

# MODELIZACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA EN LAGOS MEDIANTE EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL REMO EN EL CONTEXTO DE UN CAMBIO CLIMÁTICO

Mark VETTER

*Departamento de Geografía, Universidad de Munich*  
mark.vetter@lmu.de

## RESUMEN

Existen muchos modelos climáticos regionales pero pocos consideran el balance de energía de los lagos. Es evidente que el cambio climático tendrá gran influencia sobre los ecosistemas acuáticos por esta razón, este trabajo acopla las proyecciones de diferentes situaciones climáticas, obtenidas con el modelo climático regional REMO, con las salidas termodinámicas del modelo DYRESM para lagos. La zona de estudio es el lago Ammersee en Baviera, 40 km al sudoeste de Munich en el sur de Alemania. El periodo utilizado en las proyecciones es 2040-2050. El trabajo que presentamos intenta comprobar si estos cambios se detectan también en el lago Ammersee como consecuencia de los efectos del cambio climático. La intensidad y características del balance de energía de este lago son analizadas mediante técnicas estadísticas. Se estudian además otros parámetros como la posición del metalinión, la estabilidad térmica, la duración de la estratificación y los periodos de circulación, lo que proporciona información para evaluar los posibles cambios ecológicos del lago.

**Palabras clave:** cambio climático, lagos, limnología, cambio ecológico, REMO.

## ABSTRACT

There are several regional climate models but most of them are not coupled with lake water energy budget models. It is obvious, that climate change will also have an influence on aquatic ecosystems. This investigation will couple the results of a changing climatic atmospheric situation, calculated by the regional climate model REMO, with the thermodynamical water model DYRESM for lakes. Our study area is Lake Ammersee in Bavaria, 40 km southwest of Munich in the southern part of Germany. Experimental period for the projections will be 2040 to 2050. The research presented in this paper tries to verify if these effects are also observed in Lake Ammersee due to ongoing climate change. Intensity and characteristics of the heat budget changes in the lake are investigated through statistical methods. Other parameters such as the position of the metalimnion, thermal stability, duration of stratification and circulation periods are also studied providing information to evaluate the future ecological situation of the lake.

**Key words:** Climate Change, Lake, Limnology, ecological change, REMO

## 1. INTRODUCCION Y FIN DE LA INVESTIGACION

Existen algunos modelos regionales climáticos con los cuales se pueden simular las posibles condiciones meteorológicas (por el cambio climático según el IPCC 2007) en el futuro. Así se podrán estimar con exactitud las condiciones meteorológicas en distintas zonas. Lo que falta es saber que efectos (en tipo y dimensión) tienen esos cambios meteorológicos en los diferentes sistemas de la Tierra (litosfera, hidrosfera, biosfera etc.). Este artículo trata de investigaciones sobre la influencia de dichos cambios en una parte de la hidrosfera, los lagos, sobre todo en su estructura térmica.

## 2. METODOS Y CARACTERISACION DE LOS DATOS

Los modelos regionales para la simulación de un clima del futuro trabajan muchas veces a base de los diferentes posibles escenarios del IPCC (2007) de la emisión de los gases efecto invernadero. En esta investigación se ha utilizado el Modelo REMO del Instituto Max Planck para Meteorología (MPI-M) (JACOB 2001). Este Modelo ofrece todos los parámetros meteorológicos simulados con un intervalo de seis horas. Para otros parámetros el intervalo es de una hora. El tiempo completo de la simulación es del año 2000 hasta el 2100.

La base de la regionalización de ese modelo REMO son las estructuras del modelo climático acoplado océano-atmósfera ECHAM5/MPI-M (ver Figura 1). La resolución horizontal es a base de celdas de 10x10 km y los parámetros meteorológicos son: presión atmosférica en la superficie, humedad atmosférica, radiación de onda corta y radiación de onda larga, temperatura, precipitaciones (tipo y cantidad), viento horizontal y cobertura de nubes.

