

Toxinbildenden Cyanobakterien in sächsischen Talsperren: Ansätze, Methoden, Ergebnisse im Projekt CYAQUATA

Hilmar Börnick, Technische Universität Dresden, Institut für Wasserchemie



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



NaWaM
Nachhaltiges Wassermanagement



ReWaM

Regionales Wasser- und Abwasser-Management
für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland

4 Partner:



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Weitere externe Partner:



ReWaM: „Untersuchung der Wechselbeziehungen von toxinbildenden **Cyanobakterien** und Wasser**qualität** in **Talsperren** unter Berücksichtigung sich ändernder Umweltbedingungen und Ableitung einer nachhaltigen Bewirtschaftungsstrategie“ = CYAQUATA

- Motivation, Hintergrund
- Ziele und Ansätze von CYAQUATA
- Methoden & Ergebnisse
- Schlussfolgerungen/ Handlungsempfehlungen

- *Bedeutung Talsperren (TS):* Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz, Naherholung, Energieerzeugung, Betriebswasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung, Fischzucht ...
- trotz Wasserqualitätsverbesserung (Nährstoffe) zunehmende Tendenz in einigen TS: (Massen-) *Entwicklung von Phytoplankton* bzw. -benthos (u.a. Cyanobakterien!)
- damit verbunden: mögliche Freisetzung von *Geruchs-/Geschmacksstoffen bzw. Toxinen*
- Literatur → *Ursachen vielschichtig*, komplex, noch nicht detailliert aufgeklärt:
 - Nährstoffdargebot
 - thermische Schichtungs- / Durchmischungsregime
 - extreme Wetterereignisse
 - kürzere Eisbedeckung
 - längere Wachstumsphasen
 - höherer CO₂-Gehalte in der Atmosphäre
 - Rolle Sediment
 - ...



Quelle: <http://toxische-cyanobakterien.de/en/background-information/recognising-cyanobacterial-blooms/>

- Cyanobakterien/-toxine: Vielzahl an Untersuchungen, Studien, Veröffentlichungen

- Seit 60er Jahre Vielzahl Veröffentlichungen

*Thematik Cyanobakterien /-toxine in TS, SciFinder:**

„cyanobacteria in reservoirs“: 1655 ×
„microcystins in reservoirs“: 513 ×
„cyanobacteria & drinking water“: 2718 ×

- 29.01.2020

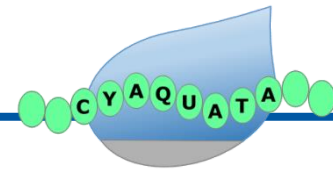
- diverse Forschungsprojekte, darunter UBA (z. B. PEPCY)
- Einrichtungen/Beratungssysteme (wie „Cyanocenter“ UBA)

nach wie vor viele *offene Fragen*, z. B.:

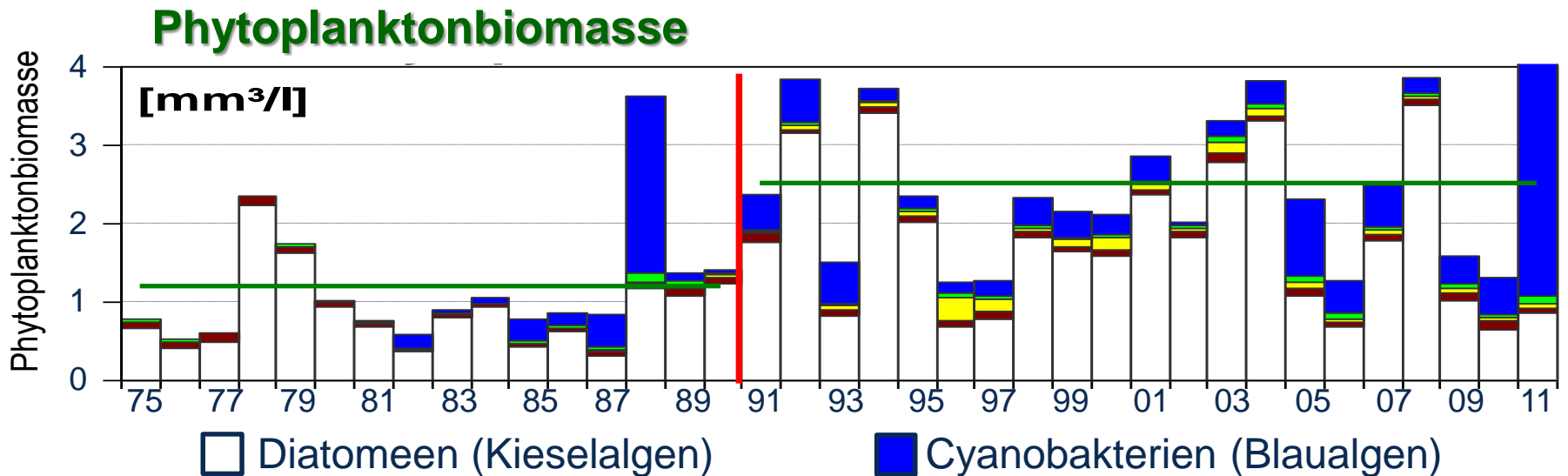
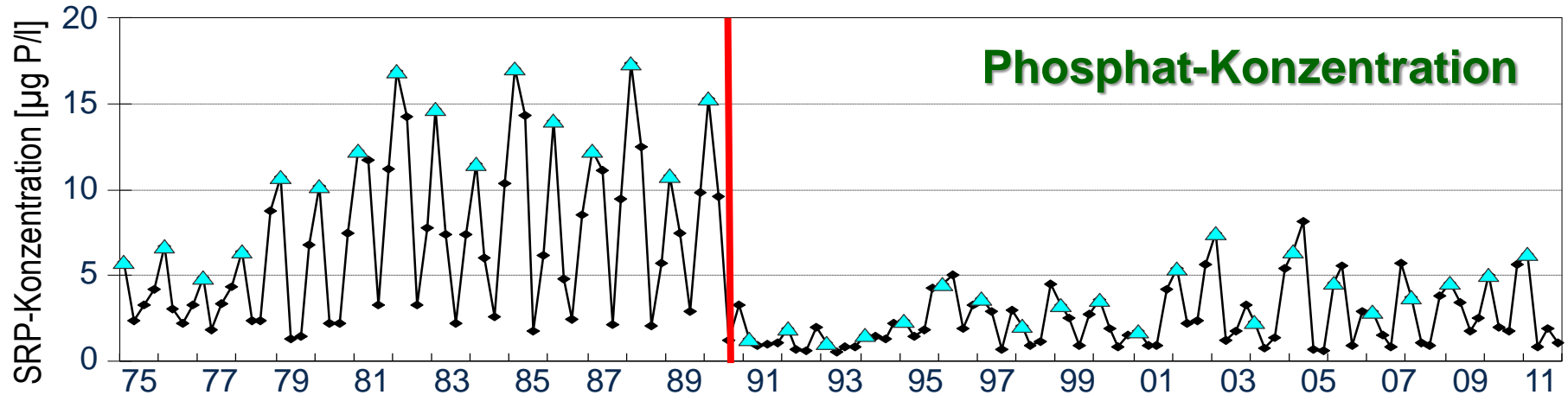
- Vorhersage von Massenblüten schwierig
- Auftreten neuer Arten CB (andere Toxine?)
- autotrophes Picoplankton: Toxinbildungspotential weitgehend ungeklärt
- über 150 Cyanotoxine bekannt, Untersuchungen beschränken sich zumeist auf 10 ... 15
- ...



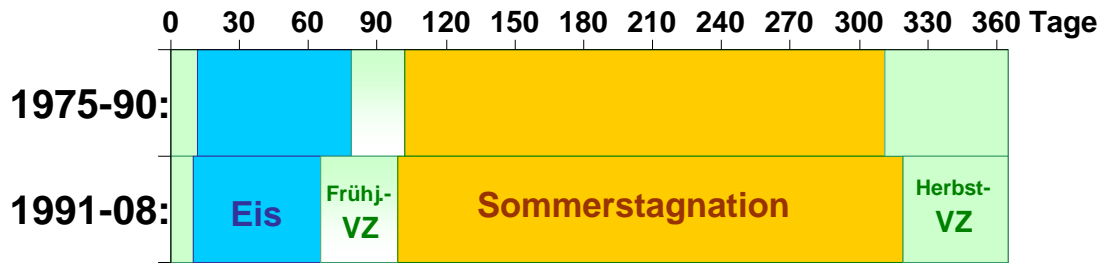
Motivation, Hintergrund



Entwicklung der Nährstoffkonzentration und der Phytoplanktonbiomasse (TS Saidenbach)



■ Winter/Eis ■ Sommerstagnation
■ Frühjahrsvollzirkulation ■ Herbstvollzirkulation



