

Sanierung Zugersee Zirkulationsunterstützung mittels Luft-Blasenschleier im Winter



Technischer Bericht zum Vorprojekt (ohne Anhang)

21. August 2023

Im Auftrag des Amtes für Umwelt des Kantons Zug

Impressum

Auftraggeber:

Baudirektion Kanton Zug, Amt für Umwelt
Aabachstrasse 5
6300 Zug
041 728 53 70
info.afu@zg.ch
www.zg.ch/afu

Roland Krummenacher, Amtsleiter
Bruno Mathis, Abteilungsleiter

Datum: 21.8.2023
Version: 2.1
Autor(en):
Hanspeter Bachmann
Markus Boller
Lukas Marti
Seitenzahl: 62

Titelfoto: Andreas Busslinger Photography
Zugersee von der Rigi mit Blick Richtung
Walchwil und Zug

Auftragnehmer:

BRA turbo Ing AG
Effiziente Belüftungs- und Pumpsysteme
aQa.engineering
Prof. Dr. Markus Boller

Industriestrasse 11
6343 Rotkreuz
041 340 36 36
info@braturboing.ch
www.braturboing.ch

Hanspeter Bachmann, BRA turbo Ing AG
Prof. Dr. Markus Boller, aQa.engineering
Lukas Marti, LUMAR engineering AG

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
1. Einleitung	8
1.1. Vorbemerkungen zur geplanten Variante	8
1.2. Ausgangslage und Problemstellung	9
1.3. Projektziele see-interne Massnahmen	10
1.4. Grundlagen	10
1.5. Rechtsgrundlagen	11
1.6. Projektorganisation	12
2. Zirkulationsunterstützung mittels Luft-Blasenschleier im Winter	13
2.1. Prozessanalyse	13
3. Bemessung und Betrieb der Blasenschleier	15
3.1. Natürliche Variablen	16
3.2. Bemessung der Belüftungsinstallationen	18
3.2.1. Erforderlicher Luftdurchsatz	18
3.2.2. Entwicklung der Blasengrösse	19
3.2.3. Entwurf und Betrieb der Diffusoren	21
3.2.4. Flexibilität der Anlagen	24
3.3. Absenken der Diffusoren	24
3.3.1. Aktualisierung der Prognosen zur Wirksamkeit der Zirkulationsunterstützung als see-interne Massnahme	26
4. Technische Realisierung der geplanten Zirkulationsunterstützung	28
4.1. Verfahrenstechnik	28
4.1.1. Systementscheid	28
4.1.2. Druckluftaufbereitung und Druckstufen	28
4.1.3. Kompressorenraum, Platzbedarf	30
4.2. Anlage und Ausrüstung landseitig	31
4.2.1. Grundstückerschliessung	31
4.2.2. Betriebsgebäude mit notwendigen technischen Einrichtungen	31
4.2.3. Elektroversorgung mit Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen	32
4.3. Baumassnahmen seeseitig	32
4.3.1. Rohrschweisssplatz und Rohrlager	34
4.4. Geologische Abklärungen für die Planung des Bauprojekts	35
4.4.1. Geologische und hydrogeologische Verhältnisse	35
4.4.2. Naturgefahren und Oberflächenabfluss	36
4.4.3. Weitere Standorteigenschaften	37
4.4.4. Geotechnische und hydrogeologische Herausforderungen	38
4.4.5. Leitungen vom Betriebsgebäude zu den Diffusoren	40
4.4.6. Leitungsbau im See	41

4.4.7.	Diffusoren für den Eintrag von grobblasiger Druckluft	41
4.4.8.	Verschiebung der geografischen Lage der Diffusoren	43
4.4.9.	Markierungsbojen und Verankerung	43
5.	Messboje Online für Temperatur- und Sauerstoff-Messung	44
6.	Baulicher und betrieblicher Unterhalt	46
6.1.	Anforderungen und mögliche Ausgestaltung des Servicebootes	46
6.2.	Stellenbeschrieb für den Unterhalt / Anforderungsprofil	48
6.2.1.	Möglicher Aufgabenbeschrieb für das Unterhaltspersonal	48
6.2.2.	Mögliches Anforderungsprofil	48
6.3.	Geschätzter Stundenaufwand für Betrieb und Wartung	48
7.	Erfolgskontrolle	49
8.	Kosten	50
8.1.	Baukosten Infrastruktur, Gebäude, Vortrieb See	50
8.2.	Kosten Seeleitungsbau mit 5 Diffusoren	51
8.3.	Kosten Druckluft-mit 5 Diffusoren	51
8.4.	Kosten Druckluftherzeugungsanlage mit 5 Diffusoren	52
8.5.	Kosten Elektro-, Mess-, Steuerungs-, Regelungs- und Leittechnik-Planung (EMSRL) (ohne allgemeine Elektroinstallationen)	52
8.6.	Kosten Umlegung Trafostation und Anschluss	53
8.7.	Kosten Photovoltaik Anlage	53
8.8.	Kosten Serviceboot	53
8.9.	Kosten Steganlage 2m x 12m	54
8.10.	Kosten Messboje «Oscar»	54
8.11.	Honorare	55
8.12.	Zusammenstellung Kosten für die Technische Zirkulationsunterstützung	55
8.13.	Kosten für Betrieb und Unterhalt	56
9.	Landerwerb	57
10.	Terminplanung	58
11.	Themenspeicher zuhanden Bauprojekt	59
Glossar		60
Abkürzungen		60
Literaturverzeichnis		61

Abbildungsverzeichnis	61
Planbeilagen	62
Literaturbeilagen	62
Anhang	63
A1. Erläuterungen zur Verfahrenstechnik	63
A2. Erläuterungen zu Technik und Installationen	74
A3. Bericht über die Machbarkeit der Wasserbauarbeiten vom 31.1.2023	76
A4. Geotechnischer Vorbericht vom 28.4.2023	86
A5. Bootsbauer	109
A6. Messboje	111

Zusammenfassung

Der mittlere Phosphorgehalt (P) des Zugersees ist heute mit rund 80 mg P/m³ Wasser, ausgehend von der maximalen Belastung von 200 mg P/m³ zu Beginn der 1980er-Jahre, immer noch viel zu hoch. Seit dem Jahr 2014 findet praktisch keine weitere Abnahme des Phosphorgehalts mehr statt. Die Gründe dafür liegen bei der grossen maximalen Tiefe von 200 m, dem sehr hohen Nährstoffgehalt im Tiefenwasser und der dadurch verursachten Dichtestabilisierung. Zudem wird mit der Klimaerwärmung im Winterhalbjahr die Zeit immer kürzer, in der von der Seeoberfläche bis zum Seegrund eine gleichmässige Wassertemperatur um ca. 4° C vorliegt, was die Voraussetzung für die natürliche vertikale Zirkulation und Sauerstoffversorgung in einem See darstellt. Dies führt dazu, dass im Zugersee im Winter sehr selten eine natürliche, vollständige Mischung auftritt und deshalb keine ausreichende Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers erfolgt. Die Messungen und Untersuchungen in den vergangenen zehn Jahren zeigen, dass die Entfernung der hohen Phosphorgehalte aus dem Tiefenwasser und die Rückführung des Zugersees in den mesotrophen Zustand, den der See früher aufwies, nur mit Hilfe technischer Massnahmen möglich ist.

Der Bericht der Eawag «Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees» vom April 2019 zeigt auf, dass see-externe Massnahmen nicht ausreichen für die Rückführung des Zugersees in den mesotrophen Zustand. Der Bericht verglich die Wirkung und Kosten verschiedener see-interner Massnahmen und kommt zum Schluss, dass die Unterstützung der natürlichen Zirkulation des Seewassers im Winter durch die Einleitung von Pressluft eine effektive und naturnahe technische Massnahme zur Behebung des Phosphorproblems ist. Damit kann das Phosphor-Reservoir im Tiefenwasser zeitlich gestaffelt aus dem Zugersee abgeführt werden. Mit der Zirkulationsunterstützung erfolgt auch ein verstärkter Sauerstoffeintrag aus der Atmosphäre ins Tiefenwasser.

Mit den vorgeschlagenen Massnahmen soll innert sechs bis zwölf Jahren eine vollständige Durchmischung des Sees im Winter erreicht werden. Negative Auswirkungen der Massnahmen sind praktisch ausgeschlossen. Modellrechnungen der Eawag zeigen, dass mit der Zirkulationsunterstützung im Winter bis ins Jahr 2050 die P-Konzentration im Jahresdurchschnitt von heute rund 80 mg P/m³ auf 42 mg P/m³, bis ins Jahr 2070 auf 36 mg P/m³ stationär gesenkt werden. In Kombination mit den bereits beschlossenen see-externen Massnahmen, Umsetzung des «Zuströmbereichs Z₀ Zugersee», kann der mesotrophe Zielzustand von 30 mg P/m³ erreicht werden.

Der Eintrag der Pressluft erfolgt im Winterhalbjahr während rund vier Monaten mit in der Höhe verstellbaren Diffusoren. Die im See aufsteigende grobblasige Luft erzeugt einen Blasenschleier, welche die Zirkulation des Tiefenwassers auslöst. Ähnliche technische Einrichtungen sind seit den 1980er-Jahren im Baldegger-, Sempacher-, und Hallwilersee zur kombinierten Sauerstoffanreicherung des Tiefenwassers im Sommer und zur Zirkulationsunterstützung im Winter in Betrieb.

Es ist vorgesehen, beim Standort Sagenbrugg, der stillgelegten ARA in Walchwi, ein Betriebsgebäude mit den benötigten Anlagen zur Erzeugung und Steuerung der benötigten Druckluft zu erstellen. Die Druckluft gelangt dabei über insgesamt fünf Druckluftleitungen zu den Diffusoren an der tiefsten Stelle im Südbecken des Sees. Die Diffusoren sind an Unterwasserbojen aufgehängt und dadurch in der Höhe verstellbar. Damit kann der Tiefenbereich im See, in welchem die vertikale Zirkulation verstärkt werden soll, entsprechend gesteuert werden.

Für die Betriebs- und Unterhaltsarbeiten müssen die Leitungen mit den Diffusoren an die Seeoberfläche gezogen werden können. Dazu ist ein Serviceboot mit einem Kran notwendig. Bojen zeigen an der Seeoberfläche die Position der Diffusoren an, stellen jedoch für die Schifffahrt keine Gefahr dar.

Die Baukosten für die benötigten technischen Anlagen der Zirkulationsunterstützung belaufen sich auf zirka 11,6 Millionen Franken. Die jährlichen Betriebskosten werden mit zirka 450'000 Franken abgeschätzt.

1. Einleitung

Der Zugersee gilt mit einem mittleren Phosphorgehalt (P) von rund 80 mg P/m³ Wasser als der am stärksten mit Nährstoffen belastete aller grossen Seen der Schweiz (AFU Zug 2023). Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Zugersee bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts in einem stabilen, mittelnährstoffreichen (= mesotrophen) Zustand befand. Die Gesamtphosphorwerte des Seewassers lagen damals um 20 mg P/m³.

Durch die Einleitung von ungenügend gereinigtem Siedlungsabwasser und durch Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft erreichte der Phosphorgehalt des Seewassers um 1980 ein Maximum von ca. 200 mg P/m³. Obwohl der Nährstoffgehalt dank umfassenden see-externen Massnahmen stark zurückging (Abnahme ca. 5,5 t P/a seit 1982), findet seit 2014 praktisch keine weitere Abnahme des Phosphorgehaltes mehr statt. Einige Gründe für diese Stagnation sind u.a. die grossen Nährstoffdepots im Tiefenwasser, die lange hydraulische Aufenthaltszeit von rund 14 Jahren, die durch den Klimawandel verstärkte Dichteschichtung sowie der nach wie vor zu hohe Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft. Weiter besteht aufgrund der grossen Seetiefe (maximale Tiefe 198 m) und der hohen Nährstoffgehalte im Tiefenwasser eine chemische Dichteschichtung. Dies bedeutet, dass im Winterhalbjahr meistens keine vollständige Mischung und eine zu geringe Sauerstoffanreicherung des Tiefenwassers stattfinden.

Der Bericht der Eawag «Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees» vom April 2019 zeigt auf, dass die aktuell laufenden see-externen Massnahmen nicht ausreichen, um den angestrebten Zielzustand eines mesotrophen Sees zu erreichen. Die externe P-Belastung hat in den letzten Jahren stagniert, so dass ohne see-interne Massnahmen keine Verbesserung der Seequalität erwartet werden kann. Deshalb wurde von der Eawag aus einer Palette möglicher Massnahmen die see-interne Massnahme der Zirkulationsunterstützung (ZU) im Winter als effektivste Variante vorgeschlagen (AFU Zug 2023). Die angereicherten P-Reservoirs im Tiefenwasser sollen in einem kontrollierten Prozess langsam aus dem Zugersee abgeführt werden.

1.1. Vorbemerkungen zur geplanten Variante

Die Eawag hat in ihrem Bericht «Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees» vom April 2019 folgende Massnahmen untersucht:

- Zirkulationsunterstützung mittels Luft-Blasenschleier im Winter
- Ableitung von nährstoffreichem Tiefenwasser in die Reuss
- Ableitung von nährstoffreichem Tiefenwasser in die Lorze
- Belüftung des Tiefenwassers mit Sauerstoff
- Chemische Verfahren zur Elimination des Phosphors aus dem Hypolimnion (P-Fällung).

Der Vorschlag zur Zirkulationsunterstützung mittels Luft-Blasenschleier im Winter wurde dabei im Vergleich zu anderen technischen Möglichkeiten favorisiert und detailliert beschrieben. Die Bestvariante zeichnet sich aus durch:

- Vergleichsweise einfache bauliche Ausführung
- Unterstützt die natürliche Mischung im See
- Mobilisiert die grossen Nährstoffdepots im Tiefenwasser
- Führt ganzjährig zu höheren Sauerstoffgehalten im Tiefenwasser
- Sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis

Mittels einer technischen Vorrichtung an der tiefsten Stelle im See soll ein Luft-Blasenschleier erzeugt werden, welcher im Winter die Zirkulation des Hypolimnions erzwingt. Dazu sind technische Einrichtungen nötig, wie sie in ähnlicher Weise im Baldegger-, Sempacher-, und Hallwilersee seit 1982, 1984, respektive 1986 betrieben werden. Die technische Zirkulationshilfe im Winter löst die Mischung im See aus und führt zur Mobilisierung des Phosphors an die Seeoberfläche. Mit dieser Massnahme kann der Phosphor langsam in einem kontrollierten Prozess über die Lorze aus dem See abgeführt werden.

1.2. Ausgangslage und Problemstellung

Der Zugersee weist nach wie vor zu hohe Phosphorgehalte (P) auf. Infolge externer Massnahmen zur Reduktion der P-Belastung durch Zuflüsse konnten die P-Gehalte im See von rund 200 mg P/m³ anfangs 1980er-Jahre auf heute noch 80 mg P/m³ verringert werden. Seit dem Jahr 2014 erfolgt keine weitere Phosphor-Abnahme mehr im Zugersee. Die Gründe dafür liegen bei der grossen maximalen Tiefe von 200 m, dem sehr hohen Nährstoffgehalt im Tiefenwasser und der dadurch verursachten Dichtestabilisierung. Zudem wird mit der Klimaerwärmung im Winterhalbjahr die Zeit immer kürzer, in der von der Seeoberfläche bis zum Seegrund eine gleichmässige Wassertemperatur um ca. 4° C vorliegt, was die Voraussetzung für die natürliche vertikale Zirkulation und Sauerstoffversorgung in einem See darstellt. Die technische Zirkulationsunterstützung im Winter mittels Presslufteintrag löst dieses Problem. Diese Technik wurde und wird in verschiedenen anderen Schweizer Seen mit Erfolg eingesetzt.

Im Vorprojekt zur Zirkulationsunterstützung im Zugersee wurden folgende Teilbereiche untersucht:

- **Umfassende technische Systemauslegung**
Modellrechnungen und Simulationen
- **Erzeugung des Blasenschleiers**
Konstruktion, Dimensionierung und Standortwahl der Diffusoren
Auslegung und Konstruktion der Druckleitungen
- **Erzeugung der Druckluft**
Auslegung der landseitigen technischen Anlagen, insbesondere der Kompressoren
Energetische Auslegungen betreffend Energieverbrauch und Abwärmenutzung
Minimierung der Immissionen, insbesondere Lärm
- **Definition Betriebsgebäude**
Standortwahl und Anforderungen an die betrieblichen Bauten
Dimensionierung, Ausführungsvorschlag

- **Unterhaltsplanung / Überwachung**
Definition der vorgesehenen Unterhalts- und Überwachungsarbeiten
Auslegung Unterhaltsponton
- **Umweltaspekte**
Auswirkungen abschätzen und in der Planung berücksichtigen
- **Kosteneffizienz**
Zielgerichteter Einsatz der einzusetzenden finanziellen Mittel
Einsatz langlebiger Komponenten mit geringem Unterhaltsaufwand.

1.3. Projektziele see-interne Massnahmen

Der Eawag-Bericht aus dem Jahr 2019 zeigt auf, wie mit einer Zirkulationsunterstützung im Winter der angestrebte Zielzustand eines mesotrophen Zugersees erreicht werden kann. Mit den vorgeschlagenen Massnahmen soll innert 6 bis 12 Jahren eine vollständige Durchmischung des Sees im Winter erreicht werden. Negative Auswirkungen der Massnahmen sollen möglichst vermieden, bzw. minimiert werden.

Modellrechnungen der Eawag (2019) zeigen, dass mit der vorgeschlagenen Zirkulationsunterstützung bis ins Jahr 2050 die P-Konzentration im Jahresdurchschnitt von heute rund 80 mg P/m³ auf 42 mg P/m³, bis 2070 auf 36 mg P/m³ stationär gesenkt werden. In Kombination mit den bereits beschlossenen see-externen Massnahmen, Umsetzung des «Zuströmbereichs Z₀ Zugersee», kann der mesotrophe Zielzustand von 30 mg P/m³ erreicht werden.

Die Zirkulationsunterstützung wird zu einer leichten Erhöhung der P-Konzentration im Oberflächenwasser wie auch in der abfliessenden Lorze führen. In den ersten 10 bis 20 Jahren der Zirkulationshilfe ist zu erwarten, dass sich die P-Konzentrationen im Oberflächenwasser um ungefähr 15 mg P /m³ gegenüber den zu erwartenden Werten ohne Massnahmen erhöht. Sie kann zu einer allfällig leicht erhöhten Algenproduktion (im natürlichen Schwankungsbereich der letzten 10 bis 20 Jahre ohne negative Auswirkungen) führen. Durch die stufenweise Absenkung der Diffusoren um jährlich 10 m bis 20 m bis auf 190 m Tiefe wird erwartet, dass das Ausmass der Algenproduktion nicht höher sein wird als in den 2000er-Jahren.

1.4. Grundlagen

Als Grundlagen für die geplanten baulichen Massnahmen dienen/dienten folgende Dokumente:

- Bericht Eawag «Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees», 2019
- Bericht Eawag «Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung», 2022
- Blasenschleiermodell (Wüest, A., N. H. Brooks, and D. M. Imboden (1992), Bubble plume modeling for lake restoration, Water Resour. Res., 28(12), 3235– 3250.)
- Blasenschleiermodell (McGinnis I, D. F., A. Lorke, A. Wüest, A. Stöckli, and J. C. Little (2004), Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake, Water Resour. Res., 40, W10206, doi:10.1029/2004WR003038.