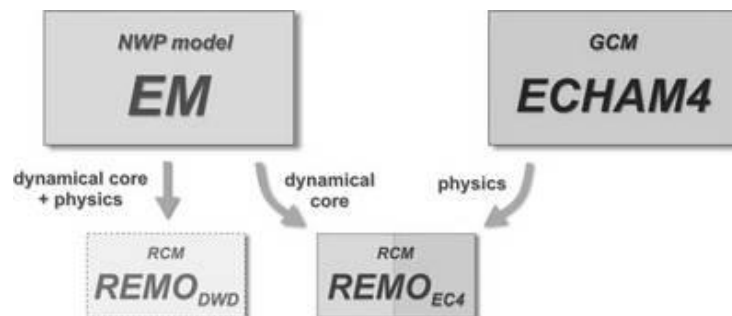


Fig. 1: Concepto del modelo REMO utilizando como base los modelos ECHAM y EM del MPI-M (MPI-M 2010)

Los resultados de este modelo, es decir, los datos meteorológicos para un futuro simulado, serán los datos del input para el modelo del balance termodinámico del agua DYRESM (IMERITO 2010). Este modelo simula el contenido de calor en la masa de agua. Así es posible conocer la futura distribución de la energía térmica (o la estructura térmica) de un lago. Esa será la base para estimar otros escenarios ecológicos del mismo (distribución de oxígeno, nutrientes, etc.).

El modelo DYRESM está ya completamente calibrado y listo para realizar simulaciones de las condiciones futuras (VETTER 2010). Para su utilización son necesarios 5 ficheros con las siguientes características:

- Un perfil vertical de temperatura inicial del lago, que indica la situación térmica al inicio. Ese perfil puede ser un perfil ficticio (para un futuro simulado), que tiene más o menos las características térmicas del promedio del lago.
- Un fichero de configuración, que contiene datos generales de simulación como el intervalo del resultado de la simulación, el inicio y el día final de la simulación etc.
- Un fichero de morfometría, con las diferentes capas del lago. Además contiene diversas informaciones geográficas como la latitud y la longitud del sitio del lago etc.
- Un fichero del input y del output de los arroyos del lago. Estos son datos de la cantidad de agua que entra y sale del lago, cuales influyen al balance térmico del sistema.
- Un fichero con los parámetros de calibración, que tiene algunos ajustes de parámetros (influencia de la actividad del viento, extinción de la luz etc.). Ese fichero permite hacer un ajuste, una calibración de la simulación.
- Un fichero de la meteorología, que define la radiación de onda corta y de onda larga (o cobertura de nubes), precipitación, temperatura, presión y humedad atmosféricas, actividad del viento.

El intervalo del tiempo en los ficheros del input, así como de la meteorología e hidrología debe ser el mismo que el intervalo definido para el resultado de la simulación.

### 3. ZONA DE ESTUDIO

Para la calibración del modelo DYRESM es necesario tener datos meteorológicos (de la zona cerca del lago) así como datos de campo, es decir, perfiles verticales de la estructura del lago. También es necesario encontrar una zona, donde se pueda constatar un posible cambio climático que además sea medible (VETTER 2010).

Por esas razones fue elegido el Lago Ammersee. Este lago está situado aproximadamente 35km al sur-oeste de Munich en Baviera/Alemania. Su ubicación puede verse en el mapa (figura 2).



Fig. 2: La zona de estudio. El lago Ammersee se encuentra 35 km al sur-oeste de Munich

Esta masa de agua tiene una superficie de 46,6 km<sup>2</sup> y un volumen de 1750 x 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. En la cuenca hidrográfica del lago se sitúan explotaciones de agricultura extensiva y también hay algunas zonas forestales. En las décadas de 1980 y 1990 hubo bastantes problemas con la calidad del agua en la cuenca del Ammersee. Pero desde entonces se ha invertido mucho en la infraestructura de la cuenca del lago para purificar el agua que entra en el mismo, habiéndose construido incluso un anillo de alcantarillado alrededor del lago. Con éxito se mejoró la calidad del agua. Para analizar ese desarrollo se puede utilizar la figura 3. El fósforo total es un indicador de la entrada de nutrientes en el lago, que favorecen mucho la producción primaria. Desde 1985 se ha reducido extremadamente de un valor promedio total de alrededor 25 µm hasta unos 10 µm hoy en día.

