



Erfolgskontrolle der Gewässer im Einzugsgebiet der Abwasserreinigungsanlagen im oberen Fricktal

ARA-Ausbauprogramm 1996-2009

Ambio GmbH, Dezember 2009

Herausgeber

Departement
Bau, Verkehr und Umwelt
Abteilung für Umwelt

Projektleitung

Arno Stöckli, Abteilung für Umwelt, Sektion Boden und Wasser

Autor

Markus Haberthür, Ambio GmbH, Zürich

Mitarbeit

Guido Erni, Untersiggenthal

Titelblatt: ARA Hornussen

Inhalt

1. Anlass der biologischen Erfolgskontrolle	7
2. Gewässerbeurteilung nach Modulstufenkonzept	9
2.1 Ausgewählte Kriterien für die Erfolgskontrollen	9
3. Entwicklung des Gewässerzustandes in der Übersicht	11
3.1 Äusserer Aspekt	11
3.2 Gewässerzustand gemäss der Kieselalgenindikation	14
4. Wirkung der Massnahmen bei einzelnen Abwasserreinigungsanlagen	15
4.1 ARA Hornussen	16
4.2 ARA Linn	18
4.3 Aufgehobene ARA Zeihen	20
5. Literatur	22
Anhang A1: Daten der Kieselalgen (Untersuchung 2009)	23
Anhang A2: Daten des äusseren Aspektes (Untersuchung 2009)	25
Anhang A3: Methoden	26

Zur Erfolgskontrolle des ARA-Ausbauprogrammes 1996-2009 im oberen Fricktal wurde der biologische Zustand der Sissle und zweier Zuflüsse im Einflussbereich von Abwasserreinigungsanlagen zweimal untersucht. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse zusammen. Durch die Sanierungsmassnahmen ist die Gewässerbelastung deutlich zurückgegangen. Die geprüften Anforderungen und ökologischen Ziele der Gewässerschutzverordnung werden heute bezüglich des äusseren Aspektes besser, bezüglich der Zeigerwerte der Kieselalgen an sieben von acht Stellen erfüllt.

Massnahmen

Im oberen Fricktal wurde die bestehende Abwasserreinigungsanlage von Hornussen im Jahr 2006 ausgebaut. Im Jahr darauf konnte die ARA Zeihen aufgehoben und deren Abwasser auf die ARA Hornussen geleitet werden. Die Anlage von Linn blieb unverändert. Ihre Aufhebung ist 2010 geplant.

Verbesserung des Gewässerzustands

Hinsichtlich der äusserlich sichtbaren Beurteilungskriterien wie Verschlammung, Trübung, Schaumbildung und Geruch hat sich die Situation im gesamten Gebiet in erheblichem Masse verbessert. Bei der Erstuntersuchung vor der Sanierung entsprach an 7 von 8 Untersuchungsstellen eines bis mehrere dieser Merkmale nicht mehr den Anforderungen der Gewässerschutzverordnung. Heute ist nur noch eine von acht Stellen bezüglich eines Merkmals (leichter Schaum) beeinträchtigt.

Mit den Massnahmen ist der früher an 5 von 8 Stellen auftretende Aufwuchs von sichtbaren, tierischen Einzellerkolonien verschwunden.

Die Sauerstoffversorgung in der Gewässersohle, eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung einer natürlichen, tierischen Lebensgemeinschaft, ist heute zumindest zeitweise leicht eingeschränkt. Die diesbezüglichen Anforderungen der GSchV sind an 6 von 8 Stellen nicht erfüllt. Verantwortlich sind sowohl natürliche (Tuffbil-

dung, Kolmation) als auch anthropogene Prozesse.

In den Zuflüssen der Sissle reduzierten die bisherigen Massnahmen sowohl die Gesamtbelastung (DI-CH) als auch die organische Belastung (Saprobie) signifikant. Vor Beginn der Sanierungsmassnahmen erreichte der Gewässerzustand des Zeiherbaches und des Sagenmülibaches in den Gewässerabschnitten unterhalb der ARA-Einleitungen die ökologischen Ziele der Gewässerschutzverordnung zum Teil bei weitem nicht mehr. Dabei fiel vor allem die hohe Belastung durch biologisch wirksame, organische Stoffe aus den Abwasserreinigungsanlagen ins Gewicht. In der Sissle wurden die betreffenden Anforderungen unterhalb der ARA Hornussen schon 1996 eingehalten.

In Bezug auf die Gesamtbelastung (DI-CH) genügten vor den Sanierungen 6 von 8 Stellen den Anforderungen. Bei 4 Stellen konnte der stoffliche Gewässerzustand als „sehr gut“ bei 2 als gut und bei je einer als „mässig“ bzw. „nicht befriedigend“ bezeichnet werden. Nach dem Stand der Sanierungen 2009, ist die durch Kieselalgen angezeigte Gewässerqualität an 7 untersuchten Stellen „gut“ bis „sehr gut.“ Und nur an einer Stelle „unbefriedigend“. Nach Stilllegung der ARA Linn sollte diese 2010 den Anforderungen entsprechen. Damit wären die wichtigsten gesetzlichen Anforderungen eingehalten und die ökologischen Ziele bezüglich der Wasserqualität erreicht.

Der Eintrag anorganischer Nährstoffe, insbesondere von Phosphor und Stickstoff, sowie anderer Stoffe ist in der Sissle gestiegen. Die Quellen müssen oberhalb der ARA Hornussen liegen. Bei den andern Abwasserreinigungsanlagen liegt der Düngungsgrad (gemäss dem Nährstoffindex der Kieselalgen) der Gewässer im Bereich früherer Werte. Insgesamt gelten alle untersuchten Gewässerabschnitte infolge der flächenhaften Nährstoffabschwemmung als „kritisch“ bis „auffallend“ mit Phosphor und Stickstoff belastet.

Was bleibt zu tun?

Die Belastung des Sagenmülibaches durch das

Abwasser aus der ARA Linn ist zu hoch. Weiter ist die Entwicklung der Eisensulfidflecken in den Gewässern des oberen Fricktals im Auge zu behalten.

Aufhebung der ARA Linn

Die Aufhebung der ARA Linn ist für 2010 vorgesehen. Die Verdünnungsverhältnisse im Sagenmülibach sind ungünstig, insbesondere in Trockenwetterphasen mit tiefen Abflusswerten. Auch werden die Betriebssicherheit und die Wirtschaftlichkeit der Abwasserreinigung mit der Zuleitung des Abwassers in die ARA Hornussen verbessert.

Sauerstoffhaushalt in der Bachsohle verbessern

Die erhöhte organische Abbautätigkeit sowie fehlende Sohlenverlagerungen führen stellen- und zeitweise zu Sauerstoffdefiziten in den Kleinlebensräumen der Bachsohle. Die festgestellte Kolmatierung infolge der Kalkausscheidungen ist jedoch nicht die primäre Ursache. Bei ausreichender Geschiebedynamik würden die sich bildenden Tuffschichten immer wieder aufgebrochen. Mit der Entfernung von Sohlenbefestigungen würden die Sohlenverlagerungen verstärkt, was die Zwischenräume von Feinmaterial befreit und insgesamt die Sauerstoffversorgung der Sohle verbessert. Zu prüfen ist auch, ob die verbleibende organische Belastung weiter gesenkt werden könnte.

1. **Anlass der biologischen Erfolgskontrolle**

Veränderte Rahmenbedingungen der Abwasserbehandlung

Die Infrastruktur zur Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung ist nicht für die Ewigkeit gebaut. Die Kanalisationssysteme und Abwasserreinigungsanlagen müssen laufend unterhalten und im gleichen Zuge den sich verändernden Anforderungen angepasst werden. Jährlich wächst die Siedlungsfläche in der Schweiz um rund zwei Prozent und erfordert eine laufende Erweiterung der Entwässerungssysteme. Die Problematik von Mikroverunreinigungen durch toxische und hormonaktive Spurenstoffe hat sich im letzten Jahrzehnt akzentuiert. Sie zeigt sich in schwindenden Fischpopulationen und Missbildungen bei Fischen.

Das Fernhalten von Fremdwasser aus der Abwasserkanalisation – gegenwärtig rund 33% der schweizerischen Abwassermenge – ist immer noch ein vorrangiges Ziel zur Steigerung der Reinigungseffizienz der Abwasserreinigungsanlagen. Der flächendeckende Verbund der Kanalisationsnetze ermöglicht eine Optimierung des Abwassermanagements und ein effizientere Bewirtschaftung der Abwasserreinigung. In diesem Zusammenhang ist auch der Ersatz der früher einzeln betriebenen, kleineren Abwasserreinigungsanlagen durch zentrale Grossanlagen mit wirkungsvolleren Reinigungstechnologien und besseren betriebswirtschaftlichen Eckwerten zu sehen.

Ende einer intensiven Investitionsphase

Die Rahmenbedingungen der Abwasserbehandlung haben sich auch im oberen Fricktal verändert. In der Folge wurden in den letzten fünf Jahren dort grössere Investitionen in die Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung getätigt. Dabei wurde die ARA Hornussen saniert und die ARA Zeihen aufgehoben. Die Aufhebung der ARA Linn ist für 2010 geplant.

Bestandteil des Qualitätsmanagements

Allein schon die beträchtlichen öffentlichen Investitionen verpflichten die kantonalen Gewässerschutzfachstellen die Wirkung der Gewässer-

schutzmassnahmen zu prüfen und die Öffentlichkeit über deren Erfolg zu informieren. Dies verlangt auch Art. 50 des Gewässerschutzgesetzes (GSchG). Die Erfolgskontrollen sind dabei als Teil eines umfassenden Systems zum Qualitätsmanagement der öffentlichen Umweltpolitik zu sehen.

Prüfung der Gesetzeskonformität

Die ökologischen Ziele und Anforderungen an die Wasserqualität für Fließgewässer sind in der Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 formuliert. Neben den Grenz- und Richtwerten für chemische und physikalische Qualitätskriterien umschreibt die Verordnung auch Anforderungen für den äusseren Aspekt (Farbe, Geruch, Trübung etc.) sowie den heterotrophen und pflanzlichen Bewuchs der Gewässersohle (Anhang A3). Die ökologischen Ziele streben bezüglich der organischen Belastungen (Saprobie) und des anorganischen Nährstoffeintrags (Trophie) einen biologischen Zustand an, der für nicht oder nur schwach belastete Gewässer typisch ist (Anhang A3).

Integrative Erfassung der Gewässerbelastung

In methodischer Hinsicht ergänzen sich die chemischen und biologischen Qualitätskriterien gegenseitig. Während chemische Untersuchungen in der Regel Momentaufnahmen der stoffspezifischen Wasserqualität darstellen, widerspiegeln die biologischen Erhebungen die längerfristige Wirkung der Belastungsfaktoren auf die Lebensprozesse im Gewässer. So können z. B. aus der Zusammensetzung der Wasserorganismen Rückschlüsse auf die Belastungsvorgänge im Gewässer gezogen werden. Diese können nicht nur auf stoffliche Aspekte, sondern auch auf hydrologische und gewässermorphologische Stressfaktoren ausgedehnt werden. Biologische Methoden eignen sich besonders für Erstaufnahmen der Wasserqualität und um generelle Qualitätsänderungen im Laufe eines Sanierungsvorhabens festzustellen.

