

ANALIZA TEMPERATURNEGA REŽIMA IN POJAVA LEDU NA BOHINJSKEM JEZERU

Analysis of Temperature and Appearance of Ice on Bohinj Lake

Peter Frantar* UDK 551.526(497.4 Bohinj)

Povzetek Abstract

Bohinjsko jezero je največje naravno stalno slovensko jezero, katerega stanje gladine beležimo na Agenciji RS za okolje od leta 1919, temperaturne podatke pa od 1939 do danes. Analizirane so izbrane vrednosti povprečnih temperatur in pojava ledu ter prikazani trendi obeh zajetih spremenljivk skozi zajeto časovno obdobje. Primerjali smo tudi pojav ledu in temperatur ter analize zajetih parametrov Bohinjskega jezera z znanstvenimi izsledki s področja spremenljivosti podnebja.

Lake Bohinj is the largest permanent natural lake in Slovenia. In the Environmental Agency of the Republic of Slovenia, we measured the state of the water level from the year 1919 and the temperatures from 1939 to today. We analysed selected average temperatures and the occurrence of ice over a period of time. A comparison between the occurrence of ice and temperatures and a comparison between the parameters involving Lake Bohinj and scientific results in the field of climatic changes were also done.

Uvod

Bohinjsko jezero je največje naravno stalno jezero v Sloveniji. Jezersko kotanjo, v kateri danes leži jezero, je izdolbel Bohinjski ledenik, zato pravimo, da je Bohinjsko jezero ledeniškega nastanka. Leži na nadmorski višini 525 m, njegova površina je 318 ha, največja globina pa 45 m (Firbas, 2001). Znano je, da so jezera močno povezana z atmosferskimi pojavi, ki se odražajo v fizikalnih in kemičnih parametrih jezerske vode. Tako se vreme »zgladi« in odrazi v jezerskih temperaturah in pojavljanju ledu na jezeru. Te pojave obravnavamo v članku. Uporabili smo podatke o stanju gladine in temperature zgornjega sloja vode Bohinjskega jezera z vodomerne postaje Agencije RS za okolje, ki leži pri cerkvi Sv. Duha in deluje od leta 1919. Podatki so pridobljeni z enkrat-dnevним opazovanjem stanja in merjenjem temperature s pomočjo opazovalca. Zavedamo se, da je pri interpretaciji le-teh potrebna določena previdnost, zlasti zaradi možnih subjektivnih meritev. Za zimi 1999/2000 in 2000/2001 smo podatke o pojavu ledu dobili iz letnih poročil o kakovosti jezer (Remec Rekar, 2000 in 2003) in so »zajeti« na drug način, kar je treba upoštevati pri interpretaciji podatkov.

Podnebna spremenljivost je postala aktualna tema in del našega vsakdana. Različni mediji nam ponujajo vedno več dokazov o spremenljivosti podnebja, zlasti v zadnjih letih 20. stoletja. Naraščanje koncentracij toplogrednih plinov,

zlasti po drugi svetovni vojni, povzročata »umetno« povečan učinek tople grede in posledično segrevanje ozračja. Prek temperatur zraka, padavin itn. pa se vse to odraža tudi na jezerih (Lohmann, 2003). Raziskave podnebnih sprememb in vpliva le-teh na ledenike, led in jezera kažejo, da se je segrevanje izrazito povečalo po letu 1980 oz. 1990 (Trivedi, 2002; Danielson, 2002; Nadbath, 1999; Gabrovec, 1998; Houghton J.T. in sod., 2001;). Pri nas je za visokogorje Julijskih Alp značilen trend rasti povprečnih temperatur zraka in upadanja števila dni s temperaturo pod 0 °C, ki je potrebna za tvorjenje in ohranjanje ledu – v primeru Triglavskega ledenika (Nadbath, 1999).

Glavni pokazatelji podnebnih sprememb (spremenljivosti) so indikatorji, ki jih delimo v dve osnovni področji (Houghton J.T. in sod., 2001): temperaturni in hidrološko-nevihtni indikatorji. Za analizo vpliva vremena na jezero so zanimivi zlasti prvi. Temperaturni indikatorji kažejo na povečanje temperature tako zraka kot vode, posledično na manjšanje ledenikov, zmanjševanje rečnega in jezerskega ledu na srednjih in visokih geografskih širinah, tanjšanje ledenih pokrovov na Arktiki, manjšanje območij večnega ledu in snega itn.

