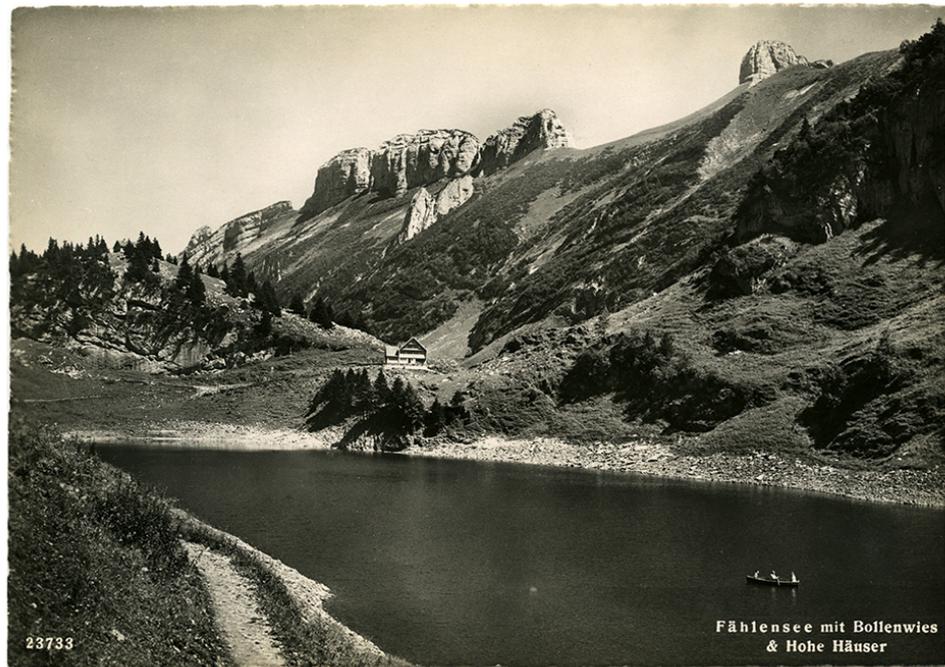


# Trophieverhältnisse Fählensee

Entwicklung des Nährstoffgehaltes seit dem 15. Jahrhundert



Postkarte ca. 1960

## Fachbericht

Untersuchung eines Seesedimentkernes mittels  
Kieselalgen zur Rekonstruktion des Gesamtphosphors

Bericht Nr. 1296-B-08  
Datum: 9.2.2021

---

**Impressum**

Auftraggeber: Bau- und Umweltdepartement · Kanton Appenzell Innerrhoden  
Gaiserstrasse 8 · CH-9050 Appenzell

Auftragnehmer: AquaPlus AG  
Gotthardstrasse 30 · CH-6300 Zug

Projektleitung: Fabian Peter

Mitarbeiter: Joachim Hürlimann · Yvonne Bernauer · Christa Gufler

Externe Beratung: *Adrian Gilli*, ETH Zürich (Verfügbarmachung des Sedimentkerns, Gefriertrocknung der Sedimentproben)

*Lukas Glur*, EAWAG (Datierung, Flutereignisse)

*Flavio Anselmetti*, Universität Bern (Beratung Beurteilung Sedimentkern, Geologie Einzugsgebiet)

*André F. Lotter*, Luzern (Berechnung P-Rekonstruktion)

*Sandro Frefel*, Appenzell, Landesarchivar (historische Abklärungen zur Alpbewirtschaftung, zu Rodungen sowie zu Orts- und Flurnamen)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Ausgangslage und Auftrag</b>	<b>2</b>
<b>2 Grundlagen und verwendete Methoden</b>	<b>3</b>
2.1 Sedimentkern FAE09-03 und Datierung	3
2.2 Methodik Kieselalgenpräparation und Bestimmung	4
2.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors und weitere Auswertungen	7
<b>3 Bisherige Erkenntnisse und Messdaten zur Nährstoff- entwicklung im Fählensee</b>	<b>9</b>
3.1 Kurzbeschreibung des Fählensees	9
3.2 Geologische Hinweise zum Einzugsgebiet des Fählensees	10
3.3 Historische Nutzungen und Entwicklungen im Einzugsgebiet des Fählensees	12
3.4 Entwicklung des Gesamtphosphors seit den 1990er Jahren	16
<b>4 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>17</b>
4.1 Kieselalgen-Stratigraphie	17
4.2 Taxazahl und Diversität	19
4.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors	21
4.4 Historische Proben des Fählensees	23
4.5 Offene Fragen	26
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>27</b>

---

## ANHANG

### ANHANG A:

Kieselalgen-Zählraten Sedimentkern FAE09-03	29
---	----

## 1 Zusammenfassung

Der Fählensee weist seit Jahren hohe Phosphorwerte auf. Daher wurde der See seit den 1990er Jahren immer wieder limnologisch untersucht. Inzwischen ist bekannt, dass der See neben externen Phosphoreinträgen auch einen grossen Phosphorspeicher im Seesediment hat. Infolge der Sauerstoffarmut über Grund während den Stagnationsphasen löst sich der abgelagerte Phosphor wieder aus dem Sediment, so dass der See sich selber düngt und das Algenwachstum fördert. Der Phosphoreintrag von Abwasser durch das Gasthaus Bollenwees wurde inzwischen saniert. Weitere Einträge aus dem Einzugsgebiet (Alpbewirtschaftung, Gestein) sind nicht abschliessend quantifiziert

Um die Nährstoffgeschichte des Fählensees besser zu verstehen, wurde ein Sedimentkern mittels Kieselalgen untersucht. Kieselalgen sind geeignete Indikatoren, da sie im See als planktische Algen leben und ihre Skelette nach dem Absterben über sehr lange Zeit im Sediment noch artspezifisch nachweisbar sind, und Rückschlüsse zum Gesamtphosphor erlauben. Der für die Rekonstruktion des Gesamtphosphors verwendete Sedimentkern wurde im Jahr 2009 durch die EAWAG, ETH Zürich sowie die Universität Bern zu Forschungszwecken entnommen und mittels Messungen von radioaktiven Isotopen  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{14}\text{C}$  datiert. Der für diese Studie zur Verfügung gestellte rund 100 cm lange Kern reicht in etwa in das 15. Jahrhundert zurück.

Die Rekonstruktion des Gesamtphosphors erfolgte mit 30 Sedimentproben à 1 cm Mächtigkeit der Tiefen 0 bis 109 cm, wobei die obersten rund 30 cm Sediment (2009 bis ca. 1850) fast lückenlos mit 23 Proben untersucht wurden. Die restlichen 7 Proben verteilen sich auf die unteren 70 cm Sediment (1 Probe pro 10 cm). Der rekonstruierte Gesamtphosphor wies im Zeitverlauf von ca. 1450 bis ins Jahr 2009 fünf typische Abschnitte auf:

1450 bis 1500:	um 20 µg P/l (bis ca. < 30 µg P/l), mesotroph
1500 bis 1700:	Anstieg auf > 30 bis 40 µg P/l, bis schwach eutroph
1700 bis 1900:	Konstanz bei > 30 bis 40 µg P/l, schwach eutroph
1900 bis 1970er Jahre:	kurze Erholung auf ca. 30 µg P/l, knapp mesotroph
seit 1970er Jahre:	Anstieg auf 50 bis 80 µg P/l, eu- bis hypereutroph

Der Fählensee war damit während einer sehr langen Phase vermutlich meso- bis schwach eutroph, was atypisch ist für Bergseen dieser Höhenlage und Abgeschiedenheit. Phosphorhaltiges Gestein im Einzugesgebiet, der karstige Untergrund, die Topographie, respektive die Steilheit der umliegenden Hänge und die Mulde beim Fählensee sowie die seit dem Mittelalter betriebene Alpbewirtschaftung dürften wichtige Ursachen für diesen Umstand sein. Die ab den 1970er Jahren festgestellte deutliche Eutrophierung hängt jedoch mit den eingeleiteten Abwässern des Gasthauses Bollenwees zusammen. Die Sanierung erfolgte im Jahr 2001 mit dem Anschluss der Gebäude an die Kanalisation. Diese Massnahme manifestiert sich aber noch nicht in den rekonstruierten Phosphorwerten. Dies einerseits weil der jährliche seeinterne Phosphoreintrag noch sehr gross ist und andererseits weil sich im Sediment pro 1 cm Mächtigkeit in etwa 8 Jahre Planktongeschichte akkumulieren.

## 1 Ausgangslage und Auftrag

Der Fählensee<sup>1</sup> wird infolge der Eutrophierung seit Beginn der 1990er Jahren limnologisch untersucht (siehe AquaPlus 1990 bis 2020 und weitere Publikationen gemäss Kapitel 2). Inzwischen ist bekannt, dass der See einen sehr hohen Phosphorgehalt im Sediment aufweist. Aufgrund der Eisbedeckung im Winter wie auch der Sommerstagnation hat der See lange Phasen mit fehlender Zirkulation wodurch der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser abnimmt und teilweise anoxische Bedingungen herrschen. Diese beiden Faktoren, nämlich hoher Phosphorgehalt im Sediment und Sauerstoffarmut über Grund bedingen eine Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment in die Wassersäule. Damit düngt sich der See selber, denn während den Zirkulationsphasen gelangt dieses phosphorreiche Tiefenwasser an die lichtdurchflutete Oberfläche. Damit sind ideale Bedingungen vorhanden, dass sich jeweils im Frühjahr nach der Eisschmelze eine Planktonblüte und im Sommerhalbjahr am Ufer eine Fadenalgendecke entwickeln kann. Als relevante anthropogene Ursachen für die zumindest ab den 1990er Jahren hohen Phosphorgehalte sind einerseits die damals noch in den Fählensee eingeleiteten Abwässer des Gasthauses Bollenwees wie vermutlich auch die Alpbewirtschaftung (Abschwemmung von Boden und Dung ab beweideten Flächen) zu nennen. Infolge des karstigen Untergrundes entspricht das topografisch bedingte Einzugsgebiet nicht dem hydrologischen Einzugsgebiet. Zudem weist der Fählensee keine ständig fliessenden oberirdischen Zuflüsse auf und der Abfluss erfolgt unterirdisch Richtung Mülibach im St. Galler Rheintal. Diese Verhältnisse erschweren, die Phosphorfrachten und Verursacher zu eruieren.

Im Rahmen der letzten Abklärungen und Einschätzungen zur Eutrophierung des Fählensees wurde daher vorgeschlagen seine Trophiegeschichte, respektive die Entwicklung des Gesamtphosphors im Fählensee während der letzten Jahrhunderte zu rekonstruieren (AquaPlus, 2019). Mit dieser Rekonstruktion des Gesamtphosphors sollen die Bedeutung und die Relevanz der verschiedenen möglichen natürlichen und anthropogenen Ursachen besser eingeschätzt werden. Die Rekonstruktion erfolgt mittels der im Seesediment eingelagerten Kieselalgen. Dazu wird ein geeigneter Sedimentkern aus der Seemitte analysiert. Das Verfahren ist erprobt und wurde in der Schweiz schon an etlichen Seen angewandt.

Für die Untersuchung des Sedimentes konnte auf einen Sedimentkern zurück gegriffen werden, welchen die EAWAG, ETH Zürich und Universität Bern zu Forschungszwecken im Herbst 2009 dem Fählensee entnahm (Glur et al. 2013). Der verwendete Sedimentkern wurden so entnommen, dass eine Rekonstruktion des Gesamtphosphors mittels im Sediment eingelagerten Kieselalgen durchgeführt werden kann. Der Kern war zudem ungestört, also ohne Bioturbation, ohne erkennbare Gasauftösse oder andere Störfaktoren, welche die Nutzung des Kerns verunmöglicht hätten. Zudem am Kern in verschiedenen Tiefen eine Altersdatierung vorgenommen.

Der Auftrag zur Rekonstruktion erteilte das Bau- und Umweltdepartement des Kantons Appenzell Innerrhoden der Firma AquaPlus AG.

---

<sup>1</sup> Wir benutzen generell den Namen Fählensee, Fählental mit 'h' geschrieben. In gewissen Quellen und Karten werden diese Namen auch ohne 'h' geschrieben.

## 2 Grundlagen und verwendete Methoden

Die folgenden Grundlagen wurden verwendet:

- Sedimentproben des Kernes FAE09-03, entnommen durch die EAWAG, ETH Zürich und Universität Bern September 2009 (Abb. 1 und 2). Details dazu siehe Kapitel 2.1 und Glur et al. (2013).
- Kartenwerke, geografische und geologische Informationen vom Kartenportal des Bundes (<https://map.geo.admin.ch>).
- Studien zum Fählensee oder in welchen der Fählensee erwähnt wird: Eugster (1939), Walser (1976), Reutimann (1987), Langenegger (1990-1998), Leibundgut (1995), Lotter et al. (1998), Müller et al. (1998), Glur et al. (2013) sowie Berichte der AquaPlus AG (1990, 1992, 2018, 2019, 2020) und Hinweise zu Kaltluftseen ([www.kaltluftseen.ch](http://www.kaltluftseen.ch)).
- Bisherige Angaben zur trophischen Entwicklung des Fählensees (Gesamtphosphor seit 1991, siehe AquaPlus (2019)).
- Literaturrecherche zu historischen Aspekten und Konsultation der Proben-sammlung AquaPlus:
  - Historische Angaben zum Fählensee, zur Fählenalp und zum Gasthaus Bollenwees sowie generell zur Alpgeschichte im Alpstein (siehe Tabelle 1).
  - Aufwuchs- und Planktonproben des Fählensees gemäss AquaPlus (1990, 1992, 2018) und Lotter (1998) sowie weiteren algologischen Sammlungen der Schweiz.
  - Historische Bilder gemäss St. Galler Bibliotheksnetz (Verbundkatalog) sowie aktuellere Bilder ab Google-Earth und von gerahmten Bildern im Gasthaus Bollenwees.
- Auskünfte und Hinweise zur Entstehung des Fählensees und zur Geologie des Einzugsgebietes von Herrn Flavio Anselmetti, Universität Bern.
- Herr Sandro Frefel, Landesarchivar Kanton Appenzell Innerrhoden, bediente uns mit vielen wertvollen Informationen zur Fählenalp und Hinweisen zu Websites ([www.ortsnamen.ch](http://www.ortsnamen.ch), [www.digital.idiotikon.ch](http://www.digital.idiotikon.ch)) und übergab uns Auszüge aus dem Innerrhoder Alpkataster von Josef Inauen und der Chronik der Appenzell I.-Rh. Liegenschaften bezüglich Bollenwees, Fählenalp und Fählensee.

