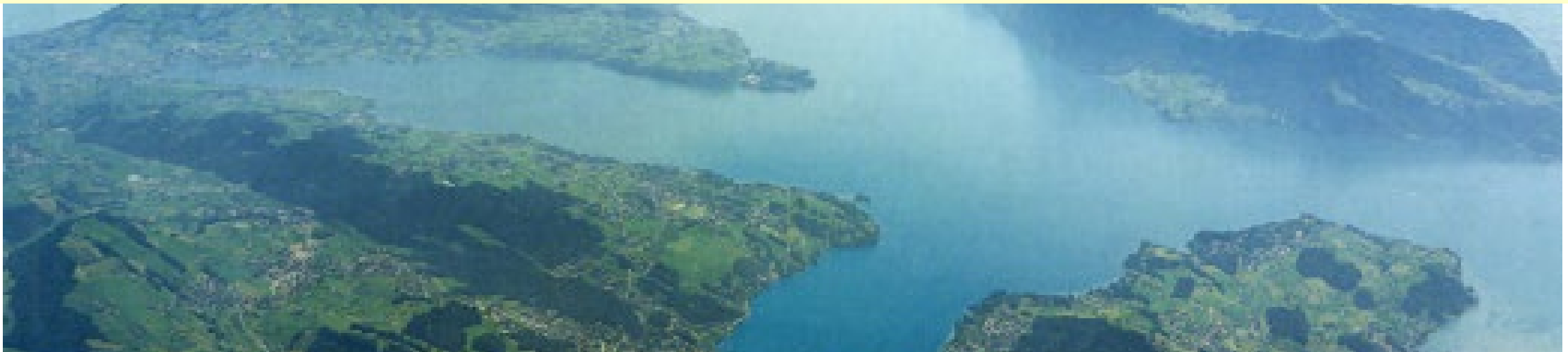


**Interactions entre charge en phosphore, production primaire et déplétion d'oxygène –  
Constats au bout de plusieurs décennies de suivi des lacs suisses**



Alfred Wüest - Beat Müller

14 juin 2022, Cercl'eau, Romanshorn

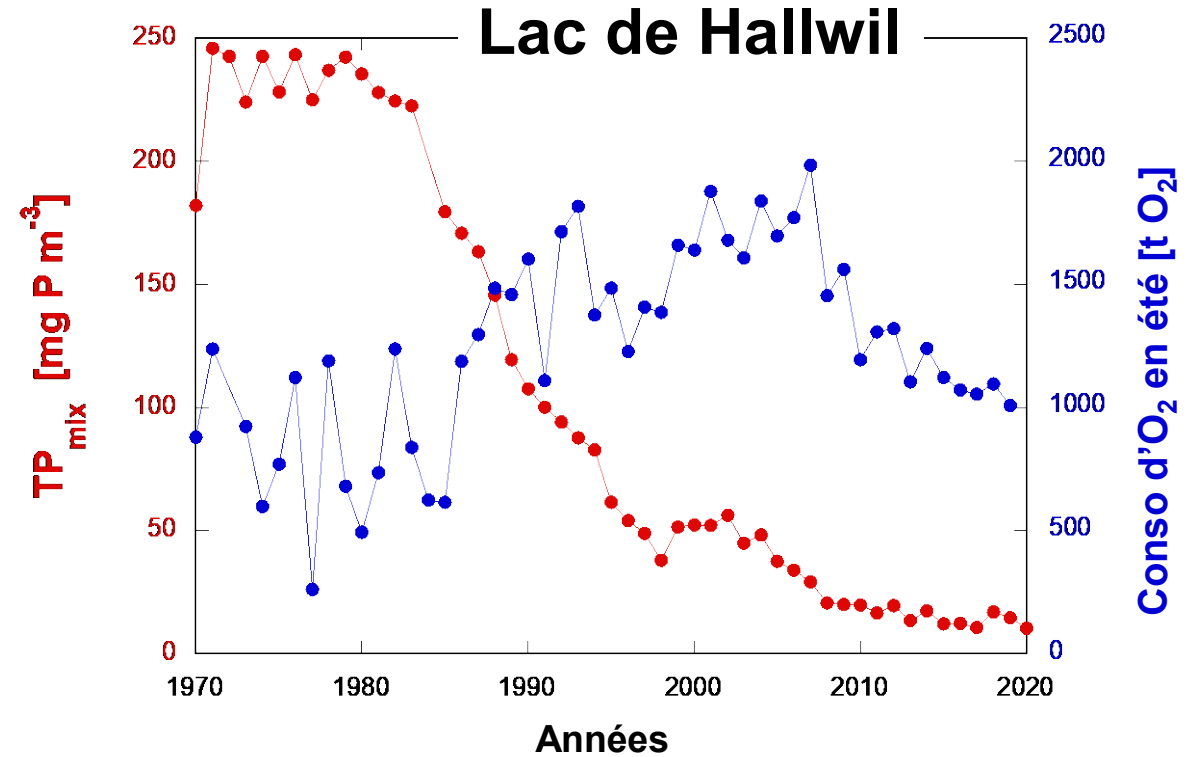
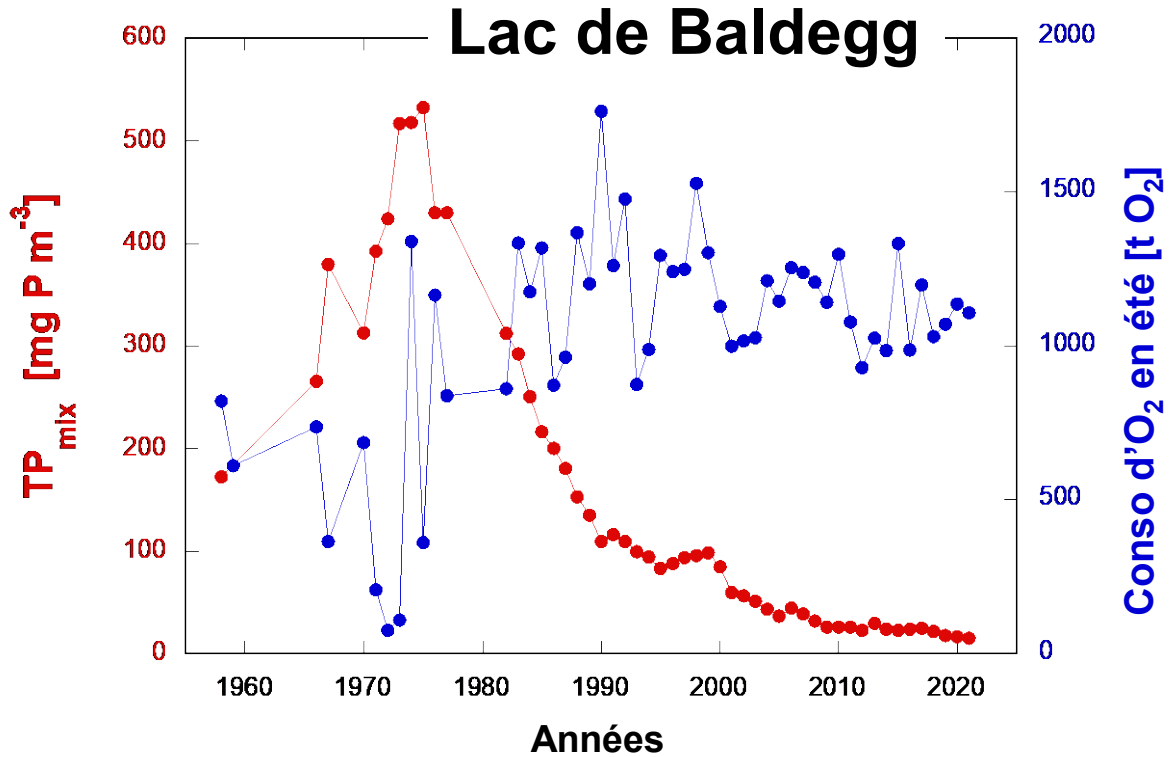


# Prologue

45 ans de lutte contre l'eutrophisation couronnés de succès –  
Que retenir du monitoring?



# Irritation 1: le P baisse, mais pas la consommation d'O<sub>2</sub>

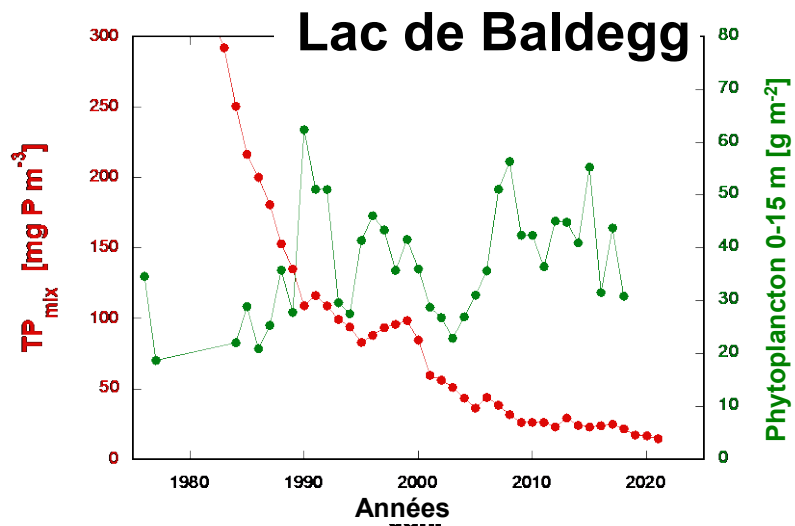
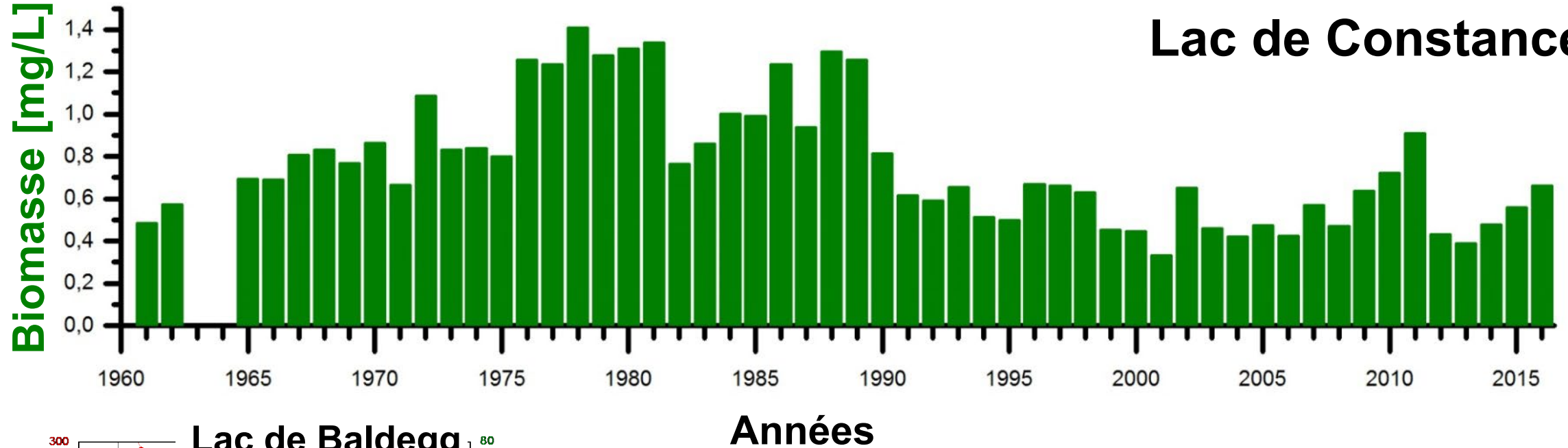


