei den Messstellen Werdhölzli und Kloster Fahr maximal die Bewuchsdichte 3 (gut ausgebildete Fäden und Zotten). Die im Fliessverlauf folgenden drei Messstellen wiesen jeweils am Ufer eine deutlich höhere Algenbewuchsdichte auf. Der Deckungsgrad an fädigen oder Kolonien bildenden Algen betrug > 75 %. Die Limmat war somit im Fliessverlauf durch eine Zunahme der Algendichte geprägt (Abbildung 3). Der Algenbewuchs war in Oetwil a.d.L. auf der linken Seite wie auch bei den weiter flussabwärts gelegenen linken und rechten Uferstellen bei Wettingen und Turgi so hoch, dass die Konturen der Steine zum Teil weitflächig nicht mehr erkannt werden konnten. An diesen Stellen erachten wir dies als Wucherung von Algen (Veralgung), so dass die Anforderungen an die Fliessgewässer gemäss Anhang 2 der GSchV nicht erfüllt sind.

Von Oetwil a.d.L. an flussabwärts waren die Ufer atypisch stark veralgt

Die krustenförmige Rotalge *Hildenbrandia rivularis* und die fädige Grünalge *Cladophora glomerata* wurden bei allen Messstellen nachgewiesen. *Hildenbrandia rivularis* kam dabei stets in geringer Dichte vor (1-10 %). Sie bevorzugt stabile Gewässersohlen und besiedelt als Schatten adaptierte Art auch Steinunterseiten und tiefere Stellen der Limmat. *Cladophora glomerata* kam ebenfalls in geringer Dichte vor, mit Ausnahme der Stellen Kloster Fahr und Wettingen. Hier bedeckte sie mit höheren Deckungsgraden bis maximal 26-50 % die Flusssohle.

Störzeiger wie hautförmige Blaualgen, die Gebelgrünalge *Vaucheria* sp. oder die fädige Grünalge *Cladophora glomerata* kamen vor, aber meistens nicht mit hoher Deckung

Der Algenbewuchs der 5 Messstellen entsprach gemäss Wasserrahmenrichtlinie (LANUV 2009) weitgehend der Algengruppe B (weniger sensible Arten). Algen der Artengruppe A (sensible Arten) traten nur bei der Messstelle Werdhölzli auf und Algen der Artengruppe C (Störzeiger, Eutropierung, mässigen bis unbefriedigenden Zustand anzeigend) traten mehrmals ab der Stelle Kloster Fahr in Erscheinung. Die Artengruppe D (Störzeiger, sehr starke Eutropierung, unbefriedigenden bis schlechten Zustand anzeigend) fanden wir zumindest makroskopisch nicht. Im Fliessverlauf machten sich somit die eingeleiteten gereinigten Abwässer bemerkbar, aber nicht im Sinne, dass flächendeckend überall Störzeiger auftraten. Die Algenbewuchsdichte insgesamt, die resultierende pflanzliche Biomasse und damit verbunden die Folgeprozesse (Mineralisierung, Sedimentation, Kolmation) sind jedoch deutliche Anzeichen für eine Eutrophierung der Limmat flussabwärts.

In geringen Mengen, aber dennoch auffällig waren die Gallerte bildende Blaualge *Nostoc* sp., die hautförmigen Blaualgenlager *Phormidium retzii* und *Oscillatoria limosa*, die krustenförmige Braunalge *Heribaudiella fluviatilis*, die für das Winterhalbjahr typische fädige Goldalge *Hydrurus foetidus* mit geringem Restbestand sowie die im Frühling aufkommende fädige Grünalge *Ulothrix zonata*. Die Gelbgrünalge *Vaucheria* sp., ein Störzeiger der Algengruppe C, war wie erwartet vorhanden, aber in geringer Dichte (Abbildung 2).



Abb. 2: Fotodokumentation von in der Limmat vorgefundenen Algen. Aufnahmen vom 16. bis 20. März 2020.

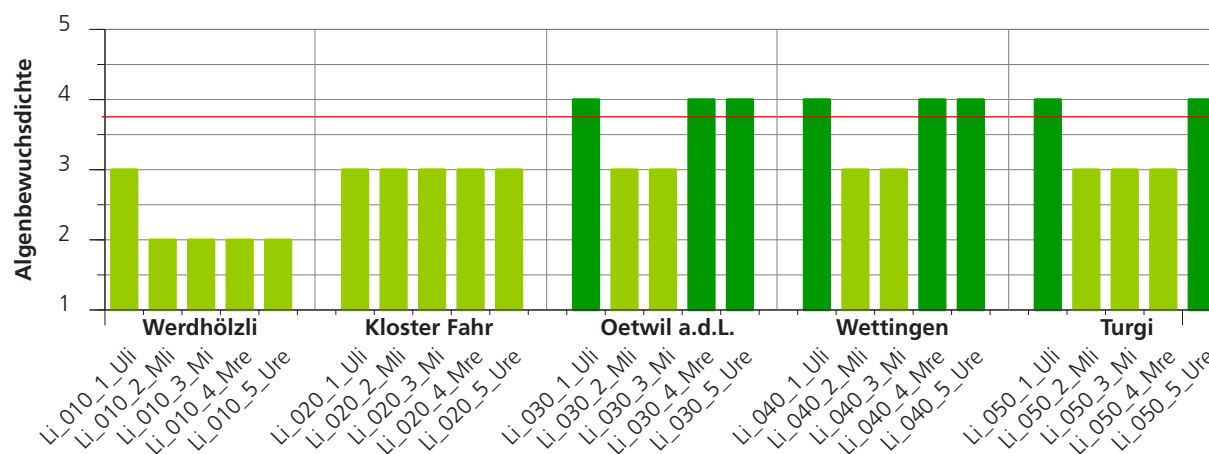


Abb. 3: Darstellung der Algenbewuchsdichte im Fliessverlauf der Limmat. Aufnahmen vom 16. bis 20. März 2020.

1: Krustenalgen, 2: Ansätze von Fäden und Zotten, 3: gut ausgebildete Fäden und Zotten, 4 = Gewässersohle zum grössten Teil mit Algen bedeckt, 5: ganzer Bachgrund mit Algen bedeckt, Konturen der Steine nicht mehr sichtbar.
Rote Linie: Ab Bewuchsdichte > 3.5 liegt eine atypische Veralgung vor (Algenwucherung gemäss GSchV Anhang 2).