Teil des aargauischen Überwachungskonzeptes für die Gewässer

Gestützt auf dem Grobkonzept für den Gewässerschutz der 90er Jahre [13] und den Folgerun-

gen eines Berichtes der Abteilung für Umwelt vom Juni 1993 zum Zustand der aargauischen Fließgewässer [14] wurden die Ziele für die biologische Überwachung des Gewässerzustandes im Kanton Aargau neu definiert. Diese sind:

1. *Erweiterung der Beurteilung der Wasserqualität auf die biologischen Qualitätsziele (Langzeitkontrolle)*
2. *Erfolgskontrolle der weitergehenden Abwasserreinigung (ARA-Ausbauphase der 90er Jahre) bezüglich der biologischen Gewässergüte*
3. *Flächendeckender Überblick über die biologische Wasserqualität (Optimierung des Mitteleinsatzes zur Feststellung von Abwasserunreinigungen)*
4. *Nachweis von akuten Gewässerverschmutzungen (Schadenfälle)*

Der vorliegende Bericht entspricht Punkt 2 des Untersuchungsprogrammes.

Wirkungsprüfung der Massnahmen bei den einzelnen Kläranlagen

Zur Erfolgskontrolle wurde anhand der Kieselalgen und des „Äusseren Aspektes“ untersucht, wie sich die Belastungsverminderung hinsichtlich absetzbarer Stoffe, organisch abbaubarer Stoffe, Phosphor und Stickstoff in den Gewässern auswirkte. Zu diesem Zweck wurden die von den ARA-Abwässern betroffenen Gewässerabschnitte vor und nach Ausführung der Sanierungsprojekte mit biologischen Methoden (siehe Kapitel 2 und Anhang 3) untersucht.

Alle betroffenen Gewässerabschnitte im oberen Fricktal wurden erstmals im den Jahren 1996 und 1997 untersucht. Nach den inzwischen abgeschlossenen weiteren Sanierungen wurden die Gewässer in diesem Jahr (2009) einer erneuten Erfolgskontrolle unterzogen.

2. Gewässerbeurteilung nach Modulstufenkonzept

Das Gewässerschutzgesetz (GSchG) verlangt nicht nur die Erhaltung einer guten Wasserqualität und der vielfältigen Funktionen der Gewässer als Lebensraum für Pflanzen und Tiere, sondern auch eine nachhaltige Nutzung durch den Menschen. Für die Überwachung von Fließgewässern ergeben sich daraus unterschiedlichste Anforderungen und Qualitätskriterien, welche in der Gewässerschutzverordnung (GSchV) und im „Modul-Stufen-Konzept zur Untersuchung der Fließgewässer“ [11] beschrieben sind.

Bereiche	Module	Stufen		
	Äusserer Aspekt	–	–	–
Hydrologie und Morphologie	Abflussverhalten	F	S	A
	Gewässerform	F	S	A
Biologie	Kieselalgen	F	–	A
	Wasser- und Sumpfpflanzen	F	S	A
	Ufervegetation	F	S	A
	Wirbellose	F	S	A
Stoffe	Fische	F	S	A
	Chemie	F	S	A
	Umweltschädlichkeit	F	S	A

Figur 1: Bei den ARA-Erfolgskontrollen zur Anwendung gelangte Bewertungsmodule des Modul-Stufen-Konzeptes.

Das Modul-Stufen-Konzept wird der Notwendigkeit gerecht, dass die Bewertung von Fließgewässern entsprechend der Problemstellung mit unterschiedlichen und differenzierten Ansätzen erfolgen muss. Es unterscheidet zwischen den drei Fließgewässerbereichen „Abflussverhalten und Gewässerform,“ „Gewässerorganismen“ und „Wasserinhaltsstoffe.“ Dazu bietet es gegenwärtig 10 Bewertungsmodule, mit denen sich die Gewässer flächendeckend (Stufe F), systembezogen (Stufe S) und abschnittsweise (Stufe A) bewerten lassen (Figur 1). Dabei ist festzuhalten, dass die Bewertung je nach Modul und Stufe eine unterschiedliche zeitliche Gültigkeit hat.

2.1 Ausgewählte Kriterien für die Erfolgskontrollen

Zur Erfolgskontrolle des ARA-Ausbauprogrammes erwies sich eine Bewertung nach den Modulen **Kieselalgen, Stufen F und A** und **Äusserer Aspekt** am zweckmässigsten und kostengünstigsten.

Modul Äusserer Aspekt

Der äussere Aspekt eines Gewässers wurde gemäss dem entsprechenden Modul [12] nach 7 Kriterien geprüft und bewertet (siehe Figur 2). Die Kriterien „Kolmation“ und „Feststoffe“ sind nicht berücksichtigt.

Kriterium	Bewertung		
heterotropher Bewuchs	kein	<25%	?25%
Eisensulfid	kein	<25%	?25%
Schlamm	kein	wenig/mittel	viel
Schaum	kein	wenig/mittel	viel
Trübung	keine	leicht/mittel	stark
Verfärbung	keine	leicht/mittel	stark
Geruch	kein	leicht/mittel	stark
Kolmation	keine	leicht/mittel	stark
Feststoffe	keine	vereinzelt	viele

starke Beeinträchtigung, GSchV nicht erfüllt. Massnahmen gemäss GSchV, Art. 47	
schwache bis mässige Beeinträchtigung, GSchV nicht erfüllt. Massnahmen nach Art. 47	
keine Beeinträchtigung, GSchV erfüllt. Keine Massnahmen	

Figur 2: Bewertungskriterien und Bewertungsskala des Moduls „äusserer Aspekt“.

Modul Kieselalgen, Stufe F

Im Modul „Kieselalgen“ [10] wird die aus den Proben ermittelte Indexzahl nach einer fünfstufigen Skala bewertet. Der schweizerische Diatomeenindex (DI-CH) erlaubt die Bewertung der Wasserqualität auf Stufe F (generelle Indikation der chemischen Belastung).

DI-CH	Bewertung	
1.00-3.49	sehr gut	GSchV erfüllt
3.50-4.49	gut	
4.50-5.49	mässig	GSchV nicht erfüllt
5.50-6.49	unbefriedigend	
6.50-8.00	schlecht	

Figur 3: Bewertungskriterien und Bewertungsskala des Moduls „Kieselalgen“ auf der Stufe F.

Bei den Stufen „sehr gut“ und „gut“ sind die Anforderungen der Gewässerschutzverordnung (GSchV) erfüllt, bei den Stufen „mässig“, „unbe-

friedigend“ und „schlecht“ hingegen nicht (siehe Figur 3).

Modul Kieselalgen, Stufe A

Die Zusammensetzung der Kieselalgen wurde zudem nach weiteren Zeigereigenschaften untersucht, die eine differenzierte Beurteilung hinsichtlich der Saprobie und der Trophie ermöglicht.

Gewässergütestufe		
I	oligosaprob	GSchV erfüllt
I - II	oligo – β -mesosaprob	
II	β -mesosaprob	
II - III	β -mesosaprob – α -mesosaprob	GSchV nicht erfüllt
III	α -mesosaprob	
III - IV	α -mesosaprob – polysaprob	
IV	polysaprob	

Figur 4: Bewertungsskala der Saprobie nach Lange-Bertalot, Hofmann und Reichardt.

Die Methode von Lange-Bertalot [4], Hofmann [7] und Reichardt [8] nutzt vor allem die saprobiologischen Eigenschaften (= Wirkung der organischen Belastung auf die Kieselalgenzusammensetzung) der Kieselalgen. Sie bewertet die organische Belastung nach folgenden 7 Stufen (siehe Figur 4)

Tropiestufen	Indexbereiche
unbelastet (oligotroph)	1.0 – 1.4
schwach belastet (oligotroph-mesotroph)	1.5 – 1.8
deutlich belastet (mesotroph)	1.9 – 2.2
kritisch belastet (mesotroph – eutroph)	2.3 – 2.7
auffallend belastet (eutroph)	2.8 – 3.1
stark belastet (eutroph – hypertroph)	3.2 – 3.5
sehr stark belastet (hypertroph)	3.6 – 4.0

Figur 5: Bewertungsskala der Trophie nach Schiefele und Kohmann.

Die Methode von Schiefele und Kohmann [6] erlaubt es, anhand der Kieselalgenzusammensetzung die Nährstoffumsetzung (Trophie) in einem

Fliessgewässer anhand eines Trophieindex abzuschätzen. Dabei wird nach 7 Trophiestufen unterschieden (siehe Figur 5).

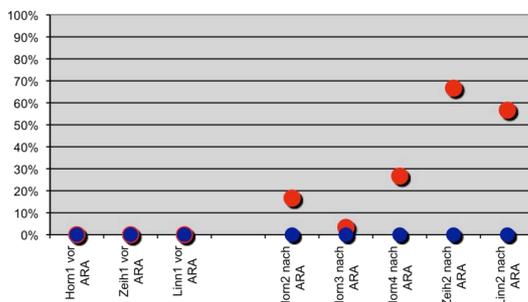
3. Entwicklung des Gewässerzustandes in der Übersicht

3.1 Äusserer Aspekt

Die Massnahmen bezüglich der Abwasserreinigung im oberen Fricktal haben den äusseren Aspekt in der Sissle und in den beiden untersuchten Zuflüssen insgesamt verbessert. Vor Beginn der Sanierungsphase waren die Gewässer hinsichtlich mehrerer äusserer Merkmale zu beanstanden. Dies ist nun mit den durchgeführten Sanierungsmassnahmen nur noch bezüglich auftretender Eisensulfidflecken der Fall.

Kein heterotropher Bewuchs mehr

Der Sanierungserfolg zeigt sich vor allem im deutlichen Rückgang des heterotrophen Bewuchses. 1996 und 97 wurde an allen Stellen unterhalb der ARA-Einleitungen sichtbarer, heterotropher Bewuchs festgestellt. Die Häufigkeit der Steine mit sichtbaren Ciliatenbelägen lag damals zwischen 17% und 67%. Die ARA Hornussen hatte mit einer Häufigkeit von 17% noch den geringsten Einfluss aufs Gewässer. Im Sagenmülibach unterhalb der ARA Linn wiesen 57% und im Zeiherbach unterhalb der heute aufgehobenen ARA Zeihen gar 67% der Steine sichtbaren heterotrophen Bewuchs auf. Mit der Realisierung der bisherigen Sanierungsmassnahmen ist der heterotrophe Bewuchs unmittelbar unterhalb der ARA-Einleitungen nicht mehr sichtbar.