**P baisse** – mais la forte consommation d'O<sub>2</sub> perdue

**Pourquoi?**

# Irritation 2: le P baisse, mais la biomasse très peu

Lac de Constance



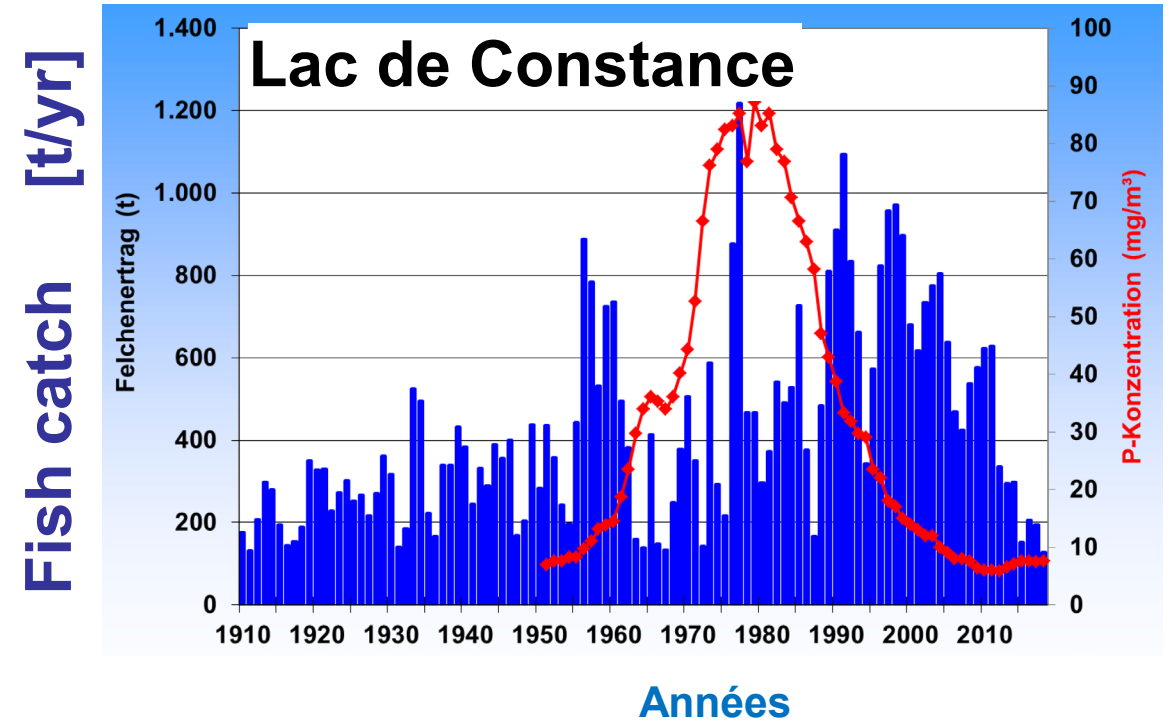
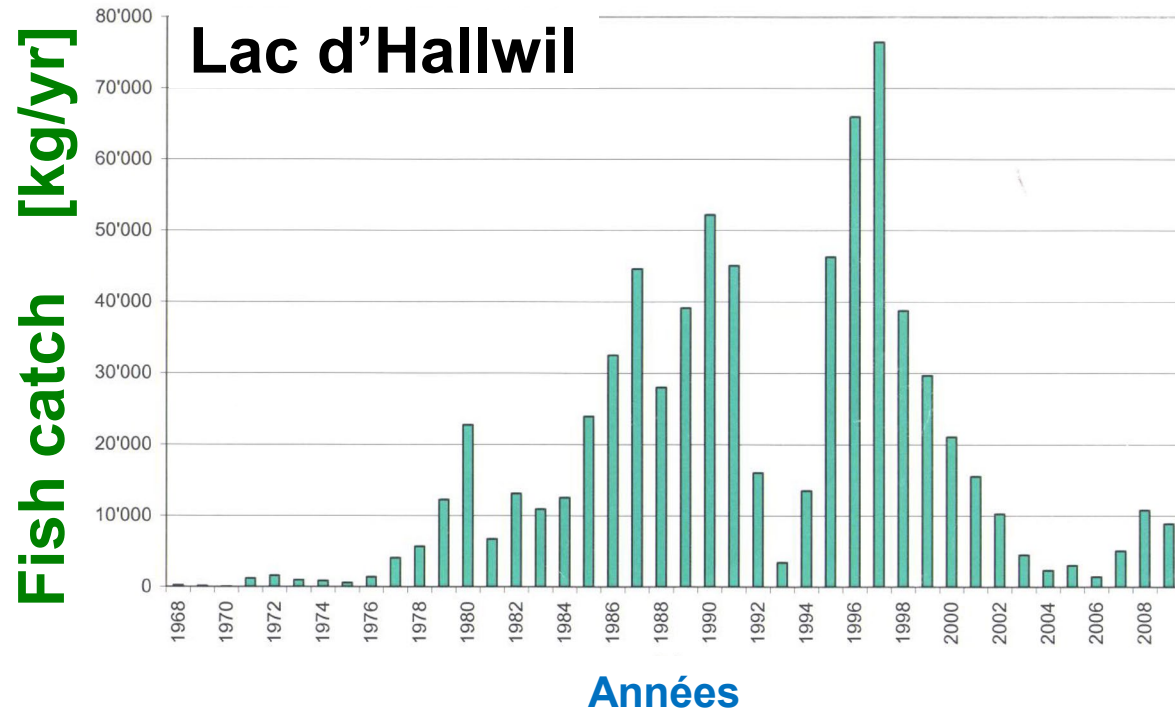
**Le P baisse (90%!)**

mais

**la biomasse se maintient**

**Pourquoi?**

# Irritation 3: la biomasse se maintient mais les captures baissent



- Dès ~2000, baisse des prises de pêche (**état des lieux, OFEV 2017**)
- Rapport manifeste avec la baisse du phosphore
- Mais pourquoi pas avec la biomasse?

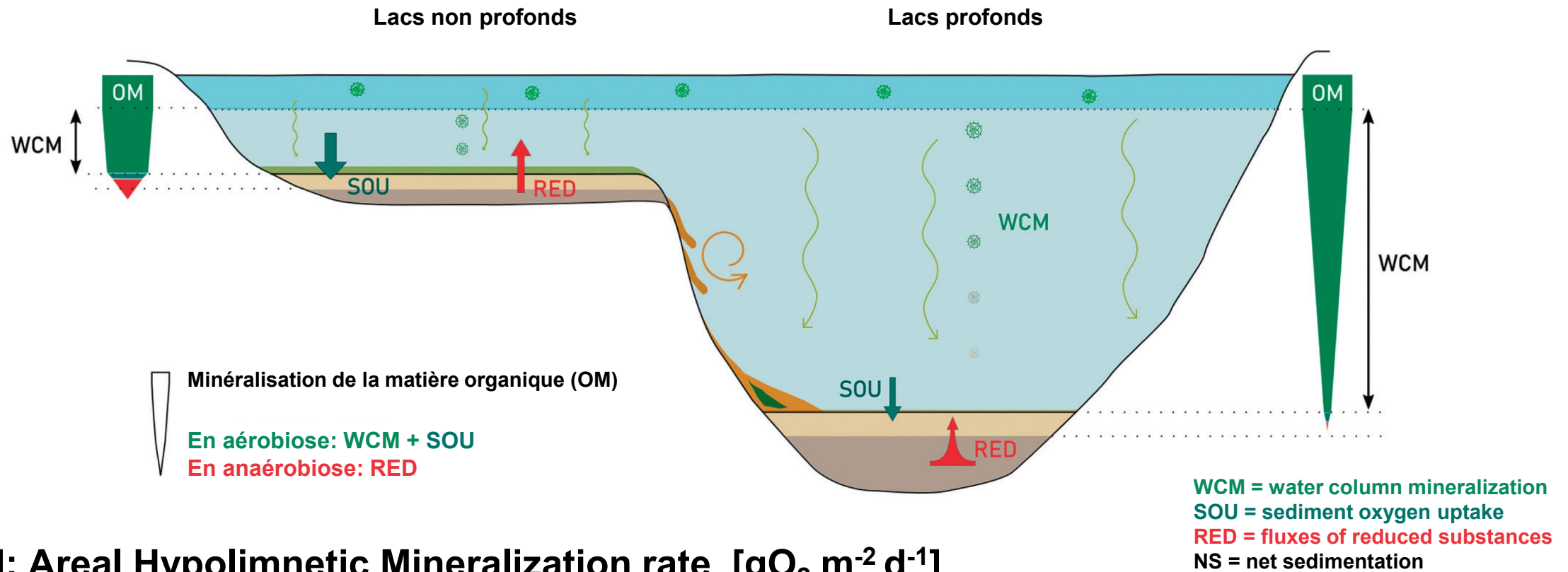
# Le monitoring soulève des questions – Donne-t-il aussi des réponses?

- **Pourquoi le phytoplancton ne recule-t-il pas plus fortement** alors que le phosphore a souvent été éliminé à 90%?
- **Pourquoi la consommation d'O<sub>2</sub> ne baisse-t-elle pas** malgré des teneurs très réduites en phosphore?
- **Pourquoi les prises de pêche chutent-elles** alors que la biomasse de phytoplancton et la consommation d'oxygène baissent à peine?
- Y a-t-il **des seuils** qui expliquent que la production primaire n'est limitée qu'à partir d'une teneur en P étonnamment faible?
- Y a-t-il une explication pour ces **observations apparemment contradictoires**?

# Contenu

- Prologue et questions
- **Réaction de la consommation d'O<sub>2</sub> à la baisse du phosphore**
- Modification du C/P du phytoplancton avec la baisse du P
- Charge tolérable en P (APS) pour une production primaire moyenne (état mésotrophe)
- Conclusions

# Définition de la consommation d'O<sub>2</sub> (AHM) et de la NEP

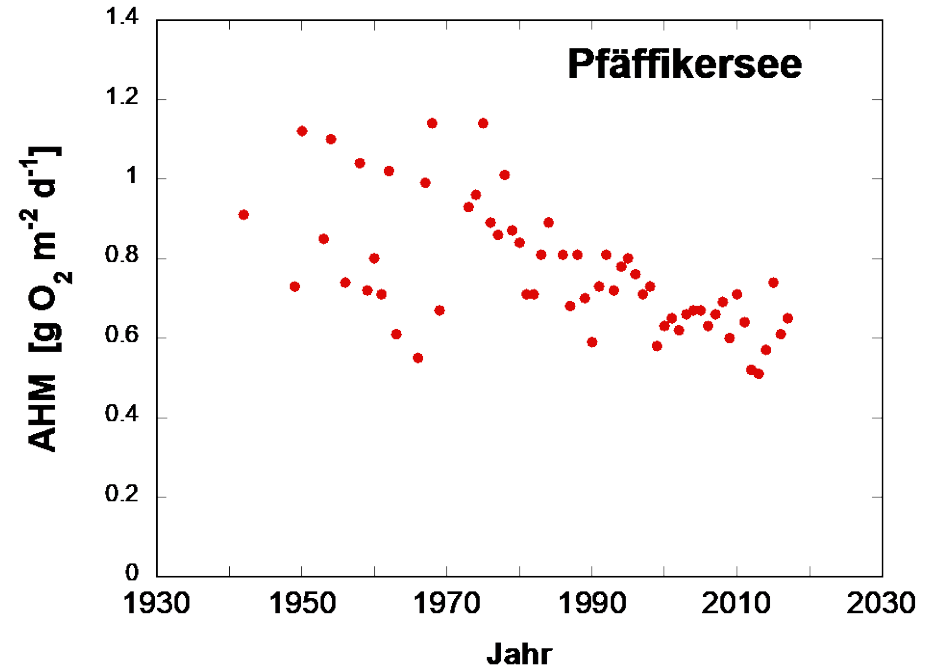
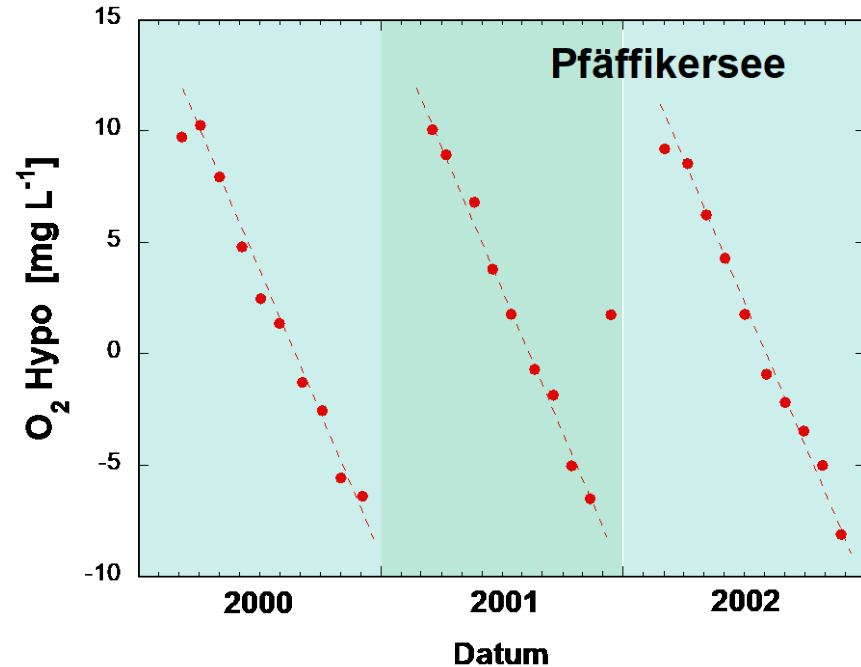