1.5. Rechtsgrundlagen

Die gesetzlichen Grundlagen für die Sanierung des Zugersees sind in der Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) beschrieben. Es sind die nachfolgenden Rechtsgrundlagen:

GSchV, Anhang 1, Art. 1:

¹ Die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen (MO) oberirdischer Gewässer und der von ihnen beeinflussten Umgebung sollen:

- a. Naturnah und standortgerecht sein sowie sich selbst reproduzieren und regulieren
- b. eine Vielfalt und eine Häufigkeit der Arten aufweisen, die typisch sind für nicht oder nur schwach belastete Gewässer des jeweiligen Gewässertypus.

³ Die Wasserqualität soll so beschaffen sein, dass:

- c. andere Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch menschliche Tätigkeit ins Wasser gelangen können:
 - in Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen, Schwebstoffen oder Sedimenten nicht angereichert werden
 - keine nachteiligen Einwirkungen auf die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen und auf die Nutzung der Gewässer haben,
 - keine unnatürlich hohe Produktion von Biomasse verursachen,
 - die biologischen Prozesse zur Deckung der physiologischen Grundbedürfnisse von Pflanzen und Tieren, wie Stoffwechselvorgänge, Fortpflanzung und geruchliche Orientierung von Tieren, nicht beeinträchtigen,
 - im Gewässer im Bereich der natürlichen Konzentrationen liegen, wenn sie dort natürlicherweise vorkommen
 - im Gewässer nur in nahe bei null liegenden Konzentrationen vorhanden sind, wenn sie dort natürlicherweise nicht vorkommen.

GSchV, Anhang 2, Art. 13:

² Der Nährstoffgehalt von stehenden Gewässern darf höchstens eine mittlere Produktion von Biomasse zulassen; besonders natürliche Verhältnisse bleiben vorbehalten.

³ Für Seen gilt ausserdem:

- a. Durch Seeregulierungen, Wassereinleitungen und -entnahmen, Kühlwassernutzung und Wärmeentzug dürfen im Gewässer die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung sowie, insbesondere im Uferbereich, die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen nicht nachteilig verändert werden.
- b. Der Sauerstoffgehalt (O₂) des Wassers darf zu keiner Zeit und in keiner Seetiefe weniger als 4 mg O₂/l betragen; er muss zudem ausreichen, damit wenig empfindliche Tiere wie Würmer den See- und Grund ganzjährig und in einer möglichst natürlichen Dichte besiedeln können. Besondere natürliche Verhältnisse bleiben vorbehalten.

1.6. Projektorganisation

Das nachstehende Organigramm zeigt die Struktur der Projektorganisation für das Vorprojekt.

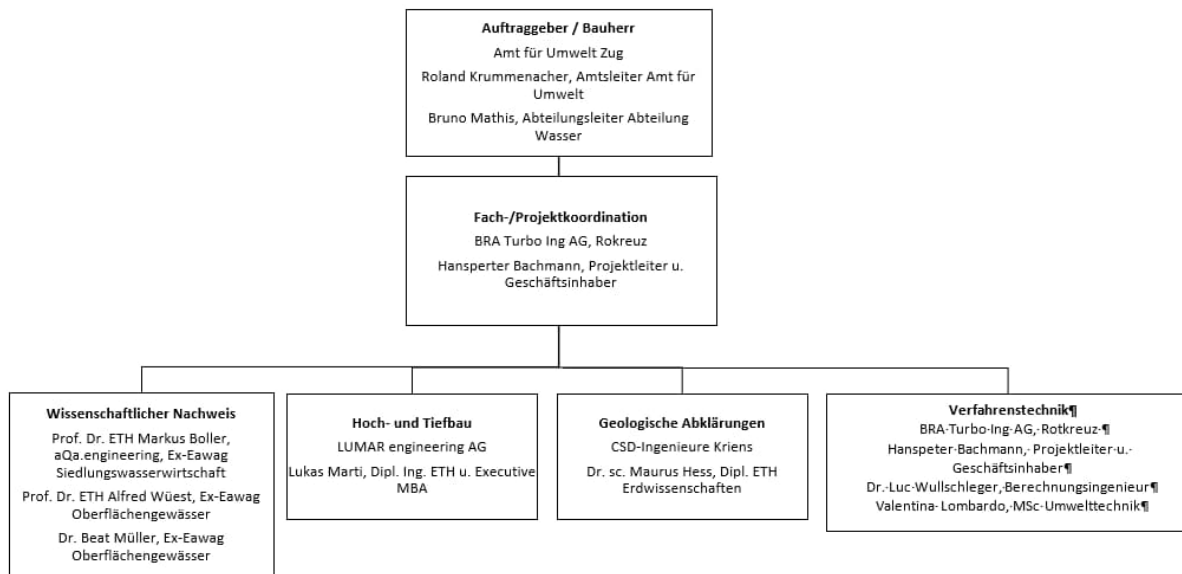


Abbildung 1: Organigramm der Projektorganisation

2. Zirkulationsunterstützung mittels Luft-Blasenschleier im Winter

2.1. Prozessanalyse

Im Unterschied zu den Einrichtungen zur Seebelüftung im Baldegger-, Sempacher- und Hallwilersee, bei denen es darum geht, eine Umwälzung in den Wintermonaten durch grobblasige Belüftung und im Sommer eine Anreicherung von Sauerstoff durch feinblasige Belüftung zu erreichen, ist beim Zugersee nur die Zirkulationsunterstützung in den Wintermonaten mit grobblasiger Druckluft von Interesse.

Die Belüftung von Seen mit Blasenschleiern ist ein komplexer Vorgang, bei dem die entscheidenden Verfahrensgrößen ständigen Veränderungen in Ort und Zeit unterworfen sind. Die ablaufenden physikalischen Prozesse können nur durch rechnerische Nachbildung in mathematischen Modellen quantitativ erfasst werden. Während die Berechnung der maximalen und minimalen Luftmengen durch pauschale Überlegungen für konkrete Profile der Temperatur und der Wasserdichte noch näherungsweise möglich ist, können die Prozesse der Blasenbildung und -auflösung nur über mathematische Modelle genügend genau beschrieben werden. In einer grundlegenden Forschungsarbeit wurden die wichtigsten Vorgänge von Wüest, Brooks und Imboden (Wüest, Brooks und Imboden 1992) umfassend formuliert. Die Formulierung aller Prozesse umfasst zahlreiche gleichzeitig zu lösenden Differentialgleichungen und zahlreiche Prozessparameter, die als Randbedingungen gesetzt oder rechnerisch ermittelt werden müssen.

Die dabei erfassten Prozesse sind:

- Entwicklung der Blasengröße entlang des Aufstiegspfades (Druckverhältnisse, Gasaustausch)
- Gasaustauschprozesse an der Blasenoberfläche im Zuge des Blasenauftiegs (z. B. O₂, N, CO₂, CH₄)
- Wassertransport durch die eingetragene Energie (Auftrieb in Form von Druckluft) infolge Blasenauftieg.

Abbildung 2 zeigt eine neuere Version der schematischen Darstellung eines Blasenschleiers (McGinnis et al. 2004) aufgrund von Forschungsarbeiten der Eawag im Hallwilersee. Das aufgezeigte Strömungsbild und die Isoplethen (= Linien gleicher Temperatur, gestrichelte Linien) vermitteln eine Idee, wie komplex allein die Mischungsvorgänge sind, die durch die aufsteigenden Blasen ausgelöst werden. Je nach Menge der aufsteigenden Blasen werden entsprechende Wassermengen mit einer berechenbaren Geschwindigkeit kaminartig nach oben bewegt. Die Aufstiegsbewegung verlangsamt sich auf dem Weg nach oben und kommt in einer bestimmten Höhe zum Stillstand. Dies ist bei tiefen Seen wie dem Zugersee bereits in etwa der halben Seetiefe der Fall. Die weiter aufsteigenden Blasen bilden einen sekundären Blasenschleier, der je nach eingepresster Luftmenge und je nach Blasengröße eine Wassermischung bis zur Seeoberfläche ermöglicht.

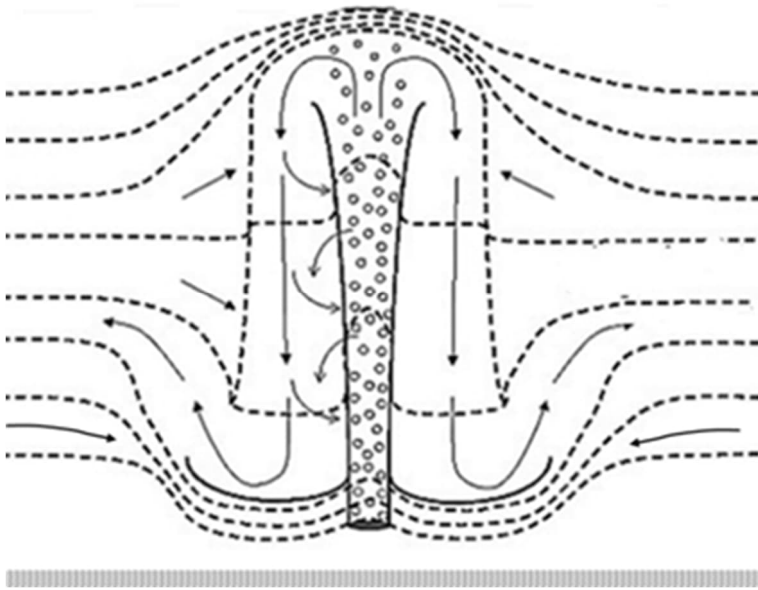


Abbildung 2: Mögliche Mischungsvorgänge durch Blasenschleier in einem See (gestrichelte Linien = Isoplethen) (MacGinnis et al. 2004)

Zum Gelingen des Phosphor-Austrags aus dem See ist zusätzlich die horizontale Durchmischung des Sees von zentraler Bedeutung. Gemäss Machbarkeitsstudie zum Energieverbund der Stadt Zug aus dem Jahr 2014 (Schmid, 2014) ist bekannt, dass die natürlichen Transportvorgänge im Zugersee in horizontaler Richtung derart gross sind, dass der in den aufgemischten Schichten enthaltene Phosphor innerhalb von wenigen Tagen und Wochen an den Ausfluss des Sees transportiert und damit über die Lorze ausgetragen wird. Dies ist hauptsächlich während der nach der Mischung erfolgenden Temperaturschichtung im Epilimnion der Fall. Auch die Einschnürung beim «Chiemen» in den flachen und breiten Untersee und in das 198 m tiefe bergumrahmten Obersee stellt dabei für die horizontale Mischung kein Hindernis dar. Trotz dieser Verengung ist der Stoff- und Wassertransport kaum eingeschränkt. Die Austauschzeit zwischen den beiden Seebecken beträgt wegen interner Wellen, starken Strömungen und der grossen Tiefe vor dem «Chiemen» maximal 30 Tage (Liechti 1994).

3. Bemessung und Betrieb der Blasenschleier

Zwei Aufgaben von Blasenschleiern können rechnerisch erfasst werden, nämlich:

- die Mischung des Seewassers, insbesondere bei geschichteter Wassersäule und
- die An-/Abreicherung von Gasen im Seewasser, hauptsächlich von Sauerstoff und Stickstoff in Funktion der Tiefe.

Abbildung 3 zeigt eine Übersicht über die entscheidenden Informationen, die

- (1) als Input bekannt sein müssen,
- (2) als Entwurfsgrossen der Belüftungsanlage zu bestimmen sind und
- (3) als Folge der Prozessgrössen die Ausbildung und Eigenschaften des Blasenschleiers ergeben.

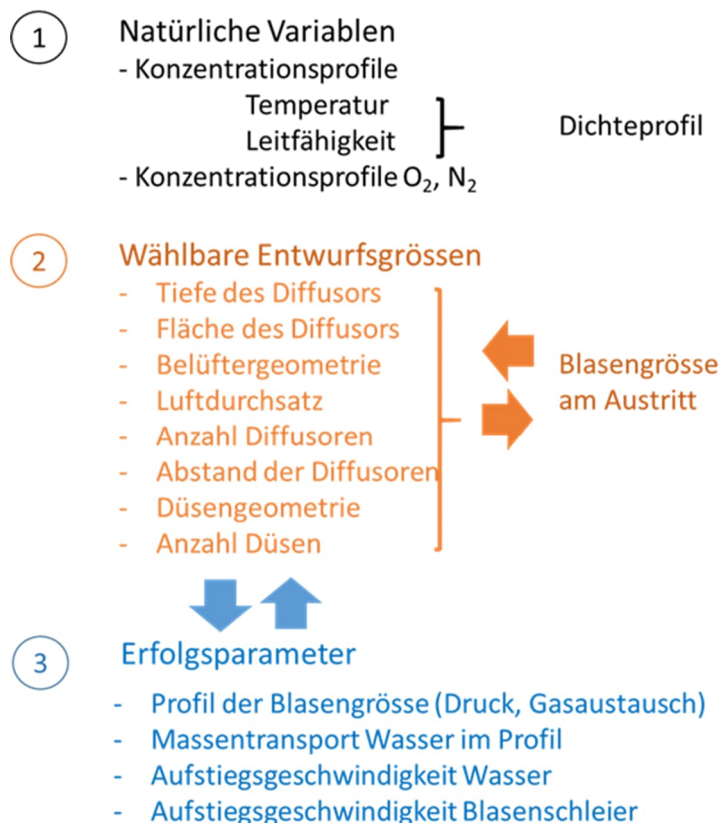


Abbildung 3: Prozessparameter bei der Bildung von Blasenschleiern zur Zwangsumwälzung von Seen

3.1. Natürliche Variablen

Für die Beurteilung der Effizienz eines Blasenschleiers zur Mischung von Wasserschichten sind Informationen über den physikalisch-chemischen Zustand des Sees in Form von Tiefenprofilen notwendig. Solche Tiefenprofile werden von Qualitätsparametern im Zugersee mittels analytischer Messsonden regelmässig gemessen. Für die Betrachtung der Mischverhältnisse sind vor allem die Profile der Wassertemperatur, der Leitfähigkeit und des Sauerstoffgehaltes von Bedeutung. Diese Wasserqualitätsparameter werden seit vielen Jahren regelmässig als sogenannte Multisondenprofile durch das Amt für Verbraucherschutz (AVS) Zug gemessen und stellen eine solide Datenbasis für die Beurteilung massgebender Schichtungen des Zugersees dar.

Die vordringlich interessierenden Dichteprofile können aus den Messgrössen Temperatur und Leitfähigkeit berechnet werden (Wüest, Brooks und Imboden 1992). Als massgebend für die Bemessung der erforderlichen Lufteinträge sind die Profile in den für die Umwälzung vorgesehenen Monaten November bis März/April beizuziehen (vgl. Abbildung 4), wobei die Novemberprofile massgebend für den maximalen Lufteintrag sind, weil in diesem Zeitraum der höchste Energieaufwand für die Mischung notwendig ist. Die Auswertung von Tiefenprofilen von November bis April zeigt, dass infolge der Klimaerwärmung die Jahresübergänge von 2021/22 (Abbildung 5) und vor allem von 2022/23 (Abbildung 5) für die Auslegung der Belüftungsanlage massgebend heranzuziehen sind.

Die Wasserdichteprofile der Monate November und Dezember der Jahre 2021 und 2022 (Abbildung 6) zeigen die noch vorhandene Stratifikation bis in Tiefen von 20-30 m. Angesichts der Prognosen einer zunehmenden Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten werden vorteilhafterweise Reserven im Entwurf der Belüftungsanlage eingebaut. Die Multisondenprofile vom 29.11.2022 erweisen sich als die bisher kritischsten Bedingungen und werden deshalb für die im Folgenden dargestellten Berechnungen beigezogen.

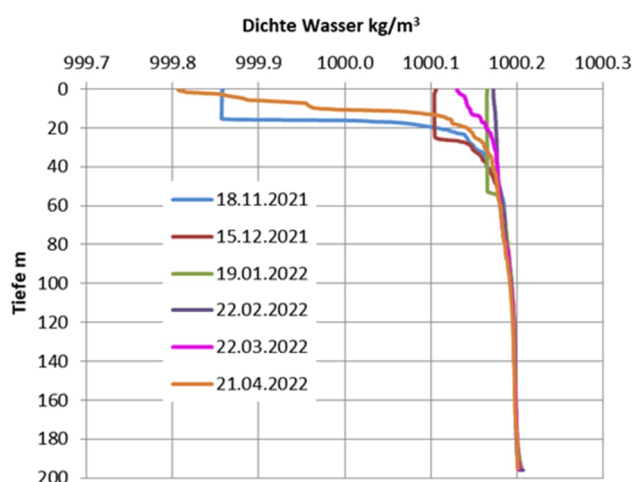


Abbildung 4: Dichteprofile des Zugersees in der Winterperiode 2021/22

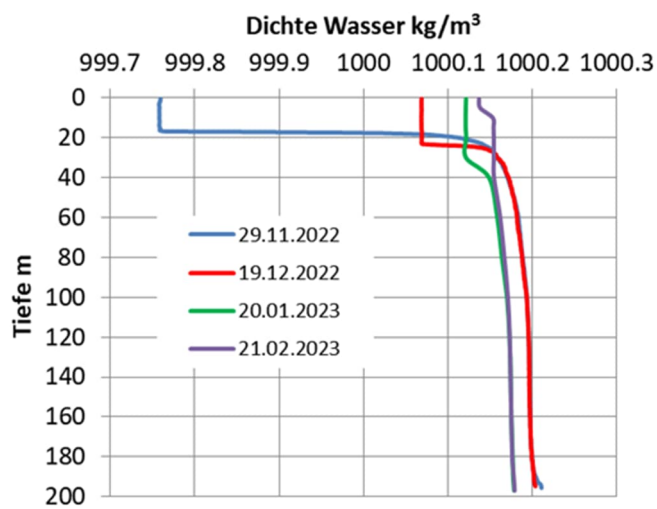


Abbildung 5: Dichteprofile des Zugersees in der Winterperiode 2022/23

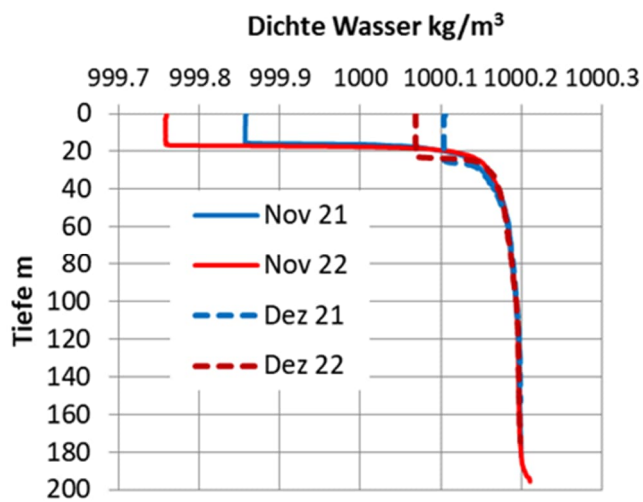


Abbildung 6: Dichteprofile des Zugersees in der massgebenden Winterperiode 2021/22

3.2. Bemessung der Belüftungsinstallationen

3.2.1. Erforderlicher Luftdurchsatz

Der Entwurf von Blasenschleiern lässt die Quantifizierung einer Vielzahl von Bemessungsparametern offen und frei wählbar. Dies vor allem, weil für tiefe Seen wenig Erfahrung vorhanden und diese nicht ohne Weiteres von einem See auf den andern übertragbar ist. Im Vergleich zu den anderen belüfteten Seen zeichnet sich der Zugersee vor allem durch seine mehrfach grössere Tiefe von 198 m aus.

