

## CHAPITRE IV

## DIE SEDIMENTE DES PFAFFORETSEES (PFYNGUT)

M. STRAUB, F. ANSELMETTI, L. WICK

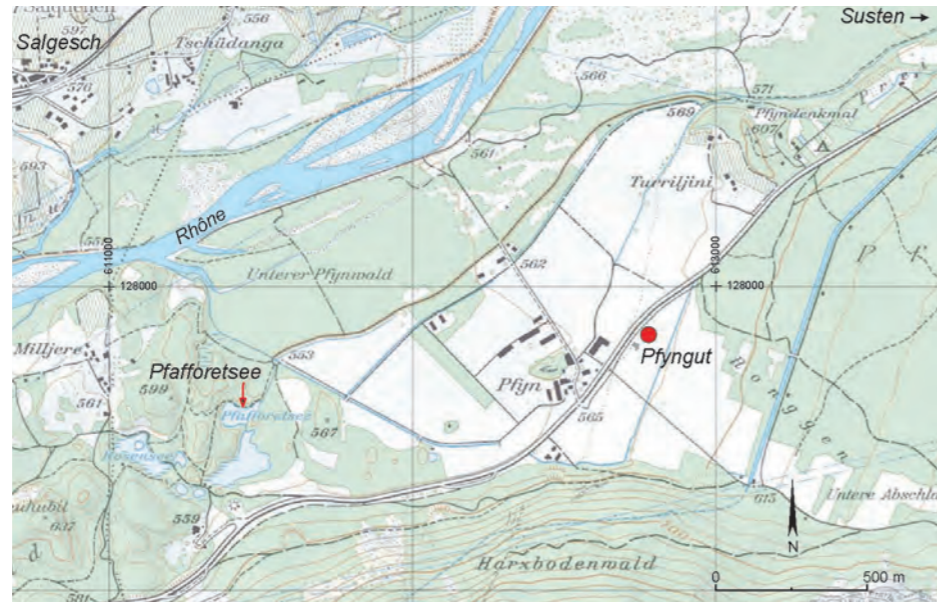


Fig. 0A — Situationsplan des Pfafforetsees und der Ausgrabungstätte Pfyngut.



Fig. 0B — Pfafforetsee von Osten.

## EIN ARCHIV VERGANGENER UMWELT- UND KLIMAÄNDERUNGEN

(M. STRAUB<sup>1</sup>, F. Anselmetti<sup>2</sup>)

## EINLEITUNG

## Motivation und Ziele

Durch die in der Umgebung durchgeführten archäologischen Ausgrabungen wurde das Interesse geweckt, mehr über den Zusammenhang zwischen den menschlichen Aktivitäten und den vergangenen Umweltbedingungen zu erfahren (Abb. 0a und 0b).

Seen sind geeignete Klimaarchive, da sich in ihren Sedimenten verschiedenste Informationen über die zur Zeit der Ablagerung herrschenden Verhältnisse speichern. Ziel dieser Studie ist, anhand der Sedimentanalysen eine möglichst genaue Rekonstruktion vergangener Klima- und Umweltverhältnisse zu gewinnen und die Ablagerungsbedingungen, beeinflusst durch die Umgebung des Sees, ausführlich zu beschreiben. Dazu werden die Seesedimente datiert, um ein Altersmodell über die verschiedenen Sedimentabschnitte zu erhalten, was eine Korrelation mit den Befunden der archäologischen Ausgrabungen ermöglicht.

Zu diesem Zweck wurde ein Gemeinschaftsprojekt zwischen ETH Zürich, Eawag und dem Büro TERA (Sion) initiiert, mit dem Ziel, die Sedimente des Pfafforetsees zu untersuchen.

## Seen als Klimaarchive

In Seen können verschiedene Sedimenttypen unterschieden werden, die durch unterschiedliche Ablagerungs-Mechanismen entstanden sind. Seen gelten als natürliche Archive für atmosphärische, terrestrische und aquatische Umweltprozesse, da sie diese in ihren Sedimenten aufgezeichnet und gespeichert werden. Die Sedimentabfolge eines Sees lässt deshalb Rückschlüsse auf frühere Umwelt- und Klimabedingungen zu<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Marietta Straub, *Department of Earth Science*, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich.

<sup>2</sup> Flavio Anselmetti, *Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz*, Dübendorf), Swiss Federal Institute of Aquatic Science & Technology, Zürich.

<sup>3</sup> MAGNY 2004.

## UNTERSUCHUNGSGEBIET

### Pfafforetsee

Der Pfafforetsee befindet sich im Pfyngwald, welcher sich auf einer Höhe von 500-700 m.ü.M. im Rhonetal zwischen Leuk und Sierre erstreckt. Er ist einer von 6 kleinen Seen des Pfyngwalds in der hügeligen Landschaft eines prähistorischen Felssturzes. Der See selbst liegt auf 555 m.ü.M. und besitzt eine mittlere Wassertiefe von 6 m, bei einer Fläche von  $\sim 3'800 \text{ m}^2$ <sup>4</sup>. Mit seinem Becken, welches eine maximale Tiefe von 12 m aufweist, ist der Pfafforetsee der tiefste der Pfyngseen, weshalb seine Sedimente für eine Untersuchung am vielversprechendsten erschienen. Gespiesen wird der Pfafforetsee durch Grundwasser und, zu einem kleineren Teil, von einem Ausfluss des Grosssees, welcher selbst von einem Ausfluss des Pumpseeils versorgt wird, der (heute) einen direkten Rhonewassereinfluss hat<sup>5</sup>.

### Geologie

Der Pfyngwald liegt zwischen zwei geologischen Haupteinheiten: einerseits grenzt er an die helvetischen Decken im Norden, andererseits an die penninischen Decken im Süden. Dazwischen befinden sich verschiedene quartäre Ablagerungen, wie der Illgraben-Schuttfächer in den flussaufwärts liegenden Gebieten oder die weit verbreiteten Schotterablagerungen der Rhone. Zusätzlich ist die Geologie des Pfyngwaldes im Gebiet der Pfyngseen durch Relikte eines Felssturzes geprägt, welcher vermutlich im Spätglazial<sup>6</sup> von der Nordseite her aus den Helvetischen Decken in das Rhonetal niederging. Über den Vorgang des Felssturzes gibt es verschiedene postulierte Szenarien<sup>7</sup>, und es existiert bis heute noch keine exakte Altersdatierung dieses Ereignisses. Die Pfyngwaldseen entstanden direkt nach diesem Felssturz auf der topographisch unregelmässigen Bergsturzmasse und bieten deshalb die Möglichkeit, anhand der Sedimente weit zurück in die Vergangenheit zu schauen.

### Methoden

Im Dezember 2006 wurde eine eintägige reflektions-seismische Aufzeichnung des Sees durchgeführt, um die Sedimentfüllung geophysikalisch zu analysieren und anschliessend die besten Kernentnahmestellen bestimmen zu können. Verwendet wurde ein Geoacoustic 3,5 kHz Einkanal Pinger-System. Eine akustische Quelle sendet dabei Signale aus, die am Seeboden und im Sediment reflektiert und wieder durch die Quelle als Empfänger aufgezeichnet werden. Die vertikale Auflösung beträgt  $\sim 10 \text{ cm}$ . Über den ganzen See wurden in einem engen Netz seismische Informationen aufgezeichnet, wodurch ein quasi-3D Datensatz gewonnen werden konnte. Im Frühling 2007 wurden an 4 verschiedenen Stellen im See Sedimentkerne entnommen, zwei davon auf der südlichen Flanke des Beckens, einer auf der nördlichen und ein letzter an der tiefsten Stelle in der Mitte des Beckens. Dazu wurde eine mobile Plattform mit einer Uwitec-Kernvorrichtung mit

Hilfe eines Helikopters auf den See transportiert (Abb. 1). Entnommen wurden an jeder der 4 Stellen ein Kurzkern, mit einer durchschnittlichen Länge von 1 m, sowie ein Langkern. Der längste Kern, gezogen in der Mitte des Sees, erreichte eine Gesamtlänge von fast 5 m. Alle Kerne wurden anschliessend für die Analysen an die ETH Zürich transportiert. Als erstes wurde mit einem Multi Sensor Core Logger (Geotek MSC.L) die Dichte und die Magnetische Suszeptibilität alle 5 mm gemessen. Anschliessend wurden die Kerne aufgeschnitten und verschiedene sedimentologische, geochemische und biologische Eigenschaften untersucht. Ausserdem wurde eine genaue visuelle Beschreibung der Kerne aufgezeichnet. Zusätzlich zu den visuellen, chemischen und physikalischen Untersuchungen wurde am IPNA Basel an den beiden Masterkernen (PFO7-1\_2 und PFO7-3) Proben für Pollenanalyse entnommen.

Die Korngrösse der Sedimente wurde mit einem laseroptischen Gerät (Malvern Mastersizer) bestimmt. An chemischen Analysen wurden XRD (X-Ray Diffraction), XRF (X-Ray Fluorescence), organischer und anorganischer Kohlenstoff, sowie C und O Isotopen Messungen durchgeführt. Mit Hilfe der XRD und XRF Analysen konnten genauere Informationen über die elementare und mineralogische Zusammensetzung des Sediments gewonnen werden, die Isotopen Analyse diente dazu, den Entstehungsmechanismus (biogen/anorganisch) des Kalkanteils genauer festzulegen. Um die Sedimentabfolge zu datieren, wurden 9 Radiokarbondatierungen gemacht, 7 am Kern 2 und je eine an den Kernen 3 und 4. Gemessen wurden terrestrische, pflanzliche Makroreste, wie beispielsweise Föhrenzapfen, Blattreste und Zweige. Die aus den Messungen gewonnenen Informationen wurden zum Schluss interpretiert und miteinander in Zusammenhang gebracht.



Fig. 1 — Kernplattform «Helvetia» mit Uwitec Hammer-Kolbenkernsystem.

4 BENDEL 2001.

5 BENDEL 2001.

6 BURRI 1997.

7 BURRI 1997 ; LUGEON 1910 ; NUSSBAUM 1942.

## Resultate

### Reflektions Seismik und Kernstellen

Basierend auf den seismischen Informationen wurde als erstes eine bathymetrische Karte des Sees interpoliert und mit Hilfe dieser Informationen wurden die Kernstellen bestimmt. Abbildung 2 zeigt das Netz der einzelnen seismischen Linien (links) sowie die bathymetrische Karte (rechts) des Sees mit den Kernlokalitäten (Abb. 2). An der tiefsten Stelle besitzt der See eine Wassertiefe von ~12 m. Die Beckenabhänge sind steil abfallend, die Randregionen eher flach.

Die seismischen Daten wurden nach dem Prozessieren in einzelne Linien aufgeteilt, was eine 2D Ansicht an verschiedenen Stellen im Seebecken erlaubt, in welchen man einzelne Sedimentlagen erkennen kann. Abbildung 3 zeigt einen typischen NW-SE Querschnitt durch das Seebecken (Abb. 3). Das Signal reicht in eine Tiefe von durchschnittlich 5 m, darunter werden die Reflektionen zu schwach. Es lassen sich durch gut verfolgbare Reflektionen mehrere Sediment-Pakete unterscheiden, abgetrennt durch die blauen Linien. Insgesamt werden 5 seismische Einheiten definiert, welche sich durch das ganze Seebecken hindurch ziehen. Die Einheiten weisen auf unterschiedliche Sedimentationsprozesse hin, die nicht an allen Stellen des Sees in gleichem Ausmass stattgefunden haben. Diese Pakete sind in randlichen Regionen mächtiger als im tiefen Becken.

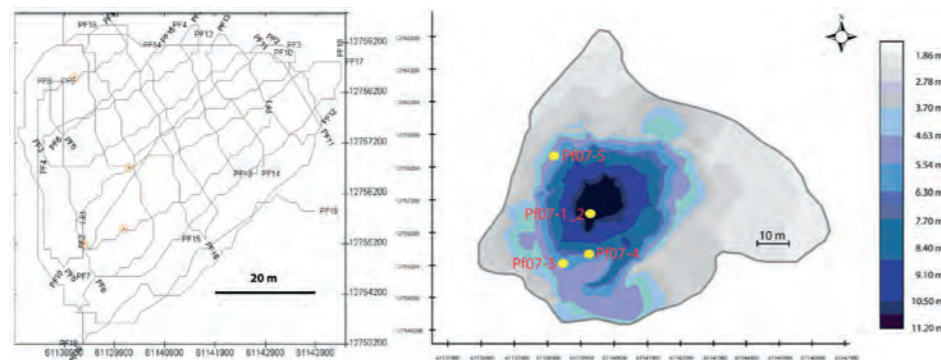


Fig. 2 — Links: Übersicht über seismische Linien des Sees. Rechts: Bathymetrische Karte Pfafforetsee, gelbe Markierungen kennzeichnen die einzelnen Kernstellen.

