

# Historische Sauerstoffverhältnisse im Zürichobersee

Rekonstruktion historischer Sauerstoffgehalte im Lachener  
Becken mittels Sedimentkern-Analysen

Verfasserin: Nathalie Dubois  
Dübendorf, Dezember 2014



Titelbild: Der Zürichobersee. © Adrian Kienzi

## Einleitung

Der Zürichobersee wird im weiteren Verlauf dieses Berichts als Obersee bezeichnet. Seit 1972 untersucht die Wasserversorgung Zürich (WVZ) in monatlichen Abständen verschiedene physikalische, chemische und biologische Messgrößen im Obersee, im Linthkanal und im Abfluss zum Zürich Untersee (Gammeter und Forster, 2002). Als Folge der Abwasserreinigung und anderer Gewässerschutzmassnahmen hat sich der Phosphor- und der Stickstoffgehalt auf einem tiefen Niveau stabilisiert. Die seeinterne Biomasseproduktion geht auch seit einigen Jahren deutlich zurück. Nach wie vor sinkt aber der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser im Lachener Becken (Obersee) jährlich für mehrere Monate unter das Anforderungsminimum ab (Schildknecht et al., 2013). Die Konzentrationen sinken im Spätsommer in der Regel unter 4 mg/l, steigen dann aber in der Zirkulationsphase von Januar bis April wieder an.

Wie im Bericht von Gammeter und Forster (2002) vermerkt, gibt es im Falle des Obersees besondere natürliche Verhältnisse, die einen wesentlichen Einfluss auf die ungünstigen Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser haben. Wegen dem kleinen Anteil des Tiefenwassers am gesamten Seevolumen im Obersee (nur 28%) wird der Sauerstoffvorrat im Tiefenwasser während der Stagnationsperiode entsprechend rasch aufgebraucht. Im vorliegenden Bericht wird anhand der Untersuchung von Sedimentkernen die historische Entwicklung des Sauerstoffmangels im Obersee besprochen.

Die Gewässerschutzverordnung beinhaltet nur einen konkreten Anforderungswert für stehende Gewässer: der Sauerstoffgehalt darf zu keiner Zeit und in keiner Seetiefe weniger als **4 mg/L O<sub>2</sub>** betragen (besondere natürliche Verhältnisse sind vorbehalten).

## Probenahme

### Untersuchungsstellen

Am 6. Oktober 2014 wurden 6 Kerne in verschiedenen Tiefen im Lachener Becken entnommen (siehe Tafel 1, Abbildung 1). Die Kerne wurden am gleichen Tag in das Limnologie Labor an der ETH Zürich gebracht und in einem Kühlraum bei 4°C aufbewahrt.

Kern	CH-Koordinaten		Wassertiefe (m)
	Breite	Länge	
ZUR-LAC-14-01	704 904	229 188	39
ZUR-LAC-14-02	704 535	229 278	32.8
ZUR-LAC-14-03	704 331	229 295	27.1
ZUR-LAC-14-04	704 160	229 317	22.7
ZUR-LAC-14-05	703 972	229 364	16.4
ZUR-LAC-14-06	705 572	228 520	37.8

Tafel 1. Koordinaten der Sedimentkerne



Abbildung 1. Entnahmestellen der Kerne im Obersee

## Laboranalysen

### GEOTEK Multi-Sensor Core Logger (MSCL)

Der MSCL ermöglicht zerstörungsfreie, quasi-kontinuierliche Messungen physikalischer Parameter. Es werden Dichte, Schallwellengeschwindigkeit und magnetische Suszeptibilität in wassergesättigten Sedimentkernen ermittelt. Veränderungen der Sedimentfazies lassen sich somit leicht erkennen und Kerne können miteinander korreliert werden. In der Abbildung 2 werden Untersuchungsergebnisse der magnetischen Suszeptibilität der sechs Kerne gezeigt.

### Kernfotos

Die Sedimentkerne wurden mit einer Line-scan Kamera, die an dem ETH Avaatech Core Scanner befestigt ist, direkt nach dem Öffnen sowie nach der Oxidation fotografiert. Abbildung 3 zeigt die Bilder sowie die Kernkorrelation. Kern ZUR-LAC-14-01 wurde für die XRF Bestimmung von Redox-Metallen sowie für die Datierung ausgewählt.