### 2.1 Sedimentkern FAE09-03 und Datierung

Der für die Rekonstruktion des Gesamtphosphors verwendete Sedimentkern FAE09-03 wurde durch die EAWAG, ETH Zürich und die Universität Bern im September 2009 dem Fählensee entnommen. Die Position der Kernentnahme befindet sich in Abbildung 1.

Der 109 cm lange Kern wurde nach der Probenahme in Längsrichtung aufgeschnitten, fotografiert und in den obersten rund 25 cm Tiefe des Kernes für

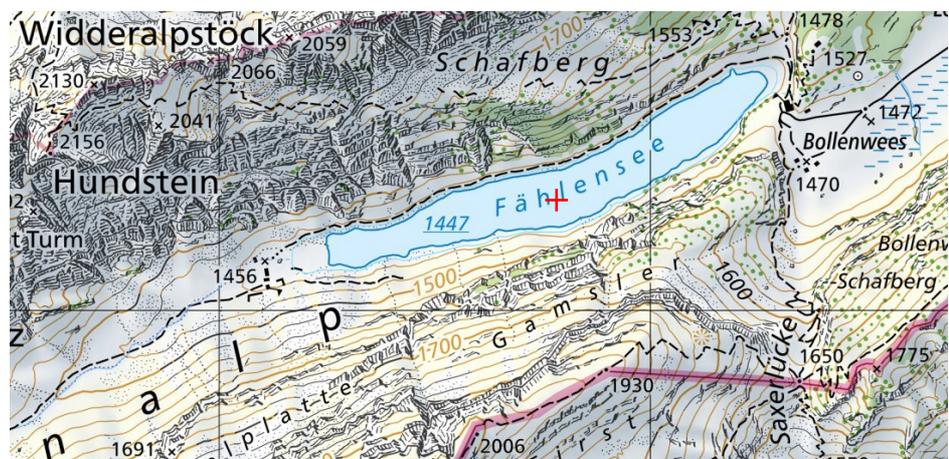
die Datierung beprobt (Abb. 2). Anschliessend wurde der Kern an der ETH Zürich bis zur vorliegenden Verwendung gekühlt gelagert.

Dieser Kern FAE09-03 erwies sich für die Rekonstruktion als geeignet und da er für weitere Forschungen nicht vorgesehen war, wurde er uns zur vollständigen Beprobung und Nutzung zur Verfügung gestellt. Die Beprobung des Kernes erfolgte in 1-cm-Schichten durch AquaPlus im Herbst 2020 im Labor der ETH Zürich (Departement Erdwissenschaften). Anschliessend wurden die Proben durch Herrn Adrian Gilli (ETH Zürich) gefriergetrocknet.

Die Datierung des Kernes erfolgte über die Messung des im Sediment vorhandenen radioaktiven Isotops  $^{137}\text{Cs}$ . Die Resultate ergaben zwei Peaks an  $^{137}\text{Cs}$ , nämlich einen in rund 3.25 cm Tiefe (Tschernobyl-Fallout von 1986) und einen zweiten Peak in rund 10.25 cm Tiefe ( $^{137}\text{Cs}$ -Fallout der Atombombenversuche von 1963). Die Sedimentationsrate in den obersten rund 10 cm Sediment entspricht damit, unter Abzug der Turbidite rund 1.5 mm/Jahr. Die Datierung des ganzen Kernes befindet sich in Abbildung 2. Die Lage und Mächtigkeit der Turbidite (Hochwasserereignisse, Flutlagen mit Eintrag von allochthonem Material in den See) basieren auf verschiedenen Angaben. Einerseits konnten Turbidite aufgrund des frisch geöffneten Kernes erkannt werden, andererseits aber auch basierend auf den Angaben in Glur et al. (2013), den Hinweisen von Andy Lotter, Lukas Glur und Falvio Anselmetti. Die Datierung ergab, dass der rund 1 m lange Kern in etwa in die Zeit des 15. Jahrhunderts zurückreicht. Diese Grössenordnung der Datierung wird auch durch die Datierung eines Langkernes des Fählensees mittels dem Isotop  $^{14}\text{C}$  - also der Radiokarbonmethode - bestätigt. Es wurden dazu im Kern vorhandene terrestrische Makroreste verwendet (Glur et al. 2013).

## 2.2 Methodik Kieselalgenpräparation und Bestimmung

Die Präparation der Kieselalgen (eine Auswahl von 30 Proben, siehe Abbildung 2: Spalte Rek.TP) erfolgte durch das Amt für Verbraucherschutz des Kantons Zug. Es wurde eine Entkalkung mittels Salzsäure und eine Heissoxidation mit Schwefel-



**Abbildung 1: Standort der Kernentnahme.**

+ Entnahmestelle Sedimentkern (749'781 / 235'245 / 1'447 m ü. M.), Entnahmetiefe: 24 m Tiefe, Kernentnahme im September 2009. (Kartengrundlage: map.geo.admin.ch)

säure sowie eine weitergehende Oxidation mittels Kaliumnitrat durchgeführt. Die so präparierten 30 Kieselalgenproben wurden in das Kunstharz Naphrax eingebettet. Alle für die Kieselalgen aufbereiteten 109 Sedimentproben (gefriergetrocknete Rohproben) sowie die 30 präparierten Proben und die 30 Präparate werden bei AquaPlus archiviert.

Die Bestimmung der Arten erfolgte im Lichtmikroskop. Die Nomenklatur orientiert sich weitgehend an Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991) sowie einigen wenigen taxaspezifischen Bestimmungswerken. Es wurde bewusst die alte Taxonomie verwendet. Dies daher, weil die verwendete Eichkurve zur P-Rekonstruktion auch auf alter Taxonomie beruht.

Wenige Taxa (*Cyclotella*, *Stephanodiscus*) des Fählensees wurden bereits im Jahr 1993 in Zusammenhang mit dem Kleinseendatensatz auch im Rasterelektronenmikroskop betrachtet (Lotter, 1998). Damit kann gewährleistet werden, dass die Bestimmung der dominierenden centrischen Taxa gleich gewählt wird, wie damals. Die Auszählung der Kieselalgenschalen (jede Kieselalgenart besteht aus zwei Schalenhälften, Summe der gezählten Schalen = 100 %) erfolgte im Lichtmikroskop bei 1'000-facher Vergrößerung (Ölimmersion, Interferenz und Phasenkontrast). Aufgrund der Zählresultate wurden die relativen Häufigkeiten (rH) der einzelnen Arten berechnet:

$$rH_{ij} (\%) = (N_{ij} / N_j) * 100\%$$

- rH<sub>ij</sub> = Relative Häufigkeit der Art i in der Probe j  
N<sub>ij</sub> = Anzahl gezählte Schalen der Art i in der Probe j  
N<sub>j</sub> = Gesamtzahl der gezählten Schalen der Probe j.

Basierend auf einer Schnellzählung (= 50 Schalen), mit welcher alle 30 präparierten Sedimentproben betrachtet wurden, wurde festgestellt, dass alle ausgewählten Proben genug Kieselalgen enthielten, um mit vernünftigem Aufwand eine Zählung von 500 Schalen durchführen zu können. Es gab aber grundsätzlich viele Bruchstücke, insbesondere der langen und fragilen Arten (*Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*) sowie bei den grösseren centrischen Arten (*Cyclotella radiosa*, *C. bodanica*). Die kleineren centrischen Arten (*Stephanodiscus minutulus*, *S. parvus*) hingegen waren mehrheitlich ganz. Aufgrund dieser Tatsache wurden auch *Cyclotella*-Bruchstücke so gut wie möglich bestimmt und zu ganzen Schalen aufsummiert. Dennoch gehen wir davon aus, dass in gewissen Tiefen die centrischen *Cyclotella*-Arten in der relativen Häufigkeit eher unterschätzt wurden. Dieser Sachverhalt fließt dann bei der Interpretation des rekonstruierten Gesamtphosphors ein. Bei *Asterionella formosa* wurden nur die vergrößerten Kopfpole und bei langen Schalen der Gattung *Fragilaira* diejenigen Bruchstücke gezählt, bei welchen die Schalenmitte vorhanden war. Die Zählresultate der 30 Proben befinden sich in Anhang A.

# Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Fählensee mittels Kieselalgen

Kern Zustand A	Kern Zustand B	Nr.	Schicht	Turbidite [cm]	<sup>137</sup> Cs	Jahr	Alter	Rek.TP	Bemerkungen
		1	0 - 1 cm		2009	2009	0	ja	
		2	1 - 2 cm			2001	8	ja	
		3	2 - 3 cm			1993	16	ja	
		4	3 - 4 cm	0.25	1986	1986	23	ja	
		5	4 - 5 cm	0.25		1983	27	ja	
		6	5 - 6 cm	0.50		1981	29		
		7	6 - 7 cm	1.00		1981	28		
		8	7 - 8 cm	0.75		1980	29		
		9	8 - 9 cm	0.50		1976	33	ja	
		10	9 - 10 cm			1969	40	ja	
		11	10 - 11 cm	0.40	1963	1963	46	ja	
		12	11 - 12 cm			1956	53	ja	
		13	12 - 13 cm			1949	60	ja	
		14	13 - 14 cm			1942	67	ja	
		15	14 - 15 cm			1935	74		
		16	15 - 16 cm			1928	81		
		17	16 - 17 cm			1921	88	ja	
		18	17 - 18 cm			1914	95	ja	
		19	18 - 19 cm			1907	102	ja	
		20	19 - 20 cm			1900	109	ja	
		21	20 - 21 cm			1893	116	ja	
		22	21 - 22 cm			1886	123	ja	
		23	22 - 23 cm	0.70		1884	125	ja	
		24	23 - 24 cm			1877	132	ja	
		25	24 - 25 cm	0.60		1874	135	ja	
		26	25 - 26 cm			1867	142	ja	
		27	26 - 27 cm			1860	149	ja	
		28	27 - 28 cm	0.40		1856	153		
		29	28 - 29 cm			1849	160		
		30	29 - 30 cm			1842	167	ja	
		31	30 - 31 cm	1.00		1842	167		
		32	31 - 32 cm	0.30		1837	172		
		33	32 - 33 cm			1830	179		
		34	33 - 34 cm	0.70		1828	181		
		35	34 - 35 cm	0.35		1823	186		
		36	35 - 36 cm	0.30		1818	191		
		37	36 - 37 cm			1811	198		
		38	37 - 38 cm	0.30		1807	202		
		39	38 - 39 cm			1800	209		
		40	39 - 40 cm			1793	216	ja	
		41	40 - 41 cm			1786	223		
		42	41 - 42 cm			1779	230		
		43	42 - 43 cm	0.50		1775	234		
		44	43 - 44 cm	1.00		1775	234		
		45	44 - 45 cm	0.50		1772	237		
		46	45 - 46 cm			1765	244		
		47	46 - 47 cm	0.65		1762	247		
		48	47 - 48 cm			1755	254		
		49	48 - 49 cm			1748	261		
		50	49 - 50 cm			1741	268	ja	
		51	50 - 51 cm			1734	275		
		52	51 - 52 cm			1727	282		
		53	52 - 53 cm			1720	289		
		54	53 - 54 cm			1713	296		
		55	54 - 55 cm			1706	303		
		56	55 - 56 cm	0.50		1703	306		
		57	56 - 57 cm			1703	306		
		58	57 - 58 cm	0.10		1696	313		
		59	58 - 59 cm	0.70		1694	315		
		60	59 - 60 cm	0.40		1690	319	ja	
		61	60 - 61 cm			1683	326		
		62	61 - 62 cm			1676	333		
		63	62 - 63 cm			1669	340		
		64	63 - 64 cm			1662	347		
		65	64 - 65 cm			1655	354		
		66	65 - 66 cm			1648	361		
		67	66 - 67 cm			1641	368		
		68	67 - 68 cm			1634	375		
		69	68 - 69 cm	0.30		1629	380		
		70	69 - 70 cm			1622	387	ja	
		71	70 - 71 cm	0.60		1619	390		
		72	71 - 72 cm	1.00		1619	390		
		73	72 - 73 cm	1.00		1619	390		
		74	73 - 74 cm	0.80		1618	391		
		75	74 - 75 cm			1611	398		
		76	75 - 76 cm			1604	405		
		77	76 - 77 cm			1597	412		
		78	77 - 78 cm	0.80		1596	414		
		79	78 - 79 cm	0.40		1591	418		
		80	79 - 80 cm			1584	425	ja	
		81	80 - 81 cm			1577	432		
		82	81 - 82 cm			1570	439		
		83	82 - 83 cm	0.90		1570	439		
		84	83 - 84 cm			1563	446		
		85	84 - 85 cm			1556	453		
		86	85 - 86 cm			1549	460		
		87	86 - 87 cm	1.00		1549	460		
		88	87 - 88 cm	0.40		1544	465		
		89	88 - 89 cm			1537	472		
		90	89 - 90 cm			1530	479	ja	
		91	90 - 91 cm			1523	486		
		92	91 - 92 cm	0.50		1520	489		
		93	92 - 93 cm	0.40		1516	493		
		94	93 - 94 cm			1509	500		
		95	94 - 95 cm			1502	507		
		96	95 - 96 cm			1495	514		
		97	96 - 97 cm			1488	521		
		98	97 - 98 cm			1481	528		
		99	98 - 99 cm			1474	535		
		100	99 - 100 cm			1467	542	ja	
		101	100 - 101 cm	0.50		1463	546		
		102	101 - 102 cm			1456	553		
		103	102 - 103 cm	0.90		1456	554		
		104	103 - 104 cm			1449	561		
		105	104 - 105 cm			1442	568		
		106	105 - 106 cm			1435	575		
		107	106 - 107 cm			1428	582		
		108	107 - 108 cm			1421	589		

**Abbildung 2: Sedi-  
mentkern FAE09-03  
des Fählensees.**

**A:** Zustand des Kerns bei der Beprobung im Jahr 2020.

**B:** Zustand des Kerns bei der Probenahme im September 2009.

**Turbidite** gemäss Angaben von Hr. Dr. Lukas Glur sowie gemäss Beobachtungen am frischen Kern. Die Fotos der Kerne sind verzogen, so dass die Tiefenstufen nicht genau übereinstimmen. Die Turbidite können daher nicht im Kern zugeordnet werden. Die Datierung des Alters pro Tiefenstufe ist als Grössenordnung zu verstehen.

