

Phosphor-Nettosedimentation im Lauerzersee



David Janssen, Nathalie Dubois

IMPRESSUM

Auftraggeber

Amt für Gewässer des Kantons Schwyz

Autoren

David Janssen, Nathalie Dubois

Referenzierung

Janssen DJ, Dubois N (2025). Phosphor-Nettosedimentation im Lauerzersee. Kurzbericht im Auftrag des Amts für Gewässer des Kantons Schwyz, Eawag, Kastanienbaum.

Publikationsdatum

14. November 2025

Titelbild

Der Lauerzersee und sein Einzugsgebiet, gesehen von der Rigi. David Janssen

INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund	4
2	Eigenschaften des Lauerzersees.....	5
3	Phosphor-nettosedimentation.....	8
3.1	Probenahme und Analytik	8
3.2	Phosphorverteilung und Nettosedimentation.....	8
4	Ausblick.....	11
	Danksagung	11
	Literatur.....	11
5	Anhang.....	13

1 HINTERGRUND

Gemäss der Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.20) darf die Konzentration von gelöstem Sauerstoff in Schweizer Seen nicht unter $4 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ sinken. Diese Anforderung wird im Lauerzersee jedoch nicht erfüllt: Während der sommerlichen Schichtung fallen die Sauerstoffkonzentrationen unterhalb der Sprungschicht (ca. 5 m Tiefe) regelmässig unter diesen Grenzwert.

Mehrere in den letzten Jahrzehnten im Auftrag des Kantons Schwyz durchgeführte Untersuchungen (u. a. Aquaplus, 2005; Limnex, 2015; Schmid & Janssen, 2023) zeigen, dass sich die Sauerstoff- und Nährstoffsituation im See bislang nicht signifikant verbessert hat.

Im Rahmen des jüngsten Auftrags an die Eawag (Schmid & Janssen, 2023) sollten insbesondere folgende Aspekte bewertet werden:

- Verfügbarkeit von Informationen zur Definition geeigneter Massnahmen zur Verbesserung der O_2 -Konzentrationen im See,
- Wirksamkeit potenzieller Massnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge und zur Erhöhung der Sauerstoffkonzentrationen,
- Struktur und Angemessenheit der laufenden Überwachung (Parameterwahl, Messfrequenz) sowie Optionen für eine ergänzende Überwachung auf Einzugsgebietsebene,
- Prüfung, ob im Lauerzersee „besondere natürlichen Verhältnisse“ gemäss Anhang 2, Ziffer 13, Buchstabe b GSchV bestehen, d. h. ob seine natürlichen Eigenschaften eine dauerhafte Einhaltung des Grenzwertes von $\geq 4 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ verhindern.

Der Bericht von 2023 kam zum Schluss, dass der Lauerzersee aufgrund seiner morphometrischen und limnologischen Eigenschaften besonders anfällig für eine Sauerstoffverarmung im Hypolimnion ist. Es wurde aufgezeigt, dass konventionelle Massnahmen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht ausreichen würden, um die Vorgaben der GSchV dauerhaft zu erfüllen.

Aufgrund der engen Kopplung zwischen der Phosphorverfügbarkeit und dem Sauerstoffverbrauch im Hypolimnion (vgl. Müller et al., 2019) ist aber davon auszugehen, dass eine Reduktion der Phosphoreinträge in den See langfristig zu einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse in der Tiefe führen kann. Vor diesem Hintergrund empfahl der Bericht von Schmid & Janssen (2023), die aktuelle Phosphorbilanz des Lauerzersees – einschliesslich der Nettosedimentation von Phosphor – detaillierter zu quantifizieren und zu begrenzen.

Der Kanton Schwyz hat die Eawag beauftragt, bei der Bestimmung der aktuellen Phosphorbilanz des Lauerzersees mitzuwirken. Im Rahmen dieses Auftrags wurde ein neuer Sedimentkern entnommen, um die Netto-Sedimentation von Phosphor im See zu bestimmen, das heisst, die Menge Phosphor, welche dauerhaft im Sediment eingelagert wird.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die dabei durchgeführten Arbeiten, die methodischen Ansätze sowie die erzielten Ergebnisse und bildet damit eine Grundlage für die weitere Bewertung und das Management des Nährstoffhaushalts im Lauerzersee.

2 EIGENSCHAFTEN DES LAUERZERSEES

Der Lauerzersee liegt auf einer Höhe von 447 m ü. M. und weist eine Fläche von 3.1 km² auf. Das gesamte Einzugsgebiet (einschliesslich des Sees) umfasst 72.4 km² (vgl. Abbildung 1). Etwa 50 % des Einzugsgebiets werden landwirtschaftlich genutzt, rund 35 % sind bewaldet, während die restlichen Flächen aus Siedlungs- und unproduktiven Gebieten bestehen (EBP, 2003).

Der Hauptzufluss erfolgt über die Steiner Aa, die nahezu die Hälfte des Einzugsgebiets entwässert und an der Westseite des Sees mündet. Die wichtigsten Kennwerte des Sees sind in Tabelle 1 (nach Schmid & Janssen, 2023) zusammengefasst.

Tabelle 1: Morphologische und hydraulische Kennwerte des Lauerzersees.

Kenngrösse	Wert	Quelle
Oberfläche	3.1 km ²	BAFU (map.geo.admin.ch)
Einzugsgebietsfläche (inkl. See)	72.4 km ²	BAFU (map.geo.admin.ch)
Maximale Tiefe	14 m	BAFU (map.geo.admin.ch)
Mittlere Tiefe	7.5 m	(Ribi et al. 2005)
Gesamtes Volumen	23.4 × 10 ⁶ m ³	(Ribi et al. 2005)
Volumen Epilimnion (bis 5 m Tiefe)	13.7 × 10 ⁶ m ³	(Ribi et al. 2005)
Volumen Hypolimnion	9.8 × 10 ⁶ m ³	(Ribi et al. 2005)
Grenzfläche Epi-/Hypolimnion	2.3 km ²	(Ribi et al. 2005)
Mittlerer Abfluss	3.1 m ³ /s	BAFU (map.geo.admin.ch)
Mittlere Wasseraufenthaltszeit	87 d	berechnet aus Abfluss und Volumen
Höhenlage	447 m ü. M.	BAFU (map.geo.admin.ch)

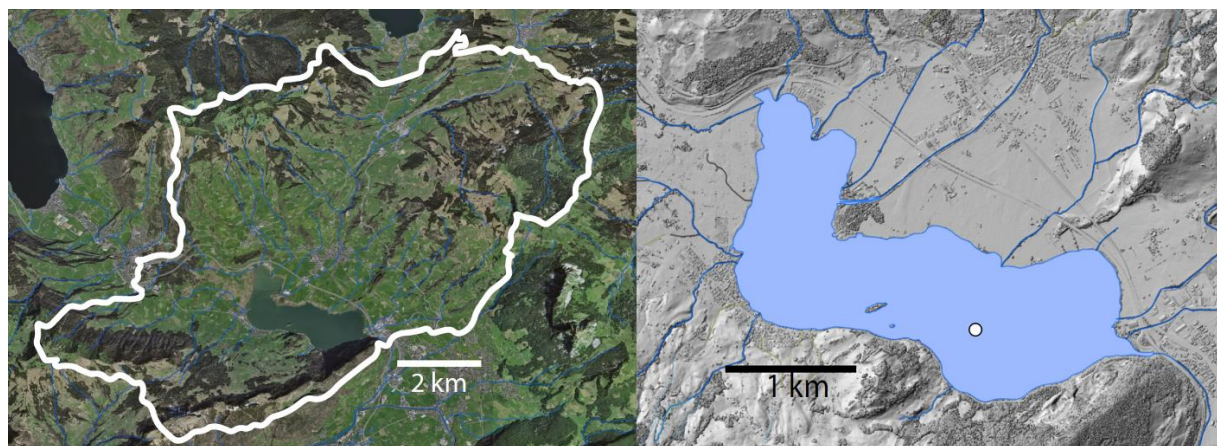


Abbildung 1: Übersicht über den Lauerzersee und sein Einzugsgebiet. Links ist das Einzugsgebiet in weisser Umrandung dargestellt, rechts der See mit seinen Zuflüssen und dem Abfluss. Die Position der Sedimentkernentnahmestelle ist mit einem weissen Punkt markiert. (Quelle Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopographie, map.geo.admin.ch).