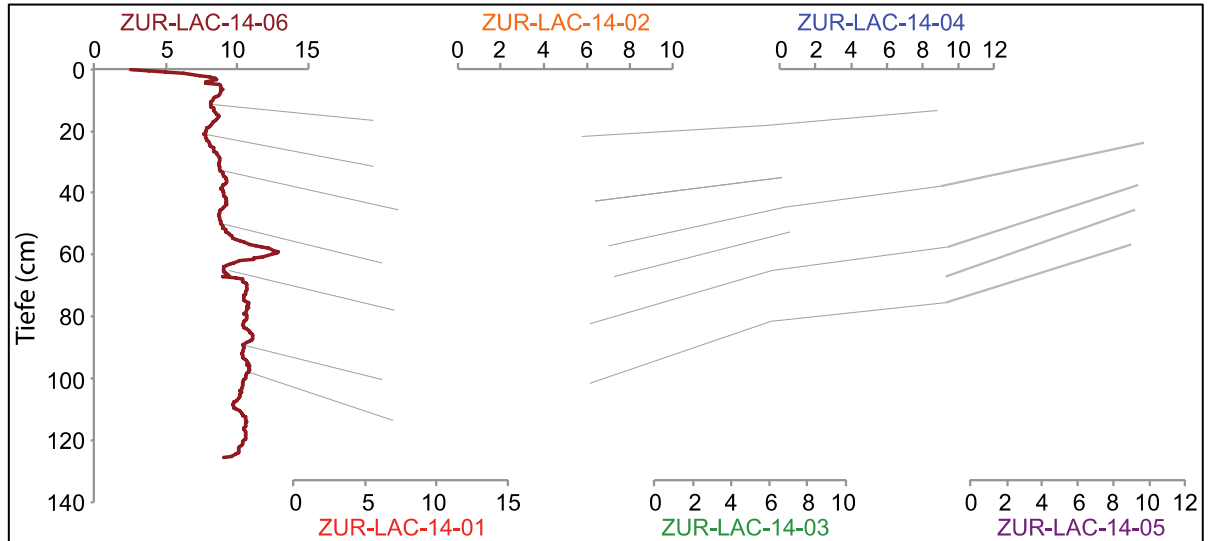


Abbildung 2. Korrelation zwischen den Kernen basierend auf deren magnetische Suszeptibilität (SI\*10-5)

### Altersbestimmung der Sedimente durch Gamma-Spektrometrie

Es wurden 23 Proben aus dem Kern ZUR-LAC-14-01 entnommen, um die Verteilung des künstlichen Radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  im Sedimentprofil zu bestimmen. Variationen des  $^{137}\text{Cs}$ -Eintrags werden als Sedimentmarker für die Datierung und Bestimmung der Sedimentationsrate benutzt.  $^{137}\text{Cs}$  ist erst seit Mitte des letzten Jahrhunderts (1951) durch oberirdische Atomwaffentests in die Atmosphäre gelangt. Ein maximaler Ausstoss von  $^{137}\text{Cs}$  durch diese Kernwaffentests erfolgte im Jahre 1963, kurz vor dem Inkrafttreten des Vertrages über das Verbot von Atomwaffenversuchen. Der zweite Anstieg des  $^{137}\text{Cs}$  in Seesedimenten der Schweiz ist auf den Reaktorunfall von Tschernobyl zurückzuführen (1986). Im obersten Zentimeter wurde  $^7\text{Be}$  gemessen, was auf rezente (<2 Monate) Sedimentation hinweist.

Eine charakteristische Erscheinung des Zürichsees sind die sporadisch auftretenden Massentwicklungen einzelner, sonst kaum in Erscheinung tretender Phytoplankter. Bis Mitte der achtziger Jahre waren es vor allem Blaualgen, die solche 'Blüten' verursachten. Diese Phänomene dauerten meist nur kurze Zeit. Die Ausnahme bildete *Melosira granulata*, welche während des ganzen Winters (1981/82 und 1986) massenhaft auftrat (Gammeter et al., 1997). Die Blüte von 1982 bildet eine optisch sichtbare (4 mm) grüne Schichte in den Kernen ZUR-LAC-14-01 (26 cm) und -06 und (20 cm).