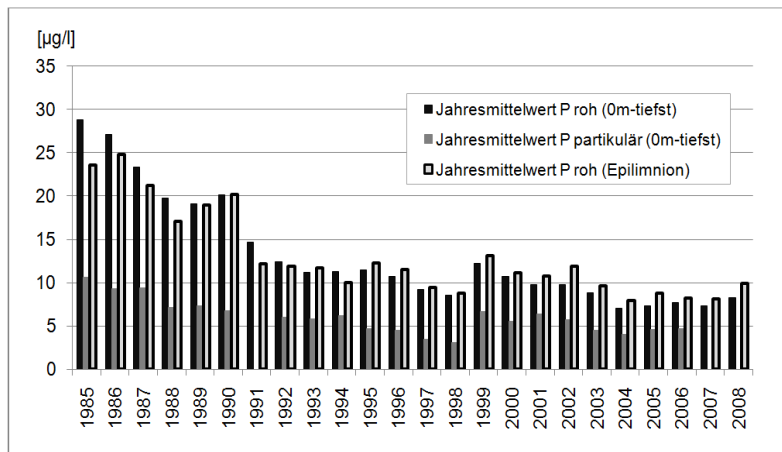


Fig. 3: Valor de la concentración del fósforo entre 1985 y 2008 como promedio del lago Ammersee (VETTER 2010)

Para la simulación en esta investigación está previsto simular el periodo que va de 2040 hasta 2050.

Las figuras 4 y 5 muestran la previsión de un posible cambio climático en la zona de estudio. La figura 4 muestra el posible aumento de la temperatura del aire en invierno según el modelo REMO en el periodo 2031/2060 en comparación con el periodo 1971/2000.

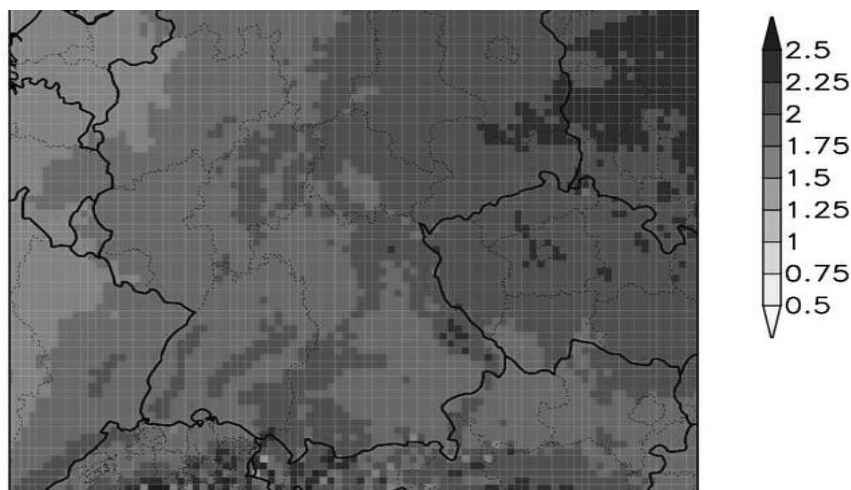


Fig. 4: Posibles cambios del modelo REMO 2031/2060 menos los valores del periodo 1971/2000 según el escenario A1B del IPCC en invierno, temperatura del aire en 2m (MIP-M 2010)

En la figura 5 se puede ver el calentamiento calculado en el mismo periodo para las temperaturas del aire en verano.

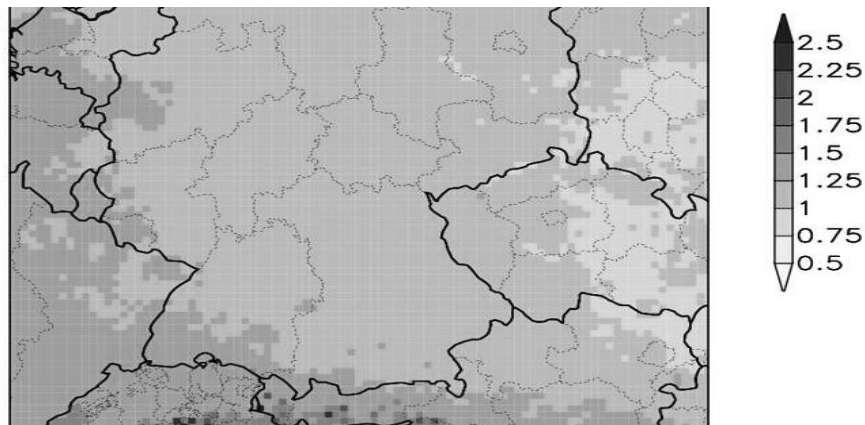


Fig. 5: Cambios posibles del modelo REMO 2031/2060 menos los valores del periodo 1971/2000 según el escenario A1B del IPCC en verano, temperatura del aire en 2m (MIP-M 2010)

## 4. RESULTADOS

### 4. 1. Primeros resultados – Trabajos preparativos

En un primer estudio en otro lago se ha constatado que los cambios en el contenido de calor de los lagos tendrán consecuencias sobre su estructura térmica interna. Eso fue investigado por el autor para el lago Königssee, en el sudeste de Alemania, comparando su estado limnológico y físico desde el pasado (1978-1980) hasta el presente.

