

The influence of climate change on the occurrence of hypoxia in Swiss lakes

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
RYAN PETER NORTH
MAsc in Civil Engineering, The University of British Columbia
born 16.09.1979
citizen of Canada

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Rolf Kipfer, examiner
Dr. David M. Livingstone, co-examiner
Prof. Dr. Bernhard Wehrli, co-examiner
Prof. Dr. Frank Peeters, co-examiner

Summary

The focus of this thesis was climate-lake coupling in the context of ongoing and future impacts of climate change on oxygen concentrations in the hypolimnion of lakes. Time-series analysis of historical data sets was used to investigate the effect of a climate regime shift (CRS) in the late 1980s on lake temperatures, lake mixing patterns and hypolimnetic oxygen concentrations. In addition, a hypolimnetic oxygen depletion model was modified and tested for use as a water resource management tool. The study sites included five perialpine lakes in Switzerland that were regularly monitored over 29 to 85 years.

The first study addressed an important issue when working with historical data sets: gap-filling. Because of the long time-span covered by historical data sets, missing data points are common. However, in many forms of data analysis a continuous data set with consistent measurement intervals is required. Two common gap-filling methods – cubic spline and linear interpolation – were compared using profiles of temperature, oxygen, phosphorus and chloride, which were considered representative of a variety of profile shapes. The simpler method, linear interpolation, was found to be more consistent than cubic spline interpolation, which was more susceptible to the creation of large errors. The results highlighted the potential for both methods to produce large errors when profile gradients were high, even at relatively small gap sizes.

The impact of climate variability on aquatic systems was assessed for river and lake temperatures across Switzerland. An abrupt increase in air temperature, linked to the late 1980s CRS, was reflected in the surface water temperatures of 18 rivers and streams (using an aggregated mean time-series) and four lakes (the Upper Lake of Zurich, the Lower Lake of Zurich, the Lake of Walenstadt and Greifensee). A month-by-month comparison of water temperatures before and after the late 1980s CRS showed seasonal differences in the magnitude of the warming, which was stronger in winter, spring and summer than in autumn. The abruptness of the shift and its magnitude diminished with increasing lake depth. The difference in warming rates between the surface and bottom water resulted in an increase in lake thermal stability. The study showed that the abrupt warming in the late 1980s contributed substantially to the overall increase in temperature that has occurred in inland waters in Switzerland.

The increase in thermal stability in the Lower Lake of Zurich reduced the frequency of occurrence and/or intensity of annual deep-water renewal and resulted in an increase in the duration and spatial extent of hypoxia. The increase in hypoxia was most likely the cause of a concurrent increase in the re-dissolution of phosphorus from the sediment, which may in turn have contributed to an observed increase in the potentially toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens*.

While historical data sets can help to determine past lake conditions and responses, water resource managers require more up-to-date results in order to properly manage lake resources. To address these needs, an existing oxygen depletion model was modified to predict oxygen concentrations at the end of the upcoming stratification period. The model was configured and tested using data from four Swiss lakes (the Upper Lake of Zurich, the Lower Lake of Zurich, the Lake of Walenstadt and Aegerisee). The model accurately predicted oxygen concentrations in the hypolimnion, as well as the occurrence of hypoxia at the end of the summer stratification period.

The major conclusion of the thesis is that climate change can negatively affect hypolimnetic oxygen concentrations in lakes. Considering the observed global increase in lake surface temperature over the past few decades, the ongoing global rise in air temperatures could result in a global rise in the extent and duration of lake hypoxia.

Résumé

Cette thèse porte sur l'interaction entre le climat et les lacs, dans le contexte des impacts, actuels et futurs, des changements climatiques sur la teneur en oxygène des lacs. Des méthodes de traitement de série temporelle sont appliquées à des données historiques pour étudier l'effet d'un changement de régime climatique (CRS), dans les années 1980, sur les températures des lacs, les modes de mélange et la concentration d'oxygène dans l'hypolimnion. De plus, un modèle de déplétion en oxygène de l'hypolimnion est modifié et testé pour être utilisé comme outil de gestion intégrée des ressources en eau. Les sites d'étude comprennent cinq lacs périalpins, situés en Suisse, dans lesquels une gamme de paramètres physico-chimiques a été régulièrement mesurée, durant des périodes de 29 à 85 ans.

La première étude aborde une question importante, associée aux données historiques: comment combler les lacunes? En raison de la longue durée des séries temporelles, les valeurs manquantes sont relativement nombreuses, ce qui limite l'emploi de méthodes statistiques nécessitant des données continues, c'est-à-dire définies par un intervalle de mesure constant. Deux méthodes d'interpolation – spline cubique et linéaire – sont comparées, sur la base d'une sélection représentative de profils de température, d'oxygène, de phosphore et de chlorure. La méthode la plus simple, l'interpolation linéaire, est jugée plus cohérente que l'interpolation spline cubique, qui est plus susceptible d'engendrer des erreurs importantes. Les résultats montrent, néanmoins, que les deux méthodes peuvent potentiellement produire des grandes erreurs lorsque les gradients de profil sont élevés.

L'impact de la variabilité climatique sur les systèmes aquatiques est évalué dans les lacs et cours d'eau de Suisse. L'augmentation abrupte de la température de l'air, liée aux CRS, est reflétée dans les températures de l'eau de 18 cours d'eau et quatre lacs (le haut-lac de Zurich, le bas-lac de Zurich, le lac de Walenstadt et celui de Greifensee). Dans les lacs, la soudaineté de la transition et son ampleur diminue avec la profondeur. Cette différence d'augmentation entre les couches d'eau superficielle et profonde a entraîné une augmentation de la stabilité thermique du lac. L'étude montre que le réchauffement abrupt des années 1980 a largement contribué à l'augmentation de la température qui s'est produite dans les lacs et cours d'eau de Suisse.

L'augmentation de la stabilité thermique dans le bas-lac de Zurich a réduit la fréquence ou la force des grands événements de mélange, qui à son tour a conduit à une augmentation de la durée et de l'étendue spatiale de l'hypoxie. Cette croissance d'hypoxie est probablement la cause d'une augmentation de la remise en solution du phosphore à partir des sédiments, ce qui peut, en son tour avoir contribué à une augmentation observée de la cyanobactérie *Planktothrix rubescens*, qui est potentiellement toxique.

Alors que les données historiques sont très utiles pour déterminer les conditions et les réactions des lacs dans le passé, les gestionnaires des ressources en eau ont besoin de résultats plus immédiat. Pour répondre à ces besoins, un modèle existant est modifié pour prévoir les concentrations d'oxygène à la fin de la prochaine période de stratification. Le modèle est configuré et testé en utilisant des données provenant de quatre lacs Suisses (le haut-lac de Zurich, le bas-lac de Zurich, le lac de Walenstadt et Aegerisee). Le modèle prédit avec précision les concentrations d'oxygène dans l'hypolimnion, et fournit des estimations relativement précises de la présence d'hypoxie en fin de la période de stratification.

La principale conclusion de cette thèse est que le changement climatique peut réduire les concentrations d'oxygène dans les lacs. Etant donné l'augmentation globale des températures observées dans les lacs au cours des dernières décennies, on peut s'attendre à ce que le réchauffement atmosphérique entraîne une hausse généralisée de l'étendue et de la durée de zones hypoxiques en milieu lacustre.