Kern	Tiefe	Jahr	Ereignis
ZUR-LAC-14-01	0-1 cm	2014	$^7\text{Be}$ in Probe
ZUR-LAC-14-01	24-25 cm	1986	Tschernobyl max. in $^{137}\text{Cs}$
ZUR-LAC-14-01	26-27 cm	1982	<i>Melosira granulata</i> Blüte
ZUR-LAC-14-01	46-47 cm	1963	Bomben max. in $^{137}\text{Cs}$
ZUR-LAC-14-01	54-55 cm	1951	Anfang Bomben Test in $^{137}\text{Cs}$

Tafel 2. Tiefe und Alter der Sedimentmarker im Kern ZUR-LAC-14-01



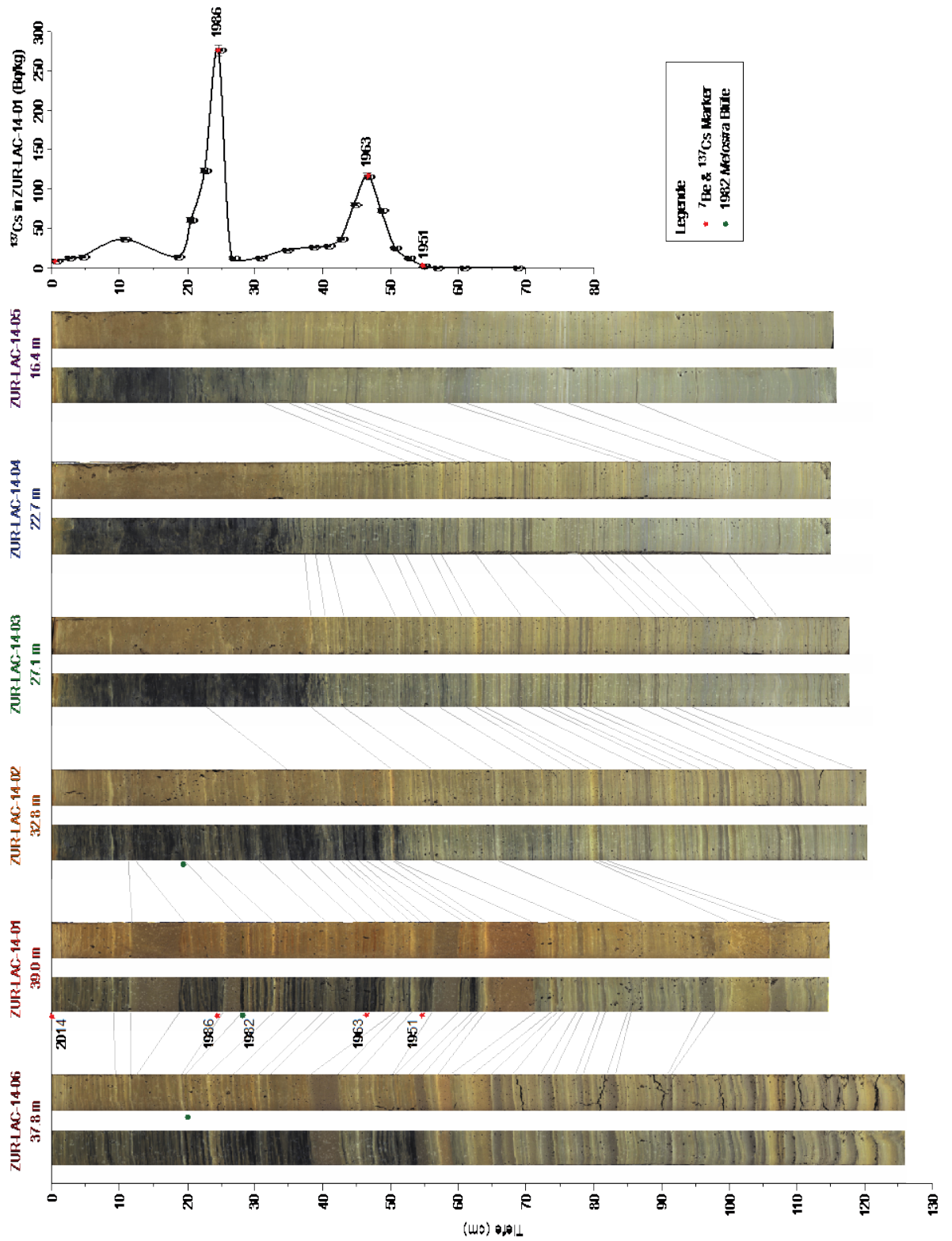


Abbildung 3. Fotos der Kerne im unoxidierten (jeweils unten) sowie im oxidierten Zustand.