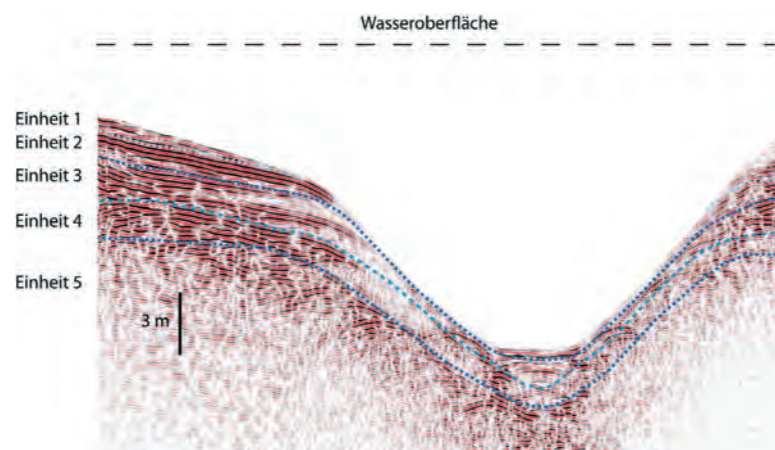


Fig. 3 — Seismischer Querschnitt durch das Seebecken, die fünf verschiedenen seismischen Einheiten sind durch blaue Linien gekennzeichnet.

### Sedimentkerne

Aus den 4 Langkernen wurden 2 Sedimentkerne als sogenannte Masterkerne bestimmt. Sie zeigen die ausführlichsten und längsten Sedimentationsabfolgen. Gewählt wurden Sedimentkern PF07-I\_2, aus der Mitte des Beckens, von nun an Kern 2 genannt, und PF07-3 (Kern 3) vom südlichen Rand. An diesen beiden Kernen wurden alle detaillierten Messungen durchgeführt. Der ~5 m lange Masterkern 2 besteht aus zwei 3 m langen Kernen, die unmittelbar nebeneinander entnommen wurden und sich überlappen. Der entsprechende Übergang sowie die Korrelation zu den anderen Kernen wurden anhand MSCl Daten und visuell-erkennbaren lithologischen Wechseln durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die beiden Masterkerne, welche in ca. 1 m lange Sektionen geschnitten wurden (Abb. 4). Gut erkennbar sind die deutlichen Sedimentwechsel innerhalb der Kernabfolgen. Unterschieden wird zwischen folgenden Sedimenttypen :

- braune, organisch-reiche Lagen
- reine Algenlagen
- helle, anorganische Lagen
- karbonatische Lagen

An der Basis von Kern 3 (sowie von Kern 5 und 4) sind zudem Schieferbruchstücke zu erkennen die bis zu ~3 cm gross sind. Markant sind die Übergänge zwischen dunklem, organisch-reichem Sediment zu relativ inorganischen, grauen, siltig-tonigen Abschnitten. Die oben erwähnten, verschiedenen Sedimenttypen können deshalb vereinfacht in zwei Haupt-Lithologien zusammengefasst werden, die beim Betrachten der Kerne sofort unterschieden werden können: graue, siltige Sektionen oder organische, braune Abschnitte.

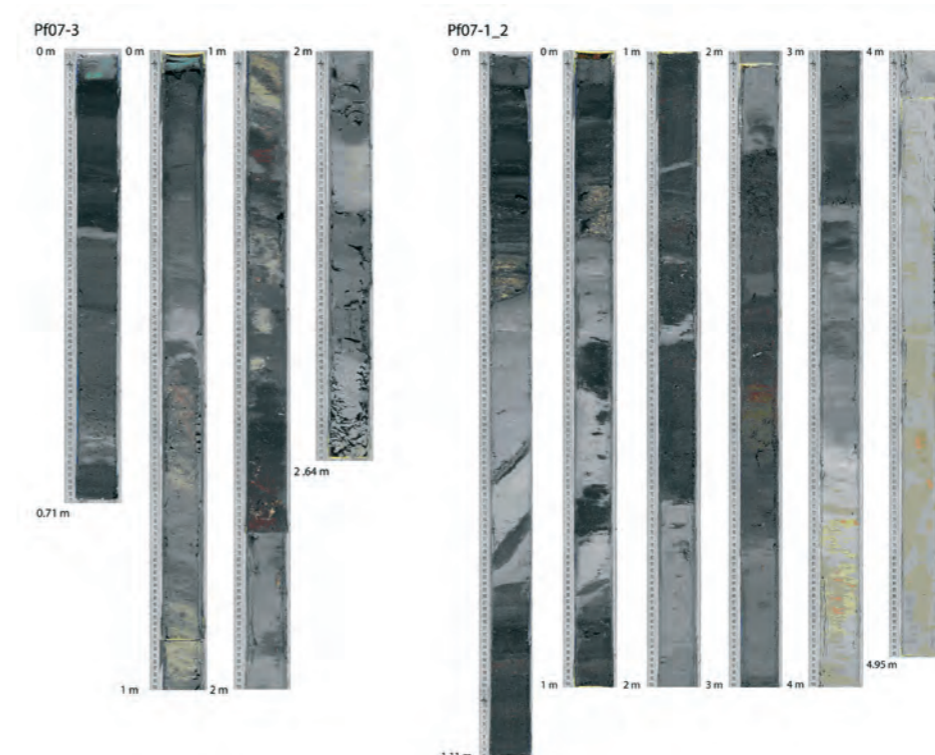


Fig. 4 — Übersicht über Masterkerne Kern 2 (PF07-I\_2) und Kern 3 (PF07-3).

### Physikalische und chemische Eigenschaften

**MSCL** : Die MSCL-Analyse wurde mit einer Auflösung von 5 mm gemessen. Die Resultate, welche die Dichte und die magnetische Suszeptibilität beinhalten, zeigen klare Unterschiede über die verschiedenen Sedimentabschnitte. Es lassen sich zwei klare Muster identifizieren :

1. Die Dichte und die magnetische Suszeptibilität sind hoch, in Bereichen wo das Sediment viel Karbonat oder siliklastisches Material enthält (graue Sedimentabschnitte).
2. Die Dichte und die magnetische Suszeptibilität sind tief, in Bereichen wo das Sediment hauptsächlich aus organischem Material besteht (braune Sediment Abschnitte).

Die MSCL Daten zeigen somit sehr deutlich die Wechsel von organisch-reichem zu anorganischem Sediment an. Weiter ist beim Kern 3 im untersten Abschnitt, wo sich die Schieferstücke befinden, ein markanter Anstieg der magnetischen Suszeptibilität zu beobachten (bis ca. 30 [SI]). Im Kern 2 findet man einen Abschnitt mit ähnlichen bzw. noch höheren Werten zwischen 2.5-3.4 m Tiefe (bis 80 [SI]). Die unterste Partie dieses Kerns weist hingegen tiefere Werte zwischen 10-15 [SI] auf.

**Korngrösse** : Die Korngrösse wurde mit einem Intervall von jeweils 5 cm gemessen, an einzelnen Stellen wurde eine höhere Auflösung (bis zu 1 mm) genommen. Wie schon die Resultate des MSCL, zeigen auch die Korngrössemessungen klar die Wechsel von organischem Sediment (Korngrössen bis 400 µm) zu anorganischem Sediment (Korngrössen bis zu 20 µm). Innerhalb der grauen, anorganischen Lagen sind keine grösseren Unterschiede zu erkennen, die meisten besitzen eine durchschnittliche Korngrösse zwischen 10-20 µm.

**XRD** : Mit Hilfe der XRD Messungen wurde versucht, mineralogische Unterschiede in den grauen, siltigen Lagen zu finden. Die Analysen ergaben für alle grauen, siltigen Abschnitte die gleiche Zusammensetzung, bestehend aus Quarz, Muskovit, Calcit und verschiedensten Tonmineralien. Kleinere Unterschiede wurden nur in der Tonmineralzusammensetzung erkannt. Abbildung 5 zeigt eine pseudo-3D Graphik, welche die graphische Zusammenstellung der XRD-Resultate einer Probe des Illgraben Schuttfächers (Probenname Illgraben) sowie von allen grauen Lagen des Kerns 2 aufzeigt (Abb. 5). Jeder Peak gehört zu einem Mineral, wobei ein Mineral mehrere sekundäre Peaks besitzen kann. Klar ersichtlich ist, dass alle Peaks in jeder Probe enthalten sind, was bedeutet, dass die mineralogische Zusammensetzung in allen Proben sehr ähnlich ist.

**XRF** : Um detaillierte Informationen über die elementare Zusammensetzung der Kerne zu bekommen, wurde eine XRF-Analyse durchgeführt. Gemessen wurden die Elemente Al, Si, S, Cl, K, Ca, Th, V, Cr, Mg und Fe mit einer Auflösung

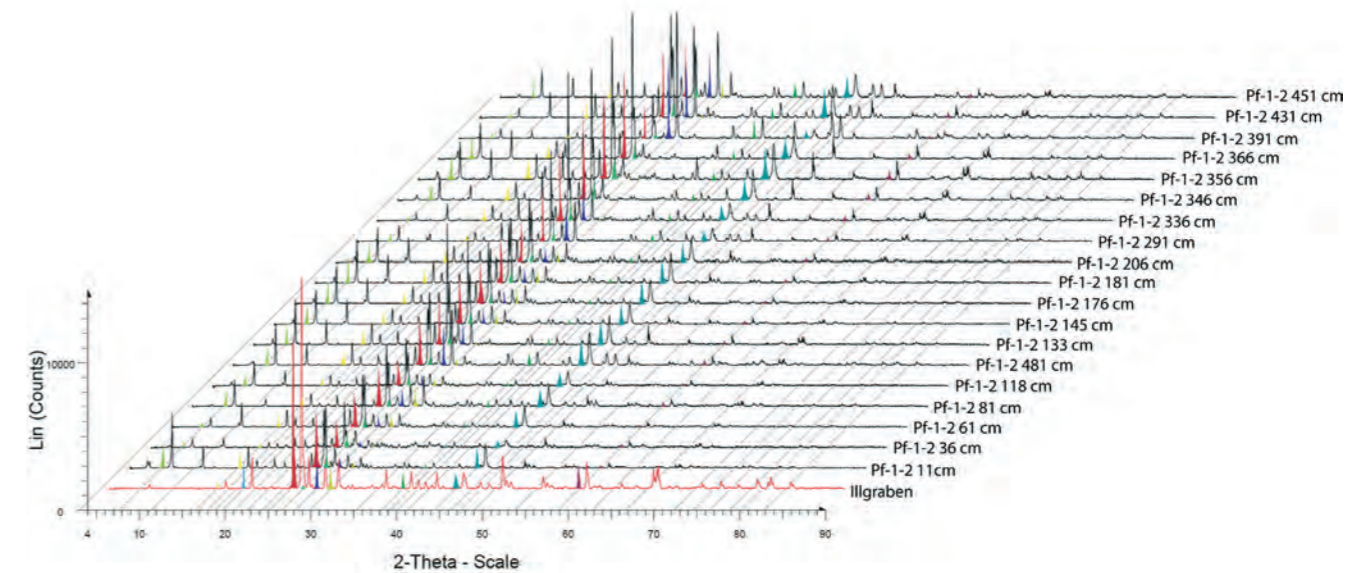


Fig. 5 — Übersicht XRD Resultate von Masterkern 2 (Pf07-1\_2), sowie einer Illgraben Schuttfächer Probe (erst Linie). Peaks kennzeichnen die verschiedenen Mineralien.

von 1 cm. Auch hier zeichnen sich zwei klare Muster ab. Alle grauen Lagen zeigen vergleichbare Anreicherungen an allen Elementen, die organischen Lagen zeigen deutlich weniger Elementanreicherungen. Überall bei den grauen, siltigen Lagen sind klare Peaks zu erkennen, und es ergeben sich ähnliche Muster wie bereits in den MSCL Kurven. Abbildung 6 zeigt Beispiele der XRF Kurven der Elemente des oberen Teils von Kern 2 (Abb. 6). Man erkennt klar die erhöhten Elementanteile in den grauen Lagen und man sieht deshalb eine deutliche 3-er Struktur im ersten Meter des Kerns, gleichlaufend zu den drei grauen, siltigen, 10-20 cm-dicken Lagen.