Ein grosser Fortschritt im Entwurf von Blasenschleiern waren die oben erwähnten Forschungsarbeiten, die nicht zuletzt durch die realisierten Belüftungsanlagen in Baldegger-, Sempacher- und Hallwilersee in den Jahren 1982-1986 inspiriert wurden. Die mathematische Formulierung der wichtigsten Prozesse ermöglicht heute die Einflüsse einzelner Entwurfparameter abzuschätzen. Die ganzheitliche Betrachtung des Zusammenspiels aller Prozessparameter ist quantitativ jedoch nur mit Hilfe der entsprechenden Software möglich. Im internationalen Umfeld der Fachkräfte auf diesem Gebiet konnte die Mitarbeit von Prof. D.F. McGinnis gewonnen werden, der auf der Basis der Arbeiten von Wüest et al. (1992) eine Software zur Berechnung von Blasenschleiern entwickelt hat. Leider erlaubte der heutige Zustand der Software bisher nur Berechnungen in Wassertiefen bis 47 m. Im weiteren Verlauf der Projektplanung wurde auf Anregung des Auftragnehmers eine Erweiterung der Software auf Tiefen von 200 m programmiert. Die neue Version dient heute als einmaliges Instrument zur bestmöglichen Auslegung der Belüftungseinrichtungen in den vorliegenden Tiefen.

Als Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebenen Berechnungen mit dem Blasenschleiermodell dienten vorerst Abschätzungen von Prof. Dr. A. Wüest (ehemals Eawag) zum erforderlichen Luftbedarf zur Umwälzung der Wassermassen, der aufgrund seiner Erfahrungen mit Blasenschleiern folgende Überlegungen zur Bestimmung des erforderlichen Luftdurchsatzes angestellt hat:

Bestimmung des minimalen Luftdurchsatzes:

Unter der Annahme, dass die Diffusoren jedes Jahr um 10 m abgesenkt werden, ergibt sich in vier Monaten (von Mitte November bis Mitte März) in einer repräsentativen Tiefe von 100 m eine Wassermenge von $(14,2 \text{ km}^2 \times 10 \text{ m} / 4 \text{ Monate}) = \text{ca. } 14 \text{ m}^3/\text{s}$. Für Diffusorflächen von 7-10 m² beträgt damit die minimale Luftmenge für eine 10 m dicke Wasserschicht in 100 m Tiefe ca.

→ **540 Nm³/h.**

Bestimmung des maximalen Luftdurchsatzes:

Eine Obergrenze ergibt sich aus der Bedingung in vier Monaten die obersten 100 m komplett umzuwälzen. Für dieses Volumen von 2'400 Mio. m³ über vier Monate ergibt sich ein erforderlicher Wassertransport von 240 m³/s. Eine weitere Abschätzung zum Luftbedarf unter diesen Bedingungen ergeben Maximalmengen von ca. → **720 Nm³/h.**

Unter der Annahme einer verstärkten Dichteschichtung bedingt durch den Klimawandel wird eine Reserve von **180 Nm³/h** eingesetzt, was in einem maximalen Gesamt-Luftdurchsatz von **900 Nm³/h** resultiert.

Die maximalen Luftmengen von 900 Nm³/h wurden als erste Inputgrössen bei den Berechnungen mit dem Blasenschleiermodell verwendet. Die Ergebnisse der nachfolgend beschriebenen Modellrechnungen zeigen, dass diese Annahmen genügen, um die Umwälzung der Wasserschichten zu gewährleisten.

3.2.2. Entwicklung der Blasengrösse

Die Entwicklung der Blasengrösse beim Aufstieg durch die je nach Eintauchtiefe der Diffusoren unterschiedlichen Wassersäulen kann rechnerisch mit Hilfe eines weiteren zur Verfügung stehenden Computer-Programms SiBu-GUI (Greinert, J. and Mac Ginnes D: F: Single Bubble Dissolution Model, Environmental Modelling and Software, 2008) modellmässig beschrieben werden. Der Gasaustausch von O₂ und N₂ als Hauptkomponenten der Druckluft und die beim Aufstieg erfolgende Druckminderung sind gegenläufige Prozesse, die über die Entwicklung der Blasengrösse und damit über die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen für die vorliegenden Profile von Temperatur, O₂-Konzentration und Dichte entscheiden. Die Ergebnisse solcher Modellberechnungen von Einzelblasen geben gute Anhaltspunkte darüber, wie gross die Blasen an der Austrittsöffnung der Diffusoren sein müssen, damit sie bis nahe an die Seeoberfläche gelangen. Sie geben jedoch keine Aussagen betreffend des erzeugten Wassertransportes des Blasenschleiers. Dazu sind die nachfolgend beschriebenen Berechnungen zur Entwicklung der Blasenschleier notwendig.

Die für das Seeprofil vom 29.11.2022 im Folgenden berechneten Profile der Blasengrössen sind Beispiele zur Visualisierung der Gasaustauschvorgänge und die daraus folgenden Veränderung der Blasengrösse während des Aufstiegs.

Die Abbildungen 7a-e zeigen dabei die Entwicklung der Blasengrösse für verschiedene Eintauchtiefen der Belüfter bei unterschiedlichen Blasengrössen an der Eintrittsstelle. Einerseits vergrössert sich der Blasendurchmesser während des Aufstiegs einer Blase mit definierter Anfangsgrösse infolge des verminderten Drucks auf dem Weg nach oben. Andererseits diffundiert Sauerstoff aus der Belüftungsluft in das meist sauerstofflose oder -arme Wasser, wodurch die Blase kleiner wird. Das Zusammenwirken der beiden Vorgänge ist in den Abbildungen 7 dargestellt und zeigt, dass je nach Einblastiefe, kleinere Blasen (< 3-5 mm) immer kleiner werden. Sie erreichen die Seeoberfläche nicht, was zu ungünstigen Mischverhältnissen führt. Grosse Blasen hingegen gelangen bis zur Oberfläche und werden bei geringeren Einblastiefen sogar noch grösser.

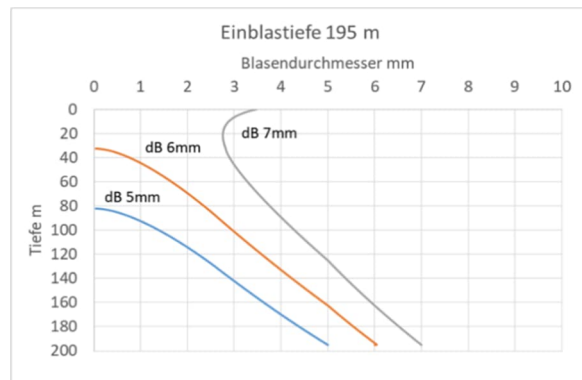
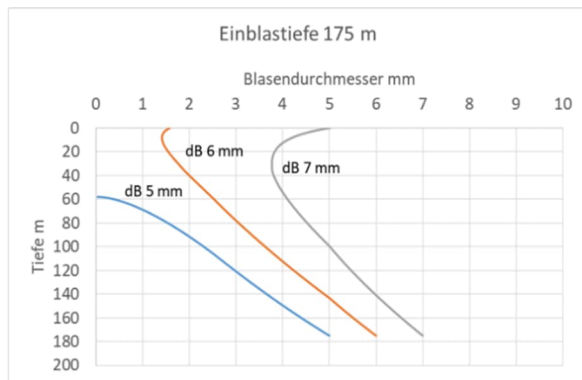
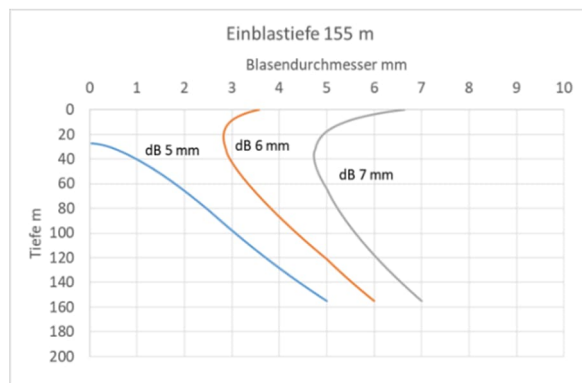
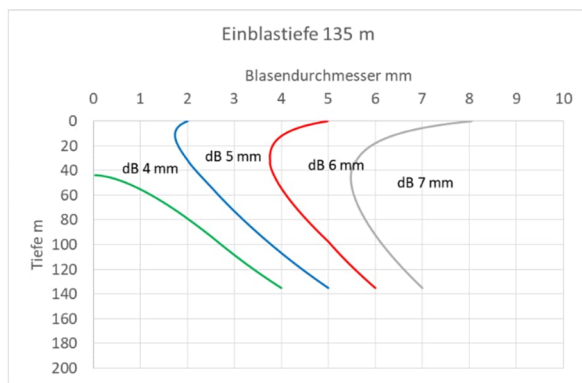
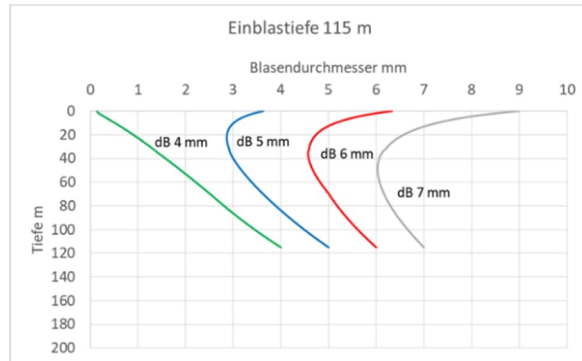
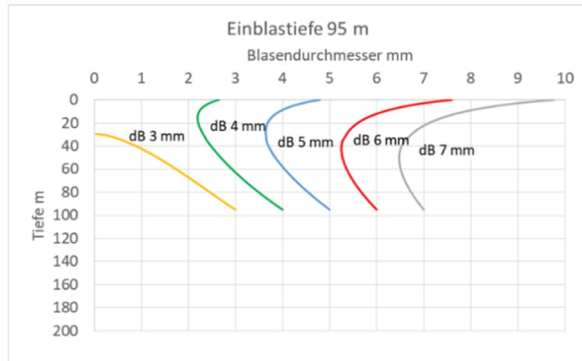


Abbildung 7 a bis e: Anwendung des Einzelblasenmodells: Entwicklung der Blasengröße während des Aufstiegs aus verschiedenen Höhenlagen ausgehend von einer definierten Blasengröße beim Blaseneintritt. Hintergrund: Konzentrationsprofile vom 29.11.2022

3.2.3. Entwurf und Betrieb der Diffusoren

Die möglichen Effekte der Parameter des Diffusoren-Designs wie

- Geometrie respektive belüftete Oberfläche der Diffusoren
- Anzahl der Diffusoren respektive Aufteilung der Luftmengen
- Blasengrösse am Düsenaustritt
- Tiefenlage der Diffusoren

wurden in zahlreichen Berechnungsserien derart eingegrenzt, dass schliesslich optimale Varianten bezüglich Designs und Betrieb resultierten.

Grundsätzlich wird im Folgenden ein Diffusor als Ring definiert (vgl. Abbildung 8). Der Ringdurchmesser sollte eine geringe Querschnittsfläche des Lufteintrags aufweisen. Es wird ein Durchmesser von 3 m mit einer Querschnittsfläche des Blasenschleiers beim Luftaustritt von $7,6 \text{ m}^2$ vorgeschlagen. Grössere Durchmesser sind etwas weniger wirksam und zudem mit grösseren Kosten verbunden.

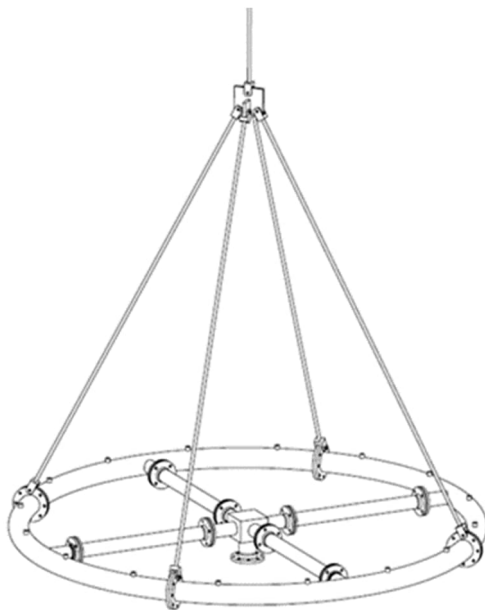


Abbildung 8: Modell see-interne Druckluftdiffusoren

Die maximalen Luftmengen wurden bei den weiteren Berechnungen zu den Einflüssen der Blasengrösse, der Diffusor-Flächen und der Anzahl Diffusoren auf bestimmte Eigenschaften der resultierenden Blasenschleier eingesetzt. Dabei wird der Endgeschwindigkeit des Blasenschleiers spezielle Bedeutung zugemessen. Zu hohe Geschwindigkeiten führen zu grossen Turbulenzen an der Oberfläche und damit zu unnötigem Energieverbrauch. Ebenso sind Geschwindigkeiten gegen null als unvorteilhaft zu beurteilen.

Als kritisch für das Design der Diffusoren sind folgende Randbedingungen massgebend:

- Einblastiefe von 190 m
- Wasserqualitätsprofile der Monate November 2021 und 2022.

Unter diesen Bedingungen wurden die Einflüsse von Luftdurchsatz, Blasengrösse bei Düsenaustritt, Anzahl der Diffusoren, respektive des Luftertrags pro Diffusor rechnerisch ermittelt. Die Simulation ergibt, dass der vertikale Wassertransport durch den Blasenschleier bei grösseren Tiefen über 80 m insbesondere bei kleinen Blasengrössen immer unterhalb der Seeoberfläche zum Stillstand kommt. Die trotzdem aufsteigenden Blasen verursachen jedoch einen sekundären Blasenschleier, dessen Wirkung ebenfalls näherungsweise berechenbar ist. Dies führt zur Erkenntnis, dass bei Verwendung von mehreren Diffusoren, diese bei der vorgesehenen stufenweisen Absenkung in unterschiedlichen Tiefen angeordnet werden können. Eine weitere Erhöhung der Flexibilität des Diffusoren-Betriebs besteht darin, dass weniger tief liegende Diffusoren mit kleineren Düsenöffnungen zur Erzeugung von kleineren Blasengrössen betrieben werden können.

Eine für die Bemessung der Diffusoren weitere kritische Bedingung ist der Luftertrag in einer Tiefe von 190 m bei einem maximalen Luftdurchsatz von $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Für die Modellrechnungen wird der maximale Luftertrag von $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ gleichmässig auf die Anzahl Diffusoren aufgeteilt. Es zeigt sich, dass unter diesen Bedingungen Blasendurchmesser von 8 bis 10 mm erforderlich sind. Kleinere Blasen steigen nicht genug hoch und führen damit nicht zu einer vollständigen Mischung. Bei den Berechnungsfällen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Diffusoren und unterschiedlichen Blasengrössen wurden die Kriterien (1) Blasenauftstieg bis nahe zur Oberfläche und (2) Endgeschwindigkeit des Blasenschleiers kleiner als $0,2 \text{ m/s}$ als Ausschlussgrössen verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Blasengrösse von 9 mm mit 1 bis 3 Diffusoren die Endgeschwindigkeiten des Blasenschleiers grösser als $0,2 \text{ m/s}$ sind und deshalb aufgrund zu hoher Turbulenz zu einem unwirtschaftlichen Betrieb des Luftertrags führen. Die Simulationen der sekundären Blasenschleier ergeben, dass für den Dimensionierungsfall mit insgesamt 4 Diffusoren bei einer Blasengrösse von 9 mm die günstigsten Bedingungen resultieren (vgl. Abbildung 9).

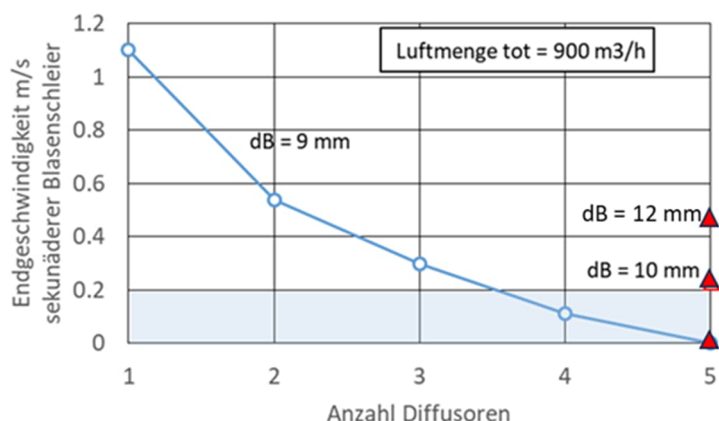


Abbildung 9: Resultierende Endgeschwindigkeiten des sekundären Blasenschleiers bei Einsatz unterschiedlicher Anzahl von Diffusoren (Blasengrösse 9 mm, Einzelpunkte für 9, 10 und 12 mm bei 5 Diffusoren [rote Dreiecke]).

Der Betrieb mit insgesamt 5 Diffusoren ergibt nur einen sinnvollen Betrieb mit einer Blasengrösse von 10 mm. Alle anderen Fälle mit 5 Diffusoren ergeben bei kleineren Blasengrössen eine unvollständige Mischung oder bei grösseren Blasen eine zu hohe Turbulenz. Für den Betrieb der Zirkulationsunterstützung dürften deshalb rein rechnerisch die Anzahl von 4 Diffusoren ausreichend sein.

Überlegungen betreffend eines sich weiter verstärkenden Klimawandels, der ebenfalls zu einer stärkeren Stratifizierung der Wasserschichten führt sowie Redundanz - bei einem allfälligen Ausfall eines Diffusors - führen dazu, dass für die Zirkulationsunterstützung ein zusätzlicher fünfter Diffusor als sinnvoll erachtet wird. Damit ergibt sich eine insgesamt grössere Flexibilität beim Betrieb und bei der Steuerung der Anlage. Die Frage bezüglich der definitiven Anzahl Diffusoren ist im Rahmen von Kosten-Nutzen-Überlegungen auf Stufe Bauprojekt zu prüfen. Für die weiteren Überlegungen und Berechnungen wird für die Zirkulationsunterstützung mit insgesamt 5 Diffusoren ausgegangen.

Obige Betrachtungen zu den Betriebsgrössen beziehen sich nur auf den für die Dimensionierung der Anlagen massgebenden Endzustand bei einer Belüftung aus 190 m Tiefe. Um die Diffusoren schrittweise um 10 bis 20 m abzusenken und gleichzeitig stets betriebsgünstige Bedingungen der Blasenschleierentwicklung zu gewährleisten, sind die Blasengrössen in der jeweiligen Tiefenlage der Diffusoren entsprechend anzupassen. Abbildung 10 zeigt dabei beginnend ab einer Einblas-tiefe von 90 m für den Bemessungsfall von 900 Nm³/h mit 4 oder 5 Diffusoren die dabei einzuhal-tenden Blasengrössen. Die Modellrechnungen weisen nach, dass das System empfindlich auf die Blasengrösse reagiert. Unter den jeweiligen Betriebsbedingungen sind nur geringe Schwankungs-breiten der Blasengrösse möglich, um die oben erwähnten Kriterien einhalten zu können. Umso wichtiger ist es, eine möglichst grosse Flexibilität im Betrieb der Diffusoren vorzusehen.