4.3 Kieselalgen

Insgesamt wurden an den fünf Messstellen respektive 25 Transektstellen 93 Arten nachgewiesen, 7 davon gelten als Hauptarten und 4 weitere als Begleitarten. Im Mittel waren die Messstellen durch 20 bis 26 Arten gekennzeichnet. An den einzelnen Transektstellen wurden zwischen 11 und 37 Arten bestimmt, was für Flüsse eher tief ist. Im schweizerischen Durchschnitt für Flüsse liegt die Artenzahl pro Probe (Steinsubstrat) bei 35 bis 40 Taxa.

Die gefundenen Hauptarten sind in der Schweiz weit verbreitete Taxa. Von den Hauptarten bevorzugt keine Art sehr sauberes und weitgehend unbelastetes Wasser. Alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Hauptarten, mit Ausnahme von *Amphora pediculus* sind typisch für mehrheitlich gering bis mittel nährstoffbelastete Fließgewässer der Schweiz. *Amphora pediculus* hingegen toleriert auch leicht erhöhte organische Belastungen und Nährstoffkonzentrationen. Die häufigsten bei allen 25 Transektstellen vorhandenen Taxa waren die gebietsfremde Art *Achnanthydium delmontii* sowie die einheimische Art *Nitzschia fonticola*.

Die gebietsfremde Art *Achnanthydium delmontii* dominierte die Lebensgemeinschaften der Kieselalgen und verdrängte heimische Arten

Die gereinigten Abwässer fördern gegenüber Stoffbelastungen tolerante Arten

Die Lebensgemeinschaften wiesen auf Ebene der Autökologie (Basis D-Gruppen) im Flussverlauf erkennbare Änderungen auf (Abbildung 4). Dazu wurden die Arten je nach Empfindlichkeit gegenüber Nährstoff- und Abwasserbelastungen einer der 5 D-Gruppen «sehr gut», «gut», «mässig», «unbefriedigend» oder «schlecht» zugeordnet. So nahm an der Messstelle Werdhölzli (Li_010) der Anteil der Gruppe «sehr gut» den höchsten Wert ein, während dieser weiter flussabwärts deutlich tiefer ausfiel. Gleichzeitig nahm der Anteil der Arten der Gruppe «mässig» bis zur

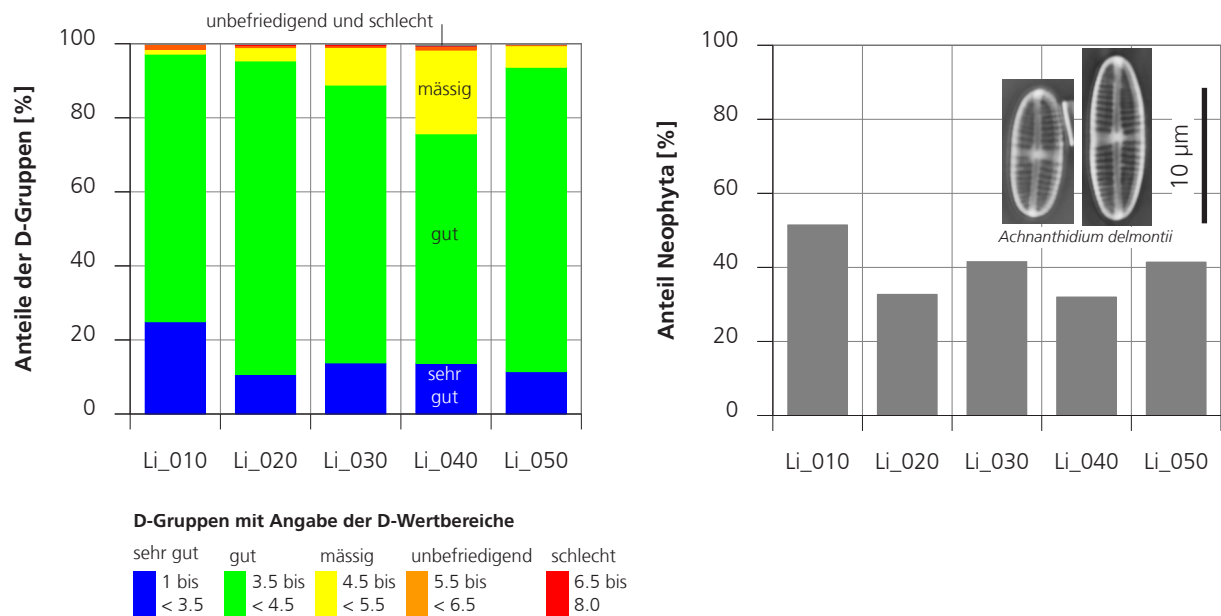


Abb. 4: Darstellung der D-Gruppen und des Anteils der Neobiota pro Transekt (Mittelwerte). Aufnahmen vom 16. bis 20. März 2020.

Links: Anteile der D-Gruppen. Die für die Bildung der D-Gruppen verwendeten D-Werte sind artspezifische Werte, welche für die Berechnung des Kieselalgenindex DI-CH benötigt werden. Die Farben und Bezeichnungen entsprechen den Zustandsklassen gemäss BAFU Modul Kieselalgen (BAFU 2007b). Die D-Wertbereiche sind in der Legende aufgeführt.

Rechts: Summe der Neobiota, wobei dieser Anteil zu fast 100 % durch das Taxon *Achnanthydium delmontii* bestimmt wird.

Messstelle Wettingen (Li_040) stetig zu. Offenbar bewirkten die gereinigten Abwässer eine erkennbare Verschiebung der Artenzusammensetzungen und somit der Lebensgemeinschaften.

Die Verbreitung des Neophyten *Achnanthes delmontii* erfolgt in der Schweiz seit rund 10 Jahren sehr erfolgreich. So besiedelt heute das Taxon fast alle Fließgewässer des Mittellandes. In grossen Flüssen dominiert das Taxon wie in der Limmat auch die Lebensgemeinschaft der Kieselalgen mit enorm hohen Anteilen.