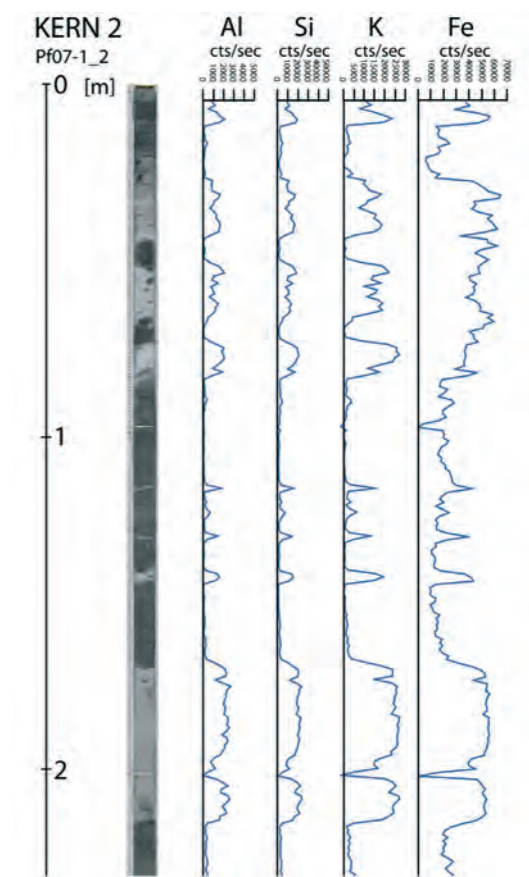


Fig. 6 — Ausschnitt XRF Daten der Elemente Al, Si, K und Fe. Deutlich erkennbar ist die Korrelation erhöhter Elementkonzentrationen zu den grauen, siltigen Sedimentabschnitten.

**Organischer und anorganischer Kohlenstoff:** Insgesamt wurde an 24 Proben in den grauen Lagen der beiden Masterkerne der Anteil an organischem und anorganischem Kohlenstoff gemessen (Tabelle 1 TOC/IC/OC). In den oberen 3 Metern zeigen beide Kerne überwiegende Anteile an anorganischem Kohlenstoff, es gibt aber überall geringe organische Anteile, und teilweise stehen die beiden Werte im Gleichgewicht. Kern 2 zeigt im untersten Abschnitt zwischen 4-5 m Sedimenttiefe ein deutliches anorganisches Signal. Der ausgeprägte tonig-siltige Sedimentabschnitt an der Basis des Kerns weist hingegen ebenfalls ein anorganisches Signal auf.

**Karbonatgehalt:** Aus den gleichen 24 Proben wie für den organischen/inorganischen Kohlenstoff wurde auch der Kalziumkarbonatgehalt berechnet, basierend auf dem Wert des inorganischen C-Gehalts. Der Karbonatgehalt zeigt starke Variationen zwischen 7 und 60% (Tabelle 1 Karbonatgehalt).

**c/o Isotopen:** Am Masterkern 2 wurden insgesamt 5 Isotopenmessungen gemacht, an Kern 3 eine als Vergleichswert. Beprobte wurden die grauen Sedimentabschnitte zuoberst, in der Mitte und zuunterst am Kern (61/81/181/391/451 cm Sedimenttiefe). Die Resultate zeigen 2 verschiedene Isotopensignaturen auf (Abb. 7). Drei Proben (61/81/181 cm PFO7-I\_2) zeigen leicht negative  $\delta^{13}C$  Werte und negative  $\delta^{18}O$ , was für eine biogene Produktion spricht, die restlichen Proben (391/451 PFO7-I\_2 und 181 PFO7-3) weisen ein detritisches Signal auf, gekennzeichnet durch positive  $\delta^{13}C$  und nur leicht negative  $\delta^{18}O$  Werte.

**C14 Datierungen:** Die älteste Datierung, in einer Sedimenttiefe von 4,22 m, ergab  $3280 \pm 75$  BP. Tabelle 2 zeigt die Resultate der C14 Datierungen mit den entsprechenden Kalibrationen.

Proben Name	CaCO3 total [%]	CaCO3 inorganisch	CaCO3 organisch %
Pf-1_2-11	18.333	13.967	4.367
Pf-1_2-36	18.583	9.742	8.842
Pf-1_2-61	19.483	24.858	-5.375
Pf-1_2-81	29.383	26.742	2.642
Pf-1_2-118	36.242	15.908	20.333
Pf-1_2-133	29.767	16.267	13.500
Pf-1_2-145	22.908	13.717	9.192
Pf-1_2-176	19.725	15.017	4.708
Pf-1_2-181	20.192	14.750	5.442
Pf-1_2-206	21.417	15.242	6.175
Pf-1_2-291	51.308	27.250	24.058
Pf-1_2-336	26.975	16.683	10.292
Pf-1_2-346	9.975	0.000	9.975
Pf-1_2-356	3.158	0.000	3.158
Pf-1_2-366	1.983	0.000	1.983
Pf-1_2-391	58.775	57.392	1.383
Pf-1_2-431	30.725	27.467	3.258
Pf-1_2-451	34.175	32.683	1.492
Pf-1_2-481	36.100	34.000	2.100
Pf3-44	9.625	7.525	2.100
Pf3-46	15.400	8.725	6.675
Pf3-191	65.650	42.792	22.858
Pf3-201	63.925	51.917	12.008
Pf3-221	67.517	60.992	6.525

Tabelle 1 — Karbongehalt einzelner Sedimentabschnitte in %. PF-I\_2 entspricht Kern 2, PF-3 Kern 3.

**Pollenanalyse:** Die Ergebnisse der Pollenanalyse zeigen die Umwelt- und Landschaftsentwicklung, sowie Spuren von menschlichen Aktivitäten von der Eisenzeit bis in die heutige Zeit.

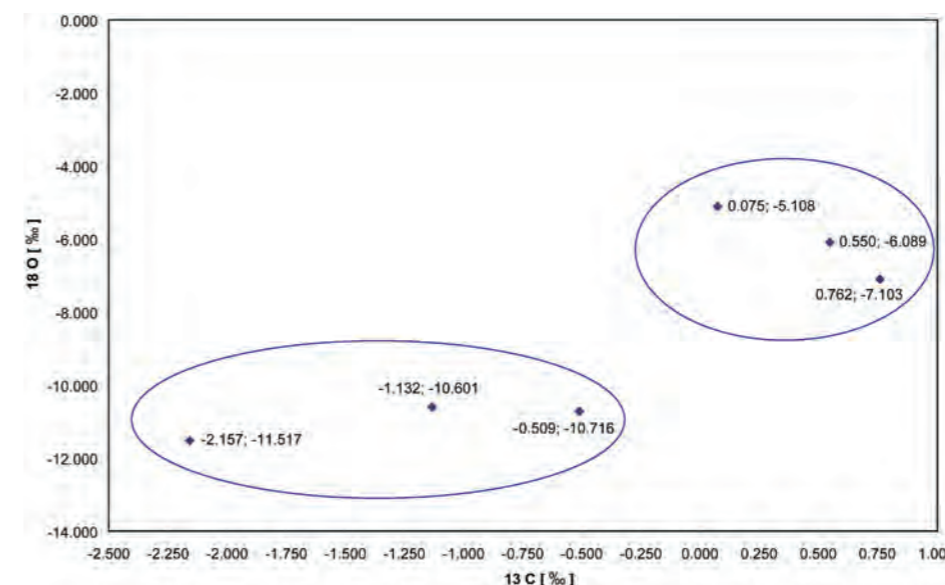


Fig. 7 — Isotopenanalyse Resultate.

Probenname	Sediment Kern	Tiefe [m]	Material	cal C-14 Alter BP	cal C-14 Alter BC/AD	95% Werte
Pf07C14-1A-96-98	Pf07-1-2	0.96-0.98	Makrofossilien, Pinus, Populus	1170 ± 40	780 AD	720 AD - 980 AD
Pf07C14-1B-38-40	Pf07-1-2	1.38-1.40	Makrofossilien, Pinus, Picea	1645 ± 40	305 AD	260 AD - 540 AD
Pf07C14-1B-68-70	Pf07-1-2	1.68-1.70	Makrofossilien, Betula twigs	1900 ± 40	50 AD	20 AD - 230AD
Pf07C14-1C-20-22	Pf07-1-2	2.20-2.22	Makrofossilien, pinus periderm	1870 ± 40	80 AD	50 AD - 240 AD
Pf07C14-2A-72-76	Pf07-1-2	2.72-2.76	Makrofossilien, picea	2330 ± 45	380 BC	750 BC - 200 BC
Pf07C14 2A-78	Pf07-1-2	3.04	Holz	2380 ± 50	430 BC	760 BC - 370 BC
Pf07C14 2C-13	Pf07-1-2	4.22	Holz	3280 ± 75	1330 BC	1740 BC - 1410 BC
Pf07C14 3C-25	Pf07-3	1.84	Holz	1615 ± 55	335 AD	260 AD - 570 AD
Pf07C14 4C-41	Pf07-4	2.38	Holz	2175 ± 55	225 BC	390 BC - 60 BC

C14 Alter (BP)--delta C13 korrigiertes radiokarbon Alter    BP= Before Present (vor 1950 AD)

Tabelle 2 — Resultate C14 Datierungen.

## Diskussion

Das Ablagerungsmilieu der 5 verschiedenen Hauptsedimenttypen wird folgendermassen interpretiert:

- braune, organisch reiche Lagen : Produktion im See, Algen, Diatomeen ;
- reine Algen-Lagen : Produktion im See, Algen-blütenereignisse ;
- helle, anorganische Lagen : Detritisch, Rhoneein-schwemmungen, Hochwässer ;
- karbonatische Lagen : «Seekreide», Frühlingsausfällung im See ;
- Schieferbruchstücke : Aufgearbeitetes Bergsturz-Material.

Für die Entstehung der Sedimente des Pfafforetsees gibt es deshalb mehrere Entstehungsszenarien: Nebst der normalen «authigenen», d.h. in der Wassersäule produzierten Sedimentation von organischem Material (Algen und andere Wasserpflanzen) oder biochemischer Produktion von Seekreide, können durch Überflutungen der Rhone Ablagerungen in die Seen «detritisch» eingetragen werden, was zu Überschwemmungslagen in der Sedimentabfolge führt. Zusätzlich kann es kleinere Rutschungen oder Felsstürze geben, die Material von den seitlichen Abhängen in den See eintragen. Die Ablagerungen in den See können nach einem Modell von Brönnimann<sup>8</sup> beschrieben werden, welches die Unterschiede in der Sedimentation während warmen und kalten Klimaphasen aufzeigt (Abb. 8). Die 5 verschiedenen Sedimentationstypen werden in zwei Hauptsedimentationstypen eingeteilt, mit allochthonen und autochthonen

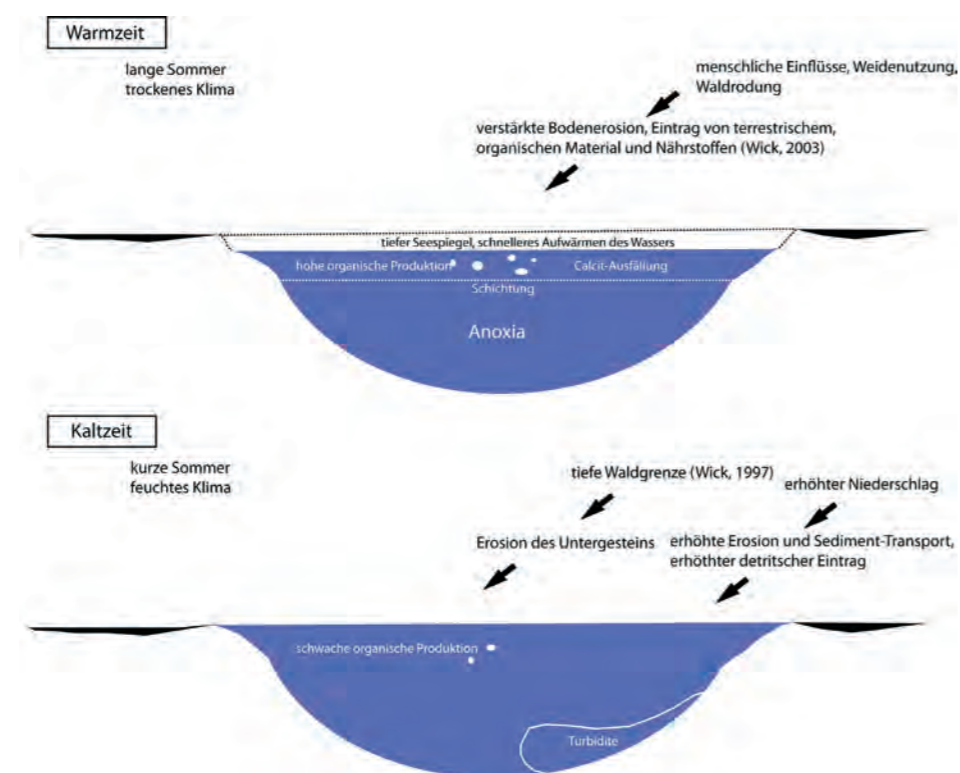


Fig. 8 — Klimamodell nach Brönnimann (2006). Abhängig von Warm- oder Kaltzeitbedingungen werden unterschiedliche Sedimentationstypen abgelagert.