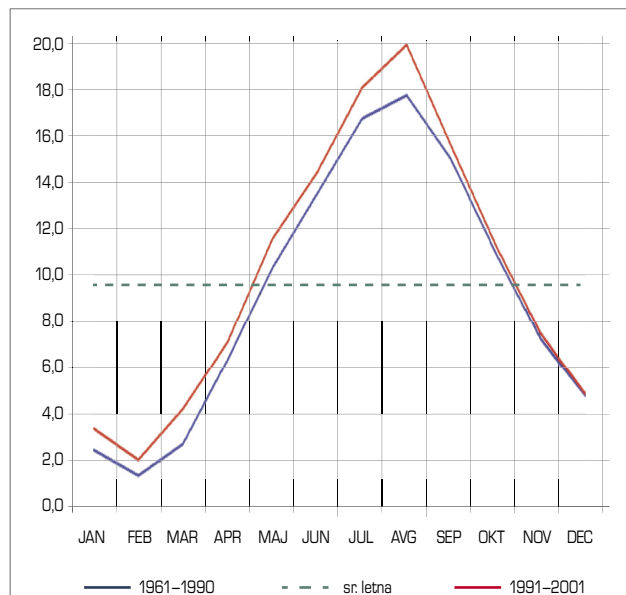
Spreminjanje vremena in podnebja se odraža tudi na jezerih, ki blažijo oz. gladijo vremenska nihanja. Na jezeru se odražajo glavne podnebne poteze (Frantar, 2002) in je zato primerno tudi za analizo o podnebni spremenljivosti v njegovi okolici. V članku sta zajeta dva temperaturna indikatorja: temperatura jezerske vode in pojav ledu. Za analizo trendov smo uporabili metode drsečih sredin, linearnega trenda in Pearsonovega koeficienta korelacije (Ferligoj, 1994).

* Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija RS za okolje, Vojkova 1 b, Ljubljana, Peter.Frantar@gov.si

Temperature

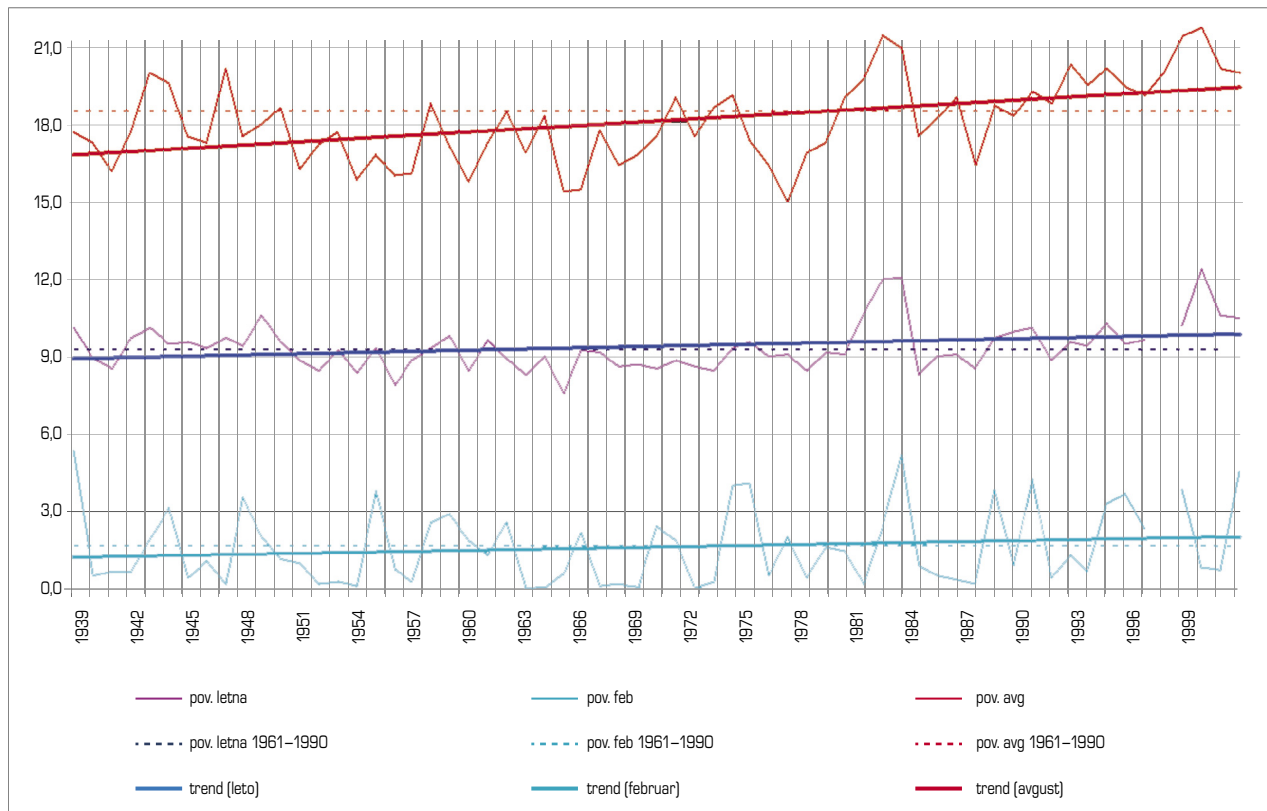
Spremljanje temperatur jezerske vode poteka v Bohinju od leta 1939. V članku smo uporabili podatkovni niz 1939–2001. Analizirali smo podatke o povprečnih mesečnih temperaturah vode po specifičnih obdobjih (1961–90 in 1991–2001) in podatke o povprečnih letnih, februar-skih in avgustovskih temperaturah vode za celoten niz podatkov. Referenčna dolgoletna povprečna temperatura jezera (1961–90) je 9,13 °C. Obdobje 1939–60 je bilo malce toplejše od referenčnega, 9,18 °C, kar še vedno lahko pripišemo naravnim podnebnim gibanjem. Zadnje »enajstletje« 1991–2001 pa ima povprečno leto temperaturo že skoraj 10 °C (9,99 °C). Že pogled na sliko 2 nam pokaže precejšnje povišanje temperature v zadnjem času.