Vermutete Ursachen für den Anstieg

Warme Winter



Kürzere Eisbedeckung
und/oder

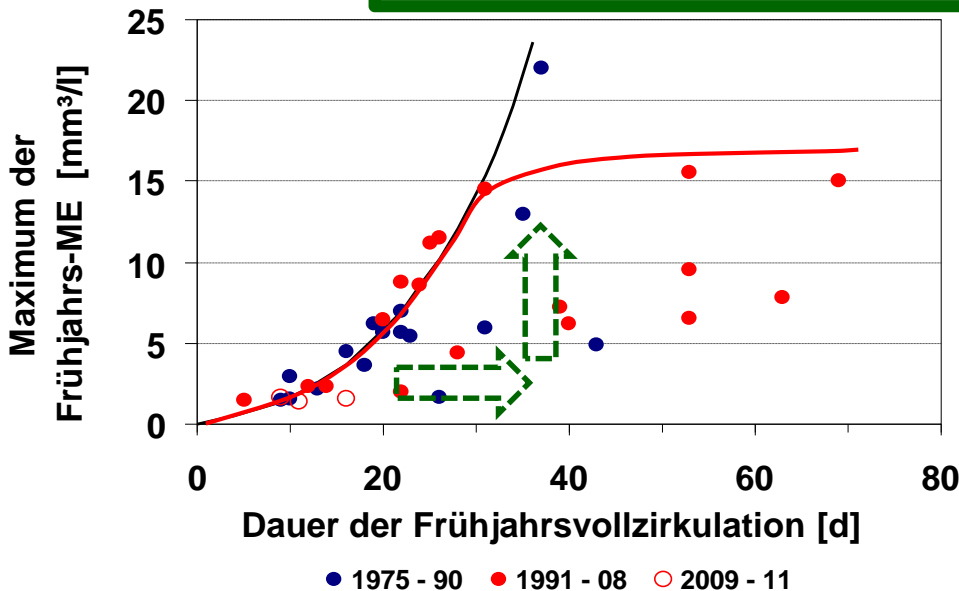
früherer Eisaufbruch



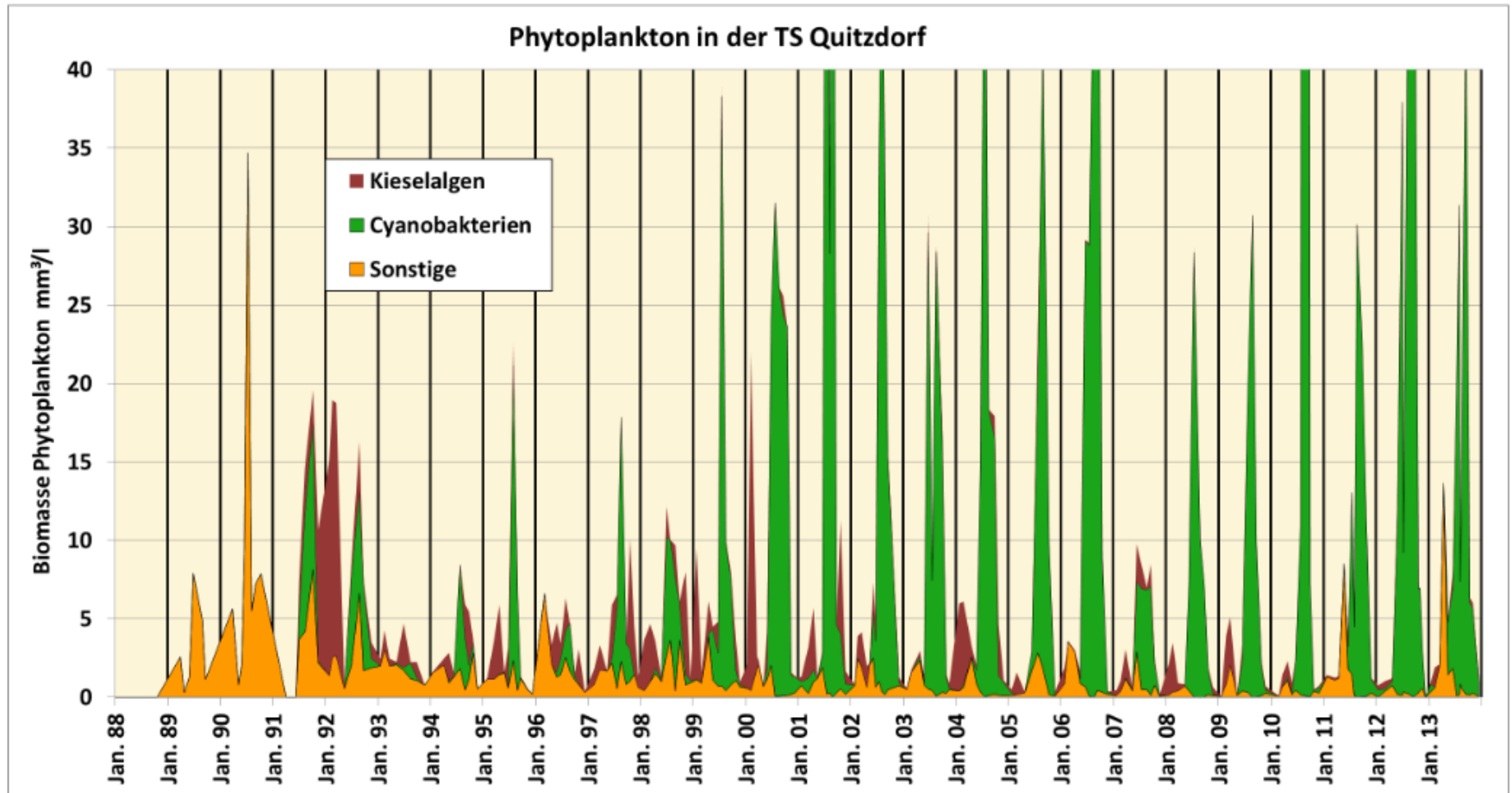
Längere Frühjahrsvollzirkulationszeit



verlängerte
Wachstumsmöglichkeit



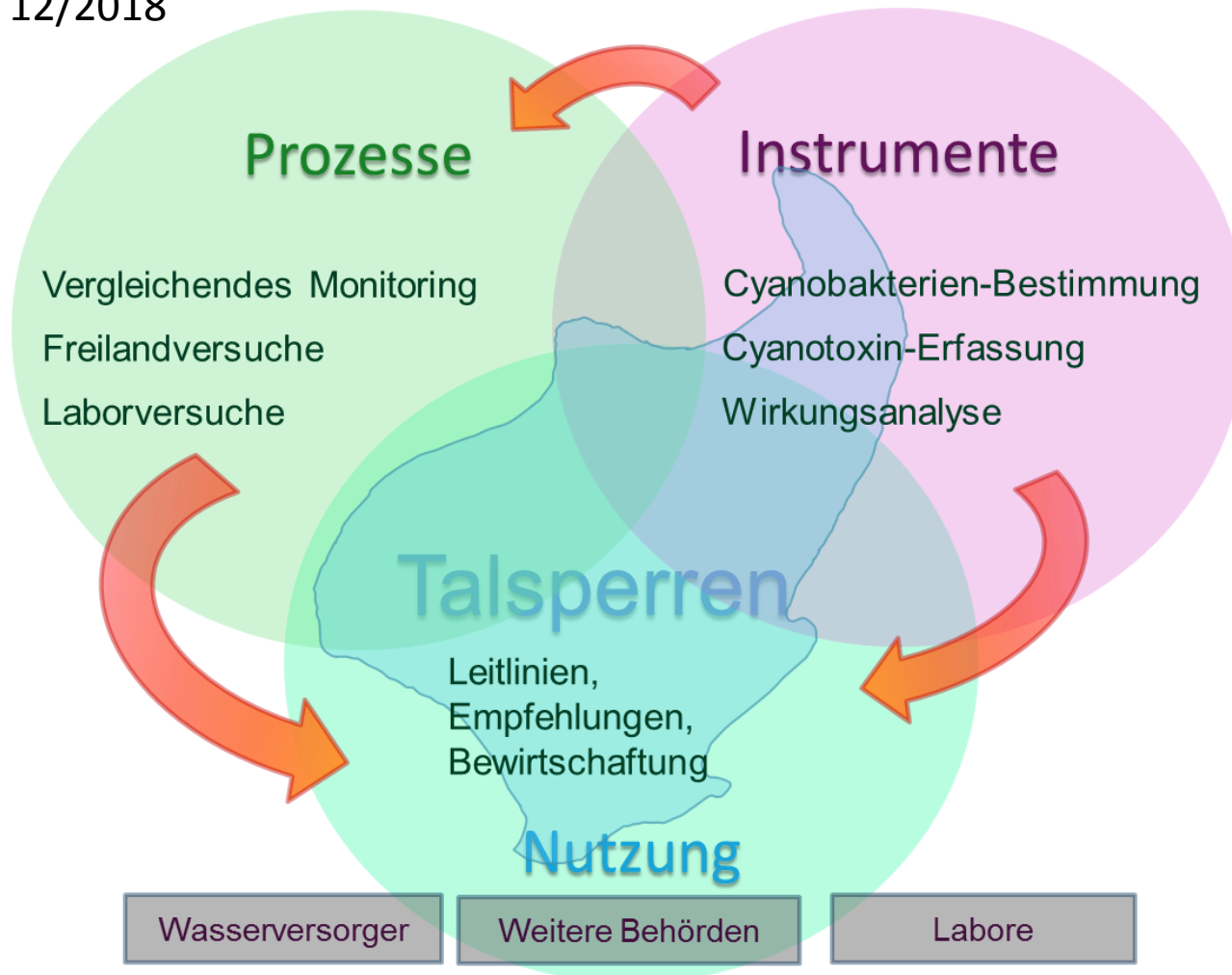
Cyanobakterien in der TS Quitzdorf



Quelle: https://media.lk-goerlitz.active-city.net/aemter/kreisentwicklung/tsq/Praesentation_23-04-2014.pdf

Forschungsprojekt CYAQUATA:

Laufzeit: 06/2015 – 12/2018



Trinkwassertalsperren



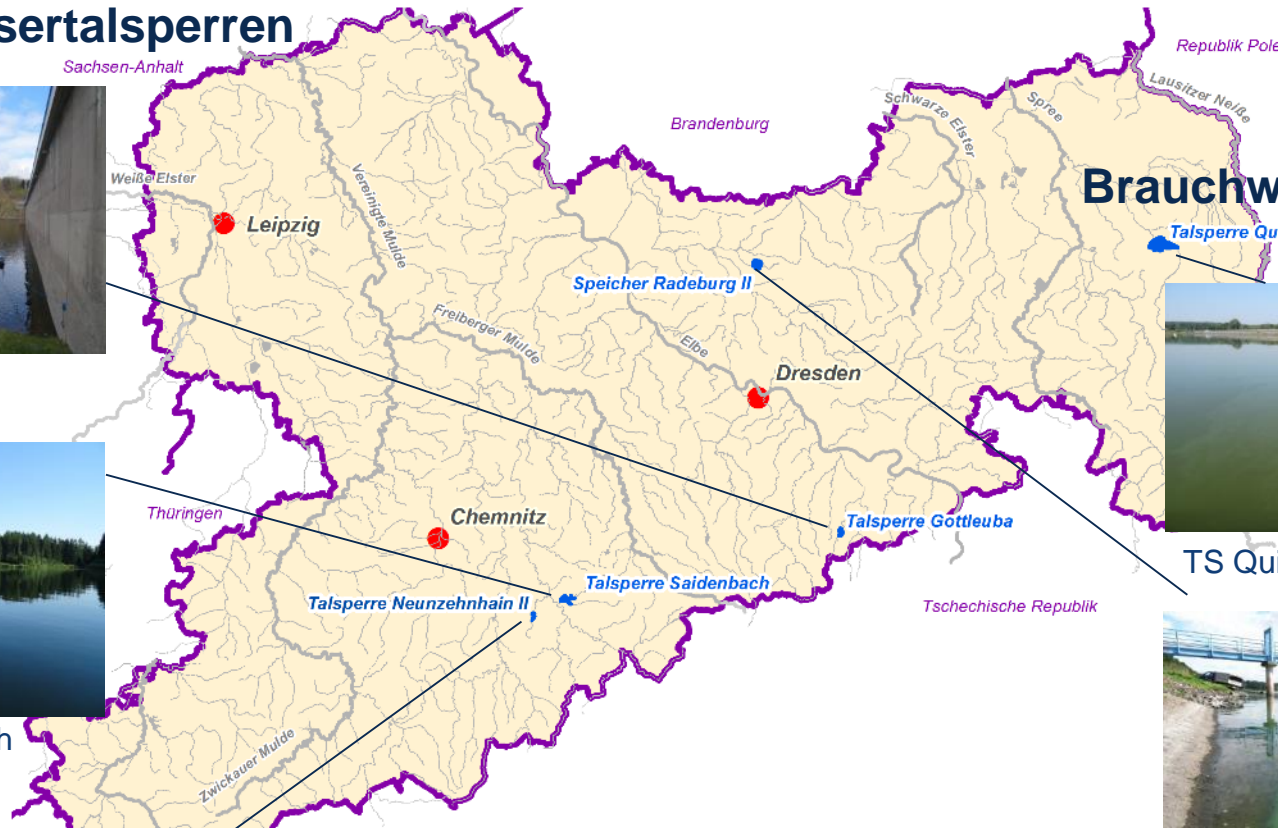
TS Gottleuba



TS Saidenbach



TS Neunzehnhain II



Brauchwasserspeicher



TS Quitzdorf

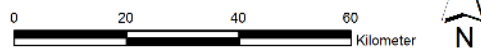


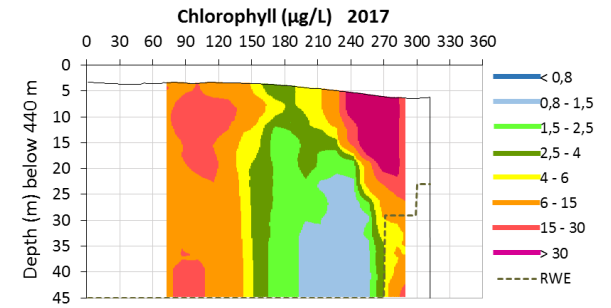
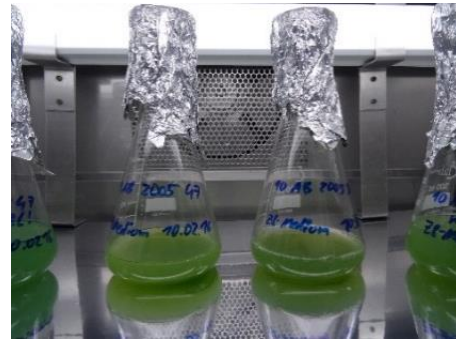
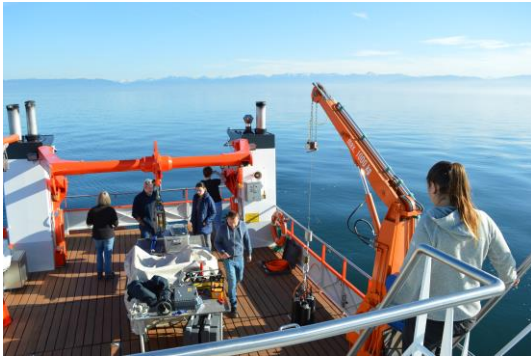
Speicher Radeburg II

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Boarbeitung: LFULG, Referat 44 - Oberflächenwasser, Wasserrahmenrichtlinie
Fachdaten: LFULG
Herbeitungsstand: September 2017
Geobasisdaten: © 2017, Staatsbetrieb Geobasisdaten und Vermessung Sachsen (GeoSN)





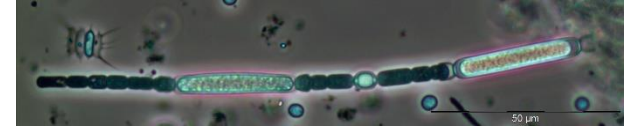
METHODEN & ERGEBNISSE (AUSWAHL)



Methodik – CB-Erfassung

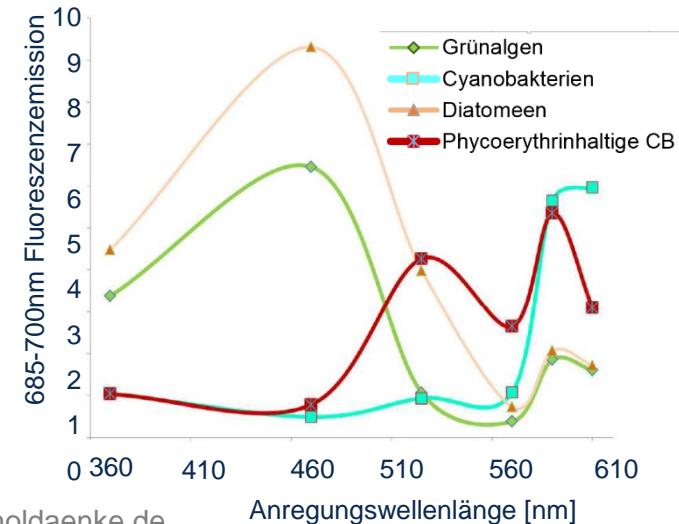
Mikroskopie

- Bestimmung bis zur Art oder Gattung
- Abschätzung des Phytoplankton-Biovolumens



FluoroProbe (bbe moldaenke)

- Fluoreszenzspektroskopische Detektion der Pigmente
- Quantifizierung von Diatomeen, Grünalgen, Cryptophyta und Cyanobakterien
- Neu: Kanal für phycoerythrin-haltige Cyanobakterien



www.bbe-moldaenke.de

Durchfluss- zytometrie (BD Accuri C6)

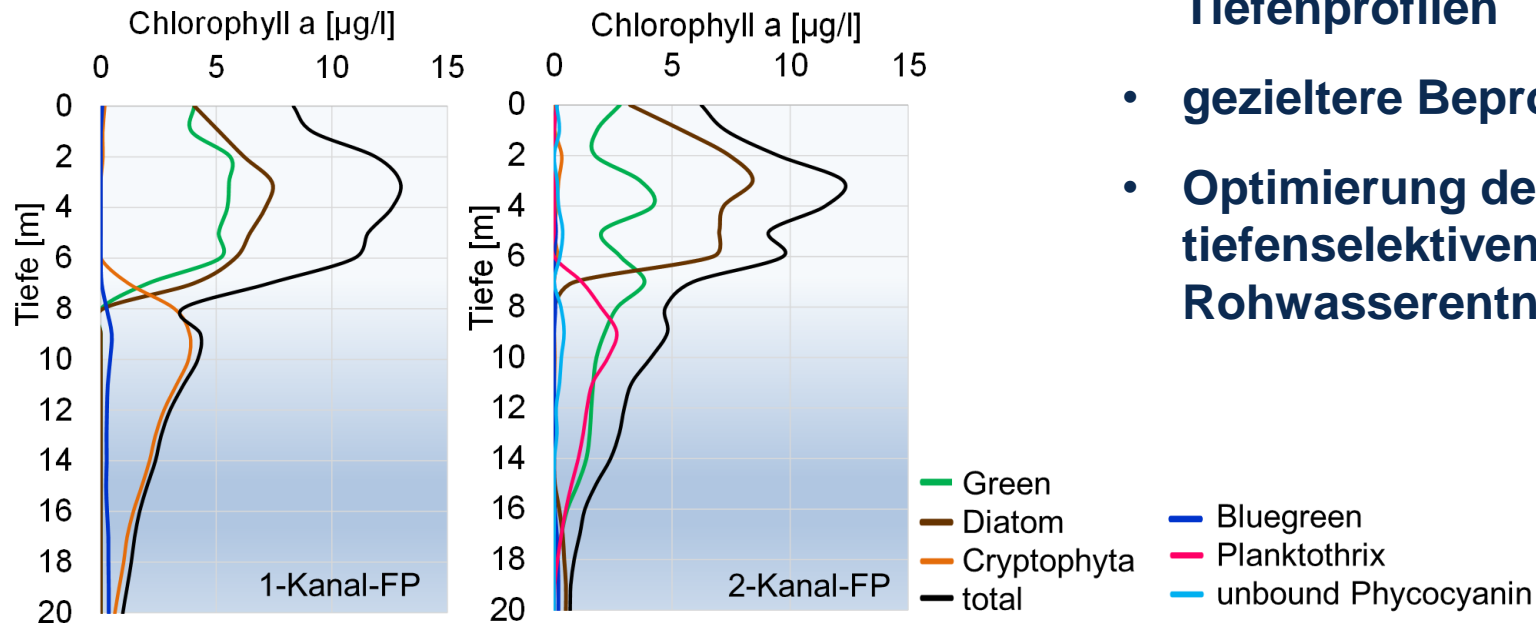
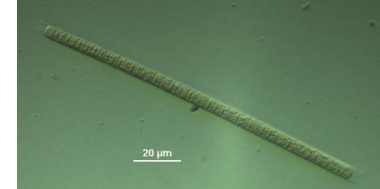
- Basiert auf photometrische Detektion und Partikelzählung
- Differenzierung von Phytoplankton hinsichtlich Pigmentzusammensetzung, Größe und Oberflächenstruktur