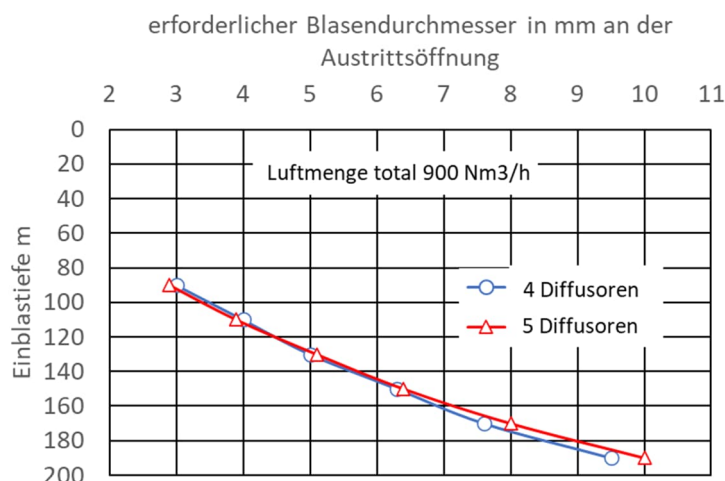


Abbildung 10: Erforderlicher Blasendurchmesser an der Einblasstelle bei der Absenkung der Diffusoren in zunehmende Wassertiefen (Lufteintrag 900 m³/h, Fälle mit 4 und 5 Diffusoren).

Die Blasenbildung lässt sich zum heutigen Zeitpunkt rein rechnerisch noch nicht exakt bestimmen. Die durch die Düsen austretende Luft formt im Wasser Blasen, die von verschiedenen Faktoren z.B. Grösse, Druck, Luftgeschwindigkeit und Lage der Düsen, Grösse und Form der Düsenöffnungen abhängig sind. Die Luftgeschwindigkeit wiederum ist abhängig von der Anzahl Düsen auf einem Diffusorenring. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, wird eine noch zu

definierende maximale Anzahl Öffnungen vorgesehen, die nach Bedarf geschlossen oder mit Düsen versehen sind. Die Ermittlung der genauen Zahl der Öffnungen erfordert eine umfangreichere hydraulische Berechnung, welche im Zuge des Bauprojektes erfolgen soll. Zudem werden mehrere Sätze unterschiedlich grosser Düsen erforderlich sein. Es empfiehlt sich vorgängig zum endgültigen Einsatz der Diffusoren entsprechende Versuche zur Einstellung der Blasengrössen durchzuführen.

3.2.4. Flexibilität der Anlagen

Mit den Modellrechnungen können nur bestimmte Betriebspunkte bestmöglich simuliert werden. In Wirklichkeit sind die Betriebsbedingungen dauernden Veränderungen unterworfen, die sich relativ langsam über Tage und Wochen erstrecken. Zudem sind Unsicherheiten in der Bildung der Blasen-schleier vorhanden, die in Wirklichkeit keine definierten Blasengrössen beinhalten, sondern eine nicht näher bekannte Streuung aufweisen. Für einen stets optimalen Betrieb ist es deshalb unerlässlich, die technischen Einrichtungen zur Belüftung für den Betreiber der Anlagen möglichst flexibel zu gestalten. Zusammenfassend kann diese Flexibilität wie folgt erreicht werden:

- Die Diffusoren werden einzeln mit gesteuerter Luftzufuhr betrieben
- Die installierten Diffusoren können nach Bedarf zu- oder abgeschaltet werden.
- Die Diffusorenringe werden mit einer Serie von Öffnungen versehen, die nach Bedarf geschlossen oder geöffnet werden können. Die darauf montierten Düsen können nach Anzahl und Düsenöffnung variiert werden.
- Die einzelnen Diffusoren können in unterschiedlichen Tiefenlagen positioniert werden. Dies ermöglicht die Optimierung des Energieaufwandes zur Erzeugung einer erwünschten Durchmischung über die Eintauchtiefe und die erforderliche Blasengrösse.
- Ein Echolot soll dem Betreiber jederzeit die Kontrolle der Blaseschleier ermöglichen, um damit die steuerbaren Parameter optimal einstellen zu können.

3.3. Absenken der Diffusoren

Aus den Aufzeichnungen von Dr. B. Müller (ehemals Eawag) in Abbildung 11 geht die zeitliche Entwicklung der P-Konzentrationen im Epilimnion (oberste 15 m) des Zugersees in den letzten 50 Jahren hervor. In diesem Zeitraum haben die P-Konzentrationen um das 3- bis 4-fache abgenommen. In der Grafik sind zudem die auf Modellrechnungen basierenden P-Konzentrationen im Epilimnion eingetragen, die durch die vorgesehene Zirkulationsunterstützung in Zukunft zu erwarten sind.

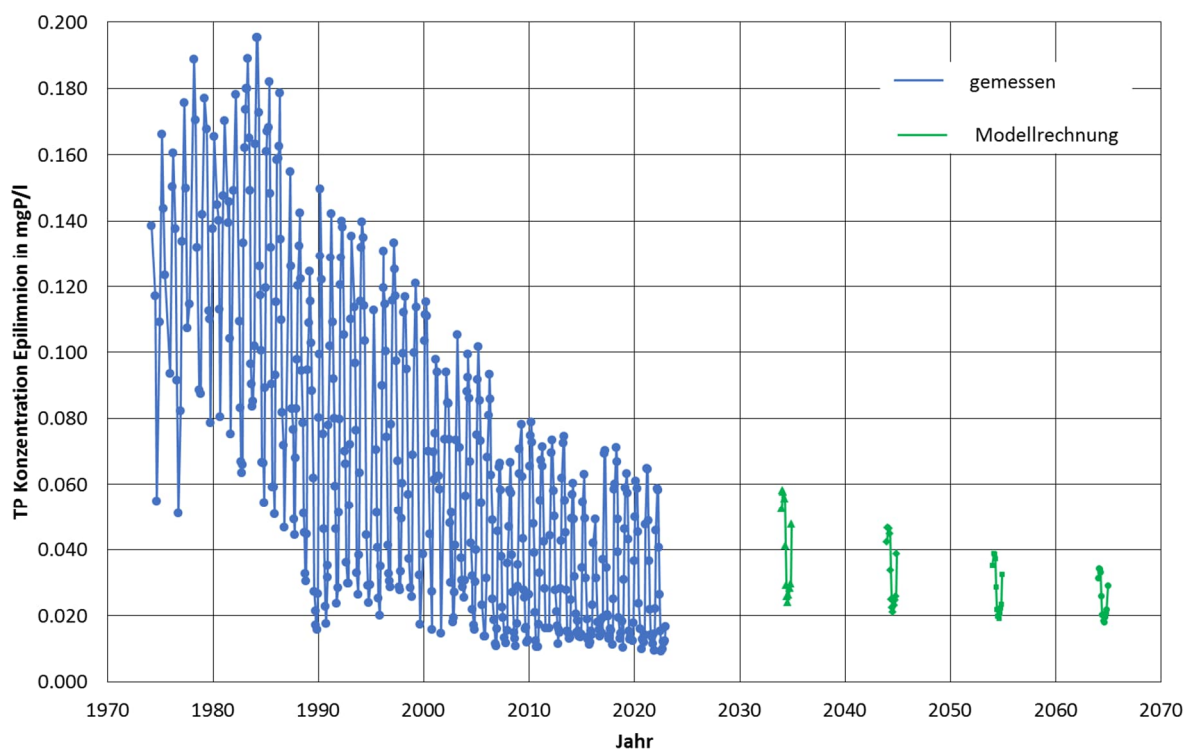


Abbildung 11: Entwicklung der Gesamt-Phosphorkonzentration im Epilimnion des Zugersees seit 1974 und Extrapolation der Konzentrationen im Zuge der vorgesehenen Massnahmen

Bei der Zirkulationsunterstützung ist vorgesehen, die Belüftungsaggregate beginnend bei einer Tiefe von 90 m jedes Jahr um 20 m (allenfalls um 10 m) abzusenken. Dies, um keine plötzliche Überdüngung der oberliegenden Schichten durch die P-reicheren neu eingemischten Schichten zu verursachen. Sie könnten allenfalls zu unerwünschten Algenblüten Anlass geben.

Bereits im Bericht der Eawag (2022) «Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung», wurden die Resultate von Modellrechnungen zur zeitlichen Entwicklung der P-Konzentrationen im See ohne Massnahmen und mit Zirkulationsunterstützung dargestellt. Aus den Abbildungen 12a-d geht hervor, dass der jahreszeitliche Verlauf der P-Konzentrationen im Epilimnion zu Beginn der Umwälzung um bis zu 15 mg P/m^3 ansteigen wird. Dieser Anstieg vermindert sich stetig über die berechnete Betriebszeit der Umwälzung von 40 Jahren. Zwischen der Absenkung der Diffusoren um 10 m oder um 20 m pro Jahr ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede der P-Konzentrationen in den obersten 15 m. Um den ganzen Absenkprozess zu beschleunigen, kann deshalb eine Absenkung um jeweils 20 m erfolgen. Es wird empfohlen, die Einmischung zu überwachen und die weiteren Absenkungen situativ anzupassen.

Die aus den Abbildungen 11a-d hervorgehenden P-Konzentrationen zeigen, welche Wirkungen durch die künstliche Umwälzung zu erwarten sind. Es bleibt zu erwähnen, dass in der dargestellten Modellrechnung noch eine gewisse Abnahme des externen P-Inputs in den See eingerechnet ist.

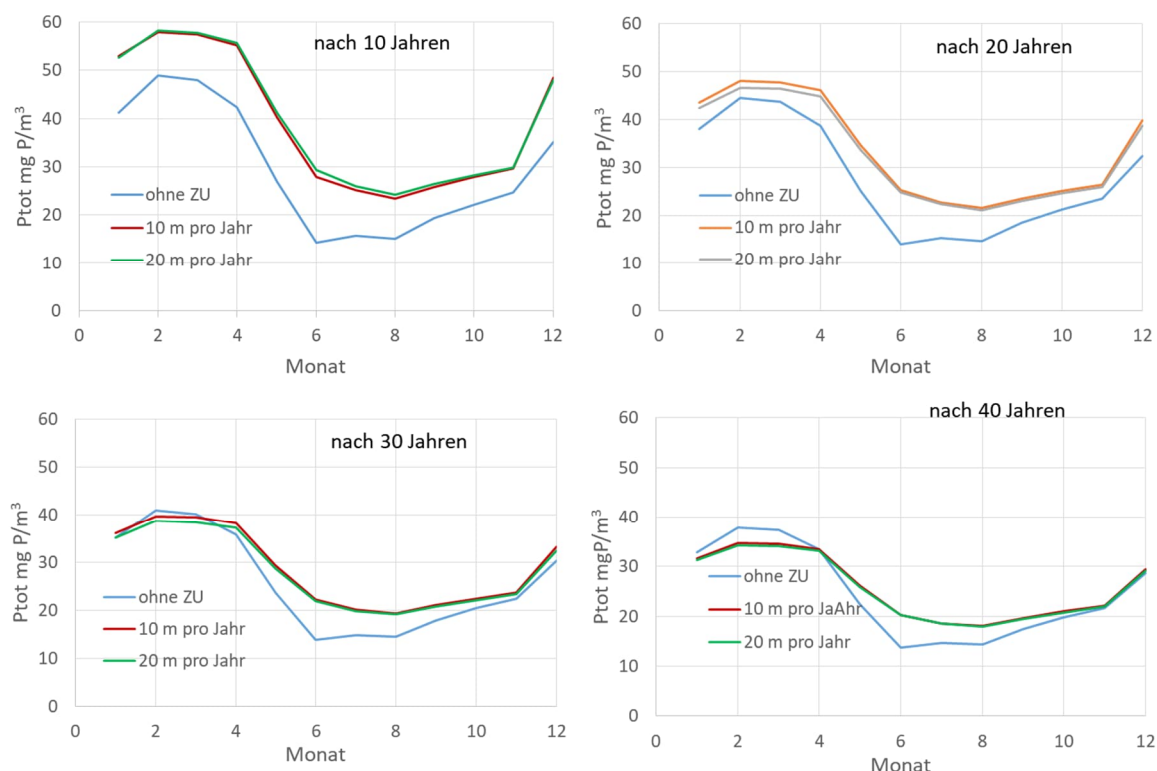


Abbildung 12 a bis d: Entwicklung der Gesamtphosphor-Konzentrationen im Epilimnion des Zugersees nach 10, 20, 30 und 40 Jahren der Zirkulationsunterstützung bei Absenkung der Diffusoren um 10 m, respektive 20 m pro Jahr

3.3.1. Aktualisierung der Prognosen zur Wirksamkeit der Zirkulationsunterstützung als see-interne Massnahme

Die möglichen Auswirkungen auf die Badewasserqualität, Schilfschutz-/Schilfschutzansiedlungsprojekte, Naturschutzgebiete / Flachmoore an der Unteren Lorze und den Fischbestand (Felchen) werden hier kurz beschrieben.

Die Eawag hat in ihrem Bericht «Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung» (Müller, et al. 2022) die möglichen Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung (ZU) wie folgt zusammengefasst:

- *Durch die Zirkulationsunterstützung wird die P-Konzentration in der Oberflächenschicht (Epilimnion) und auch in der Lorze für etwa 20 Jahre um 15 mg/m³ (rund 20 % im Vergleich zur Situation ohne ZU) erhöht. Somit wird die Oberflächenschicht des Sees P-Konzentrationen erreichen, die den Höchstwerten der letzten 15 Jahren entsprechen. Dies entspricht somit der Situation, welche der See vor kurzem durchlaufen hat. Dadurch ist kein überraschendes Auftreten von fädigen Algen und/oder Ansammlung von Algenmatten, welche den Schilfbeständen schaden könnten zu erwarten. Es ist auch kein negativer Einfluss auf die Felchenbestände zu erwarten.*
- *Das Auftreten von schädlichen Algen wird durch unterschiedliche Faktoren gesteuert, die meist nicht eindeutig zugeordnet werden können. Die P-Konzentration im Zugersee ist auch ohne ZU hoch, so dass eine Algenblüte je nach Witterungsbedingung nicht verhindert werden kann und*

im Prinzip jedes Jahr auftreten könnte. Das spontane Auftreten einer Algenblüte ist unabhängig von see-internen Massnahmen nicht vorhersehbar.

- *Durch die ZU wird die Aufnahme von Luft-Sauerstoff durch Mischung im Winter ermöglicht. Die dadurch erhöhte Sauerstoffkonzentration hat zwei positive Effekte:*
 - *Gewährleistung eines zunehmend oxischen Lebensraumes für höhere Organismen.*
 - *Ermöglicht die oxische Mineralisation von absinkendem organischem Material und von der Sedimentoberfläche.*
- *Durch die zusätzliche Sauerstoffversorgung wird die Fischpopulation an Lebensraum gewinnen. Es ist keine Schädigung von Biodiversität, Fangertrag oder Vielfalt zu erwarten. Bisher zeigt die Statistik der Fischerei-Fangerträge im Zugersee keinen Zusammenhang mit der P-Konzentration. Es wird daher bei einer kurzzeitigen Erhöhung der P-Konzentration um 20% keine spürbare Auswirkung erwartet.*

4. Technische Realisierung der geplanten Zirkulationsunterstützung

Landseitig wird bei der Sagenbrugg in Walchwil ein Betriebsgebäude mit den benötigten Anlagen gebaut. Am Standort bestehen heute ein Abwasser-Pumpwerk des Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachtersee-Ägerisee (GVRZ) und ein Bootsplatz, welche aber nicht tangiert werden. Im Betriebsgebäude werden, die für die Erzeugung der Druckluft eingesetzten ölfreien Kolbenkompressoren und die restliche Technik platziert. Die Druckluft wird auf die fünf Leitungen aufgeteilt, welche in den See und zu den Diffusoren führen. Die geplante Druckluftversorgung ist in Abb. 14, Rohrleitungs- und Instrumentenfliessschema (R&I Schema), abgebildet.

Um den Erfolg der beschriebenen Massnahme zu überwachen, ist vorgesehen, eine Messboje im Zugersee zu installieren. Die Boje ist mit einem Sensor ausgestattet, der über ein Tiefenprofil Temperatur, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit und optional evtl. auch pH-Wert und Algenwachstum misst.

4.1. Verfahrenstechnik

4.1.1. Systementscheid

Zur Erzeugung der Druckluft wurden verschiedene technische Möglichkeiten miteinander verglichen. Geprüft wurden Booster- in Kombination mit Schraubenverdichter, Hochdruckturbo mit Booster und Kolbenkompressoren.

Der Systementscheid zu Gunsten von zwei ölfreien Kolbenkompressoren ist detailliert im Anhang, Rubrik «Verfahrenstechnik» ersichtlich. Nach nachstehenden Kriterien wurde entschieden:

- Ölfreie Druckluftherzeugung als Grundvoraussetzung
- Energieverbrauch
- Wartungsaufwand
- Investitions- und Unterhaltskosten.

4.1.2. Druckluftaufbereitung und Druckstufen

Für die Erzeugung der Druckluft sind zwei ölfreie Kolbenkompressoren vorgesehen, welche die benötigte Druckluft auf einen Druck (PT) von 30 bar verdichten können. Die verdichtete Druckluft wird in einem Druckluftbehälter mit einem Volumen von zirka 10 m³ von 15–25 bar zwischengespeichert. Pro Belüftungslinie zu den Diffusoren wurde ein Druckluftbedarf von 180 bis 225 Nm³/h errechnet. Dies ergibt total eine Luftmenge von zirka 1'200 Nm³/h für 5 Diffusoren.

Im Betriebsgebäude wird die Druckluft auf die fünf Druckleitungen zu den Diffusoren verteilt. In jedem Leitungsabgang wird ein Regler (M) installiert, um die Luftmenge mit dem Luftmengenmesser (V) zu dosieren. Seeseitig werden anschliessend die Druckleitungen mit einem Innendurchmesser von 75 mm verlegt. Am Ende der fünf ca. 1,3 km langen Rohrleitungen werden die Diffusoren befestigt, welche die Druckluft blasenförmig ins Seewasser verteilen. Bei jedem Abgang wird der Prozessdruck (P) überwacht, um Rückschlüsse auf einen störungsfreien Betrieb zu schliessen.

Im ersten Jahr soll mit der Belüftung des Zugersees in einer Tiefe von 90 m und mit einem Luftdruck von ca. 12 bar gestartet werden. Danach werden die Diffusoren jedes Jahr um 20 m gesenkt, bis nach fünf Jahren die maximale Tiefe von 190 m erreicht wird. Beim Absenken der Diffusoren

um 20 m muss der Luftdruck jeweils um ca. 2 bar erhöht werden. In einer Tiefe von 190 m wird der benötigte Luftdruck somit ca. 22 bar betragen.

Im Projekt sind zwei baugleiche Kolben Kompressoren vorgesehen. Die Leistung der Motoren beträgt zwei Mal 250 kW. Somit ist:

1. beim Ausfall eines Motors eine Redundanz hergestellt
2. Es können wirtschaftlich zwei verschiedene Druckstufen hergestellt werden, um verschiedene Eintragstiefen im See zu bedienen (vgl. gelbe und grüne Leitungsführung im Abbildung 13).