AHM: Areal Hypolimnetic Mineralization rate [gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]  
NEP: Net Ecosystem Production [gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]

$$\text{AHM} = \text{WCM} + \text{SOU} + \text{RED}$$
$$\text{NEP} = \text{AHM} + \text{NS}$$

**Attention: Parts différentes dans les lacs profonds / non profonds**

# Détermination de l'AHM (consommation d'O<sub>2</sub>)



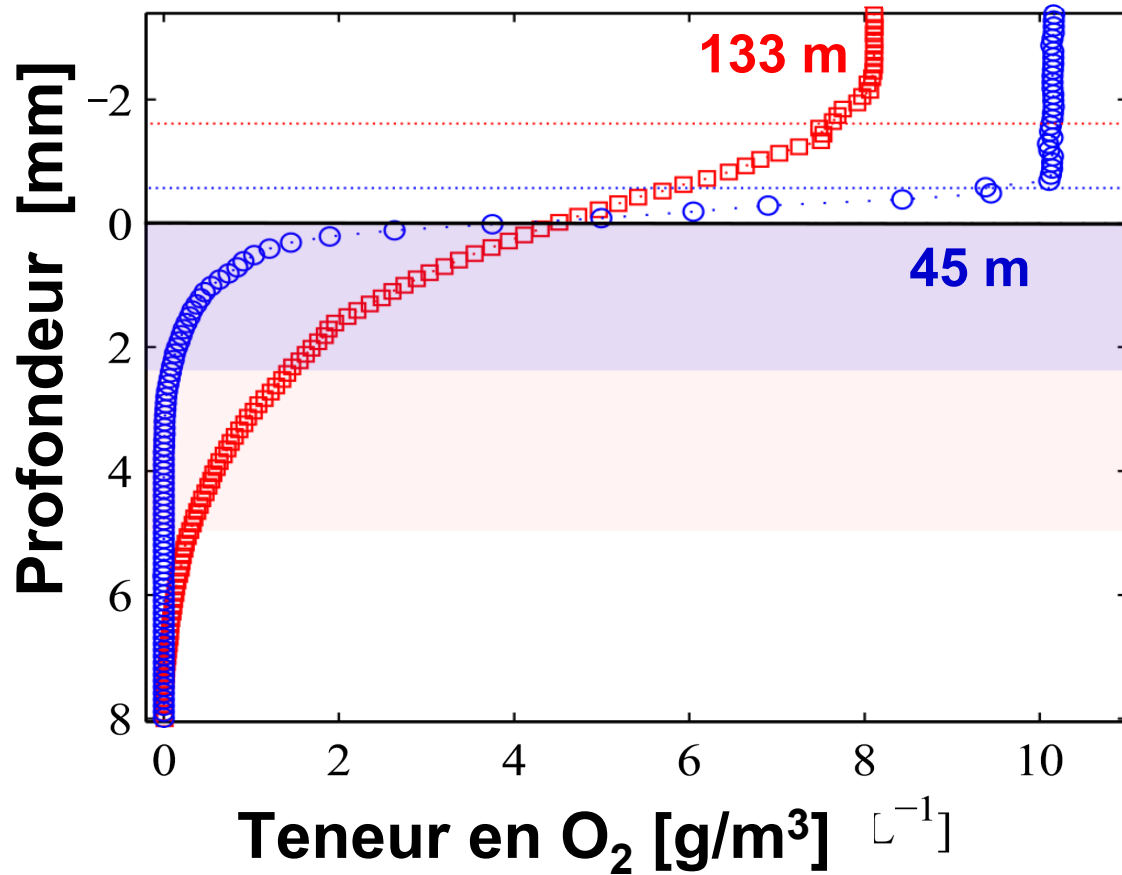
**AHM:** calculer la teneur en O<sub>2</sub> de l'hypolimnion d'avril à oct-nov ( $\Delta t$ ) et déterminer la baisse par  $\Delta t$  et unité de surface à 15 m de profondeur.

**Principe:**

$$\text{AHM} = \text{WCM} + \text{SOU} + \text{RED}$$

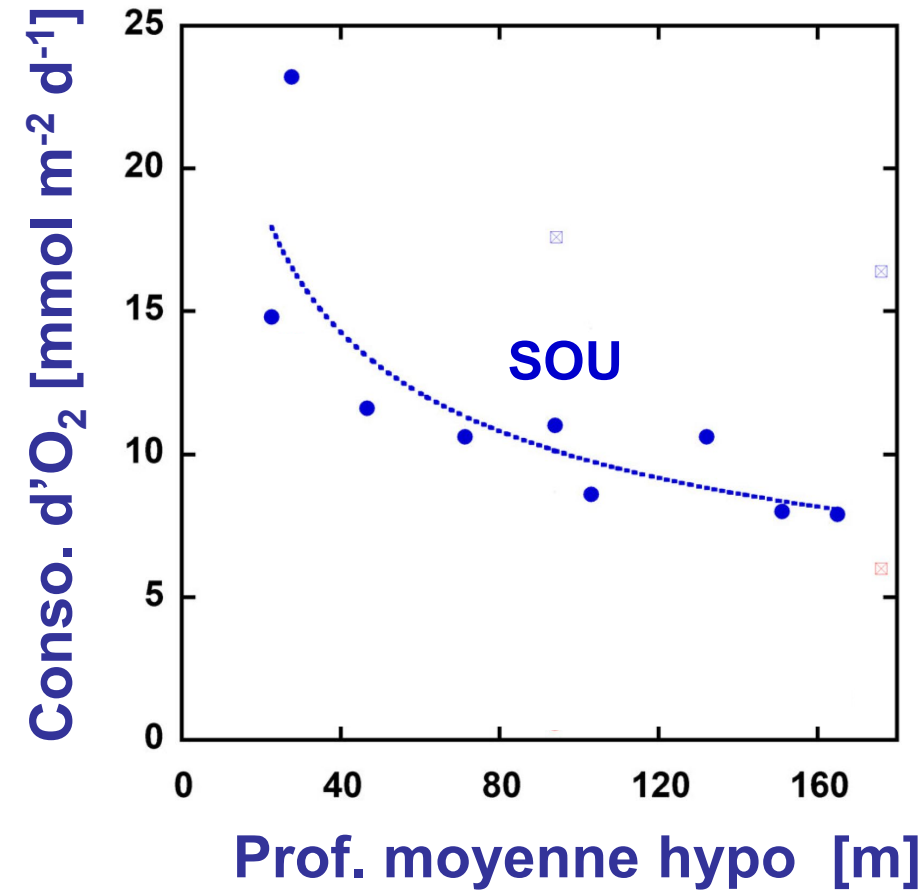
# SOU et RED – le rôle de la profondeur

**SOU** = part de l'AHM



(Lac Léman, Schwefel et al. 2018)

**AHM** = **WCM** + **SOU** + **RED**

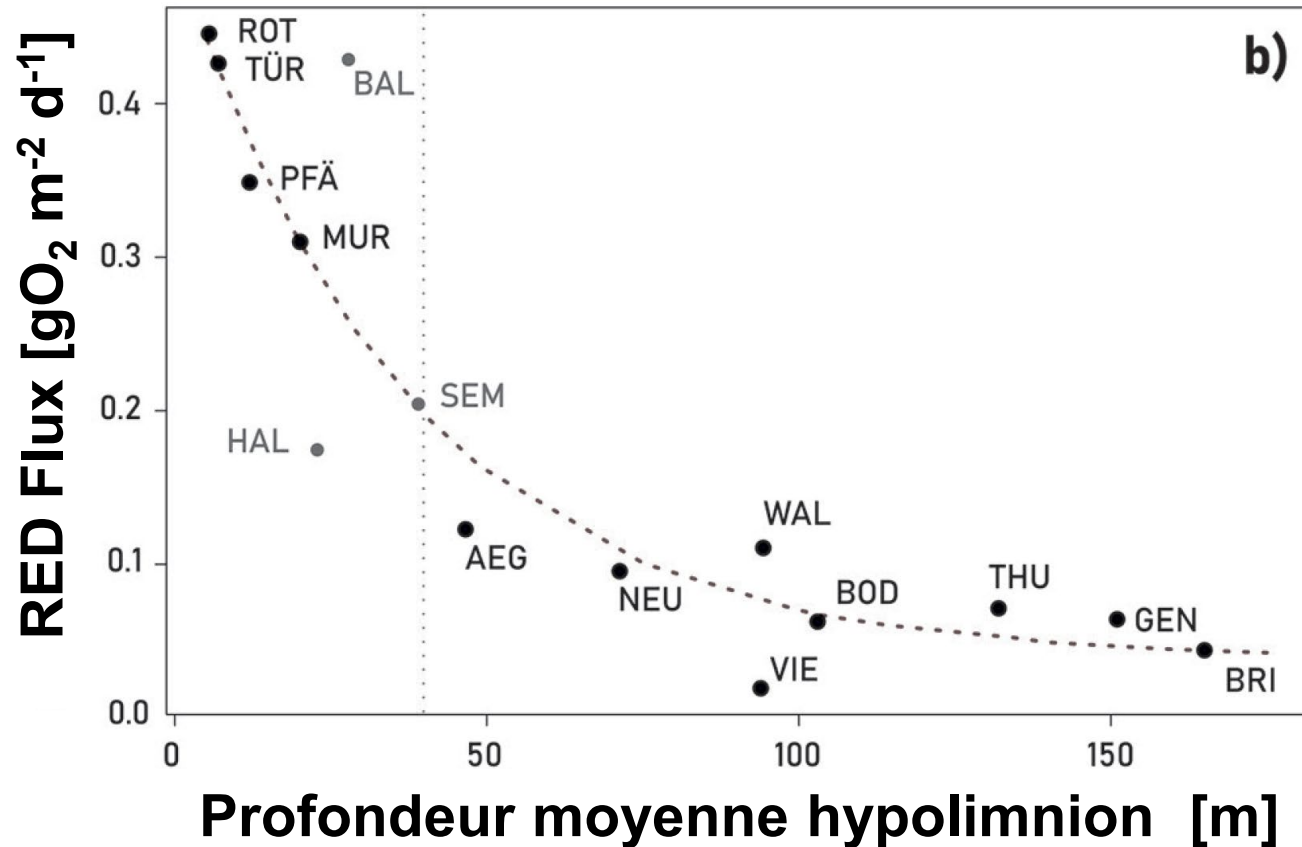


(Divers lacs, Steinsberger et al. 2020)