Komponenten. Das detritische Sediment und das Felsturz-Material sind von ausserhalb eingetragen worden (allochthon), die organischen, biogenen, die Seekreide und algenreichen Lagen sind im See selbst entstanden (autochthon). Diese Sedimentationstypen, allochthon und autochthon, können jeweils mit spezifischen klimatischen Verhältnissen in Zusammenhang gebracht werden. Das organische, biogene und algenreiche Sediment wird mit warmen Klimaverhältnissen in Verbindung gebracht, das detritische Sediment und das an den Hängen abgerutschte Felsturz-Material wurden während kälteren und/oder nasserer Epochen abgelagert. Situation 1 in Abbildung 8 zeigt die Ablagerungsvorgänge während einer Warmzeit, die durch lange Sommer und trockenes Klima (oder: geringe Niederschlagsmengen) gekennzeichnet ist und deren Sedimentation hauptsächlich von organischem Material geprägt wird. Möglicherweise schlagen sich in diesen Sedimenten auch menschliche Einflüsse in Form eines erhöhten Eintrages an organischem Material und an Nährstoffen nieder, ausgelöst, durch vermehrte Weidenutzung und Kolluvialbildung nach Waldrodung und landwirtschaftlicher Nutzung (Kap. v, *Évolution sédimentaire et chronologique du site*). In Situation 2 sind die Sedimentationsbedingungen während einer kühlen Klimaphase dargestellt, die durch kurze Sommer und erhöhte Niederschlagsmengen charakterisiert ist. Hier wird, hauptsächlich bedingt durch eine geringere organische Produktion, mehrheitlich detritisches und anorganisches Material sedimentiert. Die Baumgrenze liegt deutlich tiefer, wodurch eine erhöhte Gesteinserosion erreicht wird. Menschliche Einflüsse wie Waldrodung und Weidenutzung sind vermutlich geringer, es wird weniger organisches Material in den See eingetragen, dafür treten vermehrt kleinere Rutschungen auf (Turbidite) und die Bodenbeschaffenheit ist allgemein instabiler. Zusätzlich führt erhöhter Niederschlag zu höheren Wasserständen in den Flüssen, und es treten vermehrt Überschwemmungen auf, welche detritisches Material im See ablagern können (Rhone-Einfluss im Pfyngwaldgebiet). Die beiden Haupt-Lithologien beschreiben diesen Wechsel zwischen feucht-kalten Klimaphasen (mit Sedimentation von detritischem Material) und trocken-warmen Abschnitten (mit Eintrag von organischem Material).

Interessant ist ein Vergleich der limnogeologischen Daten vom Pfafforetsee mit den rekonstruierten Gletscherkurven und Eisständen des Aletsch-Gletschers<sup>9</sup> und weiterer zentralalpiner Gletscher<sup>10</sup> sowie Waldgrenzenveränderungen<sup>11</sup> und Seespiegelschwankungen<sup>12</sup> (Abb. 9). Die Epochen der kleinen Eiszeit, der beiden Göschener Kaltphasen sowie des Löss-Intervalls konnten mit guter Übereinstimmung als helle detritische Intervalle in den Seesedimenten identifiziert werden. Besonders deutlich wird dies anhand der XRF Daten der Kerne. Die 3-er Struktur im ersten Meter des Kerns 2 wird dabei mit der kleinen Eiszeit in Verbindung gebracht. (Hinweis: auf dem Schwemmkegel des Illgraben-Fächers findet nach 1200 AD eine massive Überflutung und Ablagerung von Wildbachsedimenten statt. Dabei werden ältere, mittelalterliche Ackeroberflächen + Pfluspuren überdeckt. Nach diesem Ereignis findet nur noch Weidewirtschaft mit Bissenbewässerung und dadurch Akkumulation von bis über 1 m mächtigen Silten statt). Die grauen, siltigen Lagen werden mit guter Übereinstimmung

<sup>9</sup> HOLZHAUSER 1984.

<sup>10</sup> RÖTHLISBERGER 1986.

<sup>11</sup> WICK, TINNER 1997 ; HAAS *et al.* 1998.

<sup>12</sup> MAGNY 1995.

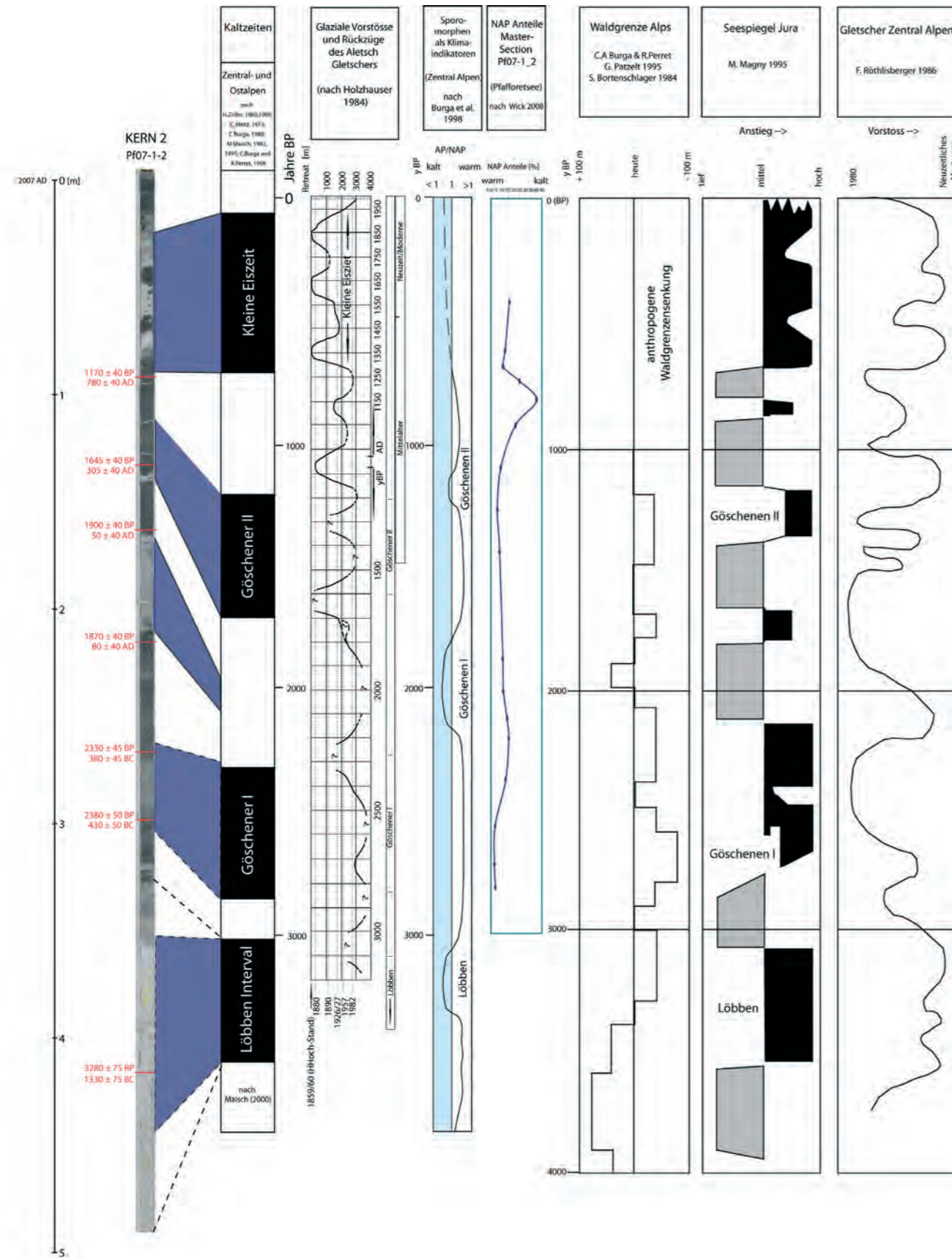


Fig. 9 — Übersicht Kern-Klima Korrelation. Kalte Klimaphasen sind durch graue, siltige Sedimentabschnitte gekennzeichnet, wärmere durch braunes Sediment, reich an organischem Material.

mit von der Literatur her bekannten kühl-klimatischen Zeitabschnitten korreliert. Dies scheint in der Sedimentationsgeschichte des Pfafforetsees überein zu stimmen. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht des Masterkerns 2, im Vergleich mit verschiedenen Klimaproxies und einer möglichen Korrelation zu den Kaltphasen der Kleinen Eiszeit, der Göschener Kaltphasen und des Löbber Intervalls. Zusätzlich angegeben sind auch die  $c_{14}$  Alter. Mit dem mehrfachen Wechsel von organischer Sedimentation zu grauem, siltigen Lagen zeichnet sich in den Seeablagerungen ein ähnliches Muster ab wie bei den klimatisch bedingten Gletscherschwankungen. Synchron zu Gletschervorstößen – als Folge kühl-feuchter Klimabedingungen –, werden demnach im Pfafforetsee die inorganischen detritischen Lagen gebildet, was mit unserem Ablagerungsmodell gut übereinstimmt. Anhand der Pollenanalyse konnten zusätzlich die Abschnitte definiert werden, in denen menschliche Einflüsse in der Umgebung des Pfafforetsees vermutet werden. Erste Kennzeichen, wahrscheinlich aus der Eisenzeit stammend, sind um  $380 \pm 45$  BC, in einer Sedimenttiefe von  $\sim 2,75$  m zu finden. Anthropogener Einfluss aus römischer Zeit in Form von Waldrodung und Weidenutzung wird in einer Sedimenttiefe von 2,20-2,57 m ersichtlich. Im darüberliegenden Kernabschnitt, zwischen 1,08-1,28 m Tiefe, liegen palynologische Anzeichen für mittelalterliche Landnutzung vor. Weitere Informationen über die Resultate der Pollenanalyse sind infra aufgeführt.