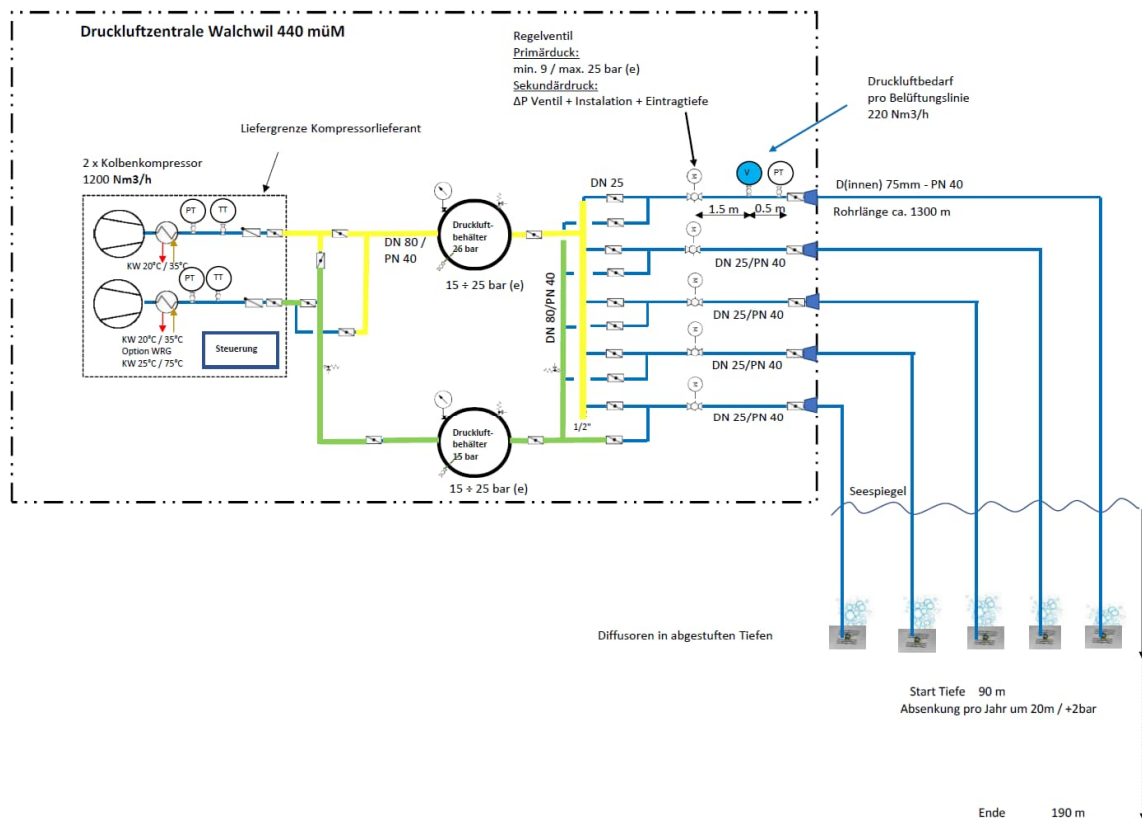


Abbildung 13: Schema der Kompressoren Anlage

4.1.3. Kompressorenraum, Platzbedarf

Die beiden Kolbenkompressoren werden aus Lärmschutzgründen im Untergeschoss (UG) platziert. Der Raum ist so bemessen, dass auch die notwendigen Servicearbeiten durchgeführt werden können. Die Wände und Decken werden mit schallhemmenden Materialien verkleidet. Er ist mit den notwendigen Krananlage versehen, um das Handling der Service- und Revisionsarbeiten zu ermöglichen.

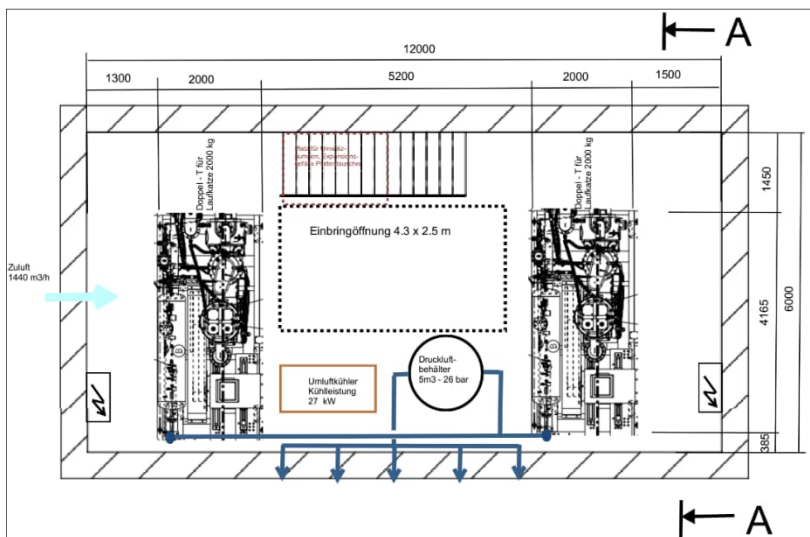


Abbildung 14: Layout Platzbedarf Kompressorenraum



Abbildung 15: Druckluft-Kompressor (Beispiel)

4.2. Anlage und Ausrüstung landseitig

4.2.1. Grundstückerschliessung

Gemäss Vorabklärungen eignet sich dafür das Grundstück 195, beim Pumpwerk Sagenbrugg in der Gemeinde Walchwil als Standort. Beim Grundstück 195 handelt es sich um eine stillgelegte Kläranlage, die zu einem Teil in ein Pumpwerk umfunktioniert wurde. Der inaktive Teil der Kläranlage kann zurückgebaut und an deren Stelle das Betriebsgebäude erstellt werden. Die Zufahrt erfolgt ab Kantonsstrasse auf den heute bestehenden Parkplatz.

Das Grundstück ist mit Strom, Wasser und Abwasser erschlossen. Die bestehende, auf dem Dach des inaktiven Teils der Kläranlage platzierte Trafostation, kann ins neue Betriebsgebäude integriert werden.

4.2.2. Betriebsgebäude mit notwendigen technischen Einrichtungen

Zur Unterbringung der notwendigen Technik soll ein Betriebsgebäude mit 3 Stockwerken (UG, EG und OG) erstellt werden, welches zweckmässig für Betrieb, Wartung und Unterhalt für die landseitige Ausrüstung verfügbar ist. Die Bauten, namentlich das Betriebsgebäude, muss den Vorschriften der Ortsplanung entsprechen und soll sich dezent ins Ortsbild einfügen. Das Gebäudedach soll auf dem Niveau der Kantonsstrasse zu liegen kommen.

Im Obergeschoss OG wird ein allgemeiner Betriebsraum für das Personal und Unterhaltsmaterial eingerichtet. Der Zugang zur Anlage erfolgt über diesen Betriebseingang.

Im Erdgeschoss EG ist ein grosses Tor angeordnet, über welches die grossen und schweren Komponenten in das Gebäude verbracht werden können. Im Gebäude selber werden die Anlagen auf Rollen und an Kranbahnen an ihren Bestimmungsort verschoben. Ebenfalls im Erdgeschoss ist Platz für die neue Trafostation, die Schaltanlagen und Steuerungen. Nur von der Seeseite her zugänglich ist zudem ein öffentlich zugängliches, barrierefreies Unisex-WC.

Im Untergeschoss UG sollen die benötigten zwei Kolbenkompressoren und Druckbehälter untergebracht werden. Auf die schalltechnische Dämmung, insbesondere der ca. 95 dB lauten Kompressoren, muss ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Der Lärm soll ausserhalb der Anlagen praktisch nicht wahrgenommen werden, weshalb auch vorgesehen ist, die Kompressoren im UG unterzubringen. Die Verlegung der Druckluftleitungen von den Kompressoren zum See erfolgt grabenlos und somit uferschonend.

Das neue Gebäude und die Druckluftherzeugungsanlage werden mit einem Wärmerückgewinnungskreislauf ausgerüstet. Die Kühlung der Kompressoren erfolgt über einen geschlossenen Kühlwasser-Glykol-Kreislauf mit Trockenkühler, wobei Abwärme von bis zu 75°C entsteht. Diese Wärme muss abgeführt werden und kann möglicherweise an die angrenzenden Liegenschaften abgegeben werden. Die für die Kompression notwendige Umgebungsluft wird über einen Ventilator mit Schalldämpfer von aussen zugeführt.

Für die Steuerung und Überwachung der Wirksamkeit der Anlage wird ein Online-Messsystem für die Erfassung der notwendigen Messparameter eingesetzt. Für Wartung, Kontrollen und Unterhalt der im See installierten Anlagen ist ein Serviceboot mit Krananlage und Stromgenerator notwendig. Ebenfalls ist eine Anlegestelle für das Serviceboot geplant.

4.2.3. Elektroversorgung mit Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen

Die elektrische Versorgung erfolgt über die neu zu platzierende Trafostation Sagenbrugg. Es ist vorgesehen, diese in das neu zu erstellende Betriebsgebäude zu integrieren. Die Trafostation wird eine Leistung von 1'000 kVA aufweisen, wobei mit einer Dauerlast von ca. 400 kVA gerechnet wird.

Die Einspeisung der Elektrohauptverteilung erfolgt direkt ab der Trafostation. Besondere Aufmerksamkeit muss dem Korrosionsschutz geschenkt werden, da Ausgleichsströme verhindert werden müssen.

Es ist ein übergeordnetes Prozessleitsystem vorgesehen. Der Leitrechner wird im Büro platziert und mit Notstrom versorgt. Die Anlage kann von verschiedenen externen Standorten überwacht und geführt werden.

4.3. Baumassnahmen seeseitig

Die notwendigen seeseitigen Baumassnahmen inkl. der Kostenschätzung wurden von der Willy Stäubli Ing AG, Horgen ausgearbeitet und berechnet (siehe Anhang). Es ist geplant, fünf Seeleitungen von Walchwil aus in den tiefsten Bereich des Sees zu führen. Am Ende jeder Leitung wird ein Diffusor montiert, welcher kontrolliert Luft in den See einbläst. Die Seeleitungen starten in Sagenbrugg bei Walchwil, wo sich auch das Betriebsgebäude mit den Kompressoren befindet. Die genauen Standorte der Diffusoren sowie die exakte Linienführung der luftgefüllten Seeleitungen müssen noch definiert werden.

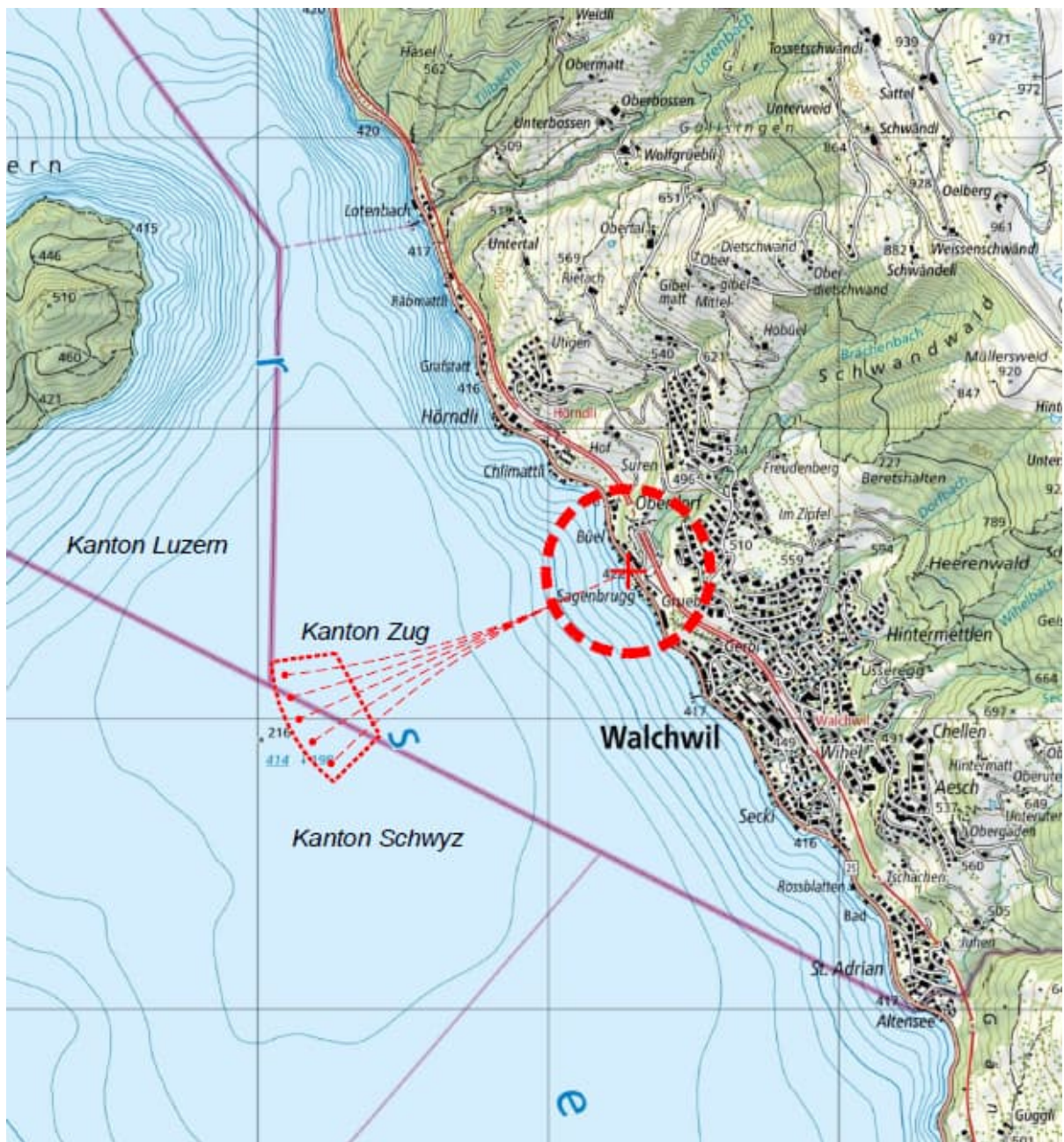


Abbildung 16: Geplante Lage der Druckluftleitungen mit dem Diffusorenfeld (map.geo.admin 2023). Das gesamte System wird über mehrere Jahrzehnte betrieben. Eine dementsprechend solide und langlebige Bauweise wird angestrebt.

4.3.1. Rohrschweisplatz und Rohrlager

Für den Leitungsbau wird ein geeigneter Schweissplatz nötig. Dieser sollte etwa 300 x 50 m betragen und direkt am See liegen. Da die Rohre mit Lastwagen angeliefert werden, muss ein Teil des Platzes befestigten Boden aufweisen.



Abbildung 17: Rohrschweisplatz auf einer Wiese am Seeufer (Willy Stäubli Ing. AG 2023)

In der Nähe des Schweissplatzes muss ein schwimmendes Rohrlager im See erstellt und nach dem Binnenschiffahrtsgesetz gekennzeichnet werden, um die Rohre zwischenzulagern. Dieser wichtige Platz muss als Installationsfläche mit der Baueingabe des Projektes eingegeben werden. Die Grösse richtet sich nach den lokalen Gegebenheiten (Uferbeschaffenheit, Windrichtung, Wassertiefe, etc.). Je länger das schwimmende Rohrlager ausgebildet werden kann, desto wirtschaftlicher kann gearbeitet werden. Optimal ist eine Fläche von ca. 1'000 m x 50 m. Schweissplatz und schwimmendes Rohrlager sind im Bauprojekt zu bestimmen.



Abbildung 18: Schwimmendes Rohrlager in einem See (Willy Stäubli Ing. AG 2023)

4.4. Geologische Abklärungen für die Planung des Bauprojekts

Für die Baugrundbeurteilung wurde die CSD-Ingenieure Kriens (nachfolgend CSD) hinzugezogen. CSD war bereits an der Sanierung der SBB-Bahnleitung in Walchwil beteiligt, und ist mit der Geologie vor Ort vertraut. Daher wurden sie beauftragt, eine erste Prognose über die Geologie abzugeben sowie die mit dem Bau des Betriebsgebäudes und des Luftkanals verbundenen Risiken anhand der vorhandenen Unterlagen zu untersuchen, Empfehlungen zu erarbeiten, ein Sondierungskonzept zu erstellen und die Baukosten zu schätzen.

4.4.1. Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Der Projektperimeter liegt gemäss geologischem Atlas in den Bachschuttablagerungen. Das Bachschuttmaterial dürfte am Standort durch künstliche Auffüllungen und Deckschichten überlagert sein.

Unterhalb der Bachschuttablagerungen ist die Moräne zu erwarten. Darunter liegen die Felsschichten der Unteren Süsswassermolasse (Sandstein, Nagelfluh). Die Felsoberkante liegt gemäss dem geologischen Atlas der Schweiz in einer Tiefe von zirka 2 bis 5 m. Die Felsschichten sind auf den obersten Dezimetern bis Meter erfahrungsgemäss verwittert bzw. an gewittert. Details zu Tiefenlage, Mächtigkeiten und Eigenschaften der einzelnen Schichten müssen mittels Sondierungen auf der Projektparzelle bestimmt werden.

Für den Bereich des geplanten Gebäudes sind keine Grundwasservorkommen bzw. keine Grund- oder Quellwasseraustritte sowie derartige Fassungen auskartiert. Das Vorhaben befindet sich nach der Karte des planerischen Gewässerschutzes des Kantons Zug im Zuströmbereich des Zugersees (Z₀) und ausserhalb von Gewässerschutzbereichen oder Grundwasserschutzzonen. Der Gewässerschutzbereich Z₀ entspricht in baurechtlicher Hinsicht der Zone üB (übrige Bereiche).

Obwohl kein zusammenhängendes Grundwasser erwartet wird, muss vor allem bei und nach starken Niederschlägen oder Dauerregen bzw. während der Schneeschmelze mit Hang- und

Schichtwasserzutritten in den grobkörnigen Lockergesteinsschichten und in der Verwitterungszone über dem Felsen gerechnet werden.

4.4.2. Naturgefahren und Oberflächenabfluss

Die Parzelle Nr. 159 liegt gemäss Gefahrenkarte des Kantons Zug teilweise im Bereich geringer bis erheblicher Gefährdung für Wassergefahren. Die erhebliche Gefährdung ist jedoch auf den am südlichen Rand der Parzelle verlaufenden Sagenbach zurückzuführen. Das Grundstück liegt zudem am Ufer, was das Wassergefahrenpotenzial begünstigt. Für die Parzelle Nr. 905 ist jedoch keine Wassergefährdung verzeichnet.

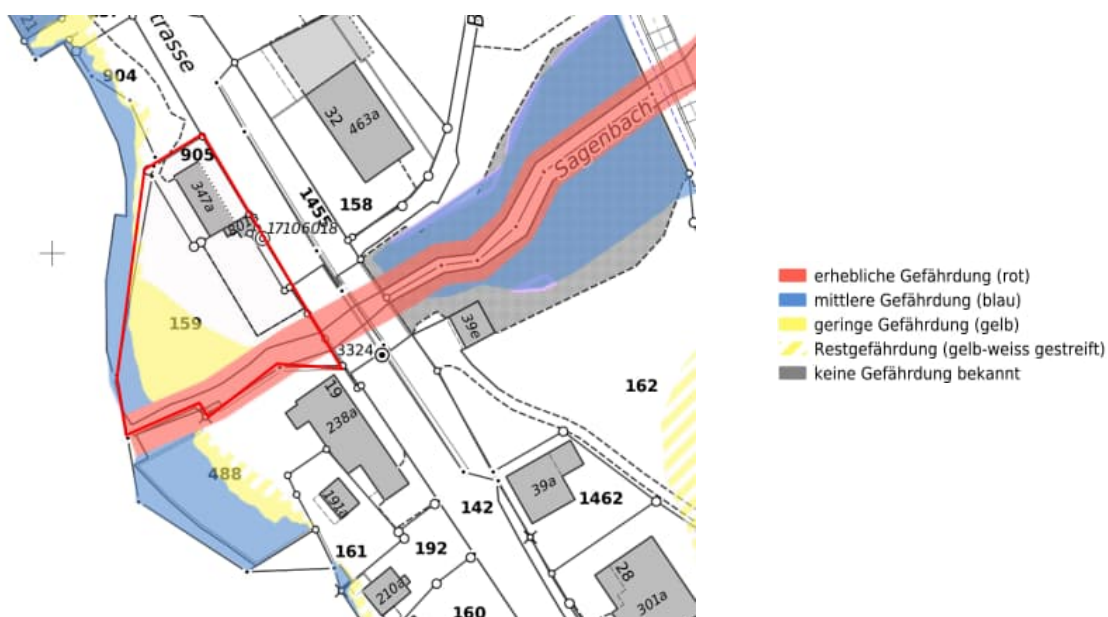


Abbildung 19: Synoptische Gefahrenkarte

Weitere Hinweise auf andere Naturgefahren (Lawinen, Rutschprozesse, Sturzprozesse) sind für den Projektperimeter nicht verzeichnet.