Die Überwachungsdaten zeigen, dass der See in den Monaten November und Dezember vollständig durchmischt wird. Dabei erreicht der Sauerstoff im Tiefenwasser Konzentrationen von 10–11 mg L⁻¹ O₂. Nach dieser Durchmischung bildet sich eine Eisschicht, deren Dauer von den jeweiligen Winterbedingungen abhängt.

Während der Eisbedeckung setzt ein kontinuierlicher Sauerstoffabbau im Tiefenwasser ein, dessen Ausmass direkt mit der Dauer der Eisbedeckung zusammenhängt. Im späten Winter bzw. frühen Frühling kann es nach der Eisschmelze zu einer erneuten (teilweisen) Durchmischung kommen; diese führt jedoch nicht immer zu einer vollständigen Erneuerung des Sauerstoffs im Hypolimnion. Somit kann ein Teil des Sauerstoffdefizits in die folgende Schichtungsperiode übertragen werden (AquaPlus, 2006a; Limnex, 2015; Schmid & Janssen, 2023).

Die geringe maximale (14 m) und mittlere Tiefe (7.5 m) des Lauerzersees – insbesondere im Verhältnis zu seiner grossen Oberfläche – hat einen entscheidenden Einfluss auf den Sauerstoffhaushalt. Aufgrund des hohen Verhältnisses zwischen Sedimentoberfläche und Wasservolumen ist der nach der Durchmischung verfügbare Sauerstoffvorrat vergleichsweise gering. Folglich ist ein grosser Teil des Sees während der sommerlichen Schichtung anfällig für Sauerstoffmangel. Unterhalb der Thermokline (typischerweise in 4–6 m Tiefe) wird der See regelmässig sauerstofffrei.

Frühere Massenbilanzberechnungen ergaben einen Netto-Sauerstoffverlust von $0.4\text{--}0.5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, was einem Gesamtverlust von $0.55\text{--}0.65 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ über die Epilimnion-Hypolimnion-Grenzfläche entspricht (AquaPlus, 2005; Jaun et al., 2006; Müller et al., 2012; Limnex, 2015; Schmid & Janssen, 2023). Dieser Verlust wird primär durch den mikrobiellen Abbau organischer Substanz in den Sedimenten erklärt. Die Sauerstoffzehrung müsste in den Bereich von $0.20\text{--}0.25 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ gesenkt werden, um zu verhindern, dass die mittleren O_2 -Konzentrationen im Hypolimnion unter den Grenzwert von $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ fallen (Schmid & Janssen, 2023).

Die kurze Wasseraufenthaltszeit im Lauerzersees (ca. 3 Monate, bezogen auf das Gesamtvolumen) deutet darauf hin, dass die saisonale Nährstoffzufuhr aus den Zuflüssen im Verhältnis zum internen Nährstoffgehalt des Sees bedeutend ist. Der Nährstoffhaushalt wird somit von den externen Einträgen dominiert.

Während der Sommermonate wird dieser Effekt verstärkt, da die Schichtung zu einer Isolation des Tiefenwassers führt und das Volumen der aktiv durchmischten Schicht (Epilimnion) kleiner wird (vgl. Volumenangaben in Tabelle 1).

Die jährlichen Phosphoreinträge betragen nach aktuellen Schätzungen:

- Gesamt-Phosphor (TP): etwa $7.7\text{--}9.3 \text{ t P a}^{-1}$
- Gesamt gelöster Phosphor (TDP): etwa $2.5\text{--}3.0 \text{ t P a}^{-1}$

(EBP, 2003; Limnex, 2020; Hutchings et al., 2023; siehe auch Tabelle 2 in Schmid & Janssen, 2023).

Die Hauptquelle des Phosphors sind diffuse Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Entsprechend hängt die jährliche Belastung stark von den hydrologischen Bedingungen ab – in niederschlagsreichen Jahren sind die Phosphoreinträge deutlich höher als in trockenen Jahren (Linx, 2020).

Der bioverfügbare Phosphor während der sommerlichen Schichtung wurde auf $0.35\text{--}0.50 \text{ g P m}^{-2}$ geschätzt (Schmid & Janssen, 2023). Unter Verwendung der in Kiefer et al. (2021) dargestellten Beziehung zwischen O_2 -Zehrung und bioverfügbarem Phosphor (vgl. Abbildung 2) lässt sich ableiten, dass eine Reduktion des bioverfügbaren Phosphors zu einer geringeren Sauerstoffzehrung führen würde.

Gemäss Schmid & Janssen (2023) wäre eine Reduktion um 60–70 % erforderlich, um die Zielwerte eines durchschnittlichen Hypolimnion- O_2 -Gehalts von $> 4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ zu erreichen – ein Wert, der realistisch kaum erreichbar ist. Dennoch würde bereits eine moderate Reduktion des Phosphoreintrags zu einer merklichen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse beitragen.

Abschliessend ist hervorzuheben, dass der überwiegende Teil des bioverfügbaren Phosphors aus externen Quellen (v. a. Landwirtschaft) stammt, während der interne P-Umsatz nur eine untergeordnete Rolle spielt. Daher sollten Massnahmen zur Verringerung der P-Konzentrationen auf die Reduktion externer Einträge fokussieren.