**Rek.TP:** Diese Tiefenstufen wurden für die Rekonstruktion des Gesamtphosphors verwendet, indem die Kieselalgen bestimmt und ausgezählt wurden.

dunkles Sediment, entstanden infolge Sauerstoffarmut über Grund und erhöhtem Anteil an organischem Gehalt, dazwischen helle Lagen, welche vermutlich Flutlagen entsprechen dürften

hell, oxidiertes Sediment, über Grund vermutlich mehrheitlich sauerstoffreich, dazwischen helle Lagen, welche vermutlich Flutlagen entsprechen dürften

### 2.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors und weitere Auswertungen

Zur Charakterisierung der Kieselalgen sowie zur Rekonstruktion des Trophiegrades und des Gesamtphosphors wurden folgende Verfahren eingesetzt (Berechnungen durch Herrn Prof. Dr. A. Lotter, Luzern):

1. Ermitteln der **stratigraphischen Kieselalgenzonen** (Abbildung 7). Mit diesen Zonen werden über Sedimenttiefenstufen hinweg, charakteristische Kieselalgengemeinschaften erkannt und als stratigraphische Kieselalgenzonen zusammengefasst.
2. Die **Rekonstruktion des Phosphorgehalts** (TP) wurde mittels "*weighted averaging partial least-squares*" (WAPLS, ter Braak & Juggins 1993) Regression und Kalibration an quadratwurzel-transformierten Prozentdaten der Kieselalgen und log-transformierten TP-Daten durchgeführt. Die Rekonstruktion liefert drei Phosphorwerte, nämlich den eigentlichen rekonstruierten Wert sowie eine obere und untere Abweichung (Rekonstruktionsfehler). Die Abweichungen sind abhängig von den Arten und deren Toleranz gegenüber Phosphor und der Gewichtung (relative Häufigkeit des Vorkommens pro Tiefenstufe).
3. Die **Bestimmung des Trophiegrades** stützt sich auf die folgende Skala ab:

oligotroph:	$P_{\text{tot}} < 10 \mu\text{g P/l}$	geringe Produktion
mesotroph:	$P_{\text{tot}} 10 - < 30 \mu\text{g P/l}$	mittlere Produktion
eutroph:	$P_{\text{tot}} 30 - < 100 \mu\text{g P/l}$	hohe Produktion
hypertroph:	$P_{\text{tot}} > 100 \mu\text{g P/l}$	sehr hohe Produktion
4. **Historische Algenproben** wurden in diversen Verzeichnissen von Sammlungen Schweizer Algologen (Meister, Güttinger, Bachmann und Messikommer) gesucht, aber nur wenige Untersuchungen gefunden. So beprobte Ernst Hurter im Jahr 1921 (Bachmann 1928) den Fählensee und Messikommer im Jahr 1954 die Alpsteinseen und damit auch den Fählensee (Messikommer 1958). Die Gewässer des Alpsteins wurden offenbar früher wenig algologisch untersucht. Die anschliessend aufgeführten Proben stammen aus der Periode vor der festgestellten Eutrophierungsphase.

#### September 1921

Planktonprobe von Herrn Ernst Hurter, publiziert in Bachmann (1928)

#### 6. und 7. September 1954

Plankton- und Aufwuchsproben sowie Fadenalgen der Uferbank und Ausquetschmaterial der Wasserpflanze *Elodea canadensis*.

Artenliste mit Angaben der Häufigkeiten in Messikommer (1958)

In der Sammlung von AquaPlus standen aus früheren Aufträgen Bestimmungen der unten aufgeführten Proben zur Verfügung. Diese Proben stammen alle aus der Phase der festgestellten Eutrophierung mit erhöhten Phosphorwerten ab 1990.

**8. bis 10. Oktober 1990**

Phyto- und Zooplankton (Netzzüge) aus verschiedenen Tiefen

Probenahme: Dr. O. Langenegger, Gais AR in Zusammenarbeit mit dem Laboratorium der Jagd- und Fischereiverwaltung des Kantons St. Gallen.

**9. März, 1. Juni und 13. September 1991**

Phyto- und Zooplankton (Schöpfflaschen) aus verschiedenen Tiefen

Probenahme: Dr. O. Langenegger, Gais AR

Auswertung der Oberflächenproben

**22. Oktober 2013**

Stein-Aufwuchsprobe zur Untersuchung der Kieselalgen, Probenahmeort am Ufer östlich der Alpgebäude Fählen und südlich des Zuflusses in den Fählensee (749'255 / 235'109).

Schöpfproben (100 Liter Oberflächenwasser) und Netzzüge

**26. Juni, 29. August und 26. November 2014**

Nicht verwertbare Proben.

Die oben aufgeführten algologischen Untersuchungen wurden nur hinsichtlich den dazumal gefundenen planktischen Kieselalgen ausgewertet. Die Publikationen und Berichte enthalten aber auch Artenlisten zu den anderen Algengruppen und dem Zooplankton. Auf diese Arten wird hier nicht eingegangen.

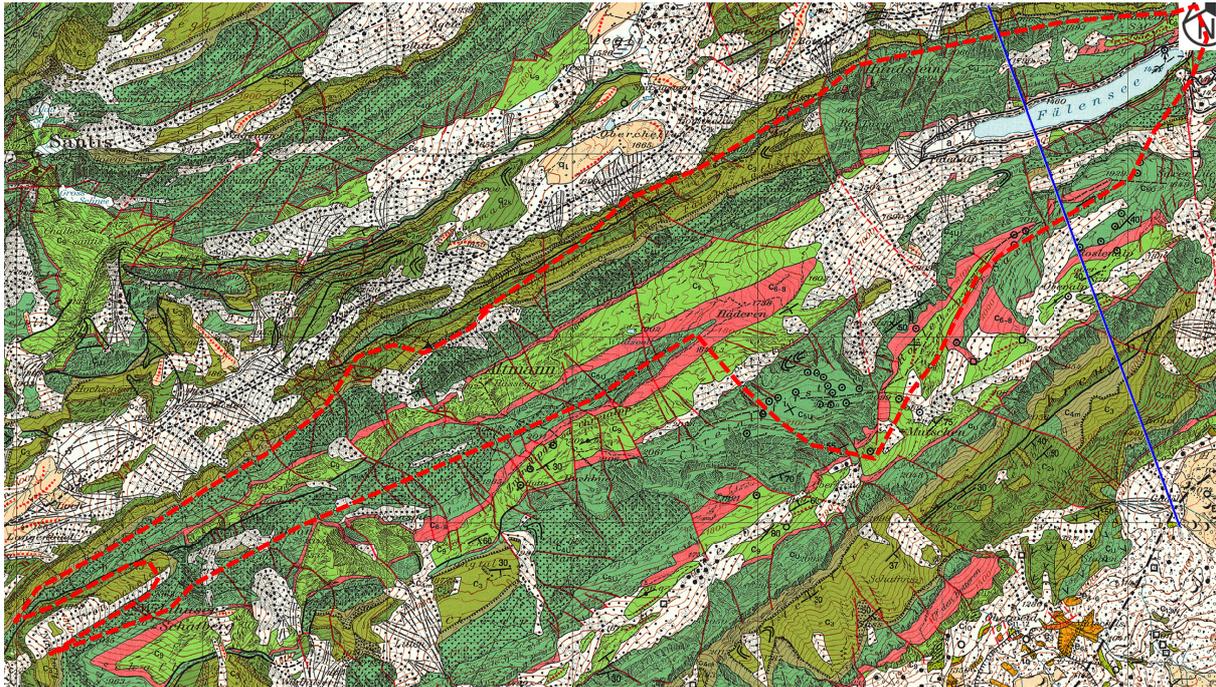


Der Fählensee weist je nach Wasserstand eine maximale Tiefe von 23.4 m bis 31.4 m auf. Der Wasserstand kann vom mittleren Wasserstand aus betrachtet um 2 m sinken, respektive um 6 m ansteigen. Die Wasseraufenthaltszeit berechnete Leibundgut (1995) auf 85 Tage. Obwohl der See keinen ständig fließenden oberirdischen Zufluss hat, ist der See stark mit unterirdischen Zu- und Abflüssen durchflossen. Es wurden Durchflüsse um 210 l/s (AquaPlus 2019) bis 300 l/s (Leibundgut 2015) berechnet. Der Fählensee ist im Winter lange eisbedeckt und im Sommer ist der See zumindest gemäss Messungen der letzten Jahre thermisch geschichtet. Die Mulde, in welcher der Fählensee sich befindet, dürfte zudem auch die zeitweise Bildung eines Kaltluftsees bedingen, wie dies für den nahe gelegenen Sämtisersee bekannt ist. Die wiederholten Sauerstoffmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten lassen erahnen, dass der See oft sauerstoffarmes bis sauerstoffloses Tiefenwasser hat. Da die Sedimente gemäss Untersuchungen in den Jahren 2018 und 2020 sehr hohe Phosphorgehalte aufweisen, bedingt diese Sauerstoffarmut eine Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment in das Tiefenwasser und damit eine Eigendüngung des Sees. Die hohen Phosphorwerte im Sediment sind atypisch für einen Bergsee und sie lassen erahnen, dass der Fählensee ein aus limnologischer Sicht spezieller See darstellt.

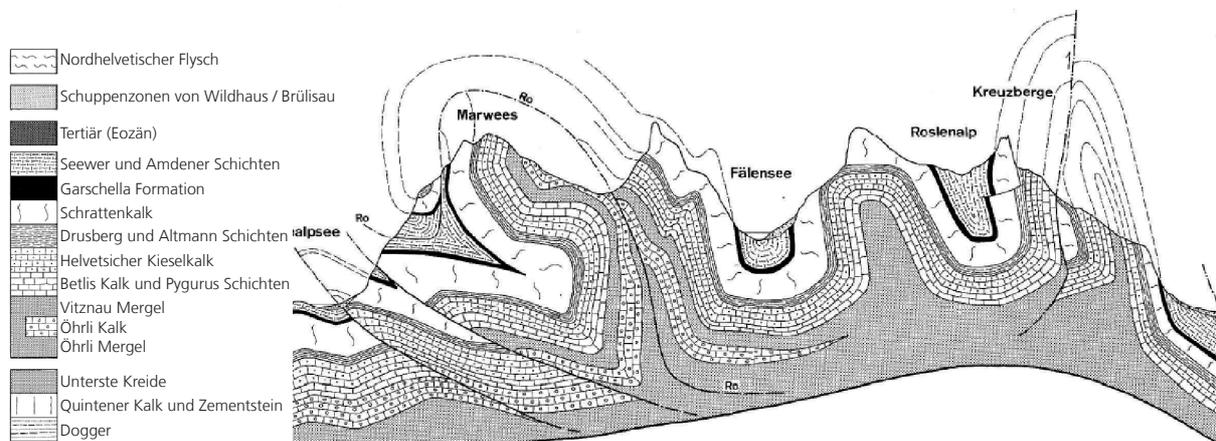
### **3.2 Geologische Hinweise zum Einzugsgebiet des Fählensees**

Aus geologischer Sicht entstand der Fählensee vor rund 12'500 Jahren im Spätglazial, als der Lokalgletscher abschmolz und die Senke frei gab. Der Zulauf fällt meistens trocken (da karstiger Untergrund), der Ablauf erfolgt unterirdisch in einem Karstloch und der Wasserspiegel dürfte gemäss mündlicher Mitteilung von Prof. Flavio Anselmetti, Universität Bern, im Spätglazial höher gewesen sein.

Im Einzugsgebiet des Fählensees gibt es gemäss Geologischem Atlas GA25 kreidezeitliche Ablagerungen, welche Phosphoritmineralien (hauptsächlich das Mineral Apatit) aufweisen (Abb. 4). Das betrifft vor allem die Garschella-Formation (früher als helvetischer Gault bezeichnet) und die Gemsmättli Bank im Helvetischen Kieselkalk. Im Bereich der Alp Häderen und des Roslenfirst ist die Garschella-Formation aufgeschlossen. Bei Starkregenereignissen dürfte über Erosionsprozesse Phosphor aus diesen Gesteinslagen zum See verlagert werden. Weitere Frachten sind auch aus Einträgen durch Lösungsprozesse insbesondere durch die unterirdisch verlaufenden Zuflüsse zu erwarten. Zudem umrahmt die Garschella Formation den ganzen See, welcher in einer Synklinalmulde liegt (Abb. 5). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass dieses phosphorhaltige Gestein die Limnologie des Fählensee zumindest mitprägt und vermutlich schon lange beeinflusst. Chemische Analysen von Abflusswasser aus diesen phosphorhaltigen Schichten wären diesbezüglich nützlich, um den Beitrag zur Phosphorfracht einschätzen zu können (siehe auch Kapitel 3.3 sowie AquaPlus 2019).



**Abbildung 4: Geologische Formationen im Einzugsgebiet des Fählensees.** Die phosphorhaltige Garschella-Formation ist in den Bereichen Häderen, Roselenfirst sowie seitlich des Sees aufgeschlossen (rötliche Flächen). Durch die Karstverhältnisse kommt das Wasser jedoch auch unterirdisch mit den phosphorhaltigen Schichten in Kontakt. Rot gestrichelt ist das hydrologische Einzugsgebiet des Fählensees. Blaue Linie: Lage des geologischen Profils in Abb. 5. (Quellen: Kartengrundlage: map.geo.admin.ch, Einzugsgebiet: AquaPlus, 2019).



**Abbildung 5: Geologisches Profil durch den Alpstein mit dem Fählensee.** Die phosphorhaltige Garschella Formation ist als schwarze Schicht zu erkennen (aus Funk et al, 2000, verändert).

### 3.3 Historische Nutzungen und Entwicklungen im Einzugsgebiet des Fählensees

Das oberflächliche Einzugsgebiet des Fählensees umfasst in erster Linie die Weiden der Fählenalp sowie die sehr steilen Flanken links und rechts des Sees. Die Bollenweesalp, deren Weiden mehrheitlich ausserhalb des Einzugsgebietes liegen, war für den Fählensee dennoch bis vor kurzem von Bedeutung, da die Abwässer des Gasthauses Bollenwees bis 2001 in den Fählensee geleitet wurden. In Tabelle 1 werden für den See und die beiden Alpen historische Gegebenheiten aufgelistet. In Abbildung 6 wird der Fählensee aus verschiedenen Perspektiven und Jahreszeiten fotografisch illustriert.

Die Fählenalp weist eine produktive Fläche von rund 190 ha sowie 129 ha unproduktive Flächen auf (Inauen 2004). Die Fählenalp dürfte schon seit Jahrhunderten genutzt worden sein. Dies belegt einerseits eine Akte aus dem Jahr 1298, wonach damals ein Teil der Fählenalp verkauft wurde. Andererseits weisen auch die vielen Flurnamen mit dem Wort 'Schaf' auf die Beweidung der Flächen durch Schafe hin. Im 15. und 16. Jahrhundert nahm infolge der Intensivierung der Viehwirtschaft auch der Druck auf die Alpwirtschaft zu, so dass vermutlich auch im Einzugsgebiet des Fählensees die Weiden zugänglicher gemacht und möglicherweise auch melioriert wurden. Flurnamen zu Rodungen oder ähnlichen Tätigkeiten sind gemäss Ortsnamenforschung im Einzugsgebiet des Fählensees nicht bekannt (mündliche Mitteilung Herr Sandro Frefel, Landesarchivar). Bemerkenswert ist aber gemäss Büchler (2000), dass die Waldgrenze im Alpstein infolge der tieferen Durchschnittstemperaturen tiefer liegt, wie in den Hauptalpen. Zudem wurde offenbar ebenfalls gemäss Büchler (2000) im Bereich des Fählensees versucht Arven anzupflanzen, jedoch ohne Erfolg.