Se detectaron cambios significativos en la temperatura de superficie de entre 1 y 3 Kelvin y en la figura 6 se puede ver que también se produjeron cambios en la temperatura del hipolimnion en los periodos de observación.

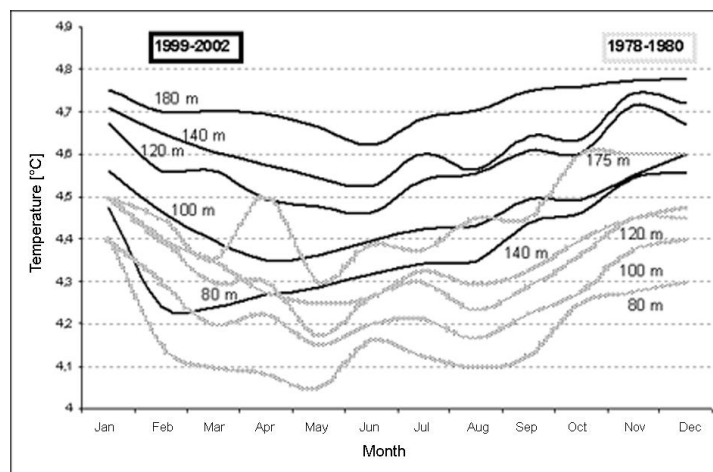


Fig. 6: Cambios en la temperatura del agua, observado en el Lago Königssee, comparando dos tiempos de estudio diferentes (VETTER 2009)

Estos cambios influenciarán la estratificación y los periodos homotérmicos del lago con importantes consecuencias ecológicas, ya que la zona por encima de la termoclina es ahora mayor.

La figura 7 muestra el cambio en la estabilidad de la estratificación en el lago. Esa estabilidad se puede calcular con un método limnológico estandarizado: la metodología de la estimación de la estabilidad de Schmidt (SCHMIDT 1928). El valor de la estabilidad de SCHMIDT es el valor de energía necesario para convertir un perfil estratificado en un perfil con homotermia (la misma temperatura en todos los puntos del perfil vertical).

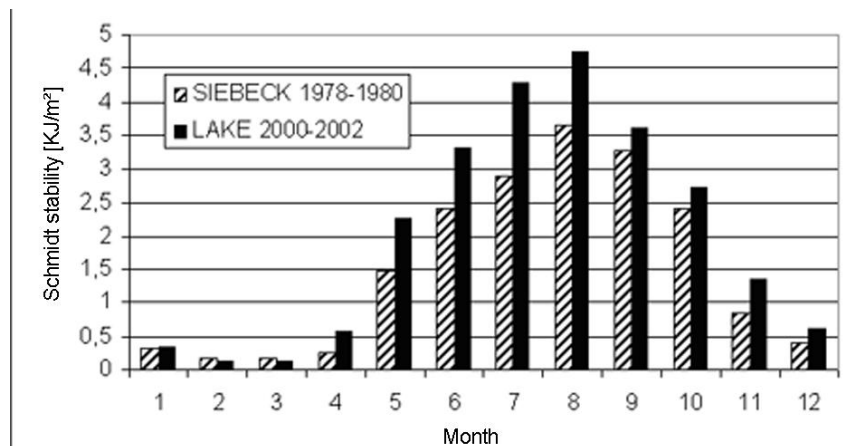


Fig. 7: Cambios en la estabilidad de la estratificación del lago Königssee (VETTER 2009)

Como se puede ver en la figura 8, una mayor estabilidad también puede tener influencia en la circulación. Los periodos de estratificación (en verano) pueden ser más largos. En verano empieza la estratificación algunas días antes (hoy en día aproximadamente 10-15 días antes en primavera y la circulación de otoño tiene efecto alrededor de 15-20 días más tarde. Esto es importante para la ecología de un lago: Sólo en las épocas con circulación hay posibilidad de entrada de oxígeno a las zonas más profundas del lago. Esas zonas de circulación son cada vez más cortas posiblemente como consecuencia del cambio climático.