An den 25 untersuchten Transektstellen wurden die gebietsfremden Algen *Achnanthes delmontii* und *Navicula jakovljevicii* nachgewiesen. *A. delmontii* kam bei allen Transektstellen mit Anteilen von rund 10 bis 77 % vor, wobei 9 der 25 untersuchten Transektstellen sogar einen Anteil von > 50 % aufwiesen (Abbildung 4). Auffällig war, dass *A. delmontii* die mittlere Flusssohle meist mit deutlich höheren Anteilen besiedelte wie die Uferbereiche. *N. jakovljevicii* war hingegen nur bei zwei Transektstellen und dort mit nur je einer Schale vertreten. *A. delmontii*, welche überall und gehäuft vorkam, prägte somit die Lebensgemeinschaften der Kieselalgen der untersuchten Messstellen. Die gebietsfremde Art *A. delmontii* dürfte für Mensch, Nutztiere und Infrastruktur keine Probleme geben. Das Taxon beeinflusst aber die Artenvielfalt in einem Fließgewässer sehr stark, indem es mit den hohen Zelldichten andere (standortgerechte) Arten verdrängt (AquaPlus 2020b).

Die biologisch indizierte Wasserqualität ist in Werdhölzli «sehr gut» und flussabwärts durchgehend «gut»

Betrachtet man die indizierte Wasserqualität hinsichtlich DI-CH Wert (Kieselalgen-Index) im Fließverlauf, so sind die Verhältnisse im Mittel sehr ähnlich. Der gemittelte DI-CH Wert der Messstelle Werdhölzli indiziert wenig bessere Verhältnisse als die folgenden Messstellen im Fließverlauf. Entspricht die Messstelle Werdhölzli als Mittelwert insgesamt noch der Zustandsklasse «sehr gut», fallen die sich flussabwärts befindenden vier anderen Stellen, wenn auch knapp, in die Zustandsklasse «gut» (Abb. 5).

Der DI-CH-Wert verbesserte sich in den letzten 35 Jahren

Zieht man alle uns bekannten Limmatuntersuchungen des Monats März der letzten 35 Jahre bei (1987-2020, 55 Proben, wobei Jahre mit total nur 2 Proben weggelassen wurden), wird eine über die Zeit leichte Verbesserung des DI-CH-Wertes erkennbar (AquaPlus 2020a). Die Änderungen des DI-CH-Wertes sind aber gering, nämlich von rund 3.9 nach 3.5.

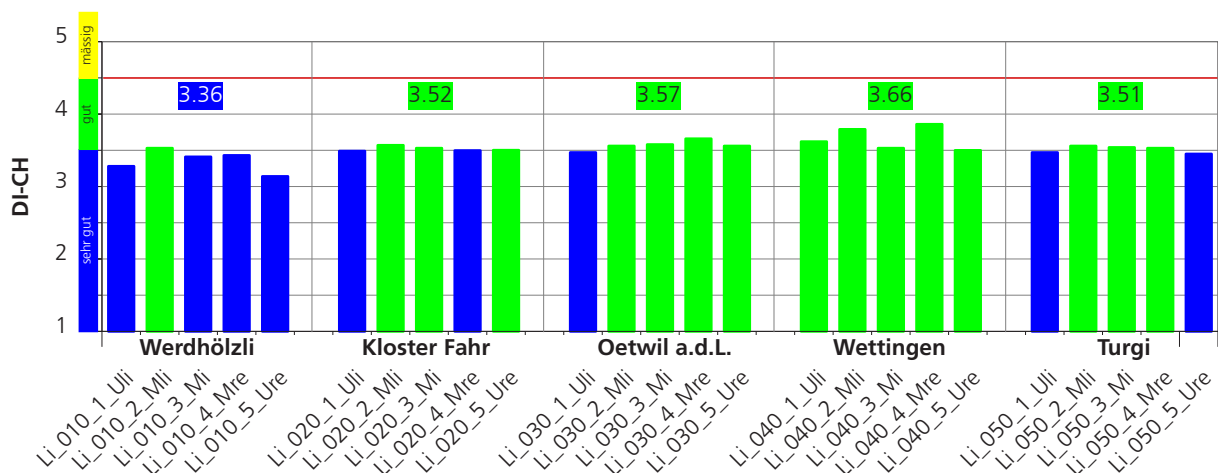


Abb. 5: Darstellung des Kieselalgen-Indexwertes DI-CH im Fließverlauf der Limmat. Aufnahmen vom 16. bis 20. März 2020.

Die Farbskala bei der Y-Achse entspricht den ersten drei Zustandsklassen gemäss BAFU Modul Kieselalgen (BAFU 2007b). Rote Linie: Ab einem DI-CH von 4.5, werden die ökologischen Ziele der GSchV, Anhang 1 nicht mehr erfüllt.

4.4 Wasserwirbellose (Makrozoobenthos)

Sehr geringe und gegenüber dem März 2010 reduzierte Besiedlungsdichten

Die Ausbreitung des Neozoons *Dikerogammarus vilosus* in der Limmat erfolgte im Jahr 2006 vom Zürichsee her Limmat abwärts (Steinmann 2006). In der Sihl kommt *Dikerogammarus vilosus* gemäss Aussage von Herrn Patrick Steinmann bis heute nicht vor. Spätestes im Jahr 2010 war die Besiedlung bis zur Mündung in die Aare erfolgt.

Seeabfluss des Zürichsees und die zahlreichen Staubereiche führen zu einer verstärkten Potamalisierung der Limmat

Das Makrozoobenthos der Limmat wies pro Messstelle mittlere Individuendichten von rund 2'000 bis 4'000 Ind./m² auf. Während im Fliessverlauf die Individuendichten mehrheitlich vergleichbar waren, wiesen die drei Tauchproben pro Messstelle eine dichtere Besiedlung auf. Die Besiedlungsdichten sind für einen Mittelstandfluss der Schweiz sehr gering und auch im Vergleich zur Untersuchungskampagne 2010 fallen sie sehr tief aus.