Bei einem historischen Blick zurück in die Zeit seit rund 1500 ist in Zusammenhang mit der Limnologie des Fählensees zwingend auch die Kleine Eiszeit (Anfang des 15. Jhd. bis in das 19. Jhd. (Wikipedia)) mit mehreren Phasen von Gletschervorstössen zu erwähnen. Diese kalten Perioden schränkten vermutlich infolge Kälte, Schnee und kürzerer Vegetationszeit die Alpnutzung ein und die Eisbedeckung des Fählensees dürfte länger gedauert haben als heute.

Gemäss Signer (1953) befanden sich im Jahr 1835 in der Umgebung der Fählenalp 4 Viehställe mit total 340 Tieren (40 Kühen, 50 Ziegen und 250 Schafe). Gemäss Inauen (2004) befanden sich im Jahr 1893 mit 149 Tieren (17 Kühe, 12 Rinder, 38 Ziegen und 82 Schafe) und im Jahr 2000 mit 203 Tieren (18 Kühe, 99 Rinder, 84 Ziegen und 2 Pferde) deutlich weniger Tiere (auch umgerechnet auf Grossvieheinheiten) auf der Fählenalp als 1835. Die Viehbestände zeigen aber, dass im Einzugsgebiet des Fählensees schon lange Alpweiden genutzt wurden. Nach Inauen (2004) beträgt bei der Fählenalp die Alpzeit 70 Sömmerungstage (25. Juni bis anfangs September) und bei der Bollenweesalp 85 Sömmerungstage (10 Juni bis anfangs September).

Der Fählensee wird öfters als kalt, dunkel, tiefgründig, abflusslos, lange Zeit eisbedeckt und als fischlos oder zumindest als See mit bescheidenem Fischbestand beschrieben. Es wird im 19. Jhd. von Groppen (was aber auch Kaulquappen sein können), kleinen Elritzen und generell von 'Fischen' (vermutlich sind Forellen gemeint) gesprochen. Eine Quelle erwähnt, dass die Fische zuerst auf dem Markt in

## Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Fählensee mittels Kieselalgen

Zeitraum	Fählensee	Bollenwees	Fählenalp	Q
Mittelalter	Schriftlich belegt ist die wirtschaftliche Nutzung des Alpsteingebietes erst seit dem Mittelalter.			1
	<b>Fälen / Fählen</b> bedeutet Hanglage, abschüssiges Gebiet, steil abfallende Alp, Felli = besonders gefährliche Stelle. <b>Fählenschafberg, Schafberg, Bollenweeser Schafberg</b> deuten auf höher gelegene, steinige und für Tiere schwer zu erreichende Weiden hin, welche eher von Schafen genutzt wurden. Flurnamen die auf Rodungen, Köhlern oder ehemaligen Wald schliessen würden, fehlen.			1, 9
1298			Verkauf eines Teils der Fählenalp (erster Nachweis der Alp)	1
1411	In einer Urkunde wird erwähnt, dass Vieh über die Saxerlücke getrieben wurde.			5
15. und 16. Jhg	Die Intensivierung der Viehwirtschaft betraf auch die Alpwirtschaft, indem die kollektiven Weiden und Wälder am Berg intensiver genutzt wurden. Ausdruck davon sind zunehmende Ressourcenkonflikte (z. B. um Holz, Weiden) im 15. und 16. Jahrhundert. <i>Hinweis: Rodungen (auch Brandrodungen) im Gebiet des Fählensees sind unserer Recherche nach nicht dokumentiert. Auch die Namensforschung weist nicht auf einen Wald oder Rodungen hin. Das Nutzholz (Hütten, Feuer etc.) durfte gemäss Innauen (2010) im Stiefelwald geschlagen werden. Es wurde dann über den Fählensee geflösst.</i>			4, 8
1593, 1597	Der See war im Besitz von Konrad Gruber. Die Fische mussten möglichst in Appenzell (Markt) verkauft werden.		Die grosse Alp (Fählen) war noch im 16. Jhd. in Kuhrechte aufgeteilt	8, 9
ab 1600	Ab 1600 regelten Alpsatzungen Nutzung und Unterhalt, um 1800 kam es zu einer Arbeitsteilung zwischen Sennen und Talbauern.			1
1682	Unterirdischer Abfluss erstmals erwähnt			7
um 1750	<i>"Wegen seiner ungemeinen Kälte keine Fische darin bleiben können; hingegen ernähret er viele Grop-pen"</i> (Kaulquappen?)			2
ca. 1800		Bewirtung von Gästen in der Sennhütte		3
1835	Groppen und kleine Elritzen		40 Kühe, 50 Ziegen, 250 Schafe	9
1836, 1849		Die Alp wird als abgelegenes Alpentälchen bezeichnet, Fählen und Bollenwees werden praktisch immer als Einheit behandelt.		8
1893		17 Kühe, 12 Rinder, 38 Ziegen, 82 Schafe	35 Kühe, 44 Rinder, 67 Ziegen, 70 Schafe	8
1904	Ohne Fische, zu einem grossen Teil des Jahres mit Eis bedeckt			6
1904, 1921	Färbversuche: 1904 (Fliegszeit 26.5 Std.), 1921 (13 Tage), Wasserstand im See ist wichtig.			7
1916		Neubau Gasthäuschen für rund 30 Personen		3
1921, 1922	Sämtiser- und Fählensee als Wasserkraft-Staubecken, Anlass für geologische Untersuchungen			9
1928	Während eines grossen Teiles des Jahres zugefroren			11
1937, 1940	Konzession für Botsfahrten erteilt, ab 1940 Verzicht auf Bootsfahrten			8
1950	See im Besitz des Kantons			8
1958	Durchwärmungsverhältnisse weniger gut wie beim Sämtisersee			12
1982		Neubau biologischer Kläranlage		3
ab 1990	Beginn limnologischer Untersuchungen des Fählensee			13
2000		17 Kühe, 15 Rinder, 5 Ziegen, 70 Schafe	18 Kühe, 99 Rinder, 84 Ziegen, 2 Pferde	8
2001		Bollenwees ist an die Kanalisation angeschlossen		3
2009	Entnahme der Sedimentkerne für die vorliegende Studie			10

**Tabelle 1: Historische Gegebenheiten, Beobachtungen zum Fählensee sowie der Fählenalp und dem Bollenwees.**

Quellen: **1** Sonderegger (2014), **2** Altherr (1994), **3** Bergwirte-Verein (2017), **4** Sonderegger (2019) **5** Sonderegger (1977), **6** Geographisches Lexikon der Schweiz (1904), **7** Eugster (1939), **8** Inauen (2004), **9** Jakob Signer (1953), **10** Glur et al. (2013), **11** Bachmann (1928), **12** Messikommer (1959), **13** AquaPlus (diverse), Langenegger (1990-1998), Leibundgut (1995), Lotter et al. 1998).

Appenzell verkauft werden müssen und erst anschliessend andernorts noch unverkaufte Ware angeboten werden dürfe.

Der unterirdische Abfluss wurde früh (1682) erkannt (Eugster 1937). Mittels Färbversuchen (1904, 1921) wurde eindeutig nachgewiesen, dass das Wasser des Fählensees je nach Wasserstand unterschiedlich schnell beim Mülibach bei Sennwald wieder zum Vorschein kommt. Es wurden Fliesszeiten von 26.5 Std. (19. Juni 1904, nach Schneeschmelze, vermutlich noch hoher Wasserstand) und 13 Tage (6. Dezember 1921, vermutlich tiefer Wasserstand) gemessen.

Der Fählensee war früher aufgrund der Bilder und Dokumente ein wichtiger Bestandteil der Alpnutzung. So diente er dem Vieh als Tränke, war Fischlieferant und geschlagenes Holz liess sich einfach transportieren. Zudem anerkant sich auch lange Zeit die Möglichkeit, das Abwasser vom Bollenwees in den See zu entsorgen. Der Fählensee war aber auch Hindernis, denn die Erschliessung zur Fählenalp war und ist bis heute nur zu Fuss möglich. Die starken Wasserspiegelschwankungen bedingten aber auch, dass im Frühling bei Schneeschmelze der See so stark ansteigen konnte, dass die Alpgebäude der Fählenalp überflutet wurden. Zudem hinderte der See je nach Schneemenge und Wasserstand auch den Zugang zur Alp.

Die heutige Nutzung des Fählensees beschränkt sich auf touristische Erlebnisse (eindrückliche Landschaft, Schwimmen, Sportfischerei, Befahren der Eisdecke mit Fahrrädern). Eine in den 1920er Jahren angedachte Nutzung der Wasserkraft im Sinne eines Staubeckens, wurde nicht realisiert. Dies möglicherweise aus der Tatsache, dass bei einem Höherstau der unterirdische Abfluss hätte versiegelt werden müssen, mit der Folge, dass der Mülibach bei Sennwald im St. Galler Rheintal und damit die Mühle vermutlich markant weniger Wasser gehabt hätte.

Aufgrund der seit dem 15. und 16. Jahrhundert vermutlich intensivierten Alpnutzung kann angenommen werden, dass auch der Eintrag an Dung auf die Weiden zunahm. Die Steilheit der Weiden, der karstige Untergrund, die geringe Bodenbedeckung verbunden mit sommerlichen Niederschlägen dürften somit schon vor Jahrhunderten regelmässig dazu geführt haben, dass organische Stoffe (Humus, Dung, Holz etc.) und Nährstoffe (z. B. Phosphor) oberflächlich und unterirdisch dem Fählensee zugeführt wurden. Zudem kann auch angenommen werden, dass früher beim Flössen des Holzes diverse Holzabfälle im See verblieben und dass bei Starkniederschlägen und Lawinnenniedergängen immer wieder Totholz eingetragen wird. Die Tauchgänge vom 25. Juni 2020 zeigten denn auch, dass nebst Feinsediment in Tiefen oberhalb von 10 m Felsblöcke, Steine wie auch Totholz und Baumstämme vorkommen (AquaPlus 2020).



Fählensee Richtung Bollenwees (um 1960).



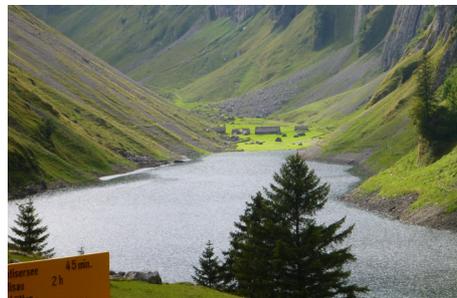
Fählensee Richtung Fählenalp (1959).



Steile Bergflanken umgeben den Fählensee.\*



Fählensee mit wenig bewaldeten Flanken (2013).



Fählensee Richtung Bollenwees (2013).



Überschwemmte Fählenalp.



Fählenalp überflutet mit Wasser und Schnee.



Gefrorener Fählensee.\*

**Abbildung 6: Fotos des Fählensees und seines Einzugsgebietes.**

Bildquellen: Die beiden historischen schwarz-weiß Bilder stammen vom St. Galler Bibliotheksnetz (Verbundkatalog), die Bilder mit \* wurden Google-Earth entnommen, die Bilder der überschwemmten Fählenalp hingen im Sommer 2013 als Bilder im Gasthaus Bollenwees und die Bilder des Jahres 2013 sind von AquaPlus.