## XRF-Kern Scanner

Mit Hilfe der Röntgen-Fluoreszenz-Kern-Scanner-Methode (XRF Core Scanner) kann das Sediment geochemisch charakterisiert werden. Diese Methode dient der relativ schnellen und zerstörungsfreien Analyse chemischer Elemente an der Oberfläche von halbierten Sediment-Kernen. Ein grosser Vorteil dieser Methode ist die hohe Auflösung im Millimeter-Bereich. Redox-sensitive Elemente im Sediment liefern dabei Informationen über Redox-Bedingungen im See. Die XRF Core Scanner Methode liefert allerdings nur relative Intensitäten der verschiedenen Elemente und somit keine absoluten Konzentrationen. Abbildung 4 zeigt verschiedene Element-Profile im Kern ZUR-LAC-14-01.

# Ergebnisse und Diskussion

## Kernbeschreibung

Auf den unmittelbar nach dem Öffnen gemachten Fotos (Abbildung 3) haben die Kerne generell im oberen Teil eine sehr dunkle Farbe und im unteren Teil sind sie heller. Der Übergang ist abrupt, vor allem in den tiefsten Kernen. Die Fotos im oxidierten Zustand zeigen die Kerne in einer helleren Farbe, vor allem sieht man den Übergang von den hellen Lagen zu dem vorher dunklen Teil nicht mehr.

Die unteren helleren Sedimente sind immer laminiert. Die einzelnen Lagen haben unterschiedliche Mächtigkeit und Farben, meist grau, hellgelb oder rötlichbraun. Diese Schichten weisen auf klastische Lagen hin, die wahrscheinlich aus Trübeströmen von der Wägistaler Aa oder der Jona stammen (Carradori, 2005).

Die oberen dunkleren Sedimente sind nur in den tiefsten Kernen laminiert, und deuten auf biochemische Warven mit einem hohen Anteil an organischem Material hin. Biochemische Warven werden in Seen gebildet, welche eine hohe biologische Produktivität während des Sommers aufweisen. Während den warmen Jahreszeiten wird viel Kohlenstoff durch Photosynthese in organisches Material eingelagert, was zu einer Übersättigung an Kalziumkarbonat führt. Das Kalziumkarbonat fällt aus und wird als helle Sommerlage abgelagert (Kelts & Hsü, 1978). Die absinkenden organischen Überreste werden oxidativ zersetzt und führen deshalb zu sauerstofffreien Bedingungen am Seeboden. Die dunklen Winterlagen bestehen aus feinem Detritus und aus organischem Material, das nicht abgebaut wurde.

Biochemische Warven sind deutlich in den Kernen ZUR-LAC-14-01 und -06 zu erkennen, oberhalb einer Tiefe von ca. 60 cm. In diesen Kernen können die Warven auch für die Datierung nützlich sein: Jede helle Lage entspricht einem Sommer, jede dunkle Lage einem Winter. Im Kern ZUR-LAC-14-02 (32.8 m Wassertiefe) sind die biochemischen Warven nicht immer klar definierbar. In den Kernen ZUR-LAC-14-03, -04 und -05 ist das dunkle Sediment relativ homogen. Dies weist auf bioturbierende Organismen in einer zum Teil oxischen Sedimentoberfläche hin (Niessen and Sturm, 1987; Lotter et al., 1997). Die schwarze Farbe bedeutet aber noch zeitweise reduzierende (suboxisch) Bedingungen. Die obersten 2-3 Zentimeter in diesen drei Kernen vom untiefen Seebereich sind nicht mehr schwarz und weisen deshalb auf eine rezente Rückkehr von Sauerstoff hin.

Da Warven nur erhalten bleiben, wenn keine Bioturbation stattfindet, können wir davon ausgehen, dass Bioturbation nur oberhalb von 30 m Wassertiefe stattfand, und dies erst seit ca. 70 Jahren. Die tieferen Kerne zeigen einen Wechsel von klastischen Ablagerungen zu biochemischen Warven zum gleichen Zeitpunkt wie der Beginn der Bioturbation im untiefen Seebereich. Da die biochemischen Warven intakt geblieben sind, weist dies auf anoxische Bedingungen am Seeboden unterhalb von 30 m Wassertiefe hin.