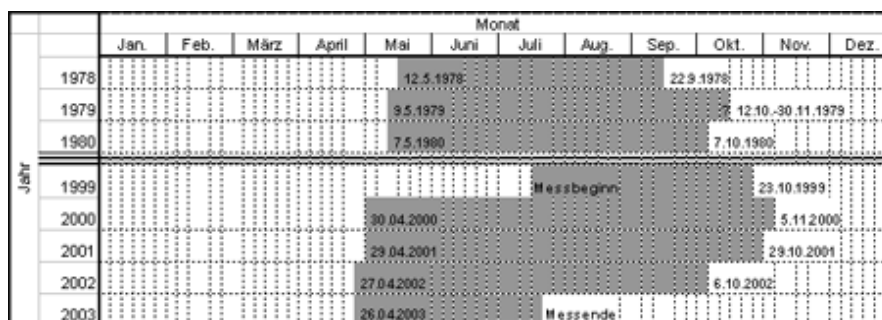


Fig. 8: Prolongación de los periodos de estratificación en el lago Königssee (VETTER 2009)

Finalmente, a través de los resultados del lago Königssee, se puede asumir que hay una influencia en la estructura térmica del lago que debe influir en su ecología. Para el lago Ammersee habría que estudiar si se obtienen los mismos resultados, ya que la situación en el lago y en su cuenca es un poco diferente.

Pero para realizar previsiones de futuro hay que tener en cuenta los cambios que se evidencian de la investigación del lago Königssee; antes de examinar el lago Ammersee es necesario establecer las herramientas de predicción del futuro balance térmico en el lago y para eso es necesario calibrar antes el modelo del balance térmico del lago.

## 4. 2. Resultados de la calibración del modelo

Para la calibración del modelo DYRESM para estimar el balance térmico del lago Ammersee, se ha utilizado el periodo entre 2004 y 2008. Para ese intervalo de tiempo se pudieron conseguir los datos meteorológicos e hidrológicos necesarios para la simulación y también fue posible tomar datos de los estudios de campo para después comparar los datos de la simulación con los datos reales. Solo así se puede evaluar la calidad de las modelaciones.

En la figura 9 se aprecia la diferencia entre los valores de la temperatura del agua en superficie simulados (línea gris) y los datos medidos (los puntos). Se ve que en algunas fechas, los datos simulados son bien comparables con los datos medidos. En otras fechas es necesario mejorar la calibración.

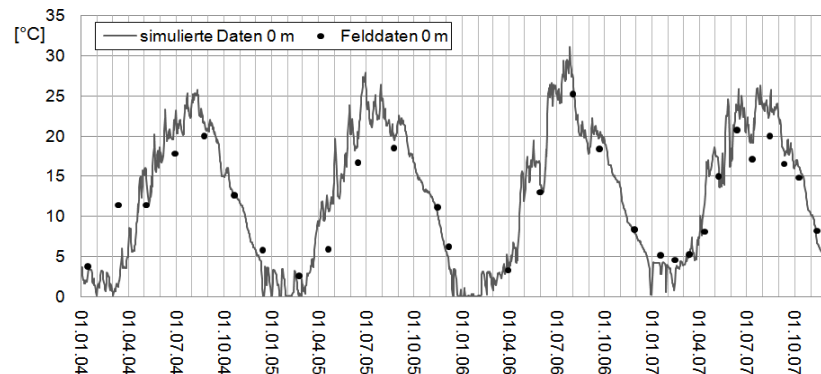


Fig. 9: Simulación de la temperatura del agua en la superficie del Ammersee en comparación con los datos medidos (VETTER 2010)

En Figura 10 se puede ver los resultados de la misma modelación, pero ahora en las zonas más profundas, es decir a 80 metros de profundidad. En esas profundidades la diferencia absoluta en las temperaturas no es tan notable, como se puede ver en la escala.

La simulación está bastante bien calibrada algunos años (como por ejemplo 2004 y 2006). En los años 2005 y 2007 la tendencia es correcta, pero para calcular los valores absolutos correctos del modelo habría que calibrar todavía mejor.