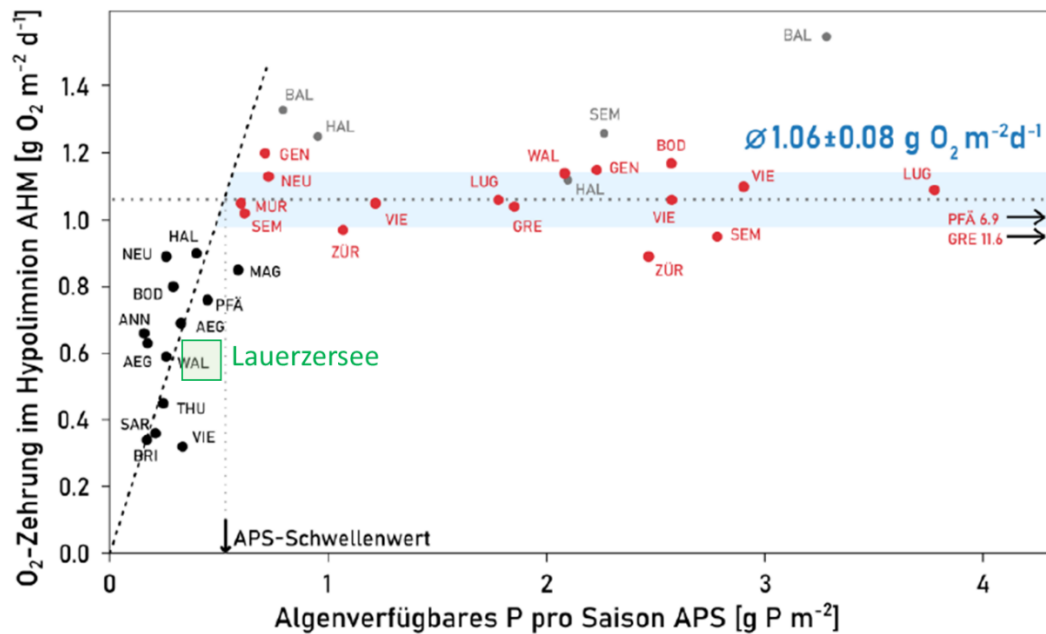


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen algenverfügbarem Phosphor während der Sommerschichtung und der Sauerstoffzehrung im Hypolimnion in Schweizer Seen und dem Lac d'Annecy (Kiefer et al. 2021, siehe auch Müller et al., 2019), ergänzt mit den grob geschätzten Werten für den Lauerzersee (aus Schmid & Janssen, 2023). Für die Daten der anderen Seen siehe Tabelle 3 in Kiefer et al. (2021).

3 PHOSPHOR-NETTOSEDIMENTATION

3.1 PROBENAHME UND ANALYTIK

Am 4. August 2025 wurde an der Position 688'833 / 209'514 (in der Nähe der Messstation Husmatt) ein Sedimentkern (Kern LAU-25-03) entnommen. Der Kern wurde der Länge nach halbiert; eine Hälfte wurde fotografisch dokumentiert (vgl. Abbildung A.1), die zweite Hälfte in 1-cm-Intervalle unterteilt.

Zur Bestimmung der Nass- und Trockendichte des Sediments wurden für jedes Intervall die Massen vor und nach der Gefriertrocknung sowie das jeweilige Sedimentvolumen erfasst. Die Proben wurden anschliessend manuell homogenisiert, oxidativ aufgeschlossen (nach DIN/ISO 15681-1:2003) und spektrophotometrisch auf Gesamtphosphor (TP) und Gesamtstickstoff (TN) analysiert.

Für die Datierung wurden insgesamt 21 Proben mit einem HPGe-Bohrlochdetektor gemessen. Die Messzeit betrug pro Probe mindestens 48 Stunden. Die Altersbestimmung erfolgte anhand der γ -Aktivitäten von ^{137}Cs , ^{210}Pb und ^{226}Ra . Das ^{137}Cs -Profil (vgl. Abbildungen A.2 und A.3) zeigt zwei ausgeprägte Maxima:

- ein Maximum bei 25 cm Tiefe, das dem Tschernobyl-Fallout (1986) zugeordnet wird, und
- ein Maximum bei 39 cm Tiefe, das dem Fallout der atmosphärischen Atomwaffentests von insbesondere 1963 entspricht.

Aufgrund des auf ^{210}Pb basierenden CF:CS-Modells wurde eine mittlere Sedimentationsrate von 0.66 cm a^{-1} berechnet und bis zu einer Tiefe von 85 cm extrapoliert. Die detaillierten Datierungen sind in Tabelle A.1 aufgeführt; die berechneten P-Sedimentationsraten in 1-cm-Intervallen sind in Tabelle A.2 dargestellt.

3.2 PHOSPHORVERTEILUNG UND NETTOSEDIMENTATION

Die tiefsten Sedimentabschnitte des Kerns (ca. 80 cm, Sedimentationsjahr ± 1900) weisen relativ stabile P-Gehalte von etwa $250 \mu\text{g P g}^{-1}$ auf. In Richtung Oberfläche steigen die Konzentrationen kontinuierlich an, mit einem deutlichen Sprung bei ca. 4 cm, der die P-ärmeren tieferen Sedimente von den P-reichen Oberflächensedimenten ($> 600 \mu\text{g P g}^{-1}$) trennt (vgl. Abbildung 3A, Tabelle 1).

Diese Werte liegen im Bereich mesotropher Seen wie des Zürichsees und Bodensees, sind jedoch niedriger als jene eutropher Systeme wie Baldeggersee, Hallwilersee oder Sempachersee (Gächter & Wehrli, 1999; Moosmann et al., 2006).

Unter Verwendung der Sedimentationsrate (0.66 cm a^{-1}) und der Trockendichte wurden die P-Gehalte in Netto-P-Akkumulationsraten umgerechnet (Tabelle A.2). Um Vergleiche zwischen Seen unterschiedlicher Grösse zu ermöglichen, werden die Werte flächennormiert in $\text{kg P km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ angegeben. Die aktuellen Nettosedimentationsraten betragen $1500 - 2200 \text{ kg P km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, während in den älteren Sedimentabschnitten $900 - 1200 \text{ kg P km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ermittelt wurden. Damit liegen die Werte des Lauerzersees über denjenigen anderer Schweizer Seen, selbst in deren ehemals hypertrophen Phasen (Baldeggersee, Hallwilersee, Greifensee, Pfäffikersee: $\sim 300 - 1100 \text{ kg P km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; Moosmann et al., 2006).

Für die Gesamt-P-Massenbilanz wurde die Sedimentationsrate auf die gesamte Seefläche von $3,1 \text{ km}^2$ hochgerechnet. Dies ergibt eine Nettosedimentation von $4.7 - 7.0 \text{ t P a}^{-1}$ in den letzten Jahren. Diese Berechnung setzt voraus, dass die Sedimentation im gesamten See räumlich homogen ist. Frühere Untersuchungen weisen jedoch auf örtliche Unterschiede hin, mit Sedimentationsraten zwischen dem

0.5- und dem 2-fachen der in diesem Kern bestimmten Werte (Aquaplus, 2002; Busmann & Anselmetti, 2010). Die vorliegende Berechnung liefert daher eine erste Näherung zur Quantifizierung der P-Sedimentation und dient als Grundlage für die Massenbilanzabschätzung (vgl. Abbildung 3B).

Vergleichsdaten zeigen, dass die Netto-P-Sedimentation im Lauerzersee sowohl in der jüngeren Vergangenheit als auch während früherer Eutrophierungsphasen höher ist als in anderen untersuchten Schweizer Seen (Moosmann et al., 2006; Müller et al., 2014).