### **XRF Elemente**

Frühere Studien haben gezeigt, dass längere Änderungen in den Redoxbedingungen zeitliche Variabilität in verschiedenen Elementprofilen erzeugen (Schaller et al. 1997; Enters et al., 2010). Im Baldeggersee weisen Fe, As und Mn Anreicherungen an der tiefsten Stelle auf den Beginn von Sauerstoffmangel hin, während Mo und das Cr/V Verhältnis permanente anoxische Bedingungen kennzeichnen.

Der Vergleich zwischen Sauerstoffmessungen und Metallprofilen von 1950 bis 1990 im Baldeggersee zeigt, dass Mn empfindlich auf große saisonbedingte Variationen im Tiefenwasser- Sauerstoffgehalt reagiert (Schaller et al., 1997). Im Zürichsee haben Naeher et al. (2013) gezeigt, dass Mn ein nützlicher Anzeiger von Sauerstoffanreicherungsereignissen im Hypolimnion ist, und dass das Mn/Fe Verhältnis sogar als semi-quantitativer Indikator der Sauerstoffkonzentration benutzt werden kann. Tiefe Werte des Mn/Fe Verhältnisses deuten auf einen tiefen Sauerstoffgehalt an der Wasser-Sediment-Grenzfläche hin, und umgekehrt. Anoxische Bedingungen führen zu der bevorzugten Freisetzung von Mn, während unter oxischen Bedingungen Mn abgelagert wird. Das Mn/Fe Verhältnis kann aber nur in sauerstoffreichen Systemen angewendet werden, in denen sich die Redox Zustände stark mit den Jahreszeiten ändern.

Im Kern ZUR-LAC-14-01 deuten starke Schwankungen im Mn und im Mn/Fe Verhältnis oberhalb von 63 cm Tiefe auf starke jährliche Veränderungen im Redox Zustand des Lachener Beckens hin (Abbildung 4). Interessanterweise zeigt Schwefel auch höhere Werte in den Intervallen, in dem das Mn/Fe Verhältnis hoch ist. Dies könnte auf die Bildung von Sulfiden im anoxischen Milieu hindeuten. Fe im Gegensatz zeigt nur kleine Variationen, die sehr ähnlich zu den Ti Variationen sind (Abbildung 4). Dies weist auf Änderungen im detritischen Signal hin. Die Elemente Rb, Zn, Sr, Ca zeigen deutlich eine Herkunft von den verschiedenen Turbiditen, die mehrmals im Kern auftreten und auf Ereignisse wie Hochwasser und Rutschungen hinweisen (Abbildung 4).

### **Vergleich mit den historischen Messungen**

Im Lachener Becken wurden am 10. Sept. 1910 in 30 m Tiefe 7.5 mg/l Sauerstoff gemessen – weit mehr als jemals seither im Monat September (Minder, 1922). In den ersten Jahren mit monatlichen Messungen durch das kantonale Laboratorium (1936 bis 1946) lagen die jährlichen Sauerstoffminima im Tiefenwasser noch zwischen 4 und 6 mg O<sub>2</sub>/L. Diese Sauerstoffwerte deuten darauf hin, dass der Seegrund in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts besser mit Sauerstoff versorgt war als in allen darauffolgenden Jahren (Thomas und Örn, 1984).