Auch die Zusammensetzung der Besiedlung nach Grossgruppen hat sich seit 2010 stark verändert, wobei der Vergleich nur mit den untersten beiden Messstellen Wettingen und Turgi möglich ist (Abbildung 6). So hat sich der Anteil der Crustaceen deutlich erhöht. Dies liegt zum Teil an der Einschleppung des Neozoons *Echinogammarus ischnus*, der an allen Messstellen hohe Dichten erreicht hat. Gleichzeitig sind die absoluten Dichten des bereits 2010 vorhandenen Neozoons *Dikerogammarus vilosus* auf einem ähnlichen Niveau wie 2010. Durch die stark reduzierten Gesamtdichten führt dies gleichzeitig zu einem höheren relativen Anteil dieser Art. Von der Reduktion am stärksten betroffen sind die Insekten. So sind die Eintagsfliegenlarven fast vollständig verschwunden und die Stein- und Köcherfliegenlarven stark reduziert. Andere, auch sonst seltenere Gruppen sind ebenfalls betroffen.

Das Makrozoobenthos wurde deutlich von potamal orientierten Arten geprägt. Der Zürichsee, wie auch die diversen Staustufen, aus welchen möglicherweise auch Individuen ausgeschwemmt wurden, dürften Erklärungen für diese Ausprägung der Artenzusammensetzung sein. Im Weiteren wurde das Makrozoobenthos durch Weidegänger und Sammler, respektive passive Filtrierer dominiert. Filtrierer sind typische Ernährungsformen unterhalb von Seen und Staustufen. Sie profitieren von der Drift an Nahrungspartikeln. Mit räuberischer Ernährung traten vor allem die beiden Neozoen *Dikerogammarus vilosus* und *Echinogammarus ischnus* auf.

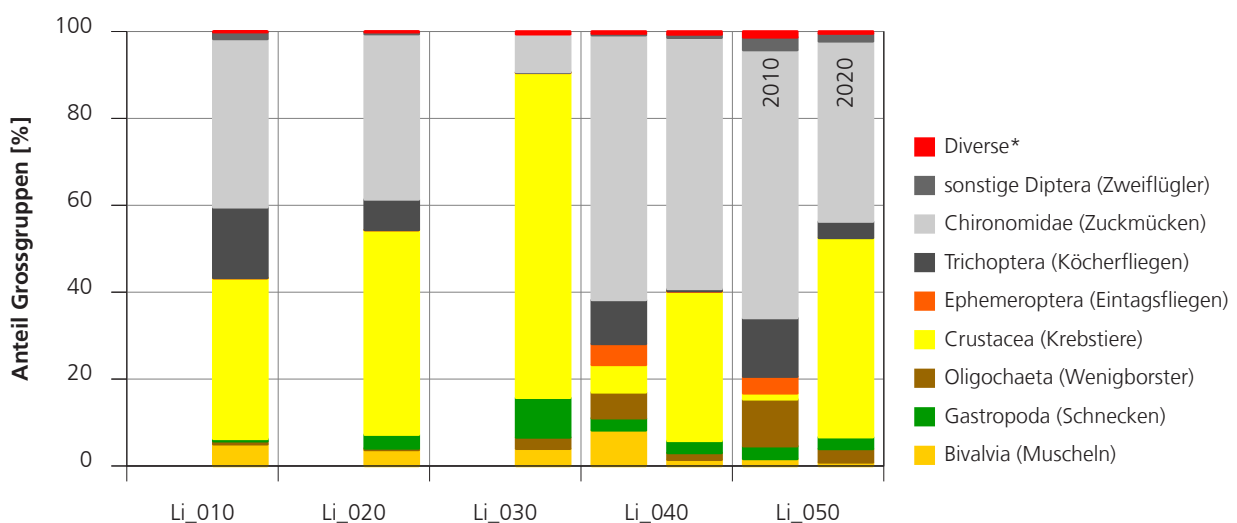


Abb. 6: Zusammensetzung des Makrozoobenthos in der Limmat nach Organismengruppen im März 2010 (linke Balken) und März 2020 (rechte Balken).

* Diverse = Turbellaria (Strudelwürmer), Hirudinea (Egel), Coleoptera (Käfer) und weitere Taxa.



Abb. 7: Fotodokumentation von in der Limmat vorgefundenen Neozoen im März 2020.

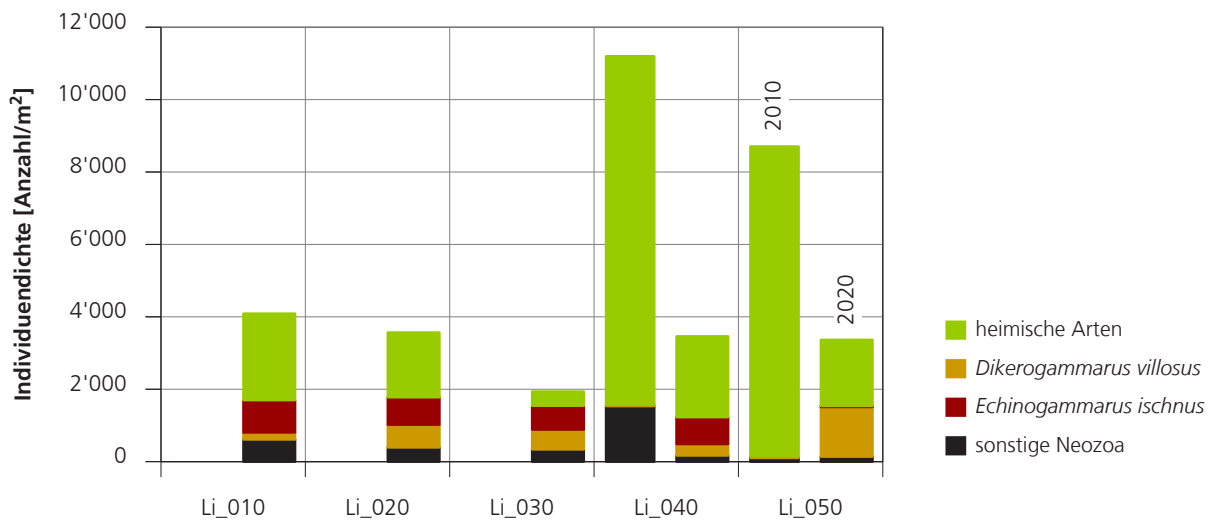


Abb. 8: Individuendichten der wichtigsten Neozoenarten und heimischer Arten in der Limmat im März 2010 (linke Balken) und im März 2020 (rechte Balken).