Methodik – CB-Erfassung

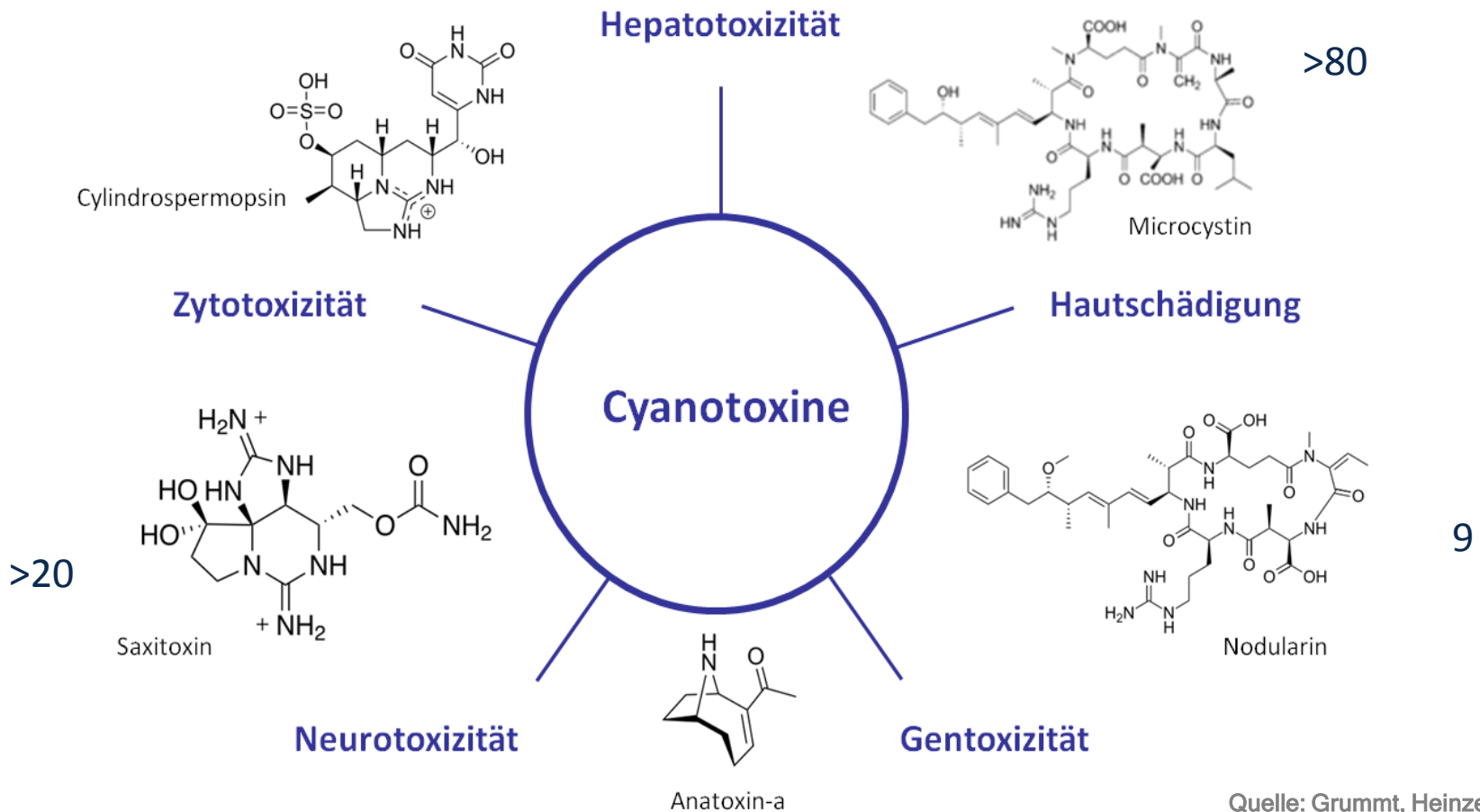
Weiterentwicklung der **FluoroProbe-Sonde**

- Neues Profil für phycoerithrinhaltige Cyanobakterien (z. B. *Planktothrix rubescens*)
- Detektion von freiem Phycocyanin (Indikator für absterbende Cyanobakterienblüten)



- **In-situ Aufnahme von Tiefenprofilen**
- **gezielte Beprobung**
- **Optimierung der tiefenselektiven Rohwasserentnahme**

Erfassung Cyanotoxine



Quelle: Grummt, Heinze (UBA)

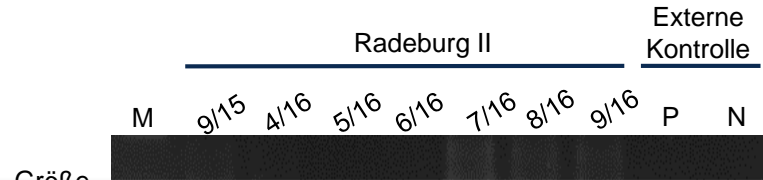
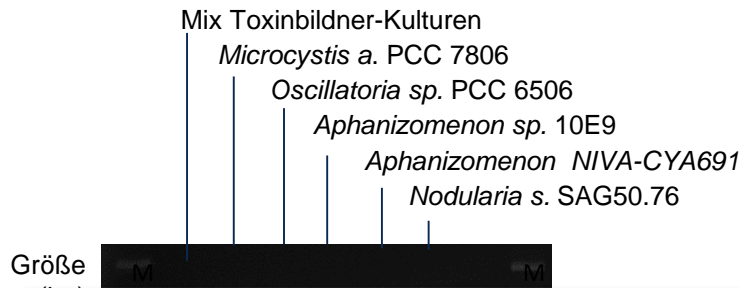
Molekularbiologische Cyanotoxinerfassung

Nachweis von Toxin-Genen

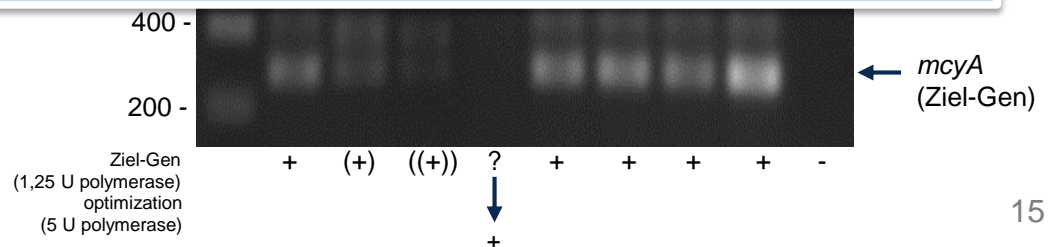
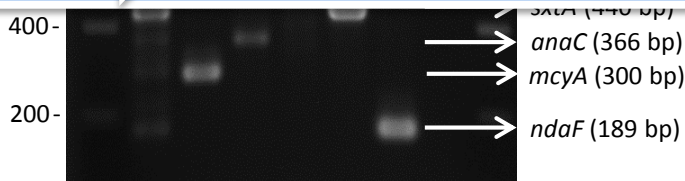
Nachweis von Genabschnitten der Cyanotoxinsynthese in Wasserproben

→ **Potentielle Toxinproduzenten**

Gruppe	Toxin	Gen	PCR-Produkt
Hepatotoxin	Microcystin	<i>mcyA</i>	300 bp
	Nodularin	<i>ndaF</i>	189 bp
Neurotoxin	Saxitoxin	<i>sxtA</i>	440 bp
	Anatoxin	<i>anaC</i>	366 bp
Cytotoxin	Cylindrospermopsin	<i>cyrB</i>	536 bp



Wasserproben können parallel auf das Vorkommen von 5 Toxin-Genen untersucht werden



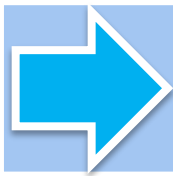
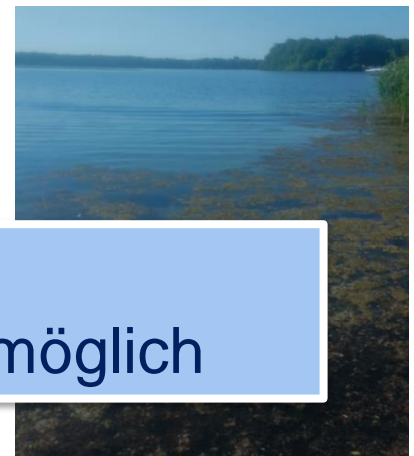
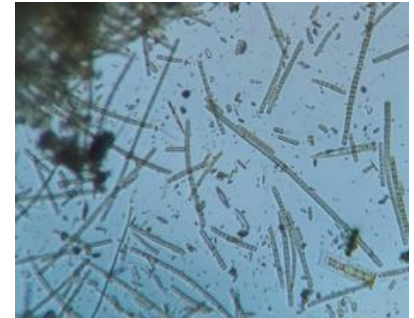
IGS
e)

Wirkungsbezogene Cyanotoxinerfassung

Zellbasierte Toxizitätstests

Wirkungsbasierte Teststrategie erfasst Gesamtoxizität der Probe
Toxikologisches Screening von Wasserproben noch nicht möglich

- Verdachtsfälle für cyanobakterielle Toxine, die keinem bekannten Toxin zugeordnet werden können
- Toxizitätstest eines Cyanobakterienstammes
- Charakterisierung neu identifizierter Cyanotoxine