#### Zusammenfassung

Der Pfywald zeigt starke paläoklimatische Wechsel und Umweltveränderungen in der Vergangenheit. Nachdem sich die Region der Pfyseen auf dem Felssturzschild gebildet hatte, zeichnet sich das Gebiet durch mehrere Wechsel zwischen Epochen mit warmen/trockenen und kalten/nassen Klimaphasen aus. Die bekannten Kaltzeiten wie Kleine Eiszeit, Göschener I/II und Löbber sind in der Sedimentation des Pfafforetsees registriert und durch markante Wechsel von organischer zu anorganischer Sedimentation klar erkennbar. Der unterste Teil des Masterkerns 2 kann dem Zeitabschnitt der Kaltzeit des Löbber Intervalls zugeordnet werden ( $\sim 3000$  Jahre und älter). In dieser Sektion sind keine Anzeichen für anthropogene Einflüsse im Gebiet erkennbar. Im darüberliegenden Abschnitt war das Klima vermutlich wärmer, die Sedimentation ist hauptsächlich durch organisches Material geprägt. In diesem Abschnitt finden sich erste menschliche Spuren. Die siltige, tonige Sektion darüber wird in Verbindung mit der Göschener Kaltphase I gesetzt, wieder gefolgt von einer wärmeren Epoche. Zwischen 2,20 und 1,68 m besteht das Sediment ebenfalls aus siltigem, tonigem Material. Dieser Abschnitt wurde innerhalb sehr kurzer Zeit abgelagert (siehe  $c_{14}$  Datierungen), möglicherweise handelt es sich um eine kleinere Rutschung oder, wahrscheinlicher, um eine oder mehrere Überschwemmungslagen der Rhone. Darüber wird die Göschener Kaltphase II eingeordnet, gefolgt von einer wärmeren Epoche mit organischer Sedimentation bis ca. 0,80 m, danach folgt das Intervall der Kleinen Eiszeit (3-er Struktur mit den siltigen, grauen Lagen), und zuletzt, im obersten Teil ist der Abschnitt der heutigen Moderne zu finden.

## LANDNUTZUNG UND UMWELTVERÄNDERUNGEN VON DER EISENZEIT BIS ZUM MITTELALTER. PALÄOÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM PFYNWALD.

(L. Wick<sup>13</sup>)

### EINLEITUNG

Das Wallis zählt nicht nur zu den ältesten Kulturlandschaften der Schweiz, sondern ist dank seiner zentralalpiner Lage und dem sonnigen, kontinental geprägten Klima auch botanisch und umweltgeschichtlich von besonderem Interesse. Seit sich neolithische Bauern im Rhonetal niederliessen und die ersten Wälder rodeten, hat sich die Landschaft unter dem Einfluss des Menschen kontinuierlich verändert, zuerst in den tieferen Lagen, und im Laufe der Zeit auch in der montanen und subalpinen/alpinen Stufe. Bis zur Entwicklung von Tourismus und Industrie und dem Ausbau der Wasserkraftnutzung ab Mitte des 20. Jahrhunderts war das Tal geprägt von kleinräumiger bäuerlicher Bewirtschaftung mit traditionellen sozioökonomischen Strukturen.

Im Zusammenhang mit den archäologischen Untersuchungen der bis in die Eisenzeit zurückgehenden Siedlungstätigkeit im Weiler Pfyngut und den zahlreichen Spuren landwirtschaftlicher Aktivitäten tauchten Fragen auf nach der Lebens- und Wirtschaftsweise der damaligen Bevölkerung und ihrer Beziehung zur Umwelt. Antworten auf diese Fragen können mit palynologischen Untersuchungen an Seesedimenten gefunden werden. Sie geben Auskunft über die Entwicklung von Vegetation und Landschaft in der Umgebung des Sees. Natürliche und anthropogene Veränderungen, wie Änderungen in der Struktur der Wälder und Waldauflichtungen durch Rodungen, Feuer oder Weidewirtschaft spiegeln sich im Artenspektrum des Pollenniederschlags in den Seesedimenten wider. Da die Tallagen des Wallis im Laufe der Jahrtausende immer wieder durch Hochwasser der Rhone überschwemmt wurden und der Mensch natürliche Feuchtstandorte trocken legte, gibt es nur vereinzelt Torf- oder Seeablagerungen, in denen die Umweltgeschichte ungestört dokumentiert ist. Dazu gehört der Pfafforetsee im Pfyngwald. Er liegt im Gebiet des prähistorischen Bergsturzes von Sierre, etwa 1,2 km westlich der archäologischen Fundstelle Pfyngut. Ziel der sedimentologischen und palynologischen Untersuchungen am Pfafforetsee war es, Informationen darüber zu erhalten, wie die Menschen die natürlichen Ressourcen des Waldes nutzten, und wie sich die Landschaft infolge der menschlichen Aktivitäten wie Waldrodungen, Ackerbau und Beweidung im Laufe der Zeit veränderte. Ausserdem sollte der Einbezug der Klimageschichte der vergangenen Jahrtausende die Zusammenhänge zwischen Klima, Besiedlung, Wirtschaftsweise und Landschaftsentwicklung aufzeigen.

### DIE SPÄT- UND POSTGLAZIALE VEGETATIONS- UND LANDSCHAFTSENTWICKLUNG IM WALLIS

Der grösste Teil unserer Kenntnisse über die Vegetationsgeschichte im Wallis seit dem Rückzug der Gletscher am Ende der letzten Eiszeit gehen auf die Untersuchungen von Welten<sup>14</sup> in den 1960er und 1970er Jahren zurück. Allerdings liegen die meisten der bearbeiteten Lokalitäten in den

mittleren und oberen Höhenlagen, also oberhalb von 1000 m ü.M., da die mäandrierende Rhone allfällig vorhandene Sedimentationsbecken auf dem Talboden regelmässig entweder ausräumte oder mit Flussablagerungen überdeckte. Das einzige vollständige und datierte Pollendiagramm, das die Vegetationsentwicklung der letzten ca. 15'000 Jahre zeigt, stammt vom Lac de Montorge (640 m ü.M.), einem kleinen See auf der Talflanke oberhalb von Sion<sup>15</sup>. Die jüngeren Untersuchungen konzentrierten sich vor allem auf den Nachweis von Waldgrenz- und Klimaschwankungen in subalpinen-alpinen Stufe (e.g. WICK, TINNER 1997 ; KALTENRIEDER *et al.* 2005). In engerem Bezug zu der vorliegenden Arbeit stehen die Untersuchungen an einem Kurzkern vom Pfafforetsee zur Wald- und Feuergeschichte der letzten paar Jahrhunderte (BENDEL *et al.* 2006) und die hochauflösenden Pollen- und Holzkohleanalysen am Lac de Montorge (CURDY *et al.* 2009). Letztere umfassen ungefähr den gleichen Zeitraum wie der neue Bohrkern vom Pfafforetsee und ermöglichen somit einen direkten Vergleich von Vegetationsentwicklung und Landnutzung zwischen der südexponierten, intensiv genutzten Kulturlandschaft um Sion und der eher kargen, von Föhrenwald bedeckten und wiederholt von Hochwassern der Rhone und Schüttungen aus dem Illgraben betroffenen Landschaft des Pfyngwaldes.

Die spätglaziale Vegetationsentwicklung verlief im Wallis ähnlich wie in anderen Regionen Mitteleuropas: nach dem Rückzug des Rhonegletschers vor ca. 15'000 Jahren wuchs auf den Rohböden im Tal eine lockere Pioniervegetation mit Beifuss und Zwergsträuchern. Eine erste markante Klimaerwärmung um ca. 12'600 BC begünstigte die Ausbreitung von Sträuchern, wie Sanddorn und Wacholder, die schon nach kurzer Zeit von den ersten lichten Birkenwäldern verdrängt wurden. Ab etwa 12'000 BC bildete die Waldföhre (*Pinus sylvestris*) im ganzen Tal und an den Talhängen ausgedehnte Wälder, denen in den höheren Lagen Birken, Arven und Lärchen beigemischt waren. Die maximale Höhenlage der Waldgrenze lag vermutlich bei etwa 1500 m ü.M.<sup>16</sup>. Ein letzter spätglazialer Klimarückschlag, die jüngere Dryas (ca. 10'600 - 9500 BC) verursachte eine vorübergehende Auflichtung der Wälder. Die rasche Klimaerwärmung zu Beginn des Postglazials ermöglichte die Einwanderung und Ausbreitung von Eichen und anderen mesophilen Laubgehölzen. Auf den tiefgründigeren Böden wurden die Föhrenwälder durch Eichenwälder ersetzt, und an den eher schattigen, feuchteren Standorten breiteten sich Ulmen, Eschen und Erlen aus. Welten<sup>17</sup> geht davon aus, dass auf dem Schuttfächer des Illgrabens und dem Blockschutt des prähistorischen Bergsturzes die Waldföhre gegenüber der Eiche im Vorteil war und der Pfyngwald – heute das grösste zusammenhängende Föhrenwaldgebiet Europas – ein Relikt der späteiszeitlichen Föhrenwälder ist.

An den etwas feuchteren Lagen der montanen Stufe bildeten sich ab ca. 6500-5500 BC Weissstannen- und Buchenbestände aus; sie erreichten im Wallis jedoch nie die grosse Bedeutung, die sie in den nördlichen und südlichen Alpentälern und im Alpenvorland hatten.

Ab dem mittleren Holozän sind in den Pollendiagrammen aus dem Wallis die ersten Spuren menschlicher Aktivitäten zu erkennen: die Wälder werden aufgelichtet, und die Pioniergehölze Birke, Hasel und Erle werden

<sup>13</sup> Lucia Wick, palynologue, Institut für Prähistorische und Naturwissenschaftliche Archäologie (IPNA), Universität Basel.

<sup>14</sup> WELTEN 1982.

<sup>15</sup> WELTEN 1982.

<sup>16</sup> WELTEN 1982 ; WICK 2000.

<sup>17</sup> WELTEN 1982.



häufiger. Gleichzeitig weisen Pollenfunde von Getreide und Acker- und Weideunkräutern auf Ackerbau und Viehhaltung hin. An den meisten untersuchten Lokalisationen sind diese Hinweise auf neolithische Landwirtschaft ab etwa 4300 BC erkennbar; im Profil vom Lac de Montorge hingegen wurde der Beginn der regelmässigen Getreidepollenfunde auf 6000-5500 BC datiert. In der Bronzezeit (ab ca. 1700 BC) nahm der menschliche Einfluss auf die natürliche Vegetation deutlich zu; die Ackerflächen wurden vergrössert und die Weidegebiete ausgedehnt. Die starke Zunahme von Lärchenpollen lässt auf die Entstehung der sogenannten Lärchwiesen in der oberen montanen und subalpinen Stufe schliessen. In diese Periode fällt auch der Beginn der Alpwirtschaft. Während im Neolithikum die alpinen Rasen nur extensiv genutzt wurden, wurde in der Bronzezeit die Waldgrenze um mehrere hundert Meter abgesenkt, um Weideflächen für das Vieh zu schaffen.

Das Pollendiagramm vom Lac de Montorge zeigt seit der Bronzezeit eine zunehmende Nutzung und Zerstörung der ursprünglichen Wälder; die Region um Sion erhielt bis im Mittelalter schliesslich das heutige Gesicht einer intensiv genutzten Kulturlandschaft. Ob sich diese Entwicklung auf klimatisch und edaphisch bevorzugte, für Ackerbau (und später Weinbau) besonders geeignete Regionen im Wallis beschränkte, und wie die weniger produktiven Gebiete wie der Pfywald genutzt wurden, ist eine der Fragen, welche die Untersuchungen am Pfafforetsee beantworten sollen.

#### DER PFAFFORETSEE UND SEINE UMGEBUNG

Das Gebiet des Pfywaldes erstreckt sich über den mächtigen Schuttfächer des Illgrabens und das hügelige Gelände des prähistorischen (vermutlich späteiszeitlichen) Bergsturzes von Sierre, bei welchem grosse Felsmassen vom Nordhang des Tales am Fusse des Gorwetschs abgelagert wurden. Ausserdem bedeckt er die mächtigen Alluvionen der Rhone im Bereich der Siedlung Pfy zwischen dem Schuttfächer und dem Bergsturzgebiet und in der Talebene südlich der Rhone.

Der Pfafforetsee ist einer von mehreren kleinen Seen, die sich auf dem wasserundurchlässigen Felssturzmaterial gebildet haben. Seine maximale Wassertiefe beträgt 11,2 m und die Wasseroberfläche ca. 3780 m<sup>2</sup>. Die heutige Vegetation in der Umgebung des Sees besteht hauptsächlich aus mehr oder weniger offenem Föhrenwald (*Pinus sylvestris*) auf überwiegend flachgründigen, sandigen und nährstoffarmen Böden. Die für das warmkontinentale Klima des Wallis charakteristische Flaumeiche (*Quercus pubescens*) bildet hier nur einzelne kleine Bestände auf edaphisch günstigen Standorten. Die traditionelle Bewirtschaftung des Föhrenwaldes – die Beweidung mit Ziegen und Schafen, Streunutzung und die Verwendung von Misteln als Tierfutter und Medizinalpflanze – wurde bis über die Mitte des letzten Jahrhunderts hinaus praktiziert. Die Waldföhre, die als Pionierbaum auf den durch regelmässigen Nährstoffentzug und Viehtritt beeinträchtigten Böden einen Konkurrenzvorteil besass, wird seit der Aufgabe dieser Nutzungsform im Pfywald und in den anderen Föhrenwaldgebieten des Wallis allmählich von der Flaumeiche verdrängt<sup>18</sup>.