Gemäss der Oberflächenabflusskarte des Kantons Zug sind geringe Abflüsse im Projektperimeter möglich. Oberflächenabflüsse entsprechen dem Niederschlagsanteil, der nach Auftreffen auf den Boden nicht in den Boden versickert, sondern oberflächlich zu einem Gewässer hinabfliesst. Im Bereich des Gebäudes ist mit Fliesstiefen bis 10 cm zu rechnen.



4.4.3. Weitere Standorteigenschaften

Erdbeben: Der Projektperimeter gehört gemäss der Karte zu den Erdbeben-Gefährdungszonen nach SIA 261 zur Zone Z1b. Auf Grund der erwarteten Geologie gehen wir von einer Zuordnung zu Baugrundklasse A (Fels mit max. 5 m Lockergesteinsbedeckung) aus.

Altlastenthematik: Im öffentlichen Kataster der belasteten Standorte, sowie im Kataster der belasteten Standorte des Militärs, Zivilflugplätze und öV sind keine Einträge für den Bauperimeter und seine direkte Umgebung verzeichnet.

Archäologie: Der Perimeter ist nicht im Fundstelleninventar verzeichnet.

Prüfperimeter Bodenverschiebungen (PBV): Ein rund 27 m breiter Streifen entlang der Zugstrasse (kantonale Strasse) ist im Prüfperimeter für Bodenverschiebungen (Verkehrsträger) verzeichnet. Auf der Parzelle des geplanten Vorhabens sind ca. 11 m davon betroffen. Liegt ein Bauvorhaben im PBV, so muss der Boden vor dem Abtrag gemäss dem Handbuch Probenahme (VBBo) auf Schadstoffbelastungen untersucht werden.



Abbildung 21: Prüfperimeter Bodenverschiebungen (PBV)

4.4.4. Geotechnische und hydrogeologische Herausforderungen

Geotechnik: der verformungsarme Baugrubenabschluss muss sorgfältig geplant werden.

Empfehlung: Umsetzung der Sondierkampagne, um die Grundlagen für eine zuverlässige Bemessung der Sicherungsarbeiten zu erhalten. Es wird die folgende Sondierkampagne vorgeschlagen:

- 2 Rammsondierungen à ca. 7 m Tiefe (unter der vorgesehenen Baugrubensohle oder bis auf den Felshorizont)
- 2 Kernbohrungen à ca. 5 bis 10 m Tiefe
- OPTION: 1 Offshore Kernbohrung (falls die Geologie komplexer als erwartet ist und die Sondierungen auf dem Festland nicht ausreichen, um ein zuverlässiges Bodenmodell zu erstellen).

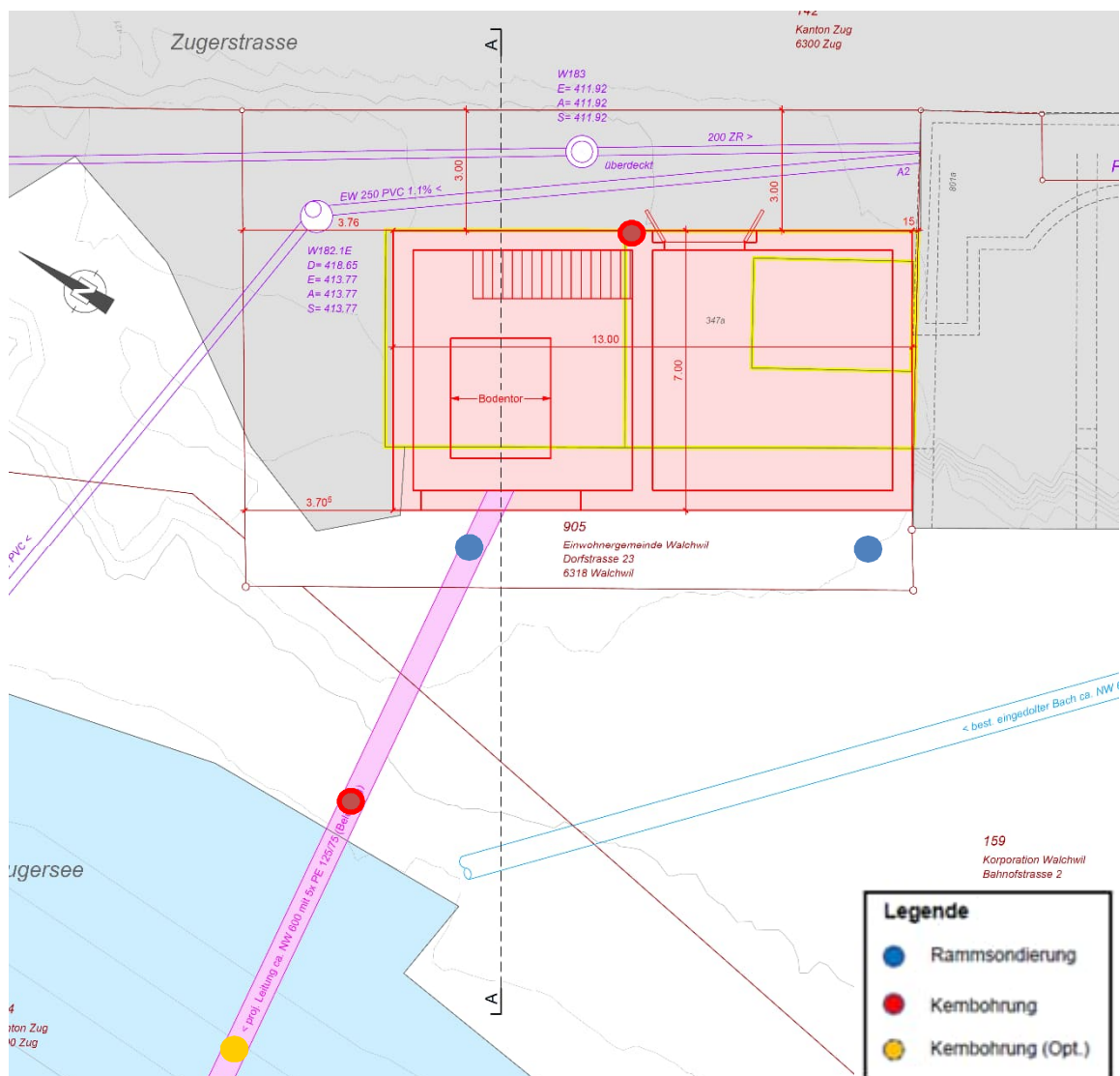


Abbildung 22: Sondierkonzept

Grabenloser Leitungsbau: Gemäss erster Anfrage bei Unternehmern ist die Erstellung der Rohrleitung aus geotechnischer Sicht möglich. Denkbar ist eine Pressbohrung oder ein Stahlrohrrammen (Schlagvortrieb). Die beiden Verfahren unterscheiden sich kostenmässig nicht immens. Der Anteil des Vortriebs im Felsen beeinflusst die Kosten im Rahmen von ca. 10–15 %.

Empfehlung: Die optionale Offshore-Bohrung soll ausgeführt werden, wenn eine höhere Kostengenauigkeit für die Erstellung der Rohrleitung erlangt werden soll.

Seeprofil: Zuverlässige Angaben über die Höhenlage des Seebodens sind Voraussetzung für die Planung und Ausführung des grabenlosen Leitungsbaus sowie für die Installation der Diffusoren.

Empfehlung: Wenn der Verdacht besteht, dass die vorliegenden Informationen Ungenauigkeiten enthalten, wäre eine genauere GPS-Vermessung in den für das Projekt relevanten Bereichen unerlässlich.

Hydrogeologie: Der Sagenbach fliesst durch das Projektgrundstück. Die Vorschriften zum Gewässerabstand müssen eingehalten werden. Nach einem Telefongespräch mit Herrn Peter Keller¹ am 24.4.2023 ist der vorhandene Abstand zwischen dem Bach und dem Projektbereich (> 20 m) ausreichend und entspricht den oben genannten Vorschriften.

Weitere hydrogeologische Herausforderungen sind zum heutigen Zeitpunkt keine bekannt.

4.4.5. Leitungen vom Betriebsgebäude zu den Diffusoren

In den ersten 20 m ab dem Ufer wird zur Schonung der Ufervegetation mittels Pressbohrung oder Schlagvortrieb ein Hüllrohr zirka NW 600 mm verbaut, in welches die Druckluft-Leitungen eingezo-

gen werden. Die Leitungseinführung in die Betriebszentrale wird zugänglich ausgestaltet und ermöglicht spätere Überwachungen und Unterhaltsarbeiten.

Der Baugrubenaushub dient gleichzeitig als Startgrube für die Bohrung oder den Schlagvortrieb.



Abbildung 23: Schlagvortrieb beim Bau und mit eingezogenen Rohren

¹ Projektleiter Oberflächengewässer, Restwasser und Schutzzonen AFU Kanton Zug
Sanierung Zugersee, Vorprojekt Zirkulationsunterstützung im Winter
Stand am 21. August 2023

4.4.6. Leitungsbau im See

Die Luftzuführungsleitungen werden grösstenteils aus herkömmlichen HDPE-Kunststoffrohren gefertigt. Die Druckstufe wird auf SDR 5 PN 40 festgelegt (40 bar). Der Aussendurchmesser der Rohre beträgt 125 mm, die Wandstärke 25 mm. Der verbleibende Innendurchmesser beträgt 75 mm. Dieses aussergewöhnlich starkwandige Rohr hat neben der hohen Zugfestigkeit auch gute Knickeigenschaften. Diese sind während des Absenkvorganges der Seeleitungen und der Standortverschiebungen der Diffusoren von grossem Vorteil.

Ein grosses Augenmerk muss auf die Ballastierung der Leitungen aufgrund der Luftfüllung während des Betriebes gerichtet werden. Der gesamte Leerauftrieb muss durch die Ballastierung überwunden werden, sodass die Leitung sicher auf dem Seegrund abgelegt werden kann.

Zu diesem Zweck wird die Leitung, im Bereich welcher ständig auf dem Seegrund aufliegt, mit rostfreien CNS-Stahlseilen ballastiert. Der Vorteil liegt in einem guten Handling und einem günstigen Preis dieses Systems.



Abbildung 24: HDPE-Leitung mit Drahtseil umwickelt im schwimmenden Rohrlager (Willy Stäubli Ing. AG 2023)

Der Leitungsbereich, welcher vom Seegrund durch das Wasser zu den Diffusoren führt, kann alternativ auch mit speziellen Rohren erstellt werden. Diese Rohre haben die Ballastierung im Rohrmantel integriert. Der Vorteil dieses teuren Systems liegt darin, dass nur ein «nacktes» Rohr zum Diffusor führt und es deswegen keine Fangstellen und unnötigen Kreuzungspunkte gibt.

4.4.7. Diffusoren für den Eintrag von grobblasiger Druckluft

Die Diffusoren werden am Ende der ballastierten Seeleitung angeschlossen und haben die Aufgabe die Luft in der richtigen Tiefe, mit der nötigen Blasengrösse und Menge in den See einzuleiten. Zu diesem Zweck muss ein «Lift» erstellt werden (siehe Abb. 26). Auf diese Weise kann jeder Diffusor in der gewünschten Wassertiefe verankert werden. Zusätzlich soll jeder Diffusor durch ein speziell angefertigtes Serviceboot verschoben und für Reinigungs- und Wartungsarbeiten aufgezo-gen werden können.

Die Verankerung des Systems wird durch ein Gewicht sichergestellt. Der Ankerstein wird aus bewehrtem Beton erstellt und sollte eine Masse von zirka 4'000 kg aufweisen. Die Führungsseile zirka $\varnothing 16$ mm werden in einem Abstand von 3 bis 5 m am Ankerstein befestigt und führen zur Tragboje, welche 4 m unter dem Wasserspiegel schwimmt. Die Tragboje muss einen Auftrieb von 3'000 kg entwickeln, um das gesamte System sicher zu betreiben. Auf der Oberseite der Tragboje befinden sich Seilklemmen, welche die Führungsseile festhalten. Zusätzlich wird das Restseil auf Haspeln aufgewickelt, um eine Reserve für Wartungsarbeiten und allfällige Verschiebungen in grössere Seetiefen zu haben.

An der Tragboje wird der Diffusor (Abbildung 12) aufgehängt. Das Halteseil zirka $\varnothing 12$ mm wird wiederum über Seilklemmen gehalten und auf einer Haspel aufgeschossen. Der Diffusor kann somit in jeder beliebigen Wassertiefe unter der Tragboje verankert werden. Seitlich des Diffusors werden Führungsrohre montiert. Der Diffusor kann sich dadurch beim Anheben und Absenken während den Wartungsarbeiten nicht verdrehen. Alle Stahlbauteile werden aus rostfreiem CNS Stahl gefertigt, um die Langlebigkeit des Systems zu gewährleisten.

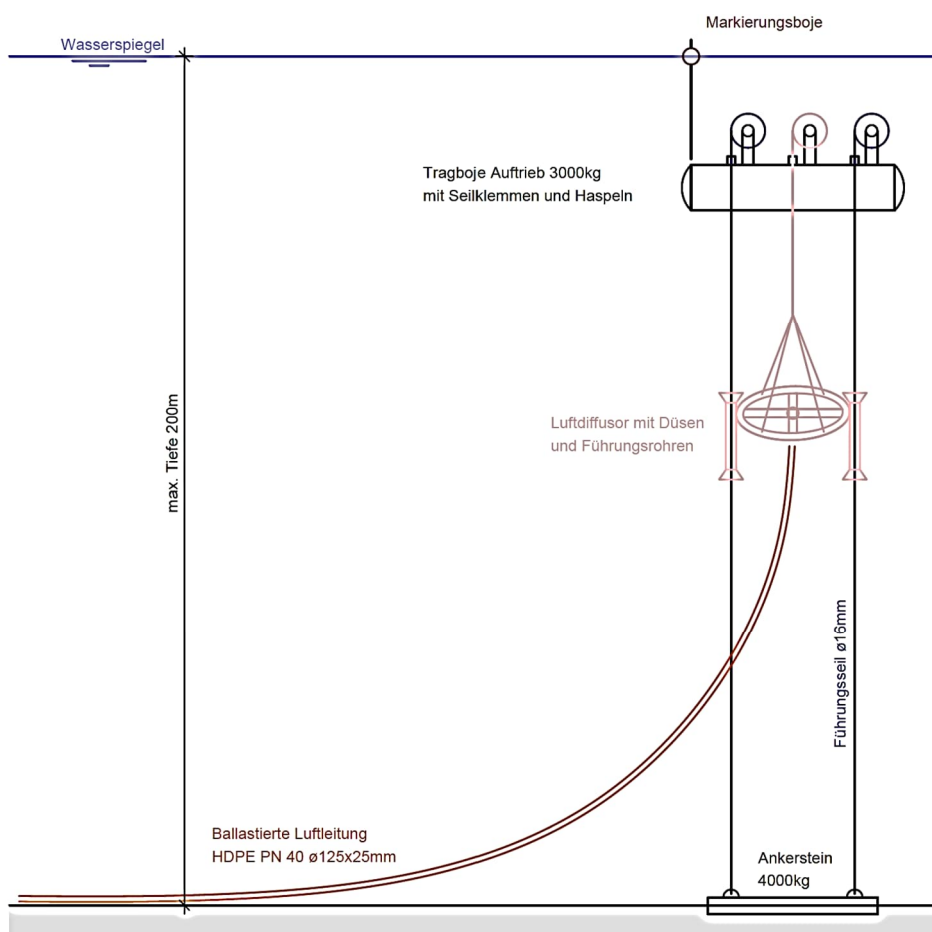


Abbildung 25: Vorgeschlagenes «Lift»-Konzept für die Diffusoren

4.4.8. Verschiebung der geografischen Lage der Diffusoren

Durch das Heben und Absenken der Diffusoren entsteht eine Verschiebung von ca. 130 m zu der Eintragsstelle am Seegrund, über welche sich das Serviceboot auf dem See verschiebt. Die approximative Lage des Diffusorenfeldes ist in Abbildung 17 ersichtlich.

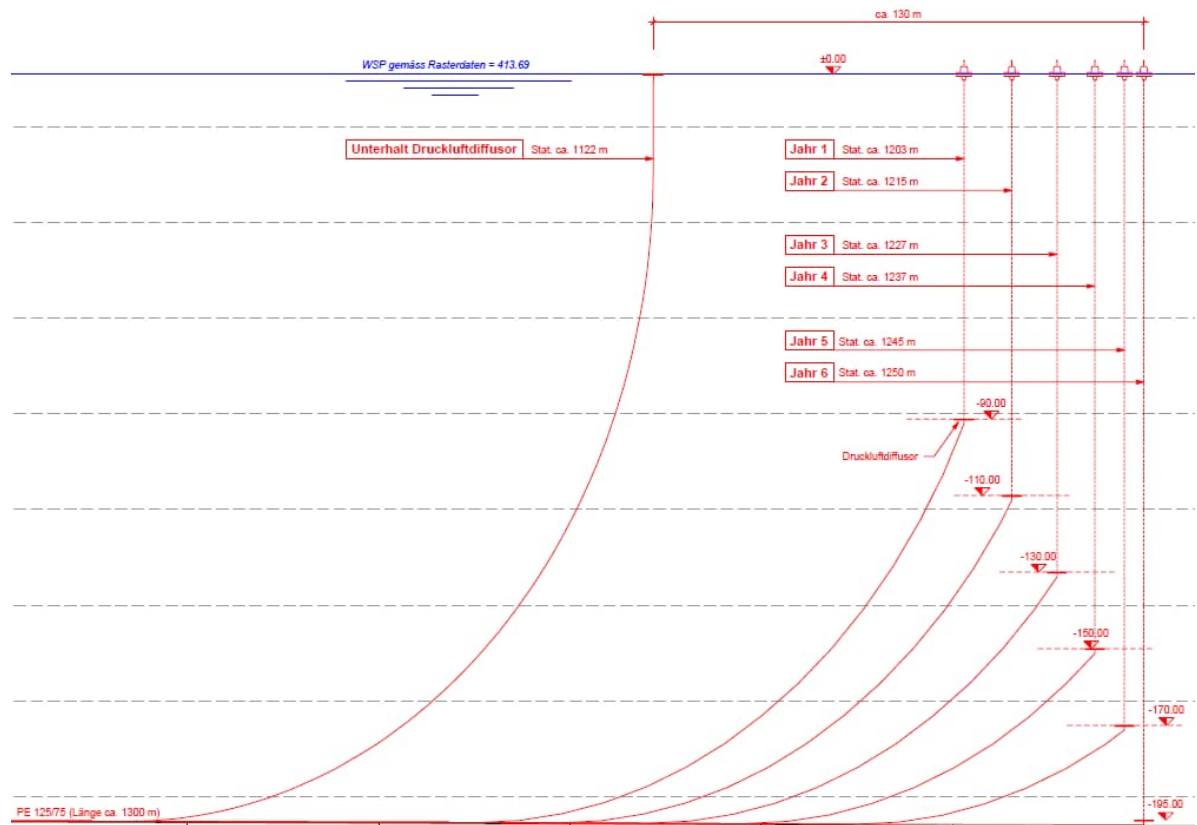


Abbildung 26: Geografische Verschiebung der Druckluft-Diffusoren bei der Eintragsstelle

4.4.9. Markierungsbojen und Verankerung

Die Tragboje wird mit einer Markierungsboje gekennzeichnet, sodass sie jederzeit einfach erkannt werden kann. Die Markierungsboje wird mit einer Solarleuchte und einem Radarreflektor ausgerüstet.