Wirkungsbasierte Teststrategie etabliert
Screening von Wasserproben noch nicht möglich

→ Neurotoxische Effekte nachgewiesen

Chemisch-analytische Cyanotoxinerfassung

Trennung von intra- und extrazellulärer Fraktion durch Filtration
(Glasfaserfilter, 0,7 μm)

Intrazelluläre Toxine

Methanolextraktion; Ultraschallbehandlung

Extrazelluläre Toxine

Anreicherung über Festphasenextraktion

Summenanalytik z. B. Immunoassay ELISA

Toxine /
Toxingruppen

Erhältlich für 5 Gruppen:
MC/NOD, STX, ATX, CYN



Abraxis ELISA Kit

Einzelsubstanzanalytik z. B. LC-MS/MS

- Unterschiedliche LC-Methoden für polare/ unpolare Toxine



LC-MS/MS, TU Dresden, IWC

Cyanotoxinanalytik

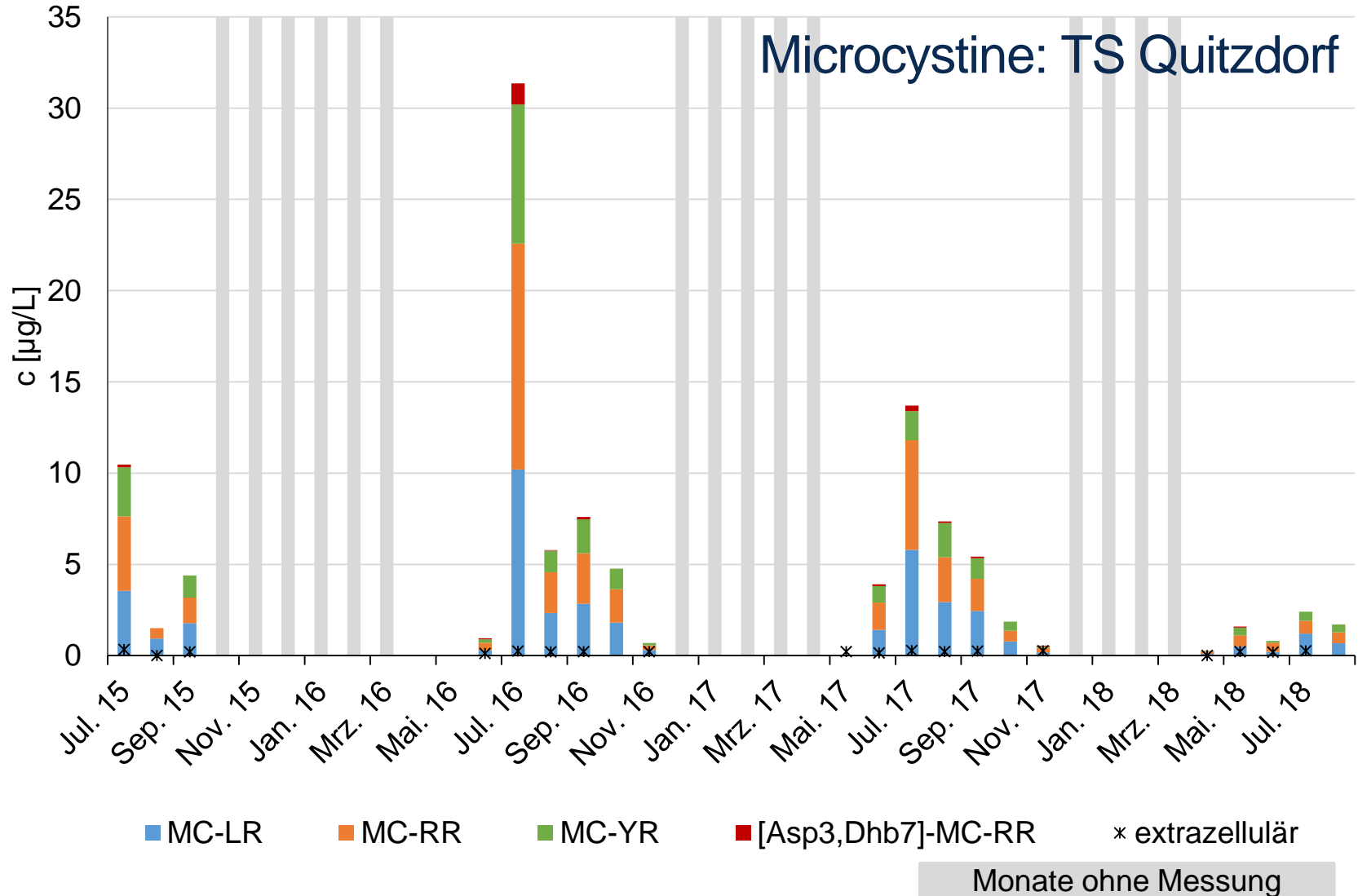
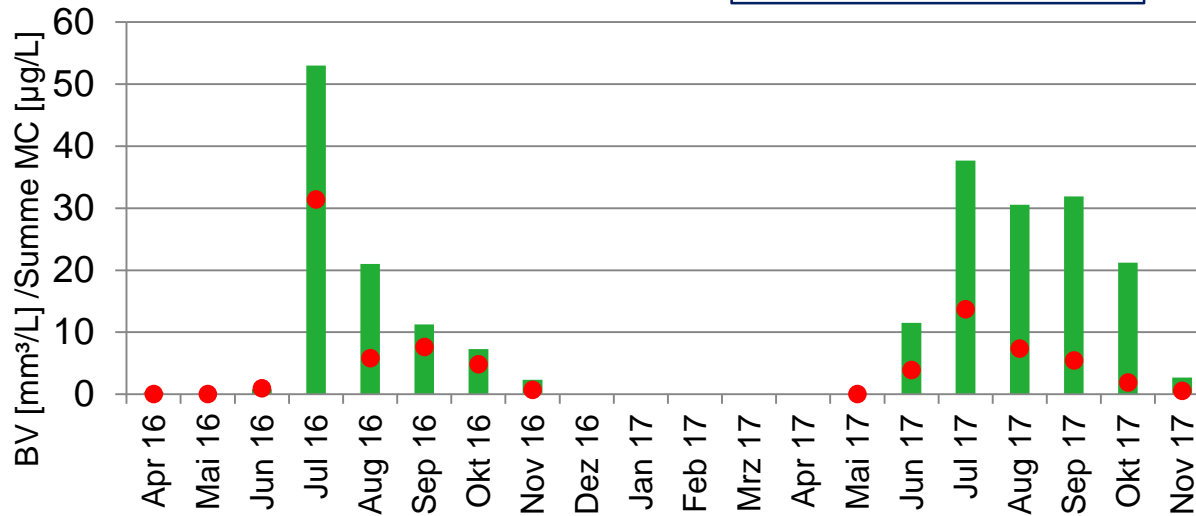


Abb.: Intra- und extrazelluläre Microcystinkonzentration in der TS Quitzdorf (Epilimnion-Mischprobe)

Cyanotoxinanalytik

TS Quitzdorf



- Biovolumen Cyanobakterien
- Summe Microcystine

Microcystine – Biovolumen Cyanobakterien

Speicher Radeburg II

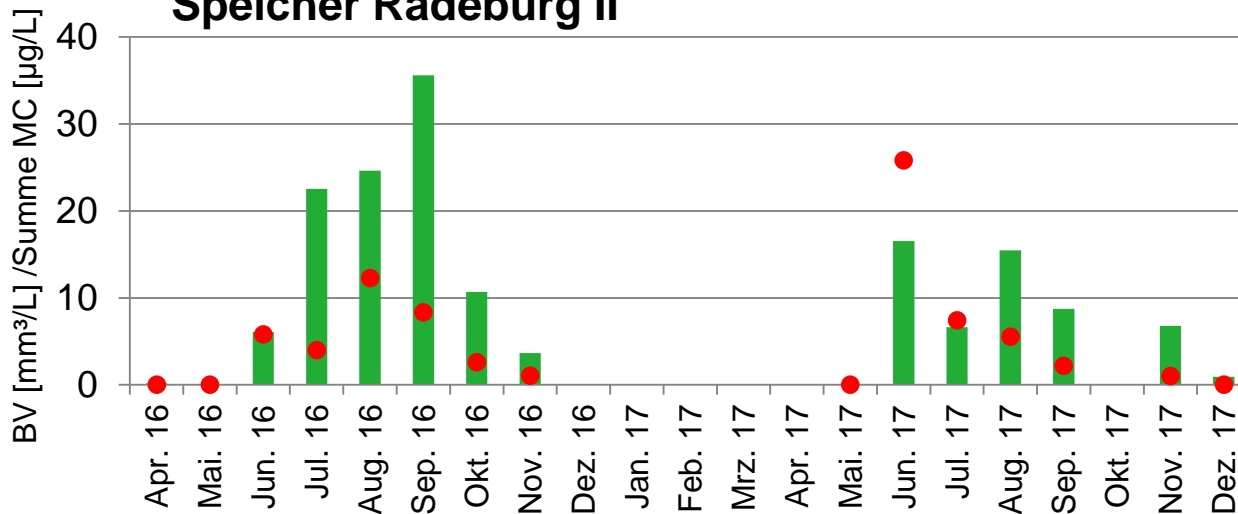
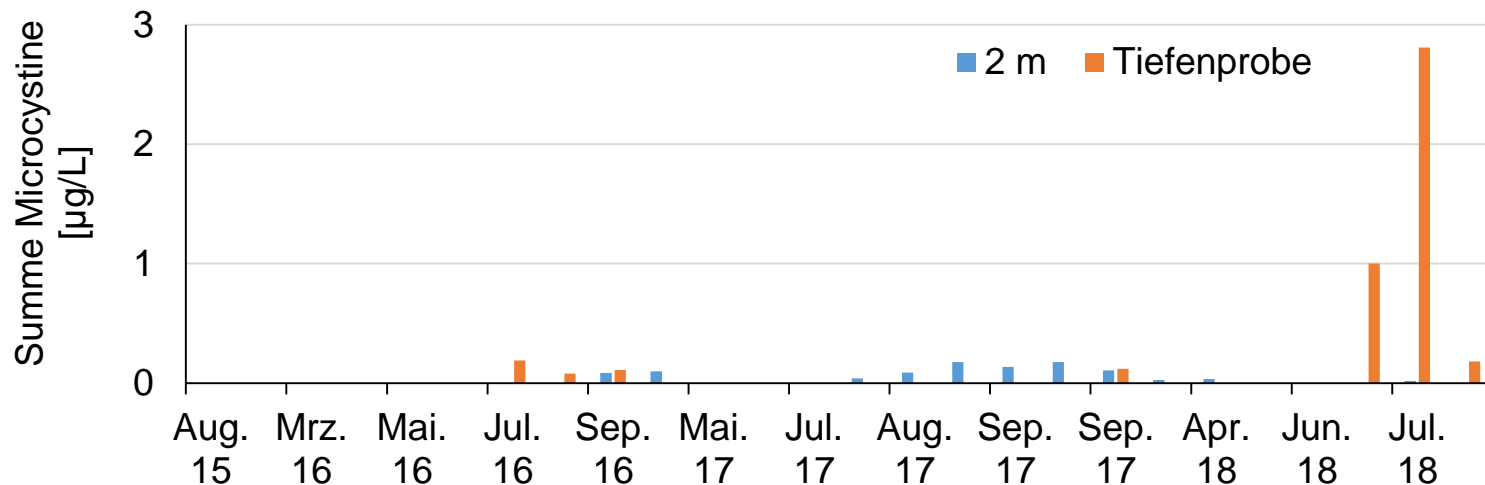