Figur 6: Prozentualer Anteil der Steine mit heterotrophem Bewuchs an den untersuchten Stellen im Oberen Fricktal. Rot vor der Sanierung, blau nach der Sanierung.

Der Befund zeigt, dass durch die Sanierungen deutlich weniger partikuläre organische Stoffe

aus den Abwasserreinigungsanlagen in die Sissle gelangen.

Neu verstärkt Eisensulfid vorhanden

2009 traten an 6 von 8 Stellen im oberen Fricktal Eisensulfidflecken auf. An den 6 Stellen wiesen zwischen 3% und 20% der untersuchten Steine Flecken auf. Gegenüber früheren Untersuchungen hat diesbezüglich eine deutliche Zunahme stattgefunden. Das verbreitete Auftreten von sichtbarem Eisensulfid zeigt, dass die Sauerstoffversorgung in der Bachsohle über weite Strecken zumindest zeitweise leicht beeinträchtigt ist. Zu einem Teil ist dies durch die natürlichen Kalkausscheidungen und die dadurch entstehende Kolmation zurückzuführen.

Verschwunden sind seit 1996 an allen Stellen die Verschlämzung, Trübung und Geruch. Die früheren Schaumbildungstendenzen haben ebenfalls abgenommen und sind 2009 nur noch unterhalb der ARA Linn vorhanden.

Insgesamt haben die Massnahmen den äusseren Aspekt der Gewässer im oberen Fricktal verbessert. Die diesbezüglichen Anforderungen sind aber noch nicht vollumfänglich erfüllt (Eisensulfid).

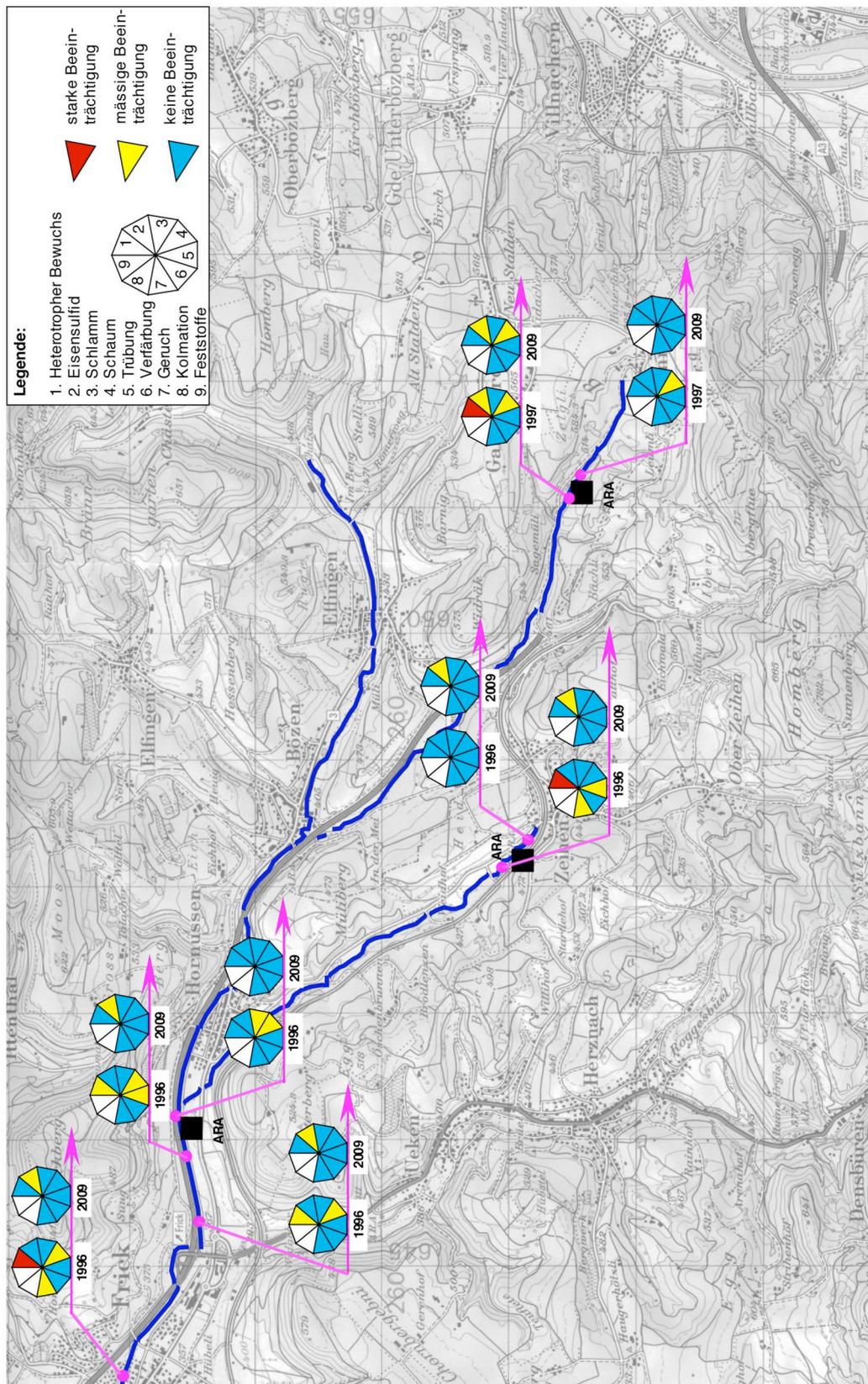


Abbildung 1 : Entwicklung des äusseren Aspektes der Gewässer im oberen Fricktal zwischen 1996 und 2009. Die Merkmale 8 (Kolimation) und 9 (Feststoffe) wurden nicht untersucht.

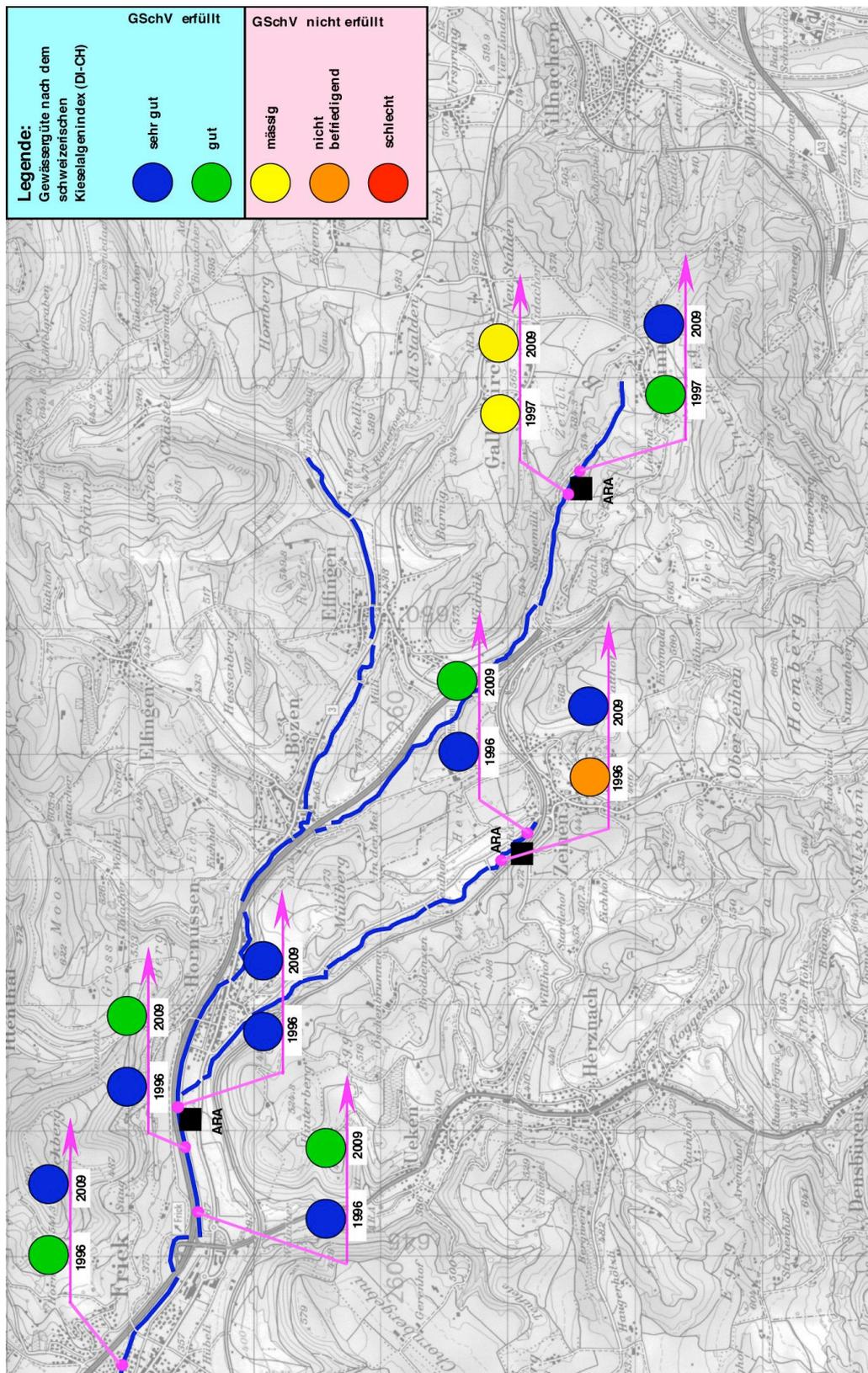


Abbildung 2: Entwicklung der Gesamtbelastung (DI-CH) der Gewässer im oberen Fricktal zwischen 1996 und 2009.

3.2 Gewässerzustand gemäss der Kieselalgenindikation

Durch das ARA-Ausbauprogramm hat sich vor allem die Belastungssituation in den beiden untersuchten Zuflüssen der Sissle verbessert. Vor Beginn der Sanierungsphase erfüllte die Stoffbelastung des Sagenmüli- und des Zeiherbaches an 3 von 4 untersuchten Stellen die Anforderung der Gewässerschutzverordnung nicht mehr. Dies sowohl aufgrund der hohen Belastung durch biologisch wirksame, organische Stoffe als auch bezüglich der Gesamtbelastung (DI-CH). Mit der Realisierung der bisherigen Sanierungsmaßnahmen sind die Anforderungen im gesamten Einzugsgebiet des oberen Fricktals hinsichtlich der Gesamtbelastung an 4 Stellen als „sehr gut“ und an 3 Stellen als „gut“ und an der Stelle unterhalb der ARA Linn als „mässig“ zu bezeichnen. Bezüglich der organischen Belastung sind die Anforderungen an allen 8 Stellen erfüllt.