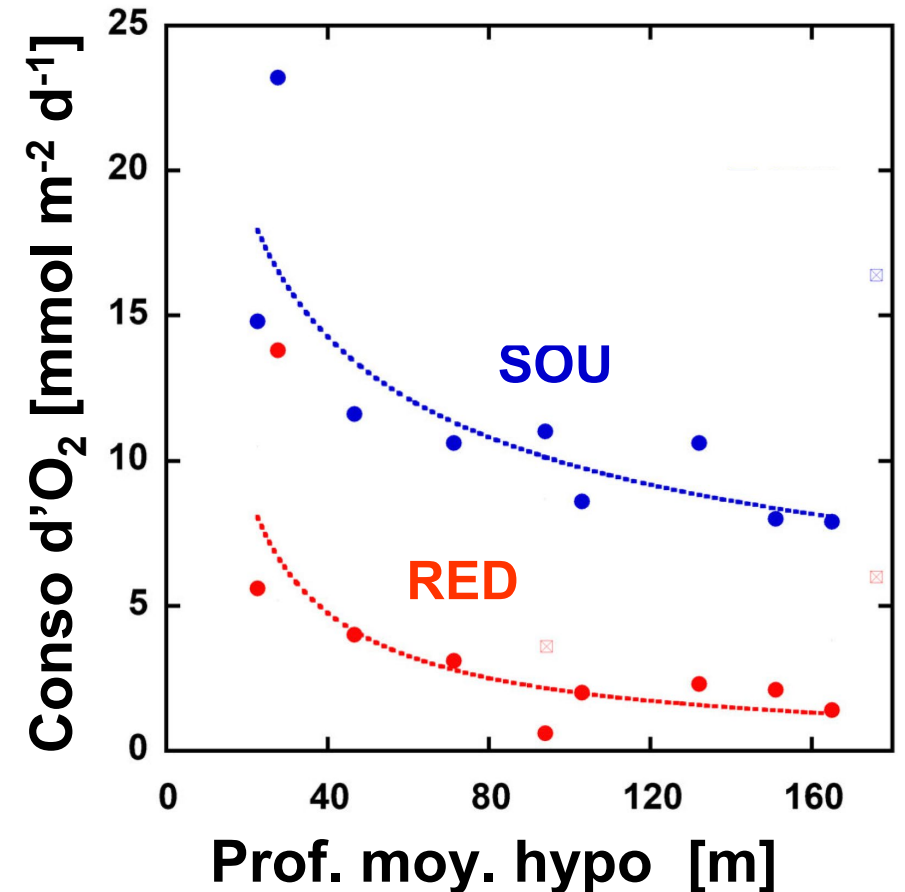
# SOU et RED – le rôle de la profondeur

**RED** = part de l'AHM

**AHM** = **WCM** + **SOU** + **RED**

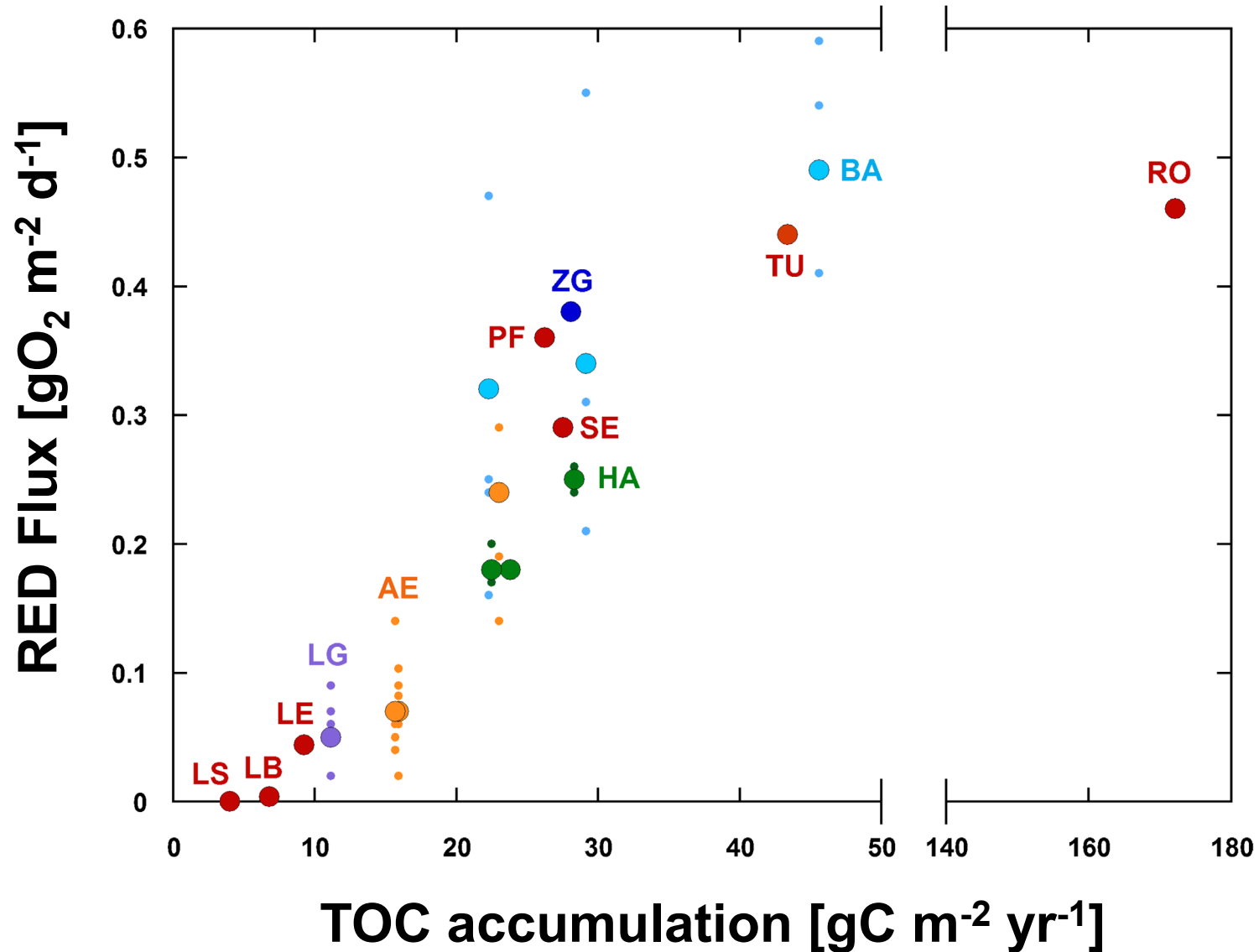


(Kiefer et al. 2020)



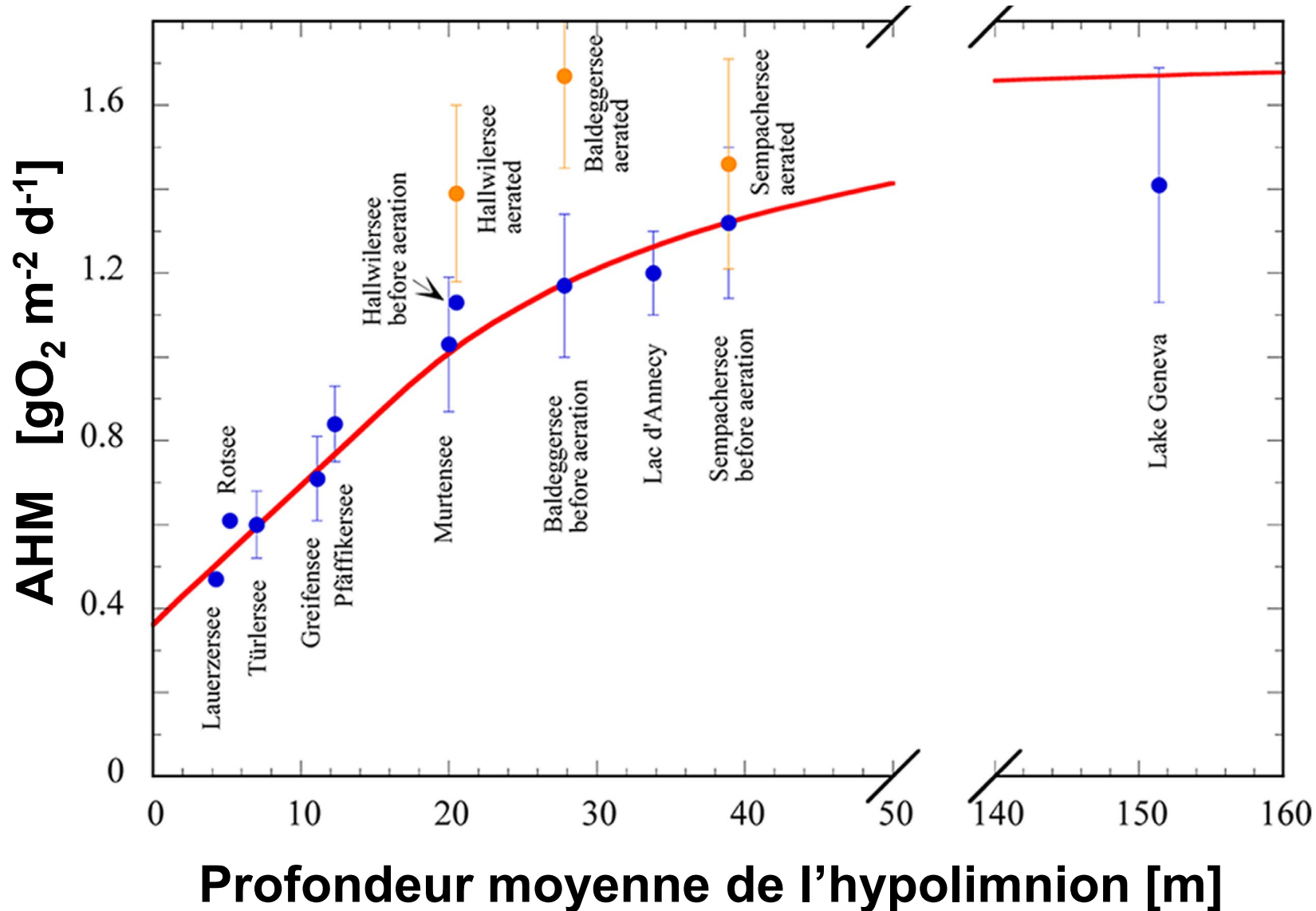
(Steinsberger et al. 2020)

# SOU et RED – le rôle de la profondeur



(Steinsberger  
et al. 2017)

# AHM potentielle maximale (consommation d'O<sub>2</sub>)



Trait rouge =

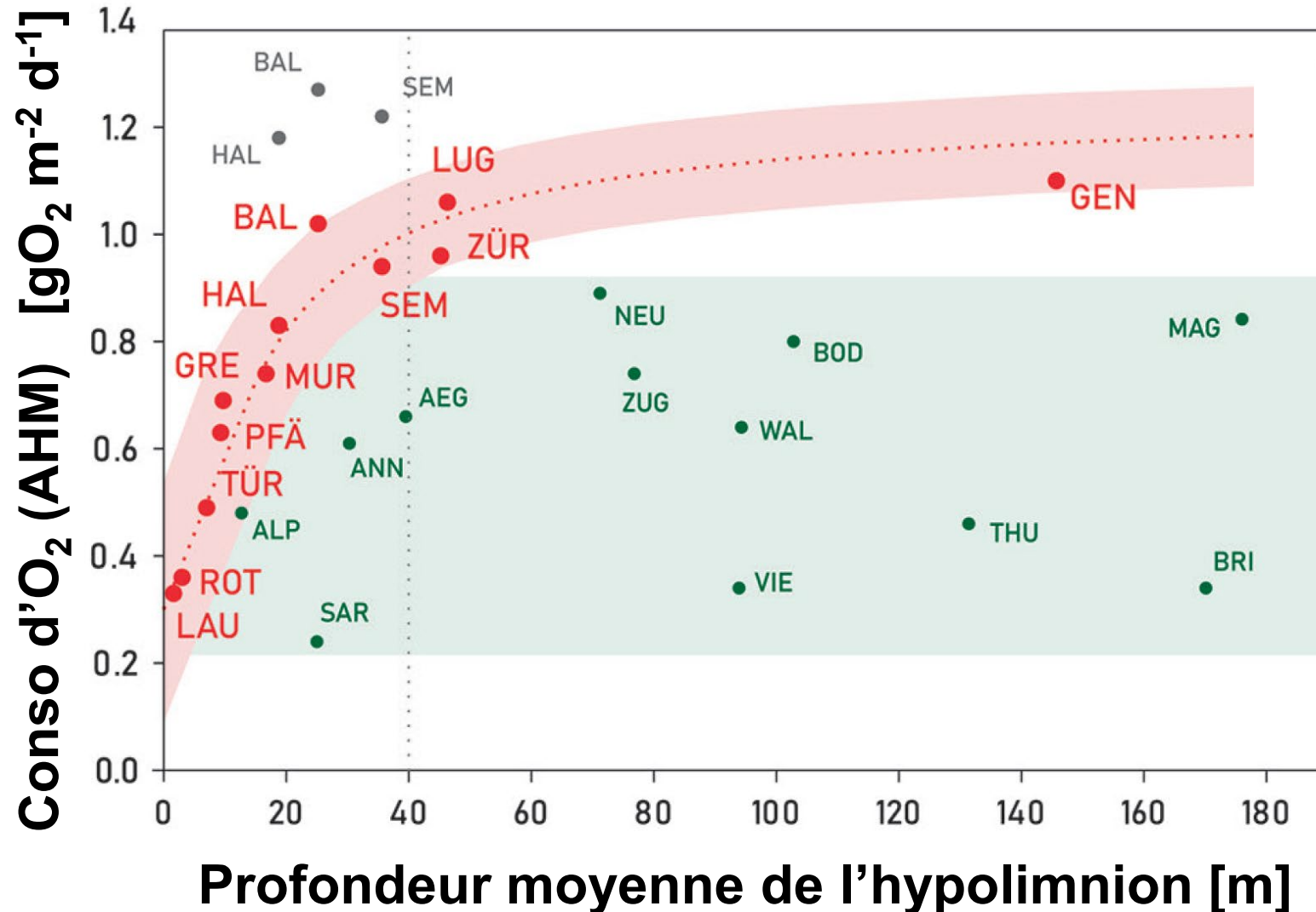
AHM potentielle maximale

Fonction de:

- RED
- Profondeur
- NEP

(Müller et al. 2012)

