

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**TOPLOTNE OBREMENITVE SAVE DOLVODNO OD
NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO PO ZGRADITVI
HIDROELEKTRARNE BREŽICE**

DIPLOMSKO DELO

Nuša ROŽMAN

Mentor: prof. dr. Branko Kontić

Nova Gorica, april 2009

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Branku Kontiću za korektno usmerjanje skozi celoten projekt izdelave diplomske naloge, za strokovno delo ter napotke in literaturo.

Hvala sodelavkama iz Univerze v Novi gorici prof. dr. Polonci Trebše in mag. Malgorzati Pietcha za pomoč pri delu v laboratoriju. Zahvala gre tudi sodelavcem na Kemijskem inštitutu prof. dr. Milenku Rošu, Matjažu Omerzelu in asist. prof. dr. Andreji Drolc za pomoč pri seznanjanju z laboratorijskimi metodami dela.

Hvala zaposlenim v Nuklearni elektrarni Krško, še posebej Alešu Volčanšku, Boštjanu Gregoriču in Borutu Fajtu za hitro posredovanje informacij in podatkov, za prijaznost in sodelovanje. Bili ste mi v veliko pomoč.

Posebna zahvala gre moji družini in prijateljem za neomajno podporo in potrpežljivost tekom študija ter optimistično vzpodbudo pri nastajanju diplomske naloge.

Hvala mami in očetu, ker sta odlično opravila svojo vlogo starševstva in mi s tem omogočila, da sem do sedaj uresničila vse svoje sanje.

POVZETEK

Gradnja hidroelektrarne Brežice bo povzročila nastanek akumulacijskega jezera v spodnjem delu reke Save. V nalogi sem obravnavala pričakovane skupne temperaturne/toplotne spremembe v Savi zaradi upočasnjene toka in povečane površine gladine, ki bosta posledica omenjenega jezera ter toplotnega obremenjevanja, ki ga povzroča Nuklearna elektrarna Krško (NEK). Delo sem opravila v dveh stopnjah: v prvi sem z analizami biokemijske potrebe po kisiku (BPK) ugotavljala razlike v porabi raztopljenega kisika pri temperaturah 20, 25 in 30 °C, v drugi pa sem te rezultate uporabila pri napovedovanju koncentracij raztopljenega kisika v Savi s pomočjo matematičnega modela, ki temelji na Streeter-Phelpsovi enačbi. Dodatno sem analizirala delovanje hladilnih celic Nuklearne elektrarne Krško z vidika znižanja neto proizvedene električne energije, ker se je del porabi za pogon hladilnih celic, kadar se preprečuje previsoko segrevanje Save zaradi odvajanja hladilnih vod NEK. Na osnovi rezultatov analiz BPK, izvedenih v pozno poletnih in zgodnje jesenskih mesecih pri nizkih pretokih in visokih temperaturah Save, ter modeliranja, lahko zaključimo, da zaradi spremembe rečnega režima reke, ki bo posledica gradnje HE Brežice, ne bo prihajalo do prekomernega znižanja koncentracije raztopljenega kisika. Obratovanje NE Krško bi bilo lahko ob novonastalih pogojih racionalnejše (optimalnejše), če bi se spremenili obratovalni pogoji iz vodnogospodarskega dovoljenja za 1 °C, in sicer tako, da bi bila $\Delta T = 4$ °C in $T_{\max} = 29$ °C, namesto sedanjih $\Delta T = 3$ °C in $T_{\max} = 28$ °C.^o

KLJUČNE BESEDE: biokemijska potreba po kisiku, profil raztopljenega kisika, toplotna obremenitev, NE Krško, HE Brežice, reka Sava

ABSTRACT

The construction of the Hydro power plant Brežice will cause a formation of a river accumulation lake in the lower part of the river Sava. This thesis concentrates on common temperature/thermal changes on the river Sava induced by the natural heating of the watercourse due to the slower flow and enlarged surface as well as the thermal strain induced by the Nuclear power plant Krško (NPPK). The research has been performed in two phases: in the first phase I have determined the differences in consumption of dissolved oxygen at 20, 25 and 30 °C using the biochemical oxygen demand (BOD) analysis, in the second phase I have used the results of the first phase to forecast the concentration of dissolved oxygen in the river Sava with the help of a mathematical model, which is based on the Streeter-Phelps equation. Additionally I have analysed the functioning of NPPK's cooling cells from the lowering of net produced electrical energy point of view, due to the fact that a part of electrical energy is used up for powering the cooling cells when the overheating of the river Sava as a consequence of withholding NPPK's cooling waters is being prevented. Based on the results from the BOD analysis, performed in the late summer and early autumn months at low water flow and high water temperatures of the river Sava, as well as the modelling, we can conclude, that the changes to the river regime due to the construction of the Hydro power plant Brežice will not lead to the excessive drop of the dissolved oxygen concentration. The operation of NPPK under new conditions could be rationalized (optimized) with the modification of operational conditions from the water management permit for 1 °C in the way of $\Delta T = 4$ °C and $T_{\max} = 29$ °C instead of the present $\Delta T = 3$ °C and $T_{\max} = 28$ °C.

KEY WORDS: biochemical oxygen demand, dissolved oxygen profile, thermal strain, Nuclear power plant Krško (NPPK), Hydro power plant Brežice, river Sava

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|----|
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 Problem | 1 |
| 1.2 Cilji diplomskega dela | 1 |
| 2 TEORETIČNE OSNOVE | 2 |
| 2.1 Toplotni vplivi na reke | 2 |
| 2.1.1 SPLOŠNO | 2 |
| 2.1.2 SPREMEMBE NEKATERIH PROCESOV V VODI ZARADI NASTANKA AKUMULACIJSKEGA JEZERA | 2 |
| 2.1.1.1 Samočistilna sposobnost rek in ocenjevanje kakovosti | 4 |
| 2.1.1.2 Nitrifikacija | 6 |
| 2.1.1.3 Dno in sedimentacija | 6 |
| 2.1.1.4 Fotosinteza | 7 |
| 2.1.1.5 Navzemanje in poraba kisika | 8 |
| 2.1.3 VPLIV TEMPERATURE NA POSAMEZNE ZDRUŽBE | 13 |
| 2.1.2.1 Toplotni vpliv na razkrojevalce | 15 |
| 2.1.2.2 Toplotni vpliv na producente | 15 |
| 2.1.2.3 Toplotni vpliv na potrošnike | 16 |
| 2.2 Hidroelektrarna Brežice | 19 |
| 2.2.1 SPREMEMBA TOPLOTNIH OBREMENITEV REKE SAVE | 19 |
| 2.2.2 VPLIV HE BREŽICE NA GLAVNI HLADILNI SISTEM NE KRŠKO | 19 |
| 2.3 Nuklearna elektrarna Krško | 20 |
| 2.3.1 HLADILNI SISTEM NEK | 20 |
| 2.3.2 HIDROLOŠKI PODATKI | 23 |
| 2.3.3 ODVISNOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE OD OKOLJSKIH OMEJITEV | 25 |
| 2.3.4 ZAKONODAJA | 26 |
| 2.3.4.1 Slovenija | 26 |
| 2.3.4.2 Svet | 27 |
| 3 PRAKTIČNI DEL | 28 |
| 3.1 Laboratorijsko delo | 30 |
| 3.1.1 VZORČENJE IN SHRANJEVANJE VZORCEV | 30 |
| 3.1.2 ANALIZNE METODE | 31 |
| 3.1.3 APARATURA | 31 |
| 3.1.4 IZVEDBA DOLOČITVE BPK | 32 |
| 3.1.4.1 Reagenti | 32 |
| 3.1.4.2 Izvedba | 33 |
| 3.2 Model raztopljenega kisika v reki | 34 |
| 3.3 Izračun znižanja učinkovitosti NEK zaradi delovanja hladilnih celic | 34 |
| 4 REZULTATI IN RAZPRAVA | 37 |
| 4.1 Določanje biokemijske potrebe po kisiku pri temperaturah 20 °C, 25 °C in 30 °C | 37 |
| 4.2 Določanje profila raztopljenega kisika pod NE Krško pri temperaturah 20 °C, 25 °C in 30 °C | 38 |
| 4.3 Prikaz delovanja hladilnih celic pri spremenjenih določilih vodnogospodarkega dovoljenja | 41 |
| 5 ZAKLJUČKI | 43 |
| 6 VIRI | 44 |
| PRILOGE | |

PRILOGE

PRILOGA A: Prikaz akumulacijskega bazena HE Brežice

PRILOGA B: Ugotovitve študij v obdobju 2002 - 2007

PRILOGA C: Grafični prikaz delovanja črpalk v odvisnosti od delta T in pretoka za leto 2006, 2007 in 2008

PRILOGA D: Tabele izračunov profila raztopljenega kisika pri različnih temperaturah in z različnimi prezračevalnimi konstantami

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Koncentracija kisika v vodi v odvisnosti od temperature ter pogoji za salmonidne in ciprinidne ribe..... | 3 |
| Slika 2: Poenostavljen prikaz vira in porabe raztopljenega kisika | 4 |
| Slika 3: Streeter – Phelpsova »sag – krivulja«..... | 13 |
| Slika 4: Prikaz prehranjevalne verige v vodi | 14 |
| Slika 5: Temperaturni vplivi na spremembe populacij alg | 15 |
| Slika 6: Vpliv temperature na hitrost rasti rib | 17 |
| Slika 8: Poenostavljen prikaz hladilnega sistema | 21 |
| Slika 9: Poenostavljen prikaz protitočnega sistema hladilnih celic..... | 22 |
| Slika 10: Pogled na hladilne celice s šestimi ventilatorji v NEK | 22 |
| Slika 11: Mesto vzorčenja pod starim savskim mostom v Brežicah | 30 |
| Slika 12: OxiTop® IS 12..... | 32 |
| Slika 13: Grafični prikaz delovanja črpalk hladilnih celic v letu 2003: a)odvisnost od ΔT , b) odvisnost od pretoka Save..... | 35 |
| Slika 14: Diagram proizvodnje za leto 2003..... | 36 |
| Slika 15: Grafični prikaz biokemijske potrebe po kisiku pod starim savskim mostom pri 20 °C, 25 °C in 30 °C. | 38 |
| Slika 16: Prikaz profila raztopljenega kisika pri izbrani in izračunani prezračevalni konstanti (K_2) v odvisnosti od temperature | 40 |
| Slika 17: Grafični prikaz delovanja črpalk hladilnih celic pri spremenjeni omejitvi iz vodnogospodarkega dovoljenja ($\Delta T = 4$ °C)..... | 41 |

KAZALO TABEL

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Uvrstitev Save v kakovostni razred od leta 1995 do leta 2005 | 6 |
| Tabela 2: Prezračevalne konstante, K_2 | 8 |
| Tabela 3: Enačbe za napoved reareacijske konstante K_2 | 9 |
| Tabela 4: Povprečni mesečni in najnižji mesečni pretoki v obdobju 2002 - 2008 | 23 |
| Tabela 5: Najvišje srednje dnevne temperature Save..... | 25 |
| Tabela 6: Obratovalni pogoji za nekatere ameriške in evropske države | 27 |
| Tabela 7: Uporabljene analizne metode za določitev vrednosti posameznih parametrov | 31 |
| Tabela 8: Izbira količine vzorca glede na pričakovano porabo kisika za razgradnjo.... | 34 |
| Tabela 9: Izmerjene vrednosti BPK_5 v mg/L v odvisnosti od temperature – sinteza vseh meritev. | 37 |
| Tabela 10: Izračun profila raztopljenega kisika pri 20 °C in izbranem K_2 | 39 |
| Tabela 11: Prikaz ocenjenega izpada prihodka v letu 2003 | 42 |

SEZNAM SIMBOLOV

| oznaka | merska enota | opis |
|----------------------------|--------------------------------------|---|
| BPK | mg L ⁻¹ | biokemijska potreba po kisiku |
| BPK ₅ | mg L ⁻¹ | biokemijska potreba po kisiku v 5-ih dneh |
| C | mg L ⁻¹ | dejanska koncentracija raztopljenega kisika v vodi pri določeni temperaturi |
| C _{O₂} | mg L ⁻¹ | koncentracija raztopljenega kisika v vodi |
| C _s | mg L ⁻¹ | nasičena koncentracija raztopljenega kisika v vodi |
| D | mg L ⁻¹ | deficit raztopljenega kisika v vodi |
| D _c | mg L ⁻¹ | kritični deficit raztopljenega kisika v vodi |
| h | m | srednja globina struge |
| H | g cm ⁻³ Pa ⁻¹ | Henryjeva konstanta |
| K ₁ | dan ⁻¹ | konstanta hitrosti deoksigenacije |
| K ₂ | dan ⁻¹ | konstanta hitrosti prezračevanja |
| L | mg L ⁻¹ | končna vrednost biokemijske potrebe po kisiku |
| L ₀ | mg L ⁻¹ | začetna vrednost biokemijske potrebe po kisiku |
| nT _{So} | °C | najvišja (povprečna dnevna) temperatura Save v obdobju |
| nQ _{vm} | m ³ s ⁻¹ | najnižji (srednji dnevni) pretok Save v obdobju |
| pnT _m | °C | povprečje najvišjih (srednjih dnevnih) temperatur v mesecu |
| pmQ | m ³ s ⁻¹ | povprečni mesečni pretok |
| P | Pa | parcialni tlak kisika v zraku |
| Q | m ³ s ⁻¹ | pretok |
| S | mm ⁻¹ | naklon struge |
| S _R | mg L ⁻¹ dan ⁻¹ | stopnja prezračevanja |
| T | °C | temperatura |
| ΔT | °C | temperaturna razlika hladilne vode in Save v točki mešanja |
| T _{max} | °C | maksimalna temperatura Save v točki mešanja |
| v | m s ⁻¹ | srednja hitrost toka |
| x | m | razdalja |
| x _c | m | kritična razdalja |
| θ | - | temperaturni koeficient |

SEZNAM KRATIC

CWS - Circulating Water System (sistem kroženja hladilne vode)

HE – hidroelektrarna

EL – elektrometrija

ISO - International Organization for Standardization – Organizacija za standardizacijo

MM - manometrija

NEK – Nuklearna elektrarna Krško

TET – Termoelektrarna Trbovlje

1 UVOD

1.1 Problem

V današnji dobi velike porabe električne energije se svet nagiba k čim večjem izkoriščanju obnovljivih virov. Eden glavnih so reke oziroma proizvodnja električne energije v hidroelektrarnah (HE). V energetske cilje, ki si jih je zadala Republika Slovenija za zmanjšanje toplogrednih plinov z uporabo naravnih virov, spada tudi izgradnja verige hidroelektrarn na spodnji Savi. HE Brežice je predzadnja elektrarna v tej verigi. Njen akumulacijski bazen bo umeščen med mestoma Krško in Brežice in bo s tem neposredno vplival na delovanje Nuklearne elektrarne Krško (NEK), ki leži 2,6 kilometra dolvodno od mesta Krško. NEK pri obratovanju izkorišča Savo kot ponor odvečne toplotne energije.

Izgradnja HE Brežice in z njo povezano akumulacijsko jezero bosta povzročila spremembe sedanjega rečenega režima, kar se bo odrazilo v spremenjeni hitrosti toka, možnih spremembah režima podtalnice v ožjem in širšem območju zaježitve, spremembi življenjskih pogojev za vodne organizme in posledično spremembi vodne biocenozе in obrežij. Spremenili se bodo torej pogoji, ki vplivajo na kakovost vode reke Save. V povezavi z NEK in vračanjem segrete savske vode iz hladilnega sistema v reko se spremembe vodotoka navezujejo predvsem na spremembo temperature vode in vsebnosti raztopljenega kisika v vodi na odseku NEK – HE Brežice. Temperatura vode in koncentracija raztopljenega kisika sta namreč ključna dejavnika, ki določata stanje vodnega ekosistema. Temperatura vode in koncentracija raztopljenega kisika sta dolvodno od NEK odvisna tudi od obratovanja NEK, obratovanje pa je odvisno od pretoka in temperature Save pred NEK. Da NEK ne bi prekomerno obremenjevala reke s toplotno energijo, mora upoštevati obratovalne omejitve vodnogospodarskega dovoljenja (MOP, 2002), ki določajo, koliko NEK lahko segreje Savo. Z zaježitvijo Save se pričakuje, da se bo temperatura vode dodatno povišala zaradi upočasnjenega toka in večje površine. Ob tem pa se postavlja vprašanje, koliko se bo spremenila vrednost raztopljenega kisika v vodi, ter ali bo skupen vpliv še sprejemljiv in skladen z omejitvami.

1.2 Cilji diplomskega dela

Da bi simulirali te pogoje, smo zasnovali raziskavo, na osnovi katere bi ocenili spremembe razmer v Savi po zgraditvi HE Brežice.

Cilj diplomske naloge je bil določiti spremembo dveh parametrov po izgradnji HE Brežice: biokemijske potrebe po kisiku pri treh različnih temperaturah in posledično koncentracije raztopljenega kisika. Oba parametra sta pomembna za razumevanje morebitnih sprememb stanja ekosistema v bodočem zaježitvenem bazenu.

V povezavi z dobljenimi rezultati analize biokemijske potrebe po kisiku in profila raztopljenega kisika je bil cilj naloge tudi podati podlage za morebitno spremembo omejitev vodnogospodarskega dovoljenja. Slednje bi NEK omogočalo racionalnejše obratovanje upoštevajoč analizo delovanja hladilnih celic NEK ob neugodnih hidroloških pogojih.

V kontekstu navedenega sem razvila hipotezo, da segrevanje Save po zgraditvi HE Brežice in zaradi obratovanja NEK v obsegu $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ in $T_{\text{max}} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ ne bo povzročilo padca raztopljenega kisika pod 6 mg L^{-1} .