5. Messboje Online für Temperatur- und Sauerstoff-Messung

Für die Online Temperatur- und Sauerstoffmessung ist eine Messboje von Flydog Marine Typ «Oscar» vorgesehen. Die Messboje wird mit der entsprechenden Sensorik ausgestattet und soll in definierten Zeit- und Tiefenabschnitte folgende Parameter messen:

- Temperatur
- Sauerstoffkonzentration
- Leitfähigkeit
- pH-Wert
- Fluorometer, um Chlorophyll und Phycocyanin zu messen (Algenwachstum).

Die zu messenden Parameter, Anzahl Messungen und Tiefenprofil der Messungen werden vom Hersteller eingestellt. Die Messboje besteht aus einem Schwimmer aus Polyurea Kunststoff und einem Metallrahmen. Sie ist sehr widerständig gegen mechanische Einwirkungen, Chemikalien und UV-Strahlen.

Die Verankerung der Bojen basiert auf zwei Ankerleinen, die an den Seiten der Boje befestigt sind. Dies verhindert, dass sich die Verankerungsleinen mit dem Kabel verheddern, mit dem die Instrumente (Sensoren) im See auf- und abwärts gezogen werden. Um Kollisionen mit Schiffen zu vermeiden, befindet sich an der Spitze der Boje eine Laterne. Zudem ist die Boje mit Solarzellen ausgestattet, die genug Energie erzeugen, und die Batterien zu laden. Dadurch ist die Boje energieautonom.

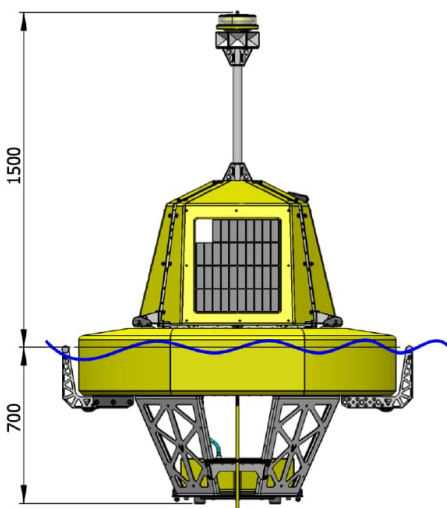


Abbildung 27: Messboje «Oscar» von Flydog Marine

Gemäss Flydog Marine gibt es zwei Möglichkeiten, um die Messsonde auf 190 m Tiefe abwärts zu ziehen. Die erste Möglichkeit (Variante 1) ist, ein dünneres Profilkabel zu verwenden für das ab- und aufwärts Ziehen der Sonde. Mit dem dünneren Profilkabel kann mehr Kabel auf die Trommel aufgezogen werden. Die zweite Möglichkeit (Variante 2) ist, zwei Sonden an einem Profilkabel zu befestigen. Hier würde die tiefe angebrachte Sonde von 95-190 m Tiefe messen und die obere Sonde von 0-95 m. Diese Methode würde gegenüber der ersten Methode Energie und Zeit sparen für die Messung.

In der Kostenschätzung ist die leicht günstigere Variante 1 eingerechnet.

6. Baulicher und betrieblicher Unterhalt

Folgende Arbeiten werden anfallen:

- Überwachung und Steuerung der Anlage, vor Ort und via Prozessleitsystem
- Wartung und Betrieb der Kompressoren-Station
- Wartung und Reinigung der Diffusoren (zweimal jährlich)
- Neujustierung der Diffusoren
- Wartung der Messboje
- Instandhaltung Arbeitsfloss.

Es ist geplant, das Betriebsgebäude neben dem Pumpwerk Sagenbrugg zu stellen, welches vom Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachtsee-Ägerisee (GVRZ) betrieben wird. Für den baulichen und betrieblichen Unterhalt der land- und seeseitigen Anlagen kann mit einem Leistungsauftrag an ein fachlich geeignetes Ingenieurbüro vergeben werden.

Zur Wartung und Reinigung der Diffusoren muss ein geeignetes Serviceboot für den Unterhalt und das regelmässige Heben der Diffusoren inklusive Druckleitungen beschafft werden.

6.1. Anforderungen und mögliche Ausgestaltung des Servicebootes

Das Serviceboot wird zum Unterhalt und Versetzen der Diffusoren benötigt. Es wird in Walchwil an einem Steg verankert. Das Serviceboot sollte mit diversen Hebegeräten ausgerüstet werden:

- 1 Bergungswinde 10'000 kg
- 2 Spillwinde 5'000 kg
- 1 Spillwinde 3'000 kg
- 1 hydraulischer Kranarm, ca. 10 m Ausladung bei 10'000 kg Gewicht.

Es ist eine Überlegung wert das Serviceboot mit Elektroantrieben auszurüsten. Dazu würden zwei Aussenbord Motoren elektrisch oder mit Benzin betrieben. Die Leistung würde ca. 2 x 50 kW betragen. Die Hauptwinde würde einen hydraulischen Antrieb erhalten, um grössere Drehmomente zu bewältigen. Für die Positionierung der Diffusoren und Kontrolle des Blasenbildes ist ein Echolot vorgesehen.

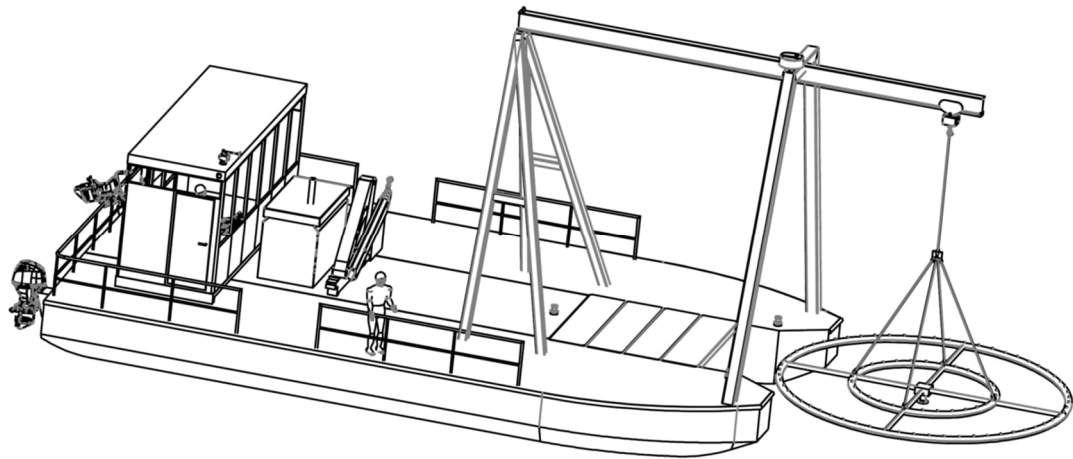


Abbildung 28: 3-D Darstellung des Servicebootes

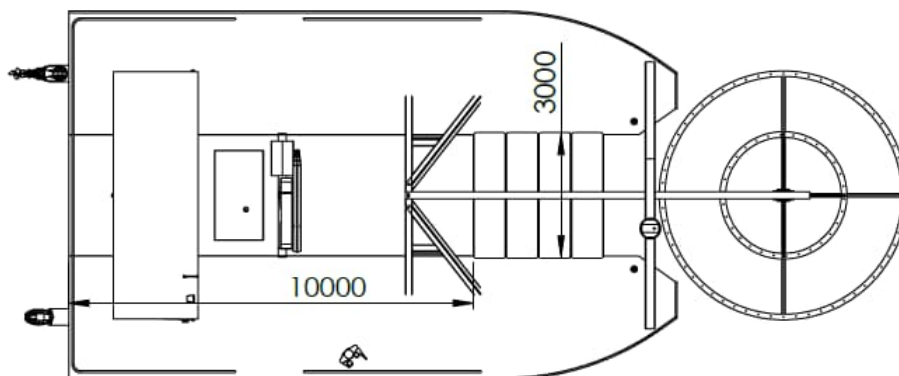


Abbildung 29: Aufsicht Serviceboot

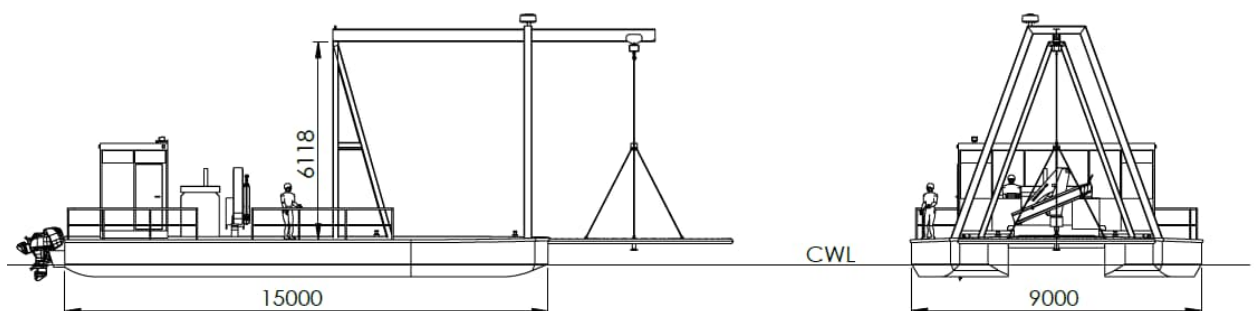


Abbildung 30: Seitensicht mit Schema und Masse des Serviceboot (Hasler Bootswerft AG 2023)

6.2. Stellenbeschreibung für den Unterhalt / Anforderungsprofil

Viele Arbeiten und Unterhaltsaufgaben müssen aus Sicherheitsgründen zu zweit ausgeführt werden. Die Wartung und Reinigung der Diffusoren bedingen den Einsatz von mind. 4 Fachkräften auf dem Serviceboot.

6.2.1. Möglicher Aufgabenbeschrieb für das Unterhaltspersonal

- Überwachung der Regelvorgänge vor Ort oder via Prozessleitsystem
- Leistung von Pikettdienst (Einsatz bei relevanten Störungen)
- Instandhaltung der Kompressorenstation
- Reinigung der Diffusoren (zweimal jährlich)
- Wartung der Messboje
- Mithilfe bei der Neujustierung der Diffusoren
- Instandhaltung Serviceboot.

6.2.2. Mögliches Anforderungsprofil

- Mitarbeiter oder Mitarbeiterin mit technischem Knowhow beispielsweise Polymechaniker, Landmaschinenmechaniker, Elektriker, etc.
- Geübt im Umgang mit Prozessleitsystemen
- Kenntnisse für die Wartung und Betrieb von Hochdruck-Kolbenkompressoren
- Kenntnisse von Regelvorgängen
- Wenn möglich mit Bootsführerprüfung für den Betrieb des Service-Schiffs
- Grundsätzliche Erfahrung im Anlagenbetrieb und -Unterhalt von Vorteil.

6.3. Geschätzter Stundenaufwand für Betrieb und Wartung

In der Schätzung ist der Aufwand für die Arbeitsausführung durch zwei Personen gemäss SUVA Vorschriften eingerechnet.

Unterhalt und Betrieb	Anzahl	Stunden	Total
Kontrollgänge	54	3	162
Überwachung der Regelvorgänge Prozessleitsystem	365	0.1	36.5
Wartung der Kompressoren	8	10	80
Leistung von Pikettdienst (Einsatz bei relevanten Störungen)	5	4	20
Instandhaltung der Kompressorenstation	5	10	50
Reinigung der Diffusoren (zweimal jährlich)	10	36	360
Wartung der Messboje	12	8	96
Mithilfe bei der Neujustierung der Diffusoren	5	50	250
Instandhaltung Arbeitsboot	4	24	96
Total Stunden für Unterhalt und Betrieb			1150.5

7. Erfolgskontrolle

Mit der see-internen Erfolgskontrolle wird einerseits die zielgerichtete Steuerung der Anlage sichergestellt. Andererseits soll gezeigt werden, wie sich die Phosphorkonzentration im Zugersee weiterentwickelt. Die Gesamtkonzentration an Phosphor im See wird gemäss den Prognosen der Eawag (2019) abnehmen und innert 50 Jahren soll sich ein mesotrophes Gleichgewicht einstellen. Dieses Monitoring soll mittels Tiefenprofilen des Sees sowie der geplanten Messboje von Flydog Marine Typ «Oscar» durchgeführt werden. Die Messboje liefert dabei neben anderen Messparametern täglich Daten zum Sauerstoffgehalt in den verschiedenen Seetiefen. Die Tiefenprofile geben im Zweiwochenrhythmus Informationen zur Veränderung des Phosphorgehalts im Zugersee.

8. Kosten

Alle nachfolgenden ausgewiesenen Baukosten basieren auf Richtofferten und sind im **Umfang +/- 20 %** ausgewiesen. Kostenstand: 2023, alle Zahlen exkl. MWST.

8.1. Baukosten Infrastruktur, Gebäude, Vortrieb See

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk.	Total Fr.
Kernbohrung und Rammsondierung	gl	1	10'000	10'000
Kernbohrung Offshore	gl	1	50'000	50'000
Aushub- und Spezialtiefbauarbeiten (Aushub, Nagelwand, Unterfangung)	gl	1	200'000	200'000
Grabenloser Leitungsbau, Rammvortrieb	gl	1	130'000	130'000
Werkleitungen Provisorien	gl	1	100'000	100'000
Wasserhaltung	gl	1	50'000	50'000
Anpassungen Zufahrt	gl	1	40'000	40'000
Wiederherstellen Zufahrt nach Bauende	gl	1	60'000	60'000
Installation (Bau)	gl	1	60'000	60'000
Rückbau Trafo und alte ARA	gl	1	60'000	60'000
Betonarbeiten, inkl. Schalung, Armierung	m3	350	1'200	420'000
Abdichtung, Einführung Leitungen	gl	1	40'000	40'000
Hinterfüllung, inkl. Lieferung	m3	500	80	40'000
Innenausbau	gl	1	20'000	20'000
Abdichtung, Überdachung			40'000	40'000
Tore, Objektschutztüren	gl	1	70'000	70'000
Öffentliches WC, Sanitäranlagen	gl	1	30'000	30'000
Not-Pumpenanlage	gl	1	30'000	30'000
Diverse und Kleinpositionen Bau (ca. 25%)	%	25	300'000	300'000
Stark- und Schwachstrominstallationen	gl	1	50'000	50'000
Total exkl. MWST				1'800'000

8.2. Kosten Seeleitungsbau mit 5 Diffusoren

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk.	Total Fr.
Rohrschweissplatz	gl	1	80'000	80'000
Installation Rohrleitungsbau	gl	1	50'000	50'000
Installation Wasserbau	gl	1	90'000	90'000
Schwimmendes Rohrlager	gl	1	75'000	75'000
Liefern Rohre HDPE PN 40 ø125/75mm	m	7'000	30	210'000
Verschweissen Rohre HDPE PN 40 ø125/75mm	m	7'000	20	140'000
Einwässern Rohre HDPE PN 40 ø125/75mm	m	7'000	20	140'000
Ballastieren Rohre HDPE PN 40 ø125/75mm	m	7'000	80	560'000
Absenken Rohre HDPE PN 40 ø125/75mm	m	7'000	40	280'000
Liefern Spezialrohre mit Ballastmantel	m	1'500	120	180'000
Verschweissen Spezialrohre mit Ballastmantel	m	1'500	70	105'000
Absenken Spezialrohre mit Ballastmantel	m	1'500	160	240'000
Ausblasen der Rohre	Stk	5	10'000	50'000
Druckprobe	Stk	5	10'000	50'000
Total exkl. MWST				2'250'000

8.3. Kosten Druckluft-mit 5 Diffusoren

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk	Total Fr.
Installation Wasserbau	gl	1	70'000	70'000
Liefern und Versetzen Ankersteine	Stk	5	15'000	75'000
Liefern und Versetzen CNS Führungsseile	Stk	10	10'000	100'000
Produktion CNS Tragboje	Stk	5	40'000	200'000
Montage Tragboje	Stk	5	12'000	60'000
Ausrüstung Tragboje	Stk	5	14'000	70'000
Liefern und Versetzen Tragseile	Stk	5	4'000	20'000
Produktion CNS Diffusoren	Stk	5	52'000	260'000
Montage Diffusoren	Stk	5	8'000	40'000
4 komplette Düsensätze	Stk	5	15'000	75'000
Markierungsboje, Leuchte, Reflektor	Stk	5	16'000	80'000
Anschluss Seeleitungen	Stk	5	16'000	80'000
Inbetriebnahme	Stk	5	14'000	70'000
Total exkl. MWST				1'200'000

8.4. Kosten Druckluftherzeugungsanlage mit 5 Diffusoren

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk	Total Fr.
AF Druckluftkompressor 25 bar, 220 kW	Stk	2.00	250'000	500'000
Rückkühler, 300 kW mit Schalldruckpegel (Lp) 32 dB(A) Nachbetrieb	Stk	1.00	30'000	30'000
Mabe Druckluftbehälter 26 bar/ 5000 L	Stk	1.00	20'000	20'000
Mehrpreis stärkere Umwälzpumpen und grössere Plattentaucher	Stk	1.00	8'000	8'000
Armaturensatz zu 26 bar Druckluftbehälter	Stk	1.00	2'000	2'000
Umluftkühler 27 kW	Stk	1.00	15'000	15'000
Regelventile inklusive Antrieb	Stk	5.00	3'000	15'000
Messsonden VA 570 Druchfluss-/Verbrauchssensor	Stk.	5.00	4'000	20'000
Transport 2 Stk. Kompressoren, je ca. 9700kg	Stk.	2.00	10'000	20'000
40 bar Druckleitungen		1.00	37'000	37'000
Einbringung sämtlicher Komponenten Hebeeinrichtungen		1.00	25'000	25'000
Dokumentation für Zertifizierung		1.00	5'000	5'000
Behördliche Abnahme		1.00	3'000	3'000
Total exkl. MWST.				700'000

8.5. Kosten Elektro-, Mess-, Steuerungs-, Regelungs- und Leittechnik-Planung (EMSRL) (ohne allgemeine Elektroinstallationen)

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk.	Total Fr.
Zuleitungen 800 kVA	Stk	1	40'000	40'000
Potenzialausgleich und Abgrenzungen	Stk	1	13'000	13'000
Anschlüsse Kompressoren Variante 2	Stk	2	11'000	22'000
Anschlüsse Hilfsbetriebe und Sensoren		1	35'000	35'000
Hauptverteilung mit Einspeisung	Stk	1	80'000	80'000
Mess-, Steuer- und Regelverteilung	Stk	1	40'000	40'000
Kompensation und aktive Filter	Stk	1	45'000	45'000
Prozessleitsystem	Stk	1	250'000	250'000
Elektroschema	Stk	1	25'000	25'000
Total exkl. MWST				550'000

8.6. Kosten Umlegung Trafostation und Anschluss

Position	Anzahl	Fr./Einheit	Total Fr.
Restwert bestehende Trafostation (März 2023)	1	20'000	20'000
Erstellen einer provisorischen Trafostation während Bauphase	1	50'000	50'000
Miete provisorische Trafostation (monatlich)	20	1'000	20'000
Netzkostenbeitrag 800A	1	90'000	90'000
Baukostenbeitrag	1	20'000	20'000
Total exkl. MWST			200'000

Kosten gemäss Schätzung WWZ. Für das Einbaurecht der Transformatorenstation in das Gebäude der Seebelüftungsanlage zahlt WWZ Netze AG eine einmalige Entschädigung von Fr. 275.-/m³ (UG) oder Fr. 325.-/m³ (EG).