In der Limmat sind diverse Neozoen bereits seit vielen Jahren etabliert (Abbildung 7 und 8). Bereits im Jahr 2010 wurden sechs Arten festgestellt: *Dugesia tigrina*, *Physella acuta/heterostropha*, *Potamopyrgus antipodarum*, *Dreissena polymorpha*, *Dikerogammarus villosus* und *Jaera sarsi*. Während der Kampagne 2020 sind die Tigerplanarie (*Dugesia tigrina*) und die Spitze Blasenschnecke (*Physella acuta/heterostropha*) nicht wieder aufgetaucht. Dafür sind einige Arten hinzugekommen. Dies betrifft teilweise eher unauffällige Arten wie der Kiemenwurm (*Branchiura sowerbyi*) oder den Urzeitkrebs *Triops* sp., aber auch die Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*) und vor allem den Gammariden *Echinogammarus ischnus* (Stachelflohkrebs). Die in den letzten Jahren in einigen Gewässern der Schweiz eingeschleppte stark invasive Quagga-Muschel (*Dreissena bugensis*) wurde in der Limmat nicht gefunden.

Neuer hochinvasiver Flohkrebs *Echinogammarus ischnus* bereits in hohen Dichten

Den massiven Artenverlust stelle Patrick Steinmann (AWEL) bereits 2018 aufgrund von Beobachtungen in der Limmat im Rahmen von Routineuntersuchungen sowie der NAWA-Probenahmen fest - ohne eine offensichtliche Ursache zu erkennen. Dieser Einbruch, insbesondere der Insekten (EPT), wurde auch im Jahr 2019 und nun im Jahr 2020 erneut an allen fünf Messstellen festgestellt.

Ist der massive Artenverlust eine Folge der Neozoen?

Neben den sehr niedrigen Besiedlungsdichten, sind auch die Artenzahlen gegenüber 2010 sehr stark zurückgegangen (Abbildung 9). Knapp zwei Drittel der damals gefundenen Taxa sind verlorengegangen. Dies ist bedeutend, da Taxazahlen – im Vergleich zu Besiedlungsdichten – allgemein geringeren zeitlichen Schwankungen zwischen den Jahren unterworfen sind. Die 2020 gefundenen Taxazahlen sind auch gegenüber vergleichbaren Gewässern äusserst gering. Diese Feststellung des Rückgangs der Artenvielfalt wurde bereits in den Vorjahren beobachtet. Die Ursache für diesen starken Rückgang lässt sich nicht sicher festlegen, da sich die meisten Parameter in der Limmat in den letzten 10 Jahren kaum und wenn, dann eher positiv verändert haben. Die Gewässermorphologie hat sich beispielsweise aufgrund von Revitalisierungen tendenziell verbessert und auch die Gewässerqualität ist basierend auf den chemischen Erhebungen der Nährstoffe wie auch den Bioindikatoren Kieselalgen und Makrozoobenthos mindestens «gut». Die Nährstofffrachten sind langfristig zurückgegangen und gemäss Website des AWEL seit mindestens 10 Jahren tief. Das im Feld beobachtete starke Algenwachstum auf dem Substrat deutet zwar auf eine gewisse Nährstofffracht hin, welche sich im Laufe der Zeit infolge der zunehmend besseren Reinigungsleistungen der Kläranlagen wohl eher verringert haben dürfte. Gegenüber all diesen positiven Verbesserungen, hat sich aber die thermische Situation verschlechtert. So sind in den Jahrzehnten lange anhaltende Trockenperioden vermehrt aufgetreten und die Wassertemperaturen messbar gestiegen. Da die Wassertemperatur biologische Prozesse (Verbreitung, Entwicklung, Fortpflanzung, Zersetzung etc.) beeinflusst, sollte die Wassertemperatur in der Ursachenanalyse miteinbezogen werden.

Eine mögliche Erklärung für den Rückgang sind räuberische Neozoen. Bereits 2010 wurde der stark invasive und auch räuberisch lebende Grosse Höckerflohkrebs (*Dikerogammarus villosus*) in geringen Dichten in der Limmat festgestellt. Das Auftreten dieser Art führte beispielsweise im Hochrhein zu einem deutlichen Rückgang einheimischer Arten. Neu hinzugekommen ist der ebenfalls invasive Stachelflohkrebs *Echinogammarus ischnus*, der an allen Messstellen ähnliche Dichten wie *D. villosus* erreichte ausser bei Turgi. Zusammen stellen die beiden Arten, je nach Messstelle, bis zu 50 % der gesamten Individuendichte. Spannend ist die offenbar erfolgreiche gleichberechtigte Koexistenz der beiden invasiven und räuberischen Arten. Da *D. villosus* deutlich grösser ist als *E. ischnus* und als aggressiver angesehen wird, muss *E. ischnus* mindestens teilweise eine andere Nische besetzen. Zusammen könnten *D. villosus* und *E. ischnus* einen stärkeren Einfluss auf das heimische Zoobenthos haben als alleine. Entsprechende Erfahrungen hierzu liegen bisher kaum vor.

In der Limmat kommen nur wenige und nur gering gefährdete Arten vor

Im Rahmen der Untersuchung des Jahres 2020 wurden nur wenige Arten der Roten Listen bedrohter Tierarten der Schweiz gefunden. Es waren dies ein Einzeltier der Eintagsfliegenlarve *Potamanthus luteus* (NT, potenziell gefährdet), welche im Jahr 2010 noch häufig war, eine Larve der Gemeinen Keiljungfer *Gomphus vulgaticissimus* (NT) sowie wenige Individuen der Muschelart *Pisidium amnicum* (NT). Im Vergleich mit anderen grossen Flüssen der Schweiz sind Anzahl und Auftretenswahrscheinlichkeit von Rote Liste-Arten in der Limmat gering. Dies war nach den insgesamt geringen Taxazahlen zu erwarten.

Saprobieindex indiziert den Zustand «gut»

Neben diesem starken Rückgang der Artenvielfalt gibt es weitere Ergebnisse, die sowohl 2010 als auch 2020 festgestellt wurden. So zeigt beispielsweise der Saprobienindex während beider Kampagnen und an allen Messstellen eine höhere Nährstoffbelastung («gut») an als die kantonalen chemischen Nährstoffmessungen («sehr gut»). Das Zoobenthos indizierte somit hinsichtlich der organischen Belastung ähnliche Verhältnisse wie die Kieselalgen, ermittelt mit dem Indexwert DI-CH (Kapitel 4.3).