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Toplotni vplivi na reke

2.1.1 SPLOŠNO

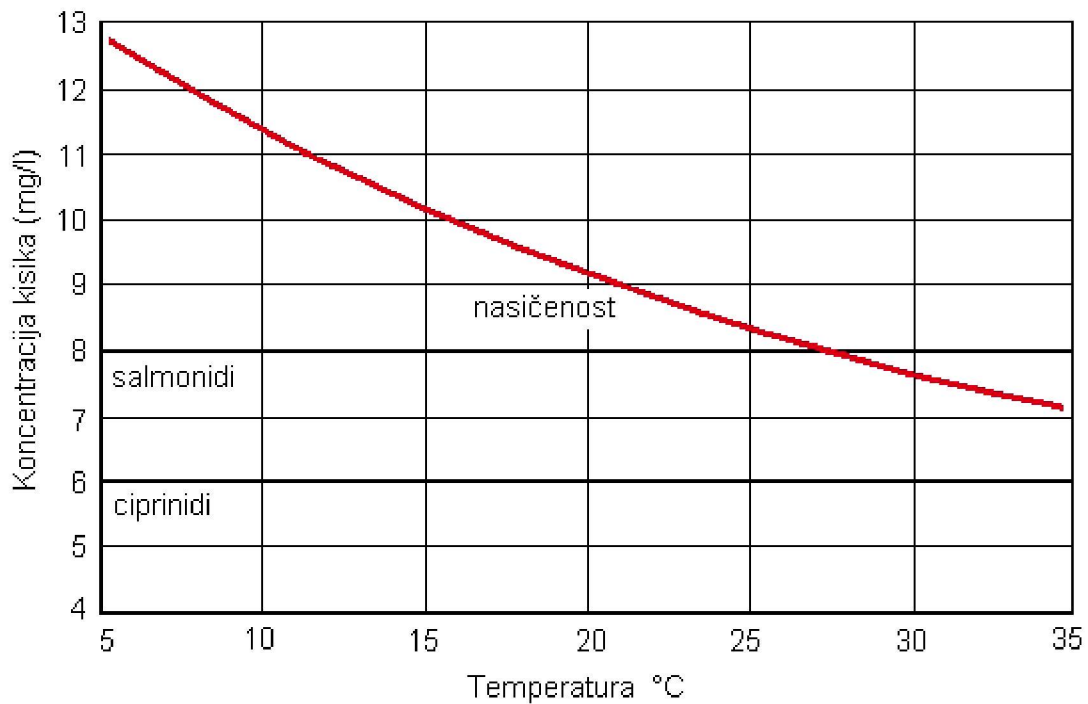
Ko govorimo o toplotnih vplivih povezanih z vodnimi telesi, imamo v mislih predvsem toplotno onesnaževanje rek s strani industrije, ki v reke odvajajo hladilne vode. Pri tem so najpomembnejše termoelektrarne.

Zaradi vedno večje porabe električne energije in zaradi vedno večjega poudarka na to, da je treba energijo pridobivati na najmanj škodljiv način, smo se začeli usmerjati k obnovljivim virom energije. Eden takih virov so reke, na katere postavljamo hidroelektrarne in s tem izkoriščamo tok vode za pogon turbin, ki proizvajajo električno energijo. Z akumulacijskim jezerom za zgradbo HE je možen reguliran pretok vode preko turbin, hkrati pa je vedno zagotovljena zadostna količina vode, ki je potrebna za obratovanje.

Izgradnja jezovne zgradbe povzroči različne spremembe vodnega režima reke in spremembe v prostoru ob reki. Posledice teh sprememb so lahko pozitivne in negativne. Med negativne spadajo predvsem povišana temperatura vode in posledično znižana koncentracija raztopljenega kisika ter zmanjšana sposobnost sprejemanja toplotnih obremenitev. Hkrati se poveča rast alg z vsemi posledicami - eutrofikacija (Sedej, 2006). Na drugi strani pa lahko zajezeitev pozitivno prispeva h kakovosti vode z zmanjšanjem množine suspendiranih snovi ter organske in biološke onesnaženosti (Cvitanič, 1999).

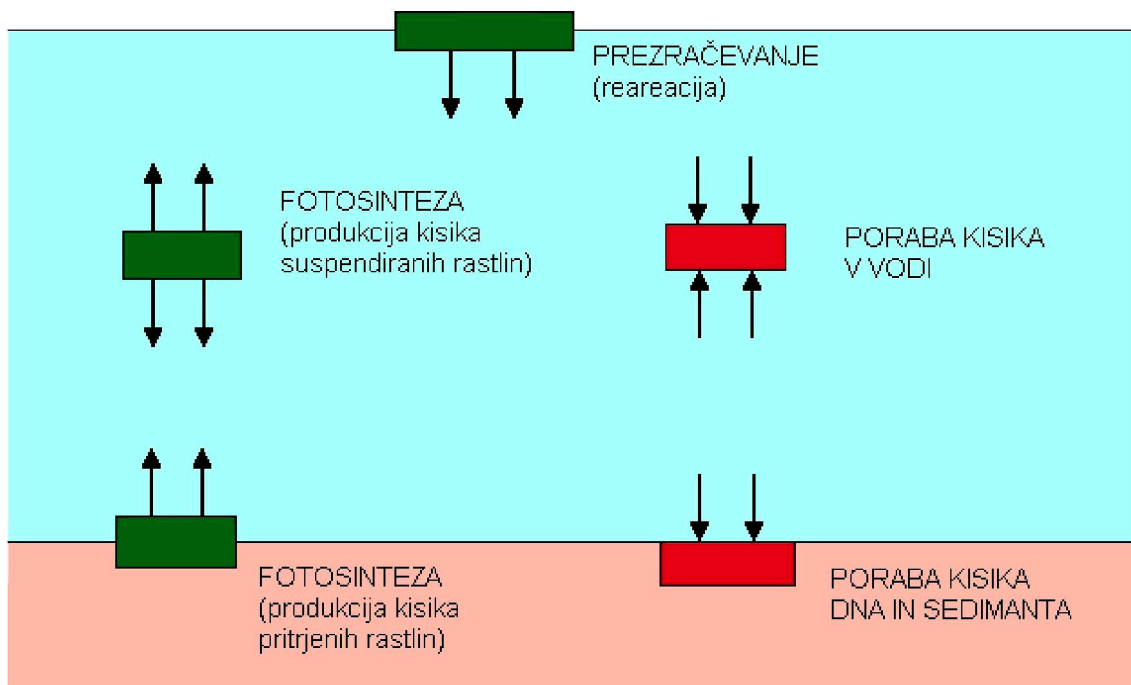
2.1.2 SPREMEMBE NEKATERIH PROCESOV V VODI ZARADI NASTANKA AKUMULACIJSKEGA JEZERA

Raztopljeni kisik ima ključno vlogo za življenje v vodi. Obstoj večine vodnih živali in rastlin je odvisen ravno od koncentracije in dostopnosti raztopljenega kisika v vodi. Znano je, da je topnost kisika z višanjem temperature manjša (slika 1), ravno tako pa je s povišanjem temperature povečana intenzivnost procesov, tudi tistih, pri katerih se raztopljeni kisik porablja (npr. hitrejša biološka razgradnja). Posledično je v vodnih telesih z višjo temperaturo koncentracija kisika manjša kot v tistih, v katerih je temperatura vode nižja.



Slika 1: Koncentracija kisika v vodi v odvisnosti od temperature ter pogoji za salmonidne in ciprinidne ribe (izrisano po podatkih iz Schnoor, 1996)

Koncentracija kisika se v vodnih telesih nenehno spreminja, saj je odvisna od številnih faktorjev. Poleg temperature vode so ključnega pomena še onesnaženost z organskimi in anorganskimi snovmi, sposobnost samočiščenja, vodni organizmi in fotosinteza. V tem poglavju so opisani nekateri procesi, od katerih je odvisna koncentracija kisika v vodi. Na sliki 2 so shematsko prikazani viri, ki prispevajo k bilanci kisika v vodi.



Slika 2: Poenostavljen prikaz vira in porabe raztopljenega kisika (prirejeno po Kontić, 1993)

2.1.1.1 Samočistilna sposobnost rek in ocenjevanje kakovosti

Pod pojmom samočistilna sposobnost vode razumemo sistem fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov, ki vodijo do razgradnje razgradljivih snovi v vodi in vračanje produktov razgradnje v kroženje elementov (Gaudy, 1975; Zagorc – Končan, 1991; Schnoor, 1996;). Posredno izraža količino organske mase, ki se s pomočjo mikroorganizmov v vodi razgrajujejo v anorgansko snov. Približno orientativno merilo za samočistilno sposobnost vodotoka je biokemijska potreba po kisiku (BPK).

Snovne spremembe, ki nastopajo v procesu samočiščenja delimo na biološke in nebiološke. V procesih nebiološkega oziroma abiotskega samočiščenja poteka odstranjevanje nerazgradljivih snovi. Sem spadajo usedanje, izkosmičenje, obarjanje, adsorpcija, absorpcija, izhlapevanje, hidroliza, fotoliza in kompleksacija. Zmanjšanje hitrosti vode vpliva na vse navedene procese in s tem na kakovost vode in vodni biološki sistem (Cvitanič, 1999).

Proces biološkega samočiščenja, ki je najpomembnejši nosilec kroženja snovi in energije v vodnem okolju, izvajajo mikroorganizmi, ki s svojim metabolizmom ob prisotnosti kisika presnavljajo organske snovi. Razgradnja organskih snovi je odvisna predvsem od stopnje in vrste onesnaženosti vodnega telesa. V onesnaženih vodah so ob povišanih temperaturah izrazitejši procesi samočiščenja in opazno je povečanje dejavnosti nosilcev teh procesov. Razgradnja v aerobnih pogojih pri temperaturi 20 °C

poteka 4- do 6-krat hitrejša kot pri 0 °C (IJS – SEPO, 1989). Posledica intenzivnejše razgradnje je večja poraba kisika in s tem zmanjšana vsebnost raztopljenega kisika. Za določanje kisikovih razmer je tako biokemijska potreba po kisiku (BPK) eden od ključnih parametrov, saj mikroorganizmi pri razgradnji porabljajo kisik. Hitrost razgradnje in pri tem porabe kisika je odvisna od več dejavnikov. Ti so:

- Bakterije

Bakterije so osnovni element pri razgradnji organskih snovi, saj ta brez njih ne more potekati. Združba bakterij se imenuje aktivna masa. Hitrost razgradnje je odvisna od rasti bakterij. Število bakterij je odvisno od količine razpoložljive hrane (onesnaženosti).

- Anorganska hraniva

Poleg magnezija, kalija, kalcija in železa sta najpomembnejša hraniva dušik in fosfor, saj sta osnovna elementa v vseh živih organizmih.

- Vrsta organskega onesnaženja

Hitrost razgradnje je odvisna od vrste organskega onesnaženja. Oksidacija lahko razgradljivih organskih snovi se začne takoj po izpustu v vodotok in poteka hitro, težko razgradljive pa potrebujejo več časa (tudi več mesecev).

- Turbulenca

Večja kot je stopnja turbulence, večji je kontakt med organskimi snovmi in mikroorganizmi, kar povečuje hitrost biokemijskih in kemijskih reakcij.

- Toksičnost

Vsebnost toksičnih snovi zmanjša hitrost samočiščenja v reki zaradi popolnega uničenja mikroorganizmov ali upočasnitve njihovega delovanja.

- Temperatura

Biološka aktivnost se poveča z naraščanjem temperature. Biokemijska potreba po kisiku v naravnem okolju je tako pri 20 °C približno dvakrat večja kot pri 10 °C. Zato so toplotni izpusti iz raznih predelovalnih industrij ali termoenergetskih obratov lahko problematični, če so količine izpustov prevelike ali če imajo previsoko temperaturo v primerjavi s temperaturo okolja.

Sprememba sedanjega režima reke v pretočno akumulacijsko jezero bo vplivala na vse navedene faktorje, razen na vrsto organskega onesnaženja ter toksičnosti, ki sta povezana predvsem z vrsto industrijskih in komunalnih odpadnih vod. Z vedno strožjimi predpisi, ki zahtevajo izgradnjo in uporabo čistilnih naprav za obe vrsti odpadnih vod, naj bi se tovrstno onesnaževanje rek v prihodnosti še zmanjšalo. Posledično naj bi se zmanjšala količina razgradljivih organskih snovi, hkrati pa bodo, kot je bilo že omenjeno, procesi biološke razgradnje zaradi višjih temperatur potekali hitreje. Zaježitev reke je lahko torej v tem primeru pozitivna.

Stopnja onesnaženosti vodotoka se ocenjuje s pomočjo fizikalnih, kemijskih in bioloških analiz na določenih merilnih mestih. Uporabljena je klasifikacija vodotokov po sistemu ocenjevanja kakovosti vodotokov (ARSO, 2006). Ta razlikuje štiri kakovostne razrede glede na osnovne fizikalno-kemijske analize, analize težkih kovin, organska onasnaževala, mikrobiološke in saprobiološke analize (saprobni indeks). Okvirna vodna direktiva določa poleg kemijskih tudi hidromorfološke in ekološke parametre. Kriteriji za določanje ekološkega stanja površinskih voda v Sloveniji še niso predpisani, saj še niso dokončno izdelane metode za ovrednotenje za vse biološke elemente kakovosti (fitoplankton, fitobentos, makrofiti, ribe in bentoški nevretenčarji) in za različne obremenitve (ARSO, 2006). V letu 2006 je bilo prvič izvedeno kvantitativno vzorčenje bentoških nevretenčarjev in fitobentosa.

V tabeli 1 je podana uvrstitev Save v Brežicah in v Jesenicah na Dolenjskem v kakovostne razrede od leta 1995 do leta 2005. V letu 2004 se je kakovost Save izboljšala. Razlog za to je zaustavitev obratovanja Tovarne celuloze in papirja Vipav Videm Krško, ki je vrsto let onesnaževala Savo.

V tem delu je Sava uvrščena v drugi kakovostni razred, kar pomeni, da spada med zmerno obremenjene vodotoke.

Tabela 1: Uvrstitev Save v kakovostni razred od leta 1995 do leta 2005 (ARSO,2006)

| lokacija/leto | Brežice | Jesenice na Dolenjskem | lokacija/leto | Brežice | Jesenice na Dolenjskem |
|---------------|---------|------------------------|---------------|---------|------------------------|
| 1995 | 3 | (2) -3 | 2001 | 3 | (2) -3 |
| 1996 | 3 - (4) | 3 | 2002 | 3 | 3 |
| 1997 | 3 - (4) | 3 | 2003 | 3 | 3 - (4) |
| 1998 | 3 | (2) -3 | 2004 | 2 | 2 |
| 1999 | 3 | 3 | 2005 | 2 | 2 |
| 2000 | 3 | (2) -3 | | | |

2.1.1.2 Nitrifikacija

Poleg razgradnje organskih snovi poteka v vodi pod vplivom mikroorganizmov tudi nitrifikacija. Nitrifikacija je oksidacijski proces, pri katerem v prvi stopnji nastane iz amonija nitrit ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$), v drugi stopnji pa iz nitrita nitrat ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$). Ta proces je pomemben za kvaliteto vodnih teles, saj predstavlja del biološkega mehanizma samočistilne sposobnosti reke. Hkrati pa je del poti pri kroženju dušika v naravi. Proces nitrifikacije je odvisen od fizikalno-kemijskih faktorjev kot sta temperatura in koncentracija kisika, in je proporcionalen koncentraciji substrata (NH_4^+) in biomase mikroorganizmov. S povišanjem temperature se poveča intenzivnost procesa nitrifikacije.

2.1.1.3 Dno in sedimentacija

Na določenih mestih v reki lahko dno prispeva več kot 50 % k celotni porabi kisika. Porabo kisika v sedimentu sestavljata dva ločena procesa: (1) dihanje živih organizmov, ki se nahajajo v sedimentu in (2) oksidacija reduciranih spojin v sedimentu, kot sta divalentno železo in sulfid (Bowman in Delfino, 1980).

Intenzivnost obeh procesov se bo zaradi spremembe struge in zajezitve spremenila.

2.1.1.4 Fotosinteza

Fotosinteza je proces, v katerem rastline, alge in nekatere bakterije s pomočjo svetlobne energije pretvarjajo anorganske spojine v organske. Značilno zanje je, da porabljajo ogljikov dioksid in vodo za sintezo sladkorjev, pri čemer se sprošča kisik. Gre za celo vrsto kompleksnih reakcij. Za poenostavljen prikaz je podana splošna kemijska enačba za sintezo glukoze:



Proces fotosinteze je odvisen od več dejavnikov, predvsem od temperature, pH, svetlobe, globine in količine CO_2 .

Zaradi potrebne svetlobe v procesu fotosinteze se ta odvija podnevi, ponoči pa se odvija proces dihanja, ki je obraten procesu fotosinteze. Če so pogoji za fotosintezo ugodni, se koncentracija raztopljenega kisika dvigne nad nasičeno vrednost. Proizvajanje kisika se ponoči preneha, poraba pa ostaja ista ali se še poveča. Zaradi tega se koncentracija raztopljenega kisika v vodi zmanjša. V primeru, da je vodotok onesnažen, se lahko zgodi, da je tudi podnevi poraba kisika večja kot proizvodnja.

Z zajezitvijo se bo sestava vodnih rastlin spremenila. Pričakuje se povečanje biomase plavajočih rastlin, spremembe v biodiverziteti pritrjenih alg in fitoplanktona (Stojič in Kališnik, 2006) ter makrofitov.

Zaradi zmanjšanja hitrosti toka in povišane temperature vode lahko pride do intenzivnih evtrofikacijskih procesov, ki vodijo do večje porabe raztopljenega kisika. Posledično se zmanjša samočistilna sposobnost reke, pogoji za življenje vodnih organizmov pa se poslabšajo. Z zagotavljanjem zadostnega pretoka vode v pretočni akumulaciji in zmanjšanjem dotoka hranilnih snovi (komunalne odpadne vode in spiranje hranil iz kmetijskih zemljišč), bodo pogoji za nastanek intenzivnih evtrofikacijskih procesov zmanjšani.

Evtrofikacija lahko pripelje do povečanja biomase plavajočih rastlin. Zaradi njihovega razraščanja na gladini vode prihaja do zatemnitve globljih predelov. Tako rastline, ki rastejo na dnu pod njimi, ne dobijo več zadostne količine svetlobe za opravljanje fotosinteze in začnejo odmirati. Odmrta masa se nato nalaga na dnu, kjer poteka razgrajevanje. Posledično se začne zmanjševanje koncentracije raztopljenega kisika v vodi, ki lahko privede do hipoksije ali celo do anaerobnih pogojev (Jobling, 1995). Prosto plavajoče rastline prispevajo k zmanjšanju koncentracije kisika tudi z omejevanjem naravnega prezračevanja vode (reareacijo), saj preprečujejo valovanje gladine, ki ga povzroča veter. Poleg tega plavajoče rastline najverjetneje sproščajo proizvedeni kisik naravnost v atmosfero, medtem ko ga ponoči porabljajo za dihanje iz vode (Kontić, 1993).

2.1.1.5 Navzemanje in poraba kisika

Navzemanje – prezračevanje je naravni proces, pri katerem molekule kisika prehajajo iz zraka skozi vodno gladino v vodo in se nato z difuzijo in konvekcijo porazdelijo po vodnem telesu. Topnost kisika v vodi je odvisna predvsem od temperature in parcialnega tlaka v plinski fazi, ki je v kontaktu z vodo.