Der Pfafforetsee liegt rund 1,2 Kilometer westlich des Weilers Pfy, und das heutige Kulturland reicht bis etwa 300 m an den See heran. Diese Entfernungen sind zu gross, als dass sich in den Seesedimenten einzelne Ereignisse aus dem Bereich der Siedlung widerspiegeln könnten; Waldrodungen und andere grössere Eingriffe in die umliegende Vegetation, sowie Anpassungen der Wirtschaftsweise und die damit verbundenen landschaftlichen Veränderungen dürften jedoch nachweisbar sein.

Mit einer Höhenlage von 555 m ü.M. liegt der See im Hochwasserbereich der Rhone. Häufigkeit und Ausmass der in den Sedimenten erkennbaren Hochwasserereignisse ermöglichen Rückschlüsse auf die regionale Klimaentwicklung.

#### UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Nach umfangreichen bathymetrischen und seismologischen Untersuchungen wurden mit einem UWITEC Kolbenbohrsystem der ETH Zürich mehrere Sedimentkerne aus dem Pfafforetsee gezogen und sedimentologisch untersucht. An dem mit einer Gesamtlänge von 4,95 m vollständigsten Bohrkern PFO7-I\_2 aus dem zentralen Teil des Sees wurden parallel zu den Sedimentanalysen auch Proben für die Pollenanalyse und Radiokarbondatierungen entnommen.

Bei den Voruntersuchungen erwiesen sich die stark minerogenen Sedimente im untersten Kernbereich (unterhalb von 340 cm) als weitgehend pollenleer und für weitere Untersuchungen ungeeignet. Da die letzten paar Jahrhunderte am Pfafforetsee Gegenstand einer früheren Untersuchung an der Universität Bern waren<sup>19</sup>, wurde darauf verzichtet, diesen Zeitabschnitt am Profil PFO7 nochmals zu analysieren.

Für den Zeitraum von der Eisenzeit bis etwa 800-900 AD wurden insgesamt 124 Pollenproben von je 1 cm<sup>3</sup> entnommen, und zwar in Abständen von 1-4 cm, wobei die Beprobung in den eisenzeitlichen und römerzeitlichen Abschnitten am dichtesten war. Die zeitliche Auflösung der Analysen beträgt in den am dichtesten beprobten Abschnitten etwa 10 Jahre. Die Pollenproben wurden im Labor für Archäobotanik des Landesamtes für Denkmalpflege in Hemmenhofen (Baden-Württemberg) nach den in der Paläobotanik üblichen Methoden aufbereitet. Für die Berechnung von Pollen- und Holzkohlekonzentrationen wurden Tabletten mit standardisierten Mengen von *Lycopodium*-Sporen zugegeben. Bei der mikroskopischen Analyse wurden im allgemeinen Pollensummen von 700-800 Pollenkörner pro Probe ausgezählt, wobei Pollen von Schwarzerle (*Alnus glutinosa* t.), von Sauergräsern (*Cyperaceae*) und Wasserpflanzen, sowie Sporen von Farnen, Moosen und Pilzen nicht in der Pollensumme eingeschlossen sind. Zusätzlich zu den Pollen wurden mikroskopische Holzkohlepartikel und die Sporen einiger Pilze (Ascomyceten) mitgezählt.

Im Pollendiagramm (Abb. 10) sind alle Taxa als Prozentwerte dargestellt, bezogen auf die Pollensumme bestehend aus Bäumen (exkl. *Alnus glutinosa*), Sträuchern, Kräutern und Gräsern. Die mikroskopische Holzkohle ist als Anzahl Partikel (Konzentration) pro cm<sup>3</sup> Sediment angegeben. Sie ist ein Mass für die Stärke, bzw. Häufigkeit von anthropogenen und / oder

<sup>18</sup> GIMMI, BÜRGI 2006; RIGLING *et al.* 2006; GIMMI *et al.* 2008.

<sup>19</sup> BENDEL *et al.* 2006.

natürlichen Bränden im Einzugsgebiet des Sees.

Zur besseren Übersicht und Abgrenzung der einzelnen Phasen der Vegetationsentwicklung wurde das Pollendiagramm in Pollenzonen (PAZ = *pollen assemblage zones*) unterteilt.

Die  $^{14}\text{C}$ -Datierungen an terrestrischen Pflanzenresten wurden am AMS Radiocarbon Dating Lab der ETH Zürich durchgeführt. Die Kalibration der Daten erfolgte mit dem Programm Calib 6.0 (STUIVER *et al.* 2005). Die Daten sind im Pollendiagramm als kalibrierte Alter AD/BC mit einem 68,2% Vertrauensintervall angegeben.

## ERGEBNISSE

Die untersten ca. 150 cm des Bohrkerns (4,95 - 3,40 m) enthalten minerogene Sedimente, die wahrscheinlich bei Hochwasser der Rhone abgelagert wurden. Ihr Pollengehalt ist so gering, dass keine Analysen durchgeführt werden konnten (Abb. 10).

Die Basis des Pollendiagrammes (PAZ-1) zeigt mit 70-85% *Pinus*-Pollen einen mehr oder weniger intakten Föhrenwald. Recht hohe Prozentwerte erreichen auch die montan-subalpinen Nadelhölzer Fichte, Lärche, Arve und Weisstanne. Der Anteil der Nichtbaumpollen (NBP) ist gering, und Hinweise auf anthropogene Eingriffe in der Umgebung des Pfafforetsees sind nur spärlich vorhanden.

Der Übergang zu PAZ-2 ist durch einen markanten Rückgang der Waldföhre gekennzeichnet. Gleichzeitig nehmen der prozentuale Anteil und die Diversität der NBP zu. Sie deuten auf Waldauflichtungen, Beweidung (e.g. *Pteridium aquilinum*, *Plantago lanceolata*, *Cichoriaceae*) und die Entstehung von offenen Ruderalstandorten (*Chenopodiaceae*, *Daucus carota*, *Artemisia*) hin. Bei den Sträuchern fällt die Ausbreitung des Sanddorns (*Hippophaë rhamnoides*) auf; er wächst auf sandigen Böden in lichten Föhrenwäldern und als Pionierpflanze auf Sand- und Kiesbänken entlang von Bächen und Flüssen. Bemerkenswert hohe Prozentwerte erreicht in dieser Pollenzone auch der Wacholder (*Juniperus communis*), der als typischer Zeiger für Waldweide gilt. Zahlreiche Funde von *Juniperus*-Stomata (Spaltöffnungen) belegen das lokale Vorkommen des Strauches, und zusammen mit den grossen Mengen an Sporen koprophiler Pilze (*Podospora*, *Cercophora*, *Sporormiella* und *Sordaria*) bildet er einen deutlichen Hinweis auf eine recht intensive Beweidung des Waldes im Umkreis des Pfafforetsees. Die vereinzelt Getreidepollenkörner weisen auf Ackerbau im Tal hin; ob sie von Getreidefeldern im Bereich des Weilers Pfyngut stammen oder auf Ferntransport aus anderen Talregionen zurückzuführen sind, lässt sich nicht entscheiden.

Die nachfolgende Pollenzone (PAZ-3) beginnt um ca. 390 BC und zeigt eine etwa 100 Jahre dauernde Periode mit nur geringem menschlichem Einfluss. Der Föhrenwald kann sich in dieser Zeit wieder regenerieren, und der lichtliebende Wacholder verschwindet weitgehend. Getreidepollen kommt nur noch sporadisch vor.

Eine neue Nutzungsphase zeichnet sich in PAZ-4a/b ab. Sie beginnt etwa um 300 BC und unterscheidet sich von PAZ-2 insofern, als die teilweise extrem hohen Holzkohlekonzentrationen auf den regelmässigen Gebrauch von

Feuer hinweisen. Eine Zunahme der Gräser und ein breites Spektrum an Sträucher- und Kräuterpollen, verbunden mit dem kontinuierlichen Rückgang der Waldföhre von rund 75% auf 15%, lassen auf massive Waldrodungen und die Auffichtung der verbleibenden Waldgebiete schliessen. Bemerkenswert ist neben den ungewöhnlich hohen Pollenwerten der Mistel (*Viscum album*) vor allem die synchrone Ausbreitung der Laubgehölze Birke, Eiche, Hasel, Erle und Rotbuche. Sie steht vermutlich in direktem Zusammenhang mit dem Einsatz von Feuer in der Landnutzung und den damit verbundenen Änderungen im Nährstoffgehalt der Böden. Hinweise auf diese Veränderungen liefern auch Nährstoffzeiger unter den NBP, die hier erstmals auftauchen, wie zum Beispiel die Brennessel. Eine besonders intensive Rodungs- und Nutzungsphase ist in PAZ-4b zu erkennen, die etwa in der Mitte des 2. Jh. BC einsetzt und bis gegen Ende des 1. Jh. BC andauert. Der Anteil an NBP – es handelt sich dabei vor allem um Vertreter von Ruderalgesellschaften, Grünlandzeiger und Ackerunkräuter – steigt auf 25-30% an. Auch die Getreidewerte nehmen etwas zu. Die ersten Pollenkörner des Walnussbaumes (*Juglans regia*) und des Roggens (*Secale cereale*) treten auf, und die regelmässigen Pollenfunde der Weinrebe (*Vitis* sp.) setzen ebenfalls hier ein. Diese Veränderungen deuten auf eine Intensivierung der Landwirtschaft hin, die mit einer Ausweitung der Ackerflächen und der Grünlandwirtschaft und der Einführung von neuen Kulturpflanzen verbunden ist. Die Auswirkungen dieser verstärkten Landnutzung auf die Landschaft sind in den Sedimenten des Pfafforetsees sichtbar: die Einschwemmungen von allochthonem Material zwischen 235 und 239 cm Sedimenttiefe deuten auf fortschreitende Bodenerosion hin.

Ein reiches Artenspektrum an Sträuchern und Kräutern von verschiedenen offenen und halboffenen Standorten weisen darauf hin, dass die Intensivierung der Landnutzung und die Änderungen der landwirtschaftlichen Methoden im Verlaufe der rund 300 Jahre in PAZ-4 zu einer hohen Diversifizierung der Landschaft führten. Hecken, Gebüsche, Waldsäume bildeten neben Äckern, Wiesen und Weiden einen wesentlichen Bestandteil der Landschaft, während naturnahe Waldgebiete im Pfyngwald wohl nur noch an unzugänglichen Stellen überdauerten.

Im Pollendiagramm vom Pfafforetsee sind für diese Zeit auch menschliche Eingriffe im subalpinen Wald zu erkennen: Fichte, Lärche und Arve gehen deutlich zurück, während die Grünerle sich auszubreiten beginnt. Dies sind Hinweise darauf, dass die Waldgrenze abgesenkt wurde, um die Alpweideflächen für das Vieh zu vergrössern<sup>20</sup>.