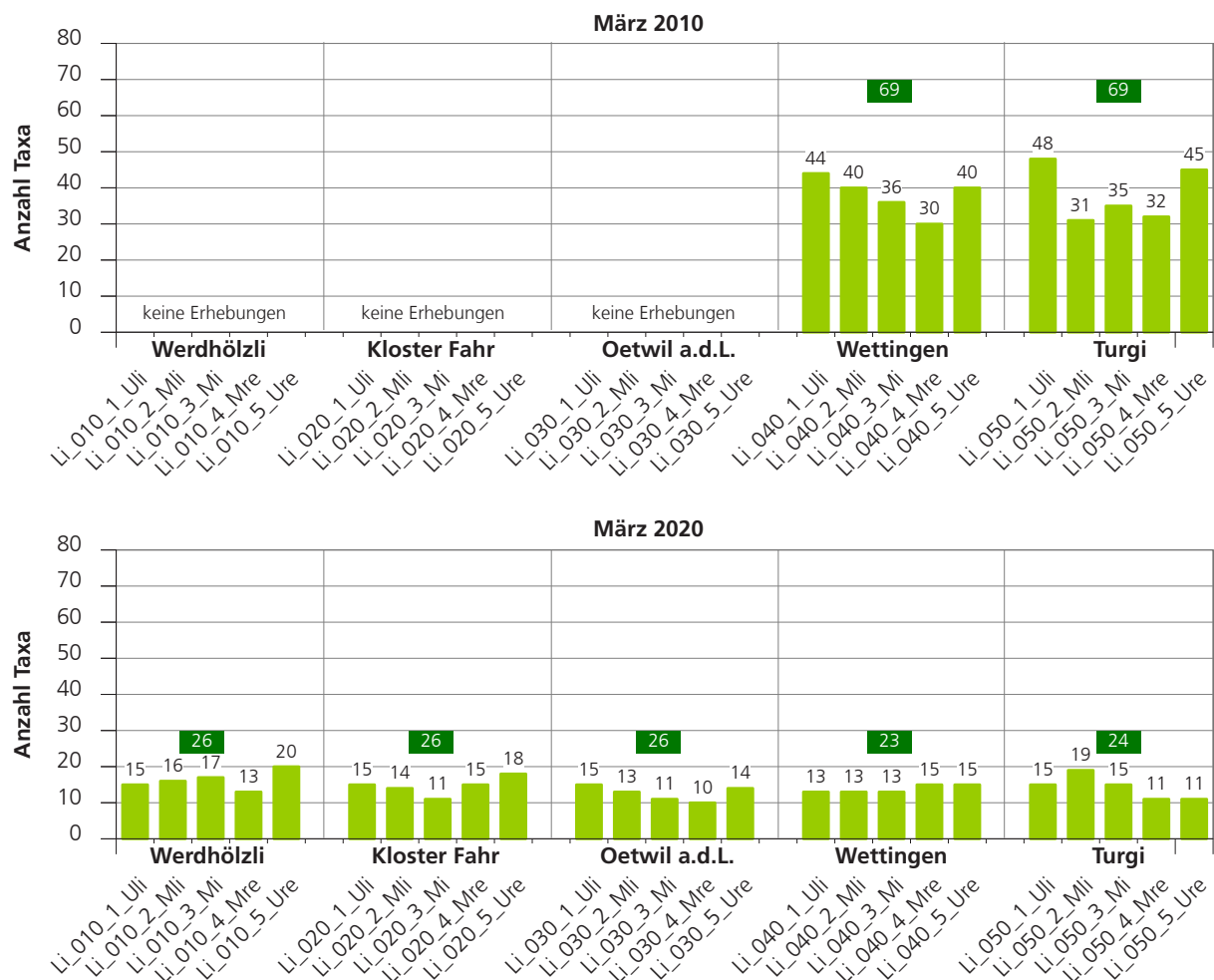


Abb. 5: Taxazahlen der Wasserwirbellosen aller Teilproben sowie der gesamten Transekte (weisse Zahl) in der Limmat.

Oben: Taxazahlen der Untersuchungskampagne März 2010. Unten: Taxazahlen der Untersuchungskampagne März 2020.

4.5 Umwelt-DNA (eDNA)

Alle mit dem Zoobenthos erfassten Zielarten auch per eDNA ermittelt

Analyse von Parallelproben zwingend

Verdriftung von eDNA

Die eDNA-Untersuchungen erfolgten nur an der obersten Messstelle Werdhölzli (Li_010) und an der untersten Messstelle Turgi (Li_050). Die eDNA-Proben wurden mit dem Verfahren des Metabarcodings gezielt auf die Präsenz von 13 gebietsfremden Benthosarten sowie der invasiven Schwarzmundgrundel analysiert. Zudem wurde mittels spezifischer PCR die Präsenz der Fischkrankheit PKD getestet. Von den gesuchten 13 gebietsfremden Benthosarten wurden 8 mit der eDNA-Methode nachgewiesen. Sechs dieser 8 Taxa wurden auch mittels der Untersuchung des Zoobenthos gefunden und zwar an zwei bis fünf Messstellen. Diese Zuverlässigkeit der eDNA-Untersuchungen ergibt sich allerdings nur, wenn die Resultate der pro Transekt entnommenen vier Proben zusammengefasst werden. Bei einer geringeren Probenanzahl wären wahrscheinlich selbst dominante Arten übersehen worden (z.B. *Echinogammarus ischnus*).

Nicht in den Benthosproben gefunden wurden einzig die Schwebegarnele *Limnomysis benedeni* (kommt im Zürichsee vor) und die Schnecke *Physella acuta/heterostropha*, welche im Jahr 2010 in der Limmat noch vorkam. So kann angenommen werden, dass diese Schnecke in kleinen Restvorkommen in der Limmat ausserhalb der Messstellen oder in Zuflüssen noch vorkommt. Es bestehen viele Möglichkeiten zur Ver- und Eindriftung von eDNA bis zur Wasserentnahmestelle: Verdriftung entlang eines Fließgewässers, Eindrift aus Zürichsee, Zuflüssen, Kanalisation, Abflüssen von Tierhälterungen, Aquarien etc.. Daher müssen mittels eDNA erhobene Resultate gewässerökologisch beurteilt werden.