# Identification des NEP non maximales au vu de l'AHM

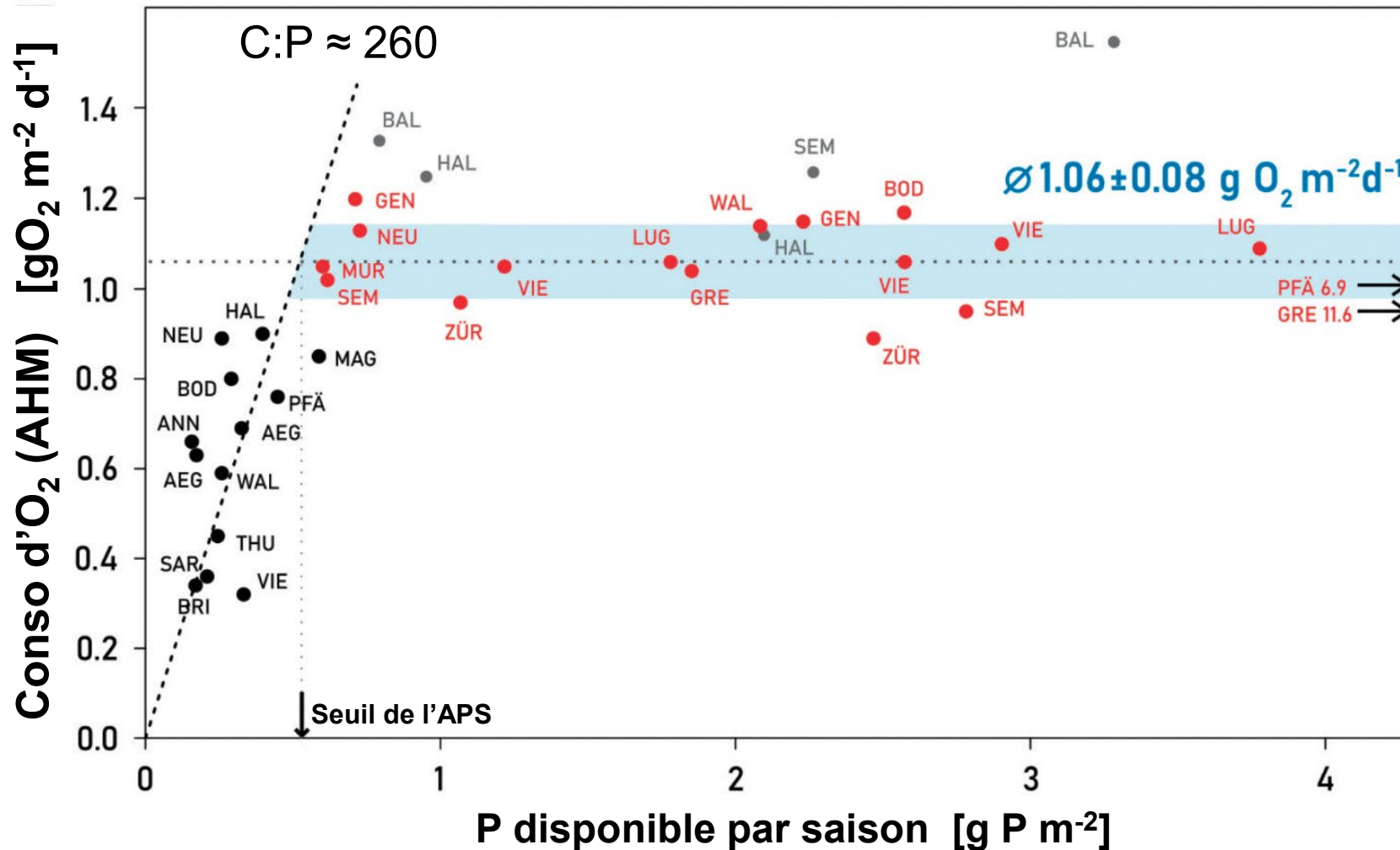


**Ligne rouge =  
AHM potentielle  
maximale**

**En Vert =  
Lac à  
NEP < maximum  
(manque de  
sensibilité pour  
 $z_H < 25$  m)**

(Kiefer et al. 2021)

# Quand la NEP et l'AHM sont-elles limitées?



Indication de la NEP (basée sur l'AHM)

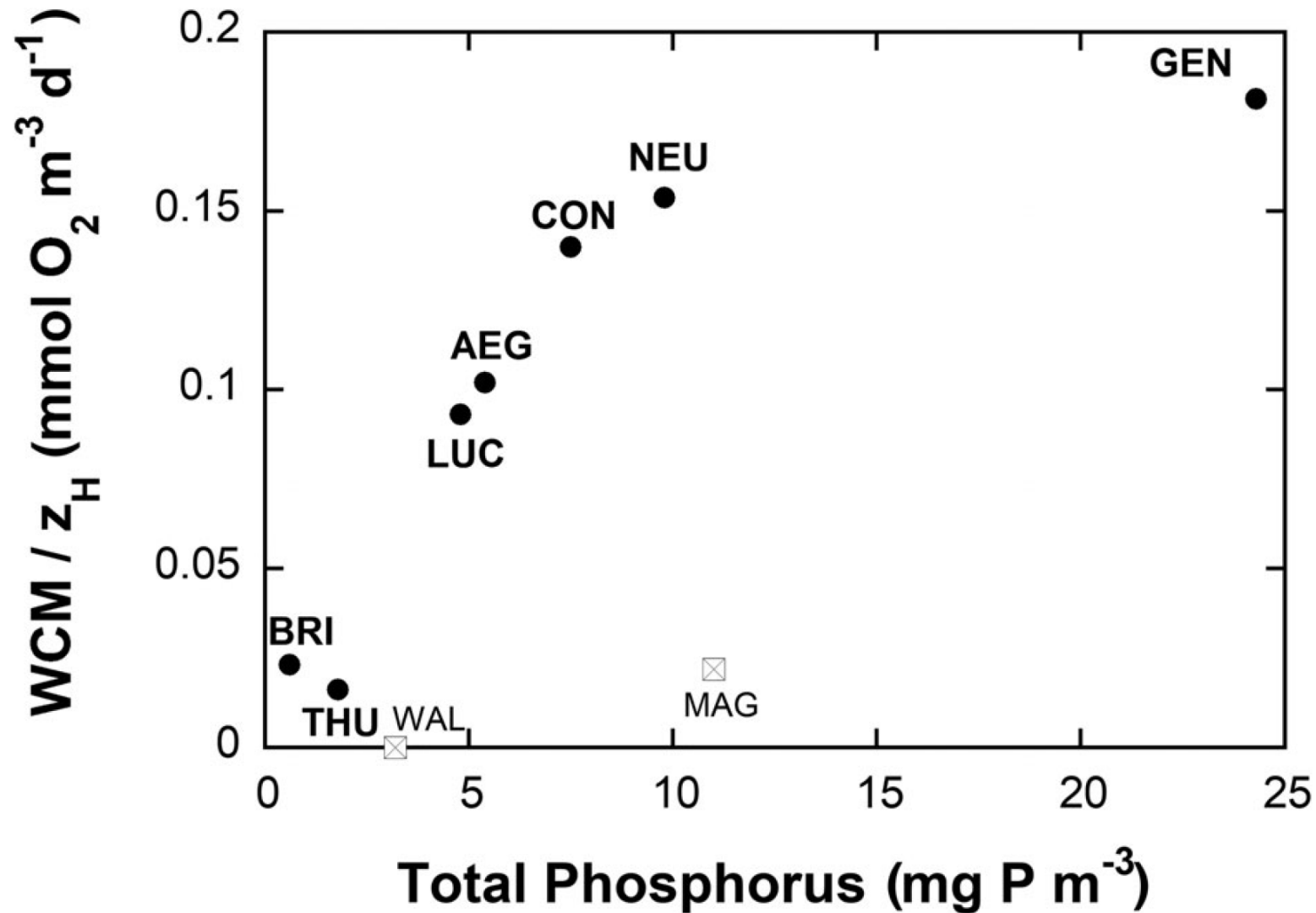
Analyse pertinente pour une profondeur de l'hypo > 25 m

Pour P biodisponible < 0.6 gP/m<sup>2</sup>  
→ Réduction de la NEP

Au-delà de ce seuil : NEP max quasi constante

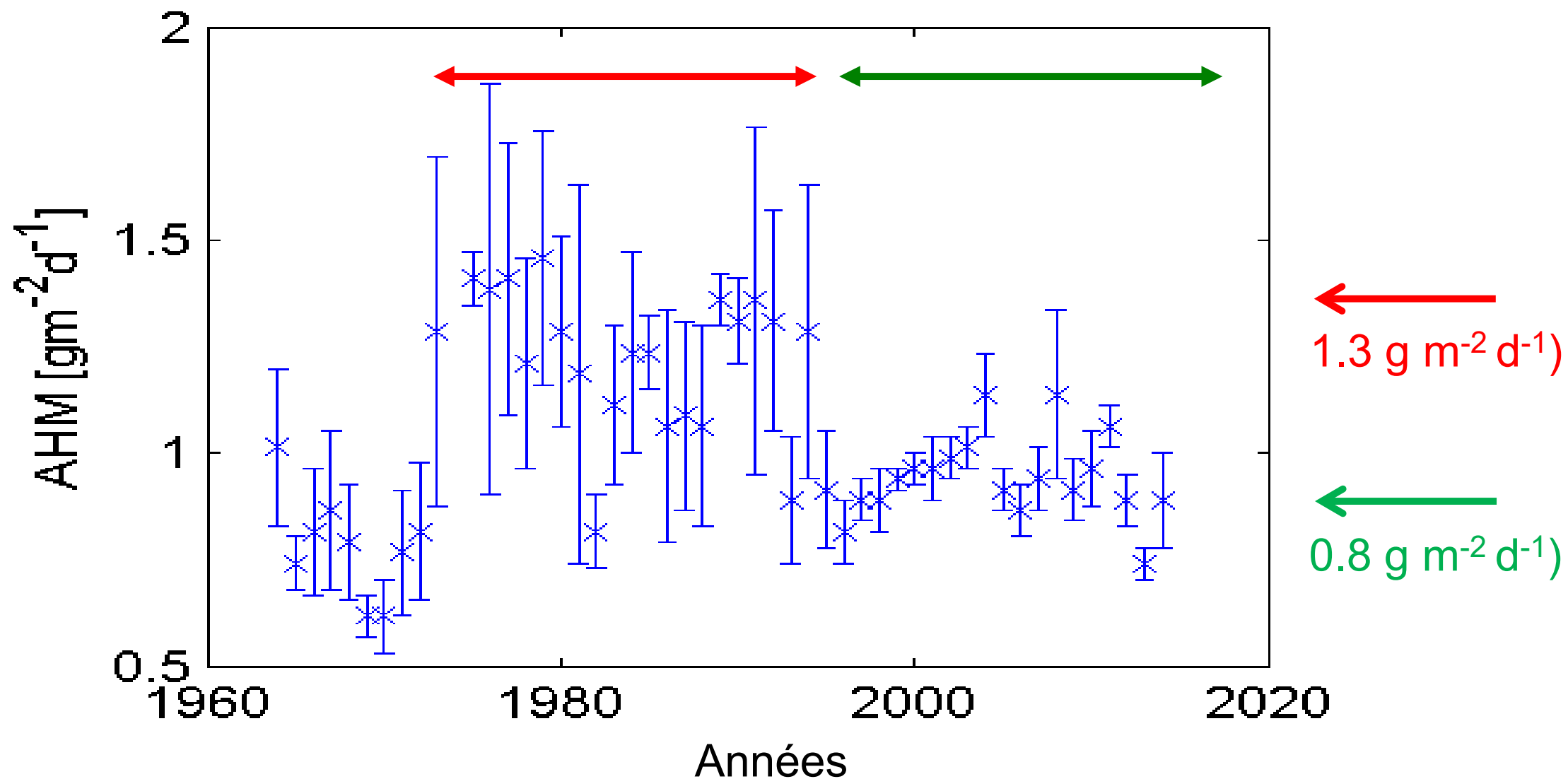
(Kiefer et al. 2020)