### 3.3 Entwicklung des Gesamtphosphors seit den 1990er Jahren

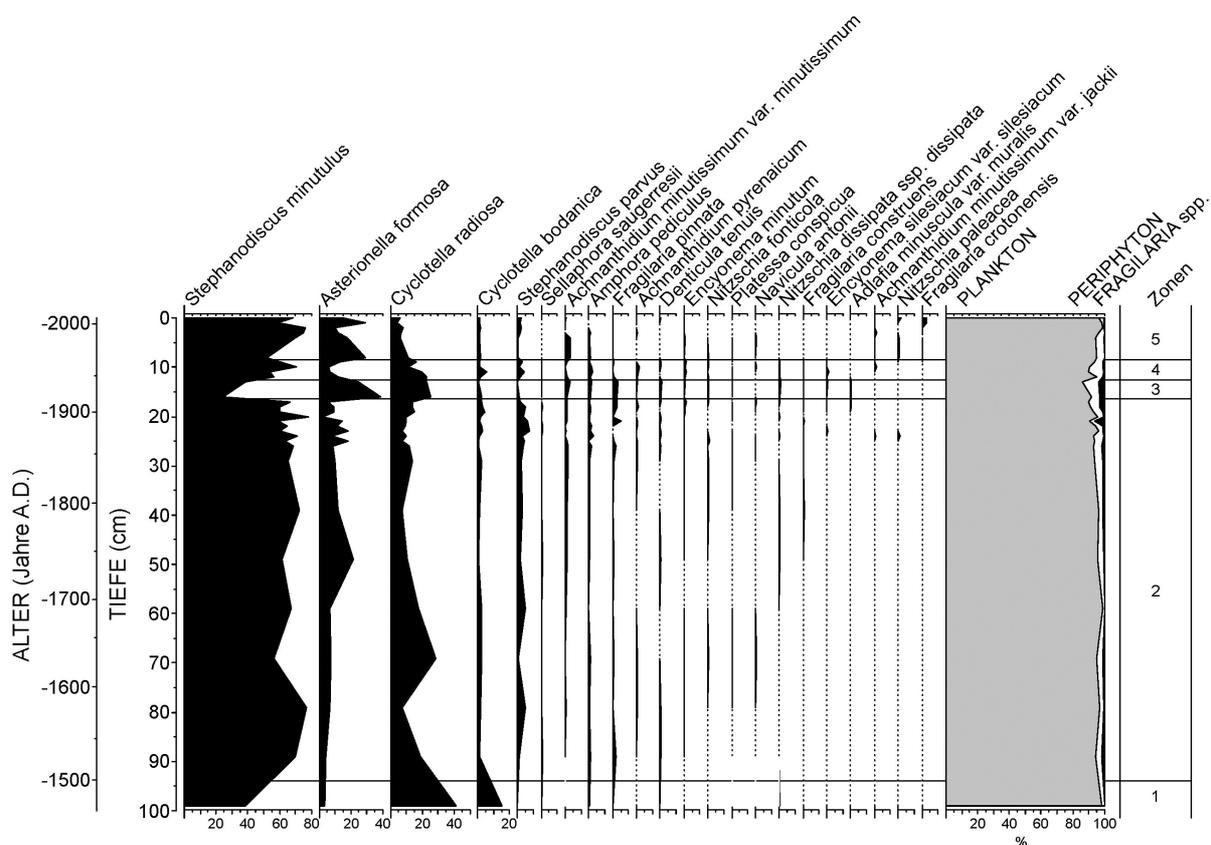
Der Phosphorgehalt des Fählensees wird erst seit den 1990er Jahren in unregelmässigen Abständen gemessen. In AquaPlus (2019) wurden diese Messungen zusammengetragen, in Tiefenstufen dargestellt, volumengewichtete Mittelwerte berechnet und hinsichtlich des Trophiegrades bewertet. Es zeigte sich, dass die lange Eisbedeckung wie auch die Sommerstagnation im Tiefenwasser (Hypolimnion) zu sehr hohen Phosphorwerten von  $> 100 \mu\text{g P/l}$  führen kann. Dies war zumindest in den Jahren 1991 und 2018 der Fall. In anderen Jahren fiel der maximale Phosphorwert je nach Jahreszeit nicht ganz so hoch aus. Es wurden im Tiefenwasser aber bis auf wenige Ausnahmen immer maximale Gehalte von  $> 30 \mu\text{g P/l}$  gemessen. Diese hohen Werte sind typisch für eutrophe Seen und kamen im Fählensee durch den Phosphorinput (Abwasser Bollenwees, Dung Alpnutzung mit Abschwemmungen im karstigem Untergrund, phosphorhaltiges Gestein) und der Rücklösung von Phosphor aus dem extrem phosphorreichen Sediment während Phasen mit tiefem Sauerstoffgehalt über Grund zustande. Der See wies im Jahr 1990 volumengewichtete mittlere Phosphorwerte von rund 40 bis 95  $\mu\text{g P/l}$  und im Jahr 1995 um 20 bis 45  $\mu\text{g P/l}$  auf. In den Jahren 1998, 2013 und 2018 nahm dann dieser Mittelwert Konzentrationen von 10 bis rund 25  $\mu\text{g P/l}$  ein. Diese berechneten Werte sind aber Momentaufnahmen zu verschiedenen Jahreszeiten und dürften sehr stark auch von der jeweiligen Dauer der Stagnationen (Eisbedeckung, Sommer) und damit vom Wetter (Temperaturen, Niederschlag, Wind, Sonnenscheindauer etc.) und den beprobten Tiefenstufen abhängig sein. Diesbezügliche Überlegungen und Einschätzungen befinden sich in AquaPlus (2019). Da der Klimawandel seit längerem messbar Änderungen in der Lufttemperatur und auch im Niederschlag (Menge, saisonale Verteilung) bedingt, hat dies vermutlich bereits und wird dies mit grosser Wahrscheinlichkeit die Limnologie des Fählensees massgebend prägen (AquaPlus, 2019). So stellten Glur et al. (2013) fest, dass Perioden mit hoher Hochwasserhäufigkeit mit kühlen (nassen und kalten) Sommertemperaturen zusammenfielen.

Der Anschluss des Bollenwees an die Kanalisation hat aber mit Sicherheit den Fählensee um etliches an Phosphorinput entlastet. Das verbleibende Phosphordepot im Sediment wird aber, vorausgesetzt es wird nicht durch ein grosses Unwetter mit viel allochton zugeführtem Material zugedeckt, noch lange die Wachstumsbedingungen planktischer Organismen zumindest im Frühjahr nach der Eismelze und im Herbst nach der Sommerstagnation beeinflussen. Die bei den Tauchgängen im Jahr 2020 festgestellten weisslichen Beggiatoa-Matten (fädige Schwefelbakterien) über dem Grund im Tiefenwasser, sind gute Indikatoren für sauerstoffarmes Wasser mit Eisensulfid (Schwarzfärbung des Sedimentes). Dies zeigt, dass auch fast 20 Jahre nach Anschluss der Bollenwees an die Kanalisation der Fählensee noch belastetes Sediment mit den bekannten Folgeeffekten aufweist.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Im Sediment des Fählensees traten generell nur wenige Kieselalgenarten auf (Abb. 7 und 9, Kapitel 4.2) und es dominierten wenige zentrische Kieselalgen der Gattungen *Cyclotella* und *Stephanodiscus* sowie *Asterionella formosa* (siehe Abb. 7, 8 und 9). Die anderen Arten, also die benthischen Uferarten waren generell weder zahlreich noch wiesen sie je einen hohen relativen Anteil auf (Abb. 7). Im Folgenden werden die Tiefenabfolge und charakteristische Phasen der letzten rund 550 Jahre sowie wenige Kennwerte wie Taxazahl und Diversität besprochen.

### 4.1 Kieselalgen-Stratigraphie



**Abbildung 7: Kieselalgenstratigraphie im Sediment des Fählensees.**

Sedimentkern FAE09-03 entnommen im September 2009, Entnahmestort siehe Abb. 1, weitere Angaben zum Sedimentkern siehe Kapitel 2.1. Grafik erstellt durch Prof. Dr. A. Lotter.

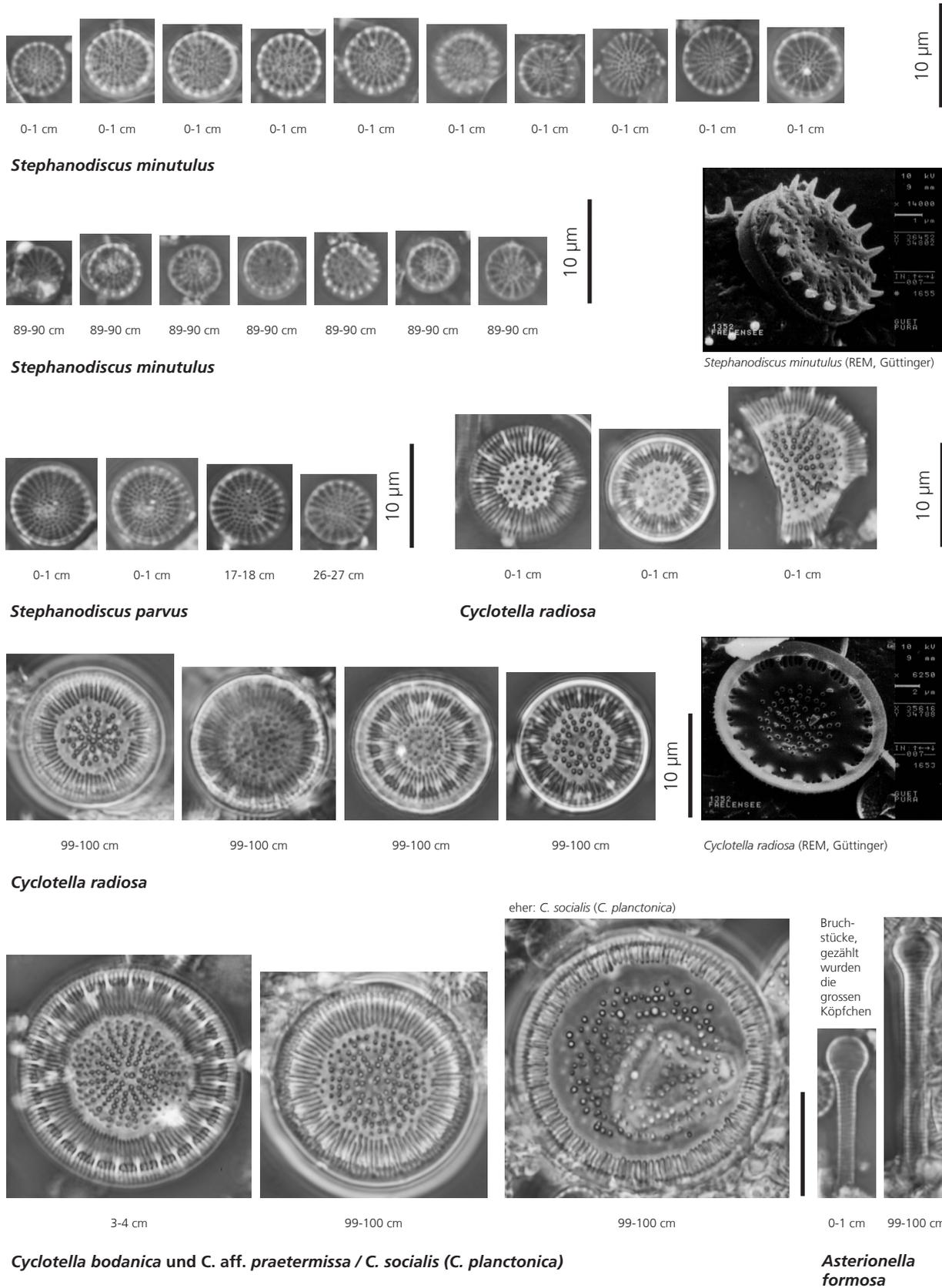
Die häufigsten Kieselalgenarten im untersuchten Sedimentkern sind in Abbildung 7 im Tiefenprofil (Stratigraphie) respektive als zeitliche Abfolge dargestellt. Die vorgefundenen Taxa und deren relativen Häufigkeiten erlauben sicher drei (bis fünf) typische Zonen abzugrenzen. **Die älteste Zone 1** umfasst die Sedimenttiefen unterhalb von 90 cm (älter als ca. 1550). In dieser ältesten Zone dominieren die beiden planktischen Taxa *Cyclotella radiosa* und *C. bodanica* (vermutlich ver-

mischt mit *C. sociabilis*). Zudem sind weitere planktisch lebende Taxa noch gehäuft vorhanden wie *Stephanodiscus minutulus* und *Asterionella formosa*, aber nicht mehr so häufig wie in den jüngeren Schichten. Der Anteil aller anderen Taxa (vorwiegend Uferarten) ist in dieser ältesten Zone mit rund 1 bis 3 % relativer Häufigkeit (rH) vernachlässigbar klein. Der höhere Anteil mit oligo- bis mesotraphenten *Cyclotella*-Arten lässt vermuten, dass damals die trophischen Verhältnisse leicht besser waren als anschließend in den jüngeren Zeiten. Der Anteil an der eutrathenten bis hypereutrathenten Art *Stephanodiscus minutulus* verdeutlicht aber, dass der Fählensee schon früh, zumindest phasenweise oder saisonal bedingt, eutroph war.

Die **mittlere Zone 2** umfasst die Sedimenttiefen von rund 90 cm bis rund 17 cm (= ca. 1550 bis 1920). In dieser Zone dominiert das eutrathente bis hypereutrathente und planktisch lebende Taxon *Stephanodiscus minutulus* mit Anteilen von rund 50 bis fast 80 %. Weitere ebenfalls recht häufige und stetig auftretende Taxa in dieser Zone waren auch planktisch lebend. Es waren dies *Asterionella formosa*, *Cyclotella radiosa*, *C. bodanica* (vermischt mit *C. sociabilis*) und *Stephanodiscus parvus*. Diese Verhältnisse dauerten rund 370 Jahre. Die festgestellten Schwankungen in den relativen Häufigkeiten erachten wir mit einer Ausnahme als nicht interpretierbar. Einzig der in der Tendenz abnehmende Anteil des Taxon *Cyclotella radiosa* fällt auf (Abb. 7, 9). Möglicherweise ist die Abnahme dieses mesotraphenten Taxons ein Hinweis für die zunehmende leichte Eutrophierung des Fählensees.

In den **jüngsten Zonen 3, 4 und 5**, also oberhalb rund 17 cm (ca. 1920 bis 2007), können drei kurze Phasen unterschieden werden. So wies um ca. 1920 bis ca. 1950 das eutrathente bis hypereutrathente Taxon *Stephanodiscus minutulus*, welches vermutlich eher die Frühjahrespopulation bildet, einen markant tieferen Anteil zu Gunsten der beiden Taxa *Cyclotella radiosa* (oft ab Sommer auftretend) und *Asterionella formosa* (Herbstform) auf. Es macht zusammen mit dem erhöhten Anteil von *Fragilaria pinnata* und weiteren *Fragilarien* den Anschein, dass der See sich in dieser Zeit trophisch eher in Richtung Mesotrophie bewegte. Ein über eine längere Dauer erhöhter Anteil an *Fragilaria*-Arten des Aufwuchses (Ufer) kann verschiedene Ursachen haben. So z. B. Änderungen des limnologischen Regimes infolge Pegeländerungen, längere Eisbedeckung mit geringerer planktischer Produktion oder Nährstoffeinträge z. B. infolge Bodenerosion (Lotter 2001).

Die **4. Zone** (ca. 1950 bis in die 1970er Jahre) und die **5. Zone** (1970er Jahre bis 2007) sind dann wieder geprägt von der Zunahme des eutrathenten bis hypereutrathenten Taxons *Stephanodiscus minutulus* und der Abnahme des mesotraphenten Taxons *Cyclotella radiosa* und einem eher hohen Anteil des eutrathenten Taxons *Asterionella formosa*. Der Fählensee dürfte damit in etwa seit den 1970er Jahren einen deutlichen Eutrophierungsschub erfahren haben und die Mesotrophie definitiv in Richtung eutroph bis sogar hypertroph verlassen haben.