Odziv temperature jezerske vode na radiacijo in temperature zraka je zakasnen. Povprečno najtoplejše in najhladnejše temperature zraka so približno en mesec po robni radiaciji sonca (solsticijih), voda pa odraža najtoplejše in najhladnejše temperature z dvomesečno zakasnitvijo (Lohmann, 2003). Najtoplejša je voda avgusta, najhladnejša pa februarja. Da to drži tudi za Bohinjsko jezero, potrjuje slika 1. Obdobje 1939–60 ni primerjano, ker je potek temperatur praktično enak referenčnemu obdobju. Primerjava povprečnih vrednosti teh dveh obdobj nam kaže, da je zadnje obdobje temperaturno preko celega leta toplejše kot referenčni niz WMO, kar že samo po sebi kaže na zviševanje temperatur; torej na segrevanje



Slika 1. Letni potek povprečnih mesečnih temperatur vode v Bohinjskem jezeru in primerjava med obdobji 1961–90 in 1991–2001. Črčkana črta prikazuje letno povprečje 1961–90.

Figure 1. A yearly timeline of the average monthly water temperatures at Lake Bohinj and a comparison of the periods 1961-90 and 1991-2001. The dotted line shows the average yearly temperature during the period 1961-90.



Slika 2. Časovni prikaz povprečnih (pov.) temperatur vode v celem letu, februarja in avgusta ter linearnega trenda (trend). Za primerjavo je prikazano tudi referenčno temperaturno povprečje med leti 1961–90.

Figure 2. A representation of the average (avg.) water temperatures in February and August with a linear trend line (trend). As a comparison, the figure also shows the average values for the reference period 1961-90.

v skladu z znanstvenimi dognanji zadnjih desetletij. Analiza temperaturne razlike med primerjanima obdobjema nam kaže večje povišanje povprečnih mesečnih temperatur vode med januarjem in septembrom (od 0,6 °C do 1,5 °C), medtem ko je oktobra, novembra in decembra razlika zelo majhna (od 0,1 °C do 0,3 °C). V letnem prerezu je največja otoplitev vode poleti, avgusta (+1,5 °C), najmanjša pa jeseni. Povprečna letna temperatura vode zadnjih enajstih let (1991–2001) je kar za +0,9 °C višja od dolgoletnega povprečja 1961–90. Vendar pa primerjava »preko leta« ne kaže trenda sprememb, saj je mogoče, da je povišanje temperature zgolj slučajno. Odgovor nam da pregled izbranih povprečnih temperatur po letih skozi celo obdobje meritev, kar prikazuje slika 2.