Zveza med koncentracijo kisika in parcialnim tlakom je definirana s Henryjevim zakonom:

$$C_{O_2} = H \times P \quad (1)$$

kjer je

C_{O_2} - koncentracija raztopljenega kisika v vodi ($g\ cm^{-3}$)

H – Henryjeva konstanta ($g\ cm^{-3}\ Pa^{-1}$)

P – parcialni tlak kisika v zraku (Pa)

Stopnjo prezračevanja (S_p) opisuje enačba prvega reda, ki določa odvisnost od trenutnega deficita (D) raztopljenega kisika v vodi in jo zapišemo kot:

$$S_p = K_2 \times D \quad (2)$$

kjer je

S_p – stopnja prezračevanja ($mg\ L^{-1}\ dan^{-1}$)

D – deficit raztopljenega kisika = $C_s - C$ ($mg\ L^{-1}$)

C_s – nasičena koncentracija raztopljenega kisika v vodi pri določeni temperaturi (mgL^{-1})

C – dejanska koncentracija raztopljenega kisika v vodi pri tej temperaturi ($mg\ L^{-1}$)

K_2 –konstanta hitrosti prezračevanja (dan^{-1})

Vrednosti prezračevalne konstante se lahko razlikujejo za več kot red velikosti. Jezera imajo vrednost K_2 okoli $0,1\ dan^{-1}$, medtem ko imajo lahko brzice na hitro premikajoči se reki K_2 celo višji od $1,0\ dan^{-1}$. Po podatkih (Kiely, 1996) so v tabeli 2 predstavljeni intervali K_2 za različna vodna telesa.

Tabela 2: Prezračevalne konstante, K_2 (Kiely, 1996)

| Vodno telo | Interval K_2 pri 20 °C |
|----------------------------------|--------------------------|
| Majhni ribniki in stoječe vode | 0.1 - 0.23 |
| Počasni potočki in velika jezera | 0.23 - 0.35 |
| Reke s počasnim tokom | 0.35 - 0.46 |
| Reke s srednje hitrim tokom | 0.46 - 0.69 |
| Reke s hitrim tokom | 0.69 - 1.15 |
| Deroča reka z brzicami | > 1.15 |

Za izračun prezračevalne konstante se uporablja poenostavljena enačba, ki ne vključuje naklona struge, strižne hitrosti in longitudinalnega disperzijskega koeficienta, zato so velikokrat daleč od pravih vrednosti prezračevalnih konstant. Veliko znanstvenikov je poskušalo najti čim bolj točno in primerno enačbo za izračun K_2 , vendar jih je večina le dober približek realni vrednosti. Nekaj enačb različnih avtorjev je podanih v tabeli 3.

Tabela 3: Enačbe za napoved prezračevalne konstante K_2 (Wilcock, 1982; Schnoor, 1996)

| Avtor | Enačba za K_2 | Obseg uporabnosti |
|-------------------------------|---|---|
| Owens, Edwards, Gibbs | $K_2 = \frac{23v^{0,73}}{h^{1,75}}$ | h = 1 - 2.5 v = 0.1 - 0.5 Q = 4 - 36 |
| Churchill, Elmore, Buckingham | $K_2 = \frac{11v}{h^{1,67}}$ | h = 2 – 11 v = 2 – 5 Q = 1000 – 17000 |
| Tsivoglou | $K_2 = \frac{0,048\Delta S}{t}$ | Q = 5 – 3000 |
| Isaacs, Gaudy | $K_2 = \frac{4,754v}{h^{3/2}}$ | T = 20 °C |
| Krenkel, Orlob | $K_2 = \frac{196(vS)^{0,408}}{h^{0,66}}$ | T = 20 °C |
| Benett, Rathbun | $K_2 = \frac{36,8v^{0,413} S^{0,273}}{h^{1,408}}$ | T = 25 °C |

kjer je:

h – srednja globina (m)
v – srednja hitrost toka (m s^{-1})
S – naklon struge (mm^{-1})
Q – pretok ($\text{ft}^3 \text{s}^{-1}$)

O'Conner in Dobbins (1958) pa sta predlagala naslednjo enačbo:

$$K_2 = \frac{3,9 \times v^{1/2}}{h^{3/2}} \quad (3)$$

kjer je

v – srednja dolžinska hitrost (m s^{-1})

h – globina vode (m)

Če pa želimo dodati še vpliv temperature na stopnjo prezračevanja, zapišemo K_2 kot:

$$K_{2(T)} = K_{2(20^\circ\text{C})} \times \theta^{(T-20^\circ\text{C})} \quad (4)$$

kjer je

$K_{2(T)}$ – konstanta prezračevanja pri temperaturi T (dan^{-1})

$K_{2(20^\circ\text{C})}$ – konstanta prezračevanja pri 20°C (dan^{-1})

T – temperatura ($^\circ\text{C}$)

θ – temperaturni koeficient

Če vstavimo enačbo (4) v enačbo (2), dobimo enačbo, ki podaja odvisnost stopnje prezračevanja od temperature:

$$S_p = K_{2(20^\circ\text{C})} \times \theta^{(T-20^\circ\text{C})} \times D \quad (5)$$

Prehajanje kisika iz zraka v vodo preko vodne gladine je odvisno od več faktorjev. Med najpomembnejšimi so temperatura vode in zraka, vlaga v zraku ter razburkanost vodne gladine, ki pa je odvisna od vetrovnosti, padavin in strukture ter nagiba struge. Večji kot je naklon in bolj kot je razgibano dno struge, večje bo prezračevanje rečne vode.

Zaradi zaježitve Save je pričakovati, ne glede na to, da bo obseg rečne gladine povečan, da bo stopnja prezračevanja zmanjšana, saj se bo občutno zmanjšala hitrost pretoka vode. Posledično je pričakovati zmanjšanje koncentracije raztopljenega kisika.

STREETER – PHELPSOVA ENAČBA

Streeter in Phelps sta leta 1925 uspela izdelati in predstaviti model, ki napoveduje gibanje koncentracije raztopljenega kisika vzdolž vodotoka, v katerega se izpušča odpadna voda, v odvisnosti od prezračevanja (prehajanje kisika preko vodne gladine) in deoksigenacije (BPK – biokemijske potrebe po kisiku). Model ne upošteva drugih dejavnikov, ki vplivajo na koncentracijo kisika v vodi (fotosinteza, poraba kisika rečnega dna, nitrifikacije idr.). Model je bil kasneje večkrat dopolnjen z vključevanjem posameznih manjkajočih dejavnikov (Schnoor, 1996). Vendar njun matematični model še vedno velja za najbolj enostaven in dovolj točen način napovedovanja koncentracije kisika v vodotokih. Osnovna oblika enačbe je:

$$v \frac{dC}{dx} = -K_1 L + K_2 (C_s - C) \quad (6)$$

kjer je

v – hitrost toka reke ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
 L – končna vrednost BPK (mg L^{-1})
 K_1 – konstanta hitrosti deoksigenacije (dan^{-1})
 K_2 – konstanta hitrosti prezračevanja (dan^{-1})
 C_s – vrednost raztopljenega kisika - nasičenost (mg L^{-1})
 C – dejanska koncentracija raztopljenega kisika (mg L^{-1})

Elementa na desni strani enačbe (6) predstavljata dva nasprotna si procesa v reki, deoksigenacijo zaradi biokemijske potrebe po kisiku in prezračevanje.

$C_s - C$ je razlika med nasičeno vrednostjo raztopljenega kisika in trenutno vrednostjo raztopljenega kisika v vodi in jo imenujemo deficit raztopljenega kisika (D). Zato enačbo (6) raje zapišemo kot:

$$v \frac{dD}{dx} = +K_1 L - K_2 D \quad (7)$$

kjer je

D – deficit raztopljenega kisika

Če želimo prikazati gibanje koncentracije raztopljenega kisika v odvisnosti od razdalje, moramo v enačbo (7) vstaviti še enačbo, ki določa končno vrednost BPK v odvisnosti od razdalje. Ta se zapiše kot:

$$L = L_0 e^{-K_1 x/v} \quad (8)$$

kjer je:

L_0 – začetna vrednost BPK (mg L^{-1})

x – razdalja (m)

S tem dobimo enačbo, ki jo lahko rešimo z integriranjem:

$$v \frac{dD}{dx} = +K_1 L_0 e^{-K_1 x/v} - K_2 D \quad (9)$$

Enačbo preuredimo tako, da dobimo na levi strani elemente, ki vsebujejo odvisno spremenljivko (D), na desni pa tiste, ki vsebujejo neodvisne spremenljivke:

$$v \frac{dD}{dx} + K_2 D = K_1 L_0 e^{K_1 x/v} \quad (10)$$

Rešitev enačbe (10) zapišemo kot:

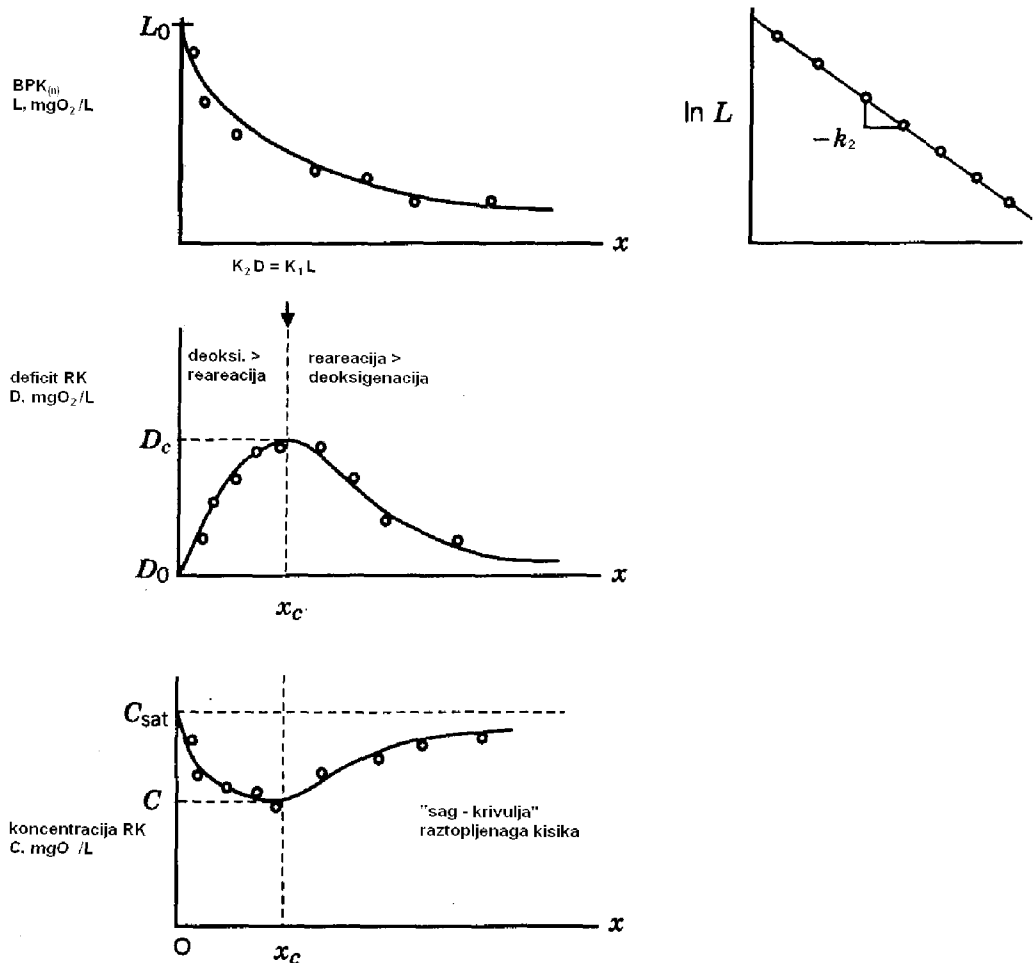
$$D = D_0 e^{-K_2 x/v} + \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 x/v} - e^{-K_2 x/v}) \quad (11)$$

Enačba (11) je končna rešitev za deficit raztopljenega kisika v odvisnosti od razdalje od točke izvora onesnaženosti v reki. Enačba se lahko zapiše tudi kot rešitev za koncentracijo raztopljenega kisika namesto deficita. Ta je podana v enačbi (12), kjer je D iz enačbe (11) nadomeščen s $(C_s - C)$:

$$C = C_s - \left[(C_s - C_0) e^{-K_2 x/v} + \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 x/v} - e^{-K_2 x/v}) \right] \quad (12)$$

Hipotetično se pričakuje, da končna vrednost BPK eksponentno upada z razdaljo (enačba (8)), medtem ko se bo deficit raztopljenega kisika povečeval do maksimalnega kritičnega deficita (D_c), ki bo nastopil v kritični razdalji (x_c), nato pa se bo zmanjševal skoraj do ničle pri $X \rightarrow \infty$ (enačba (11)). Koncentracija raztopljenega kisika se znižuje do minimuma, nato pa se zviša; potek ponazarja »sag - krivulja«, ki je grafično prikazana na sliki 3 in podana z enačbo (12).

Sčasoma se tako vodotok po izlivu nekega onesnaženja v $x = 0$ očisti sam s pomočjo prezračevanja.



Slika 3: Streeter – Phelpsova »sag – krivulja« (Schnoor, 1996)

2.1.3 VPLIV TEMPERATURE NA POSAMEZNE ZDRUŽBE

Izgradnja HE Brežice bo sedaj skoraj hudourniško reko v profilu Krško - Brežice spremenila v pretočno jezero. Največji del biocenoze Save predstavljajo prirasli organizmi (prerast), obrast (perifiton – producent kisika) in heterotrofni organizmi (porabniki kisika). Z zaježitvijo se bodo življenjski pogoji za to biocenozo poslabšali zaradi zmanjšane vnosa kisika, večjih globin vode in posledično poslabšanih svetlobnih razmer ter sprememb zrnivosti usedlin na dnu. Povečanje globine vode pa prinese s seboj tudi spremembo temperature po globini. S temperaturo so povezani metabolizem, razvojni cikel in razširjenost vodnih organizmov, saj ima vsaka vrsta svoje območje temperaturne tolerance ter optimalno temperaturo za rast in razvoj. Take spremembe življenjskih pogojev se odražajo v spremenjeni sestavi prerasti, zoobentosa in ribje favne (Cvitanič, 1999).

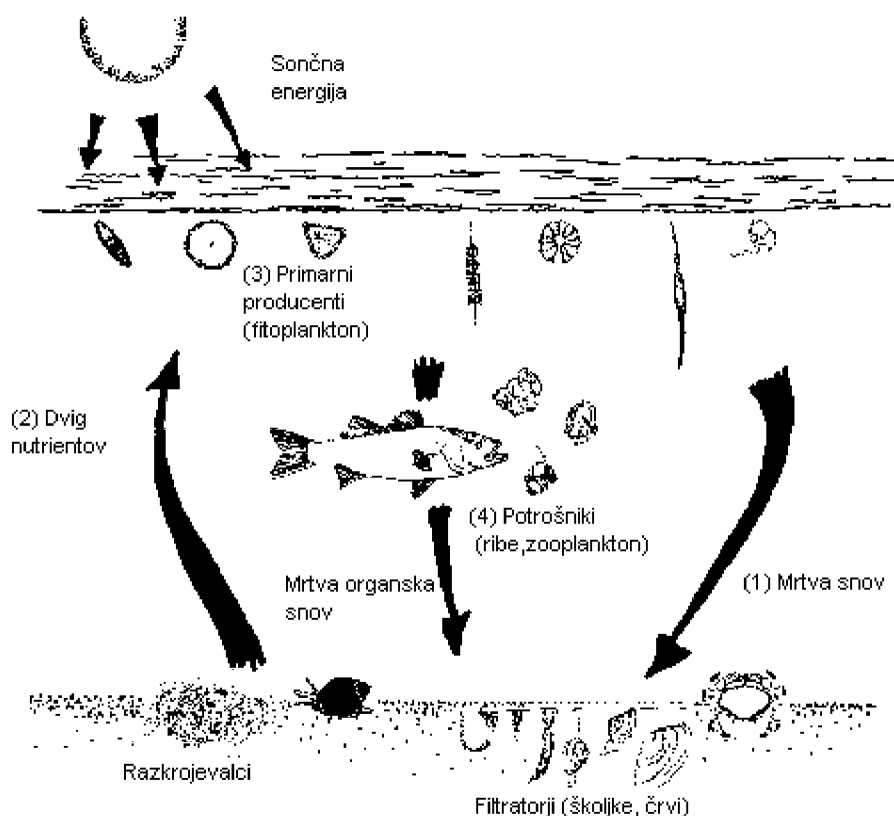
Vodne organizme v osnovi delimo na dva načina (Tarman, 1992; Brancelj, 2002):

Prvi je glede na njihov habitat. Ločimo tri združbe:

- nekton; to so prosto aktivno plavajoči organizmi, med njimi so najbolj pomembne ribe
- plankton; to so drobni organizmi, ki lebdi v vodi ali pa jih nosi vodni tok; deli se na živalski plankton (zooplankton) in rastlinski plankton (fitoplankton)
- bentos; to so organizmi, ki živijo na dnu; lahko so nanj pritrjene ali pa se po in v njem gibljejo

Druga se nanaša na njihovo vlogo in položaj v prehranjevalni verigi (slika 4):

- razkrojevalci; bakterijske vrste, ki razgrajujejo organske snovi
- primarni producenti; alge in fitoplankton
- potrošniki; bentoške živali, zooplankton in ribe



Slika 4: Prikaz prehranjevalne verige v vodi (internetna stran z dne 6. oktober 2008: www.glf.dfo-mpo.gc.ca/os/bysea-enmer/about-ausujet-e.php)

V nadaljevanju so toplotni vplivi na vodne organizme opisani glede na njihov položaj v prehranjevalni verigi.