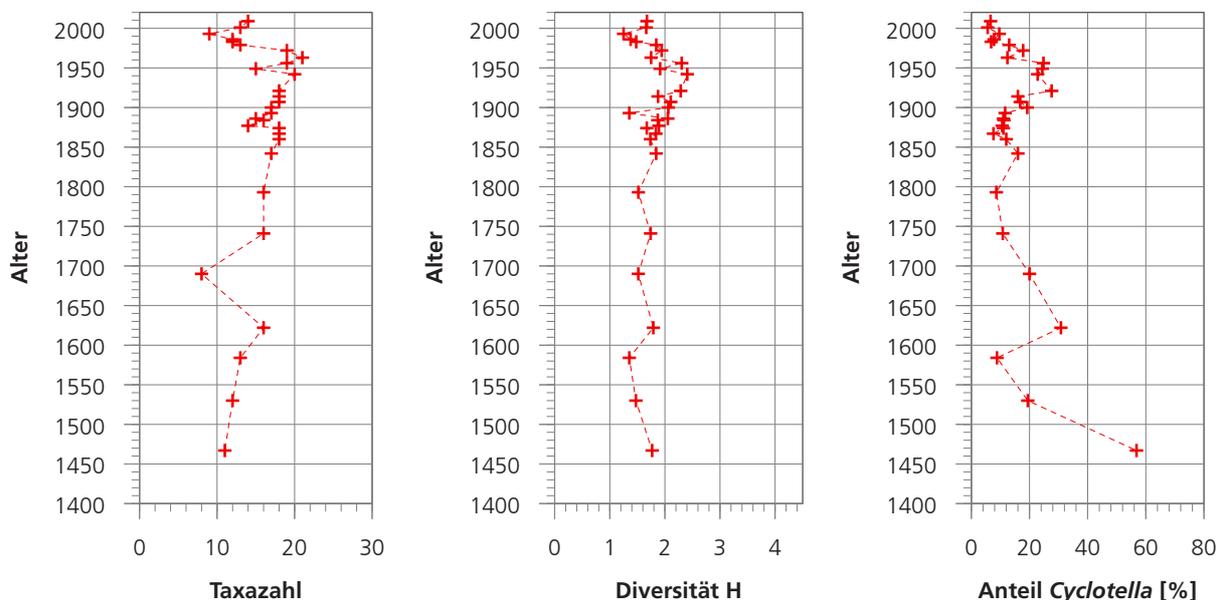


**Abbildung 8: Häufige planktische Kieselalgenarten im Sediment des Fählensees in verschiedenen Tiefestufen.**

Die Aufnahmen stammen vom Sedimentkern FAE09-03 (Lichtmikroskopie, Phasenkontrast). Nur die rasterelektronischen Mikroskopaufnahmen (REM) von *Stephanodiscus minutulus* und *Cyclotella radiosa* erstellte Walter Güttinger, Pura TI, basierend auf dem Sedimentmaterial des Fählensees, entnommen im Jahr 1993 (Probe des Kleinseendatensatzes, Lotter et al. 1998).

## 4.2 Taxazahl und Diversität

Die **Taxazahl** wie auch die Diversität sind deutlich tiefer als erwartet. Insgesamt fanden wir in den Sedimentproben 78 Taxa, davon 6 planktisch lebende Taxa. Pro Sedimentprobe traten im Rahmen der Zählung der 500 Schalen bloss zwischen 8 und 21 Taxa und im Mittel 15 Taxa auf (Abb. 9). Die Artenzahl variierte nicht gross über die Sedimenttiefe hinweg. Einzig in den Proben um ca. 1950 bis ca. 1970 war die Taxazahl leicht höher. Gemäss Lotter et al. (1998) wiesen die 68 Kleinseen des Trainingssets für die Methode der Gesamtphosphor-Rekonstruktion im Mittel 43 Taxa auf (minimal 13, maximal 92 Taxa). In diesem Trainingsset war auch der Fählensee enthalten und er wies schon damals mit 13 Taxa die tiefste Taxazahl aller 68 Kleinseen auf. Die Wassertiefe, die vermutlich geringe Vielfalt an Ufersubstraten (bloss Steine, Blöcke, Feinsediment) und die seit langem grosse Dominanz von wenigen Planktonarten dürften Gründe sein für die geringe Taxazahl.



**Abbildung 9: Charakterisierungen der Kieselalgen im Sediment des Fählensees.**

Dargestellt sind die Taxazahl, die Diversität H (Basis Log 2) und der relative Anteil der *Cyclotella*-Arten. Die Zählungen umfassten 500 Schalen. Sedimentkern FAE09-03, entnommen im September 2009, Entnahmeort siehe Abb. 1 und Kapitel 2.1.

Bezüglich **Diversität** ist im Tiefenverlauf derselbe Trend zu erkennen wie bei der Taxazahl (Abb. 9). Zudem ist auch die Diversität sehr tief; dies als Folge der geringen Taxazahl und der hohen Dominanz von zwei planktischen Taxa.

Der Anteil der **Gattung Cyclotella** im Tiefenverlauf ist ein Hinweis für die Entwicklung trophischer Verhältnisse im Fählensee, sind doch viele Taxa dieser Gattung Indikatoren für oligo- bis mesotrophe Milieus (Abb. 9). Im Fählensee kamen jedoch erstaunlicherweise im ganzen Sediment (30 Proben) nur zwei, allenfalls drei Taxa vor (Abb. 7). Es handelte sich um *Cyclotella radiosa* (Synonyme: *Cyclo-*

*tella comta* var. *radiosa*, *Lindavia radiosa*, *Puncticulata radiosa*, *Handmannia radiosa*), *Cyclotella bodanica* und vermutlich auch *Cyclotella socialis* (*C. planctonica*). Da viele Schalen zerbrochen waren, wurden die Bestimmungen so gut wie möglich gemacht (zum Teil aufgrund der Grösse des vermuteten Schalendurchmessers) und Bruchstücke zu ganzen Schalen aufsummiert. Dies hat zur Folge, dass der Anteil der Gattung *Cyclotella* eher unterschätzt wurde und die Artzugehörigkeit nicht immer ganz korrekt erfolgen konnte. Trotz diesen Umständen erachten wir jedoch der so gefundene Anteil der Gattung *Cyclotella* als plausibel.

Der Verlauf des Anteils der Gattung *Cyclotella* zeigt, dass in der ersten Hälfte des 20. Jhd. sowie im 17. Jhd. und vor ca. 1550 die trophischen Verhältnisse besser waren als in den anderen Zeiten. Der Verlauf der Gattung *Cyclotella* wie auch derjenige der Gattung *Stephanodiscus* ist im Fählensee bestimmend für die anschliessend besprochene Rekonstruktion des Gesamtphosphors.

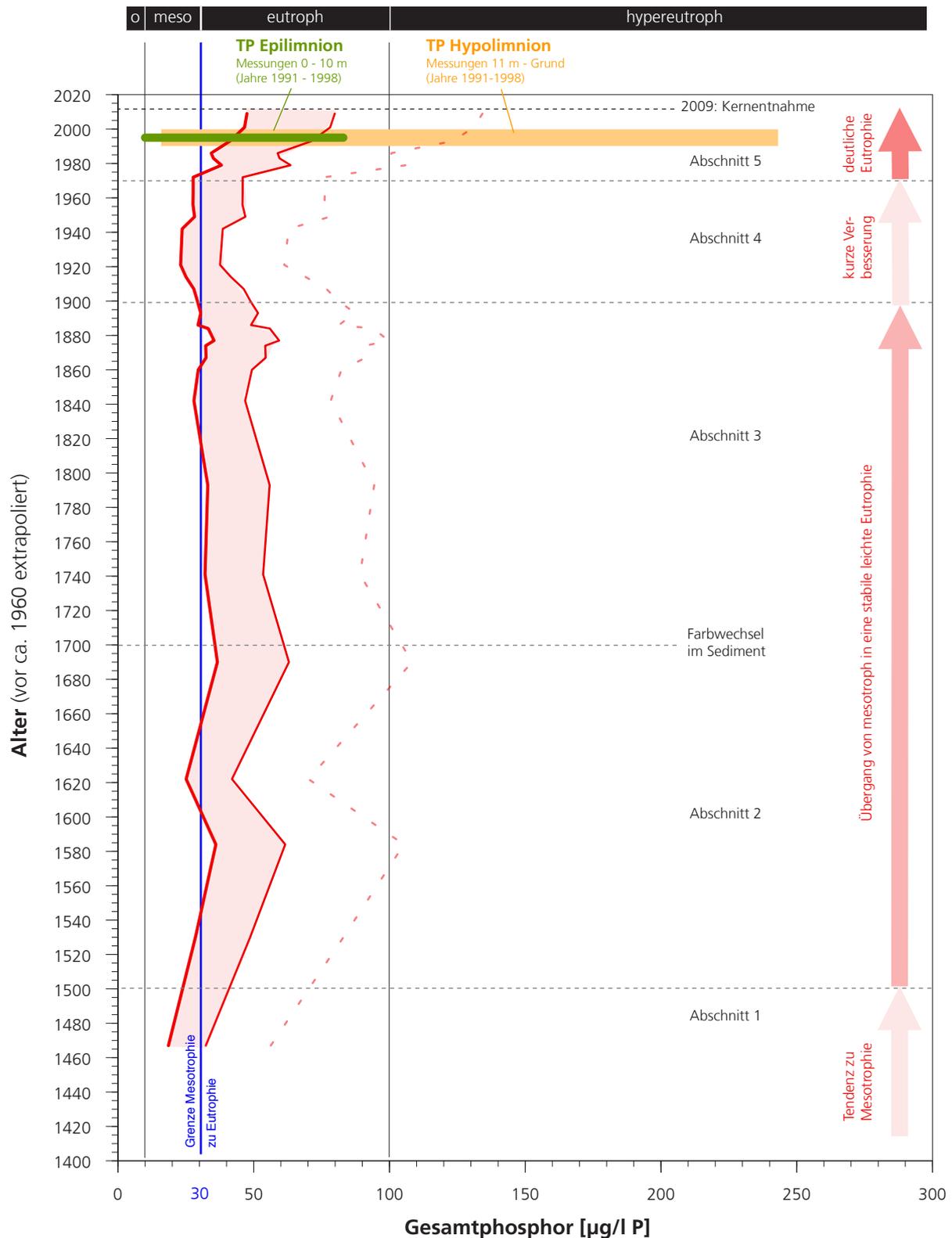
### 4.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors

Die Rekonstruktion des Gesamtphosphors erfolgte mit 30 Sedimentproben der Tiefen 0 bis 109 cm, wobei die obersten rund 30 cm Sediment (ca. 1850) fast lückenlos mit 23 Proben untersucht wurden. Die restlichen 7 Proben verteilen sich dann auf die unteren 70 cm Sediment (1 Probe pro 10 cm). Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Der mittlere rekonstruierte Gesamtphosphor wies im Zeitverlauf von ca. 1450 bis 2009 fünf typische Abschnitte auf. Der rekonstruierte Gesamtphosphor entspricht Zirkulationswerten und bildet nicht Einzelmesswerte ab, welche im Jahresverlauf und im Tiefenprofil extrem schwanken können.

**1. Abschnitt:** Vor ca. 1500 war der rekonstruierte Phosphorgehalt im Bereich um 20 µg P/l bis vermutlich höchstens 30 µg P/l. In Anbetracht, dass zu diesem Zeitpunkt die Gattung *Cyclotella* noch hohe Anteile aufwies, kann der Fählensee als mesotroph bezeichnet werden.

**2. Abschnitt:** Anschliessend bis ca. 1700 stieg der Gesamtphosphor leicht an und zwar auf über 30 bis allenfalls 40 µg P/l. Das Sediment des Fählensees weist in der Tiefe von rund 56 cm (= ca. 1700) einen markanten Farbwechsel von hellem zu dunklem bis schwarzem Sediment auf (siehe Abb. 2). Der Fählensee dürfte seit diesem Zeitpunkt einen erhöhten Anteil an organischem Gehalt haben, so dass während Stagnationsphasen der See sauerstoffarmes bis -loses Tiefenwasser hat. Die damit verbundene Phosphorrücklösung führt dann zu einer Eigendüngung des Sees, was eutrophes Milieu zur Folge hat. Die Ursache für diesen erhöhten organischen Gehalt ist Spekulation und wird wohl kaum zu diesem frühen Zeitpunkt auf einen Faktor, nämlich anthropogene Nutzung der Alpweiden, zurückzuführen sein. Vermutlich haben die klimatischen Verhältnisse (Kleine Eiszeit), die geologischen Bedingungen (Karst, phosphorhaltige Gesteinformationen), die Topographie (die steilen Flanken mit Potenzial für Erosion und Abschwemmungen) wie auch die Alpbewirtschaftung (Dung, Abwasser, Holzfösserei etc.) zu dieser speziellen Situation beigetragen.

**3. Abschnitt:** Der Fählensee verblieb dann von rund 1700 bis rund 1900 auf diesem stabilen schwach eutrophen Niveau.



**Abb. 10. Zusammenfassende Darstellung des Gesamtphosphors und der trophischen Entwicklung im Fählensee basierend auf den im Sediment eingelagerten Kieselalgen.**

Rote Linien: Rekonstruktion der Gesamtphosphor-Konzentration während der Frühjahrszirkulation basierend auf dem Kalibrationsset nach Lotter et al. (1998). Der Bereich zwischen dem unteren Fehler und dem mittleren Wert dürfte den Verlauf des Gesamtphosphors am besten darstellen. Die andere dünne rote und gestrichelte Linie entspricht dem oberen Fehler. Die 5 Abschnitte werden im Text besprochen (Kap. 4.3)

Orange und grüne horizontale Balken: Konzentrationsbereiche der Gesamtphosphorkonzentrationen (TP) im Epilimnion und im Hypolimnion in den 1990er Jahren (Daten AquaPlus (2019).

Trophieangaben nach Lampert & Sommer (1993): o = oligotroph (< 10 µgP/l), meso = mesotroph (10- < 30 µg P/l), eutroph (30- < 100 µg P/l), hypereutroph (> 100 µg P/l).

**4. Abschnitt:** Von rund 1900 bis in die 1970er Jahre sank der P-Gehalt vermutlich wenig auf den Übergangsbereich von rund 30 µg P/l. In dieser Phase nahm der Anteil der Gattung *Cyclotella* zu, wie auch die benthischen *Fragilarien*. Möglicherweise war in dieser Zeitperiode die Alpbewirtschaftung kriegsbedingt weniger intensiv.

**5. Abschnitt:** Seit den 1970er Jahren nahm der Gesamtphosphorgehalt wieder markant zu. Er stieg auf Werte von 50 bis 80 µg P/l an. Für diesen doch deutlichen Anstieg dürften weitgehend die eingeleiteten Abwässer der Bollenwees verantwortlich sein. Im Jahr 2001 erfolgte der Anschluss der Bollenwees an die Kanalisation, so dass seit 2002 keine Abwässer mehr in den Fählensee eingeleitet werden. Diese Abnahme der Phosphorfracht bewirkte zumindest bis 2009 im Sediment noch keine Veränderung der Kieselalgen. Dies wird vermutlich erst in 10 Jahren ersichtlich sein. Dies einerseits weil die Phosphor-Rücklösung den See immer noch beachtlich düngt, das System Fählensee also trotz kurzer theoretischer Aufenthaltszeit von kaum 3 Monaten träge ist und andererseits weil pro 1 cm Sediment rund 8 Jahre Planktongeschichte akkumuliert vorliegen.