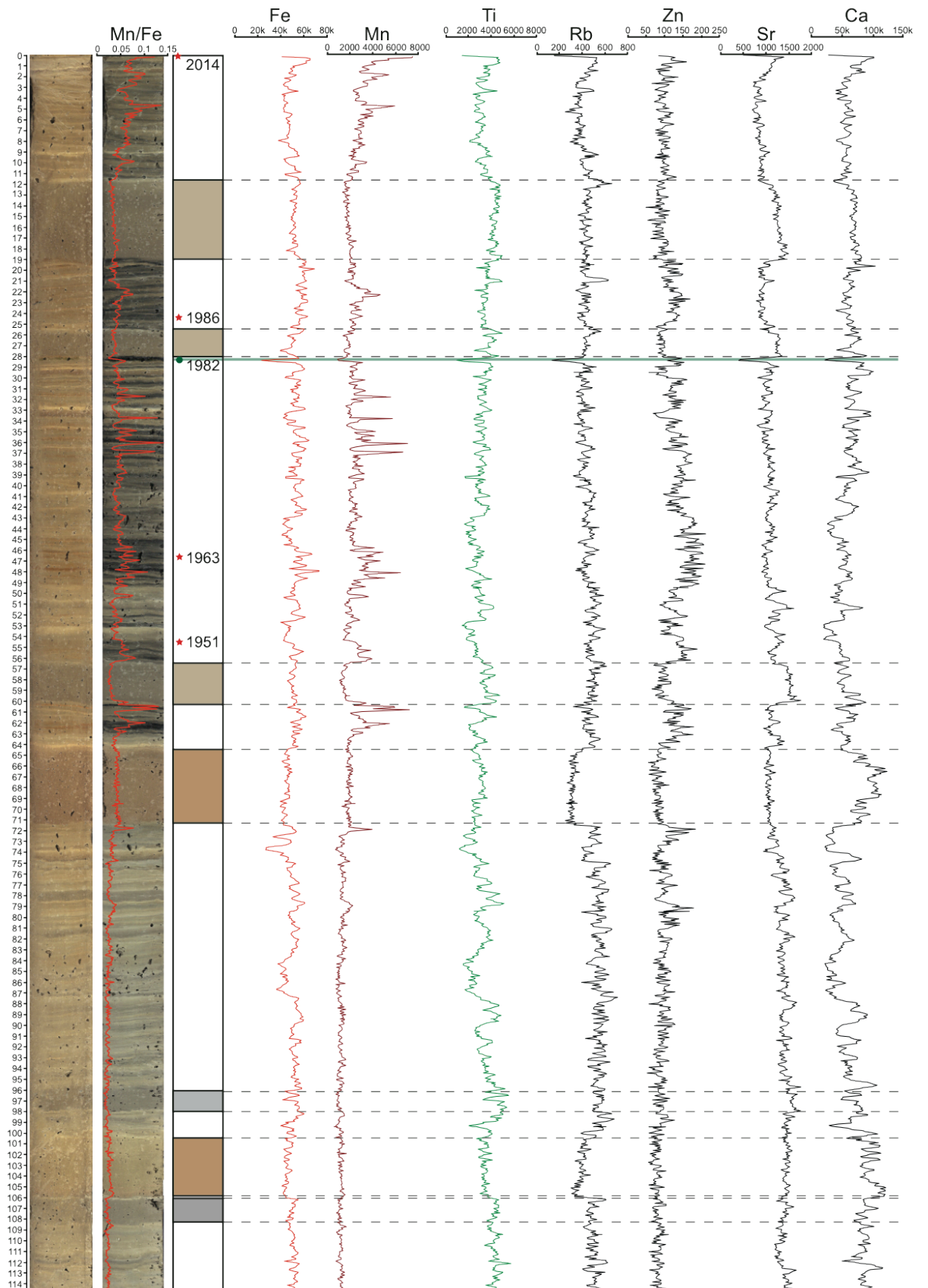


Abbildung 4. XRF signal (counts) im Kern ZUR-LAC-14-01



Die plötzliche Verschlechterung des Seezustandes ist auch in den Sedimenten erkennbar: Die starke Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Jahr 1947 unter den Grenzwert (4 mg/L) wird als Beginn der Ablagerung von biochemischen Warven aufgezeichnet. Diese sind deutlich durch deren dunkle Farben in den Fotos des frischen Kerns zu erkennen.

## Zusammenfassung

Die historischen Sauerstoffverhältnisse im Obersee wurden mit einer Untersuchung von Sedimentkernen abgeklärt. Seit 1947 haben sich biochemische Warven unterhalb 30 m Wassertiefe im Obersee gebildet. Die gute Erhaltung dieser Laminationen deutet auf sauerstofffreie Bedingungen an der Sediment-Wasser Grenze hin, da anoxische Bedingungen am Seegrund nötig sind um eine Bioturbation zu verhindern. Der Übergang vom oxischen zum anoxischen Zustand des Seebodens ist auch deutlich im Mn/Fe Verhältnis erkennbar und in den Schwefelvariationen dokumentiert.

Es gibt keinen Hinweis auf einen Sauerstoffmangel vor den 1950er. Obwohl die unteren Bereiche der Kerne nicht präzise datiert werden können, gehen diese sehr wahrscheinlich bis 1900 zurück, manche sogar bis 1850. Vor Mitte des letzten Jahrhunderts haben sich die Sedimente des Obersees eher in einem klastischen System abgelagert. Die grauen und rötlichbraunen Schichten sind Ablagerungen von allochthonem Material aus verschiedenen Zuflüssen.