Tab. 2: Resultate der Auswertung der Zielartenanalyse sowie des Nachweises der Fischkrankheit PKD pro Messstelle im Fließverlauf der Limmat im März 2020.

Links: Zielartenanalyse mittels eDNA und Untersuchung des Makrozoobenthos von Neozoen-Arten (Hirudinea: *Barbronia weberi*; Oligochaeta: *Branchiura sowerbyi*; Turbellaria: *Dugesia tigrina*; Amphipoda: *Chelicorophium curvispinum*, *Dikerogammarus villosus*, *Echinogammarus ischnus*; Mysida: *Limnomysis benedeni*; Bivalvia: *Corbicula fluminea*, *Dreissena polymorpha*, *Dreissena rostriformis*; Gastropoda: *Physella acuta/heterostropha*, *Potamopyrgus antipodarum*) und der seltenen einheimischen Gemeinen Kahnschnecke *Theodoxus fluviatilis* (Gastropoda), welche im Zürichsee im Jahr 1997 ausgesetzt wurde.

Rechts: Analyse nur mittels eDNA: Neozoon *Neogobius* sp. (Schwarzmundgrundel, Fisch) und Fischkrankheit PKD.

		Zielartenanalyse mittels eDNA und Makrozoobenthos												Fische		
		<i>Barbronia weberi</i>	<i>Branchiura sowerbyi</i>	<i>Dugesia tigrina</i>	<i>Chelicorophium curvispinum</i>	<i>Dikerogammarus villosus</i>	<i>Echinogammarus ischnus</i>	<i>Limnomysis benedeni</i>	<i>Corbicula fluminea</i>	<i>Dreissena polymorpha</i>	<i>Dreissena rostriformis</i>	<i>Physella acuta/heterostropha</i>	<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	<i>Theodoxus fluviatilis</i>	Neogobius sp.	PKD Proliferative Kidney Disease
Li_010	Werdhölzli	eDNA	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
	MZB	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-		
Li_020	Kloster Fahr	MZB	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-		
Li_030	Oetwil a.d.L.	MZB	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-		
Li_040	Wettingen	MZB	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-		
Li_050	Turgi	MZB	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	✓	-		
	eDNA	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-

5 Fazit

*Gewässersohle
beeinträchtigt*

Der **Äussere Aspekt** manifestierte sich mit Beeinträchtigungen der Gewässersohle in den Uferbereichen und regelmässig und wiederholt ab der Stelle Oetwil a.d.L. Die fliessende Welle war bis auf wenig Schaum nicht beeinträchtigt.

*Veralgung der Ufer
von Oetwil a.d.L. an
flussabwärts und da-
mit erkennbare Eutro-
phierung der Limmat
im Fliessverlauf*

Beim **pflanzlichen Bewuchs** prägten die fädigen Algen den makroskopischen Eindruck der untersuchten Messstellen. Die Algenbewuchsdichte nahm im Fliessverlauf zu. An einigen Transektstellen war der Kieselalgenbewuchs der Uferstellen so stark, dass die Konturen der Steine zum Teil weitflächig nicht mehr erkannt werden konnten (von Oetwil a.d.L. an flussabwärts). Die Anforderungen an die Fliessgewässer gemäss Anhang 2 der GSchV dürften an diesen Transektstellen aufgrund der starken Veralgung nicht erfüllt sein. Die Algenbewuchsdichte, die resultierende pflanzliche Biomasse und die damit verbundenen Folgeprozesse (Mineralisierung, Sedimentation, Kolmation) sind deutliche Anzeichen für eine Eutrophierung der Limmat im Fliessverlauf.

*Zustandsklasse bei
Werdhölzli «sehr gut»
und anschliessend bis
Turgi «gut»*

Bezüglich der **Lebensgemeinschaft der Kieselalgen** ist die biologisch indizierte Wasserqualität hinsichtlich DI-CH-Wert sehr ähnlich. Die Messstelle Werdhölzli indiziert mit «sehr gut» wenig bessere Verhältnisse wie die folgenden Messstellen im Fliessverlauf mit dem Zustand «gut». Auf Niveau der Anteile der D-Gruppen traten im Fliessverlauf erkennbare Verschiebungen der Artzusammensetzungen und somit der Lebensgemeinschaften auf. Der Einfluss der gereinigten Abwässer manifestierte sich somit weniger deutlich im Indexwert DI-CH wie in der Artzusammensetzung. Eine gebietsfremde Art, das Taxon *Achnanthydium delmontii* nahm an allen Stellen einen sehr hohen Anteil ein. Das Taxon verdrängte damit einheimische Arten. Die Lebensgemeinschaften der Kieselalgen entsprachen damit nicht den Vorstellungen der Standortgerechtigkeit.

*Dominanz der gebiets-
fremden Kieselalge
Achnanthydium del-
montii*

**Grosser Artenver-
lust insbesondere
bei den EPT-Taxa im
Vergleich zu 2010**

Die **Lebensgemeinschaft der Wasserwirbellosen** waren geprägt, sowohl durch sehr tiefe Artenzahlen, als auch durch geringe Besiedlungsdichten. Der Rückgang der Artenzahl lässt sich allerdings nur anhand der bereits 2010 beprobten Messstellen Wettingen und Turgi belegen. Die Daten der anderen Messstellen liegen allerdings im selben Bereich und sind im Vergleich mit anderen grossen Flüssen der Schweiz viel zu niedrig. Selbst in ökomorphologisch stark beeinträchtigten Abschnitten beispielsweise des Hochrheins werden höhere Taxazahlen erreicht. Der Einfluss des Zürichsees auf die Wasserwirbellose war ersichtlich. So kam es zu einer moderaten Potamalierung und einem erhöhten Vorkommen von passiven Filtrierern die vom Plankton des Sees profitieren. Diese Effekte zogen sich weitestgehend bis zur Einmündung in die Aare hin und werden im Verlauf der Limmat vermutlich durch die zahlreichen Staubereiche unterstützt.