Abb.: Sp. Radeburg II, Juni 2017

Microcystine: TS Saidenbach

Cyanotoxinanalytik

- Mesotrophe Trinkwassertalsperre mit geringem Cyanobakterien-Aufkommen



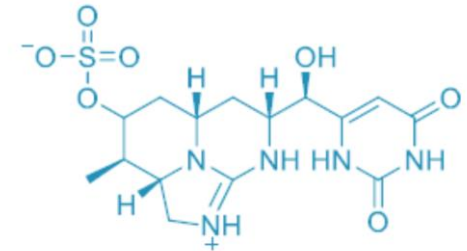
- Tiefenprobe (ca. 10 m, Metalimnion) wurde anhand des FluoroProbe-Tiefenprofils ausgewählt
- In Tiefenproben vor allem *Planktothrix rubescens*
- Signal für Standard für [Asp3,Dhb7]-MC-RR, aber bei gleichem Massenübergang werden auch [Asp3]-MC-RR und [Dha7]-MC-RR erfasst

Saxitoxin, Anatoxin und Cylindrospermopsin

Untersuchung der polaren Toxine STX, ATX und CYN erfordert zusätzliche analytische Methoden

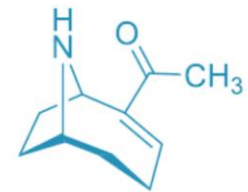
Cylindrospermopsin

- Gelegentliche Nachweise (intra- und extrazellulär) in Gewässern unterschiedlicher Trophie



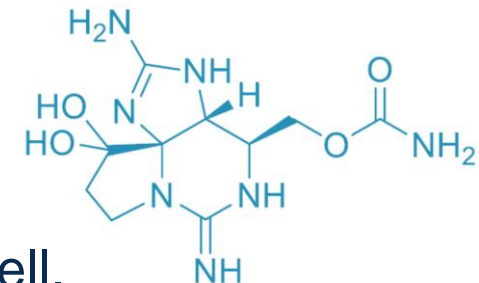
Anatoxin

- Wenige intrazelluläre Nachweise in den eutrophen Brauchwasserspeichern Quitzdorf und Radeburg II

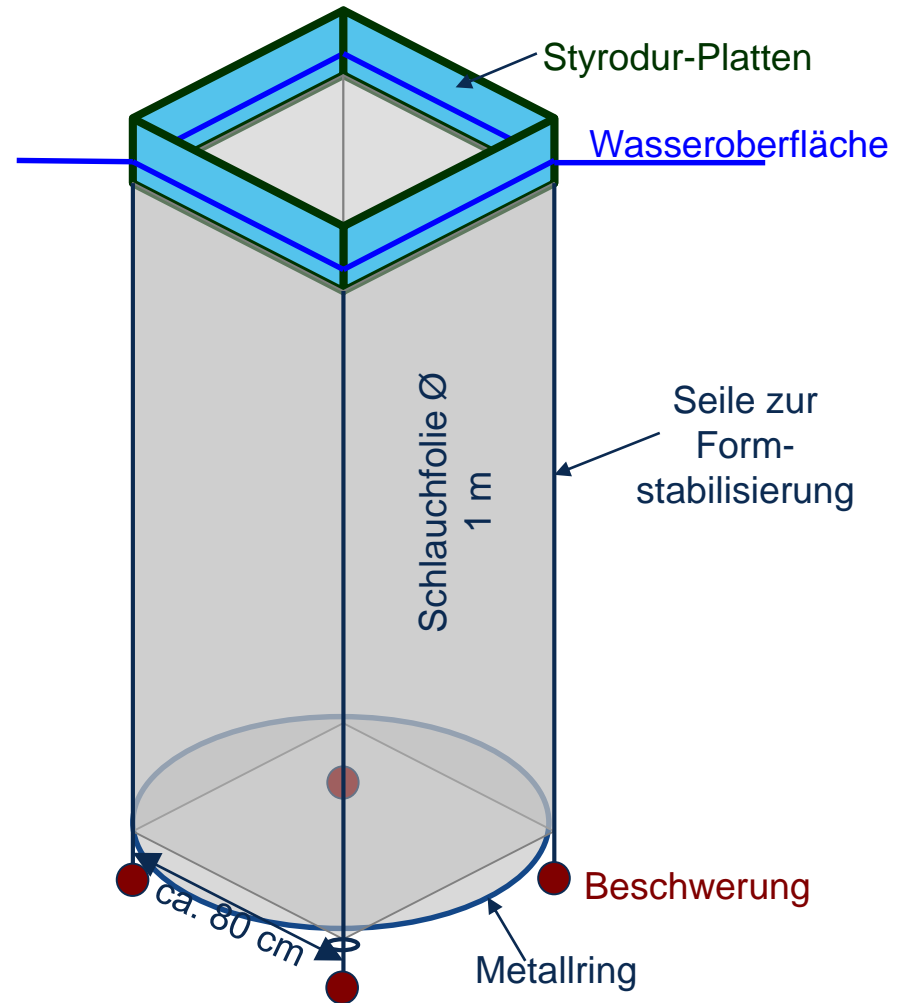


Saxitoxin

- Analytische Probleme
- Keine Nachweise mittels LC-MS/MS
- ELISA: wenige Nachweise im Speicher Radeburg II
7.05.2018: 1,36 µg/L intrazell., 0,03 µg/L STX extrazell.

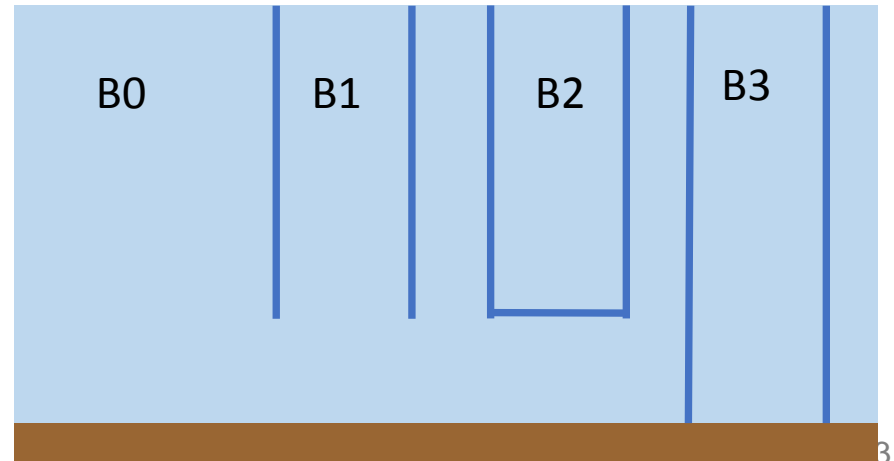
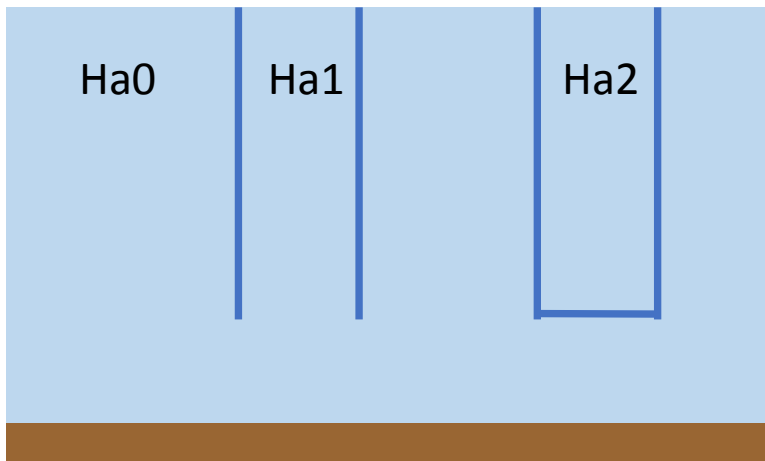
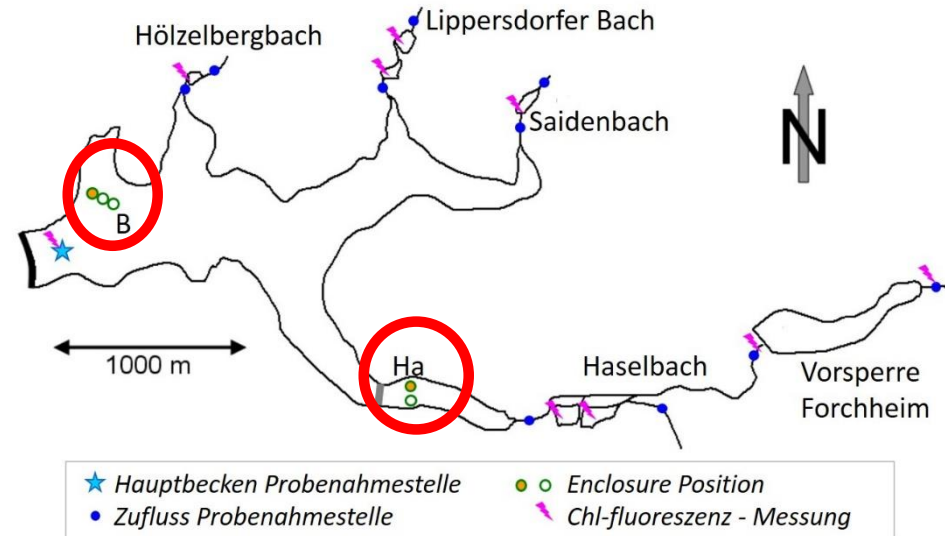