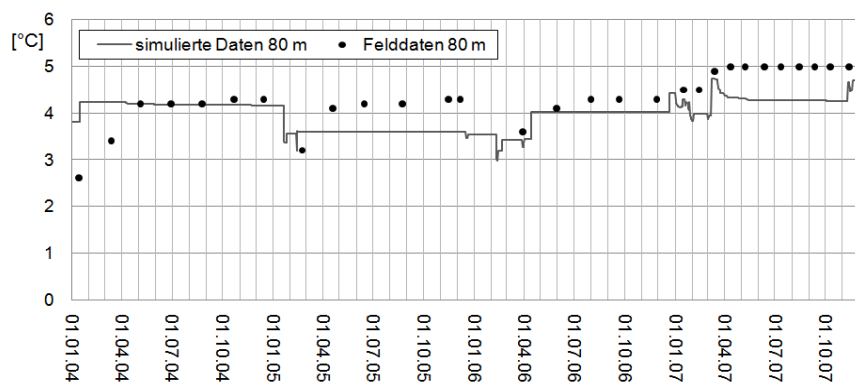


Fig. 10: Simulación de la temperatura del agua a una profundidad de 80 m del Ammersee en comparación con los datos medidos (VETTER 2010)

La calibración del modelo muestra que todavía es necesario mejorar la calibración de los parámetros, pero por otro lado se ve que es posible utilizar el modelo calibrado para estimar

un primer escenario en el Ammersee, con lo que se puede desarrollar el balance térmico del lago en un posible futuro cambio climático.

#### 4. 3. Efectos de años extremos para la ecología del lago

Para saber si un elevado contenido de calor en el lago Ammersee realmente influye ecológicamente se han realizado algunos estudios especiales en periodos de fuerte influencia de una anomalía positiva de temperatura del aire como ocurrió en 2003 y 2006. Aquí solo se analiza la situación de 2003.

La figura 11 muestra la distribución vertical del contenido de oxígeno en un perfil del lago Ammersee en los diferentes meses de 2003.

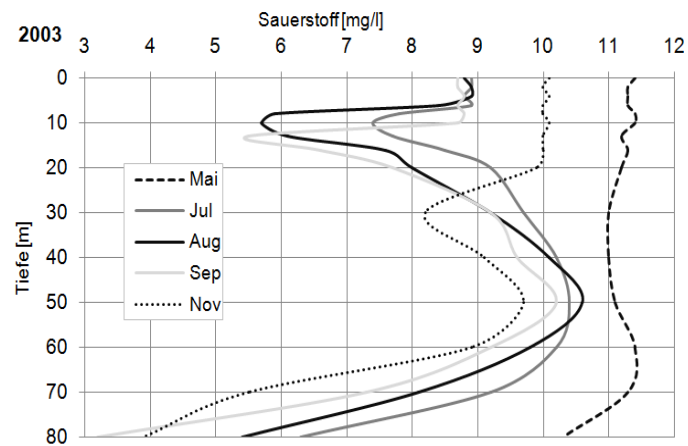


Fig. 11: Distribución vertical de oxígeno del lago Ammersee en diferentes meses del año 2003 (VETTER 2010)

Por otro lado, la figura 12 muestra la distribución vertical del contenido de oxígeno en los perfiles verticales del lago en los diferentes meses de 2008.

Se supone que 2008 fue un año promedio, un año normal en relación con su influencia meteorológica. Los análisis de los datos meteorológicos para un tiempo más largo muestran eso mismo (VETTER 2010).

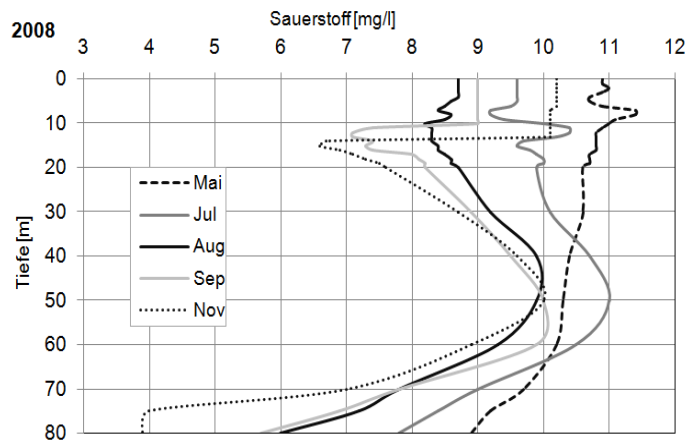


Fig. 12: Distribución vertical del oxígeno del lago Ammersee en diferentes meses del año 2008 (VETTER 2010)



Como se puede ver el año 2003 es destacado, pues el contenido de oxígeno es menor sobre todo en las zonas más profundas del lago, y especialmente después del verano excepcional. Una posible explicación de ese fenómeno puede ser la siguiente: De la misma manera que en el verano de 2003 se midieron temperaturas superficiales del agua muy altas, también la estructura térmica del lago fue mucho más estable que en el año 2008. Esto es observable en la Figura 13.