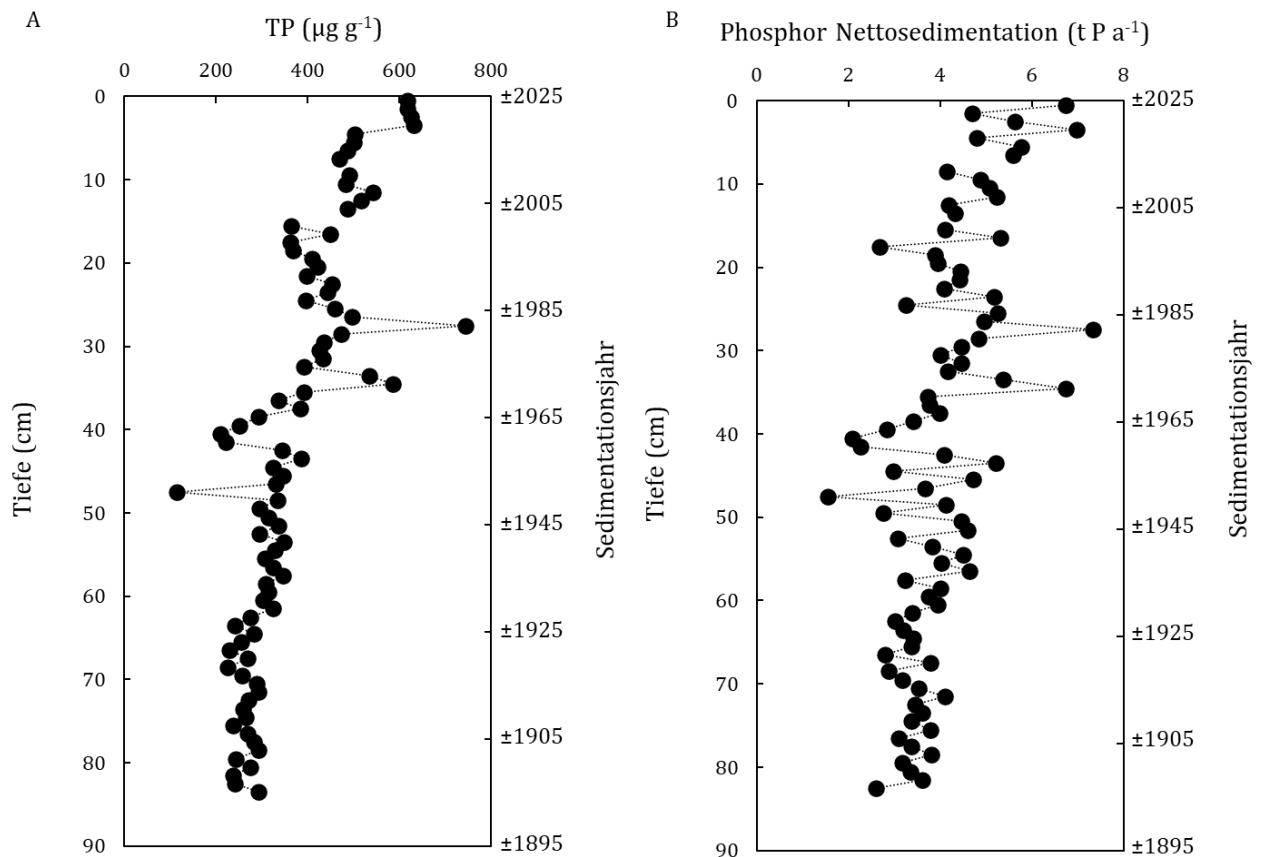


Abbildung 3: Vertikale Verteilung des Gesamtphosphorgehalts (TP) im Sediment (Panel A, $\mu\text{g P g}^{-1}$ Trockensediment) und Netto-Phosphor-Sedimentationsraten (Panel B, t P a^{-1}) im Sedimentkern LAU-25-03. Die Daten sind sowohl in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe (linke vertikale Achse) als auch vom geschätzten Sedimentationsjahr dargestellt. Die Datierung erfolgte auf Basis des Bohrungsjahres 2025 und einer mittleren Sedimentationsrate von 0.66 cm a^{-1} . Die Altersangaben dienen als Orientierungswerte. (siehe Altersmodell im Anhang, Abbildungen A.2, A.3, Tabelle A.2).

Die geschätzten Gesamt-P-Einträge (TP) in den Lauerzersee betrugen in den letzten zehn Jahren etwa $7.7 - 9.3 \text{ t P a}^{-1}$, mit geringeren Werten in trockenen Jahren (Limnex, 2020; Schmid & Janssen, 2023). Daraus ergibt sich ein Verhältnis von Netto-Sedimentation zu Eintrag von $0.62 - 0.75 \pm 0.1$, d. h. 62 – 75 % (± 10 %) des jährlich zugeführten Phosphors werden in den Sedimenten festgelegt.

Dieses Verhältnis liegt im unteren Bereich der von Moosmann et al. (2006) für andere Schweizer Seen abgeleiteten Werte (vgl. Abbildung 4). Die Unsicherheiten bei der Übertragung dieser Modellkurven sind jedoch beträchtlich; die Daten des Lauerzersees zeigen eine grössere Ähnlichkeit mit dem Pfäffikersee. Die Position des Lauerzersees auf der in Abbildung 4 dargestellten Sedimentations-/Eintrags-Kurve wird stark durch die kurze Wasseraufenthaltszeit (< 3 Monate) beeinflusst. Diese führt zu einem hohen Wasserdurchsatz und damit zu einem verstärkten Phosphorabfluss aus der

Wassersäule. Gleichzeitig wird das Volumen des Hypolimnions – und damit das potenzielle interne P-Reservoir – durch die geringe Seetiefe limitiert.

In der Folge sind die TP-Konzentrationen nach der Mischung im Frühjahr im Vergleich zu anderen Seen mit ähnlicher jährlicher P-Belastung relativ niedrig, trotz saisonaler Anoxie im Hypolimnion (vgl. Moosmann et al., 2006). Die niedrige P-Einlagerungseffizienz weist darauf hin, dass rund ein Drittel ($\approx 33\%$) des zugeführten Phosphors nicht dauerhaft im Sediment gebunden wird, sondern über das Abflussregime wieder ausgetragen wird. Die relativ geringe P-Sedimentation im Verhältnis zum jährlichen Eintrag ist nicht auf eine Limitierung der Sedimentbindungskapazität, sondern vielmehr auf die hohe Wassererneuerungsrate zurückzuführen. Der kontinuierliche Zufluss von nährstoffreichem Wasser führt dazu, dass der im See gebundene Phosphor laufend durch frische Einträge ersetzt wird. Zudem ist zu berücksichtigen, dass ein bedeutender Teil des zugeführten Gesamtphosphors in partikulärer Form vorliegt. Diese Partikel können sich – ohne wesentliche chemische oder biologische Umwandlungsprozesse – direkt in den Sedimenten ablagern, wodurch das Verhältnis von P-Sedimentation zu P-Eintrag erhöht wird.

In Übereinstimmung mit diesem Befund liegt die Nettosedimentationsrate σ (gemäss Müller et al., 2014) für den Lauerzersee bei etwa 8 a^{-1} . Das bedeutet, dass jährlich rund das Achtfache des internen TP-Inventars bei der Mischung in den Sedimenten gebunden wird – ein Wert, der deutlich über dem Wert (~ 2) liegt, der für den Lauerzersee basierend auf dem in Sempacher-, Hallwiler-, Baldegger- und Pfäffikersee beobachteten Zusammenhang zwischen Seetiefe und Sedimentation erwartet würde (vgl. Abbildung 5 in Müller et al., 2014). Diese erhöhte Rate verdeutlicht die Dominanz der externen P-Einträge gegenüber der internen Phosphordynamik und unterstreicht, dass eine Verminderung der externen Nährstoffeinträge für eine nachhaltige Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Lauerzersee entscheidend ist.