# Consommation d'O<sub>2</sub> dans la colonne d'eau (WCM) = f(Phosphore)

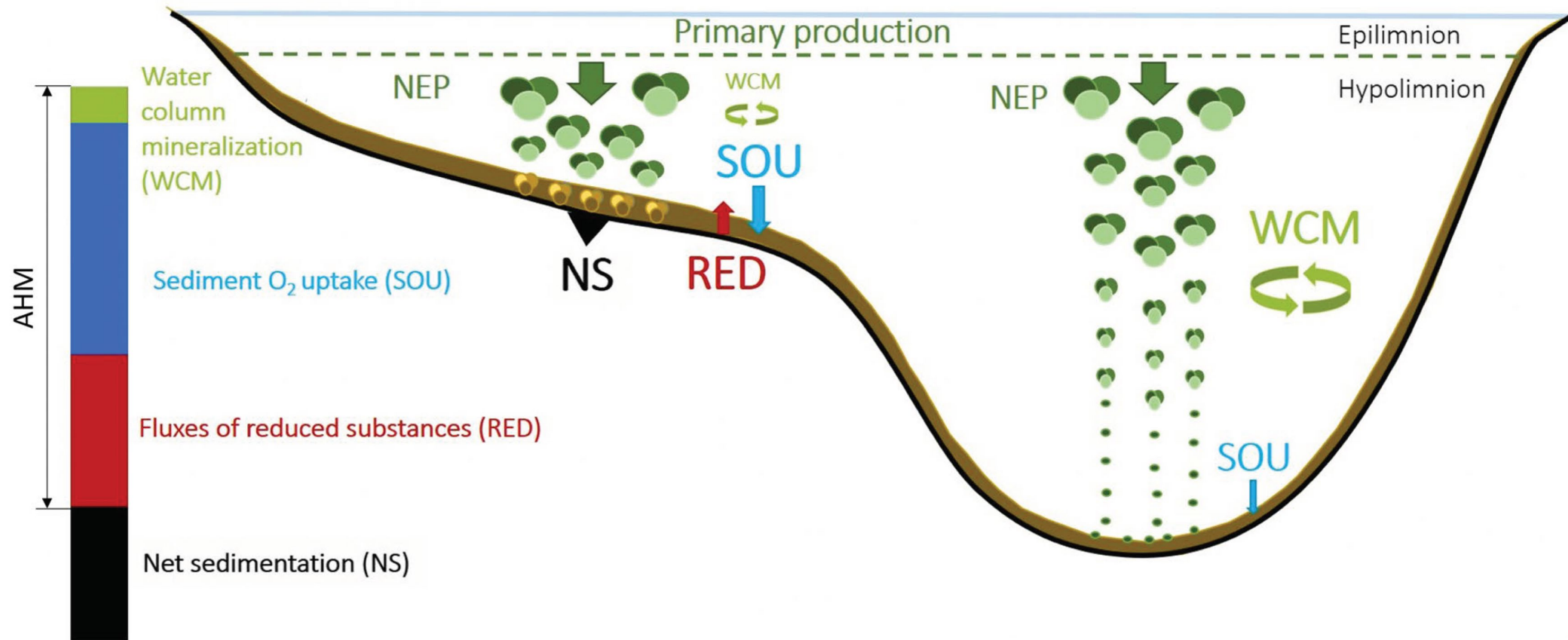


(Steinsberger  
et al. 2020)

# Lac de Constance – un cas de $NEP < \max$



# Détermination de la NEP à partir de AHM et NS



## Approximation for NEP

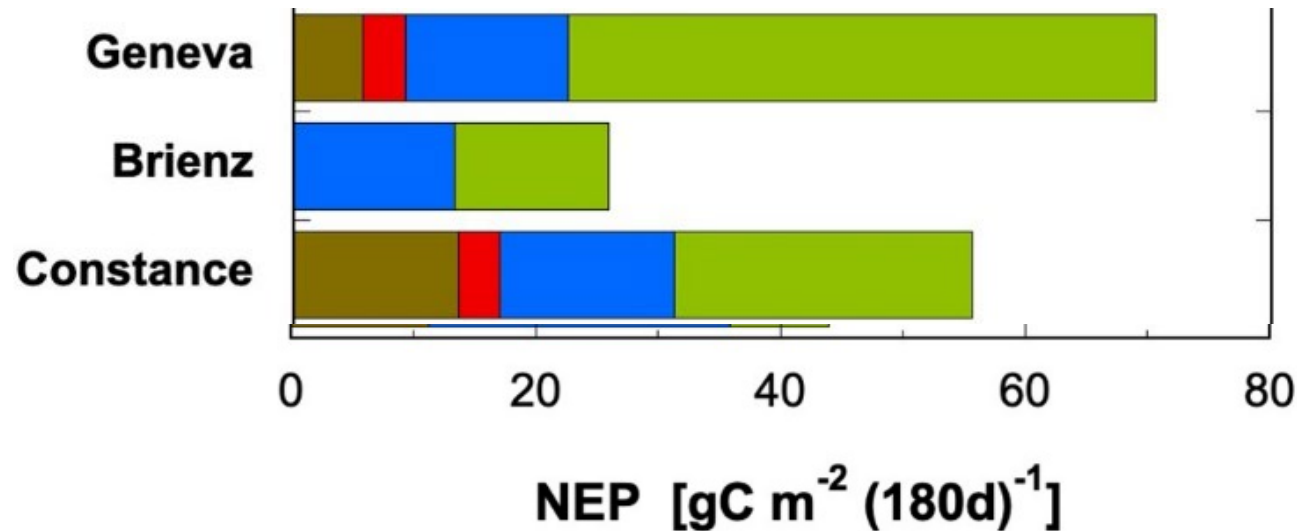
(Steinsberger et al. 2021)

$$NEP = AHM + NS = WCM + SOU + RED + NS$$

# Détermination de la NEP à partir de AHM et NS

## Approximation for NEP

$$\text{NEP} = \text{AHM} + \text{NS} = \text{WCM} + \text{SOU} + \text{RED} + \text{NS}$$



(Steinsberger et al. 2021)

## Trois exemples

### Lac Léman

NEP → eutrophe

NEP très exacte car erreur (NS) faible

### Lac de Constance

NEP → oligotrophe

NEP exacte car erreur (NS) moyenne

### Lac de Brienz

NEP → mésotrophe

NEP exacte car erreur (NS) moyenne

# Conclusions - AHM

**L'AHM (consommation d'O<sub>2</sub>) dépend du RED, de la NEP et de la profondeur du lac**

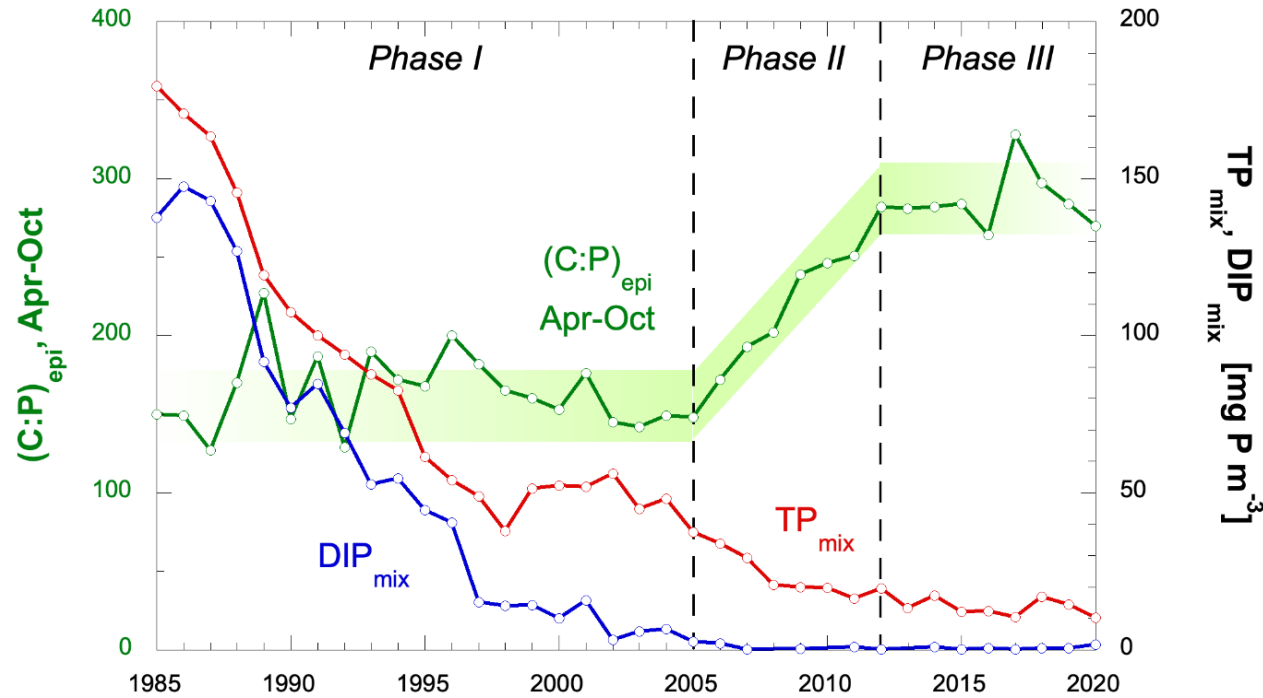
1. Dans les lacs profonds, la biomasse est mieux dégradée en descendant dans la colonne d'eau et celle qui atteint le sédiment est moins abondante
2. Donc: NS est plus élevé dans les lacs peu profonds que dans les lacs profonds
3. Donc: SOU et RED sont plus faibles dans les zones profondes (meilleure qual. sed)
4. Donc: **AHM dépend de RED, NEP et de la profondeur du lac**
5. Dans les hypo profonds: conso d'O<sub>2</sub> + faible et, si brassage régulier, plus d'O<sub>2</sub>
6. AHM atteint son niveau max en fonction de RED, NEP et de la profondeur
7. Pour les lacs profonds, NEP peut être évaluée comme fonction de l'APS (gP/m<sup>2</sup>)
8. En dessous du seuil **APS ≈ 0,6 gP/m<sup>2</sup>, baisse linéaire de la WCM et l'AHM avec P.**

# Contenu

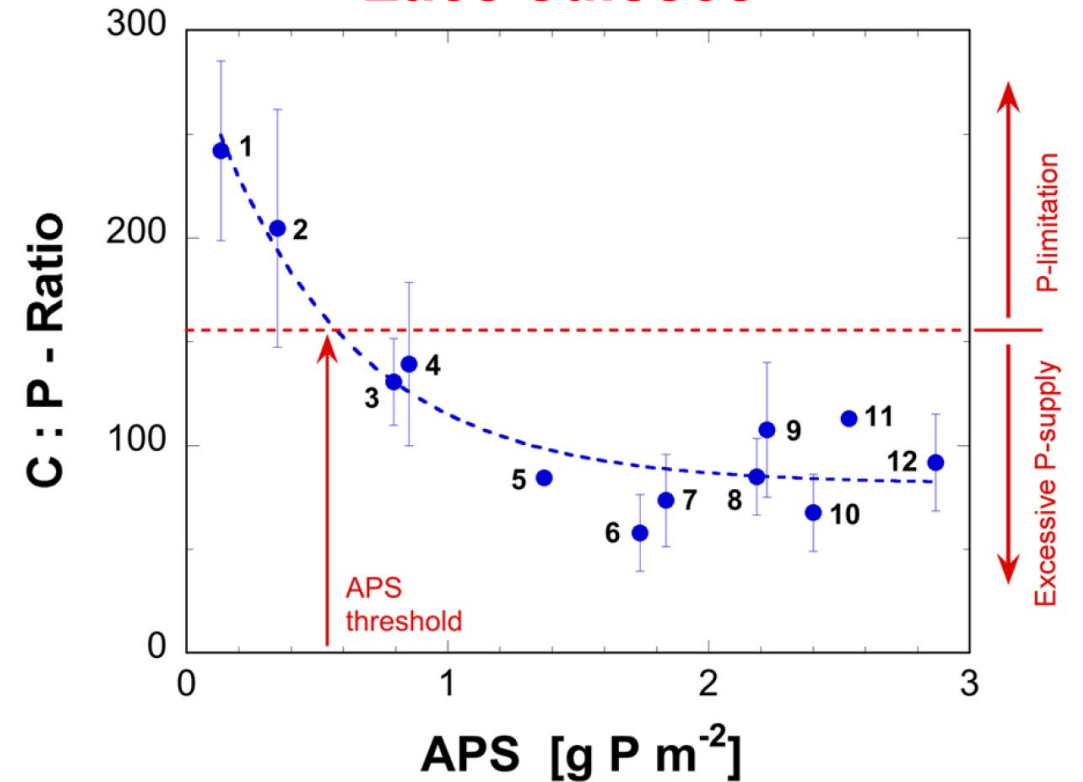
- Prologue et questions
- Réaction de la consommation d'O<sub>2</sub> à une baisse de la teneur en P
- **Modification du C/P du phytoplancton avec la baisse du P**
- Charge tolérable en P (APS) pour une production primaire moyenne (état mésotrophe)
- Conclusion