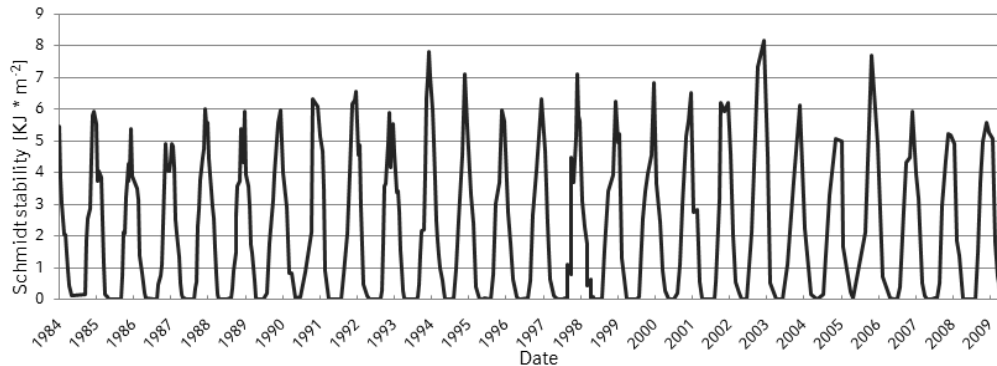


Fig. 13: Estabilidad térmica (Schmidt-Estabilidad) del Lago Ammersee entre 1984 y 2009 (VETTER 2010)

Eso impide el desplazamiento de oxígeno de las zonas superficiales del lago hasta las zonas más profundas. La consecuencia fue un sustento de oxígeno en las zonas del hypolimnion. Así, es muy probable que otros fenómenos extremos como esos del verano de 2003 y de 2006 en Europa central influyan en la distribución del calor en un lago.

## 5. CONCLUSIONES

La calibración del modelo es adecuado para la simulación de la distribución de la energía térmica del futuro. El modelo REMO ofrece todos los datos calculados necesarios del futuro para los ficheros del input meteorológico del modelo DYRESM.

Es evidente, como muestra esta investigación, que el cambio climático, o mejor dicho, un cambio en la situación energética de la atmósfera, influye en la distribución térmica de un lago. Es evidente también, que los cambios en la estructura térmica pueden tener influencia en la situación ecológica de la masa de agua, como se demuestra en años meteorológicamente extremos (como fue posible de ver en 2003 o en 2006).

Según las modelaciones REMO y de los escenarios IPCC esos años extremos serán más frecuentes en el futuro, por lo que tenemos que analizar bien si las consecuencias en los lagos provocan también problemas ecológicos a largo plazo. La investigación en este proyecto ofrece la base para esas estimaciones.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Agencia para la gestión de aguas Weilheim haber puesto a disposición del proyecto los datos del agua del lago Ammersee y también da la gracias al Ministerio de Medio Ambiente de Bavaria por fomentar el proyecto.

## 7. REFERENCIAS

IMERITO, A. (2010): *Dynamic Reservoir Simulation Model V. 4.0 - Science Manual*. 12.05. 2007. On-Line: <http://www.cwr.uwa.edu.au>.

IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. <http://www.ipcc.ch>. Geneve.

JACOB, D. (2001). *A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin*. Meteorology and Atmospheric Physics, Vol.77, Issue 1-4, pp. 61-73.

MPI-M (2010): *Explications about the REMO-Modell*. On-Line: <http://www.mpimet.mpg.de>

SCHMIDT, W. (1928): *Über Temperatur- und Stabilitätsverhältnisse von Seen*. Geogr. Ann. 10: pp .145-177.

VETTER, M. (2009): *Landschaftsveränderungen am Königssee durch den Klimawandel*. Süddeutscher Verlag für Hochschulschriften. Saarbrücken.

VETTER, M. (2010): *Methoden und Ergebnisse zur Erforschung limnologischer Folgen des Klimawandels. Unter besonderer Berücksichtigung des Ammersees und der Modellierung seines Wärmehaushaltes*. Tesis de Habilitación. Universidad Ludwig-Maximilians de Munich. Publicación previsto para finales de 2010.