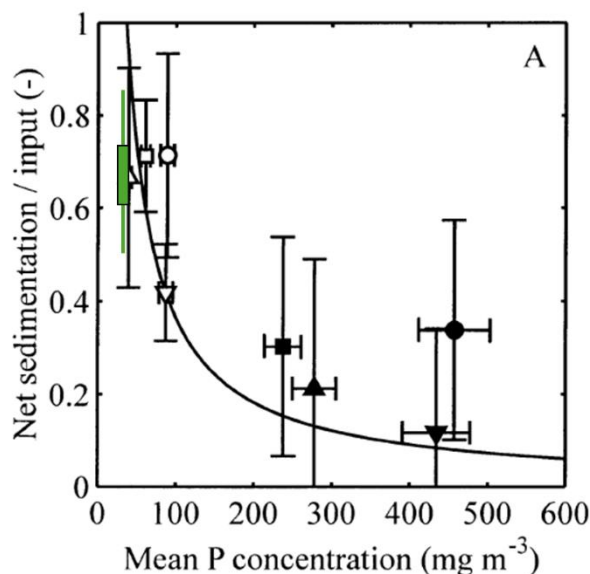


Abbildung 4: Verhältnis von Netto-Phosphor-Sedimentation zu jährlichem Gesamt-Phosphor-Eintrag (TP) in Abhängigkeit von der mittleren P-Konzentration bei der Mischung im Frühjahr. Die Darstellung wurde nach Moosmann et al. (2006) adaptiert. Das grün markierte Feld zeigt die Position des Lauerzersees, mit einem geschätzten TP-Gehalt von rund $30\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ bei der Mischung. (siehe Abbildung 6 in Schmid & Janssen, 2023).

4 AUSBLICK

Die vorliegenden Ergebnisse zur Netto-Phosphor-Sedimentation verdeutlichen, dass die Sedimentationsrate von Phosphor im Lauerzersee im Verhältnis zum gesamten P-Inhalt des Sees außergewöhnlich hoch ist, während der Anteil der jährlichen P-Zufuhr, der tatsächlich in den Sedimenten gebunden wird, vergleichsweise gering bleibt.

Beide Befunde lassen sich durch die kurze Wasseraufenthaltszeit im See erklären. Der Lauerzersee weist im Vergleich zu anderen Schweizer Seen eine geringe mittlere Tiefe und damit ein hohes Verhältnis von Seefläche zu Volumen auf. In Kombination mit den erhöhten externen Phosphoreinträgen aus dem Einzugsgebiet führt dies zu einer Dynamik, bei der der See rasch auf Veränderungen der Nährstoffzufuhr reagiert. Während die Phosphoranreicherung im Hypolimnion in den saisonalen TP-Tiefenprofilen deutlich erkennbar ist, deutet die hohe Netto-P-Sedimentation darauf hin, dass die Sedimente über eine ausreichende Bindungskapazität verfügen, um einen erheblichen Teil des vorhandenen Phosphors langfristig zu fixieren.

Entscheidend für eine nachhaltige Reduktion des Gesamtphosphorgehalts ist vielmehr eine Verringerung der externen P-Einträge aus dem Einzugsgebiet. Aufgrund der kurzen hydraulischen Verweilzeit des Lauerzersees ist davon auszugehen, dass der See relativ rasch auf Veränderungen im externen Phosphorhaushalt reagieren wird.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Anita Schlatter, Irene Brunner und Sina Spieser für die Probenahme, Irene Brunner, Pascal Rünzi, und Patrick Kathriner für Analyse, und Martin Schmid für Kommentare zum Text.

LITERATUR

- AquaPlus (2002). Entwicklung des Gesamtphosphors im Lauerzersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz, Zug.
- AquaPlus (2005) Untersuchung des Lauerzersees (Kanton Schwyz). Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz. AquaPlus, Zug
- AquaPlus (2006a) Limnologische Untersuchung des Lauerzersees (Kanton Schwyz). Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz. AquaPlus, Zug
- AquaPlus (2006b) Trophiegrad des Lauerzersees im Zeitraum 1904 bis 1919. Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz. AquaPlus, Zug
- Bussmann, F. & Anselmetti, F.S. (2010). Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (Central Switzerland). *Swiss J. Geosci.* **103**(1), 43-59. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0001-9>
- EBP (2003) Lebensraum Lauerzersee. Teilprojekt Landwirtschaft zur Sanierung des Lauerzersees. Teilaufgabe 1: Zusammenstellung der Grundlagen und Erkenntnisse. Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz. Ernst Basler + Partner AG, Zollikon

- Gächter, R. & Wehrli, B. (1998). Ten years of artificial mixing and oxygenation: no effect on the internal phosphorus loading of two eutrophic lakes. *Environ. Sci. Tech.* **32**(23), 3659-3665. <https://doi.org/10.1021/es980418l>
- Hutchings C, Spiess E, Prasuhn V (2023) Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS 3.1, Stand 2020. Agroscope Science. Agroscope, Zürich-Reckenholz, <https://doi.org/10.34776/as155g>
- Jaun L, Bloesch J, Diem T, Wüest A (2006) Sanierungsziele Lauerzersee, P- Reduktionsziele zur Verbesserung der Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser des Lauerzersees während der Sommerstagnation unter Berücksichtigung von geogenem Methan. Eawag, Kastanienbaum
- Kiefer I, Müller B, Wüest A (2021) Anleitung zur Analyse von Sauerstoffzehrung und Netto-Ökosystemproduktion. Eawag, Kastanienbaum; EPFL, Lausanne
- Limnex (2015) Limnologischer Zustand Lauerzersee 2014/5. Entwicklung des Seezustandes über die letzten 15 Jahre. Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Schwyz. Limnex AG, Brugg
- Limnex (2020) Phosphor-Eintrag in den Lauerzersee. Berichterstattung zur Messung des Phosphor-Eintrages in den Lauerzersee 2016 – 2020. Bericht im Auftrag des Amtes für Gewässer des Kantons Schwyz, Limnex AG, Brugg
- Moosmann L. & Wüest A. (2004) Sanierung des Lauerzersees – Phosphoreintrag und –bilanz. Eawag, Kastanienbaum
- Müller B, Bryant LD, Matzinger A, Wüest A (2012) Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes. *Environmental Science & Technology* 46:9964-9971, <https://doi.org/10.1021/es301422r>
- Müller, B., Gächter, R. and Wüest, A. (2014). Accelerated water quality improvement during oligotrophication in peri-alpine lakes. *Environ. Sci. Technol.* **48**(12), 6671-6677. <https://doi.org/10.1021/es4040304>
- Müller B, Steinsberger T, Schwefel R, Gächter R, Sturm M, Wüest A (2019) Oxygen consumption in seasonally stratified lakes decreases only below a marginal phosphorus threshold. *Scientific Reports* 9:18054, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54486-3>
- Odermatt JM (1970) Limnologische Charakterisierung des Lauerzersees mit besonderer Berücksichtigung des Planktons. Universität Zürich
- Ribi B, Bühner H, Ambühl H (2005) Hypsographische Daten von Seen. Stand 2005, Eawag, Dübendorf.
- Schmid M. & Janssen D. (2023). Sauerstoffdefizit im Lauerzersee: Review bisheriger Arbeiten als Grundlage für die künftige Überwachung und die Beurteilung möglicher Massnahmen. Bericht im Auftrag des Amtes für Gewässer des Kantons Schwyz, Eawag, Kastanienbaum.

5 ANHANG



Abbildung A.1: Linescan des Sedimentkerns, der für die Datierung und die Netto-P-Sedimentation verwendet wurde.