**Messwerte** des Gesamtphosphors liegen seit 1991 vor. Sie wurden im Bericht der AquaPlus ausführlich beschrieben und dokumentiert (AquaPlus 2019). Wir verzichten daher auf eine Wiederholung dieser Messwerte. In Abbildung 9 sind aber die Spannweite der Messwerte der Jahre bis zur Kernentnahme im Jahr 2009 für das Epilimnion (Oberfläche bis 10 m Tiefe) und das Hypolimnion (10 m bis Grund) dargestellt. So wies das Epilimnion je nach Jahreszeit Phosphorgehalte von 10 µg P/l (gemessen im August) bis 83 µg P/l (März) und im Hypolimnion Werte von 19 µg P/l (August) bis 240 µg P/l (März) auf. Im Mittel nahmen die Werte im Epilimnion in den 1990er Jahre 28 µg P/l und im Hypolimnion solche von 70 µg P/l ein. Diese Werte verdeutlichen, dass der Fählensee in den 1990er Jahren sicher eutroph war, obwohl in den Sommermonaten zehrungsbedingt die Phosphorkonzentrationen jeweils tief waren.

#### 4.4 Historische Proben des Fählensees

Der Fählensee wurde bisher nicht oft algologisch untersucht. Uns sind nur die Untersuchungen der Jahre 1921 (Bachmann 1928), 1954 (Messikommer 1958) sowie die in AquaPlus aufgeführten Proben der Jahre 1990, 1991 sowie 2013 und 2014 bekannt. Die Proben aus dem Jahr 2014 sind aber nicht verfügbar. In Tabelle 2 sind die in diesen Proben gefundenen planktischen Kieselalgen aufgeführt und zwar nach dem saisonalen Vorkommen.

Die in den Proben beobachteten planktischen Gattungen (*Cyclotella*, *Stephanodiscus*, *Fragilaria*, *Asterionella*) und sogar oft auch die damals bestimmten Arten fanden wir bis auf ein Taxon (*Tabellaria flocculosa*) alle auch im Sedimentkern FAE09-03. Der Plankter *Tabellaria flocculosa* wurde aber nur mit geringer Dichte in einer Uferaufwuchsprobe gefunden.

Frühjahr März-Juni	Vorsommer Juni	Herbst September-Oktober	Kern Präsenz der Gattung
<i>Cyclotella bodanica</i> (1991)		<i>Cyclotella costei / comta</i> / sp. (1954, 1990, 2013)	ja
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (1991)	<i>Stephanodiscus minutulus</i> (1991)	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> / sp. (1954)	ja
<i>Fragilaria ulna angustissima</i> (1991)		<i>Fragilaria crotonensis / ulna var acus</i> / sp. (1990, 2013)	ja
		<i>Asterionella gracillima / formosa</i> (1921, 1954, 1990, 2013)	ja
		<i>Tabellaria flocculosa</i> (2013)	nein

Legende: **Fettdruck Gattung Art** = diese Gattung, diese Art kam im Sedimentkern vor. Jahr (1954) = Jahr der Probe. **Fettdruck Jahr** = in diesem Jahr war das Taxon häufig

**Tabelle 2: Planktische Kieselalgen von Algenproben des Fählensees der Periode 1921 bis 2013 zugeordnet nach dem saisonalen Vorkommen sowie Präsenz im untersuchten Sedimentkern FAE09-03.**

Proben von **1921** gemäss Bachmann (1928), **1954** gemäss Messikommer (1959), **1990, 1991** und **2013** gemäss AquaPlus (1990, 1991, 2013).

Das vorgefundene Bild der Saisonalität entspricht den Erwartungen der Planktonkunde. So traten *Stephanodiscus minutulus* im Frühjahr und Vorsommer gehäuft auf, während *Cyclotella* und *Asterionella formosa* sowie *Fragilaria crotonensis* im Herbst dominierten. Die saisonale Abfolge von Planktern ist eine Frage der Ressourcen (Nährstoffe, Silizium, Licht), der Temperatur, der Konkurrenz, der Generationszeit, Krankheiten wie Parasiten, dem Absinken sowie dem Frass durch Zooplankter.

Bei den Kieselalgen, welche eher Kaltwasser adaptiert sind, Silizium benötigen und je nach Form und Grösse der Zellen und Kolonien unterschiedlich schnell absinken ist die saisonale Abfolge stark auch vom Trophiegrad abhängig. In eutrophen Gewässern werden im Frühjahr nach der Eisschmelze infolge Zirkulation Nährstoffe und Silizium aus dem dunklen Tiefenwasser an die lichtdurchflutete Oberfläche gebracht. Diesen Nährstoffinput ans Licht ermöglichen dann kleinen Zellen wie *Stephanodiscus minutulus*, die sich schnell vermehren, eine grosse Algenblüte zu bilden. Diese Algen bauen Phosphor und Silizium, zwei für das Kieselalgenwachstum wichtige Stoffe in die Biomasse ein. Anschliessend wird diese Algenbiomasse entweder infolge Frass oder fehlenden Ressourcen oder letztlich infolge Absterben und Absinken in der Biomasse und Zelldichte drastisch reduziert. In der Folge befindet sich das Oberflächenwasser mit wenig Phosphor in einem nährstoffärmeren Zustand, was oligo- bis mesotrophente Arten wie *Cyclotella* im Wachstum fördert. Solange das Wasser < 15 °C kalt und das Verhältnis von Silizium zu Phosphor mit 6:1 klein ist, setzen sich oft zentrische Kieselalgen durch (Sommer, 1994), wie eben z. B. die mesotrophente *Cyclotella radiosia*. Diese Sommerblüten sind aber meistens weniger dicht als diejenigen im Frühjahr. In der Folge hängt dann das Aufkommen von Kieselalgen im Herbst stark von der Dauer der Sommerstagnation und der Intensität der Herbstzirkulation sowie dem Verhältnis von Silizium zu Phosphor ab <sup>2</sup>.

Im Fählensee wurde mehrmals und dicht *Asterionella formosa* (Si:P = 60-90:1, nach Sommer 1994), aber auch *Fragilaria crotonensis* (30:1) und *Cyclotella comta*

<sup>2</sup> Gemäss Messungen von Lotter (1998, nicht publizierte Daten), wurden am 7. Juni 1993 Silizium und Phosphor in vier Tiefenstufen gemessen. Im Tiefenwasser (23 m Tiefe) war mit 2 mg Si/l rund das zehnfache an Silizium vorhanden wie im Epilimnion (0 - 6 m Tiefe: 0.14 - 0.26 mg Si/l). Der Phosphorgehalt betrug im Tiefenwasser 55 µg P<sub>tot</sub>/l und 5 µg PO<sub>4</sub>-P/l (Epilimnion: 13-26 µg P<sub>tot</sub>/l und 3 µg PO<sub>4</sub>-P/l). Es ergaben sich je nach Tiefe im Epilimnion Si:P-Verhältnisse von 5 - 19 (bezogen auf P<sub>tot</sub>) respektive 47 - 87 (bezogen auf PO<sub>4</sub>-P).

(= *radiosa*) (6:1) beobachtet. Bei hohem Si:P-Verhältnis, also wenn z. B. Phosphor in geringer oder Silizium in sehr hoher Konzentration vorhanden ist, dominiert *Asterionella* und bei tiefem Si:P-Verhältnis dominiert *Cyclotella*. Es ist auch die Koexistenz von *Cyclotella* und *Asterionella* bekannt, nämlich dann wenn Silizium wachstumslimitierend für *Asterionella* und gleichzeitig Phosphor für *Cyclotella* ist (Reynolds 1986).

So lässt sich schliessen, dass die Dauer und Intensität der Sommerstagnation mit Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment sowie die anschliessende Herbstzirkulation nicht jedes Jahr vergleichbar stattgefunden haben. In einem Bergsee wie der Fählensee, welcher zumindest im Sommer sehr stark von Wetterereignissen (Hochwassereinträge, Trockenwetterphasen, Hitzesommer etc.) und den Bedingungen im Tiefenwasser (Phosphorrücklösung) abhängig ist, sind durchaus sehr verschiedene Szenarien von Dauer und Ausprägung der Sommerstagnation und anschliessender Herbstzirkulation denkbar. Im Vergleich dazu ist das Winterhalbjahr nur bezüglich Dauer der Eisbedeckung vom Wetter abhängig. Mit dem Schmelzen des Eises ist aber garantiert, dass im Frühjahr mit Sicherheit Nährstoffe an die Oberfläche gelangen und damit eine Art wie *Stephanodiscus minutulus* zur Blüte gelangen kann. Dieser Wechsel der saisonalen Artabfolge und die Koexistenz von eutraphenten Arten im Frühjahr, von mesotraphenten Arten im Sommer und von mesotraphenten bis eutraphenten Arten im Herbst wird solange noch bleiben, bis die Phosphorrücklösung aus dem Sediment stark abgenommen hat oder vollständig unterbunden werden kann.

Die in den historischen Algenproben des Fählensees gefundenen planktischen Arten entsprechen den dominierenden Arten des untersuchten Sedimentkernes. Es zeigte sich zudem in den Algenproben wie auch im Sedimentkern eine sehr geringe Vielfalt an Arten. Zudem konnte dank den wenigen Algenproben die saisonale Abfolge der Arten nachvollzogen werden. Damit wird auch interpretierbar, wieso der Fählensee im Sediment schon seit Jahrhunderten eine Koexistenz von *Stephanodiscus* - *Cyclotella* - *Asterionella* aufweist. Sie ist vor allem dann möglich, wenn infolge langer Stagnationsphasen und Phosphorrücklösung aus dem Sediment mit anschliessender vollständiger oder teilweiser Zirkulation reichlich Phosphor und Silizium an die Oberfläche gebracht werden. Dies ist für unsere Bergseen dieser Höhenlage und Abgeschiedenheit sehr atypisch. Die Geologie (phosphorhaltiges Gestein, Karst), die Topographie (Steilheit, Mulde) und die anthropogenen Nutzungen (Alpwirtschaft, Abwasser) dürften die Ursachen sein, wieso der Fählensee zumindest schon seit dem 15. Jhd. nie oligotroph, sondern höchstens mesotroph bis schwach eutroph und in jüngsten Zeiten sogar hocheutroph war.

#### 4.5 Offene Fragen

Aus Sicht der Phosphorrekonstruktion ergeben sich folgende Fragen:

1. Wie viel Phosphor wird aus dem phosphorhaltigen Gestein (Garschella-Formation) ausgeschwemmt bzw. gelöst? Dieses Wissen würde die Phosphorbilanz wertvoll ergänzen und könnte die Hypothese, dass hohe Trophie eine starke natürliche Ursache hat allenfalls erhärten.

Vorgehen: Theoretische Abschätzungen (Modellierungen) und allenfalls Messungen vor Ort.

2. Wie sieht die Kieselalgenzusammensetzung in tieferen Sedimentschichten aus? Gab es vor 1'000 oder 2'000 Jahren einen oligotrophen Zustand?

Vorgehen: Untersuchung im vorhandenen 9 m langen Kern, indem in ca. 2 m und 3 m Tiefe wenige Kieselalgenproben entnommen und untersucht würden.

3. Wie entwickelt sich das Plankton im Jahresverlauf?

Vorgehen: Monatliche Untersuchung des Planktons, mit Beginn unter Eis (März) bis zur erneuten Eisbedeckung. Qualitative und quantitative Bestimmungen und / oder im Minimum die Messung von diversen Algenpigmenten mittels Sondenmessungen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Altherr, J. (1994): Gabriel Walser (1695-1776) Pfarrer, Chronist, Geograph und Kartenzeichner. Das Land Appenzell, Heft 24. Verlag: Appenzeller Hefte 9100 Herisau.
- AquaPlus (1990). Untersuchung des Planktons der Alpsteinseen. Sämitsersee, Seeapsee, Fählensee. Im Auftrag von Dr. Otto Langenegger, Hydrogeologe, 9056 Gais AR. AquaPlus, Wollerau. 4 Seiten und Anhang.
- AquaPlus (1992). Untersuchung des Planktons der Alpsteinseen. Sämitsersee, Seeapsee, Fählensee. Im Auftrag von Dr. Otto Langenegger, Hydrogeologe, 9056 Gais AR. AquaPlus, Wollerau. 12 Seiten und Anhang.
- AquaPlus (2018): Alpsteinseen. Gewässeruntersuchungen 2014 - 2017. Auswertungen und Beurteilungen.
- AquaPlus (2019): Gewässerzustand Fählensee. Seemonitoring und Nährstoffverhältnisse. Beurteilung Seezustand und Modellierung der Phosphorbilanz. Im Auftrag des Kantons Appenzell Innerrhoden. 39 Seiten und Anhang.
- AquaPlus (2020): Gewässerzustand Fählensee - Unterwasserdokumentation und Sedimentprobenahme. Kurzbericht zu den Tauchgängen vom 25.6.2020. Im Auftrag des Kantons Appenzell Innerrhoden. 9 Seiten.
- Bachmann, H. (1928): Das Phytoplankton der Piora-Seen, nebst einigen Beiträgen zur Kenntnis des Phytoplanktons schweizerischer Alpenseen. Schweiz. Zeitschr. f. Hydrologie IV, H. 3 u. 4, Aarau.
- Bergwirte-Verein (2017): Chronik: 75 Jahre Bergwirte-Verein.  
<https://www.appenzell.ch/de/alpstein/chronik-bergwirteverein.html>
- Büchler, H. (2000): Der Alpstein. Natur und Kultur im Säntisgebiet. Verlagshaus Schwellbrunn. 364 Seiten.
- Eugster, H. (1939): Vom Werden und Vergehen des Sämbtiser- und Fählensees. Appenzeller Kalender Band (Jahr) 218, 6 Seiten.
- Funk, H.P., Habicht, K., Hantke, R. & Pfiffner, O. (2000): Blatt II 15 Säntis. - Geologischer Atlas Schweiz 1: 25 000, Erläuterungen 78.
- Geografisches Lexikon der Schweiz (1904). Deutsche Ausgabe. 2. Band (E-K), Hrs. Knapp, Ch., Borel, M. & Attinger, V., Verlag von Gebrüder Attinger, Neuenburg.
- Glur, L., Wirth, S.B., Gilli, A. & Anselmetti, F.S. (2009): Limnogeologische Untersuchungen am Fählensee. Poster. Nicht publiziert.
- Glur, L., Wirth, S.B., Büntgen, U., Gilli, A., Haug, G.H., Schär, Ch., Beer, J. & Anselmetti, F. (2013): Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years. Sci. Rep. 3, 2770; DOI:10.1038/srep02770.
- Inauen, J. (2004): Innerrhoder Alpkataster. Die Alpwirtschaft in Appenzell I.Rh. mit einem Beschrieb der einzelnen Alpen und Alprechte. Innerrhoder Schriften, Band 12, Auszüge Bollenwees, Fählentalp und Fählensee.
- Inauen, J. (2014): Innerrhoder Alpkataster 2012 / 2013. Appenzeller Volksfreund, Band 16; 440 S.