Abnahme der Gesamtbelastung in den kleineren Zuflüssen der Sissle

Die Aufhebung der ARA Zeihen und Massnahmen in der Siedlungsentwässerung der ARA Linn führten zu einer wesentlichen geringeren der Belastung der Gewässer. Der Belastungsindex DI-CH reagierte vor allem unterhalb der ehemaligen ARA Zeihen mit einer Abnahme von 6.00 auf 2.72 und oberhalb der ARA Linn (Abnahme von 4.35 auf 2.04) positiv auf die Sanierungen. In Linn gelangt das Abwasser nun nur noch über die ARA ins Gewässer. Allerdings genügt deren Reinigungsleistung nicht. Der DI-CH ist dort praktisch gleichgeblieben (1997: 4.99, 2009: 4.91). Dies hinsichtlich anorganischer und/oder biologisch nicht abbaubarer organischer Stoffe.

Der Belastungseinfluss durch das Abwasser aus der ARA Hornussen hat sich ebenfalls nicht verändert. Der Unterschied beträgt in beiden Untersuchungsjahren ca. 0.9 Einheiten. Er manifestiert sich aber 2009 auf einem höheren Belastungsniveau als früher. Durch das ARA Abwasser stieg der Belastungsindex 1996 unmittelbar unterhalb des ARA Ausflusses von 2.50 vor der ARA auf 3.36, 2009 von 3.36 auf 4.25. Der Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsjahren ist somit nicht auf eine eigentliche Mehrbelastung

der ARA (Abwässer aus Zeihen), sondern auf Belastungsquellen weiter oben zurückzuführen.

Mit den heute umgesetzten Massnahmen kann der Gewässerzustand der im Bereich der Abwasserreinigungsanlage Hornussen (inkl. Zeihen) als „gut“ bis „sehr gut,“ Bei der ARA Linn oberhalb als „gut“, unterhalb nur als „mässig“ bezeichnet werden (Abbildung 2).

Die differenzierte Auswertung der Kieselalgen-daten hinsichtlich der Belastung durch biologisch abbaubare, organische Stoffe präzisiert den oben beschriebenen Befund. Die Belastung mit biologisch abbaubaren Stoffen hat oberhalb der ARA Hornussen seit 1996 eher abgenommen, da der Anteil der toleranten Kieselalgen zu Gunsten der sensiblen deutlich zurückging. Folglich muss der seither gestiegene DI-CH auf andere Stoffkomponenten zurückzuführen sein (anorganische Nährstoffe, toxische Stoffe). Als Quelle kommt neben der verstärkten Nährstoffabschwemmung auch die Autobahntwässerung in Frage. Die Verringerung der Belastungen im Zeiher- und Sagenmülibach ist dagegen eindeutig mit der vermehrten Elimination von biologisch abbaubaren, organischen Stoffen zu erklären. Die in diesen beiden Gewässern ergriffenen Massnahmen erwiesen sich denn auch am wirkungsvollsten.

Der Eintrag anorganischer Nährstoffe, insbesondere von Phosphor und Stickstoff, hat sich in den untersuchten Zuflüssen der Sissle durch die Massnahmen nicht wesentlich verändert. Gemäss dem Nährstoffindex der Kieselalgen (TDI) liegt der Düngungsgrad im Bereich der früheren Werte. Dagegen ist er in der Sissle im Bereich der ARA Hornussen seit 1996 an den drei oberen Untersuchungsstellen gestiegen.

Insgesamt gelten die Gewässer im oberen Fricktal infolge der flächenhaften Nährstoffabschwemmung immer noch als „kritisch“ bis „auffallend“ mit Phosphor und Stickstoff belastet.

4. Wirkung der Massnahmen bei einzelnen Abwasserreinigungsanlagen

Gegenwärtiger Ausbaustand der ARAs

Im Einzugsgebiet der Sissle oberhalb Frick sind gegenwärtig noch 2 Abwasserreinigungsanlagen mit einer Reinigungskapazität für 2800 Einwohner in Betrieb (Tabelle 1). Der gesamte Abwasseranfall betrug im Mittel 0.72 Mio m³. Dabei mussten lediglich 140 m³ Klärschlamm entsorgt werden.

Kläranlage	Einw.	Ausbau hydr.	Ausbau biol.	Baujahr Ausbau
Hornussen	3400	2500	4300	1979 2006
Zeihen	aufgehoben 2008, Anschluss an Hornussen			
Linn	280	300	300	1983 1992

Tabelle 1: Belastung und Kapazitäten der bestehenden Abwasserreinigungsanlagen im oberen Fricktal

Die Sissle ist gemäss der Gewässerschutzverordnung als empfindliches Gewässer eingestuft. Die daraus sich ergebenden, verschärften Einleitungsbedingungen für die ARA Abwässer machten verschiedene Ausbaumassnahmen notwendig.

Änderungen seit 1996

Im Zuge des Ausbauprogrammes 1996-2009 wurde die Kläranlage Hornussen für den Anschluss der Abwässer aus Zeihen erweitert (Tabelle 2).

Kläranlage	Massnahmen
Hornussen	2006 Kapazitätserhöhung mit verschärften Anforderungen (Nitrifikation / teildenitrifikation / P-Fällung), 2008 Anschluss Zeihen.
Zeihen	2008 ARA aufgehoben.
Linn	keine Änderung

Tabelle 2: Seit 1996 im oberen Fricktal sanierte Abwasserreinigungsanlagen.

Die ARA Zeihen wurde 2008 aufgehoben. Das Abwasser aus Zeihen wird heute durch die ARA Hornussen gereinigt. Die ARA Linn hat seit 1992 keine Änderungen mehr erfahren.

Geplante Änderungen

Für die Kläranlage Hornussen sind momentan keine weiteren Ausbaumassnahmen geplant. Die Aufhebung der ARA Linn und der Anschluss an die ARA Hornussen ist mittelfristig geplant.

Kläranlage	Massnahmen
Hornussen	Keine weiteren Massnahmen geplant
Linn	Aufhebung 2010, Anschluss an Hornussen

Tabelle 3: Geplante Massnahmen an den Abwasserreinigungsanlagen im oberen Fricktal.

4.1 ARA Hornussen



ARA Hornussen 2009.

Ausbaustand der ARA

Die Anlage wurde 1979 erbaut und 2006 letztmals erweitert. Sie verfügt über eine chemische P-Elimination sowie eine biologische Nitrifikation mit Teildenitrifikation.

Die Probenahmestellen



Stelle Horn.1, 0.05 km oberhalb der ARA Hornussen mit Blickrichtung bachaufwärts (Koord. 646.225/261.580)

Die Sissle ist im untersuchten Abschnitt über weite Strecken begradigt (Stellen Horn.1; Horn.2, Horn.3) Die Ufer sind durch einen geschlossenen Gehölzgürtel bestockt, der die Sohle meist gut beschattet. Im untern Abschnitt (Stelle Horn.4) ist das Gehölz etwas aufgelockert, wodurch auch die Sohle weniger Schattenwurf erhält. Die Wasserlinie ist teils mit Blockwurf verbaut und die Sohle mit Schwellen (Steinsatz, Rundholz) gesichert.



Stelle Horn.3, 0.75 km unterhalb der ARA Hornussen mit Blickrichtung bachabwärts (Koord. 645.430/261.455).



Stelle Horn.4, 2.10 km unterhalb der ARA Hornussen mit Blickrichtung bachaufwärts (Koord. 644.270/262.000).

Zustand im äusseren Aspekt

Die rein äusserlich sichtbaren Qualitätsmerkmale der Sissle erfüllen nun auch unterhalb der ARA Hornussen die Anforderungen der GSchV weitgehend. Die 1996 noch vorhandene Trübung und Schaumbildung sowie der punktuell vorhandene Abwassergeruch (Horn.4) und bestehende Schlammdepots (Horn.1) sind 2009 verschwunden. Neu aufgetreten sind ab der ARA Hornussen Flecken von sichtbarem Eisensulfid, welche auf ein zumindest zeitweise vorhandenes Sauerstoffdefizit in den Zwischenräumen der Bachsohle hinweisen. Mit 7%, 17% und 3% Flecken aufweisenden Steinen ist die Einschränkung der Sauerstoffversorgung nicht dramatisch. Trotzdem entspricht der Befund noch nicht der entsprechenden Anforderung der GSchV.

Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien					
		Schlamm-bildung	Trübung	Verfä-rbung	Schaum	Geruch	Eisen-sulfid
Horn.1	1996	schwach	keine	keine	wenig	kein	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	0%
ARA-Einlauf							
Horn.2	1996	keine	gering	keine	wenig	kein	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	7%
Horn.3	1996	keine	keine	keine	wenig	kein	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	17%
Horn.4	1996	keine	keine	keine	wenig	gering	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	3%

Entwicklung bezüglich Schlamm, Trübung, Verfärbung, Schaum, Geruch und Eisensulfid (FeS).

Sichtbare Einzellerkolonien (heterotropher Bewuchs) wurden 2009 im gesamten Abschnitt unterhalb der ARA nicht mehr festgestellt. 1996 war er noch an den Stellen unterhalb der ARA an bis zu 25% der Steine vorhanden. Die diesbezüglichen Anforderungen der GSchV sind nun erfüllt. Der pflanzliche Bewuchs der Sohle ist 2009 bescheiden und verglichen mit der Untersuchung 1996 deutlich geringer. Abwasserzeiger wie Egel und Asseln waren 2009 nicht mehr vorhanden.

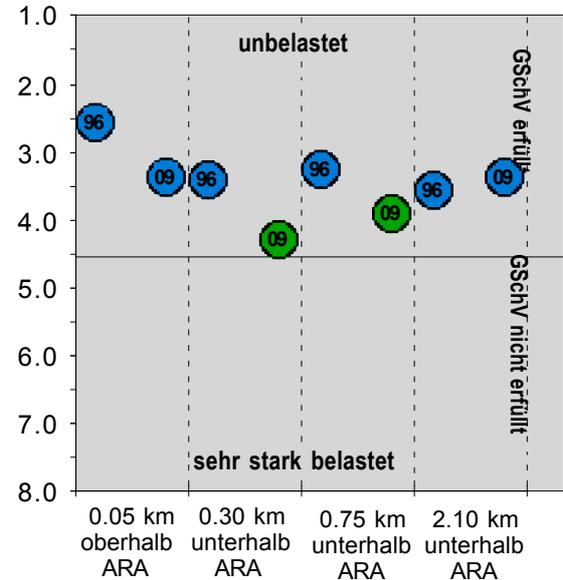
Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien				
		het. Bewuchs	Algen-dichte	Algendeck-ung gesamt	Algendeck-ung KG1-3	Planzen, Moose
Horn.1	1996	0%	4	40%	60%	1
	2009	0%	0	<5%	<5%	0
ARA-Einlauf						
Horn.2	1996	17%	3.5	40%	40%	1
	2009	0%	2	<5%	<5%	0
Horn.3	1996	3%	3.5	40%	70%	1
	2009	0%	0.5	<5%	<5%	1.5
Horn.4	1996	27%	3	30%	45%	1
	2009	0%	0	<5%	<5%	1

Entwicklung bezüglich sichtbarer Einzellerkolonien und Pflanzenbewuchs. Die Indikatoren des pflanzlichen Bewuchses werden nicht bewertet.