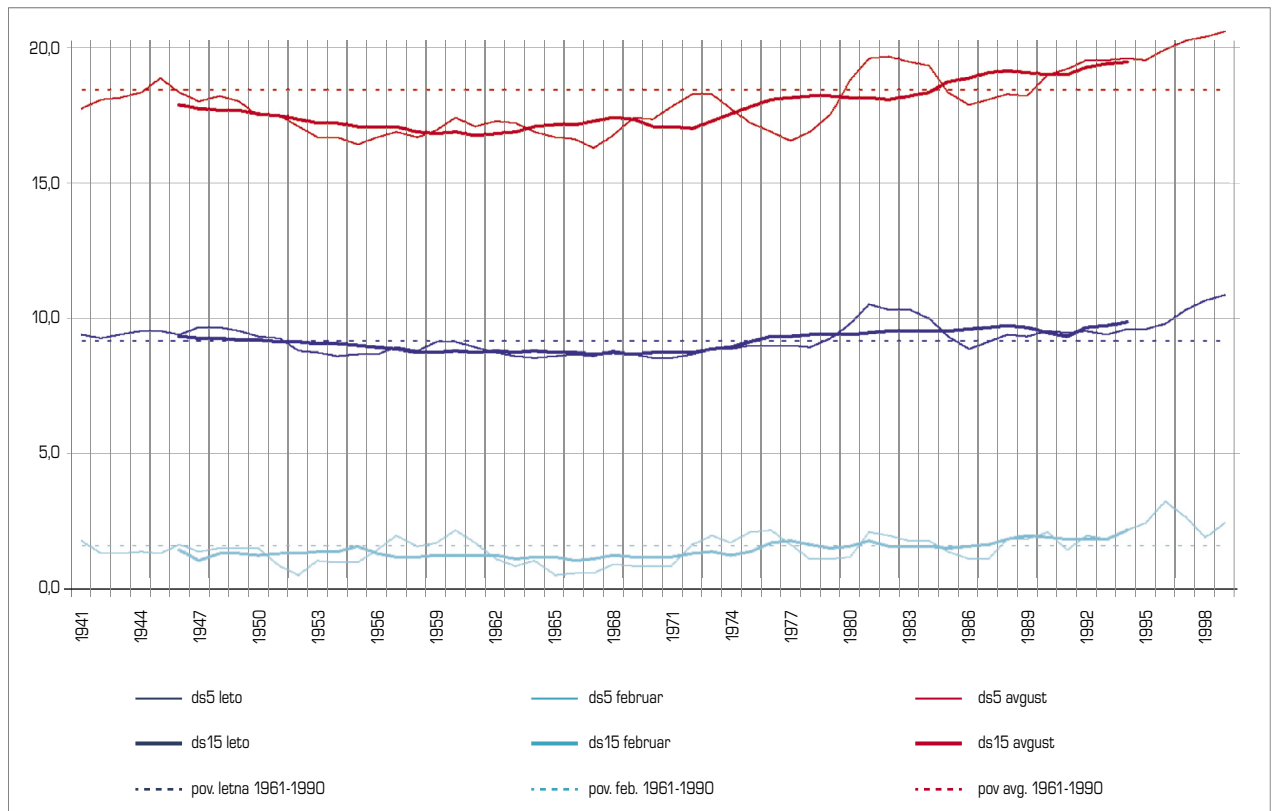
Časovna primerjava povprečnih temperatur vode februarja, avgusta ter celega leta od leta 1939 do 2001 kaže na trend naraščanja (linearne trendne črte). Korelacija med izbranimi temperaturami in časom je zelo različna, Pearsonov koeficient korelacije pa kaže na povsod naraščajočo korelacijo, ki je pri februarskih temperaturah sicer dokaj nizka (0,152 pri 76-odstotni zanesljivosti), pri letnih temperaturah je korelacija 0,284 pri 97,5-odstotni zanesljivosti, najvišja pa je pri avgustovskih temperaturah 0,486 kjer je tveganje manjše od 0,5 %. Pearsonov koeficient korelacije posredno kaže na največje naraščanje najtoplejših temperatur vode (avgust) in na nizko naraščanje srednjih februarskih temperatur. Ugotovimo lahko, da podatkovni niz letnih in

avgustovskih temperatur izraža značilen linearen naraščajoč trend.

Temperaturni podatki se skladajo z znanstvenimi dognanji o povečanju ogrevanja v zadnjih 20 letih, saj večji nagib navideznega trenda po letu 1980 opazimo že iz same osnovne linije podatkov zlasti pri povprečnih avgustovskih in letnih temperaturah. Večjega odklona povprečnih temperatur od linearne trenda ni, izjema so le obdobje v začetku 80. let ter zadnja tri obravnavana leta, ko so temperature 1 °C do 2 °C nad trendom (slika 2).

Med metode določanja trenda štejemo tudi drseče sredine (Ferligoj, 1994; Blejec, 1976). Izračunali smo 5- in 15-letne drseče sredine. Gibanje linij kaže na padajoč trend (nižanje povprečnih temperatur vode) od leta 1941 do 1960. Po letu 1960 pa linije vseh drsečih sredin začno naraščati. Ugotovimo lahko, da je bil trend temperature jezerske vode do leta 1960 celo rahlo padajoč in potem do leta 1970 praktično konstanten oz. le v zelo rahlem naraščanju. Naraščanje se poveča zlasti po letu 1970, po letu 1975 pa sta letni drseči sredini nad dolgoletno povprečno letno temperaturo 9,1 °C (slika 3), zlasti vse 5-letne drseče sredine pa kažejo v zadnjem obdobju izrazitejši porast.

Iz obeh grafov lahko sklenemo, da se tudi v Bohinjskem jezeru temperature zvišujejo, zlasti po letu 1980. Analiza temperatur jezerske vode se sklada z izsledki strokovnih



Slika 3. 5-letne (ds5) in 15-letne (ds15) drseče sredine letnih, februarskih in avgustovskih povprečij ter povprečje izbranih temperatur v obdobju 1961–90

Figure 3. 5- (ds5) and 15- (ds15) year averages for average February and August temperatures and selected data averages for the period 1961–90.

raziskav o podnebnih spremembah – ogrevanje – ki se odraža tudi na Bohinjskem jezeru.