*Passive Filtrier profi-
tieren von der Parti-
keldrift aus Zürichsee
und Staubereichen*

*eDNA-Analytik ergab
nachvollziehbare
Resultate*

Die **eDNA-Analytik** zeigte sich bei ausreichender analysierter Probenzahl als geeignete Methode um die Verbreitung einer vorher definierten Artengruppe zu erfassen. Es wurden in der Limmat aber auch die Schwebegarnele *Limnomysis benedeni* erfasst, welche vermutlich via DNA-Drift vom Zürichsee in die Limmat aus-

geschwemmt wurde. Die mit eDNA erhobenen Resultate bedingen somit eine zusätzliche gezielte gewässerökologische Einschätzung. Denn sonst droht die Gefahr, dass die Verbreitung einer Art falsch erfasst wird.

Handlungsbedarf zur Ursachenklärung des Artenverlustes

Sowohl die **Dominanz der Neobiota**, wie auch der **deutliche Rückgang der Arten** sind zwei wesentliche Erkenntnisse. Als Ursachen in Frage kommen der Einfluss der Neobiota, eine erhöhte Wassertemperatur, längere Trockenperioden, fehlende Geschiebedynamik, Mikroverunreinigungen oder eine Kombination dieser möglichen Ursachen.

Vollzug und Ausblick

Die Erkenntnisse aus der gewässerökologischen Untersuchung zeigen für die Vollzugspraxis in den Bereichen des Gewässer-, Arten- und Hochwasserschutzes sowie für die Wasserwirtschaft Defizite und Handlungsbedarfe auf (Tabelle 3). Massnahmen zur Förderung der Geschiebedynamik und der Strömungsvielfalt im Bereich der Stauhaltungen sowie der Rückbau der harten Uferverbauungen in Zusammenhang mit Hochwasserschutzmassnahmen (Aufweitungen, Aktivierung von Altarmen und Überflutung ehemaliger Auenlandschaften etc.) werden die Habitatvielfalt und damit die Lebensgemeinschaften positiv beeinflussen. Die Umsetzung der Massnahmen unter Berücksichtigung von Flora und Fauna wie auch weiteren Aspekten, kann insbesondere bei der Bekämpfung der Neobiota und der Verhinderung ihrer Ausbreitung wichtig sein.

Tab. 3: Defizite, Handlungsbedarfe und Entwicklungspotentiale der wichtigsten Vollzugsbereiche.

Die Planung und Umsetzung der Massnahmen bedingen einen grossen Koordinationsaufwand zwischen allen Akteuren. Es lassen sich aber damit Synergien nutzen.

Vollzugsbereich	Defizite	Handlungsbedarf	Entwicklungspotential
Gewässerschutz	Veralgungen, Schaumbildung Mikroverunreinigungen	weitergehende Abwassereinigungsverfahren	Reduktion von Mikroverunreinigungen
Artenschutz	Artenverluste bei Insektenlarven geringe Vielfalt an ökologischen Nischen Verbreitung von Neobiota	Ursachen klären Revitalisierungen Prävention gegen die Einschleppung weiterer Neobiota (wanderboote, Fischerei etc.)	Erhalt der Artenvielfalt Förderung ökologischer Nischen Umgang mit Neobiota
Hochwasserschutz	kanalisierter und kolmatierter Lauf Verbauung des Böschungsfusses	Aufweitungen, Geschiebemanagement Uferaufwertungen	Verbindung zu Grundwasser fördern Förderung ökologischer Nischen
Wasserwirtschaft	Auflandungen im Staubereich hohe Wassertemperaturen	Dynamisierung Abfluss, Geschiebemanagement thermischen Nutzungen (Kühlung)	Förderung der Strömungsvielfalt Kaltwasserbereiche fördern (Grundwasser-aufstösse, Zuflüsse)

6 Literaturverzeichnis

- AquaPlus (2010): Biologische Untersuchung der Limmat bei Turgi und Wettingen AG. Fachbericht Äusserer Aspekt und Flora. Untersuchungen vom 17./18. März 2010. Bericht im Auftrag des Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt, 60 Seiten inkl. Anhänge.
- AquaPlus (2020a): Biologische Untersuchung der Limmat 2020. Fachbericht Äusserer Aspekt und Flora. Untersuchungen vom 16. - 20. März 2020. Bericht im Auftrag des Kantons Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt und des Kantons Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, 147 Seiten inkl. Anhänge.
- AquaPlus (2020b): Gebietsfremde Algen in der Schweiz. Grundlagen und Situationsanalyse. Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Arten, Ökosysteme, Landschaften, Bern. 61 Seiten inkl. Anhänge.
- BAFU (2007a): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Äusserer Aspekt. Umwelt-Vollzug Nr. 07101. Bundesamt für Umwelt, Bern. 43 S.
- BAFU (2007b): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Kieselalgen Stufe F (flächendeckend). Umwelt-Vollzug Nr. 0740. Bundesamt für Umwelt, Bern. 130 S.
- BAFU GIS 2020: Geografische Informationen gemäss: <https://map.geo.admin.ch>
- Hydra (2010): Biologische Untersuchung der Limmat bei Turgi und Wettingen AG. Fachbericht Makrozoobenthos. Untersuchungen vom 17./18. März 2010. Bericht im Auftrag des Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt, 28 Seiten inkl. Anhänge.
- Hydra (2017): Methode zur Untersuchung und Beurteilung grosser Fliessgewässer Teil 2: MSK-Bewertungsmethode Makroinvertebraten in grossen Fliessgewässern; Methodenevaluation, Konzeptvorschlag. Stand: 31.01.2018, 115 Seiten.
- Hydra (2020): Biologische Untersuchung der Limmat 2020. Fachbericht Makrozoobenthos. Untersuchungen vom 16. - 20. März 2020. Bericht im Auftrag des Kantons Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt und des Kantons Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, 33 Seiten inkl. Anhänge.
- LANUV (2009): Benthische Algen ohne Diatomeen und Characeen - Bestimmungshilfe. LANUV-Arbeitsblatt 9. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen. 474 S.
- Steinmann, P. (2006): *Dikerogammarus villosus* im Zürichsee und in der Limmat. Auftraggeber AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Baudirektion Kanton Zürich, 22 Seiten.
- Thomas, E.A. & Schanz, F. (1976): Beziehungen zwischen Wasserchemismus und Primärproduktion in Fliessgewässern, ein limnologisches Problem. Vjsschr. Natf. Ges. Zürich, 121 (4), 309-317.
- WFN (2017): Abflussschwankungen in der Limmat. Gewässerökologische Beurteilung und Schadensschätzung. Bericht im Auftrag des Kantons Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, 57 Seiten.