Auf die Phase der Landschaftsöffnung und Änderung der Wirtschaftsweise in PAZ-4 folgt in PAZ-5 (ca. 10 - 230 AD) eine stabile Periode mit relativ intensiver landwirtschaftlicher Aktivität, aber ohne weitere Eingriffe in die Landschaft. Verhältnismässig niedrige Föhrenwerte und die starke Präsenz der Birke sind Hinweise auf die andauernde Nutzung des Pfyngwaldes. Häufigkeit und Ausmass von anthropogenen Feuern sind jedoch wesentlich geringer als in PAZ-4. Die hohen, aber kontinuierlich abnehmenden Pollenprozentanteile von Wacholder und andere Weidezeiger, wie der Spitzwegerich, lassen darauf schliessen, dass (Wald-)Weide – und damit die Viehhaltung – nach wie vor eine wichtige Rolle spielte. Daneben dürfte in der Umgebung des Weilers Pfyng

PFAFFORETSEE PF07

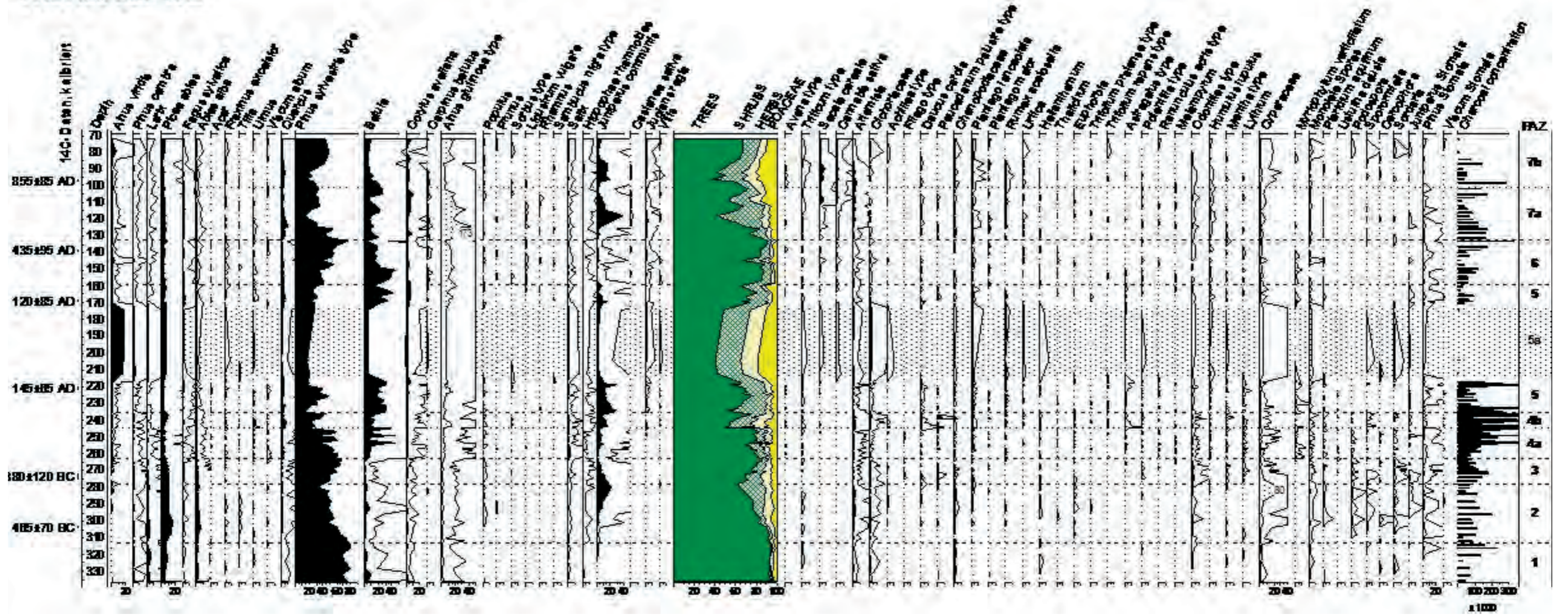


Fig. 10 — Pollendiagramm des Pfafforetsees.

auch Getreidebau betrieben worden sein, wobei die sporadisch auftretenden Pollenkörner des Roggens jedoch nicht unbedingt lokalen Anbau belegen. Im Gegensatz zu den anderen, selbstbestäubten Getreidearten wird der Pollen des Roggens durch den Wind verbreitet, kann also über grössere Strecken transportiert werden. Hingegen ist aufgrund der Pollenwerte von Juglans anzunehmen, dass im Bereich der Siedlung Nussbäume wuchsen.

In diese Periode der stabilen Landnutzung fällt ein Hochwasserereignis (PAZ-5a), bei welchem die Rhone rund 45cm siltige Feinsedimente im Pfafforetsee abgelagerte. Die weitgehend identischen C14-Datierungen aus den Seesedimenten unterhalb ( $145 \pm 65$  AD) und oberhalb ( $120 \pm 85$  AD) dieser Schicht lassen auf ein einzelnes starkes Unwetter im Einzugsgebiet der Rhone schliessen. Dafür sprechen auch die äusserst geringen Pollenkonzentrationen und die Zusammensetzung der Pollenspektren: sie sind dominiert von subalpinen Gehölzen, wie Grünerle, Lärche, Arve und Fichte und sind reich an krautigen Pflanzen aus den oberen Höhenlagen (*Saxifraga oppositifolia*, *Gentiana purpurea*, *Selaginella selaginoides*, *Plantago alpina*, usw.). Im Pollendiagramm sind keine nennenswerten Änderungen zu erkennen, welche auf dieses Hochwasserereignis zurückzuführen wären; es hatte also vermutlich keine nachhaltigen Auswirkungen auf Umwelt und Landnutzung in der Umgebung des Pfafforetsees.

Mit dem Übergang von PAZ-5 zu PAZ-6 nimmt die landwirtschaftliche Nutzung des Pfywaldes in der Umgebung des Pfafforetsees fast schlagartig ab. Der Wacholder und andere Indikatoren für Beweidung verschwinden weitgehend, und der Wald beginnt sich wieder zu regenerieren. Nach einer kurzen Ausbreitungsphase der Birke dominiert in der zweiten Hälfte der Pollenzone die Waldföhre wieder. Dabei könnte ein Hochwasserereignis kurz nach 400 AD den Waldboden mit minerogenem Material bedeckt und dadurch die Keimbedingungen für die Waldföhre verbessert haben. Diese Periode der Waldregeneration umfasst ungefähr den Zeitraum von 230 bis 580 AD. Die leichte Zunahme der Hainbuche (*Carpinus betulus*) deutet darauf hin, dass stellenweise Niederwaldwirtschaft betrieben wurde. Es ist fraglich, ob die sporadischen Funde von Getreidepollen von Äckern in der Umgebung des Weilers stammen.

In PAZ-7 sind erneut massive Eingriffe in den Wald zu beobachten. Einerseits wurde der Wald wieder intensiv beweidet, wie ein Wacholdergipfel von beinahe 40% zeigt, andererseits wurden vermutlich siedlungsnahe Waldflächen zugunsten von Ackerland gerodet. Allerdings liegt das Schwergewicht der bäuerlichen Landnutzung zu Beginn (PAZ-7a) offensichtlich noch auf Weidewirtschaft, aber Hinweise auf Ackerbau, vor allem Roggen und Hanf, sind doch deutlich vorhanden. Sehr stark vertreten ist in dieser Pollenzone auch der Nussbaum. In der zweiten Hälfte des 8. Jh. AD ist im Pollendiagramm ein starker Einbruch im Ackerbau und in der Weidewirtschaft zu erkennen, aber bereits ab etwa 840/850 AD (PAZ-7b) erfolgen erneut ausgedehnte Waldrodungen. Auffallend ist die starke Zunahme an Graspollen, die auf die steigende Bedeutung der Grünlandwirtschaft hinweist. Daneben bleibt

aber die Waldweide weiterhin ein wichtiger Wirtschaftsfaktor, wie die hohen Prozentwerte von Wacholder und koprophilen Pilzen zeigen. Der Ackerbau, der ebenfalls eine Ausdehnung erfährt, konzentriert sich jetzt vor allem auf den Roggen, andere Getreide und Hanf werden in geringerem Umfang produziert.

Das Alter für das obere Ende des vorliegenden Pollendiagrammes liegt etwa bei 1000 AD. Auf die Untersuchung der jüngeren Sedimente wurde verzichtet, da sie überwiegend aus allochthonen Einschwemmungen aus dem Einzugsgebiet der Rohne bestehen und deshalb für die Vegetationsentwicklung im Pfywald nur bedingt repräsentativ sind. Der von BENDEL *et al.*<sup>21</sup> untersuchte Kurzkern zeigt bis in die Neuzeit eine mehr oder weniger intensive Nutzung des Pfywaldes, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts weitgehend aufgegeben wurde.

## DISKUSSION

### Die Wechselwirkungen zwischen Klima, Umwelt, Landnutzung und Bevölkerungsentwicklung

Der landwirtschaftliche Ertrag ist in bäuerlichen Gesellschaften die Grundlage für Entwicklung und stabile soziale Strukturen. Da der Ernteerfolg neben edaphischen Bedingungen und technologischen Errungenschaften vor allem vom Klima abhängig ist, sind Landschafts-, Klima-, Siedlungs- und Kulturgeschichte eng miteinander verflochten. In den vergangenen Jahrtausenden gab es immer wieder kühl-feuchte Phasen mit mehrjährigen Ernteauffällen, die teilweise zu ernsthaften Nahrungskrisen und Bevölkerungsrückgängen führten<sup>22</sup>. TINNER *et al.*<sup>23</sup> zeigten für den Zeitraum von 1450 BC bis 700 AD einen Zusammenhang zwischen klimatischen Gunstphasen und der Ausweitung des Ackerbaus. Klimaverschlechterungen in der Vergangenheit zwangen die Bevölkerung, Strategien zur Krisenbewältigung zu entwickeln. Dazu gehörten in erster Linie die Aufgabe von Ackerflächen in marginalen, weniger produktiven Gebieten, aber auch Anpassungen der landwirtschaftlichen Wirtschaftsweise und die Erschliessung von zusätzlichen Nahrungsquellen. In den Pollendiagrammen ist in diesen Situationen eine Wiederbewaldung der aufgelassenen Anbauflächen mit Pioniergehölzen (Birke, Hasel, Erle) zu beobachten. In neolithischen Seeufersiedlungen im Schweizer Mittelland wurden in klimatisch ungünstigen Phasen deutlich höhere Anteile an Wildtierknochen nachgewiesen, ein Hinweis darauf, dass in Krisenzeiten vermehrt gejagt wurde, um den Haustierbestand zu schonen<sup>24</sup>. Das Bestreben, klimabedingte Ernteauffälle zu begrenzen oder zu kompensieren, dürfte generell zu methodischen Verbesserungen in der Landnutzung, wie Bodenbearbeitung, Düngung, Erntetechnik und Viehhaltung, und damit zu technologischem Fortschritt beigetragen haben.

Der Pfywald mit seinem trockenen Klima (ca. 550 mm Jahresniederschlag) und den grösstenteils unproduktiven, sandigen Böden ist kein optimales Landwirtschaftsgebiet. Klimatische Veränderungen, seien es nun längere

21 BENDEL ET AL. 2006.

22 MAISE 1998.

23 TINNER ET AL. 2004.

24 HÜSTER-PLOGMANN, SCHIBLER 1997.

Trockenperioden oder kühl-feuchte Bedingungen, wirken sich hier besonders stark aus. Hinzu kommen vor allem in den feuchteren Perioden Hochwasser der Rhone und Schüttungen aus dem Illgraben.

Holozäne Klimaverschlechterungen sind in der Regel mit erhöhten Niederschlägen, Seespiegelhochständen<sup>25</sup> und einer Häufung von Hochwasserereignissen verbunden. Da der Pfafforetsee im Hochwasserbereich der Rhone liegt, sind seine Sedimente ein wichtiges Klimaarchiv. Die  $\text{C14}$ -Datierungen ermöglichen es uns zudem, die Sedimentabfolge und den Polleneintrag in den See mit den eisenzeitlichen bis mittelalterlichen Klimaschwankungen zu korrelieren, welche aus Gletscherständen, Baumringen, Sauerstoffisotopen und atmosphärischen  $\text{C14}$ -Schwankungen abgeleitet wurden<sup>26</sup>.