Pojav ledu

Drugi zajeti temperaturni indikator podnebne spremenljivosti je pojav ledu, natančneje, manjšanje (časovno in količinsko) pojava ledu. Da je led (širše) res pokazatelj podnebnih sprememb, nas opozarjajo različni strokovni sestavki, med drugim tudi o manjšanju Triglavskega ledenika in ostalih ledenikov po Evropi in svetu (Gabrovec, 1998; Nadbath, 1999; Lohmann, 2003; itd.); ti prispevki kažejo na podnebne spremembe prek zmanjševanja »količine ledu«. Količina ledu na jezeru je v tesni povezavi s trajanjem pojava ledu, zato je trajanje pojava ledu na Bohinjskem jezeru poleg temperatur posreden pokazatelj podnebnih sprememb.

Višino gladine Bohinjskega jezera spremljamo na Agenciji RS za okolje že od leta 1919, monitoring pa je zajemal tudi pojav ledu. Metodologija monitoringa loči dva tipa pojava:

Zima	Dni	Zima	Dni	Zima	Dni
1918/19	10	1946/47	87	1974/75	0
1919/20	43	1947/48	21	1975/76	59
1920/21	68	1948/49	46	1976/77	34
1921/22	66	1949/50	48	1977/78	62
1922/23	60	1950/51	48	1978/79	61
1923/24	103	1951/52	67	1979/80	54
1924/25	31	1952/53	70	1980/81	99
1925/26	49	1953/54	73	1981/82	102
1926/27	62	1954/55	23	1982/83	41
1927/28	85	1955/56	58	1983/84	72
1928/29	NP	1956/57	55	1984/85	83
1929/30	24	1957/58	23	1985/86	58
1930/31	43	1958/59	13	1986/87	0
1931/32	93	1959/60	14	1987/88	0
1932/33	37	1960/61	30	1988/89	58
1933/34	94	1961/62	11	1989/90	0
1934/35	60	1962/63	95	1990/91	64
1935/36	0	1963/64	83	1991/92	38
1936/37	47	1964/65	71	1992/93	46
1937/38	81	1965/66	27	1993/94	6
1938/39	16	1966/67	63	1994/95	20
1939/40	86	1967/68	72	1995/96	35
1940/41	85	1968/69	90	1996/97	0
1941/42	85	1969/70	58	1997/98	0
1942/43	47	1970/71	0	1998/99	48
1943/44	17	1971/72	70	1999/00	80
1944/45	81	1972/73	66	2000/01	3
1945/46	50	1973/74			

Preglednica 1. Število dni s pojavom ledu na Bohinjskem jezeru

Table 1. The number of days (dni) with ice on Lake Bohinj each winter (zima)

led ob bregu jezera in led po vsem jezeru. Uporabljeni so bili podatki o pojavu ledu po letnem času – zimi. Izjema je zima 1918/19, kjer je zajet samo konec zime; leta 1929 pa opazovanj ni bilo, zato ni podatkov za zimo 1928/29. Kljub vsemu lahko z veliko gotovostjo trdimo, da podatek leta 1919 velja za vso zimo 1918/19, saj je med vsemi 82 opazovanimi leti led nastopil v decembru samo trikrat (leta 1933, 1980 in 1981). Podatke smo pridobili tako, da smo v vsaki zimi sešteli število dni s »kakršnimkoli« pojavom ledu – obe obliki pojava in dobili smo preglednico od zime 1918/19 do 1998/99. Za zadnji dve predstavljeni zimi smo podatke dobili iz publikacij o kakovosti jezer (Remec-Rekar, 2002 in 2003). Po opisu je bilo v zimi 1999/2000 jezero zamrznjeno »od začetka januarja do sredine marca« (vzeli smo obdobje 5/1 do 20/3), v zimi 2000/01 pa nikoli ni v celoti zamrznilo, za zajem tega vpliva pa smo se v tej zimi odločili privzeti (glede na temperaturne podatke) 3 dni ledu.