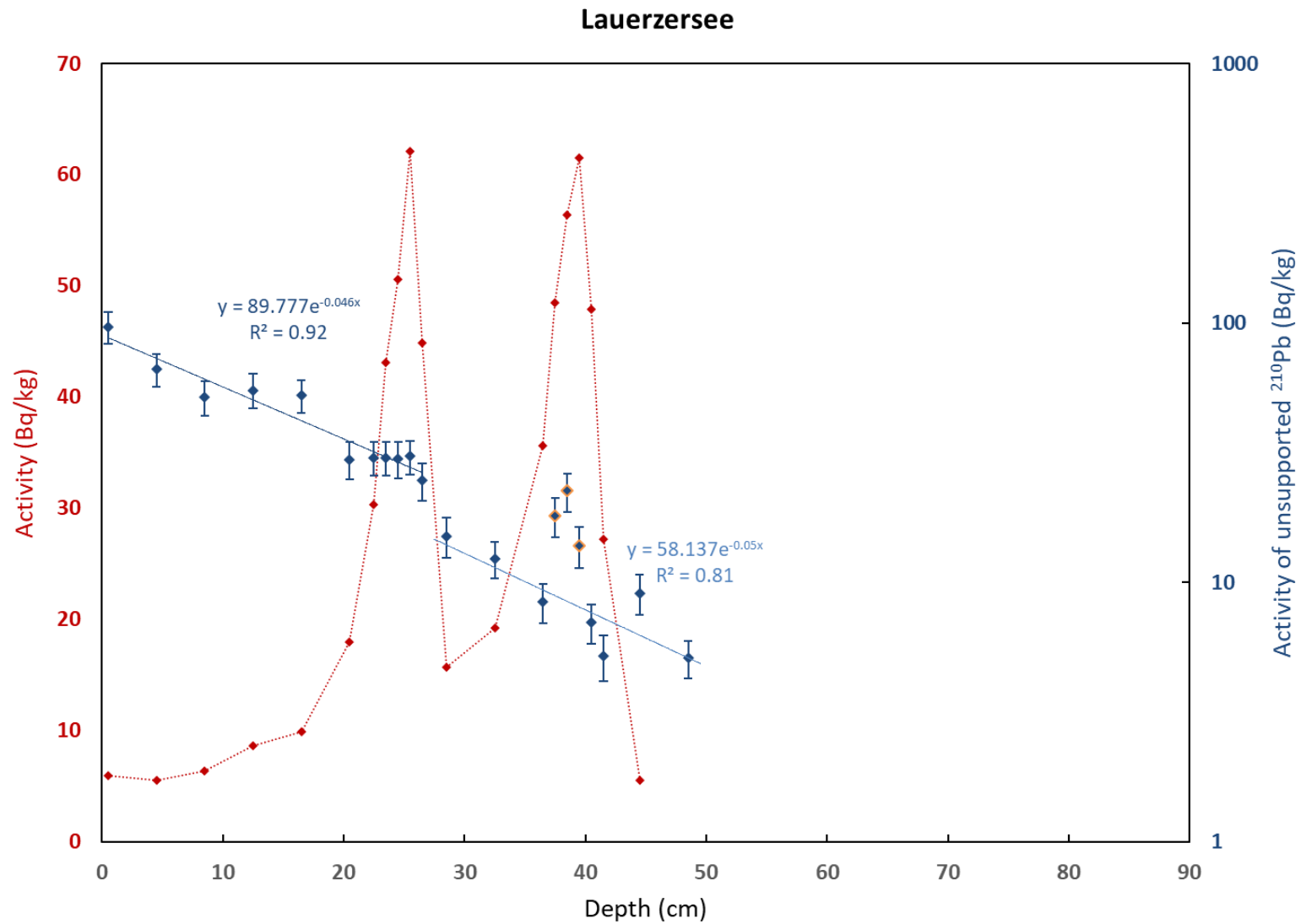


Abbildung A.2: Aktivitätskonzentrationen von Blei-210 (blau) und Cäsium-137 (rot) in Abhängigkeit von der Tiefe.

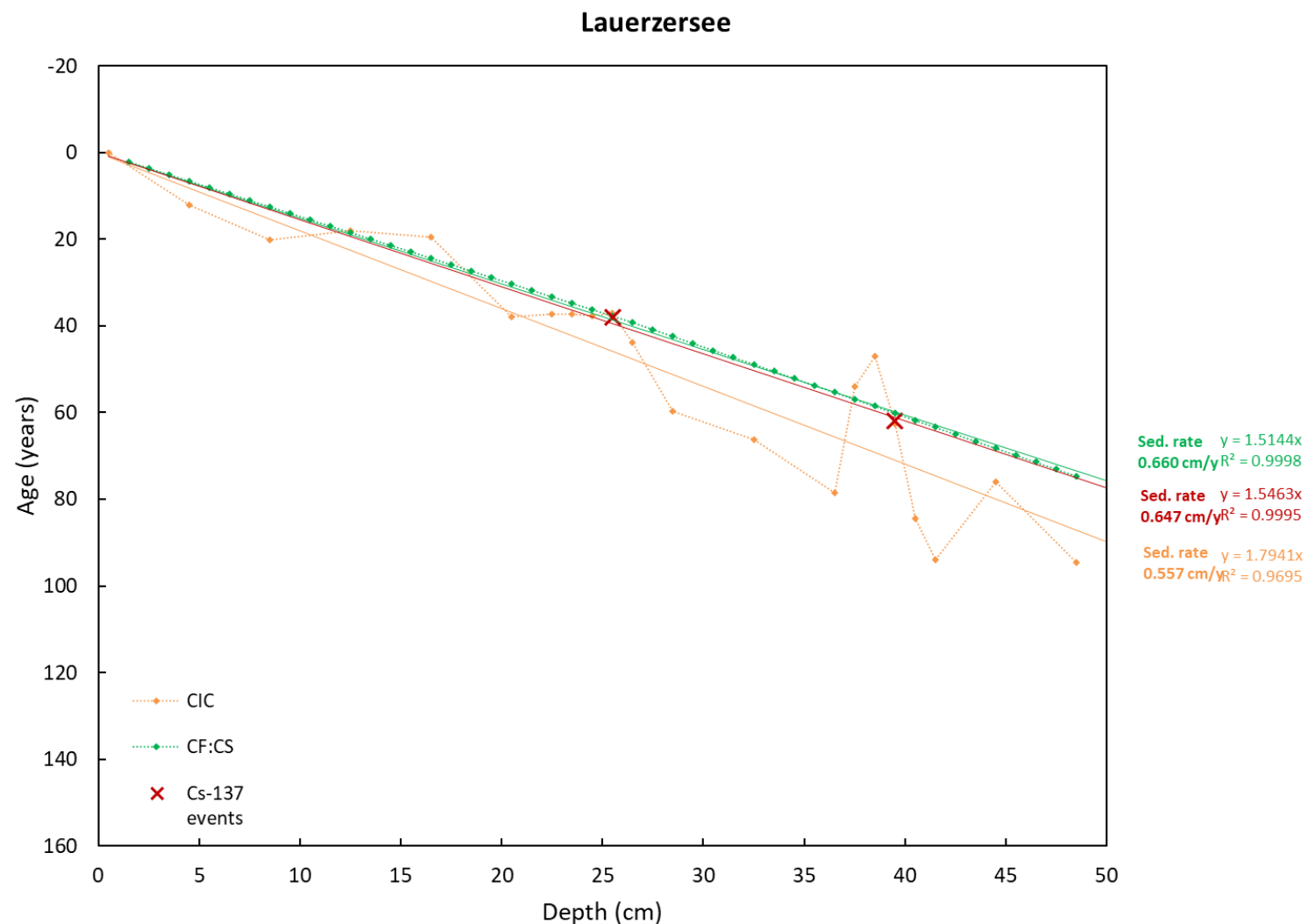


Abbildung A.3: Altersmodelle des Kerns LAU25-03. Das Constant Initial Concentration (CIC)-Modell ist in Orange dargestellt, das Constant Flux–Constant Sedimentation (CF:CS)-Modell in Grün. Die Tiefen der beiden Cäsium-Peaks (1963 und 1986) sind als rote Kreuze dargestellt. Die Sedimentationsrate von 0.66 cm a^{-1} anhand des CF:CS-Modellst stimmt mit den beiden ^{137}Cs -Peaks überein.