2.1.2.1 Toplotni vpliv na razkrojevalce

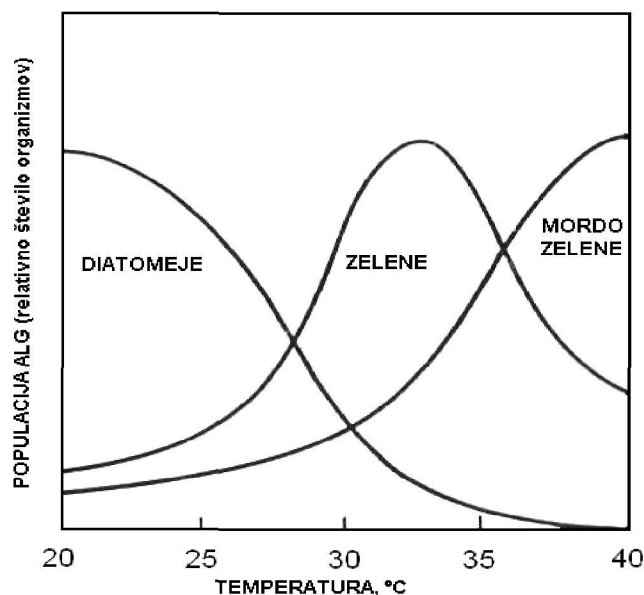
Med razkrojevalce uvrščamo predvsem bakterije, ki predelujejo organsko snov kot so mrtvi organizmi v tako obliko, da je dostopna tudi drugim organizmom v prehranjevalni verigi (producentom in potrošnikom).

V večini naravnih vod je celo v poletnih mesecih temperatura pod optimalno za prekomerno razmnoževanje bakterijskih vrst. Z izpustom tople vode pa se lahko zgodi, da se poveča masa primarnih producentov in s tem tudi odmrlih organizmov, kar pomeni povečanje števila razkrojevalcev, ki pri višjih temperaturah razgrajujejo hitreje. Posledično se porabi več raztopljenega kisika, ki lahko pade tudi na kritično mejo, če se razkroj odvija preveč intenzivno.

2.1.2.2 Toplotni vpliv na producente

Večino producentov predstavljajo alge (fitoplankton), ki uspevajo v zgornjih plasteh vodnega telesa, do koder še prodre sončna svetloba.

V laboratoriju so bile določene temperature, pri katerih uspevajo določene vrste alg. Ker so bili pogoji kontrolirani in ker nekateri dejavniki niso bili prisotni in upoštevani, so v naravi možna odstopanja od teh vrednosti. Določili so, da diatomeje dominirajo pri temperaturah do 27 °C, zelene alge najbolje uspevajo med 29 in 35 °C, modro-zelene alge pa nad 35 °C. V naravnem okolju pa naj bi diatomeje in zelene alge uspevale pod 29 °C, modro-zelene alge pa le na točkovnih izvorih tople vode, kjer temperature presegajo 29 °C – slika 5 (Glasstone in Jorda, 1980). Znano je, da med razgradnjo slednjih pomre veliko rib, vendar to pripisujejo upadu raztopljenega kisika v vodi.



Slika 5: Temperaturni vplivi na spremembe populacij alg (Glasstone in Jorda W, 1980)

2.1.2.3 Toplotni vpliv na potrošnike

Potrošniki predstavljajo največjo in najbolj raznoliko skupino živih bitij na planetu in so zato najbolj raziskana skupina na vseh področjih. V današnji dobi, ko je veliko govora o podnebnih spremembah in spremembah življenjskih pogojev, je temperatura eden od glavnih faktorjev, ki povzroča skrbi. Dejstvo je, da se ozračje segreva in z njim posledično tudi vode. Z naravnim povišanjem temperature vodotokov, ki jih lahko pričakujemo v prihodnjih desetletjih, so se strokovnjaki začeli še bolj intenzivno ukvarjati z vplivom industrije na vodna telesa.

2.1.2.3.1 Ribe in kakovost vode

Ribe so mrzlokrvne živali, kar pomeni, da se njihova telesna temperatura prilagaja temperaturi okolja, v katerem živijo. Od nje so odvisni določeni biokemijski procesi. Encimi, ki imajo ključno vlogo v vseh življenjskih procesih, postanejo pri določenih temperaturah neaktivni, celična protoplazma koagulira, hemoglobin pa postane manj aktiven pri prenašanju kisika po krvnih žilah. Torej obstaja zgornja temperaturna meja, pri kateri ribe še lahko preživijo (Glasstone in Jorda, 1980).

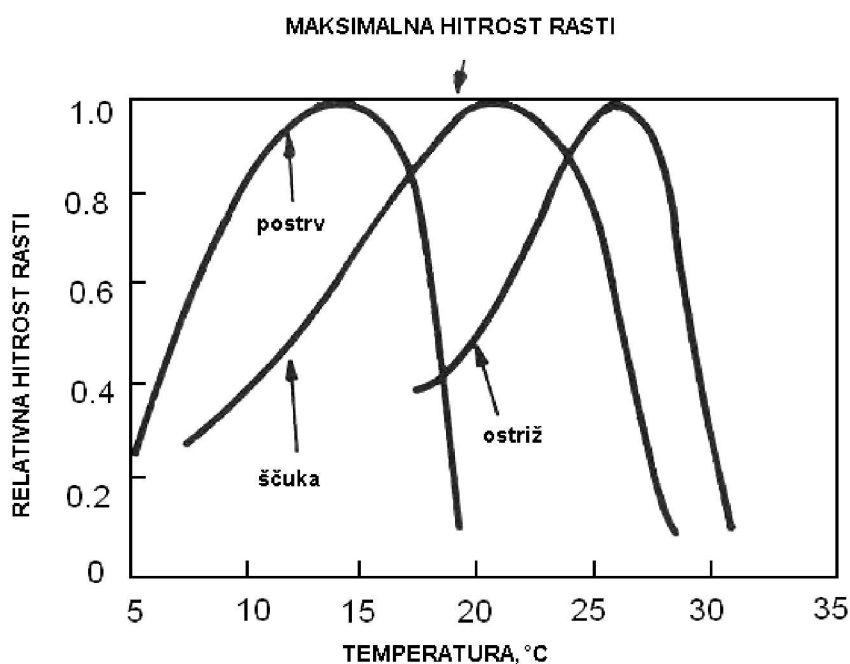
V naravi se temperatura vodnih teles nenehno spreminja z letnimi časi, zato so ribe razvile sposobnost prilagajanja v določenem tolerančnem območju. Glede na vrsto so ta tolerančna območja za življenje in razmnoževanje različna. Spremembe temperature v naravi načeloma potekajo počasi (dnevna, sezonska in letna periodičnost), zato se tudi ribe lažje prilagajajo nanje.

Večjo skrb povzročajo nenadne spremembe temperature oz. temperaturni šok. Že hitra sprememba temperature večja od 5 °C pusti negativne posledice na ribah. Spremembe večje od 12 °C pri krapih oziroma 8 °C pri postrvih pa običajno za ribe pomenijo smrt. Za ribji zarod pa so vrednosti še veliko nižje, saj so lahko usodne že temperaturne spremembe 1,5 °C za postrvi in 3 °C za krape (Glasstone in Jorda, 1980).

Različne vrste rib imajo različne zahteve po kisiku. Bolj zahtevne so postrvi, ki za življenje potrebujejo 8 do 10 mg L⁻¹ kisika, pri 3 mg L⁻¹ pa se lahko že »zadušijo«, medtem ko so krapovci manj zahtevni in za življenje potrebujejo okoli 6 mg L⁻¹ kisika, »zadušitev« pa nastopi, če se vsebnost kisika zniža na 2 mg L⁻¹ (Povž, 1990).

Drugi dejavniki, ki še določajo kakovost življenjskega prostora rib, so pH, suspendirane snovi, BPK₅, celotni fosfor, nitriti, fenolne spojine, mineralna olja, neionizirani amoniak, skupni amonij, celotni prosti klor, celotni cink in raztopljeni baker (Direktiva 2006/44/ES).

Temperatura v vodnem okolju pogojuje tudi rast in razvoj rib. Optimalna temperatura za maksimalen razvoj je pri vsaki vrsti ribe in njeni starosti različna. Na sliki 6 je prikazana relativna hitrost rasti za postrv, ščuko in ostriza. Optimalna temperatura za maksimalno rast je pri postrvi okoli 15 °C, pri ščuki 21 °C in pri ostrizu 27 °C. Očitno je, da bo postrv bolje uspevala v hladnejših vodah, medtem ko bo ostriz vladal v bolj toplih vodah. Iz tega lahko vidimo, da je pri segrevanju vodotoka možno opaziti izpodrivanje tistih rib, ki uspevajo v hladnejših vodah, s strani tistih, ki imajo večjo toleranco do višjih temperatur. Optimalne pogoje za rast in razvoj pa ne predstavlja samo temperatura. Upoštevati je treba tudi zadostno količino hrane in raztopljenega kisika, brez katerih pogoji za optimalno rast niso izpolnjeni (Glasstone in Jorda, 1980).



Slika 6: Vpliv temperature na hitrost rasti rib (Glasstone in Jorda, 1980)

Zajezitev reke bo vplivala na vrstno sestavo ribje populacije, ki se bo spreminjala v smeri vse večjega pojavljanja vrst, ki bodo sposobne preživeti v novonastalih pogojih za življenje. Fizičnim spremembam bodo sledile spremembe temperaturnega režima vode, pretokov, motnosti, sedimentacije in druge, ki prizadenejo nekatere vrste rib bolj, druge manj. Rečne ribje vrste so prilagojene na določene dnevne, sezonske in letne temperaturne pogoje. Po izgradnji jezov se temperaturni režim zelo spremeni in čim večje so te spremembe, večji je vpliv na ribe in večje so posledice. To velja predvsem za vrste, ki živijo v majhnih temperaturnih razponih. Manj so prizadete tiste vrste, ki živijo v vodah z večjimi temperaturnimi razponi in populacije teh se nemalokrat še povečajo. Spremenjeni temperaturni režim manj prizadene odrasle ribe, za razvoj zaroda in mladice pa je lahko uničujoč. Takoj po zajezitvi običajno izginejo manjše ribje vrste, ki imajo zelo kratko življenjsko dobo, take, ki slabo plavajo in se malo premikajo po biotopu, ter zarod in mladice (Povž, 1987).

Včasih so posledice zajezitve opazne šele po nekaj letih. Velikost populacij lahko upada počasi do popolnega izginotja. Ti zakasneli vplivi so slabo poznani in niso raziskani.

Poročilo o vplivih na okolje, ki je bilo izdelano za HE Krško (Imos Geateh, 2006), obravnava karakteristike nekaterih rib v reki Savi, ki se pojavljajo tudi v profilu NEK in na lokaciji bodoče jezovne zgradbe HE Brežice, in njihovo možnost za obstoj v novih življenjskih pogojih. V poročilu so ribe v grobem razdeljene na reofilne in limnofilne vrste. Reofilne vrste so prilagojene na življenje v hitro tekočih vodah z visokimi vsebnostmi kisika in nizkimi temperaturami, medtem ko so limnofilne vrste manj prilagojene za življenje v hitro tekočih vodah, potrebe po kisiku so manjše, prav tako prenašajo višje temperature, manjše pretoke oziroma bolj umirjen tok na splošno.

Med reofilne vrste spadajo potočna postrv, platnica, podust, klen (spada tudi med limnofilne vrste), blistavec, bolen, zvezdogled, mrena, pohra, pisanka, ogrica, upiravec

in menek. Predvideva se, da bodo iz tega področja zaradi novonastalih pogojev izginile naslednje vrste: potočna postrv, blistavec, zvezdogled, pisanka, upiravec in menek. Vseh šest vrst potrebuje za normalen razvoj čisto vodo, nizke temperature, hiter rečni tok in peščeno prodnata tla. Vse ostale reofilne vrste bodo ostale le v primeru, da se jim zagotovi selitev in dostop do primernih drstišč in pasišč (Stojič in Kališnik, 2006).

Limnofilne vrste na odseku med NEK in sotočjem Save in Krke predstavljajo rdečeoka, jez, globoček, zelenka, androga, ploščič, krap, pisanec, som, ščuka, navadni ostriž, smuč, srebrni koreselj in sončni ostriž. Slednja dva sta neavtohtoni vrsti, za kateri se predvideva, da se bosta njuni populaciji z zajezitvijo še povečali. Srebrni koreselj bo brez dvoma postal vodilna in najštevilčnejša vrsta. Ravno tako se bodo življenjski pogoji izboljšali za rdečeoko, ploščiča, krapa, navadnega ostriža in smuča. Vse ostale vrste bodo ostale le v primeru ugodnih pogojev za drstitev (Stojič in Kališnik, 2006).

2.1.2.3.2 Druge raziskave na potrošnikih

Študija Tehnična dokumentacija za pridobitev vodnogospodarskega dovoljenja za delovanje NEK (IJS – SEPO, 1989) kot primer morebitne spremembe vrstne populacije navaja primer ličink *Chironomus thummi*, ki so prisotne v reki Savi tudi na področju Brežic. Ugotovljeno je, da temperaturni skok za 5 °C pozimi ali v zgodnji spomladi sproži predčasen pojav metamorfoze (razvoja odrasle žuželke, ki živi na kopnem v zraku). Temperaturne spremembe povzročijo večje izletanje živali iz vode v okolico, ki ima precej nižjo temperaturo kot voda. Zato prihaja do propada osebkov in posledično zmanjšanja njihovega števila v združbi makrozoobentosa, kar pa se negativno odraža v prehranjevalni verigi, saj so te ličinke pomemben vir hrane za višje trofične nivoje. Opozarjajo tudi, da v hladnejših mesecih sprememba temperature ne bi smela biti večja od 4 °C, če ne želimo negativnega vpliva v življenjski združbi.

2.1.2.3.3 Direktiva 2006/44/ES

Vsi dejavniki, ki določajo kakovost življenjskega prostora rib, so obravnavani v »Direktivi 2006/44/ES o kakovosti sladkih voda, ki jih je treba zavarovati ali izboljšati, da se omogoči življenje rib«. V direktivi so vode razdeljene na salmonidne in ciprinidne vode, zanje pa so določene priporočene in obvezne vrednosti pomembnih lastnosti vode. Direktiva določa tudi način in minimalno pogostost vzorčenj. Glede na situacijo in rezultate preiskav pa se lahko število vzorčenj zmanjša ali poveča. Določene so tudi analizne in kontrolne metode.

V okviru te diplomske naloge so obravnavani trije parametri, in sicer temperatura, raztopljeni kisik in BPK₅.

Temperatura

Temperaturo je treba meriti tedensko gorvodno in dolvodno od točke toplotnega izpusta. Temperatura, merjena dolvodno od točke toplotnega izpusta (na robu področja mešanja), ne sme preseči naravne temperature v salmonidnih vodah za več kot 1,5 °C in v ciprinidnih vodah za več kot 3 °C. Vendar lahko v posebnih primerih države članice določijo geografsko omejena odstopanja, če lahko pristojni organ dokaže, da ni škodljivih posledic za uravnotežen razvoj ribje populacije.

Hkrati temperatura na robu mešanja ne sme presegati 21,5 °C v salmonidnih vodah ter 28 °C v ciprinidnih vodah. Temperaturne omejitve se lahko presežejo v 2 % časa.

Raztopljeni kisik

Raztopljeni kisik je treba meriti enkrat na mesec, in sicer en vzorec na najbolj kritičnem mestu. V primeru večjih dnevnih nihanj pa je treba vzorec vzeti dvakrat dnevno. Predpisana koncentracija raztopljenega kisika za salmonidne vode je 9 mg L⁻¹ za ciprinidne vode pa 7 mg L⁻¹. V primeru, da koncentracija raztopljenega kisika v salmonidnih vodah pade pod 6 mg L⁻¹ oziroma v ciprinidnih vodah pod 4 mg L⁻¹, je treba ugotovljati, ali je tako nizka vrednost slučajnost, posledica naravnega pojava ali vzrok onesnaženja ter temu primerno ukrepati.

BPK₅

Vrednost biokemijske potrebe po kisiku v salmonidnih vodah ne sme preseči 3 mg L⁻¹ O₂, v ciprinidnih vodah pa 6 mg L⁻¹ O₂.

2.2 Hidroelektrarna Brežice

Hidroelektrarna Brežice je sestavni del projekta izgradnje petih hidroelektrarn na spodnji Savi, kamor poleg HE Brežice spadajo še HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško in HE Mokrice. Skupaj naj bi proizvedle okoli 6 % električne energije v Sloveniji.

HE Brežice bo po podatkih študije »Analiza sprememb radioloških in toplotnih vplivov NE Krško na okolje po zgraditvi HE Brežice« (IJS, 2007) stala 315 metrov protitočno od starega cestnega mostu čez Savo v Brežicah (priloga A). Predviden akumulacijski bazen bo 16 kilometrov dolg odsek omejen s HE Krško na zgornjem robu ter s HE Brežice na spodnjem.

2.2.1 SPREMEMBA TOPLOTNIH OBREMENITEV REKE SAVE

Toplotne spremembe Save se spremlja in preučuje, odkar se jo je začelo izkoriščati kot ponor odpadnih vod iz obratov in kot ponor odvečne toplote. V zadnjem času so se študije izdelovale predvsem zaradi Termoelektrarne Trbovlje 3 (TET3), verige hidroelektrarn na Savi in Nuklearne elektrarne Krško. V prilogi B so zbrane ugotovitve študij v obdobju 2000–2007 (Širca, 2004; IBE, 2006; IJS, 2007).

2.2.2 VPLIV HE BREŽICE NA GLAVNI HLADILNI SISTEM NE KRŠKO

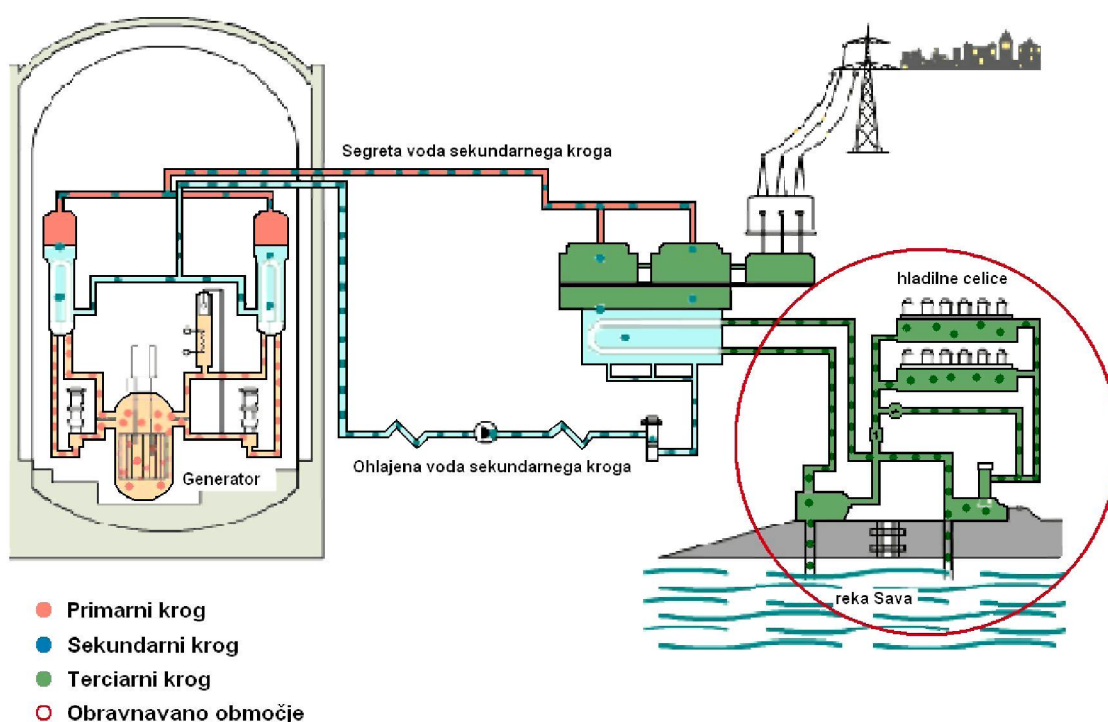
Namesto sedanjega bazena za zapornicami pri NEK bo akumulacijsko jezero moralo zagotoviti 30-dnevno hlajenje NEK v primeru nezgodne izgube hladila.