- Krammer, K. & Lange-Bertalot, H. (1986-1991): Bacillariophyceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H. & Mollenhauer D. (eds.): Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1, 2/2, 2/3 und 2/4. - Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Lampert & Sommer (1993): Limnökologie. Georg Thieme Verlag Stuttgart. 440 Seiten.
- Langenegger, O. (1990-1998): Untersuchung der Alpsteinseen. Fählensee, Säntisersee, Seealpsee. Jährliche Zwischenberichte. Amt für Umweltschutz, Kanton Appenzell Innerrhoden.
- Leibundgut, Ch. (1995): Zur Hydrologie des Alpsteins. Hydrologische Untersuchungen im Karstgebiet des Alpsteins. Innerrhoder Schriften. 4.
- Lotter, A.F. (2001): The effect of eutrophication on diatom diversity: examples from six Swiss lakes. Lange-Bertalot-Festschrift, Jahn, R. Kociolek, J. Witkowski, A. Compère, P. (eds). A.R.G. Ganter Verlag K.G.: 417-432.
- Lotter, A.F., Birks, H.J.B., Hofmann, W. & Marchetto, A. (1998): Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients. *Journal of Paleolimnology* 19: 443–463.
- Messikommer, E. (1958): Beitrag zur Kenntnis der Algenflora der nördlichen Alpsteingewässer. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. Jhg 103, Schlussheft, 287-303.
- Müller, B., Lotter, A., Sturm, M., Amman, A. (1998): Influence of catchment quality and altitude on the water and sediment composition of 68 small lakes in Central Europe. *Aquat.sci.*60 (1998) 316–337.
- Reutimann, Th (1987): Hydrologie der Alpsteinseen. Publ. Gewässerkunde No 90, Diplomarbeit Universität Bern.
- Reynolds, C.S. (1986): The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge, 384 Seiten.
- Signer, J. (1953): Chronik der Appenzell J.-Rh. Liegenschaften. Appenzellische Geschichtsblätter. Beilage zum Appenzeller Volksfreund, 15. Jhg, Nr. 9. und Nr. 10.
- Sonderegger, S. (1977): Der Alpstein im Lichte der Bergnamengebung. Das Land Appenzell, Heft 6/7. 2. Auflage. Verlag: Appenzeller Hefte 9100 Herisau.
- Sonderegger, S. (2014): Frühe Zeugnisse wirtschaftlicher Nutzung. In: Hans Büchler (Hg.), Der Alpstein. Natur und Kultur im Säntisgebiet, Herisau 2014.
- Sonderegger, S. (2019): Begehrte Weiden und Wälder am Berg. Die Ostschweizer Alpwirtschaft im Kontext der Kommerzialisierung der Viehwirtschaft im Übergang vom Spätmittelalter in die frühe Neuzeit. *Geschichte der Alpen* 2019/24, Seiten 43-64.
- Sommer, U. (1994): Planktologie. Springer Verlag, Berlin, 274 Seiten.
- Ter Braak C.J. & Juggins S. (1993): Weighted averaging partial least squares regression (WAPLS): an improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. *Hydrobiologia* 269 (270): 485–502.
- Walser, E. (1976): Die appenzellischen Gewässer. Das Land Appenzell, Heft 11. Verlag: Appenzeller Hefte, 9100 Herisau.

## **Anhang A**

Kieselalgen-Zählraten Sedimenkern FAE09-03

Tab. B1. Relative Häufigkeiten der Kieselalgen im Sedimentkern AE14-1 des Ägerisees. Datierung und Entnahmetiefe siehe Bericht. Historische Algenprobe der Sammlung Meisters vom 20. November 1904.

Sedimenttiefe	DVNR	0-1 cm	1-2 cm	2-3 cm	3-4 cm	4-5 cm	8-9 cm	9-10 cm	10-11 cm	11-12 cm	12-13 cm	13-14 cm	16-17 cm	17-18 cm	18-19 cm	19-20 cm	20-21 cm	21-22 cm	22-23 cm	23-24 cm	24-25 cm	25-26 cm	26-27 cm	29-30 cm	39-40 cm	49-50 cm	59-60 cm	69-70 cm	79-80 cm	89-90 cm	99-100 cm								
Zählsternummer																																							
Achnanthes affine (GRUNOW) CZARNECKI	26000	0.2																																					
Achnanthes atomoides MONNIER, LANGE-BERTALOT & ECTOR	26003																																						
Achnanthes KUETZING	26097																																						
Achnanthes minutissimum var. jackii (RABENHORST) LANGE-BERTALOT	26063		0.4	1.2	0.2			1.4																															
Achnanthes minutissimum var. minutissimum (KUETZING) CZARNECKY	26060	0.6	0.2		3.0	3.2	1.0	0.2	1.4	1.0	1.2	1.0	1.0	0.2	0.6	1.0	0.2	0.6	1.2	1.2	0.8	1.6	1.8	1.8	1.2	0.6	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.2							
Achnanthes pyrenaicum (HUSTEDT) KOBAYASI	26005	0.2		0.4				2.0	1.2	0.4	0.8	0.4	0.4	0.2	0.2																								
Adelia minuscula var. muralis (GRUNOW) LANGE-BERTALOT	26570																																						
Amphora mansueti KRAMMER	6171																																						
Amphora ovalis (KUETZING) KUETZING	6044																																						
Amphora pediculus (KUETZING) GRUNOW	6983		0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	1.6	2.6	0.8	1.4	0.8	0.6	1.0	0.8	0.4	0.6	1.6	1.2	1.2	2.8	1.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	1.2	1.2	0.4	0.4	1.2	0.4	0.4				
Asterionella formosa HASSALL	6050	14.4	29.0	10.0	17.8	29.0	13.0	6.4	6.8	12.0	24.6	38.8	5.4	9.0	9.0	2.4	14.4	11.2	18	8	18.4	8.8	10	12	21.4	6.6	7.4	6.6	4.2	4.2	3.2								
Caloneis constans REICHARDT	6720																																						
Caloneis lanceolata (SCHULZ) LANGE-BERTALOT & WITKOWSKI	26121																																						
Cocconeis pseudolineata (GERTLER) LANGE-BERTALOT	26128																																						
Cyclotella bodanica GRUNOW	6144	0.8	1.4	1.6	1.4	1.0	1.6	1.4	1.2	5.4	2.0	0.2	2.4	2.2	4.0	1.8	1.4	2.2	3.2	1.2	0.4	0.4	2.4	2.4	0.6	2.4	2.2	1.8	0.8	15.2	0.8	15.2							
Cyclotella radiosa (GRUNOW) LEHMERMANN	6204	5.8	4.2	8.0	6.4	5.8	11.4	16.4	11.2	19.4	22.4	22.6	25.2	13.8	13.6	15.2	9.8	9.6	9	7.4	9.8	7.2	11.6	13.6	7.4	10.2	17.6	28.6	7	18.6	41.6								
Cymbella excisa var. excisa KUETZING	26134																																						
Cymbella parva (W.SMITH) KIRCHNER	6064																																						
Denticula tenuis KUETZING	6068	0.2																																					
Diplolepis elliptica (KUETZING) CLEVE	6807																																						
Erycynema reichardti (KRAMMER) D. G. MANN	26208		0.2	0.2	1.0	0.4	1.6	1.0	1.4	0.8	0.8	0.4	1.2	0.6	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2		
Erycynema minutum (HULSE) D. G. MANN	16992																																						
Erycynema ventricosum (C. AGARD) GRUNOW	16993																																						
Erycynema silesiacum var. silesiacum (BLEISCH) D. G. MANN	26318																																						
Erycynema ventricosum (C. AGARD) GRUNOW	100217																																						
Eolimna tantula (HUSTEDT) LANGE-BERTALOT	26333																																						
Fallacia subclivata (HUSTEDT) D. G. MANN	26637																																						
Fragilaria capucina var. vaucheriae (KUETZING) LANGE-BERTALOT	6186																																						
Fragilaria constans f. binodis (EHRENBERG) HUSTEDT	6397																																						
Fragilaria constans f. constans (EHRENBERG) GRUNOW	6034																																						
Fragilaria constans f. venter (EHRENBERG) HUSTEDT	6828																																						
Fragilaria crotonensis KITTON	6075	2.8	3.0	0.2																																			
Fragilaria leptostauron var. dubia (GRUNOW) HUSTEDT	6774																																						
Fragilaria hahniana LANGE-BERTALOT	6405	1.4	0.2																																				
Fragilaria parasitica var. parasitica (W.SMITH) GRUNOW	6237																																						
Fragilaria pinnata var. pinnata EHRENBERG	6078	0.2	0.4	0.4																																			
Fragilaria pinnata var. tripona (BRUN & HERBAUD) HUSTEDT	16239																																						
Gomphonema pumilum (GRUNOW) REICHARDT & LANGE-BERTALOT	36095																																						
Gomphonema pumilum var. rigidum REICHARDT & LANGE-BERTALOT	26430																																						
Gomphonema urae LANGE-BERTALOT & REICHARDT	6801	0.2																																					
Karayevia clevei var. clevei (GRUNOW) BUKHTYAROVA	16894																																						
Karayevia laterostrata (HUSTEDT) BUKHTYAROVA	26054																																						
Meyenaea atomus var. permixta (HUSTEDT) LANGE-BERTALOT	26472																																						
Navicula anthonii LANGE-BERTALOT	16653																																						
Navicula cryptocephala var. cryptocephala KUETZING	6010																																						
Navicula cryptotenella LANGE-BERTALOT	6889																																						
Navicula gregaria DONKIN	6015																																						
Navicula oppugnata HUSTEDT	6522																																						

# Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Fählensee mittels Kieselalgen

Sedimenttiefe	DVNR	0-1 cm	1-2 cm	2-3 cm	3-4 cm	4-5 cm	8-9 cm	9-10 cm	10-11 cm	11-12 cm	12-13 cm	13-14 cm	16-17 cm	17-18 cm	18-19 cm	19-20 cm	20-21 cm	21-22 cm	22-23 cm	23-24 cm	24-25 cm	25-26 cm	26-27 cm	29-30 cm	39-40 cm	49-50 cm	59-60 cm	69-70 cm	79-80 cm	89-90 cm	99-100 cm			
Navicula trophicatrix LANGE-BERTALOT	16578	0.2							0.4							0.2										0.2								
Navicula veneta KUETZING	6890															0.2																		
Navicula wilfii LANGE-BERTALOT	6961															0.2																		
Neidium dubium (EHRENBERG) CLEVE	6108																									0.2								
Nitzschia acicularis - Formenkreis	16856																																	
Nitzschia alpha HUSTEDT	6575								0.2																									
Nitzschia alpinobacillum LANGE-BERTALOT	16100																									0.2								
Nitzschia angustata (W.SMITH) GRUNOW	6991																																	
Nitzschia dealpha LANGE-BERTALOT & HORMANN	6584																																	
Nitzschia dissipata ssp. dissipata (KUETZING) GRUNOW	6008							0.4	0.4	0.4	0.2	0.8	0.2	0.6												0.2								
Nitzschia dissipata var. media (HANTZSCH) GRUNOW	6586																																	
Nitzschia fonticola GRUNOW	36154						0.2	0.4	0.4			0.6	0.8	0.6	0.6																			
Nitzschia lacuum LANGE-BERTALOT	6597							0.4																										
Nitzschia palea var. palea (KUETZING) W.SMITH	6011																																	
Nitzschia paleacea GRUNOW	6199	1.8				0.2	0.2																											
Nitzschia pura HUSTEDT	6918					0.4		0.4																										
Nitzschia pusilla GRUNOW	6925					0.2																												
Nitzschia recta var. recta HANTZSCH	6029								0.4																									
Nitzschia supralittorea LANGE-BERTALOT	6924																																	
Planorhithium lanceolatum (BREISSON ex KUETZING) LANGE-BERTALOT	26048																																	
Platessa conspiciua (MAYER) LANGE-BERTALOT	26015						0.2		0.4		0.2	0.2	0.4																					
Platessa hustedtii (KRASSKE) LANGE-BERTALOT	26084							0.2	0.2		0.4																							
Reimera sinuata (GREGORY) KOCIDLEK & STOERMER	36212							0.2																										
Sellaphora laevisima (KUETZING) D.G.MANN	36230								0.4	0.2																								
Sellaphora nigri (DE NOTARIS) C.E. WETZEL et ECTOR	100271							0.2				0.2	0.4																					
Sellaphora pupula var. pupula (KUETZING) WERESCHKOWSKY	16614							0.2	0.4			0.4																						
Sellaphora saueresii (PESMA) C.G. WETZEL et D.G.MANN	100270																																	
Stauroneis gracilis REICHARDT	16620																																	
Stephanodiscus minutulus (KUETZING) GRUNOW in CLEVE & MORLLER	6226	68.8	58.8	76.6	75.0	69.6	52.0	60.2	70.8	53.8	56.6	38.6	24.2	67.0	60.2	60.0	78.0	58.8	65	60.2	71	63.2	68.4	65.2	72.4	61.4	67.4	56.4	77	70.2	38.4			
Stephanodiscus parvus STOERMER & HAKANSSON	6940	2.6	1.6	2.6	1.6	0.4	0.4	2.8	1.0	4.6	1.8		1.0	1.8	5.2	4.6	3.8	6.2	6.8	7.4	3	4.6	3.6	2.6	3.2	1.8	4.8	0.4	4.8	0.8				

Anzahl gezählte Schalen	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Taxazahl	14	13	9	12	12	13	19	21	19	15	20	18	18	18	17	17	15	16	14	18	18	18	18	17	16	16	8	16	13	12	11
Diversität nach Shannon & Weaver (Berechnung: Log (Basis 2))	1.67	1.66	1.25	1.38	1.48	1.84	1.94	1.75	2.30	1.91	2.41	2.29	1.88	2.11	2.06	1.35	2.05	1.87	1.89	1.67	1.84	1.74	1.84	1.52	1.74	1.52	1.79	1.35	1.47	1.77	

Gesamtphosphor gemäss Rekonstruktion	47	47	41	34	35	38	28	28	28	28	28	24	23	25	28	29	30	29	33	35	32	32	30	28	33	32	37	25	36	29	19		
Gesamtphosphor [µg P/l] Minimum	80	78	71	59	60	64	46	46	46	46	47	39	38	42	46	49	52	49	56	59	54	54	49	47	56	53	63	42	62	49	32		
Gesamtphosphor [µg P/l] Mittelwert	134	131	123	101	101	106	76	76	76	76	78	63	61	69	77	81	87	81	94	100	91	91	82	78	94	89	108	70	105	83	56		
Gesamtphosphor [µg P/l] Maximum																																	