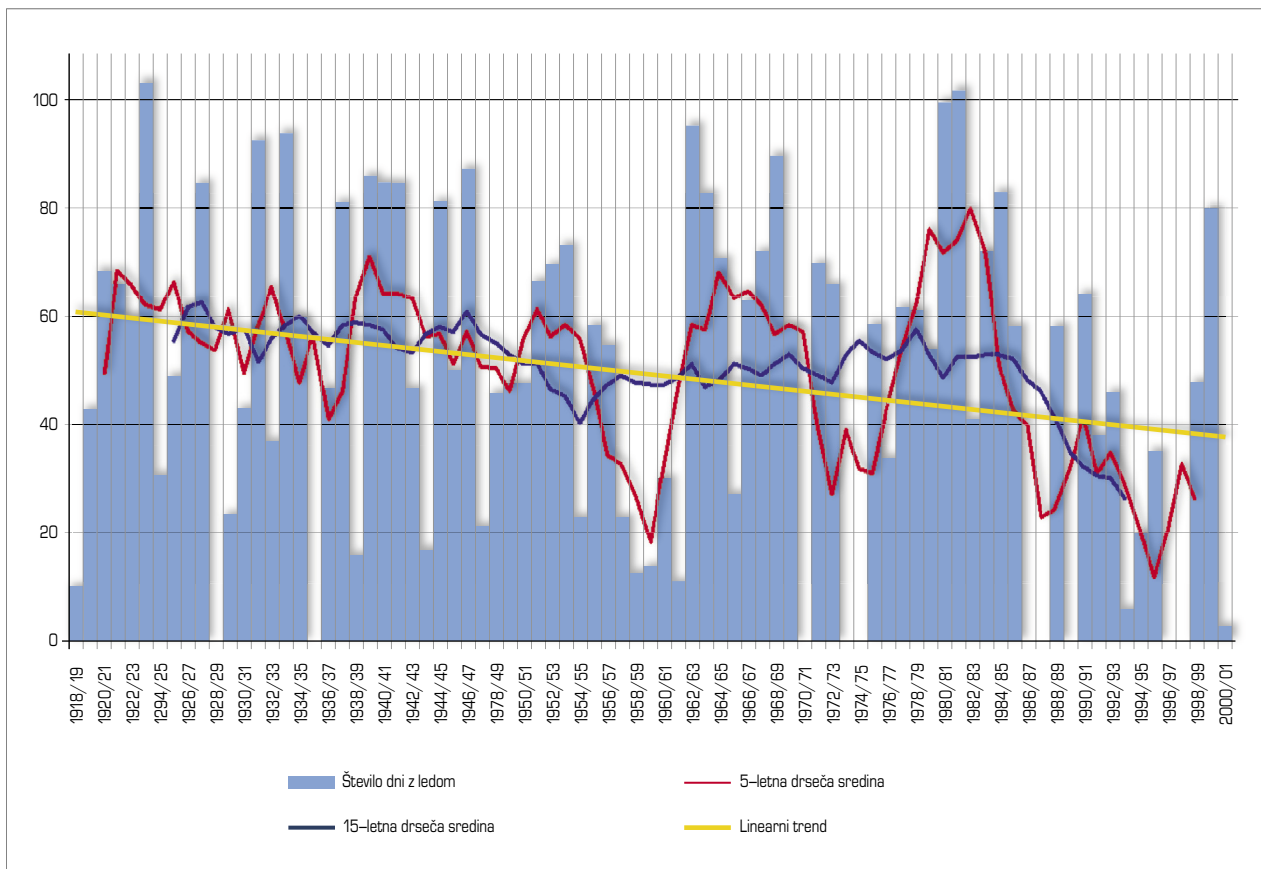
V 82 analiziranih zimah je bilo skupaj 4028 dni s pojavom ledu na jezeru. Če za zimo štejemo četrtno leta, 91 dni, skupaj v 82 letih nanese 7462 zimskih dni, kar pomeni, da je bil v tem obdobju povprečno več kot pol zime na jezeru led. Povprečno je bilo na jezeru med leti 1919 in 2001 na leto 49,1 dni. Spremenljivost podatkov je zelo velika, saj je standardni odklon kar 30 dni, porazdelitev pa je asimetrična v levo, kar pomeni, da so v celotnem opazovanem nizu »hude« zime redkejšje kot »milde«. Glede na celotno opazovano obdobje bi lahko ob predpostavki o podnebni »nespremenljivosti« trdili, da je samo 11 % možnosti, da se led pozmi sploh ne bo pojavil na jezeru, vendar se je treba zavedati podnebne spremenljivosti in trendov, na katere nas vedno bolj opozarjajo. Že pogled na preglednico 1 pove, da je v zadnjih letih veliko zim brez pojava ledu na jezeru (ničle). Slika 4 pa kaže, da se je število let brez ledu po letu 1970 začelo povečevati, zlasti

Povprečje 1919–2001	49,1
Standardni odklon	30,0
Koeficient asimetrije	-0,171
Maksimum	103
Skupaj dni z ledom	4028
Preglednica 2. Glavni statistični kazalci in vrednosti o pojavu ledu	
Table 2. The main statistical indexes and values on the occurrence of ice	