Enclosure - Aufbau



Fragestellung: In welchen Refugien werden CB-Entwicklungen initiiert?

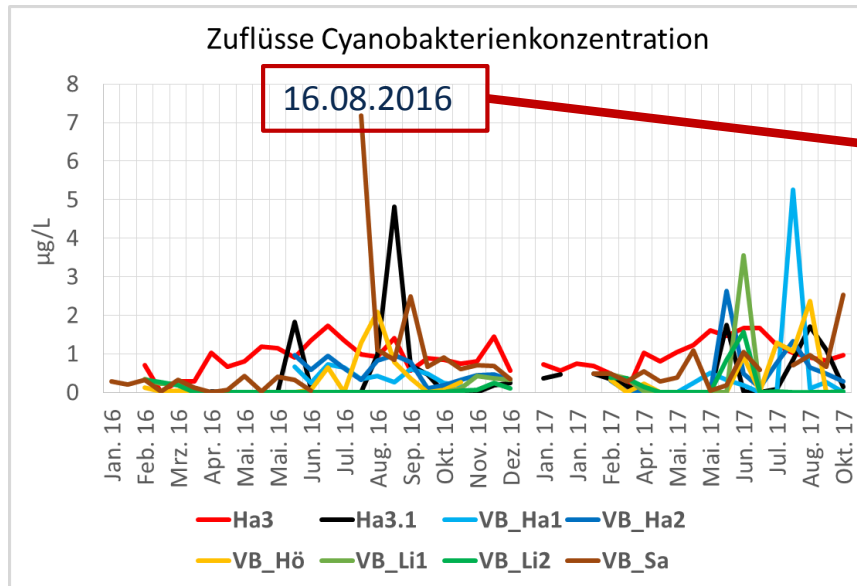
- Enclosures in verschiedenen Teilen der TS
- Enclosures unterschiedlicher Ausführung



Enclosure-Versuche in der TS Saidenbach

Stabile, länger anhaltende thermische Schichtung begünstigt Cyanobakterien in geschichteten Gewässern

Durchmischung unter bestimmten Bedingungen sinnvoll?



Anabaena sp., *Microcystis sp.*

- gleiche Arten in TS Saidenbach wie in VB Saidenbach

→ CB aus Vorbecken???

Cyanobakterien-Entwicklung aus dem Sediment (v.a. im Frühjahr) und durch Einträge aus den Vorsperren (Sommer)

Modifizierte, angepasste Bewirtschaftung der Vorsperren

		Radeburg II
Meteorologie	Niederschlag	
	Niederschlag_5	
	Niederschlag_10	
	Globalstrahlung	
	Globalstrahlung_5	+
	Globalstrahlung_10	+
	Lufttemperatur	+
	Lufttemperatur_5	+
	Lufttemperatur_10	+
Physik	Wassertemperatur	+
	Sauerstoffkonzentration	
	Sauerstoffsättigung	
	pH-Wert	+
	Leitfähigkeit	+
	Trübung (FAU)	
	Sichttiefe	+
Chemie	DOC	+
	SAK	+
	Silikat	+
	Chlorid	
	Nitrat	+
	Ammonium	+
	Sulfat	+
	Phosphat, gelöst	
	Phosphor, gesamt	+

Daten 2016/2017

Signifikanzniveau:

$p \leq 0.001$	$p \leq 0.01$	$p \leq 0.05$	$p \leq 0.1$
----------------	---------------	---------------	--------------

Speicher Radeburg II

- Einfluss zahlreicher Faktoren
- sehr variable Cyanobakterien-Population

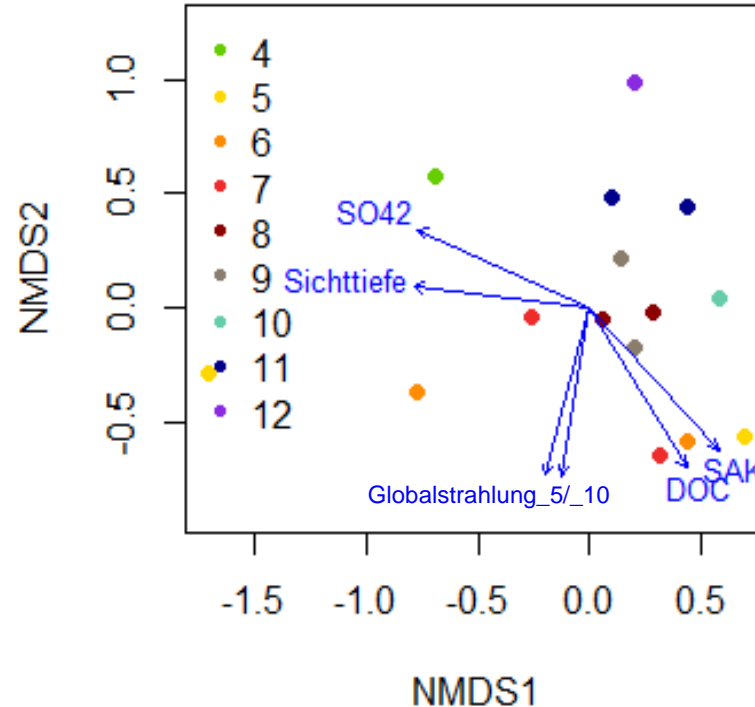


Abb.: Nichtmetrische Multidimensionale Skalierung (NMDS) auf Grundlage der Biovolumina der Cyanobakterien-Arten.

		Radeburg II
Meteorologie	Niederschlag	
	Niederschlag_5	
	Niederschlag_10	
	Globalstrahlung	
	Globalstrahlung_5	+
	Globalstrahlung_10	+
	Lufttemperatur	+
	Lufttemperatur_5	+
	Lufttemperatur_10	+
Physik	Wassertemperatur	+
	Sauerstoffkonzentration	
	Sauerstoffsättigung	
	pH-Wert	+
	Leitfähigkeit	+
	Trübung (FAU)	
	Sichttiefe	+
Chemie	DOC	+
	SAK	+
	Silikat	+
	Chlorid	
	Nitrat	+
	Ammonium	+
	Sulfat	+
	Phosphat, gelöst	
	Phosphor, gesamt	+

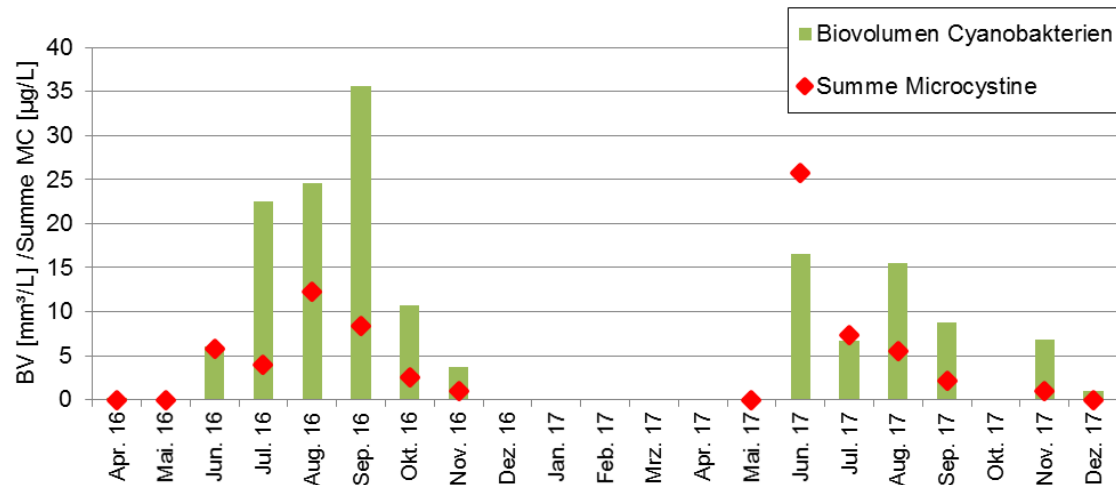
Daten 2016/2017

Signifikanzniveau:

$p \leq 0.001$	$p \leq 0.01$	$p \leq 0.05$	$p \leq 0.1$
----------------	---------------	---------------	--------------

Speicher Radeburg II

- Einfluss zahlreicher Faktoren
- sehr variable Cyanobakterien-Population
- Microcystinkonzentration aus Cyanobakterien-Biovolumen nicht ableitbar