Pri tem se pojavlja tudi vprašanje glede t.i. kratkega stika. V primeru, da bi bil tok Save prepočasen in bi prišlo do premikanja segrete vodne mase proti vhodnemu bazenu namesto dolvodno od izpustnega kanala, bi NEK črpala toplejšo vodo, kot če bi bil pretok dovolj velik. IBE predlaga preveritev rezultatov matematičnega modela, ki kažejo, da do kratkega stika ne bo prišlo, če bo zagotovljen stalen izpust vsaj 45 m³ s⁻¹ iz bazena HE Brežice.

Akumulacijski bazen mora biti projektiran tako, da zagotavlja nemoteno odvajanje toplote iz hladilnega sistema NEK in da se pri tem ne prekoračijo omejitve vodnogospodarskega dovoljenja.

2.3 Nuklearna elektrarna Krško

Nuklearna elektrarna Krško stoji na levem bregu reke Save le nekaj kilometrov dolvodno od mesta Krško. Opremljena je z Westinghousovim lahkovodnim tlačnim reaktorjem toplotne moči 2 GW. Ko reaktor obratuje na 100 % moči, se približno 35 % vse proizvedene toplotne energije spremeni v električno in prenese v 400 kV omrežje. Letno proizvede okoli 5 TWh električne energije, kar predstavlja približno 40 % skupne proizvedene električne energije v Sloveniji.



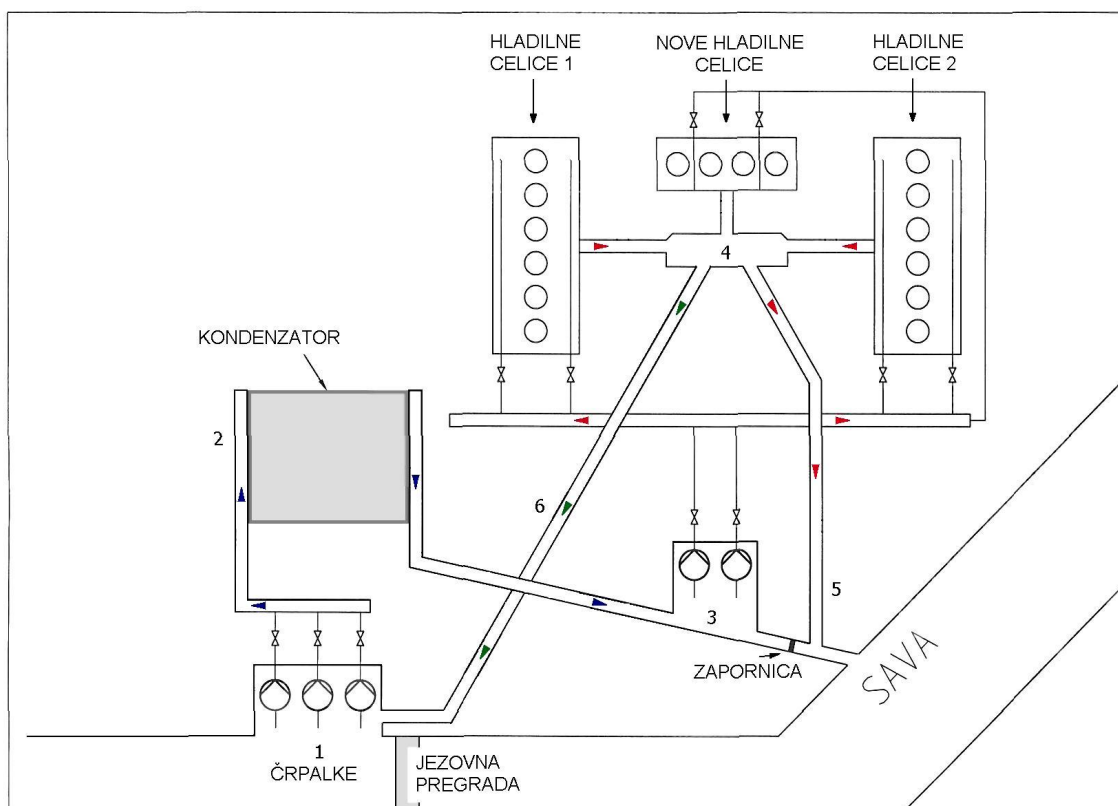
Slika 7: Shema Nuklearne elektrarne Krško (prirejeno po shemi na internetni strani NEK – www.nek.si/sl/o_jedrski_tehnologiji/delovanje_nek)

2.3.1 HLADILNI SISTEM NEK

Nuklearna elektrarna Krško je projektirana za kombinirano hlajenje kondenzatorja parne turbine. To pomeni, da toploto, ki je ne more izkoristiti v svojem procesu proizvodnje električne energije, odvaja ali v reko Savo ali/in v zrak s pomočjo hladilnih celic.

Kadar so pretoki reke Save nad $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, se elektrarna hladi pretočno (samo s savsko vodo) s pomočjo glavnega hladilnega sistema kondenzatorja parne turbine (v nadaljevanju CWS – Circulating Water System). Po hlajenju kondenzatorja se v Savo odvaja vsa ogreta voda (na sliki 8 označeno z modrimi puščicami).

Ob manjših pretokih Save je potrebno dodatno hlajenje s hladilnimi celicami (kombinirano hlajenje). Pred izpustom hladilne vode v Savo se del vode hladi s celicami, nato se del ohlajene vode odvaja v Savo po izpustnem kanalu (na sliki 8 označeno z rdečimi puščicami), preostala količina pa se po potrebi vrača do vhodnega bazena hladilne vode po obtočnem kanalu (na sliki 8 označeno z zelenimi puščicami).



Slika 8: Poenostavljen prikaz hladilnega sistema (prirejeno po IBE, 2003)

1 Voda iz Save se pred jezom oddvoji v poseben bazen, v katerem so najprej za čiščenje postavljene rešetke (širina med rešetkami je 8 cm), ki prestrežejo večje kose (debla, veje, večji odpad) in nato bolj fina sita (širina oken na situ je 1 cm), ki prestrežejo manjše kose. Od tu voda potuje preko dveh črpalk do kondenzatorja (ena črpalka je rezervna).

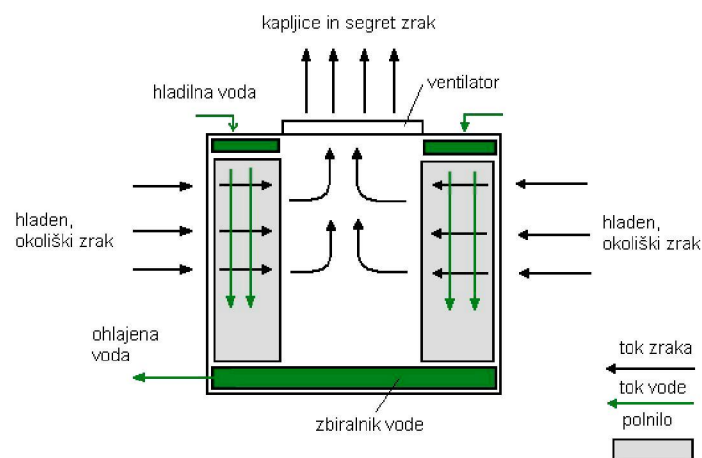
2 Pri pretoku skozi kondenzator se savska voda segreje, ker sprejme toploto izrabljene pare.

3 Od kondenzatorja potuje segreta voda ali v Savo ali pa v hladilne celice. Koliko hladilnih celic bo delovalo je odvisno predvsem od pretoka Save, njene temperature ter od temperature in pritiska zraka. Po izgradnji tretjega bloka hladilnih celic, je možno kombinirano delovanje. Glede na potrebe lahko deluje 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ali 16 celic. Pred izgradnjo novega bloka je bilo možno hlajenje samo s 6 ali 12 celicami. To ni omogočalo ustrezne optimizacije, kar je pogosto predstavljalo nepotrebno porabo električne energije za njihovo delovanje.

4 Hladilne celice

Hladilne celice so protitočen sistem zraka in vode. Hladilno vodo se prečrpa na vrh celic, kjer se razlije po mrežastih razpršilcih (polnilu) po levi in desni strani. Ventilatorji vlečejo zrak skozi polnilo in s tem omogočajo učinkovitejše hlajenje vode. Ohlajena voda se nato zbira na dnu v zbiralniku in odteka bodisi

po kanalu nazaj v Savo, bodisi v vtočni bazen hladilne vode, kjer se v ustreznem deležu pomeša s Savo za namen hlajenja kondenzatorja. Protitočni sistem hladilnih celic je prikazan na slikah 8 in 9.



Slika 9: Poenostavljen prikaz protitočnega sistema hladilnih celic (USAR, 1998; prirejeno po SIAP ANALIZE, 2004)



Slika 10: Pogled na hladilne celice s šestimi ventilatorji v NEK (www.nek.si, 15.1. 2009)

5 Primerno ohlajena voda odteka po izpustnem kanalu v Savo.

6 V primeru, da je voda pretopla, gre po obtočnem kanalu nazaj v vtočni bazen. Tam se pomeša s svežo savsko vodo in ponovno pošlje v kondenzator. V zimskih mesecih, ko je temperatura vode na vходу v črpališče blizu ledišča, preusmerijo 10 % vode iz obtočnega kanala v črpališče, s čimer preprečujejo zamrzovanje opreme in ovirano delovanja črpalk zaradi ledu.

Hladilne celice so torej hladilni sistem, ki ga uporablja NEK za hlajenje hladilne vode pred izpustom v Savo. V vročih poletnih mesecih se Sava segreje tudi nad 20 °C, pretok vode pa lahko pade pod vrednost, ki ovira nemoteno delovanje NEK. Zato je

treba v takšnih neugodnih hidroloških pogojih omiliti posledice toplotnega obremenjevanja reke.

Hladilne celice so v uporabi v povprečju več kot 100 dni na leto (podrobnejša razlaga za posamezna leta v obdobju 2002–2008 je podana v poglavju 3.3). To pomeni, da skoraj tretjino leta NEK porablja del proizvedene električne energije za delovanje sistema za hlajenje vode (CWS). Pri povprečni uporabi hladilnega sistema se uporabljajo naslednji elementi (SIAP ANALIZE, 2004):

- 2 črpalke sistema hladilnih celic, $2 \times 2 \text{ MW} = 4 \text{ MWe (max)}$,
- 12 ventilatorjev sistema hladilnih celic, $12 \times 162 \text{ kW} = 2 \text{ MWe}$,
- 3 črpalke hladilnega kroga, $3 \times 1.5 \text{ MW} = 4.5 \text{ MWe (max)}$.

Preračunano na povprečnih 100 dni delovanja hladilnih celic pomeni, da poraba električne energije za delovanje CWS znaša okoli 25 GWh. Delovanje hladilnih celic torej predstavlja strošek, ki bi se ga dalo z določenimi ukrepi znižati ali celo odpraviti.

2.3.2 HIDROLOŠKI PODATKI

Podatki v tabelah 4 in 5 so preračunani iz vrednosti meritev temperatur in pretokov, ki jih dnevno (vsakih 10 minut) opravlja NEK, za obdobje od leta 2002 do leta 2008.

Podatki v tabeli 4 prikazujejo povprečne mesečne vrednosti pretoka reke Save ter najnižje vrednosti (srednje dnevne) pretoka v obdobju (npr. v juniju leta 2002 srednje dnevni pretok Save ni bil nikoli nižji od $67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Iz tabele ni razvidno, kdaj so nastopili veliki pretoki zaradi obilnih padavin. Zaradi močnega deževja in taljenja snega (v zadnjih letih je bilo snega bolj malo, kar je vplivalo tudi na debelino snežne odeje in zalogo vode) se povečujejo pretoki najpogosteje v spomladanskih mesecih aprila, maja in junija ter v pozno jesenskem mesecu oktobru (predvsem zaradi obilnih padavin). Tudi zaradi prevelikih pretokov je obratovanje NEK lahko moteno.

Tabela 4: Povprečni mesečni in najnižji mesečni pretoki v obdobju 2002 - 2008

| 2002 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | / | / | / | / | / | 267 | 325 | 256 | 122 | 238 | 115 | 121 |
| nQvm | / | / | / | / | / | 67 | 66 | 73 | 73 | 92 | 144 | 145 |

| 2003 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 190 | 114 | 107 | 144 | 116 | 61 | 65 | 47 | 70 | 143 | 189 | 192 |
| nQvm | 128 | 92 | 81 | 95 | 81 | 51 | 46 | 41 | 50 | 65 | 109 | 89 |

| 2004 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 225 | 161 | 324 | 374 | 281 | 234 | 205 | 109 | 210 | 376 | 340 | 217 |
| nQvm | 112 | 98 | 126 | 233 | 176 | 132 | 108 | 86 | 89 | 88 | 144 | 100 |

| 2005 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 139 | 80 | 131 | 270 | 202 | 88 | 200 | 229 | 240 | 301 | 142 | 318 |
| nQvm | 79 | 70 | 63 | 113 | 115 | 70 | 79 | 74 | 107 | 109 | 81 | 109 |

| 2006 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 137 | 195 | 352 | 333 | 287 | 200 | 83 | 140 | 141 | 109 | 100 | 159 |
| nQvm | 92 | 80 | 161 | 295 | 156 | 106 | 65 | 72 | 78 | 72 | 64 | 79 |

| 2007 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 137 | 237 | 244 | 143 | 102 | 89 | 112 | 81 | 236 | 261 | 132 | 135 |
| nQvm | 80 | 126 | 143 | 100 | 74 | 75 | 59 | 59 | 83 | 187 | 95 | 86 |

| 2008 | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pmQ | 165 | 129 | 211 | 343 | 246 | 240 | 192 | 171 | 91 | 118 | 234 | 550 |
| nQvm | 82 | 84 | 88 | 201 | 134 | 124 | 105 | 101 | 75 | 63 | 95 | 155 |

- nekaj podatkov ni bilo na voljo

pmQ – povprečni mesečni pretok ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

nQvm – najnižji (srednji dnevni) pretok Save v obdobju ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Iz tabele 4 lahko razberemo, da je bilo leto 2003 izrazito suho leto z izredno nizkimi povprečnimi in najnižjimi srednje dnevnimi pretoki. Ostala leta so imela nižje pretoke v poletnih mesecih (julij, avgust in september) ter v dveh zimskih (december in januar). V teh mesecih nastopa največ dni z minimalnimi pretoki, ki občasno dosežejo kritično vrednost pretoka.

V tabeli 5 navedene temperature posameznih mesecev v letu predstavljajo najvišje srednje dnevne temperature Save (npr. v juliju leta 2004 srednja dnevna temperatura Save ni bila nikoli višja od $21,4 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabela 5: Najvišje srednje dnevne temperature Save

| LETO | JAN | FEB | MAR | APR | MAJ | JUN | JUL | AVG | SEP | OKT | NOV | DEC |
|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2002 | / | / | / | / | / | 24,8 | 22,8 | 21,7 | 18,2 | 13,8 | 11,1 | 8,7 |
| 2003 | 7,8 | 5,4 | 12,7 | 14,5 | 21,5 | 25,8 | 25,4 | 24,7 | 19,7 | 16,6 | 10,9 | 8,9 |
| 2004 | 6,7 | 6,7 | 8,8 | 12,3 | 15,5 | 19,3 | 21,4 | 21,8 | / | 12,9 | 11,8 | 8,6 |
| 2005 | 6,0 | 5,8 | 11,2 | 13,4 | 20,2 | 24,0 | 23,6 | 23,6 | 18,2 | 13,4 | 12,9 | 7,3 |
| 2006 | 5,8 | 6,2 | 9,5 | 19,6 | 16,0 | 22,4 | 24,6 | 23,4 | 18,3 | 16,6 | 11,3 | 10,1 |
| 2007 | 8,6 | 9,0 | 10,4 | 16,0 | 20,8 | 23,6 | 24,1 | 22,1 | 18,7 | / | 9,3 | 7,4 |
| 2008 | 7,5 | 8,7 | 9,3 | 11,9 | 18,1 | 20,8 | 22,1 | 21,4 | 19,6 | 13,9 | 11,7 | 7,1 |
| pnTm | 7,0 | 7,6 | 10,8 | 14,3 | 18,0 | 22,4 | 22,9 | 22,7 | 18,7 | 14,5 | 11,3 | 8,3 |
| nTSo | 8,6 | 9,0 | 12,7 | 19,6 | 21,5 | 25,8 | 25,4 | 24,7 | 19,7 | 16,6 | 12,8 | 10,1 |

/ - podatkov ni bilo na voljo

■ - nekaj dnevni meritev ni bilo na voljo

pnTm: povprečje najvišjih (srednjih dnevni) temperatur v mesecu (°C)

nTSo: najvišja (povprečne dnevna) temperatura Save v obdobju (°C)

Iz zgornje tabele lahko razberemo, da je Sava najtoplejša v poletnih mesecih; junij, julij in avgust. V teh mesecih lahko preseže celo 25 °C. Ta temperatura pa predstavlja zgornjo mejo, ko je še možno segrevati vodo za 3 °C, ne da bi presegli drugo vodnogospodarsko omejitev – 28 °C.

2.3.3 ODVISNOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE OD OKOLJSKIH OMEJITEV

NEK je pri svojem obratovanju odvisna od okoljskih dejavnikov, predvsem od pretoka in temperature reke Save. Ob neugodnih razmerah mora delovati na tak način, da upošteva pogoje vodnogospodarskega dovoljenja: $\Delta T = 3 \text{ °C}$, $T_{\max} = 28 \text{ °C}$.