# Oligotrophisation - les algues se serrent la ceinture

## Lac d'Hallwil



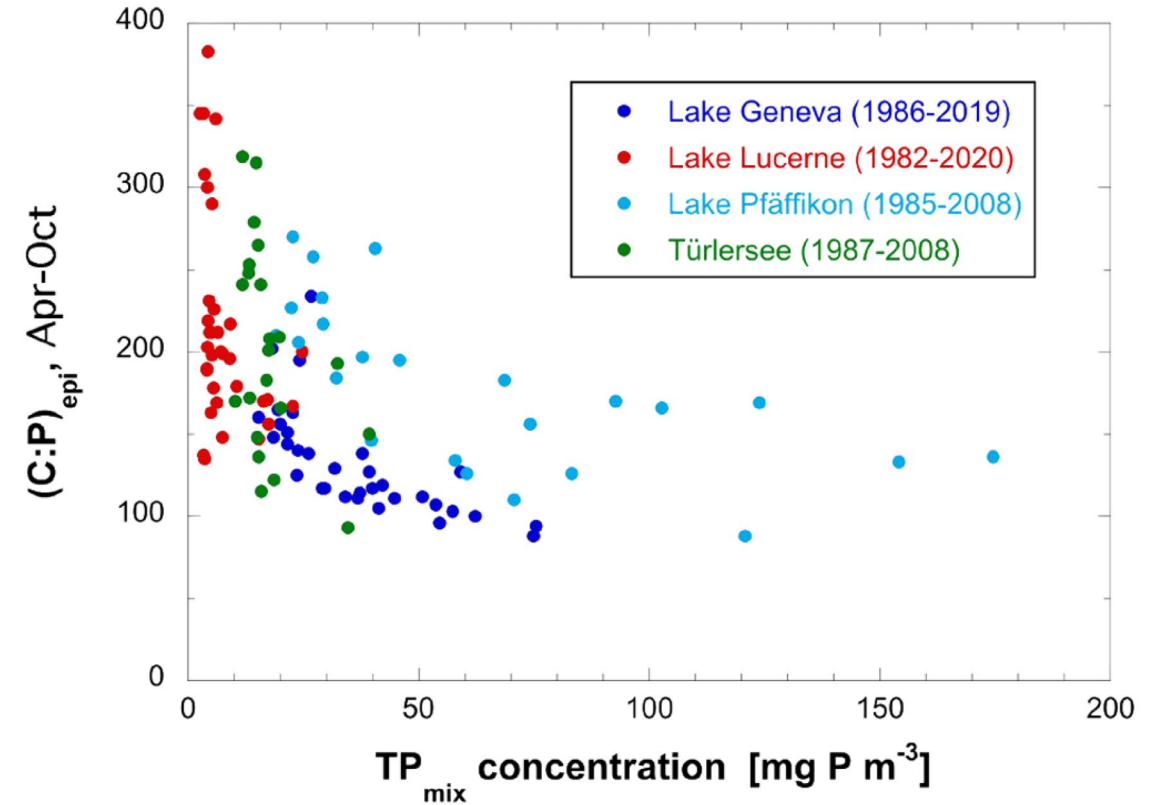
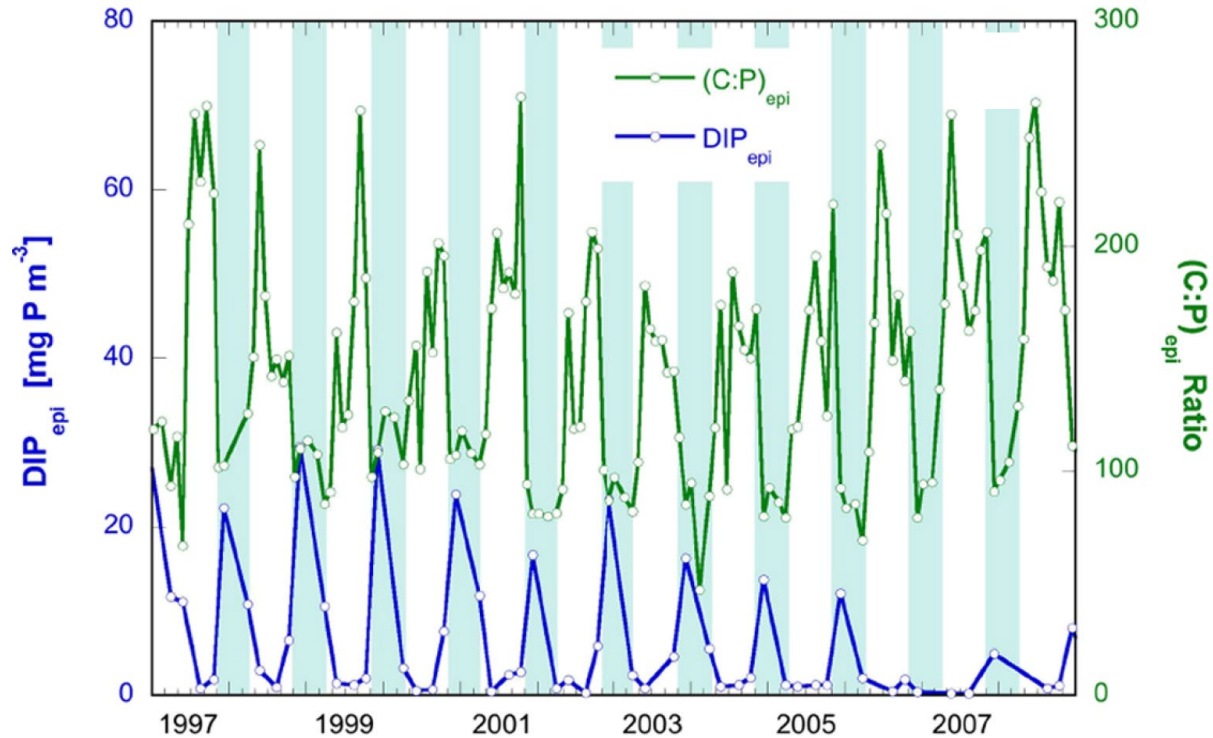
## Lacs suisses



**La NEP réagit avec un décalage à la réduction de la teneur en P**

1. C/P bas (~zone rouge) jusqu'à épuisement du phosphore inorganique dissous (DIP) (début de la limitation de P)
2. Si P bas → algues haussent leur C/P et la conso d'O<sub>2</sub> reste donc forte!

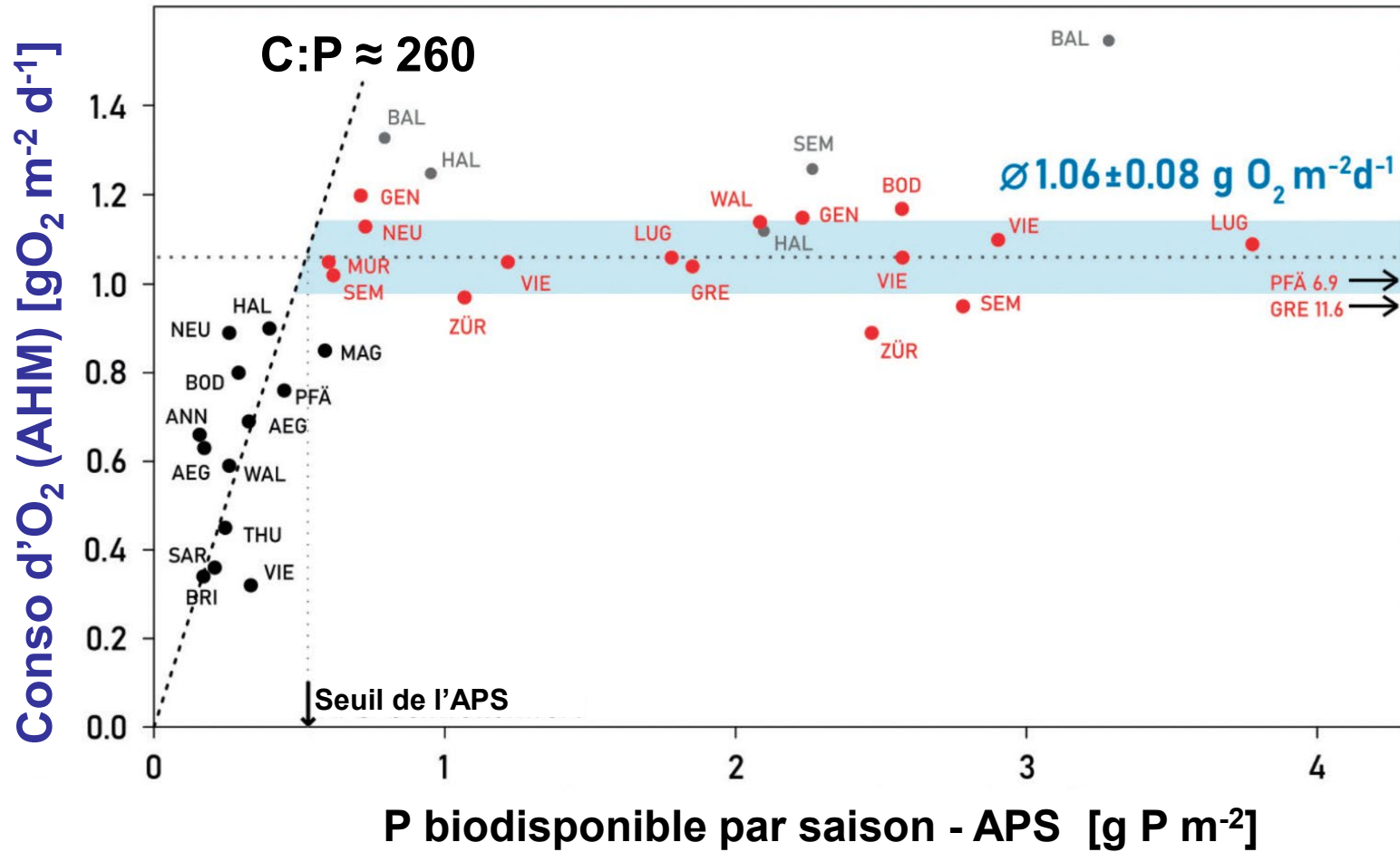
# Les algues se serrent la ceinture – mais pas toutes de la même façon



**La NEP réagit avec un décalage à la réduction de la teneur en P**

1. C/P augmente dès que DIP baisse – visible dans tous les lacs avec mesures du C/P
2. Niveau de P varie fortement où le C/P augmente (10 - 50 mg/m<sup>3</sup>)

# Dans les lacs oligotrophes → C/P ≈ 260



Pour APS < 0,6 gP/m<sup>2</sup> , la NEP est limitée par le P (Indication: conso d'O<sub>2</sub>)

Pour les lacs oligotrophes (en noir): C:P ≈ 260 (beaucoup + élevé que dans la zone rouge)

Pour APS > 0,6 gP/m<sup>2</sup> (bleu), NEP ≈ constante (Indication: conso d'O<sub>2</sub>)

# Conclusions – C/P

## Pour les faibles niveaux de P, la NEP carbone dépend des algues

1. Pour  $P > 40 \text{ mg/m}^3$ , le C/P est constant dans l'épilimnion productif ( $\sim 100 - 150$ )
2. Pour  $APS < 2 \text{ gP/m}^2$  ( $P = 40 \rightarrow 20 \text{ mg/m}^3$ ), les algues peuvent compenser:  
le C/P augmente continuellement jusqu'à un facteur  $\sim 2$
3. Au cours des saisons, le C/P augmente dès que le DIP est épuisé
4. Pour les lacs suisses oligotrophes (limités en P),  $C/P \approx 260$
5. Le C/P est très variable car les algues sont différentes
6. Lorsque le seuil est atteint, la compensation maximale est atteinte et la NEP baisse
7. Il paraît concevable que les prises de pêche baissent dès  $P = 10 \text{ mg/m}^3$  car le C/P a une influence sur la qualité des organismes servant de nourriture aux poissons.

# Contenu

- Prologue et questions
- Réaction de la conso d'O<sub>2</sub> à une baisse de la teneur en P
- Modification du C/P du phytoplancton avec la baisse de la teneur en P
- **Charge tolérable en P (APS) pour une production primaire moyenne (état mésotrophe)**
- Conclusions

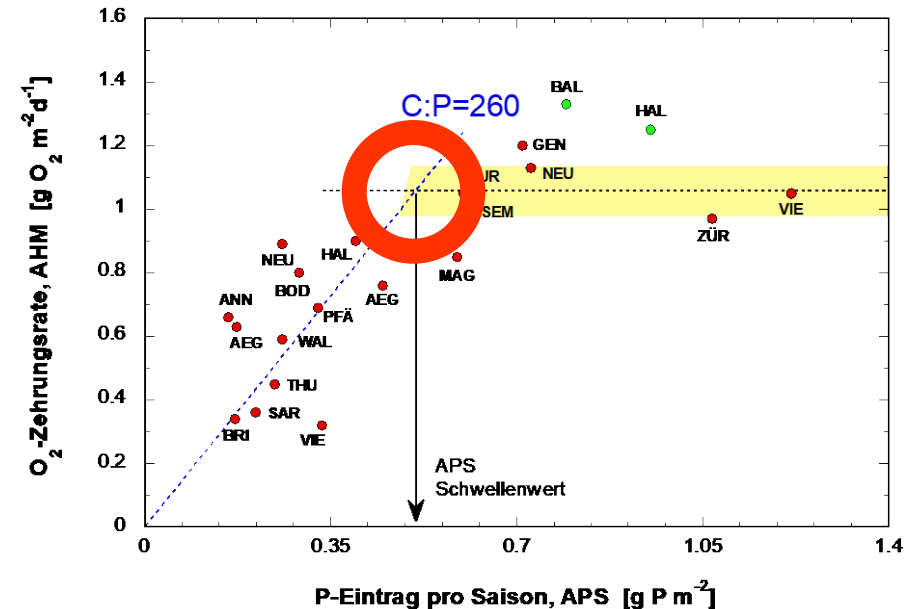
# Concentrations tolérables de P pour APS $\approx 0.6 \text{ gP/m}^2$

▪ **Tabelle 5:** Werte für  $TP_{MIX}$  und im Vergleich dazu der Schwellenwert  $TP_{MIX}^{SW}$ . Oberhalb des Schwellenwerts ist keine Abnahme der  $O_2$ -Zehrung zu erwarten.