		Gottleuba
Meteorologie	Niederschlag	
	Niederschlag_5	
	Niederschlag_10	
	Globalstrahlung	
	Globalstrahlung_5	
	Globalstrahlung_10	
	Lufttemperatur	
	Lufttemperatur_5	
	Lufttemperatur_10	
Physik	Wassertemperatur	+
	Sauerstoffkonzentration	+
	Sauerstoffsättigung	
	pH-Wert	
	Leitfähigkeit	
	Trübung (FAU)	
	Sichttiefe	
Chemie	DOC	
	SAK	
	Silikat	
	Chlorid	
	Nitrat	
	Ammonium	
	Sulfat	
	Phosphat, gelöst	
	Phosphor, gesamt	

Daten 2016/2017

Signifikanzniveau:

$p \leq 0.001$	$p \leq 0.01$	$p \leq 0.05$	$p \leq 0.1$
----------------	---------------	---------------	--------------

Talsperre Gottleuba

- Geringe Variabilität der Population
- v. a. autotrophes Picoplankton und *Planktothrix rubescens*
- Abundanzen steigen mit Wassertemperatur im Metalimnion

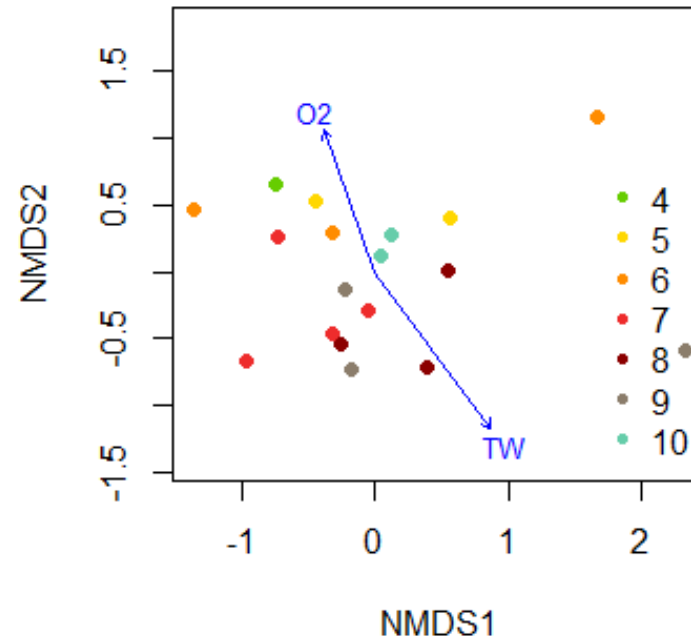


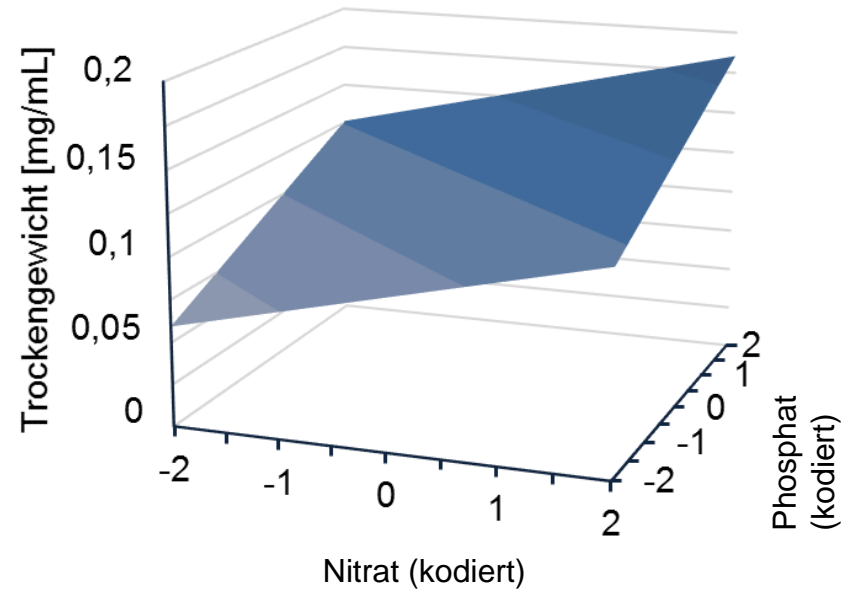
Abb.: Nichtmetrische Multidimensionale Skalierung (NMDS) auf Grundlage der Biovolumina der Cyanobakterien-Arten.

Einflussfaktoren auf CB-Entwicklungen

Laborversuche

Erhöhte Nährstoffverfügbarkeit erhöht Wachstum

Konkurrenzverhalten bei Anwesenheit mehrerer Stämme



Einflussfaktoren auf Wachstum und Toxinbildung sind Stamm-spezifisch

Klimafaktoren (Temperatur, Licht, atm. CO₂,) zeigen **keine einheitliche Auswirkung** auf Wachstum oder Toxinbildung in Laborversuchen

→ *einige Stämme profitieren von klimawandelbedingten Änderungen*

- I) Kontinuierliches Monitoring (z. B. Temperatur, Trübung)
 - Für eine Vorhersage von CB-Massenentwicklungen sind Messungen in hoher zeitlicher Auflösung notwendig

- II) Vor-Ort-Analysenmethoden (Chlorophyll a)
 - FluoroProbe zur Erfassung der Cyanobakterien
 - Anwendungsempfehlung

- III) Quantitative Methoden (Cyanotoxin-Bestimmung)
 - ELISA zur Quantifizierung der Microcystine
 - Anwendungsempfehlung



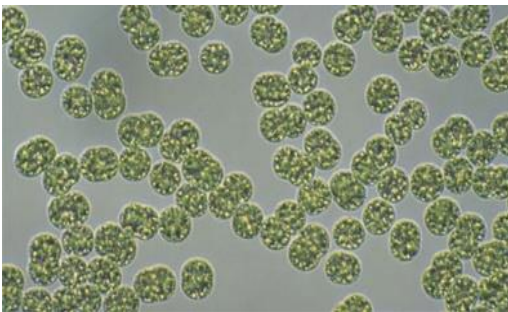


Eutrophe Brauchwasserspeicher

- Wiederholte sommerliche CB/CT-Entwicklungen wahrscheinlich
→ *CB-Population und Toxinbildung sind gewässerspezifisch*
- Erhebliche Blüten → Schutz der Nutzer (z. B. Sperrung/Abtrennung Badestellen, Aufbereitung ...)
- Verminderung der Nährstoffeinträge (punktförmige/diffuse Quelle)
- P im Sediment → über viele weitere Jahre stetige Nährstoffquelle, bei Sedimentberäumung: belastete Sedimente *komplett* entfernen
- Phosphatfällung → nicht nachhaltig
- Künstliche Durchmischung in Flachseen → ungeeignet
- Ultraschall nicht effizient; Algizide / Cyanozide (H_2O_2) Verzögerung der CB-Entwicklung, zudem Schäden für Ökosystem

Meso- und oligotrophe Trinkwassertalsperren

- Geringe Abweichungen der P-Einträge können erhebliche Auswirkungen auf die Phytoplanktonentwicklung und –artenzusammensetzung haben.
- Einige CB profitieren von den vom Klimawandel verursachten Veränderungen des thermischen Regimes (Eisbedeckung, Dauer der Zirkulations- und Stagnationsphasen, Schichtungsstabilität)
- CB-Vorkommen: **A: Koloniebildende CB**
 B: Picoplanktische CB
 C: *Planktothrix rubescens*



Microcystis aeruginosa



Planktothrix rubescens



Callieri, Freshwater Reviews (2007) 1, pp. 1-2

Picophytoplankton cells from Lake Maggiore

Meso- und oligotrophe Trinkwassertalsperren

A: Koloniebildende CB

- Bewirtschaftung der Vorsperren (P-Einträge, CB)
- Wildbettabgaben aus dem Epilimnion
- Vermeidung anoxischer Verhältnisse
- Biomanipulation, Entfernung von Aufräumungen ...

B: Picoplanktische CB

- Gut angepasst an niedrige Nährstoffkonzentrationen
- Keine Toxinbildung

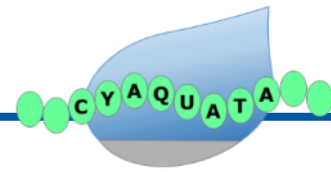
C: *Planktothrix rubescens*

- Angepasst an Metalimnion mesotropher Gewässer

**Talsperren spezifisch – Randbedingungen / Ereignisse /
Maßnahmen oft nicht übertragbar**

- Änderung Entnahmehorizont
- Abtrennung der Filamente mittels Flockung/Filtration gut möglich

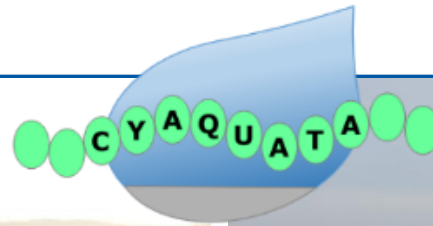




Trinkwasseraufbereitung

- Aktuell keine Gefährdung im Bereich Trinkwassertalsperren erkennbar, aber Potential nicht auszuschließen
- Die herkömmliche Aufbereitung von TS-Wasser (Flockung – Filtration – Desinfektion) ist für die Entfernung von CB und Microcystinen ausreichend
- Kritisch: Wasserwerksschlämme, (CT-Freisetzung?); Oxidation (Zelllyse)
- Hohe Gehalte an polaren Toxinen (Saxitoxine, Anatoxin und Cylindrospermopsin) → weitführende Aufbereitung
- Zur Sicherung der Wasserqualität kann Aktivkohle vorgehalten werden (auch für Geruchsstoffe)

TS Gottleuba



TS Quitzdorf



Foto: H. Börnick



Foto: H. Börnick

VIELEN DANK!



TS Neunzehnhain

Foto: H. Börnick



TS Saidenbach

Quelle: <http://www.ev-borstendorf.de/>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Europäische Union



Das LC-MS/MS-System wurde mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung sowie des Freistaates Sachsen gefördert.