Pred povečanjem moči elektrarne v letu 2002 so lahko kondenzatorje parne turbine hladili pretočno, če je bil pretok Save pred NEK več kot $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Sedaj je za tak način hlajenja potreben pretok vsaj $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Do pretoka $60\text{-}70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (odvisno od letnega časa) lahko elektrarna obratuje s polno močjo reaktorja, če obratujejo vse hladilne celice. Ker so pretoki večkrat (v povprečju okoli 15 do 30 dni na leto) še nižji, mora elektrarna delovati z zmanjšano močjo reaktorja (USAR, 1998; IBE, 2006).

V zgodovini obratovanja NEK je zaradi slabih hidroloških pogojev prišlo do občasno manjše proizvodnje. Tako je npr. leta 1993 elektrarna morala obratovati na nižani moči (med 70 in 90 %) 1145 ur oziroma več kot mesec in pol.

2.3.4 ZAKONODAJA

2.3.4.1 Slovenija

Nuklearna elektrarna Krško mora v sklopu varovanja okolja upoštevati naslednje predpise in smernice:

- Direktiva 2006/44/ES o kakovosti sladkih voda, ki jih je treba zavarovati ali izboljšati, da se omogoči življenje rib
- Uredba o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih vrst rib. Ur. l. RS, št. 46/02
- Pravilnik o imisijskem monitoringu kakovosti površinske vode za življenje sladkovodnih vrst rib Ur. l. RS št. 71/02

V sklopu vodno gospodarskega dovoljenja za odvzem in izpust hladilne vode CWS mora Nuklearna elektrarna Krško upoštevati naslednje pogoje:

- Iz vodotoka Save je dovoljeno odzematati največ $26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, kadar je pretok Save pred odvzemom večji od $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Iz vodotoka Save je dovoljeno odzematati največ 25 % pretoka Save, kadar je pretok manjši od $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Temperatura vodotoka Save po mešanju s hladilno vodo ne sme preseči $28 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Razlika med temperaturo vodotoka Save pred odvzemnim mestom za hladilno vodo in temperaturo vodotoka Save po mešanju s hladilno odpadno vodo (ΔT reke) ne sme v dnevnem povprečju preseči $3 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.4.2 Svet

Nuklearne elektrarne se gradijo skoraj povsod po svetu, vendar na različnih lokacijah in pod različnimi obratovalnimi pogoji. Obratovalni pogoji so večinoma pogojeni s hidrološkimi in meteorološkimi pogoji lokacije nuklearne elektrarne. V tabeli 6 so zbrani obratovalni pogoji za nekatere ameriške in evropske države.

Tabela 6: Obratovalni pogoji za nekatere ameriške in evropske države (www.eon-kernkraft.com/pages/ekk_en/Nuclear_Power_Plants/Locations/, z dne 9.3.2009, <https://ipsnews.net/news.asp?idnews=29441>, z dne 9.3.2009)

| država/ obratovalni pogoji | maxT (°C) | ΔT (°C) |
|----------------------------------|-----------|-----------------|
| EVROPA | | |
| Nemčija | | |
| Brokdorf | 33 | 10 |
| Isar1 | - | 2,5 |
| Francija | | |
| Tricastin | 25 | 2 |
| | | |
| ZDA | | |
| Alaska | 15 | 0,3 |
| Columbia | 32 | 3 |
| Kansas | 32 | 3 |
| New York | 32 | 3 |
| Utah | 27 | 2 |

3 PRAKTIČNI DEL

V praktičnem delu diplomske naloge je zajeto laboratorijsko delo – določanje biokemijske potrebe po kisiku v petih dneh (BPK_5) vzorcev Save dolvodno od NE Krško, matematični model raztopljenega kisika v petih dneh vezano na opravljene meritve BPK_5 ter izračun razlike med proizvedeno električno energijo ob neugodnih hidroloških razmerah in med proizvedeno električno energijo, ko elektrarna obratuje optimalno. Z določanjem BPK_5 pri treh različnih temperaturah (20 °C, 25 °C in 30 °C) sem želela ugotoviti, za koliko se poveča poraba kisika pri povišanih temperaturah. Temperature, pri katerih sem izvajala poskuse, sem določila na podlagi dejanskih temperatur Save in na podlagi do sedaj opravljenih študij, ki predvidevajo, da se lahko Sava pod določenimi pogoji segreje tudi nad 28 °C, kar pomeni preseganje omejitev vodnogospodarskega dovoljenja za obratovanje NEK.

Za pravilno določanje BPK_5 sem se morala najprej seznaniti z izvedbo poskusa. Da bi bili rezultati čim boljši, sem najprej spoznala napravo OxiTop (WTW, 2008). Za obvladovanje naprave sem morala pridobiti rutino in preciznost pri doziranju vzorca in dodatkov. Hkrati je bilo treba določiti prave količine vzorca ter količine cepiva in mineralne raztopine, ki se med seboj razlikujejo glede na stanje vodotoka oziroma podatke o vzorcu. Da bi končne poskuse opravljala s čim manj napakami in čim bolj zanesljivo, sem začetne vzorce savske vode, ki so bili odvzeti na naključnih mestih med Krškim in Brežicami, večkrat analizirala pod različnimi pogoji. Podrobnejši opis postopkov je podan v poglavju 3.1. Ker je bilo v tistem obdobju precej padavin in je Sava narasla, so vzorci bili praktično neonesnaženi z organskimi snovmi, tako da nisem zaznala nikakršne porabe kisika. Ker nisem vedela, ali je v vzorcu premalo hranil ali mikroorganizmov za razgradnjo, sem v naslednjem koraku pridobila aktivno blato iz čistilne naprave v Ajdovščini, ki vsebuje mikroorganizme (v nadaljevanju cepivo) ter pripravila mineralno raztopino in raztopino natrijevega acetata (v nadaljevanju hranilo), ki je služil kot nadomestek za organske snovi v vzorcu savske vode. Z različnimi kombinacijami količine hranila in cepiva sem želela ugotoviti:

- kolikšna je poraba raztopljenega kisika z dodanim hranilom brez dodanega cepiva,
- kolikšna je poraba raztopljenega kisika z dodanim cepivom brez dodanega hranila,
- kolikšna je poraba raztopljenega kisika z dodanim hranilom in cepivom.

Na dodatnih posvetovanjih in izobraževanju sem bila na Kemijskem inštitutu (KI) – Laboratorij za okoljske vede in inženirstvo v Ljubljani. S pomočjo skupine za vode sem določila volumne raztopin in cepiva, ki sem jih uporabljala pri vseh nadaljnjih poskusih. Predstavljena pa mi je bila tudi standardna metoda določanja BPK_5 po Winklerju, ki je predpisana z ISO standardom 5815-1 »Kvaliteta vode – določanje biokemijske potrebe po kisiku po n - dneh (BPK_n)«, vendar je v sklopu diplomske naloge nisem uporabljala. Winklerjeva metoda in analiza s pomočjo OxiTopa se razlikujeta v načinu določanja koncentracije raztopljenega kisika; podrobnejši opis je podan v poglavju 3.1.3.

V naslednjih nekaj poskusih, ki sem jih opravila, sem se trudila odstraniti čim več motenj, ki bi lahko vplivale na rezultat. Šlo je predvsem za temeljito pranje steklovine, organizacijo dela, pridobivanje rutine brez vmesnih nepotrebnih opravil in pravilno pripravo vzorca. Tu moram omeniti, da se lahko z nepravilnim shranjevanjem in prevozom vzorca od kraja vzorčenja do laboratorija izgubi prave vrednosti parametrov, ki jih merimo. Da bi se izognila tej napaki, sem vse vzorce zamrznila. Za prevoz od mesta shranjevanja vzorcev do laboratorija pa sem uporabila hladilno skrinjo, ki je

omogočala, da so se vzorci odtajali enakomerno in po naravni poti ne glede na to, kateri dan so bili vzeti iz zamrzovalnika. S tem sem maksimalno ohranjala vrednosti koncentracije raztopljenega kisika in preprečila propad mikroorganizmov.

Težave, ki sem jih imela pri opravljanju končnih poskusov, so bili predvsem tehnične narave. Najpomembnejše je bilo zadrževanje konstantne temperature v prostoru, kjer je bil OxiTop.

Če povzamem zgoraj napisano, je delo v laboratoriju potekalo na naslednji način:

- najprej sem se praktično seznanila z metodo in aparaturo, pri čemer sem preko vrste poskusov določila končne volumne cepiva in hranil za določanje BPK_5 vzorca savske vode;
- temperature, pri katerih sem izvajala poskuse, sem določila na podlagi temperatur Save na odseku Krško - Brežice za poletni in jesenski letni čas, ko so temperature najvišje, in na podlagi rezultatov študij, ki so obravnavale toplotno obremenitev Save s strani NEK in bodoče HE Brežice;
- vzorčenje sem opravila pod starim savskim mostom v Brežicah, kjer se predvideva, da je hladilna voda iz NEK že popolnoma premešana z ostalo savsko vodo. Mesto vzorčenja je od točke izpusta oddaljeno dobrih 7 km;
- vzorce sem po posvetu na KI pripravila po določenem postopku v steklenicah, ki so sestavni del garniture OxiTop; opremljene z merilnimi glavami sem inkubirala pet dni v termostatu;
- po petih dneh sem odčitala rezultate z merilnih glav;
- rezultati poskusov so vrednosti biokemijske potrebe po kisiku v odvisnosti od temperature in časa; podani in analizirani so v poglavju 4.1.

Modeliranje koncentracij raztopljenega kisika sem naredila s pomočjo Streeter – Phelpsove enačbe za določanje profila raztopljenega kisika v vodotoku. Za vhodne podatke sem uporabila rezultate analize BPK v laboratoriju in meritev, ki sem jih opravila na terenu (začetna koncentracija raztopljenega kisika).

$$C = C_s - \left[(C_s - C_0)e^{-K_2x/v} + \frac{K_1L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1x/v} - e^{-K_2x/v}) \right]$$

Za izračunavanje električne energije, ki jo je NEK porabila za obratovanje hladilnih celic v neugodnih hidroloških in vremenskih pogojih (sušna obdobja, visoke temperature vode in nizki pretoki), sem zbrala 10-minutne avtomatske meritve pretokov, temperature vode in moči generatorja ter izračunane vrednosti ΔT za leta 2003, 2006, 2007 in 2008. S pomočjo teh podatkov sem lahko določila obdobja, v katerih so hladilne celice delovale zaradi visokih temperatur reke in nizkih pretokov. S tem sem želela oceniti, koliko bi s spremembo omejitev vodnogospodarskih dovoljenj za delovanje elektrarne lahko znižali lastno rabo proizvedene električne energije oziroma koliko več bi je lahko poslali v omrežje.

3.1 Laboratorijsko delo

V laboratoriju sem določala biokemijsko potrebo po kisiku s pomočjo manometrične naprave OxiTop. Cilj je bil določiti porabo raztopljenega kisika za razgradnjo organskih snovi v Savi v profilu starega savskega mosta v Brežicah.

3.1.1 VZORČENJE IN SHRANJEVANJE VZORCEV

Vzorčenje savske vode je potekalo pod starim savskim mostom v Brežicah (slika 11). V sredinskem delu je reka Sava hitra, ob bregovih pa počasnejša in zato primerna za vzorčenje. Vzorčenje sem opravila pri pretoku $66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ v začetku oktobra 2008.

Ker sem rabila večje količine vzorca zaradi večkratne ponovitve poizkusa, sem vse vzorčevalne posode z vodo hranila v zamrzovalniku. S tem sem se izognila večjim odstopanjem začetne vrednosti raztopljenega kisika zaradi shranjevanja in prevoza vzorcev do laboratorija.



Slika 11: Mesto vzorčenja pod starim savskim mostom v Brežicah

3.1.2 ANALIZNE METODE

Ob vzorčenju sem na terenu izmerila pH, temperaturo vode ter koncentracijo raztopljenega kisika. V laboratoriju pa sem določila BPK₅.

Tabela 7: Uporabljene analizne metode za določitev vrednosti posameznih parametrov

| Parameter | Enota | Podano kot | Merilni princip | Referenčni standard |
|------------------|--------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Temperatura vode | °C | | EL | DIN 38404-4 |
| Raztopljen kisik | mg L ⁻¹ | O ₂ | EL | ISO 5814 |
| pH | - | | EL | ISO 10523 |
| BPK ₅ | mg L ⁻¹ | O ₂ | MM | EN 1988-2 |

EL – elektrometrija

MM - manometrija

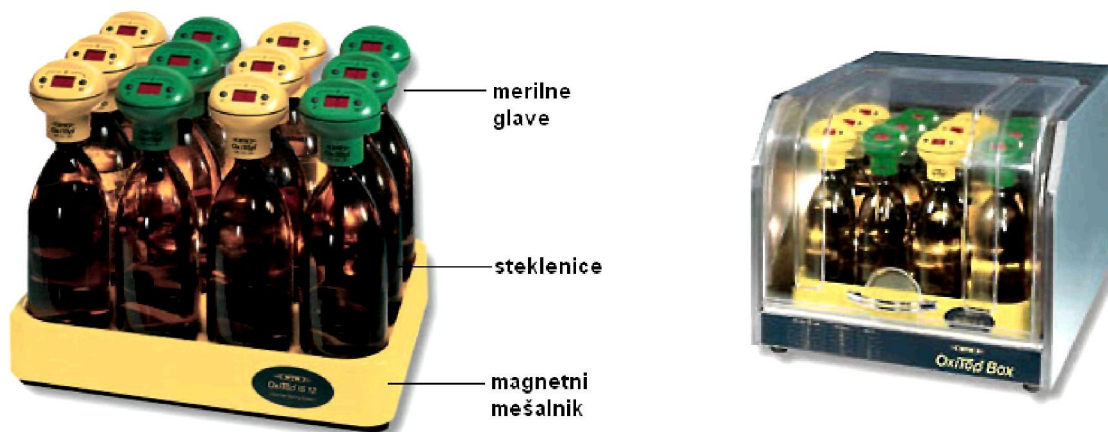
3.1.3 APARATURA

Klasičen postopek določanja BPK je Winklerjeva metoda. Po potrebi razredčen vzorec se nalije v stekleničke in se inkubira pet dni pri 20 °C. Koncentracija raztopljenega kisika se izmeri pred začetkom in po koncu inkubacije. Določi se jo kemijsko (po Winklerju) ali z elektrokemično kisikovo elektrodo. BPK izračunamo kot razliko obeh vrednosti. BPK se lahko določa tudi po poljubnem številu dni, npr. po sedmih (BPK₇), dvanajstih (BPK₁₂) ali osemindvajsetih (BPK₂₈) dneh.

V mojem primeru sem uporabila OxiTop® IS12 sistem (WTW 2008), ki omogoča avtomatske meritve in shranjevanje podatkov petih dni. Princip delovanja je merjenje pritiska v zaprtem sistemu. Mikroorganizmi pri razgradnji porabljajo kisik in sproščajo ogljikov dioksid. Ta se veže na natrijev hidroksid (NaOH). Zaradi porabe kisika se nad vzorcem ustvarja podtlak. Vrednosti izmerjene razlike v pritisku se preračunajo v vrednost BPK v mg L⁻¹.

Za uporabo OxiTopa sem se odločila tudi zaradi termostata, ki omogoča analogno nastavitve temperature v obsegu od +5 °C do +50 °C.

Naprava je sestavljena iz termostata (kovinska škatla s plastičnim pokrovom), električnega magnetnega mešala, 12 stekleničk, 12 gumijastih tulcev in 12 merilnih glavic (slika 12).



Slika 12: OxiTop® IS 12 (www.globalw.com/products/oxitop.html, z dne 17. 2. 2009)

3.1.4 IZVEDBA DOLOČITVE BPK

Biokemijska potreba po kisiku je množina kisika, ki je potrebna za biokemijsko razgradnjo organskih snovi s pomočjo mikroorganizmov, ki jih vzorec vsebuje. Uporablja se za ugotavljanje čistosti iztoka iz komunalnih čistilnih naprav, za določanje stopnje onesnaženosti komunalne odpadne vode, stoječih in tekočih vod z razgradljivimi organskimi snovmi.

V Sloveniji se BPK izvaja po ISO 5815-1, mednarodnem standardu za določitev kakovosti vode.

Standardni postopek zahteva inkubacijo vzorca pri temperaturi 20 °C. Ker pa želimo prikazati toplotni vpliv NEK na Savo, sem teste izvedla tudi pri 25 in 30°C. Postopek je bil pri vseh temperaturah enak.

3.1.4.1 Reagenti

Solne raztopine

Raztopina fosfatnega pufra (R1)

8,5 g kalijevega dihidrogen fosfata (KH_2PO_4),
 21,75 g dikalijevega hidrogen fosfata (K_2HPO_4),
 33,4 g dinatrijevega hidrogen fosfata heptahidrata ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) in
 1,7 g amonijevega klorida (NH_4Cl) se raztopi v 500 ml vode. Raztopina se razredči do enega litra.

Raztopina magnezijevega sulfata heptahidrata (R2)

22,5 g magnezijevega sulfata heptahidrata ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) se raztopi v vodi in razredči do enega litra.

Raztopina kalcijevega klorida (R3)

27,5 g kalcijevega klorida (CaCl_2) se raztopi v vodi in razredči do enega litra.

Raztopina železovega(III) klorida heptahidrata (R4)

0,25 g železovega(III) klorida heptahidrata ($\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$) se raztopi v vodi in razredči do enega litra.

Raztopina natrijevega acetata

0,13 g L^{-1} natrijevega acetata

Cepivo

Kot cepivo sem uporabila iztok iz komunalne čistilne naprave v Ajdovščini, ker vsebuje zadostno količino mikroorganizmov, ki so potrebni za določanje BPK. Pred uporabo mora cepivo mirovati v odprti posodi vsaj 2 do 3 ure.

3.1.4.2 Izvedba

Za pravilen potek BPK testa mora biti vzorec v območju nevtralnega, njegov pH mora biti med 6 in 8. V primeru, da so vrednosti izven tega območja, je potrebna nevtralizacija z natrijevim hidromoksidom (NaOH) ali klorovodikovo kislino (HCl).

Vzorec savske vode

Uporablja se vzorec vode brez dodatka solnih raztopin in cepiva. Cepivo se doda samo v primeru, če vzorec vode predhodno zamrznemo.

Slepi vzorec

V litrsko bučko do polovice nalijemo destilirano vodo. Dodamo po 1 ml vsake od solnih raztopin (R1, R2, R3 in R4) in 4 ml cepiva, nato dolijemo destilirano vodo do oznake.