Geringe stoffliche Belastung

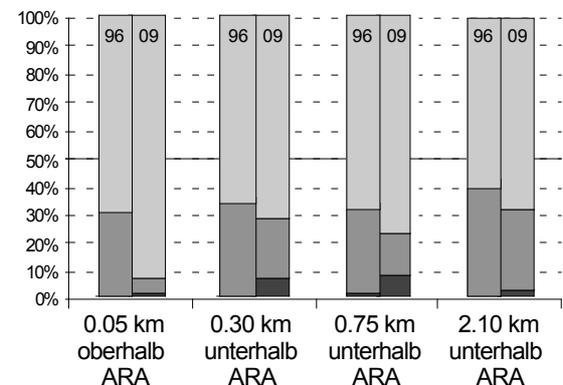
Die chemische Gesamtbelastung ist 2009 gemäss der Kieselalgenindikation (DI-CH) auch unterhalb der ARA Hornussen schwach geblieben und erfüllt die Anforderungen der Gewässer-schutzverordnung (GSchV) wie schon 1996. Al-

lerdings ist im Vergleich zur früheren Untersu-chung eine Belastung durch ARA-Abwasser er-sichtlich. Der Vergleich mit der Saprobie lässt den Schluss zu, dass sie durch organische ab-baubare wie anorganische Stoffe hervorgerufen wird.



Figur 1: Entwicklung der Gewässerbelastung der Sissle nach DI-CH 1996–2009 (siehe Text).

Die separate Auswertung der Kieselalgen-daten hinsichtlich der organischen Belastung (Saprobie) zeigt, dass die leichte Vorbelastung früherer Jah-re verschwunden ist und sich 2009 die organi-sche Belastung aus der ARA deutlicher abzeich-net. Sie erfüllt aber immer noch die betreffende Anforderung der GSchV.



Figur 2: Entwicklung des Gewässerzustandes be-züglich der organischen Belastung der Sissle 1996-2009 (siehe Text).

4.2 ARA Linn



ARA Linn 2009.

Ausbaustand

Die 1983 in Betrieb genommene Anlage wurde 1992 ausgebaut. Sie verfügt über ein Tauchtropfkörpersystem und eine Abwasserfiltrationsanlage.

Die Probenahmestellen



Stelle Linn.1, oberhalb der ARA Linn mit Blickrichtung bachaufwärts (Koord. 651.175/258.500).

Der Sagenmülibach verläuft im Untersuchungsbereich der ARA im Wald und ist gut beschattet. Im Vergleich zur Untersuchung 1996 wurde der Wald an beiden Probenahmestellen etwas aufgelichtet. Der Lauf des Baches ist weitgehend natürlich. Die Ufer sind an der Wasserlinie und auch im Bachbordbereich unverbaut. An der Sohle liegt natürlicher Kies, der allerdings durch die natürliche Tuffbildung teilweise kolmatiert ist. Die Sohle ist ebenfalls unverbaut und soweit die Wasserführung es erlaubt fischgängig.



Stelle Linn.2, unterhalb der ARA Linn mit Blickrichtung bachaufwärts (Koord. 651.100/258.525).

Äusserer Aspekt

Der äussere Aspekt hat sich seit der letzten Untersuchung nur wenig verändert. Schlamm, Trübungen, Verfärbung und Geruch wurden wie schon 1997 an keiner Stelle festgestellt. Unterhalb der ARA-Ausleitung sind immer noch ein wenig Schaum und Eisensulfidflecken vorhanden. Einzig die früher von oberhalb der ARA stammende, leichte Schaumbildung ist 2009 verschwunden.

Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien					
		Schlamm-bildung	Trübung	Verfärbung	Schaum	Geruch	Eisen-sulfid
Linn. 1	1997	keine	keine	keine	wenig	kein	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	0%
ARA-Einlauf							
Linn.2	1997	keine	keine	keine	wenig	kein	1%
	2009	keine	keine	keine	wenig	kein	20%

Entwicklung bezüglich Schlamm, Trübung, Verfärbung, Schaum, Geruch und Eisensulfid.

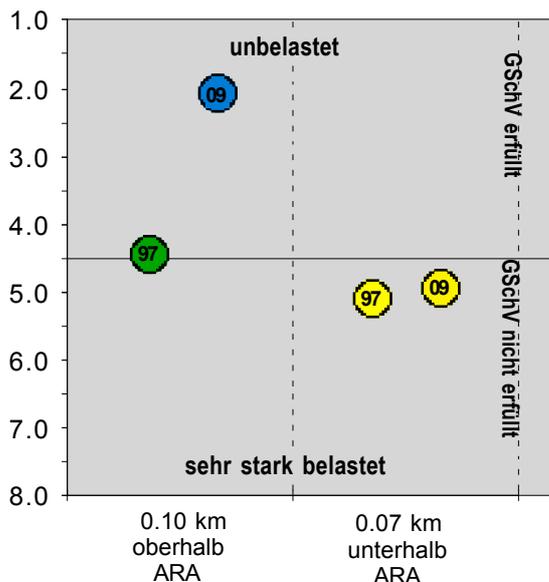
Der 1997 unterhalb der ARA noch stark sichtbare Bewuchs (an 57% der Steine) von tierischen Einzellern (heterotropher Bewuchs) ist 2009 nicht mehr vorhanden. Auch der pflanzliche Bewuchs ist durch die starke Beschattung gering. Welche frühere Ursache unterhalb der ARA zur Bildung von heterotrophem Bewuchs führte ist aus heutiger Sicht unklar. Da die ARA seit der letzten Untersuchung im Wesentlichen unverändert blieb scheinen eher betriebliche Ursachen eine Rolle gespielt haben.

Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien				
		het. Bewuchs	Algen-dichte	Algendeckung gesamt	Algendeckung KG1-3	Planzen, Moose
Linn.1	1997	0%	1	5%	5%	2
	2009	0%	0.5	<10%	<5%	0
ARA-Einlauf						
Linn.2	1997	57%	2	5%	5%	2
	2009	0%	0.5	<5%	<5%	0

Entwicklung bezüglich sichtbarer Einzellerkolonien und Pflanzenbewuchses. Die Indikatoren des pflanzlichen Bewuchses werden nicht bewertet.

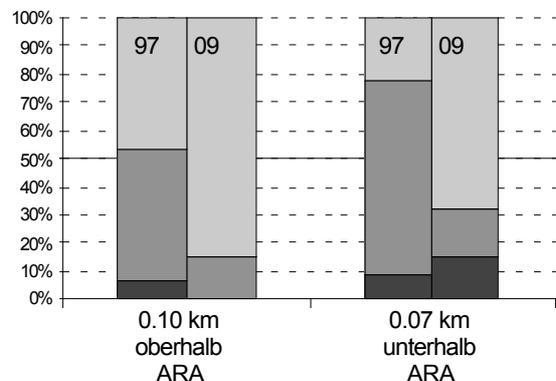
Erhöhte stoffliche Belastung

Die stoffliche Gesamtbelastung (DI-CH) hat sich zwischen 1997 und 2009 vor allem oberhalb der ARA verbessert (Figur 1). Ob in der Zwischenzeit Verbesserungen und Massnahmen in der Siedlungsentwässerung (Neuan schlüsse, sanierte Fehlan schlüsse, Regenrückhaltebecken etc.) stattgefunden haben ist nicht bekannt. Der Einfluss der ARA Linn ist heute durch den verbesserten Zustand oberhalb der ARA noch deutlicher ersichtlich. Gemessen am DI-CH ist 2009 der Zustand des Sagenmülibaches vor der ARA als „sehr gut“, unterhalb der ARA jedoch nur als „mässig“ zu bezeichnen. Die entsprechende Anforderung der GSchV ist nach der Einleitung der ARA-Abwässer nicht erfüllt.



Figur 1: Entwicklung der Gewässerbelastung nach DI-CH im Sagenmülibach zwischen 1997 und 2009 (siehe Text).

Auch hinsichtlich der organischen Belastungskomponenten zeigen die Kieselalgen zwischen 1997 und 2009 eine deutliche Belastungsverminderung bei beiden Stellen an. Der heutige Belastungsgrad erfüllt die Anforderung der GSchV auch in Bezug auf die Belastung durch organische Stoffe. Der Einfluss des Abwassers aus der ARA Linn ist zwar gegenüber der oberhalb gelegenen Stelle ersichtlich (geringerer Anteil sensibler Arten, auftretende resistente Arten) liegt aber noch im Bereich eines schwach belasteten Gewässers.



Figur 2: Entwicklung des Gewässerzustandes bezüglich der organischen Belastung des Sagenmülibaches zwischen 1997 und 2009 (siehe Text).

4.3 Aufgehobene ARA Zeihen



Aufgehobene ARA Zeihen 2009 (Luftbild aus AGIS).

Aufgehoben ARA

Die ARA Zeihen wurde 2008 aufgehoben. Das Abwasser aus Zeihen wird in der ARA Hornussen gereinigt.

Die Probenahmestellen

Der Zeiherbach ist oberhalb der ARA begradigt und an beiden Ufern hart verbaut, im Abschnitt vor der Probenahmestelle auch an der Sohle. Das linke Ufergehölz wurde seit der letzten Untersuchung stark aufgelichtet, sodass die Sohle nur mässig beschattet wird. An der Probenahmestelle selbst liegt Kies im Bachbett.



Stelle Zeih.1, oberhalb der aufgehobenen ARA Zeihen mit Blickrichtung bachaufwärts. (Koord. 648.470/258.750).

Unterhalb der früheren Einleitungsstelle der ARA-Abwässer ist der Zeiherbach weitgehend natürlich. Sowohl Ufer wie auch das Bachbett

sind von der freien Geschiebe- und Abflussdynamik geformt. Ein beidseitig dichter Gehölzgürtel sorgt für die starke Beschattung der Bachsohle. Kalkausscheidungen bewirken eine mässige Sohlenkolmation.



Stelle Zeih.2 unterhalb der aufgehobenen ARA Zeihen mit Blickrichtung bachaufwärts (Koord. 648.225/258.975).

Verbesserung im Äusseren Aspekt

Der Äussere Aspekt hat sich gegenüber früher erwartungsgemäss verbessert. Der 1996 unterhalb der ARA wahrnehmbare Abwassergeruch ist verschwunden. Das Wasser im Bach ist wieder klar. Neu sind an der Unterseite der Steine in der Bachsohle vereinzelte Eisensulfidflecken sichtbar. Dieses Phänomen tritt an beiden Stellen mit etwa der gleichen Häufigkeit (13% und 7%) auf und weist auf eine zeitweilig eingeschränkte Sauerstoffversorgung in den Zwischenräumen der Bachsohle hin. Dabei dürfte aber die erwähnte Kolmation nicht der einzige Faktor sein.

Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien					
		Schlamm-bildung	Trübung	Verfärbung	Schaum	Geruch	Eisen-sulfid
Zeih.1	1996	keine	keine	keine	kein	kein	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	13%
ARA-Einlauf							
Zeih.2	1996	keine	gering	keine	keine	gering	0%
	2009	keine	keine	keine	kein	kein	7%

Entwicklung bezüglich Schlamm, Trübung, Verfärbung, Schaum, Geruch und Eisensulfid.

Der früher, vom das ARA-Abwasser verursachte starke heterotrophe Bewuchs (an 67% der Steine) ist gänzlich verschwunden. Der pflanzliche

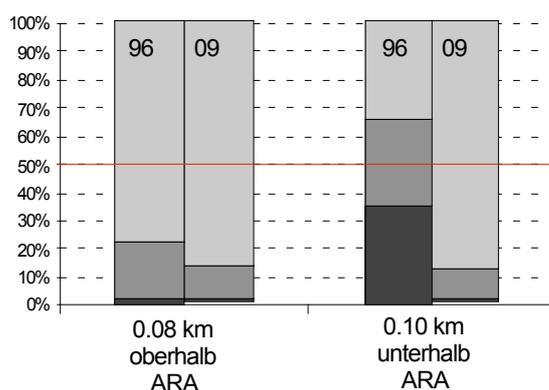
Bewuchs ist an beiden Stellen gering. Bezüglich des heterotrophen und pflanzlichen Bewuchses erfüllt der Zeiherbach an beiden Stellen die Anforderungen und ökologischen Ziele der GSchV.

Stelle	Jahr	Beurteilungskriterien				
		het. Bewuchs	Algen-dichte	Algendeckung gesamt	Algendeckung KG1-3	Planzen, Moose
Zeiher.1	1996	0%	2	8%	20%	1
	2009	0%	0	<5%	<5%	0
ARA-Einlauf						
Zeiher.2	1996	67%	3	25%	35%	1
	2009	0%	0	<5%	<5%	0

Entwicklung bezüglich sichtbarer Einzellerkolonien und Pflanzenbewuchs. Der pflanzliche Bewuchs wird nicht bewertet.

Reduktion der stofflichen Belastung

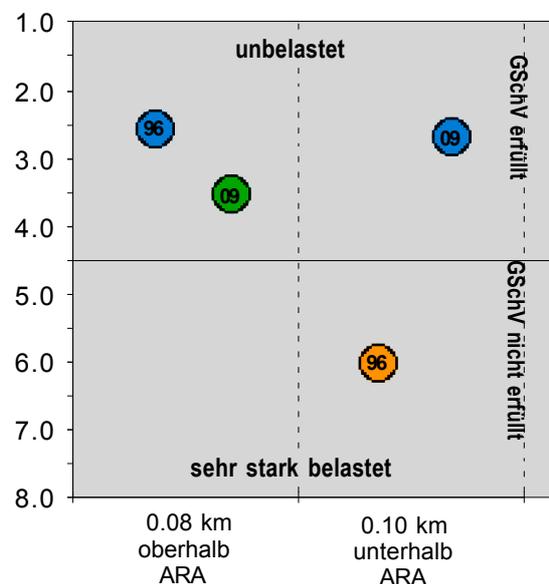
Die organische Belastung ist seit 1996 unterhalb der ehemaligen Abwassereinleitung massiv zurückgegangen. Der Anteil der belastungssensiblen Kieselalgen stieg an der Stelle unterhalb der aufgehobenen ARA von 35 auf 87% und liegt 2009 weit über der 50%-Marke (siehe Figur 1, hellgrauer Anteil der Säulen). Auch an der Stelle oberhalb der ARA ist eine leichte Verbesserung zu verzeichnen. Beide Stellen weisen nun praktisch identische Verhältnisse auf. Die Anforderungen der Gewässerschutzverordnung hinsichtlich der organischen Belastung des Zeiherbaches sind damit im gesamten Abschnitt gut erfüllt.



Figur 1: Entwicklung bezüglich der organischen Belastung des Zeiherbaches zwischen 1996 und 2009 (siehe Text).

Auch bezüglich der Gesamtbelastung (DI-CH) hat sich der Zustand seit 1996 verbessert. Er kann 2009 als „sehr gut“ bezeichnet werden.

1996 war er unterhalb der damaligen ARA-Einleitung „nicht befriedigend“. Die diesbezüglichen Anforderungen der Gewässerschutzverordnung werden 2009 im Zeiherbach an beiden Stellen gut erfüllt (siehe Figur 2).



Figur 2: Entwicklung der Gewässerbelastung nach DI-CH in des Zeiherbaches zwischen 1996 und 2009 (siehe Text).

Die aus der oberflächlichen Abschwemmung stammende Grundbelastung mit Phosphor und Stickstoff hat sich kaum verändert. Der Tropical Diatom Index (TDI) stieg oberhalb der ehemaligen ARA von 2.6 auf 2.7, unterhalb blieb er unverändert bei 2.8. Das Gewässer ist heute immer noch „kritisch“ bis „auffallend“ mit anorganischen Nährstoffen belastet.

5. Literatur

- [1] Chaix, O.; Ochsenbein, U.; Elber, F. (1995): Prioritäten für technisch-bauliche Gewässerschutzmassnahmen. Gas Wasser Abwasser 75, Heft 9, 703-713.
- [2] Thomas, E. A.; Schanz, F. (1976): Beziehungen zwischen Wasserchemismus und Primärproduktion in Fliessgewässern, ein limnologisches Problem. Vierteljahresschrift Natf. Ges. Zürich, 121, 309-317.
- [3] Uehlinger, U. (1994): Sauerstoff in der Glatt: Photosynthese, Respiration und Sauerstoffhaushalt in einem anthropogen stark beeinflussten Mittellandfluss (Glatt, Kt. Zürich). Gas Wasser Abwasser 74, Heft 2, 123-128.
- [4] Lange-Bertalot, H. (1978): Diatomeen-Differentialarten anstelle von Leitformen: ein geeignetes Kriterium der Gewässerbelastung. Arch. Hydrobiol./Suppl. 51, 393-427.
- [5] Kramer, K.; Lange-Bertalot, H. (1988): In Ettl, H.; Gerloff, J.; Heynig, H.; Molenhauer, D. (Hrsg.): Süswasserflora von Mitteleuropa Bd 2/2, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- [6] Schiefele, S.; Kohmann F. (1993): Bioindikation der Trophie in Fliessgewässern. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsbericht Nr. 102 01 504, 211 S. mit Anhang.
- [7] Hofmann, G. (1987): Diatomeengesellschaften saurer Gewässer des Odenwaldes und ihre Veränderungen durch anthropogene Faktoren. Diplomarbeit im Fachbereich Biologie der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 264 S.
- [8] Reichardt E. (1991): Beiträge zur Diatomeenflora der Altmühl. 3. Teil: Wasserqualität und Diatomeenbesatz. Algological Studies 62, 107-132.
- [9] Erni, G.; Preisig, H.R., (1994): Hydrobiologische Untersuchungen am Unterlauf der Thur (Kanton Zürich, Schweiz). Algen. Vierteljahresschrift der Natf. Ges. Zürich 139, Heft 2, 71-78.
- [10] Hürlimann, J.; Niederhauser, P. (2006): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer: Kieselalgen Stufe F.
- [11] BUWAL (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer: Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26, Bern.
- [12] BUWAL (2006): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer: Äusserer Aspekt. Entwurf, Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr., Bern.
- [13] Kanton Aargau, Regierungsrat (1990): Stand und Entwicklung des Gewässerschutzes im Aargau – Grobkonzept der 90er Jahre, Aarau 1990.
- [14] Kanton Aargau, Abteilung Umweltschutz (1993). Bericht zum Zustand der aargauischen Fliessgewässer – Untersuchung 1990/91. Aarau, Juni 1993.

Anhang A1: Daten der Kieselalgen (Untersuchung 2009)

Die Daten der früheren Untersuchungen finden sich in den Berichten der Jahre 1996 und 1997.

Stellenbezeichnung	Horn.1	Horn.2	Horn.3	Horn.4	Zeih.1	Zeih.2	Linn.1	Linn.2
Gewässer	Sissle	Sissle	Sissle	Sissle	Zeih- bach	Zeih- bach	Sagen- mül- ibach	Sagen- mül- ibach
Datum	22.7.08	22.7.08	22.7.08	22.7.09	22.7.08	22.7.09	22.7.08	22.7.08
Achnanthes atomus (HUSTEDT)								
Achnanthes biasoletiana GRUNOW	81	20	22	109	71	193	242	8
Achnanthes biasoletiana var. subatomus (LANGE-B.)				2		2	12	
Achnanthes conspicua (A.MAYER)								47
Achnanthes eutrophila LANGE-B.	2	2	19	8		2	8	4
Achnanthes exilis KÜTZING								
Achnanthes lanceolata (BRÉBISSON) GRUNOW ssp. Lanceolata	2							
Achnanthes lanceolata ssp. frequentissima (LANGE-B.)				2		2		12
Achnanthes lauenburgiana (HUSTED)								64
Achnanthes minutissima var. affinis								1
Achnanthes minutissima var. inconspicua OESTRUP				4		2	2	
Achnanthes minutissima var. jackii (RABENHORST) LANGE-B.						2	36	
Achnanthes minutissima var. minutissima (KÜTZING)	12	6	86	29	10	36	34	20
Achnanthes minutissima var. saprophila (KOBAYASI-MAYA.)		14	2	4				
Achnanthes straubiana LANGE-B.							6	
Amphora inariensis KRAMMER	74	160	139	132	68	165	25	135
Amphora libyca (EHRENBERG)								
Amphora ovalis (KÜTZING)					1			
Amphora pediculus (GRUNOW)	12	91	23	88	34	28	37	60
Caloneis bacillum (CLEVE)	11	6	2	7	12	8	4	
Cocconeis pediculus (EHRENBERG)		1						
Cocconeis placentula (EHRENBERG)								
Cocconeis placentula var. lineata (EHRENBERG) VAN HEURCK								
Cocconeis placentula var. euglypta	4	6	7	12		2	2	3
Cyclotella atomus HUSTEDT	1		2	1				
Cyclotella ocellata (PANTOCSEK)		1						
Cymatopleura solea var. apiculata (W.SMITH) RALFS							2	
Cymbella affinis (KÜTZING)	4	2	2				2	
Cymbella microcephala					2			
Cymbella minuta (HILSE ex RABENHORST)	1	3	4	8	2	7	9	3
Cymbella silesiaca (BLEISCH in RABENHORST)		1						
Cymbella sinuata (GREGORY)	4	6	5	4				3
Denticula tenuis		1			2		2	
Diatoma moniliformis (KÜTZING)					1			
Diatoma vulgare BORY DE SAINT VINCENT								
Diploneis elliptica CLEVE								
Diploneis marginestriata HUSTEDT	1							
Diploneis oblongella	5				18	3	10	3
Diploneis oculata (BRÉBISSON) CLEVE								
Fragilaria brevistriata								3
Fragilaria capucina var. gracilis (OESTRUP) HUSTED							2	
Fragilaria capucina var. rumpens			1					
Fragilaria fasciculata								
Fragilaria pinnata var. pinnata (EHRENBERG)								
Fragilaria ulna var. ulna (LANGE-B.)	1							