See	$TP_{MIX}$ [mg P m <sup>-3</sup> ]	$TP_{MIX}^{SW}$ [mg P m <sup>-3</sup> ]
Ägerisee	5.9	20.1
Baldeggersee	25.2	17.2
Bielsee	16	4.5
Bodensee	7.6	13.2
Brienzersee	2.0	6.2
Greifensee	66	18.1
Hallwilersee	15.3	20.9
Lac de Joux	15	20.2
Lac Léman	21	19.9
Lago di Lugano Südbecken	49	15.8
Lago Maggiore	10	9.5
Murtensee	22	21.0
Lac de Neuchâtel	10.1	21.5
Pfäffikersee	16.5	19.9
Sarnersee	5.0	11.1
Sempachersee	22	21.9
Thunersee	2.5	6.3
Türlensee	16	18.6
Walensee	3.2	7.0
Zugersee	88	22.9
Zürichsee	25.7	13.1

$$APS[\text{gPm}^{-2}] = \left( [TP_{mix}] + \frac{LP \times 1\text{yr}}{V_{epi}} \times \frac{Q_{Apr-Sep}}{Q} \right) \times z_{epi}$$

$$LP = V_L \times [TP_{mix}] \times \left( \sigma + \frac{\beta}{\tau} \right)$$



# Conclusions – Charge en P

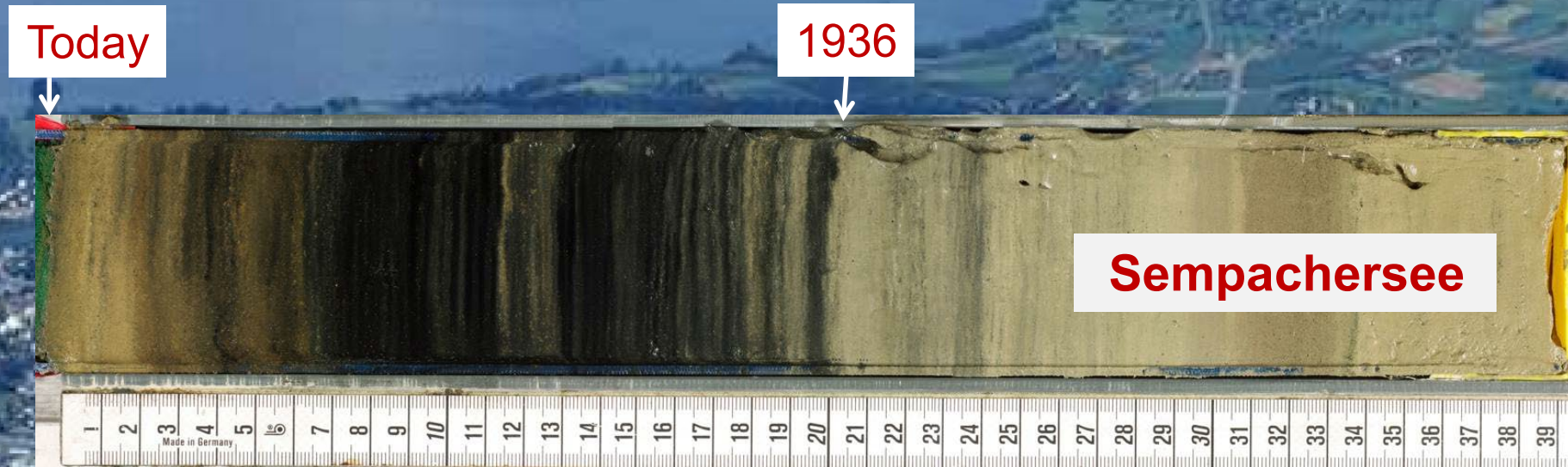
**Il est réaliste de pouvoir déterminer une charge tolérable en P**

1. Dans les lacs profonds, NEP peut être évaluée comme fonction de l'APS ( $\text{gP}/\text{m}^2$ ) car la consommation d' $\text{O}_2$  est représentative de la NEP
2. En dessous d'un APS  $\approx 0.6 \text{ gP}/\text{m}^2$ , la NEP diminue
3. La concentration de P correspondant à APS  $\approx 0.6 \text{ gP}/\text{m}^2$  varie de **5 à 20  $\text{mgP}/\text{m}^3$  ( $\text{TP}_{\text{mix}}$ )**
4. Pour les faibles niveaux de P, l'APS ( $\text{gP}/\text{m}^2$ ) est un meilleur critère que le  $\text{TP}_{\text{mix}}$  ( $\text{mgP}/\text{m}^3$ ) pour la NEP

# Conclusions

- (1) Sans un monitoring de qualité, cette analyse n'aurait pas été possible (durée, qualité des données, diversité des systèmes lac-bassin)
- (2) Le retour à une consommation d'O<sub>2</sub> de type mésotrophe est possible mais demande plus de temps que la réduction de la teneur en P (des décennies)
- (3) La consommation d'O<sub>2</sub> a très peu baissé dans la plupart des lacs:
  - car la valeur de l'APS est encore supérieure au seuil critique
  - car les sédiments riches en C présentent de forts SOU et RED
  - exception notoire: le lac de Constance
- (4) Les seuils de l'APS et du TP<sub>mix</sub> peuvent être estimés (5 – 20 mg/m<sup>3</sup>)
- (5) Un niveau de P correspondant à un état mésotrophe et une forte abondance des prises de pêche ne vont pas ensemble.

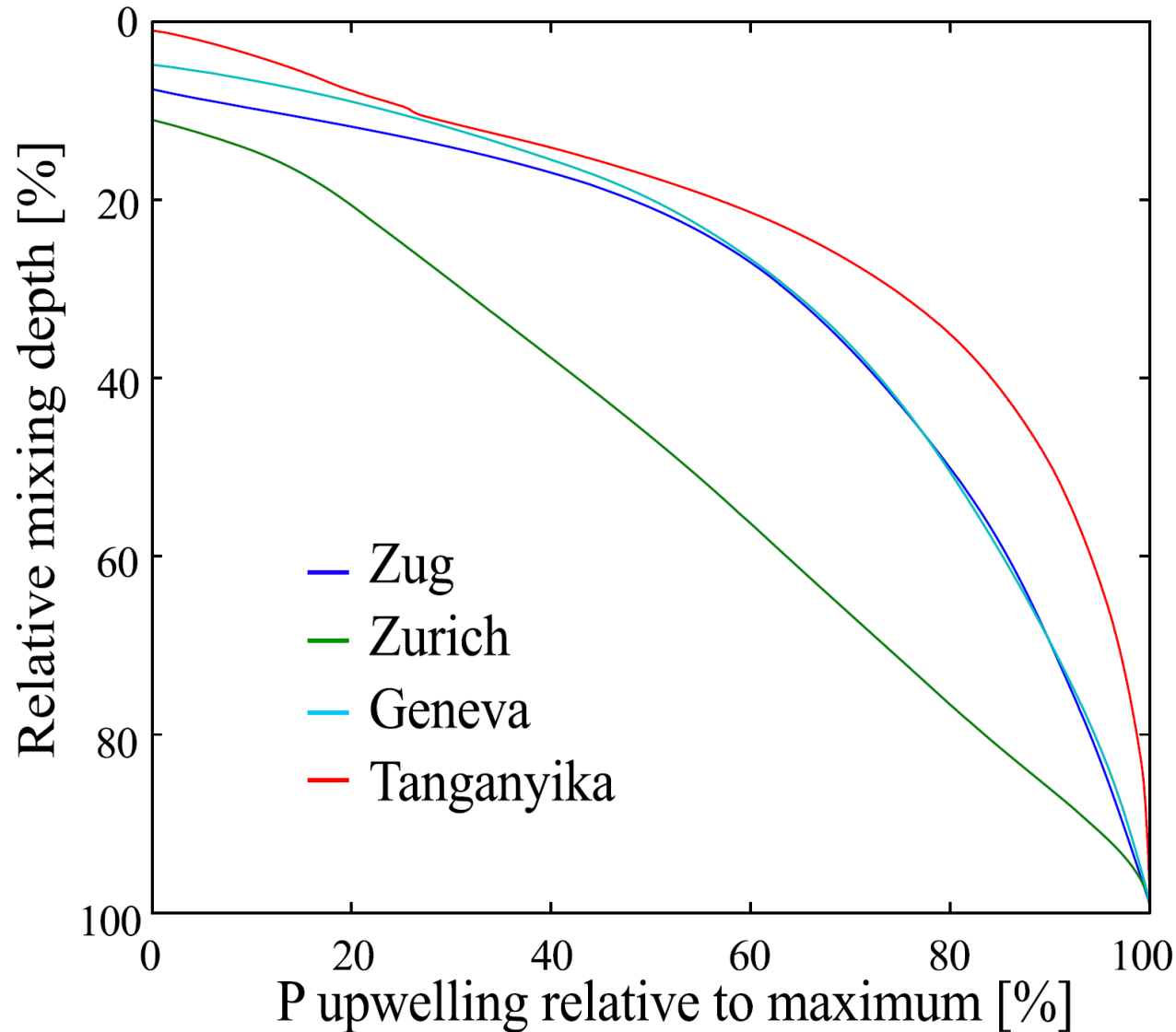
**La réoligotrophisation  
est possible – avec de  
la patience**





# Für Fragen

# Effekt der Wintermischung



## Bespiel Genfersee

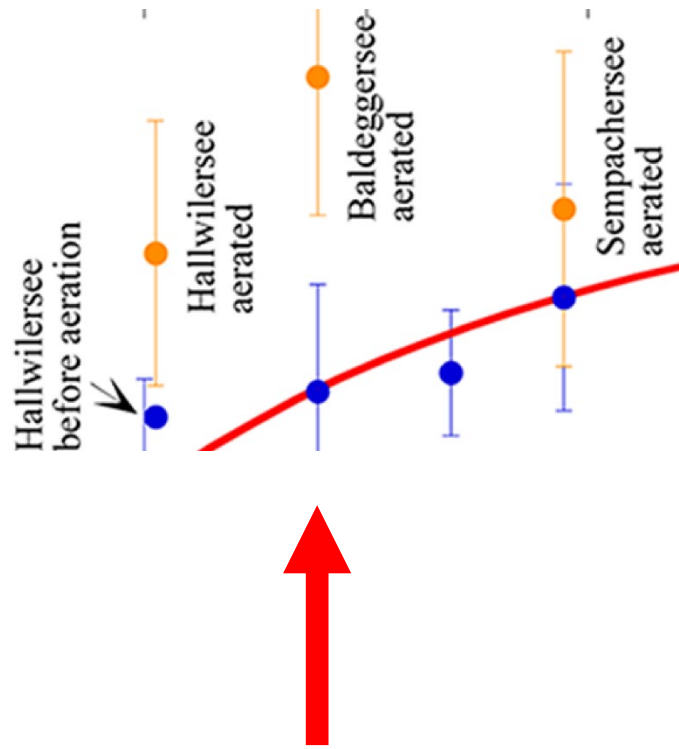
Für Mischungstiefe = 100 m  
(Max = 310 m)

→ P-Upwelling um 30% red

**Effekt hängt von Form des  
P-Profils ab  
(grösser im Zürichsee oder  
Luganensee NB)**

**Effekt grösser für  
oligotrophe Seen**

# O<sub>2</sub>-Zehrung (AHM) - Effekt der Belüftung



**Belüftung → erhöht  
O<sub>2</sub>-Gehalt → erhöht  
SOU → erhöht AHM**