Kontrolni vzorec

V litrsko bučko do polovice nalijemo destilirano vodo. Dodamo po 1 ml vsake od solnih raztopin (R1, R2, R3 in R4), 4 ml cepiva in 0,13 g natrijevega acetata.

Volumen vzorca, ki ga bomo imeli v steklenicah, izberemo s pomočjo tabele 8 glede na pričakovano porabo kisika za razgradnjo. Redčenje vzorca pri tej metodi ni potrebno. Ob izračunu končne porabe kisika množimo rezultat z ustreznim, v tabeli navedenim faktorjem.

Tabela 8: Izbira količine vzorca glede na pričakovano porabo kisika za razgradnjo (WTW, 2008)

| Pričakovana poraba kisika (mg/l) | Volumen vzorca (ml) | Faktor pri izračunu |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0 - 40 | 432 | 1 |
| 0 - 80 | 365 | 2 |
| 0 - 200 | 250 | 5 |
| 0 - 400 | 164 | 10 |
| 0 - 800 | 97 | 20 |
| 0 - 2000 | 43,5 | 50 |
| 0 - 4000 | 22,5 | 100 |

Za moje vzorce je bila pričakovana poraba kisika do 20 mg L^{-1} , kar pomeni, da sem v steklenice natočila 432 ml vzorca savske vode, slepega vzorca in kontrolnega vzorca.

V steklenice dodamo še magnet, ki v kombinaciji z magnetnim mešalom zagotavlja konstantno mešanje. V vrat pa namestimo gumijasti tulec, v katerega s pinceto vstavimo po dve tableti natrijevega hidroksida, ki v procesu razgradnje veže nase sproščeni ogljikov dioksid. Če natrijevega hidroksida ne bi dodali, ne bi zaznali spremembe tlaka v posodi (porabljeni kisika in sproščeni ogljikov dioksid bi kompenzirala tlačne razlike). Na steklenico namestimo glavo z manometrom ter pustimo pet dni, da poteče biološka razgradnja. Po poteku reakcijskega časa odčitamo vrednost BPK_5 .

3.2 Model raztopljenega kisika v reki

Profil raztopljenega kisika sem določevala z inkrementalnim izračunom (za izbrano časovno obdobje v okviru petih dni). Postopek izračuna je zasnovan na Streeter – Phelpsovi enačbi upošteva rezultate analize BPK vzorca. Primer izračuna je podan v poglavju 4.2 tabela 10, kompleten pregled izračunov pa je podan v prilogi D.

3.3 Izračun znižanja učinkovitosti NEK zaradi delovanja hladilnih celic

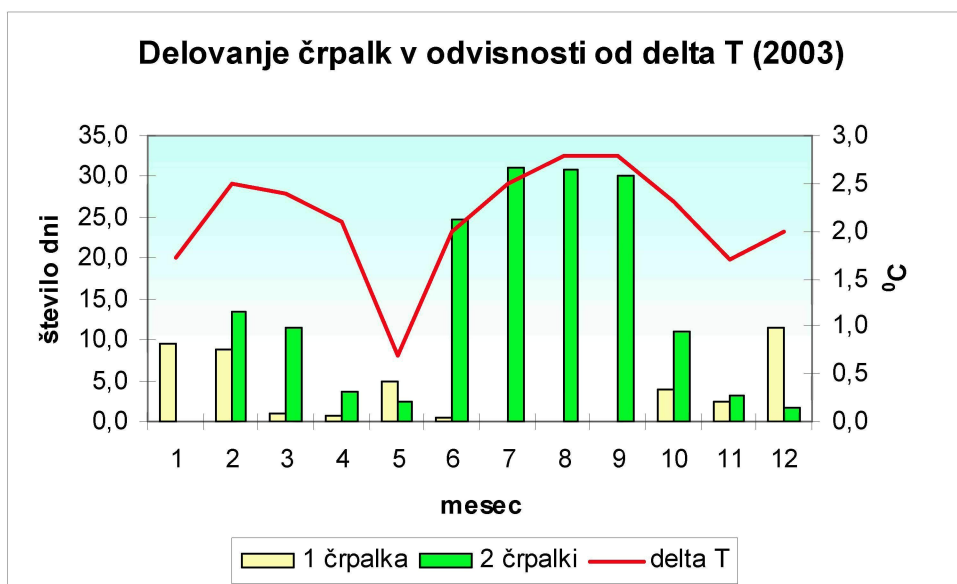
Zagon in časovna doba delovanja hladilnih celic sta odvisna predvsem od dveh dejavnikov: temperature in pretoka Save. V zgodovini obratovanja NEK je zaradi hidroloških pogojev prišlo do občasno manjše proizvodnje. Tako je npr. leta 1993 elektrarna morala obratovati na znižani moči (med 70 in 90 %) 1145 ur oziroma več kot mesec in pol. Podobni hidrološki pogoji so se pojavili tudi leta 2003, ko je na znižani moči obratovala 2232 ur oziroma tri mesece. Posledično je bilo proizvedenih 350 GWh električne energije manj kot leta 2002 (IBE, 2006).

Za leto 2003 je podana podrobnejša analiza delovanja hladilnih celic v odvisnosti od pretokov in temperature in s tem povezane proizvodnje električne energije v poletnih mesecih, medtem ko so podatki za leta 2006, 2007 in 2008 grafično podani v prilogi C.

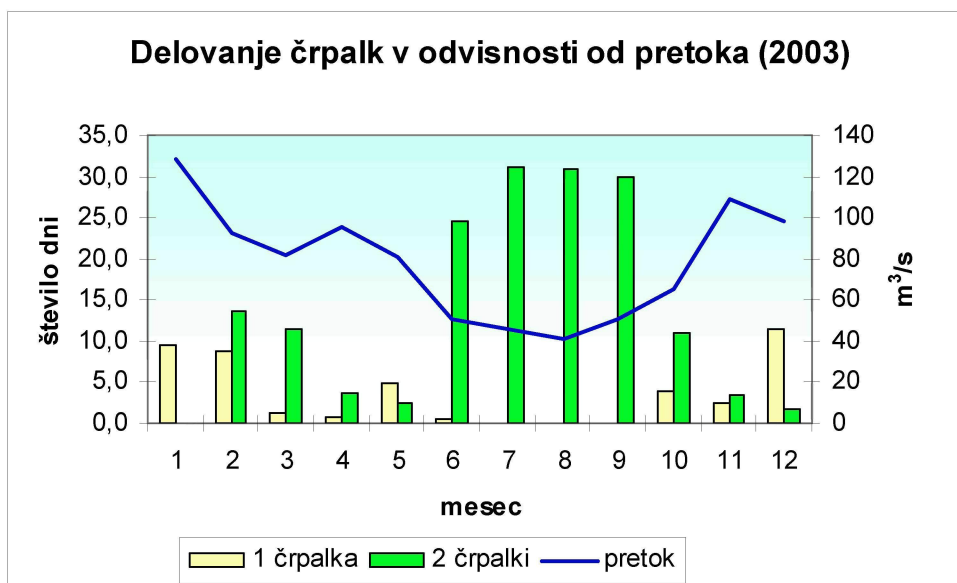
Kot že omenjeno je bilo leto 2003 glede na naravne pogoje neugodno za obratovanje NEK. Iz tabel 2 in 3 je razvidno, da je Sava v poletnih mesecih dosegla temperaturo tudi nad 25 °C in da so bili pretoki v tem obdobju okoli 50 m³ s⁻¹. Pri temperaturah višjih od 25 °C morajo delovati vse hladilne celice, da ne prekoračijo omejitev iz VG dovoljenja. Hkrati lahko NEK obratuje na nižani moči.

Na sliki 13 je podan prikaz delovanja hladilnih celic po mesecih in preračunane razlike med temperaturami Save in temperaturami segrete vode (ΔT). Delovanje hladilnih celic je prikazano preko delovanja črpalk, ki dovajajo hladilno vodo v celice.

a)



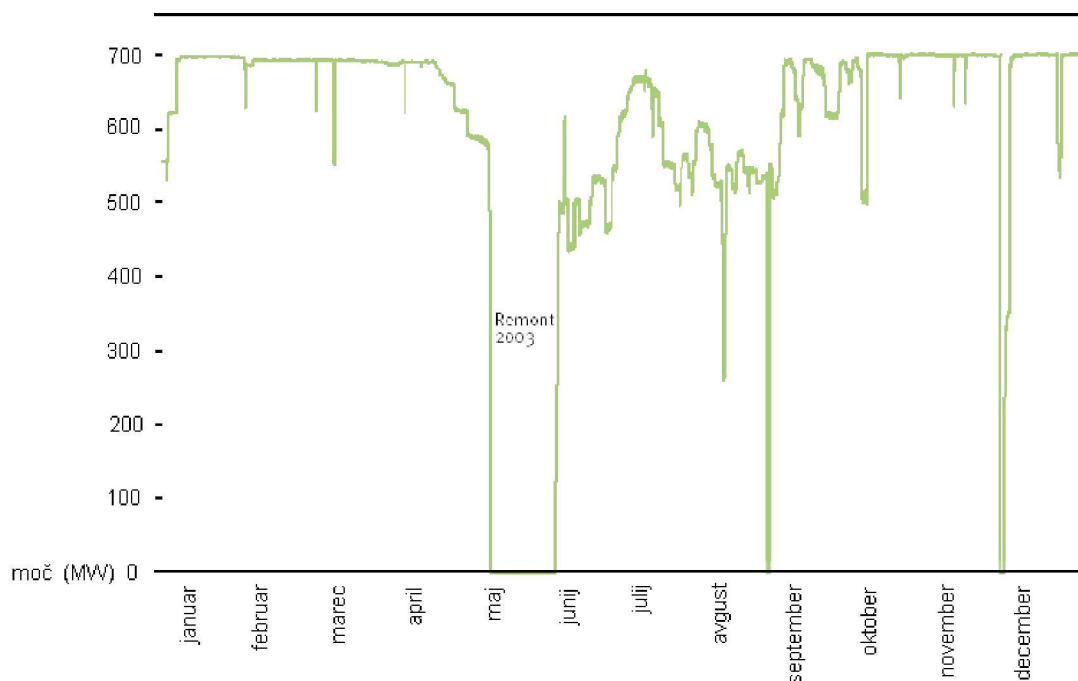
b)



Slika 13: Grafični prikaz delovanja črpalk hladilnih celic v letu 2003: a) odvisnost od deltaT, b) odvisnost od pretoka Save

Iz grafov je dobro razvidna odvisnost delovanja hladilnih celic od nihanja pretokov Save in temperature. Padec ΔT in nižje število dni delovanja hladilnih celic v maju je posledica remonta, ki je nastopil konec aprila in trajal do začetka junija.

Črpalke so v tem letu skupno delovale 207 dni oziroma osem mesecev in pol, od tega štiri mesece v poletnem času. Zaradi izrednih hidroloških pogojev je bilo treba znižati tudi moč elektrarne. Obratovanje je prikazano na sliki 14.



Slika 14: Diagram proizvodnje za leto 2003 (NEK, Letno poročilo 2003)

Iz diagrama je razvidno, da je elektrarna v poletnih mesecih (od začetka junija do konca septembra) obratovala s povprečno močjo 550 MW oziroma 78 % izkoristkom. Zmanjšana moč v takem časovnem obdobju predstavlja velik finančni izpad. Znižana moč v avgustu je posledica čiščenja kondenzatorja. Ostala vmesna znižanja moči so posledica rednih vzdrževalnih del.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 Določanje biokemijske potrebe po kisiku pri temperaturah 20 °C, 25 °C in 30 °C

V tabeli 9 so podane izmerjene vrednosti BPK za pet dni. Vzorec je bil odvzet enkrat in v treh serijah analiziran pri treh različnih temperaturah (20 °C, 25 °C in 30 °C). Meritve so bile avtomatske, odčitavanje pa je potekalo po končani petdnevni analizi.

Podatki ob odvzemu vzorca (meritve sem opravila na terenu) so naslednji:

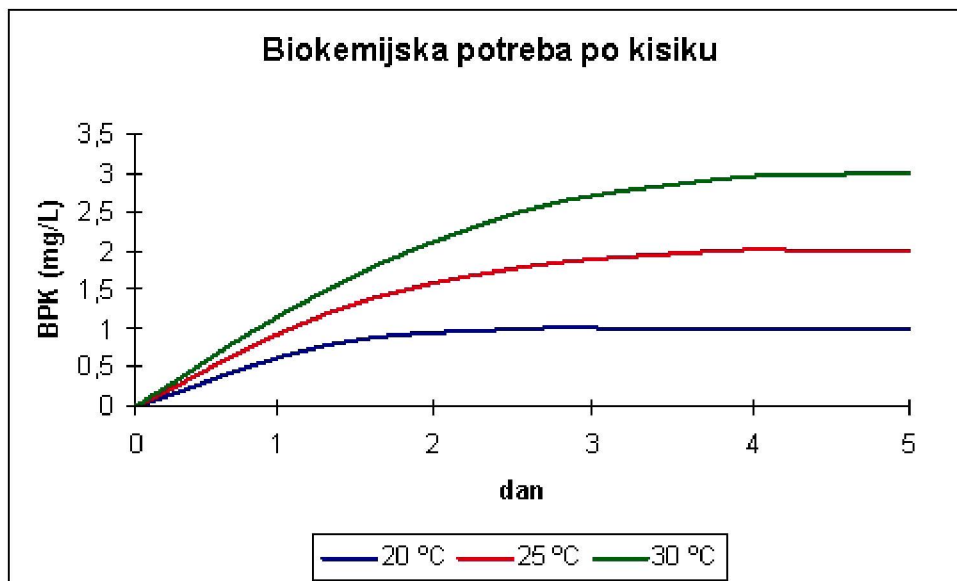
$$Q_{\text{Save}} = 66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$
$$T_{\text{Save}} = 15,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$C_{\text{O}_2} = 8,51 \text{ mg L}^{-1}$$

Tabela 9: Izmerjene vrednosti BPK_5 v mg L^{-1} v odvisnosti od temperature – sinteza vseh meritev.

| dan/T | 20 °C | 25 °C | 30 °C |
|----------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 3 |
| BPK_5 | 1 | 2 | 3 |

Iz tabele 9 lahko razberemo, da je vrednost BPK_5 pri 20 °C 1 mg L^{-1} , pri 25 °C 2 mg L^{-1} in pri 30 °C 3 mg L^{-1} . Vse vrednosti so nizke, kar pomeni da je bila Sava v času odvzema vzorca malo organsko onesnažena in da toplotna obremenitev iz NEK v takšnih razmerah nima velikega učinka na razgradnjo.

Za določanje profila raztopljenega kisika na osnovi Streeter – Phelpsove enačbe sem narisala krivulje, ki prikazujejo vrednosti BPK za obdobje 5-ih dni. Te so zbrane na sliki 15.



Slika 15: Grafični prikaz biokemijske potrebe po kisiku pod starim savskim mostom pri 20 °C, 25 °C in 30 °C.

4.2 Določanje profila raztopljenega kisika pod NE Krško pri temperaturah 20 °C, 25 °C in 30 °C

Profil raztopljenega kisika sem določila s pomočjo inkrementalnega izračunavanja profila raztopljenega kisika, ki temelji na enačbah 6 – 12.

Postopek je sledeč:

Časovna lestvica in vrednosti BPK so odčitani iz grafa BPK (slika15) in prikazani v kolonah 1, 2 in 3 tabele 10. Poraba kisika v drugem štiriurnem intervalu (med 4. in 8. uro) je $0,15 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, kar je podano v koloni 4. V 5. koloni je podan deficit. Začetni deficit znaša $0,6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, ker je $C_{S(20^\circ\text{C})} = 9,1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ in koncentracija kisika po 4 urah $8,5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ (kolona 8). Deficit je nato množen s konstanto prezračevanja za reko (K_2) in časovnim intervalom (Δt). S tem je dobljena množina kisika, ki pride v sistem s prezračevanjem. Vrednost je podana v koloni 6. Rezultati v koloni 6 so nato odštet od rezultatov v koloni 4, razlike so zapisane v koloni 7. S tem je dobljena količina kisika, ki se je v tem časovnem intervalu porabila ali navezala v sistem. Vrednost iz kolone 7 se odšteje od vrednosti koncentracije kisika v koloni 8 in prišteje vrednosti deficita v koloni 5, kar omogoča nadaljnje izračunavanje. Računski postopek se ponovi za vse naslednje časovne intervale. Rezultate iz kolone 8 narišemo v odvisnosti od časa (slika 16) in dobimo profil raztopljenega kisika (RK) v reki (Gaudy, 1975).

Za izračunavanje profila RK za Savo dolvodno od NEK sem uporabila dve vrednosti prezračevalne konstante (K_2). Prvo sem izračunala na podlagi predvidenih podatkov o akumulacijskem bazenu HE Brežice in je na sliki 16 podan kot » K_2 izračunan«. Globina bazena bo v povprečju na sredini struge 13 metrov, hitrost toka pa bo po predvidevanju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo ¹ dvakrat manjša od sedanje hitrosti Save.

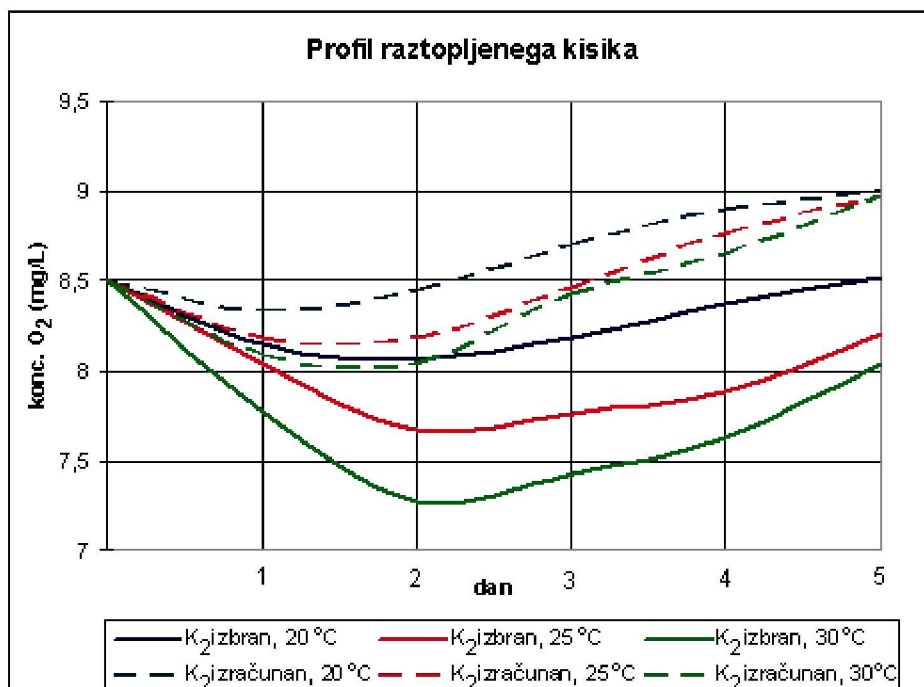
¹ IBE je v sodelovanju z FGG naredil študijo »Zagotavljanje potrebnih zmogljivosti hlajenja NE Krško po izgradnji HE Brežice in HE Mokrice«. Študija je bila predstavljena na »Predstavitvi študij, ki opredeljujejo vodni vir – reko Savo« na Agenciji RS za varovanje okolja v januarju 2009.