Stellenbezeichnung	Horn.1	Horn.2	Horn.3	Horn.4	Zeih.1	Zeih.2	Linn.1	Linn.2
Gewässer	Sissle	Sissle	Sissle	Sissle	Zeiber- bach	Zeiber- bach	Sagen- mül- ibach	Sagen- mül- ibach
Datum	22.7.08	22.7.08	22.7.08	22.7.09	22.7.08	22.7.09	22.7.08	22.7.08
Gomphonema micropus (KUETZING)	2		2	4			4	
Gomphonema minutum f. minutum (AGARDH)			6					
Gomphonema olivaceum var. olivaceum (BREBISSON)	2	6		11	9	18		1
Gomphonema parvulum (KÜTZING)								17
Gomphonema pumilum		2		6				2
Gomphonema tergestinum (FRICKE)	4	7		9	23	6		
Gyrosigma accuminatum (RABENHORST)	1			1				
Melosira varians (AGARDH)			1	3				
Meridion circulare var. circulare (C.A. AGARDH)				7			14	3
Navicula accomoda (HUSTED)								5
Navicula atomus var. atomus (KÜTZING)								
Navicula atomus var. permitis (LANGE-B.)		14	15					1
Navicula cari EHRENBERG								
Navicula cryptotenella LANGE-B.	168	164	96	54	149	22	43	12
Navicula gregaria (DONKIN)	4	3	1	5	4	1	4	14
Navicula halophila		1						
Navicula lanceolata (EHRENBERG)								
Navicula lenzii HUSTEDT	5							
Navicula menisculus var. grunowii LANGE-B.	2	27	21	6	60	1	5	14
Navicula minima (GRUNOW in VAN HEURCK)		8	19	7		4		43
Navicula minuscula var. minuscula								
Navicula minuscula var. muralis (LANGE-B.)								
Navicula radiosa KÜTZING								
Navicula reichardtiana var. reichardtiana (LANGE-B.)	17	10	5	4	10	4		9
Navicula saprophila (LANGE-B.)		3	1					
Navicula seminulum (GRUNOW)								
Navicula subhamulata	14		3	3				
Navicula sublucidula HUSTEDT	2	3	4			6	13	12
Navicula subminuscula (MANGUIN)			1	1				
Navicula tripunctata (BORY)	10	24	24	19	16	7	12	10
Nitzschia amphibia var. amphibia (GRUNOW)								
Nitzschia archbaldii				2			1	
Nitzschia constricta (RALFS in PRIT.)					2			
Nitzschia dissipata var. dissipata (GRUNOW)	141	37	20	6	28	16	28	9
Nitzschia fonticola (GRUNOW in CLEVE&MÖLLER)	5	2	2	2				
Nitzschia linearis var. linearis (W. SMITH)					1			
Nitzschia palea (W. SMITH)					7			11
Nitzschia paleacea (GRUNOW)								1
Nitzschia perminuta								4
Nitzschia pusilla (GRUNOW emend. LANGE-B.)								2
Nitzschia recta (HANTZSCH in RABENHORST)								1
Nitzschia sociabilis (HUSTED)	1	3					1	4
Rhoicosphenia abbreviata (LANGE-B.)	1		26	9				
Simonsenia delognei (GRUNOW) LANGE-B.						2	1	
Stauroneis smithii								
Surirella angusta					1			
Surirella brevisonii var. kuetzingii (KRAMMER&L.-B.)	6	7	1		9			2

Anhang A2: Daten des äusseren Aspektes (Untersuchung 2009)

Die Daten der früheren Untersuchungen finden sich in den Berichten der Jahre 1996 und 1997

Gewässer	Sissle	Sissle	Sissle	Sissle	Zeiherbach	Zeiherbach	Sagenmülbach	Sagenmülbach
Stelle	Horn.1	Horn.2	Horn.3	Horn.4	Zeih.1	Zeih.2	Linn.1	Linn.2
Datum	22.07.08	22.07.08	22.07.08	22.07.09	22.07.08	22.07.09	22.07.08	22.07.08
Verschlämmung	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
unnatürliche Trübung	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
unnatürliche Verfärbung	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
unnatürlicher Schaum	kein	kein	kein	kein	kein	kein	kein	wenig
Geruch	kein	kein	kein	kein	kein	kein	kein	kein
Fundhäufigkeit von FeS-Flecken	0%	7%	17%	3%	13%	7%	0%	20%
Stabw	0%	5%	8%	2%	13%	1%	0%	6%
Maximalwert	0%	25%	30%	10%	50%	5%	0%	30%
Minimalwert	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
mittl. Bedeckung mit Ciliatenkolonien [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Maximalwert	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Minimalwert	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Stabw	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Häufigkeit heterotropher Bewuchs	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Algenbewuchsdichte T&S	0	2	0.5	0	0	0	0.5	0.5
Sohlendeckung mit Fadenalgen	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<10%	<5%
Deckung einzelner KG mit Fadenalgen	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%
Moose und Makrophyten T&S	0	0	1.5	1	0	0	0	0
Egel	0	1	0	0	0	0	0	0
Asellus	0	0	0	0	0	0	0	0
Gam	0	0	0	0	1	1	0	0
Bae	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecd	0	0	0	0	0	0	0	0
Rhy	0	0	0	0	0	1	0	0
Trich-	0	1	0	0	0	0	0	0
Trich+	0	0	0	0	0	0	0	0
Plec	1	2	0	0	1	0	0	0
Chir	0	0	0	0	0	0	0	0
Sim	0	0	1	0	0	0	0	0
Olig	0	0	0	0	0	0	0	0
Col	0	0	0	0	0	0	0	0

Anhang A3: Methoden

1. Beurteilung des „Äusseren Aspektes“

Schlamm, Trübung, Verfärbung, Schaumbildung, Geruch, Eisensulfidflecken

Diese Merkmale beziehen sich auf Anforderungen, die in Anhang 2, Ziffer 11, Absatz 2 und Ziffer 12, Absatz 1 der Gewässerschutzverordnung umschrieben werden. Gemäss der Verordnung soll sich als Folge von Abwassereinleitungen in Fließgewässern (Ziffer 11):

- kein Schlamm bilden (Absatz 2a),
- keine Trübung, keine Verfärbung und keine Schaumbildung zeigen (Absatz 2b),
- der Geruch gegenüber dem natürlichen Zustand nicht verändern (Absatz 2c),

sowie die Wasserqualität so beschaffen sein (Ziffer 12):

- dass keine von blossem Auge sichtbaren Eisensulfidflecken (Absatz 1a) vorhanden sind.

Aus diesen Anforderungen wurden 6 direkt im Feld anwendbare Beurteilungskriterien (Kriterien 2-7 nach dem Modul *Äusserer Aspekt* [1]) abgeleitet (siehe Tabelle A1). Für jedes Beurteilungskriterium sind 3 Bewertungsstufen festgelegt.

Verschlammung, Trübung, Verfärbung, Schaum, Geruch sind direkt am Gewässer wahrnehmbar. Eisensulfidflecken können nur an der Gewässer-sole auf der Unterseite der Steine oder, falls nur Feinsediment vorhanden ist, mit Schlammstichen erkannt werden.

	Beurteilungskriterien					
	Schlamm	Trübung	Verfärbung	Schaum	Geruch	Eisensulfid
Beurteilungs-Klassen	viel	stark	stark	viel	stark	>25%
	wenig, mittel	leicht, mittel	leicht, mittel	wenig, mittel	leicht, mittel	≤25%
	kein	keine	keine	kein	kein	kein

Tab. A1 Beurteilung der Merkmale 2-8 nach Modul „Äusserer Aspekt“ (Erläuterungen siehe Text).

Eisensulfidflecken

Unter anaeroben Bedingungen bilden sich in der Bachsohle an Steinen schwarze Eisensulfidflecken. Dabei wird durch Mikroorganismen Sulfat zu Sulfid reduziert, das mit eisenhaltigen Verbindungen Eisensulfid bildet und sich an den Steinen ablagert. Der beschriebene mikrobiologische Prozess setzt ein, wenn Schlammablagerungen einerseits den Sauerstofftransport in die Sohle hemmen und andererseits durch den Abbau von organischen Substanzen eine starke Sauerstoffzehrung eintritt.

Die Intensität des Reduktionsprozesses wird durch Angabe der Häufigkeit von Steinen mit sichtbaren Eisensulfidflecken beurteilt. Dabei

wurden der Gewässersohle in einem Beprobungsabschnitt 30 Steine entnommen und bei jedem Stein an der Unterseite der prozentuale Flächenanteil der Eisensulfidflecken geschätzt. Die Fundhäufigkeit je Probenahmestelle wurde aus dem arithmetischen Mittel bestimmt.

Heterotropher und pflanzlicher Bewuchs

Die Anforderungen an heterotrophen und pflanzlichen Bewuchs werden in Anhang 2, Ziffer 11, Absatz 1 der Gewässerschutzverordnung umschrieben. Als Folge von Abwassereinleitungen sollen sich:

- keine mit blossem Auge sichtbare Kolonien von Bakterien, Pilzen oder Protozoen und keine lästigen Wucherungen

von Algen und höheren Wasserpflanzen bilden (Absatz 1a).

Diesen Anforderungen wurden 5 Beurteilungskriterien zugeordnet, die in 3 Bewertungsstufen eingeteilt sind (siehe Tabelle A2), wobei man den pflanzlichen Bewuchs im Rahmen der ARA-Erfolgskontrollen nicht weiter bewertet.

Heterotropher Bewuchs

Der heterotrophe Bewuchs wurde gleichzeitig mit den Eisensulfidflecken bestimmt. Die im Probenahmesektor der Bachsohle entnommenen 30 Steine sind zusätzlich auf sichtbare Kolonien von festsitzenden Ciliaten und des Bakteriums *Sphaerotilus natans* untersucht worden.

Ciliaten sind mikroskopisch kleine, einzellige Organismen, die durch Reihen und Kränze von

Geisseln (= Cilien, daher der Name Ciliaten) an der Zelloberfläche gekennzeichnet sind. Ihre Nahrung besteht aus Bakterien und kleinsten organischen Partikeln, die sie sich durch Erzeugen eines Wasserstromes mittels Cilienbewegung zufächeln. Die festsitzenden Ciliaten bilden bei grossem Nahrungsangebot auf der Steinoberfläche dichte, von Auge sichtbare Kolonien.