Das Auftreten von sehr niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im tiefsten Bereich des Lachener Beckens jeden Sommer ist deshalb keine natürliche Erscheinung. Der Wechsel in einem biochemischen System, in dem eher autochthones Material abgelagert wird, ist sehr wahrscheinlich eine Folge der Eutrophierung sowie veränderter Materialzufuhr durch den Bau des Staudamms (Aufstauung Wägitalersee: 1924, Aufstauung Sihlsee: 1937). Die höhere Primärproduktion führt zu einem erhöhtem Sauerstoffverbrauch durch den Abbauprozess des absinkenden organischen Materials im Hypolimnion.

Wie schon erwähnt, haben auch andere Faktoren einen Einfluss auf die Sauerstoffverhältnisse im Obersee, wie zum Beispiel die spezielle Form des Seebeckens (Örn und Thomas, 1983). Trotz tiefem Phosphorgehalt und geringer Algenproduktion haben sich die Sauerstoffverhältnisse im Obersee nicht verbessert. Dies lässt sich teilweise durch die reduzierte Zuflussmenge sowie höhere Lufttemperaturen erklären, die den Austausch mit dem Tiefenwasser verhindern und so deren Sauerstofferneuerung verunmöglichen.

## Literaturverzeichnis

- Carradori, M., 2005. Eutrophierungsspuren in den Sedimenten des Zürichobersees. Unpublizierte Diplomarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. Nr. 691.
- Enters D., Kirilova E., Lotter A. F., Lücke A., Parplies J., Jahns S., Kuhn G., Zolitschka B. Climate change and human impact at Sacrower See (NE Germany) during the past 13,000 years: a geochemical record. *J Paleolimnol*, 43:719-737, 2010.
- Gammeter, S., Forster, R., Zimmermann, U. (1997), *Limnologische Untersuchung des Zürichsees 1972 – 1996*, Wasserversorgung Zürich, 62 S.
- Gammeter, S., Forster, R., 2002. *Langzeituntersuchungen im Zürichobersee 1972 – 2000*. Wasserversorgung Zürich, 46 S.
- Kelts, K., Hsü, J. K., 1978. Freshwater Carbonate Sedimentation. In Lerman, A., (Ed.), *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. New York, United States of America: Springer Verlag, S.295-323.
- Lotter, A. F., M. Sturm, J. Teranes, B. Wehrli, 1997. Varve formation since 1885 and high resolution varve analyses in hypertrophic Baldeggersee (Switzerland). *Aquatic Sciences* 59:304–325.
- Minder, L. (1922): Studien über den Sauerstoffgehalt des Zürichsees. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 3: 107-155.
- Naeher, S., Gilli, A., North, R. P., Hamann, Y., Schubert, C. J. (2013), Tracing bottom water oxygenation with sedimentary Mn/Fe ratios in Lake Zurich, Switzerland, *Chemical Geology*, 352, 125–133.
- Niessen, F. and M. Sturm, 1987. The sediments of lake Baldegg (Switzerland) – Sedimentary environment and development of eutrophication for the last 100 years. *Arch. Hydrobiol.* 108: 365–383.
- Örn, C. G. & E. A. Thomas (1983): Bedeutung von Zufluss und Wind auf die Wärme- und Sauerstoffverhältnisse im Zürich-Obersee von 1950 bis 1975. *Gas Wasser Abwasser* 63: 33-44.
- Schaller T, Moor HC, Wehrli B (1997) Sedimentary profiles of Fe, Mn, V, Cr, As and Mo as indicators of benthic redox conditions in Baldeggersee. *Aquat Sci* 59:345–361
- Schildknecht, A., Köster, O., Koss, M., Forster, R., Leemann, M. (2013), *Gewässerzustand von Zürichsee, Zürichobersee und Walensee: Auswertungen der Untersuchungsergebnisse bis 2010*, Stadt Zürich, Wasserversorgung, 97 S.
- Thomas, E. A. & C. G. Örn (1984): Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse im Zürich-Obersee und im Zürich-Untersee von 1936 bis 1982. *Arch. Hydrobiol.* 101: 327-342.