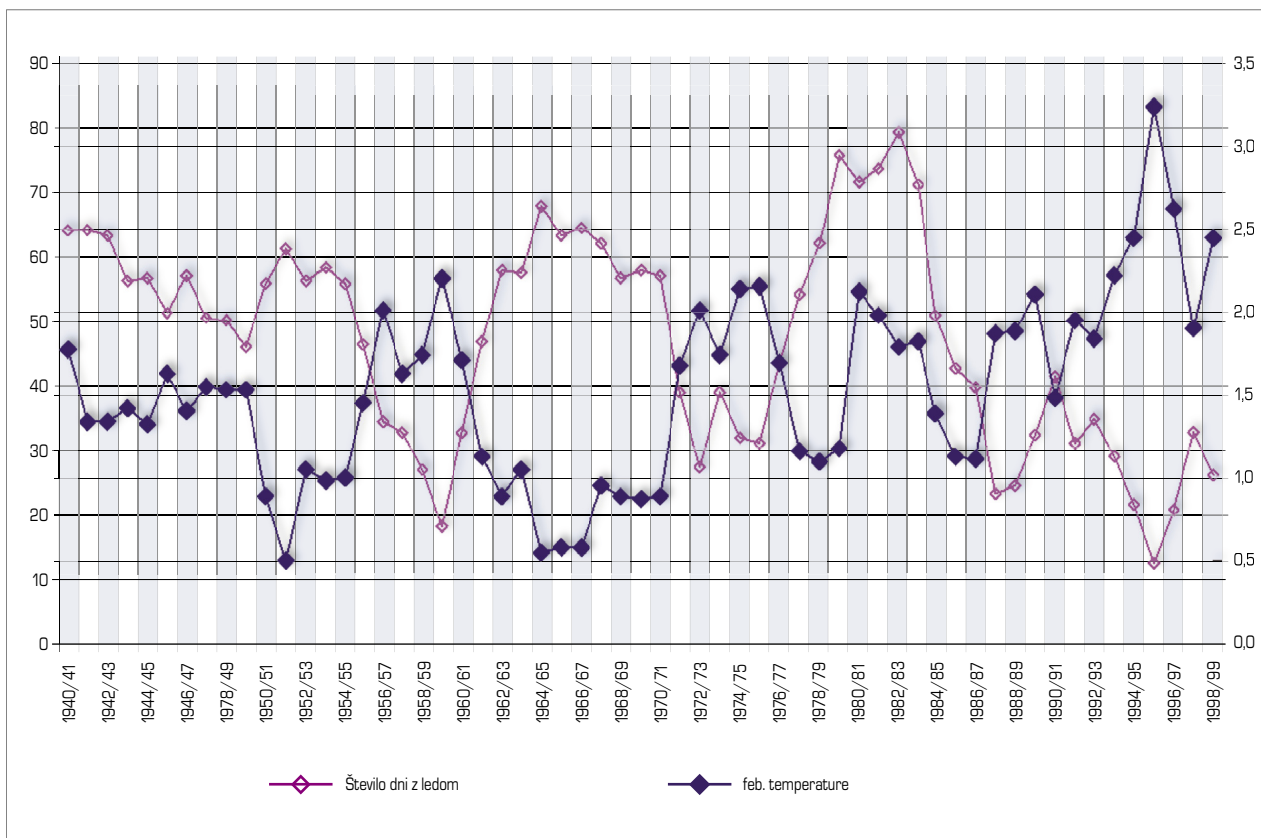
Obdobje	Dni
1918/19–1929/30	54,6
1931–1960	52,3
1961–1990	50,6
1971–2000	41,9
1991–2001	30,9

Preglednica 3. Povprečni čas ledu v izbranih obdobjih v dneh

Table 3. The average number of days (dni) with ice on the lake during selected periods (obdobje)



Slika 4. Število dni z ledom pozimi, linearni trend letnih podatkov, ter 5- in 15-letna drseča sredina
 Figure 4. The number of days with ice during the winter; the linear trend line and 5- and 15-year averages



Slika 5. Primerjava 5-letnih drsečih sredin števila dni z ledom na zimo in povprečnih februarjskih temperatur
 Figure 5. A comparison of 5-year averages of the number of days with ice and average February water temperatures.



Slika 6. Zaledenelo Bohinjsko jezero 1. februarja leta 2000 (foto: Arhiv ARSO).

Figure 6. Frozen lake Bohinj on 1 February 2000 (photo: ARSO archives)

po letu 1980. V vseh 82 analiziranih zimah je bilo 9 zim brez ledu, od tega po letu 1970 kar 8 od 9, po letu 1980 pa kar 5 od 9 zim brez ledu.

Linearni trend kaže na upadanje števila dni z ledom na Bohinjskem jezeru, kar je v skladu z znanstvenimi spoznanji o podnebnih spremembah (višanje temperature, ogrevanje) in prvem delom članka o temperaturah. Pearsonov koeficient korelacije med številom dni s pojavom ledu in časovno vrsto je negativen in dokaj nizek $= -0,225$ s statistično značilnostjo 0,042.

Glede na predstavljeno linearno upadanje lahko pričakujemo, da bo čez 150 let pojav ledu le še izreden pojav. Trend drsečih sredin pa izdaja, da skladno z globalnimi in regionalnimi podnebnimi raziskavami, trend »upadanja« pojava ledu narašča zlasti v zadnjih dvajsetih letih (glej preglednico 3 in sliko 4).

Primerjava povprečnih vrednosti števila dni z ledom po tridesetletnih obdobjih, referenčnih po standardih Svetovne meteorološke organizacije, med obdobji 1931–60 in 1961–90 ne kaže bistvenih sprememb. Upad pojava ledu je minimalen, 2 dni manj, kar bi lahko pripisali naravni spremenljivosti podnebja. Tudi obdobje 1919–30 nima večjega odstopanja. Izbrano primerjalno tridesetletno obdobje 1971–2000 pa že kaže precej večje odstopanje od prejšnjih dveh obdobji. Leta brez ledu na koncu 20.

stoletja so prispevala k bistveno nižji povprečni vrednosti. Razlika je skoraj 10 dni, kar gre na račun devetdesetih let. Da je to res, kaže tudi zadnje zajeto »enajstletje«, ko je ledu v povprečju na zimo še 10 dni manj.