8.7. Kosten Photovoltaik Anlage

Position	Anzahl	Fr./Einheit	Total Fr.
Dachfläche 13 x 7 m ergibt ca. 17 kW peak	17	1'800.00	30'600
Fassade 17 x 4 m ergibt ca. 9.5 kW peak	9.5	2'000.00	19'000
Elektroverteilung und NS Schutz	1	5'000.00	5'000
Elektroinstallationen	1	5'400.00	5'400
Total exkl. MWST			60'000

8.8. Kosten Serviceboot

Position	Anzahl	Fr./Anzahl	Total Fr.
Serviceboot (gem. Hasler Bootswerft AG, Stansstad)	1	2'500'000	2'500'000
Total exkl. MWST.			2'500'000

Die Investitionskosten für das Serviceboot wurden von der Hasler Bootswerft AG, Stansstad) geschätzt.

8.9. Kosten Steganlage 2m x 12m

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Anzahl	Total Fr.
Installation Wasserbau	gl	1	15'000	15'000
Stahlrohrpfähle NW 400, feuerverzinkt	Stk	6	7'000	42'000
Widerlager am Land	Stk	1	18'000	18'000
Joche HEB 160, feuerverzinkt	Stk	3	4'000	12'000
Längsträger UPE 140, feuerverzinkt	Stk	4	9'000	36'000
Bordlatte umlaufend, Lärche	gl	1	5'000	5'000
Streifpfosten Lärche	Stk	16	250	4'000
Belag, Lärche	gl	1	7'000	7'000
Rettungsleiter feuerverzinkt	Stk	1	5'000	5'000
Anbinde Pfähle NW 200, feuerverzinkt	Stk	4	3'000	12'000
Stromversorgung	gl	1	20'000	20'000
Wasserversorgung	gl	1	4'000	4'000
Total exkl. MWST				180'000

8.10. Kosten Messboje «Oscar»

Die Kosten für die Messboje stammen aus der Richtofferte von Flydoc Marine vom 13.2.2023. Bei den Kosten handelt es sich um Richtpreise. Die Ausführung ist gerechnet mit einem (dünnen) Profilkabel und einer Messsonde mit Sauerstoffsensor.

Position	Einheit	Anzahl	Fr./Stk	Total Fr.
Messboje «Oscar» inkl. Schwimmer, Metallrahmen, Radar, Laterne und Ausgleichgewicht	Stk.	1	41'000	41'000
Solarmodule inkl. Li-Akku	Stk.	1	10'000	10'000
Datenlogger inkl. GPS und 4G Modem	Stk.	1	7'000	7'000
Profiler Module bestehend aus Winde, Kabelführung, Software, Fernbedingung, Stützkonstruktion	Stk.	1	40'000	40'000
Projektspezifische Software	Stk.	1	4'000	4'000
Verankerung inkl. Zubehör	Stk.	2	2'500	5'000
Reisekosten für 1 Person für Installation und Training		1	4'000	4'000
Transport	Stk.	1	1'000	1'000
Proflierungskabel inkl. Zubehör	m	260		10'000
Idronaut Ocean Seven Messsonde	Stk.	1	18'000	18'000
Idronaut Dissolved Oxygen Sensor	Stk.	1	5'000	5'000
Sonderanfertigung Winde und Kabeltrommel für 200 m Kabelführung	Stk.	1	5'000	5'000
Total exkl. MWST				150'000

8.11. Honorare

Position	Total Fr.
Reserve für umwelttechnische Abklärungen zum Bauvorhaben	100'000
Geologie und Geotechnik	50'000
Geometer, Bauabsteckung, Vermessung	30'000
Bauingenieur	170'000
Bauphysiker	30'000
Verfahreningenieur	980'000
Elektroingenieur	80'000
Wissenschaftliche Begleitung	160'000
Total exkl. MWST	1'600'000

8.12. Zusammenstellung Kosten für die Technische Zirkulationsunterstützung mit 5 Diffusoren

Position	Total Fr.
Infrastruktur, Gebäude, Vortrieb See	1'800'000
Seeleitungsbau	2'250'000
Diffusoren	1'200'000
Druckluftherzeugungsanlage (Variante 2)	700'000
EMSRL (ohne allgemeine Elektroinstallationen)	550'000
Umlegung Trafostation und Anschluss	200'000
Kosten Photovoltaik Anlage	60'000
Serviceboot	2'500'000
Steganlage	180'000
Messboje «Oscar»	150'000
Reserve für Wärmeauskoppelung	350'000
Landentschädigungen	20'000
Gebühren	40'000
Honorare	1'600'000
Total exkl. MWST	11'600'000

8.13. Kosten für Betrieb und Unterhalt

Jährliche Stromkosten, Wartungskosten, Lohnkosten für Anlagewart, Kosten Unterhalt Boot, Wartung von Messgeräten etc.

Position	Jährliche Kosten (Fr.)
Stromkosten Allgemein	2'000
Heizkosten	1'500
Wissenschaftliche Begleitung	25'000
Betriebs und Unterhaltskosten Kompressoren	225'000
Wartungskosten Diffusoren	25'000
Personalkosten jährliche Reinigung Diffusoren	12'000
Wasser	1'500
Diffusoren tiefer setzen	25'000
Ersatzteile Diffusoren	5'000
Unterhalt Boot • Treibstoff, Service • Schiffssteuer, Bootsplatz, Versicherung	12'000
Wartungskosten Messboje	6'500
Wartungskosten Messgeräte	5'000
Schutzmaterial • Bootsführerschein und -fahrstunden • Arbeits- und Schutzkleidung • Schwimmwesten	10'000
Kosten Betrieb durch GVRZ 1050 Stunden à 90.– Fr.	94'500
Total exkl. MWST	450'000

9. Landerwerb

Das Grundstück mit der Nr. 905 in der Gemeinde Walchwil ist im Besitz der Einwohnergemeinde Walchwil. Die Baudirektion des Kantons Zug trifft die notwendigen Abklärungen über die Nutzung des Grundstücks. Auf dem Grundstück wird das Betriebsgebäude für die Kompressorenanlage errichtet, welche für die Umsetzung der technischen Zirkulationsunterstützung mittels Druckluft im Zugersee notwendig ist.

10. Terminplanung

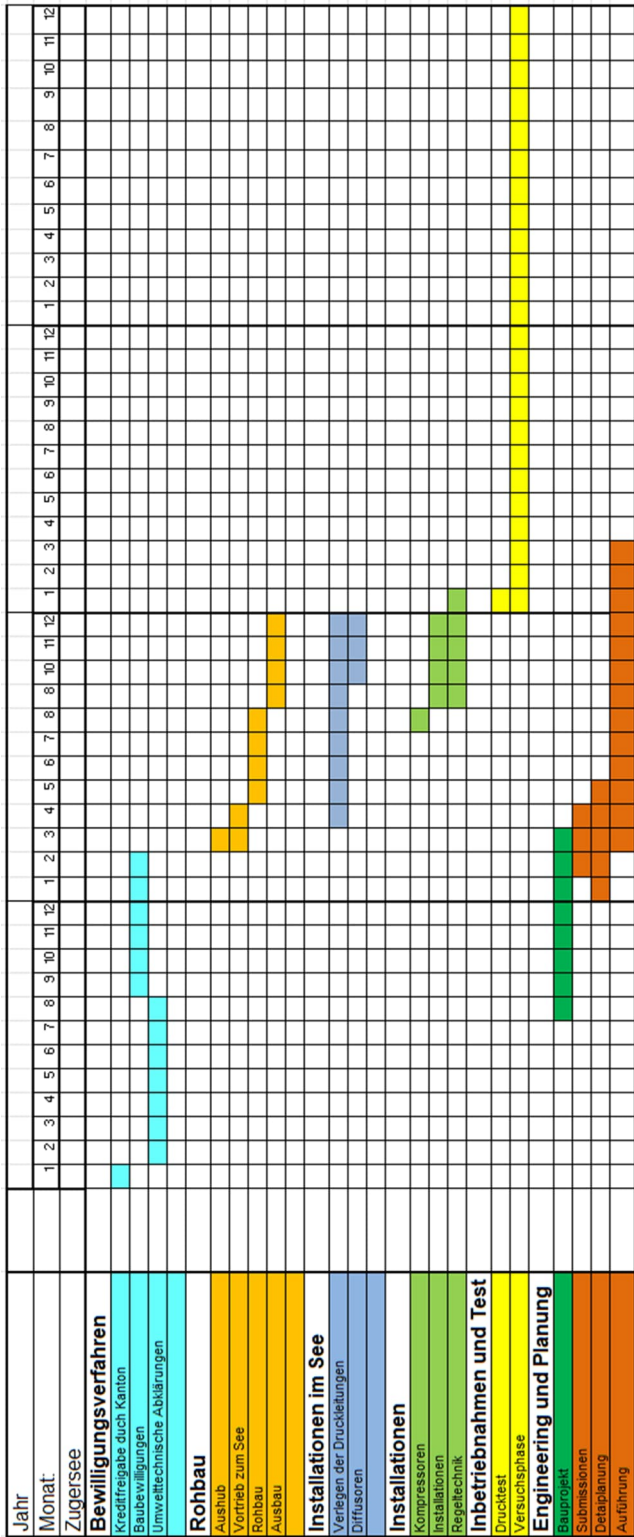


Abbildung 31: Terminplan

11. Themenspeicher zuhanden Bauprojekt

Auf Stufe Bauprojekt sind folgende zusätzliche Abklärungen zu treffen:

- Evaluation der genauen Zahl der Öffnungen, die Grösse der Düsen und der optimale Luftdurchsatz.
- Rechnerische Verifikation der Absinkgeschwindigkeit anhand effektiver Messungen
- Bestimmung eines zweckdienlichen Installationsplatzes für den Rohrleitungsbau. Prüfung der Abwärmenutzung
- Evaluation alternativer Lieferanten oder Nutzung (Wasserbauunternehmungen) für das Serviceboot
- Ausarbeitung eines Pflichtenheftes für die Wartung und den Betrieb der see-internen Anlagen sowie für das see-interne Monitoring.
- Abwägung Flexibilität / Redundanz Kosten-Nutzen-Verhältnis bei vier oder fünf Diffusoren

Im Zuge des Bauprojektes sind insbesondere folgende Teilprojekte weiter zu bearbeiten:

- Konzept Elektroinstallationen
- Elektro-, Mess-, Steuerungs-, Regelungs- und Leittechnik-Planung (EMSRL)
Konzept Messtechnik, Energiemesskonzept / Betriebsdatenerfassung
Netzqualität, Sicherstellung, Notstromkonzept
- Steuerung der HLK-Komponenten, Integration ins Netzwerk
- Erdungskonzept, Korrosionsschutz, Blitzschutz, Brandschutz
- Beleuchtungskonzept, Notbeleuchtung
- Definition Photovoltaik-Anlage (Dachfläche und Fassade)

Glossar

Epilimnion	Ein See wird in drei verschiedene Zonen unterteilt. Die oberflächennahe warme Schicht wird als Epilimnion bezeichnet. Im Frühling werden die oberen Wasserschichten durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Die Erwärmung der oberen Schichten nimmt im Sommer durch die intensivere Sonneneinstrahlung zu. Im Herbst kühlt sich das Epilimnion wieder ab.
Fluorometer	Messgerät mit dem fluoreszierenden Parameter wie z. B. Chlorophyll (u.a. in Algen enthalten) gemessen werden können.
Hypolimnion	Ein See wird in drei verschiedene Zonen unterteilt. Das kalte Tiefenwasser wird als Hypolimnion bezeichnet. Im Hypolimnion herrscht ganzjährig eine Wassertemperatur von 4°C.
Mesotroph	Mesotrophe Gewässer befinden sich in einem stabilen, mittelnährstoffreichen Zustand.
Metalimnion	Als Metalimnion (auch Sprungschicht) wird im See die Überganszone vom Epilimnion (oberflächennahe Schicht) ins Hypolimnion (Tiefenwasser) bezeichnet. Im Sommer ist das Metalimnion nur wenige Meter mächtig und durch grosse Temperaturgradienten gekennzeichnet ($> 0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ Tiefe).

Abkürzungen

AFU	Amt für Umwelt des Kantons Zug
AFW	Amt für Wald und Wild des Kantons Zug
ARV	Amt für Raum und Verkehr des Kantons Zug
AVS	Amt für Verbraucherschutz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BH	Betriebsstunden
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
GSchV	Gewässerschutzverordnung
GVRZ	Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachtersee-Ägerisee
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
MO	Mikroorganismen
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
N	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
TP	Phosphorkonzentration
TS	Trafostation
ZU	Zirkulationsunterstützung
TWA	Tiefenwasserableitung
SPS	Speicher Programmierbare Steuerung
USV	Unterbrechungslose Spannungsversorgung

Literaturverzeichnis

- AFU Zug. *Amt für Umwelt Kanton Zug*. 16. 1 2023. <https://www.zg.ch/behoerden/audirektion/amt-fuer-umwelt/wasser-gewaesser/oberflaechengewaesser/zugersee> (Zugriff am 16. Januar 2023).
- GSchV. „814.201 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV).“ 28.10.1998. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/de (Zugriff am 17. Januar 2023).
- Hasler Bootswerft AG, Stansstad. "Arbeitsboot Sanierung Zugersee." 20. März 2023. [map.geo.admin](https://map.geo.admin.ch). 24. März 2023. <https://map.geo.admin.ch>.
- Müller, Beat, Alfred Wüest, Martin Schmid, David Janssen, und Nicola Sperlich. *Auswirkung der Zirkulationsunterstützung (Beurteilung see-interner Massnahmen zu beschleunigten Sanierung des Zugersees)*. Kastanienbaum: Eawag - Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, 2022.
- Liechti P. *Der Zustand der Seen in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 237*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1994.
- Müller, Beat; Gaudard, Adrien; Wüest, Alfred. *Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees*. Kastanienbaum: Eawag - Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, 2019.
- Schmid M., *Energieverbund Zug - Machbarkeitsstudie - Technischer Bericht Seewasser*, Eawag, im Auftrag der Stadt Zug, 2014.
- Willy Stäubli Ing. AG, *Projektstudie Seebelüftung - Bericht über die Machbarkeit der Wasserbauarbeiten, inkl. Kostenschätzung*, Horgen, 2023.
- Wüest, A., N. Brooks, und D. Imboden. *Bubble Plume Modeling for Lake Restoration, Water Resources Research*. Vol. 28, NBo. 12, S. 3235-3250, 1992.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Organigramm der Projektorganisation	12
Abbildung 2:	Mögliche Mischungsvorgänge durch Blasenschleier in einem See	14
Abbildung 3:	Prozessparameter bei der Bildung von Blasenschleiern zur Zwangsumwälzung von Seen	15
Abbildung 4:	Dichtepprofile des Zugersees in der Winterperiode 2021/22	16
Abbildung 5:	Dichtepprofile des Zugersees in der Winterperiode 2022/23	17
Abbildung 6:	Dichtepprofile des Zugersees in der massgebenden Winterperiode 2021/22	17
Abbildung 7 a bis e:	Anwendung des Einzelblasenmodells: Entwicklung der Blasengrösse während des Aufstiegs aus verschiedenen Höhenlagen	20
Abbildung 8:	Modell see-interne Druckluftdiffusoren	21
Abbildung 9:	Resultierende Endgeschwindigkeiten des sekundären Blasenschleiers bei Einsatz unterschiedlicher Anzahl von Diffusoren	22
Abbildung 10:	Erforderlicher Blasendurchmesser an der Einblasstelle bei der Absenkung der Diffusoren in zunehmende Wassertiefen	23
Abbildung 10:	Entwicklung der Gesamt-Phosphorkonzentration im Epilimnion des Zugersees seit 1974 und Extrapolation der Konzentrationen	25
Abbildung 11 a bis d:	Entwicklung der Gesamt-Phosphorkonzentration im Epilimnion des Zugersees nach 10, 20, 30 und 40 Jahren der Zirkulationsunterstützung bei Absenkung der Belüfter um 10 m, respektive 20 m pro Jahr	26
Abbildung 12:	Schema der Kompressoren Anlage	29
Abbildung 13:	Layout Platzbedarf Kompressorenraum	30
Abbildung 14:	Druckluft-Kompressor (Beispiel)	30

Abbildung 15:	Geplante Lage der Druckluftleitungen mit dem Diffusorenfeld	33
Abbildung 16:	Rohrschweisplatz auf einer Wiese am Seeufer	34
Abbildung 17:	Schwimmendes Rohrlager in einem See	35
Abbildung 18:	Synoptische Gefahrenkarte	36
Abbildung 19:	Oberflächenabflusskarte	37
Abbildung 20:	Prüfperimeter Bodenverschiebungen (PBV)	38
Abbildung 21:	Sondierkonzept	39
Abbildung 22:	Schlagvortrieb beim Bau und mit eingezogenen Rohren	40
Abbildung 23:	HDPE-Leitung mit Drahtseil umwickelt im schwimmenden Rohrlager	41
Abbildung 24:	Vorgeschlagenes «Lift»-Konzept für die Diffusoren	42
Abbildung 25:	Geografische Verschiebung der Druckluft-Diffusoren bei der Eintragsstelle	43
Abbildung 26:	Messboje «Oscar» von Flydog Marine	44
Abbildung 27:	3-D Darstellung des Servicebootes	47
Abbildung 28:	Aufsicht Serviceboot	47
Abbildung 29:	Seitensicht mit Schema und Masse des Serviceboot	47
Abbildung 30:	Terminplan	58

Planbeilagen

Übersicht	1:25'000	3621.17-01
Situation	1:500	3621.17-02
Situation OG	1:100	3621.17-03
Situation EG	1:100	3621.17-04
Situation UG	1:100	3621.17-05
Schnitt A	1:100	3621.17-06
Schnitt B	1:100	3621.17-07
Längsschnitt Belüftungsleitung	1:500	3621.17-08

Literaturbeilagen

- Bubble Plume Model03.pdf
- Water Resources Research - 2004 - McGinnis - Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake (1).pdf

Anhang

- A1. Erläuterungen zur Verfahrenstechnik**
- A2. Erläuterungen zu Technik und Installationen**
- A3. Bericht über die Machbarkeit der Wasserbauarbeiten vom 31.1.2023**
- A4. Geotechnischer Vorbericht vom 28.4.2023**
- A5. Bootsbauer**
- A6. Messboje**