Sphaerotilus natans, im Volksmund Abwasserpilz genannt, ist ein kolonienbildendes Bakterium, das sich von gelösten organischen Substanzen (Zucker, Aminosäuren, Fettsäuren usw.) ernährt. Bei hohen Konzentrationen solcher Substanzen entwickelt sich *Sphaerotilus natans* zu dichten, von Auge sichtbaren Kolonien.

Aus den Daten von 30 Steinen wurde die Häufigkeit der Steine mit sichtbaren Kolonien bestimmt.

	Beurteilungskriterien				
	het. Bewuchs	Algen-dichte	Algendeckung gesamt	Algendeckung KG1-3	Planzen, Moose
Beurteilungs-Klassen	≥25%	4-5	>50	>50	4-5
	<25%	2-3	10-50%	10-50%	2-3
	0%	0-1	<10%	<10%	0-1

Tab. A2 Beurteilungsmatrix des heterotrophen und pflanzlichen Bewuchses mit der Bewuchsdichte von Algen, Moosen und Makrophyten nach der Methode von Thomas und Schanz [3]. (Erläuterungen siehe Text).

Pflanzlicher Bewuchs

Der pflanzliche Bewuchs wurde anhand der Algen, Moose und Makrophyten innerhalb der gesamten Bachsohlenfläche des jeweiligen Probenahmesektors beurteilt. Als Beurteilungskriterien dienten die Bewuchsdichteskalen für Fadenalgen, Moose und Makrophyten nach THOMAS und SCHANZ [3], der prozentuale Deckungsgrad der Bachsohle mit Fadenalgen und der prozentuale Deckungsgrad der Korngrössen 1–3 (Steine

>20 mm Durchmesser) mit Fadenalgen. In die Bewertung der Fadenalgen sind die Grünalgen (z.B. *Cladophora glomerata*), Gelbgrünalgen (v.a. *Vaucheria sp.*) und Kieselalgen einbezogen worden, dagegen ist die Zellschläuche bildende Goldalge *Hydrurus foetidus* nicht berücksichtigt worden.

Lästige Wucherungen von Algen und höheren Wasserpflanzen sind nicht notwendigerweise eine Folge des Nährstoffeintrags ins Gewässer.

Vielmehr sind sie das Resultat aus dem Zusammenwirken von Nährstoffeintrag, fehlender Beschattung, fester resp. kolmatierter Gewässer-sole, ausbleibenden Hochwasserereignissen und fehlenden Herbivoren. Gewässer mit periodischem Geschiebetrieb, ausreichender Beschattung und einer normalen Besiedlung mit pflanzenfressenden Makrobenthos weisen auch bei stärkerer Nährstoffbelastung keine Pflanzenwucherungen auf, dagegen können in schwach gedüngten Fließgewässern mit unbeweglicher, kolmatierter Sohle, fehlender Beschattung und fehlenden Herbivoren dicke Pflanzenteppiche auftreten. Starkes Pflanzenwachstum hat u. a. nachteilige Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt. Wie UEHLINGER [10] gezeigt hat, kann in Gewässern mit starkem Algenbewuchs durch den Abbau der Pflanzenbiomasse und der verstärkten Respiration in der Nacht der Sauerstoffgehalt im freien Wasser bis auf 1 mg/l absinken. Solche Sauerstoffkonzentrationen sind für viele Wirbellose und Edelfische lebensbedrohlich.

2. Beurteilung der Wasserqualität anhand der Kieselalgen

Zur Beurteilung der Wasserqualität im Bereich der Kläranlagen wurden als Bioindikatoren Kieselalgen verwendet, die unabhängig von ökomorphologischen Faktoren die Gewässergüte anzeigen. Bestimmt wurde die Gewässergüte hinsichtlich der stofflichen Gesamtbelastung nach dem Modul *Kieselalgen* (DI-CH) [2], der Saprobie nach LANGE-BERTALOT [4, 5] und der Trophie nach SCHIEFELE und KOHMANN [6].

Probenahme

Von mindestens 10 über den Bachquerschnitt verteilten Steinen wurden je ca. 10 cm² Algenaufwuchs abgeschabt. Das Algenmaterial wurde in ein kleines Plastikgefäß gegeben und mit Formaldehyd (3-4%) fixiert.

Verarbeitung der Kieselalgenproben

Die im Feld mit Lugol fixierten Proben wurden im Labor zu mikroskopisch untersuchten Präparaten weiterverarbeitet. Zuerst wurden die Proben von grösseren Bestandteilen getrennt, dann mit Salz-

säure entkalkt und durch eine Heissoxidation mittels Schwefelsäure und Kaliumnitrat von organischen Bestandteilen gereinigt. Anschliessend sind die Proben gewaschen und die suspendierten Silikatschalen auf 3 Konzentrationen verdünnt worden. Die Suspensionen wurden auf Deckgläser aufgetragen und getrocknet. Die Deckgläser mit den präparierten Schalen wurden auf einen Objektträger gebracht und in das brechungsintensive Kunstharz Naphrax (d = 1.73) eingebettet.

Bestimmung und Auszählung

Aus je einem der Präparate wurden ca. 500 Schalen bis zur Art und wo erforderlich, bis zur Unterart bestimmt. Von jeder taxonomischen Einheit zählte man die einzelnen Individuen und ermittelte die relative Häufigkeit nach der Formel:

$$\text{Relative Häufigkeit [\%]} = (N_i / N) * 100\%$$

wobei N_i die Anzahl gezählte Schalen der Art i und N die Gesamtzahl der gezählten Schalen einer Probe sind. Die erhaltenen Daten konnten zur Bestimmung des Kieselalgenindex DI-CH, der Differentialartengruppen nach Lange-Bertalot [4] des Trophieindex nach Schiefele und Kohmann [6] weiter ausgewertet werden.

Ermittlung des DI-CH

Der Kieselalgenindex DI-CH wurde aus einer gesamtschweizerischen Auswertung chemisch-physikalischer, hydrografischer und Kieselalgen-Daten von Niederhauser und Hürlimann [2] für die Beurteilung der Gewässerqualität auf Stufe F entwickelt.

Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{DI-CH} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i * G_i * H_i}{\sum_{i=1}^n G_i * H_i}$$

Der Indexwert kann zwischen 1 und 8 variieren. Für die Bewertung wird der Skalenbereich gemäss Tabelle A3 in 5 Zustandsklassen unterteilt.

DI-CH	Bewertung	
1.00-3.49	sehr gut	GSchV erfüllt
3.50-4.49	gut	
4.50-5.49	mässig	GSchV nicht erfüllt
5.50-6.49	unbefriedigend	
6.50-8.00	schlecht	

Tab. A3 Bewertung des Kieselalgenindex (DI-CH) anhand von 5 Zustandsklassen des Modulstufen-Konzeptes.

Ermittlung der Saprobie

Nach Lange-Bertalot [4] treten bei guter Wasserqualität grundsätzlich alle Kieselalgenarten auf. Hingegen bestehen artspezifische Toleranzen gegenüber zunehmender Belastung mit organischen Substanzen.

Gewässergütestufe		Prozentualer Anteil der Differentialartengruppen
I	oligosprob Unbelastet bis sehr gering belastet	$hs \geq 90\%$ $s + t + r \leq 10\%$
I-II	oligosprob – β-mesosaprob gering belastet	$hs \geq 10\%$ $50\% \leq s \leq 90\%$
II	β-mesosaprob mässig belastet	$hs \leq 10\%$ oder $hs + s > 50\%$; $s \geq 50\%$ $t + r < 50\%$
II-III	β-α-mesosaprob kritisch belastet	$10\% < hs + s < 50\%$ $50\% \leq t + r < 90\%$
III	α-mesosaprob stark verschmutzt	$hs + s \leq 10\%$; $t \geq 50\%$ $r < 50\%$
III-IV	α-mesosaprob-polysaprob sehr stark verschmutzt	$10\% < hs + s + t < 50\%$ $r \geq 50\%$
IV	polysaprob übermässig verschmutzt	$hs + s + t \leq 10\%$; $r \geq 90\%$

Tab. A4 Häufigkeiten der 4 Differentialartengruppen mit der Zuordnung der Gewässergüteklassen (hs = hochsensibel, s = sensibel, t = tolerant, r = resistent; Erläuterungen siehe Text).

Aus diesem Grund wird die Kieselalgen-gesellschaft in 3 Gruppen mit sensiblen, mässig tole-

ranten und toleranten Kieselalgen unterteilt. Der relativen Häufigkeitsverteilung der 3 Gruppen wurden die Gewässergüteklassen nach LAWA zugeordnet. In neueren Untersuchungen, unter Berücksichtigung von Quellgewässern, haben HOFMANN [7] und REICHARDT [8] die Einteilung von Lange-Bertalot revidiert und um eine hoch-sensible Differentialartengruppe erweitert. Die revidierte Zuordnung der Gewässergüteklassen zu den Häufigkeitsverteilungen der 4 Differentialartengruppen wird in Tabelle A4 gezeigt. Sie wurde für diese Untersuchung übernommen.

Ermittlung der Trophie

Zur Indikation des Nährstoffgehaltes (Trophie) in Fließgewässern haben Schiefele und Kohmann [6] anhand einer chemischen Untersuchung und der Zusammensetzung der Kieselalgen-gemeinschaft an 31 verschiedenen Fließgewässern in Deutschland die artspezifischen Nährstoffpräferenzen von 105 Kieselalgenarten festgelegt.

Trophiestufen	TDI - Bereiche
unbelastet (oligotroph)	1.0 - 1.4
schwach belastet (oligo-mesotroph)	1.5 - 1.8
deutlich belastet (mesotroph)	1.9 - 2.2
kritisch belastet (meso-eutroph)	2.3 - 2.7
auffallend belastet (eutroph)	2.8 - 3.1
stark belastet (eutroph-hypertroph)	3.2 - 3.5
sehr stark belastet (hypertroph)	3.6 - 4.0

Tab. A5 Trophiestufen mit den zugeordneten Bereichen des Trophical Diatom Index (Erläuterungen siehe Text).

Analog zum Saprobienindex von Zelinka und Marvan wird ein Trophieindex nach der folgenden Formel bestimmt.

$$TDIPS = (w_j * y_j * TDI_j) * (w_j * y_j)^{-1}$$

TDI_{p5} ist der Tropical Diatom Index der jeweiligen Probenahmestelle, TDI_i der Tropical Diatom Index der Art i , w_i der Wichtungsfaktor der Art i , y_i die relative Häufigkeit der Art i der jeweiligen Probe und n die Anzahl Arten in der Probe.

Schiefele und Kohmann [6] haben einen Index für die Phosphorbelastung (mit den Fraktionen $P_{tot} + PO_4^{3-}$) und einen kombinierten Index für Phosphor- und Stickstoffbelastung (mit den Fraktionen NH_4^+ und NO_3^-) erstellt. Die Trophiestufen der Probenahmestellen wurden in dieser Untersuchung mit dem kombinierten Index ermittelt. Die Bandbreite des Tropical Diatom Index wurde nach Tabelle A5 in 7 Trophiestufen unterteilt.