Na trend otoplitve podnebja in s tem manjšanje pojava ledu kažejo tudi značilne trendne linije. 5-letna drseča sredina kaže še precejšnje fluktuacije oz. valovanje. Med leti 1921 in 1955 je nihanje manjše. Vrednosti 5-letnih drsečih sredin so med 40 in 70 dnevi ledu na jezeru v letu. Nihanje je dokaj enakomerno s štirimi valovi, zadnji val pa se po letu 1955 močno spusti in od takrat do »danes« je nihanje močnejše. Variacija vrednosti 5-letnih drsečih sredin se poveča na razpon 15–75. 15-letna drseča sredina je že zelo zgleden derivat podatkov. Še vedno nam kaže glavna nihanja, v glavnem pa se tu dobro vidi padajoči trend, ki ga potrjuje že sam linearni trend v istem grafu. Kaže pa še na veliko zmanjšanje pojava ledu po letu 1985, kar potrjuje tudi 5-letna drseča sredina.

Sklepne misli

Primerjava 5-letnih drsečih sredin povprečne februarske temperature in števila dni z ledom je pokazala, da obstaja soodvisnost obeh parametrov. Slika 5 kaže logično zvezo, da višja februarska temperatura pomeni manj ledu. Pearsonov koeficient korelacije osnovnih podatkov –

srednjih februarских temperatur in števila dni s pojavom ledu – je $-0,754$ pri tveganju 0,5 % in kaže na dokaj visoko negativno zvezo med zajetima spremenljivkama.

Bohinjsko jezero in njegove značilnosti skozi obravnavano obdobje prek temperaturnih indikatorjev podnebnih sprememb jasno potrjujejo skladnost z znanstvenimi spoznanjih o podnebni spremenljivosti. Daljše in blažje cikle »naravnih« podnebnih segrevanj in ohlajanj vidimo iz analiz podatkov (drsečih sredin) pred letom 1980, potem pa analiza obeh indikatorjev, temperature jezerske vode in pojava ledu, pokaže na dejstvo, da se je v zadnjih dvajsetih letih Bohinjsko jezero znatno ogrelo, trend ogrevanja pa je večji po letu 1980. Glede na sedanje trende ogrevanja jezerske vode in s tem posledično pojavljanja ledu na jezeru ob enakem trendu lahko pričakujemo vedno manj možnosti za »drsanje« na Bohinjskem jezeru. Nadaljne bi bilo treba analizirati še podatke meteoroloških postaj v Bohinju in okolici ter jih primerjati s podatki drugih hidroloških postaj.

Viri in literatura

1. Baza hidroloških podatkov, SSOHP, 2003. Agencija RS za okolje. Ljubljana.
2. Blejec, M., 1976. Statistične metode za ekonomiste. Ljubljana, Ekonomska fakulteta, Univerza v Ljubljani, 868 str., 732–776.
3. Danielson, S., 2002. Everest Melting? High Signs of Climate Change. National geographic, 2002 – 6. Povzeto po: http://news.nationalgeographic.com/news/2002/06/0605_020604_everestclimate.html [21.2.2003]
4. Ferligoj, A., 1994. Osnove statistike na prosojnicah. Ljubljana, samozaložba.
5. Firbas, P., 2001. Vsa slovenska jezera: leksikon slovenskih stoječih voda. Ljubljana, Državna založba Slovenije, 370 str.
6. Frantar, P., 2002. Velika jezera. Geografski obzornik, ZGDS, Letnik 49, št. 4., str. 15–22.
7. Gabrovec, M., 1998. Triglavski ledenik med letoma 1986 in 1998. Geografski zbornik, Založba ZRC, letnik 37, str. 89–110.
8. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A., 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, Cambridge University Press. Povzeto po: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/ [21.2.2003]
9. Lohmann, U., 2003. PHYC/OCEA 2800.03 Climate Change. Medmrežje: <http://www.msccs.dal.ca/~lohmann/clch/course.html> [20.2.2003]
10. Remec Rekar, Š., 2002. Monitoring kakovosti jezer v letu 2000. Ljubljana, Agencija RS za okolje.
11. Remec Rekar, Š., 2003. Poročilo o kakovosti jezer v letu 2001. Ljubljana, Agencija RS za okolje.
12. Nadbath, M., 1999. Triglavski ledenik in spremembe podnebja. Ujma, Uprava RS za zaščito in reševanje, Letnik 13, str. 24–29.
13. Trivedi, B. P., 2002. Antarctica Gives Mixed Signals on Warming. National geographic, 2002 – 1. Povzeto po: http://news.nationalgeographic.com/news/2002/01/0125_020125_antarcticaclimate.html [21.2.2003]