Table A.1: Wassergehalt, Dichte, TP und TN des Sedimentkerns.

Sample ID	Tiefe – oben	Tiefe – unten	Tiefe – Mittelwert	Wasser	Nassdichte	Trockendichte	TP	TN	TP
	(cm)	(cm)	(cm)	(%)	g cm ⁻³	g cm ⁻³	[µg P g ⁻¹]	[µg N g ⁻¹]	[µg P cm ⁻³]
LAU25-03_01	0	1	0.5	62.4	1.42	0.53	618	2524	329
LAU25-03_02	1	2	1.5	64.5	1.06	0.37	617	2422	229
LAU25-03_03	2	3	2.5	64.4	1.23	0.44	626	2371	275
LAU25-03_04	3	4	3.5	63.5	1.48	0.54	632	2528	341
LAU25-03_05	4	5	4.5	63.9	1.28	0.47	502	1914	235
LAU25-03_06	5	6	5.5	64.1	1.56	0.56	500	1832	282
LAU25-03_07	6	7	6.5	63.6	1.55	0.56	487	1761	274
LAU25-03_08	7	8	7.5	62.9	1.40	0.52	-	-	-
LAU25-03_09	8	9	8.5	63.2	1.18	0.43	469	1710	202
LAU25-03_10	9	10	9.5	63.1	1.32	0.49	491	1699	239
LAU25-03_11	10	11	10.5	63.5	1.40	0.51	484	1743	248
LAU25-03_12	11	12	11.5	64.3	1.33	0.47	542	1882	255
LAU25-03_13	12	13	12.5	64.4	1.11	0.40	516	1846	204
LAU25-03_14	13	14	13.5	64.0	1.21	0.43	487	1790	211
LAU25-03_15	14	15	14.5	63.8	1.31	0.47	-	-	-
LAU25-03_16	15	16	15.5	62.9	1.48	0.55	365	1344	201
LAU25-03_17	16	17	16.5	62.8	1.54	0.58	450	1583	260
LAU25-03_18	17	18	17.5	63.0	0.99	0.36	362	1377	131
LAU25-03_19	18	19	18.5	63.2	1.40	0.52	367	1458	190
LAU25-03_20	19	20	19.5	63.2	1.27	0.47	409	1608	192
LAU25-03_21	20	21	20.5	63.2	1.39	0.51	421	1451	217
LAU25-03_22	21	22	21.5	63.4	1.48	0.55	397	1403	216
LAU25-03_23	22	23	22.5	62.4	1.19	0.44	454	1427	200
LAU25-03_24	23	24	23.5	62.0	1.49	0.57	442	1430	253
LAU25-03_25	24	25	24.5	62.2	1.08	0.40	396	1308	159
LAU25-03_26	25	26	25.5	61.5	1.47	0.56	459	1315	257
LAU25-03_27	26	27	26.5	61.4	1.27	0.49	496	1396	242
LAU25-03_28	27	28	27.5	62.4	1.28	0.48	743	1715	359
LAU25-03_29	28	29	28.5	60.7	1.27	0.50	473	1303	237
LAU25-03_30	29	30	29.5	60.1	1.27	0.50	436	1212	218
LAU25-03_31	30	31	30.5	60.3	1.18	0.46	425	1186	196
LAU25-03_32	31	32	31.5	60.0	1.28	0.50	433	1268	218
LAU25-03_33	32	33	32.5	60.3	1.32	0.52	392	1279	204
LAU25-03_34	33	34	33.5	60.2	1.24	0.49	534	1522	262
LAU25-03_35	34	35	34.5	60.1	1.40	0.56	586	1499	329
LAU25-03_36	35	36	35.5	61.0	1.18	0.46	393	1343	182
LAU25-03_37	36	37	36.5	60.2	1.37	0.55	337	1249	184
LAU25-03_38	37	38	37.5	59.7	1.27	0.51	385	1232	195
LAU25-03_39	38	39	38.5	59.9	1.41	0.57	293	1307	167
LAU25-03_40	39	40	39.5	58.6	1.32	0.55	251	1213	138
LAU25-03_41	40	41	40.5	58.1	1.15	0.49	210	981	102

Kurzbericht Phosphor-Nettosedimentation im Lauerzersee, 14. November 2025

LAU25-03_42	41	42	41.5	57.2	1.18	0.50	220	1017	110
LAU25-03_43	42	43	42.5	56.2	1.33	0.58	344	1305	200
LAU25-03_44	43	44	43.5	56.0	1.50	0.66	385	1464	255
LAU25-03_45	44	45	44.5	55.4	1.01	0.45	325	1332	145
LAU25-03_46	45	46	45.5	55.5	1.49	0.67	347	1314	231
LAU25-03_47	46	47	46.5	55.8	1.24	0.54	330	1195	179
LAU25-03_48	47	48	47.5	55.1	1.49	0.67	114	1164	76
LAU25-03_49	48	49	48.5	54.5	1.32	0.60	334	1081	201
LAU25-03_50	49	50	49.5	54.3	0.99	0.45	296	903	134
LAU25-03_51	50	51	50.5	53.2	1.48	0.70	314	858	218
LAU25-03_52	51	52	51.5	52.7	1.42	0.67	336	852	225
LAU25-03_53	52	53	52.5	52.7	1.08	0.51	295	815	150
LAU25-03_54	53	54	53.5	52.9	1.14	0.54	348	908	187
LAU25-03_55	54	55	54.5	52.5	1.41	0.67	328	971	220
LAU25-03_56	55	56	55.5	52.4	1.35	0.64	306	871	196
LAU25-03_57	56	57	56.5	52.4	1.47	0.70	324	949	227
LAU25-03_58	57	58	57.5	52.7	0.96	0.45	347	1043	158
LAU25-03_59	58	59	58.5	52.3	1.33	0.64	308	965	196
LAU25-03_60	59	60	59.5	52.0	1.21	0.58	314	986	184
LAU25-03_61	60	61	60.5	52.0	1.34	0.64	303	887	193
LAU25-03_62	61	62	61.5	52.9	1.09	0.51	325	1025	166
LAU25-03_63	62	63	62.5	53.1	1.14	0.54	275	852	147
LAU25-03_64	63	64	63.5	52.4	1.36	0.65	241	753	156
LAU25-03_65	64	65	64.5	52.0	1.22	0.59	283	910	167
LAU25-03_66	65	66	65.5	52.1	1.36	0.65	255	828	165
LAU25-03_67	66	67	66.5	51.8	1.23	0.59	229	732	136
LAU25-03_68	67	68	67.5	51.6	1.43	0.69	269	950	185
LAU25-03_69	68	69	68.5	51.1	1.27	0.62	226	811	141
LAU25-03_70	69	70	69.5	50.4	1.23	0.61	256	776	155
LAU25-03_71	70	71	70.5	50.4	1.21	0.60	289	793	173
LAU25-03_72	71	72	71.5	50.8	1.39	0.69	292	775	201
LAU25-03_73	72	73	72.5	50.1	1.25	0.62	270	731	169
LAU25-03_74	73	74	73.5	49.4	1.36	0.68	258	678	177
LAU25-03_75	74	75	74.5	49.8	1.24	0.62	265	766	165
LAU25-03_76	75	76	75.5	50.1	1.56	0.78	238	681	185
LAU25-03_77	76	77	76.5	50.5	1.14	0.56	269	814	151
LAU25-03_78	77	78	77.5	50.4	1.18	0.58	283	832	165
LAU25-03_79	78	79	78.5	50.2	1.28	0.64	293	903	186
LAU25-03_80	79	80	79.5	49.7	1.28	0.64	243	759	155
LAU25-03_81	80	81	80.5	49.6	1.19	0.60	274	882	164
LAU25-03_82	81	82	81.5	49.4	1.48	0.74	237	683	177
LAU25-03_83	82	83	82.5	49.5	1.05	0.53	241	701	127
LAU25-03_84	83	84	83.5	49.7	-	-	292	849	-