#### Der Beginn der eisenzeitlichen Landnutzung im Pfyngut

Das  $\text{C14}$ -Datum von  $465 \pm 70$  BC für die ersten sichtbaren anthropogenen Eingriffe im Pfyngut stimmt weitgehend mit der Datierung der Phase I im Pfyngut überein. Allerdings bestehen wegen des sogenannten Hallstatt-Plateaus gewisse Datierungsunsicherheiten. Wenn bei der Kalibration das ganze Konfidenzintervall (95,4% Wahrscheinlichkeit) berücksichtigt wird, ergibt sich ein mögliches Alter von 760-370 BC. Ein Datum um 750 BC macht durchaus Sinn, wenn man die vorhandenen Klimadaten und die palynologischen Untersuchungen vom Lac de Montorge bei Sion in die Interpretation mit einbezieht: die warm-trockene spätbronzezeitliche Klimaphase endete etwa um 1200 BC mit einem Gletschervorstoss<sup>27</sup> und einer Kaltphase (Göschener Kaltphase I) mit tiefen Temperaturen bis etwa 750 BC; danach stieg die Sonnenaktivität, und damit auch die Temperaturen, wieder an<sup>28</sup>. Am Lac de Montorge wurden um ca. 1200-1100 BC Änderungen in der Landnutzung nachgewiesen, wie etwa ein Rückgang des Getreideanbaus, die Einführung der Niederwaldwirtschaft und die Ausbreitung von Lärchwiesen an den Talhängen, die sehr wahrscheinlich mit der Klimaverschlechterung am Ende der Bronzezeit zusammenhängen<sup>29</sup>. Zu Beginn der darauf folgenden warm-trockenen Phase sind im Pollendiagramm eine deutliche Zunahme an Getreidepollen und erste Hinweise auf Weinbau zu erkennen. Zwei  $\text{C14}$ -Datierungen ergaben für diese erneute Ausdehnung des Ackerbaus Daten von  $695 \pm 105$  BC. Vergleicht man die beiden Pollendiagramme vom Montorge und vom Pfafforetsee miteinander, ist es durchaus denkbar dass die Intensivierung der eisenzeitlichen Landwirtschaft am Montorge gleichzeitig mit dem Beginn der Waldnutzung im Pfyngut – und damit wohl auch mit der ersten Besiedlung im Pfyngut – erfolgte.

Einen Hinweis darauf, dass die Datierung  $465 \pm 70$  BC aus dem Pfafforetsee zu jung sein könnte, liefern auch die Sedimentationsraten: die Akkumulationsraten in den vorwiegend organischen Sedimentabschnitten oberhalb der Datierung  $380 \pm 120$  sind erstaunlich konstant und betragen ungefähr 1mm/Jahr. Geht man für den Sedimentzuwachs im ältesten Diagrammabschnitt von ähnlichen Werten aus, ergibt sich für den Beginn des Föhrenrückgangs (Übergang PAZ-1 / PAZ-2) ein Alter von 700-750 BC. Dies bedeutet, dass zumindest der oberste Abschnitt der allochthonen

minerogenen Sedimente an der Basis des Bohrkerns der Göschener Kaltphase I zuzuordnen ist, und in der Pollenzone PAZ-1 die letzten rund 200 Jahre dieser Phase enthalten sind.

#### Klima und Landnutzung in der Eisenzeit

Der Pfyngut wurde in der älteren Eisenzeit offensichtlich intensiv als Waldweide für Wiederkäuer genutzt. Wie umfangreiche Untersuchungen an Koproolithen aus neolithischen und bronzezeitlichen Seeufersiedlungen ergaben, war dies eine verbreitete Form der Tierhaltung. Vor allem Schafe und Ziegen hielten sich ganzjährig im Freien auf und wurden höchstens im Winter noch zusätzlich mit Zweigen oder getrocknetem Laub gefüttert<sup>30</sup>. Die Produktion von Heu in Verbindung mit Stallhaltung setzte sich erst im Laufe der Eisenzeit durch. Am Pfafforetsee gibt es zumindest in der älteren Eisenzeit (PAZ-2) noch keine Hinweise auf Waldrodungen zugunsten von Grünlandwirtschaft. Hingegen scheint die Beweidung das Ökosystem des Föhrenwaldes stark belastet zu haben: die Verjüngung der Bäume wurde verhindert und der Wacholder, dessen spitze Nadeln die Tiere meiden, indirekt gefördert. Der sich ausbreitende Sanddorn und der relativ hohe minerogene Anteil im Sediment sind Anzeichen von Bodenzerstörung und kontinuierlicher Erosion im Einzugsgebiet des Sees. Der allochthone Sedimenteintrag ist in dieser Periode wohl weniger dem Klima, als vielmehr dem Einfluss des Menschen zuzuschreiben.

Anders hingegen ist die Situation im darauf folgenden, knapp 100 Jahre dauernden Zeitraum ab etwa 390 BC (PAZ-3). Anthropogene Indikatoren wie Weide- und Lichtungszeiger gehen zurück und der Föhrenwald beginnt sich wieder zu schliessen. Dieser Unterbruch in der Waldnutzung stimmt zeitlich mit einer kurz vor 400 BC einsetzenden Kaltphase überein, die auf zwei Vulkanausbrüche und eine Abschwächung der Sonnenaktivität und/oder des Golfstroms zurückzuführen ist und deren kälteste Phase bis etwa 350 BC andauerte<sup>31</sup>.

#### Landnutzung und Umweltveränderungen in der klimatisch günstigen Periode vom III. Jh. BC bis ca. 230 AD

Eine Periode der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung (PAZ-4 und 5) begann etwa um 300 BC und fällt mit einer längeren klimatischen Gunstphase zusammen, die nur zwischen ca. 180 und 150 BC von kurzzeitigen Gletschervorstössen unterbrochen wurde<sup>32</sup>. Der Föhrenwald wurde wahrscheinlich teilweise gerodet und an den für Ackerbau und Grünland ungeeigneten Standorten aufgelichtet, um den Unterwuchs für die Beweidung zu fördern. Feuer spielte bei diesen Veränderungen eine grosse Rolle. Da Pollenproduktion und -verbreitung der Waldföhre ausserordentlich gut sind, bedeutet der Rückgang der Pollenkurve auf rund 15%, dass in der Umgebung des Sees die Bestände weitgehend verschwanden. Die bei den Bränden entstandene Asche führte dem Waldboden Nährstoffe zu. Sowohl die Düngung als auch die durch Nährstoffe und Auflichtung geförderte Bodenflora beeinträchtigten die Keimfähigkeit der Föhre und brachten der

25 MAGNY 1993.

26 MAISE in JACOMET *et al.* 1999 ; 2002.

27 RÖTHLISBERGER 1986 ; HOLZHAUSER 1995.

28 MAISE in JACOMET *et al.* 1999.

29 CURDY *et al.* 2009.

30 KÜHN, WICK (im Druck) ; KÜHN *et al.* (submitted).

31 MAISE, in JACOMET *et al.* 1999.

32 MAISE, in JACOMET *et al.* 1999 ; 2002.

sich ausbreitenden Birke einen Konkurrenzvorteil. Zusätzlich könnte die Waldföhre bei dem warm-trockenen Klima unter Trockenstress gelitten haben, der durch die reichlich vorhandenen Misteln (*Viscum album*) noch verstärkt wurde. Untersuchungen zum Föhrenrückgang der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass das Zusammenwirken von verschiedenen Stressfaktoren, wie Nährstoffversorgung (im aktuellen Fall ist es die Aufgabe der traditionellen Streunutzung und des damit verbundenen Exports von Biomasse und Nährstoffen), Trockenstress und Misteln (sie entziehen dem Baum zusätzlich Wasser) zum Absterben von Föhrenbeständen führen kann<sup>33</sup>.

Die Gletschervorstösse in der ersten Hälfte des II. Jh. BC fallen mit den starken Schwankungen der Pollenkurven von Föhre und Birke zusammen. Letztere sind wohl nicht auf Klimaänderungen zurückzuführen, sondern auf Einschwemmungen von Blütenteilen (z.B. Staubblätter von Birken). Die darauf folgenden Jahrhunderte sind geprägt durch intensive Landnutzung, verbunden mit der Einführung von neuen Kulturpflanzen und der Weiterentwicklung der landwirtschaftlichen Produktionsmethoden. Die ersten Pollenkörner des Walnussbaumes treten etwa um 140 BC auf, also gleichzeitig wie am Lac de Montorge und ungefähr zur selben Zeit wie der Roggen. Die ebenfalls hier einsetzenden, geringen, aber regelmässigen Funde von *Vitis* stammen vermutlich von Rebbergen auf der südexponierten Talseite. Bemerkenswert dabei ist, dass die ersten Nachweise für Weinbau am Montorge rund 550 Jahre älter sind.

Gegen Ende des I. Jh. BC liessen die anthropogenen Eingriffe in die Landschaft, und vor allem auch die Häufigkeit der Brände, deutlich nach, und die landwirtschaftlichen Aktivitäten stabilisierten sich offenbar. Mögliche Erklärungen dafür sind eine anhaltende klimatische Gunstphase («Römerzeitliches Klimaoptimum») und die Erstellung der ersten Bewässerungsgräben, die eine Konzentration der bäuerlichen Produktion auf die ertragreichen bewässerten Flächen mit sich brachte und für stabile Erträge sorgte. Die unproduktiven Waldgebiete wurden weiterhin als Viehweide genutzt.

#### Spätromische Klimaverschlechterung und Intensivierung der Landnutzung im Mittelalter

Klimaeinbrüche um 260 und 430/440 AD, die jeweils über mehrere Jahrzehnte hinweg für kühle Temperaturen sorgten<sup>34</sup> (Göschener Kaltphase II), hatten tiefgreifende Auswirkungen auf die Landnutzung im Pfywald. Die Waldweide in der Umgebung des Pfafforetsees wurde aufgegeben, und die Föhrenbestände erholten sich wieder. Auch der Ackerbau erlitt wahrscheinlich einen empfindlichen Einbruch. Mindestens ein Teil des Getreidepollens in PAZ-6 ist auf erosiven Eintrag durch Hochwasser zurückzuführen; dies trifft vor allem auf einen Einschwemmungshorizont bei 142-146 cm (ca. 440 AD) zu. Neben dem ungünstigen Klima trugen wohl auch die Unruhen der Völkerwanderungszeit zur landwirtschaftlichen Krise bei. Sie zeichnet sich auch im Pollendiagramm vom Lac de Montorge deutlich als eine Phase der Wiederbewaldung ab. Nach 500 AD setzten in beiden Regionen wieder massive Eingriffe in die Landschaft ein. Während

sich am Montorge die landwirtschaftliche Produktion auf Ackerbau konzentrierte, wurde im Pfywald zunächst vor allem Weidewirtschaft und wenig Roggenanbau betrieben. Ein weiterer Klimaeinbruch um etwa 750 AD<sup>35</sup> wirkte sich am Montorge kaum aus, verursachte aber im Pfywald einen erneuten Rückschlag in der Landwirtschaft, bevor dann ab etwa 850 AD erneut eine Landnutzungsphase mit ausgedehnter Grünlandwirtschaft und Roggenanbau einsetzte.

#### Korrelation von Klima, Landnutzungsphasen und Paläoböden

Im Rahmen der archäologischen Ausgrabungen und geoarchäologischen Untersuchungen an der Fundstelle Pfyngut wurde eine Abfolge von subfossilen Böden freigelegt, die verschiedene Phasen mit landwirtschaftlichen Aktivitäten dokumentieren und jeweils von Schüttungen aus dem Illgraben bedeckt wurden. Siedlungsaktivitäten und Bodenbildung konzentrierten sich wohl auf klimatisch günstige Perioden, während sich Murgänge und Schüttungen in den allgemein feuchteren Kaltphasen häuften und die Böden unter sich begruben. Es sollte deshalb möglich sein, die Paläoböden mit den am Pfafforetsee nachgewiesenen Phasen der Landnutzung zu korrelieren.

Die beiden ältesten Böden (PAL.01 und PAL.02) datieren in den Zeitraum von ca. 370 BC bis 10 AD und sind durch Schüttungen aus dem Illgraben voneinander getrennt. Sie entsprechen vermutlich den beiden Landnutzungsphasen in PAZ-2 (PAL.01) und PAZ-4 (PAL.02). Die Pollenzone PAZ-5 (ca. 1-230 AD), die eine Phase stabiler landwirtschaftlicher Nutzung repräsentiert, kann mit den ersten Bewässerungssystemen und dem Paläoboden PAL.03 in Verbindung gebracht werden, und der Paläoboden PAL.04 stimmt zeitlich mit der um ca. 850 AD einsetzenden mittelalterlichen Landnutzungsphase in PAZ-7b überein.

<sup>33</sup> RIGLING *et al.* 2006; GIMMI *et al.* 2008.

<sup>34</sup> HOLZHAUSER 1995; MAISE *in* JACOMET *et al.* 2002.

<sup>35</sup> HOLZHAUSER 1995.