Table A.2: P Nettosedimentation

Sample ID	Tiefe – oben	Tiefe – unten	Tiefe – Mittelwert	Sedimentationsjahr	TP	P Nettosedimentation	P Nettosedimentation
	(cm)	(cm)	(cm)	(Jahr)	[$\mu\text{g P cm}^{-3}$]	[$\text{kg P km}^{-2} \text{ a}^{-1}$]	[t P a^{-1}]
LAU25-03_01	0	1	0.5	2024	329	2171	6.7
LAU25-03_02	1	2	1.5	2022	229	1515	4.7
LAU25-03_03	2	3	2.5	2021	275	1816	5.6
LAU25-03_04	3	4	3.5	2019	341	2253	7.0
LAU25-03_05	4	5	4.5	2018	235	1549	4.8
LAU25-03_06	5	6	5.5	2016	282	1859	5.8
LAU25-03_07	6	7	6.5	2015	274	1806	5.6
LAU25-03_08	7	8	7.5	2013	-	-	-
LAU25-03_09	8	9	8.5	2012	202	1336	4.1
LAU25-03_10	9	10	9.5	2010	239	1575	4.9
LAU25-03_11	10	11	10.5	2009	248	1634	5.1
LAU25-03_12	11	12	11.5	2007	255	1686	5.2
LAU25-03_13	12	13	12.5	2006	204	1348	4.2
LAU25-03_14	13	14	13.5	2004	211	1393	4.3
LAU25-03_15	14	15	14.5	2002	-	-	-
LAU25-03_16	15	16	15.5	2001	201	1326	4.1
LAU25-03_17	16	17	16.5	1999	260	1713	5.3
LAU25-03_18	17	18	17.5	1998	131	864	2.7
LAU25-03_19	18	19	18.5	1996	190	1256	3.9
LAU25-03_20	19	20	19.5	1995	192	1270	3.9
LAU25-03_21	20	21	20.5	1993	217	1431	4.4
LAU25-03_22	21	22	21.5	1992	216	1429	4.4
LAU25-03_23	22	23	22.5	1990	200	1318	4.1
LAU25-03_24	23	24	23.5	1989	253	1667	5.2
LAU25-03_25	24	25	24.5	1987	159	1048	3.2
LAU25-03_26	25	26	25.5	1986	257	1696	5.3
LAU25-03_27	26	27	26.5	1984	242	1600	5.0
LAU25-03_28	27	28	27.5	1982	359	2368	7.3
LAU25-03_29	28	29	28.5	1981	237	1562	4.8
LAU25-03_30	29	30	29.5	1979	218	1442	4.5
LAU25-03_31	30	31	30.5	1978	196	1294	4.0
LAU25-03_32	31	32	31.5	1976	218	1442	4.5
LAU25-03_33	32	33	32.5	1975	204	1346	4.2
LAU25-03_34	33	34	33.5	1973	262	1732	5.4
LAU25-03_35	34	35	34.5	1972	329	2172	6.7
LAU25-03_36	35	36	35.5	1970	182	1200	3.7
LAU25-03_37	36	37	36.5	1969	184	1215	3.8
LAU25-03_38	37	38	37.5	1967	195	1286	4.0
LAU25-03_39	38	39	38.5	1966	167	1100	3.4
LAU25-03_40	39	40	39.5	1964	138	914	2.8
LAU25-03_41	40	41	40.5	1962	102	675	2.1

Kurzbericht Phosphor-Nettosedimentation im Lauerzersee, 14. November 2025

LAU25-03_42	41	42	41.5	1961	110	727	2.3
LAU25-03_43	42	43	42.5	1959	200	1319	4.1
LAU25-03_44	43	44	43.5	1958	255	1684	5.2
LAU25-03_45	44	45	44.5	1956	145	959	3.0
LAU25-03_46	45	46	45.5	1955	231	1525	4.7
LAU25-03_47	46	47	46.5	1953	179	1184	3.7
LAU25-03_48	47	48	47.5	1952	76	500	1.6
LAU25-03_49	48	49	48.5	1950	201	1329	4.1
LAU25-03_50	49	50	49.5	1949	134	888	2.8
LAU25-03_51	50	51	50.5	1947	218	1441	4.5
LAU25-03_52	51	52	51.5	1946	225	1483	4.6
LAU25-03_53	52	53	52.5	1944	150	992	3.1
LAU25-03_54	53	54	53.5	1942	187	1235	3.8
LAU25-03_55	54	55	54.5	1941	220	1453	4.5
LAU25-03_56	55	56	55.5	1939	196	1297	4.0
LAU25-03_57	56	57	56.5	1938	227	1495	4.6
LAU25-03_58	57	58	57.5	1936	158	1041	3.2
LAU25-03_59	58	59	58.5	1935	196	1295	4.0
LAU25-03_60	59	60	59.5	1933	184	1211	3.8
LAU25-03_61	60	61	60.5	1932	193	1275	4.0
LAU25-03_62	61	62	61.5	1930	166	1093	3.4
LAU25-03_63	62	63	62.5	1929	147	973	3.0
LAU25-03_64	63	64	63.5	1927	156	1032	3.2
LAU25-03_65	64	65	64.5	1926	167	1099	3.4
LAU25-03_66	65	66	65.5	1924	165	1091	3.4
LAU25-03_67	66	67	66.5	1922	136	899	2.8
LAU25-03_68	67	68	67.5	1921	185	1223	3.8
LAU25-03_69	68	69	68.5	1919	141	930	2.9
LAU25-03_70	69	70	69.5	1918	155	1026	3.2
LAU25-03_71	70	71	70.5	1916	173	1140	3.5
LAU25-03_72	71	72	71.5	1915	201	1324	4.1
LAU25-03_73	72	73	72.5	1913	169	1113	3.4
LAU25-03_74	73	74	73.5	1912	177	1167	3.6
LAU25-03_75	74	75	74.5	1910	165	1088	3.4
LAU25-03_76	75	76	75.5	1909	185	1223	3.8
LAU25-03_77	76	77	76.5	1907	151	998	3.1
LAU25-03_78	77	78	77.5	1906	165	1087	3.4
LAU25-03_79	78	79	78.5	1904	186	1229	3.8
LAU25-03_80	79	80	79.5	1902	155	1024	3.2
LAU25-03_81	80	81	80.5	1901	164	1080	3.3
LAU25-03_82	81	82	81.5	1899	177	1166	3.6
LAU25-03_83	82	83	82.5	1898	127	841	2.6
LAU25-03_84	83	84	83.5	1896	-	-	-