V sedanjem stanju ob povprečnem letnem pretoku $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hitrost toka znaša $3,57 \text{ m s}^{-1}$. Na podlagi predvidevanja FGG bo hitrost toka v bazenu pri enakem povprečnem letnem pretoku $1,78 \text{ m s}^{-1}$. K_2 sem izračunala po enačbah, ki sta jih izpeljala O'Conner in Dobbins (enačba 3) ter Isaac in Gaudy (tabela 3). Povprečna vrednost obeh izračunov je $K_2 = 0,17 \text{ dan}^{-1}$. Zaradi omejenega poznavanja hidrodinamike bodočega zaježitvenega bazena, sem se odločila, da K_2 določim še preko opisno določenih vrednostih, ki so podane v tabeli 2. Za K_2 sem izbrala vrednost $K_2 = 0,23 \text{ dan}^{-1}$, ki je določena za velika jezera in je na sliki 16 podan kot » K_2 izbran«. V prilogi D so zbrane vse tabele izračunov profila raztopljenega kisika pri različnih temperaturah.

Tabela 10: Izračun profila raztopljenega kisika pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in izbranem K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,25 | 0,15 | 0,60 | 0,02 | 0,13 | 8,50 |
| | 8 | 4 | 0,4 | 0,15 | 0,73 | 0,03 | 0,12 | 8,37 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,55 | 0,20 | 0,85 | 0,03 | 0,17 | 8,25 |
| | 16 | 4 | 0,75 | 0,15 | 1,01 | 0,04 | 0,11 | 8,09 |
| | 20 | 4 | 0,9 | 0,10 | 1,12 | 0,04 | 0,06 | 7,98 |
| 1 | 24 | 12 | 1 | 0,00 | 1,18 | 0,13 | -0,13 | 7,92 |
| | 36 | 12 | 1 | 0,00 | 1,05 | 0,12 | -0,12 | 8,05 |
| 2 | 48 | 12 | 1 | 0,00 | 0,93 | 0,10 | -0,10 | 8,17 |
| | 60 | 12 | 1 | 0,00 | 0,83 | 0,09 | -0,09 | 8,27 |
| 3 | 72 | 12 | 1 | 0,00 | 0,74 | 0,08 | -0,08 | 8,36 |
| | 84 | 12 | 1 | 0,00 | 0,66 | 0,07 | -0,07 | 8,44 |
| 4 | 96 | 12 | 1 | 0,00 | 0,59 | 0,06 | -0,06 | 8,51 |
| | 108 | 12 | 1 | 0,00 | 0,52 | 0,06 | -0,06 | 8,58 |
| 5 | 120 | | 1 | | 0,46 | | | 8,64 |

Slika 16 prikazuje profile raztopljenega kisika pri dveh različnih prezračevalnih konstantah in pri treh različnih temperaturah (20 °C, 25 °C in 30 °C).



Slika 16: Prikaz profila raztopljenega kisika pri izbrani in izračunani prezračevalni konstanti (K_2) v odvisnosti od temperature

Iz grafa lahko razberemo, da se profili RK glede na vrednost prezračevalne konstante razlikujejo. Pri izbrani prezračevalni konstanti je vpliv onesnaženja večji in daljši, saj je reka počasna. Medtem ko je pri izračunani prezračevalni konstanti proces prezračevanja hitrejši (hitrejši tok), stanje pa je po petih dneh celo boljše kot na začetku. Take razmere bi nastopile v idealnih pogojih, ko po točkovnem vnosu onesnaženja v reko, ne bi bilo več porabe kisika.

Razlike nastopijo tudi pri različnih temperaturah, kar je bilo pričakovano, saj je biokemijska potreba po kisiku pri višjih temperaturah višja. Najnižja koncentracija kisika pri 20 °C nastopi po enem dnevu in pol in znaša okoli 8,1 mg L⁻¹, nato se povišuje do začetne vrednosti. Pri manjših obremenitvah Save s toplotno energijo, pri čemer temperatura Save naraste na 25 °C, najnižja vrednost koncentracije RK nastopi po drugem dnevu in znaša okoli 7,6 mg L⁻¹. Najnižjo vrednost koncentracije RK lahko odčitamo pri segretju Save na 30 °C, in sicer 7,3 mg L⁻¹ drugi dan po izpustu toplotne obremenitve.

Vidimo lahko, da koncentracija RK v najslabšem primeru pade za 1,2 mg L⁻¹. Glede na hitrost reke pri običajnih pretokih lahko sklepamo, da se masa vode zgornje plasti bazena, ki priteče mimo NEK, v nekaj urah ali nekaj dneh prelije preko jezusa HE Brežice. To pomeni, da bo padec vrednosti RK v akumulacijskem bazenu pri današnji kakovosti vode zaradi dodatne toplotne obremenitve Save s strani NEK majhen.

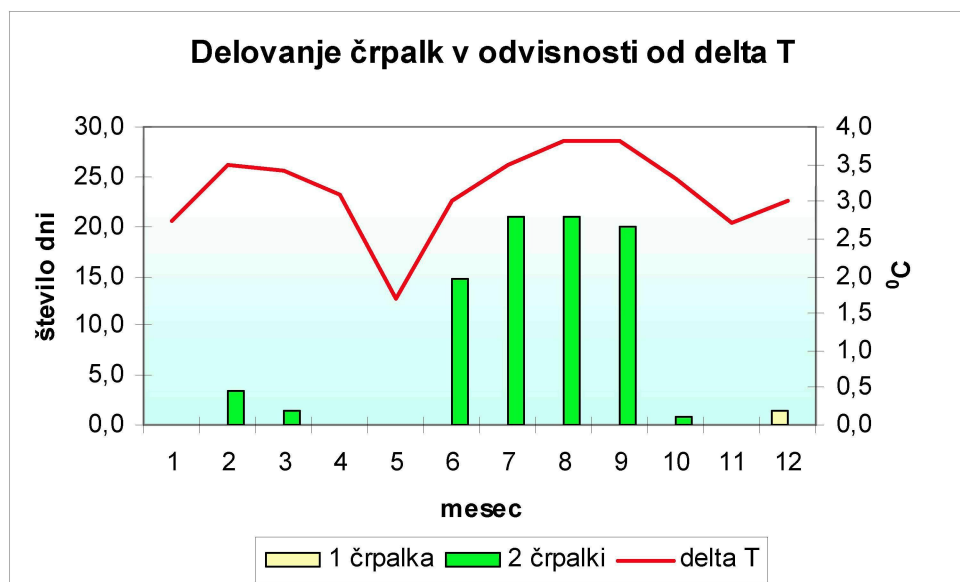
4.3 Prikaz delovanja hladilnih celic pri spremenjenih določilih vodnogospodarskega dovoljenja

Z analizo podatkov o pretokih Save, pretokih hladilne vode skozi CWS, temperatur Save in temperatur hladilne vode na iztoku v posameznih letih sem želela ugotoviti, koliko dni v letu bodo hladilne celice obratovala ob spremenjenih vodnogospodarskih pogojih.

Upoštevala sem izkušnje iz leta 2003 (poglavje 3.3) in ocenila delovanje hladilnih celic ob naslednjih omejitvah:

- prirast temperature Save v točki mešanja (ΔT) ne sme biti višji od 4 °C v dnevnem povprečju
- najvišja temperatura Save v točki mešanja ne sme biti višja od 29 °C v dnevnem povprečju

Slika 17 grafično prikazuje delovanje hladilnih celic po posameznih mesecih pri novih omejitvah za leto 2003.



Slika 17: Grafični prikaz delovanja črpalk hladilnih celic pri spremenjeni omejitvi iz vodnogospodarskega dovoljenja ($\Delta T = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Iz grafa je razvidno, da bi v letu 2003 (z možnostjo izpusta segrete hladilne vode v Savo pri višjih omejitvah) hladilne celice delovale dobrih 123 dni manj oziroma 59 % manj dni kot s sedanjimi omejitvami. Glede na podano porabo električne energije za ventilatorje in črpalke hladilnega sistema (podano v poglavju 2.3.1) sem izračunala porabo električne energije za delovanje hladilnih celic za leto 2003 pri sedanjih in novih omejitvah.

- Poraba električne energije za delovanje hladilnih celic pri sedanjih omejitvah znaša slabih 28 GWh,
- poraba električne energije za delovanje hladilnih celic pri novih omejitvah pa dobrih 12 GWh.

Taka »izguba« električne energije je nizka v primerjavi z izgubo električne energije zaradi obratovanja elektrarne na znižani moči. Če upoštevamo, da je bilo v tem letu proizvedenih okoli 350 GWh manj električne energije, kot bi jih sicer bilo, če ne bi bilo neugodnih hidroloških razmer oziroma, če bi bili obratovalni pogoji drugačni, lahko rečemo, da je bila skupna izguba velika. V tabeli 11 je finančno ovrednotena izguba električne energije zaradi obratovanja elektrarne na znižani moči. Za primerjavo so vrednosti izgube izračunane po maloprodajnih cenah povprečnega gospodinjstva, ki porabi med 5 in 15 MWh na leto, in srednje velike proizvodne industrije v Posavju, ki letno porabi med 20 in 500 MWh. Maloprodajna cena je v prvem polletju 2008 za gospodinjstvo v tej potrošniški kategoriji znašala 8,49 €/100 kWh brez davkov, za srednje veliko proizvodno industrijo pa 12 €/100 kWh brez davkov. Podatki so dobljeni na internetni strani Statističnega urada Republike Slovenije (www.stat.si/novica_prikazi.aspx?ID=1842, 16. 2. 2009).

| potrošnik | ocenjen izpad prihodka (10 ⁶ €) |
|---------------|---|
| gospodinjstvo | 29,7 |
| industrija | 42 |

Tabela 11: Prikaz ocenjenega izpada prihodka v letu 2003

Kot je prikazano, je bil letni izpad prihodka za leto 2003 visok. Povprečna gospodinjstva v Sloveniji bi za 350 GWh v prvem polletju leta 2008 NE Krško prispevala 29,7 milijonov EUR prihodka, medtem ko bi ji srednje velike industrije prinesle 42 milijonov EUR prihodka.

5 ZAKLJUČKI

Rezultati analize biokemijske potrebe po kisiku so pokazali, da Sava ni močno onesnažena z organskimi razgradljivimi snovmi. Po zaprtju tovarne celuloze in papirja Vipap Videm Krško se Sava uvršča v 2. kakovostni razred (ARSO, 2005).

Z izgradnjo HE Brežice se pričakujejo spremembe vodotoka. Pričakuje se povišanje temperature vode zlasti v zgornjih plasteh bazena, ki pa bodo dolvodno od NEK obremenjene z dodatno toplotno energijo iz hladilnega sistema NEK (slika B4 v prilogi B). Na podlagi analize BPK in izračunov raztopljenega kisika lahko rečem, da se življenjski pogoji zaradi povišane temperature zgornjih plasti v bazenu do maksimalno 30 °C ne bodo bistveno spremenili. Na to kaže profil raztopljenega kisika v reki določen za temperaturo 30 °C. Vrednost BPK₅ pri 30 °C zanaša 3 mg L⁻¹, kar je nižje od predpisanih vrednosti za ciprinidne vode. Ravno tako je koncentracija kisika v celotnem profilu raztopljenega kisika, določenega na podlagi BPK₅, višja od predpisane.

Vrstna sestava rib na odseku med NEK in starim savskim mostom pri Brežicah zajema poleg ciprinidnih vrst tudi nekaj salmonidnih. Pričakuje se, da bodo te vrste izginile iz tega dela Save predvsem zaradi spremenjenega vodnega režima, saj se bo struga Save spremenila iz hitrotekoče v pretočno jezero. Hkrati z izginotjem nekaterih vrst rib se pričakuje porast drugih vrst, ki jim počasni tok bolj odgovarja in ki imajo večje tolerančno območje za temperaturo in vsebnost raztopljenega kisika. Predlagam, da se v sklopu študij opravljenih za HE Brežice naredi tudi študija sprememb ekosistema na odseku med NEK in starim savskim mostom v Brežicah po izgradnji HE Brežice in se celostno ovrednoti toplotne in druge vplive na življenjski prostor vodnih in obvodnih organizmov.

V diplomskem delu je bil obravnavan tudi vpliv zajezitve na NEK. Hidrološke razmere so za obratovanje NEK v poletnih mesecih neugodne. S takim trendom poletnih temperatur in pretokov Save in s sedanjimi omejitvami vodnogospodarskega dovoljenja bo NEK obratovala z manj proizvedene električne energije in posledično z nižjim prihodkom. Samo leta 2003 je NEK poslala v omrežje za okoli 30 milijonov EUR manj električne energije, kot bi je, če bi bili hidrološki pogoji ustrežnejši. Pričakuje se, da zajezitev Save ne bo imela bistvenega vpliva na proizvodnjo NEK. Omejitve, ki jih ima zaradi pomanjkanja vode v strugi reke oziroma zaradi prenizkih pretokov, v večini časa ne bodo več potrebne, saj se bo zaradi zajezitve vodostaj v profilu NEK zvišal za okoli 2,5 metra, pretok vode pa mora ostati nespremenjen (ohranjati se mora povprečni letni pretok Save).

Gospodarski problem ostaja v omejitvah pri segrevanju Save, ki bodo ne glede na novonastale spremembe ostale iste. To pomeni, da bo NEK morala obratovati s pomočjo hladilnih celic ali celo z nižjo močjo zaradi povišanih temperatur vode v bazenu. V tej točki bi bilo smiselno v sklopu zgoraj omenjene študije ekosistema ponovno oceniti smiselnost sedanjih omejitev VG dovoljenja za obratovanje NEK. V novih pogojih bi NEK obratovala z večjim izkoristkom v poletnih mesecih, če bi se ΔT in maksimalna dovoljena temperatura v točki mešanja zvišala za 1 °C ($\Delta T = 4$ °C in $T_{\max} = 29$ °C).

Predlagam, da se raziskava, kot sem jo opravila sama, ponovi in zajame morebitno višje onesnaženje Save z organskimi snovmi, kot je bilo v začetku oktobra 2008. Tako bi še zanesljiveje ugotovili, kolikšne spremembe raztopljenega kisika lahko pričakujemo v Savi v prihodnjem obdobju.

6 VIRI

ARSO: Monitoring kakovosti površinskih vodotokov v Sloveniji, poročila od leta 2001 do 2006, dostopna na internetni strani ARSO – <http://hmljn.rzs-hm.si/vode/reke>, z dne 5. januar 2009

Bowman G., Delfino J. (1980): Sediment oxygen demand techniques: a review and comparison of laboratory an *in situ* system, Water Research, Vol. 14, str. 491 – 499

Brancelj A. (2002): Visokogorska jezera v vzhodnem delu Julijskih Alp, Ljubljana, Založba ZRC-SAZU/NIIB, 266 str.

Bravničar D., Jenčič V., Ocvirk J. (1999): Bolezni sladkovodnih rib, Ljubljana, Racoon, 121 str.

Bricelj M. (1991): Reka in človek – Sava, Ljubljana, Državna založba Slovenije

Cvitanič I. (1999): Analiza možnih kakovostnih sprememb Save v akumulaciji HE Vrhovo v povprečnih in ekstremnih hidroloških pogojih s pomočjo matematičnega modela (povzetek magistrskega dela), Ljubljana, Acta hydrotechnica 17, 25, str. 5 - 65

Direktiva 2006/44/ES

Eichholz G. (1985): Environmental aspects of nuclear power, 5. izdaja, Michigan – Chelsea, Lewis Publishers Inc.

Gaudy A.R., Jr., (1975): Prediction of assimilation capacity in receiving streams, Water and Sewage Works 122 (5,6), str. 62 – 65, 78 - 79

GEOAQUA (2007): Strokovno mnenje o vplivu odvzema savske vode na vodno telo površinskih in podzemnih vod na območju Nuklearne elektrarne Krško, Ljubljana

Glasstone S., Jorda W. H. (1980): Nuclear power and its environmental effects, Illinois, American Nuclear Society

Hach (1992): Water analysis handbook, 2. izdaja, Colorado, Hach Company, 831 str.

Hoffman D. J. in sod. (1994): Handbook of ecotoxicology, New York, CRC Press

a) IBE (2007): HE Brežice – Elaborat razmejitve infrastrukture, Ljubljana

b) IBE (2007): HE Brežice – Vpliv HE Brežice na glavni hladilni (CW) sistem NEK, Ljubljana

IBE (2006): Zagotavljanje potrebnih zmogljivosti hlajenja NE Krško po izgraditvi HE Brežice in HE Mokrice, Ljubljana

IBE (2003): Revision of prefeasibility study »CW system reconstruction«, Ljubljana

IJS (2007): Analiza sprememb radioloških in toplotnih vplivov NE Krško na okolje po zgraditvi HE Brežice – zaključno poročilo, Ljubljana

IJS – SEPO (junij 1989): Tehnična dokumentacija za pridobitev vodnogospodarskega dovoljenja za NE Krško, Ljubljana

Imos Geateh (januar 2006): Poročilo o vplivih na okolje za HE Krško in obvoznico Krško, Ljubljana

Jenčič V. (2007): Strokovno mnenje o temperaturni obremenitvi reke Save za življenje rib, GEO AQUA, Ljubljana

Jobling M. (1995): Environmental biology of fishes, London, Chapman in Hall, 455 str.

Kiely G. (1998): Environmental engineering, Boston, McGraw – Hill Int., 979 str.

Končan J. (1991): Evaluation of dissolved oxygen balance in two shallow turbulent Slovene streams, Water research 25, str. 1357 - 1363

Kontić B. (1979): Določanje biokemijske potrebe po kisiku odvodnih vod v laboratorijskem modelu odvodnika, Diplomsko delo, Ljubljana, 81 str.

Kontić B. (1993): Metoda za ocenjevanje toplotnih vplivov reke, Magistrsko delo, Ljubljana, 90 str.

Koželj B., Vuk D. (1987): Splošna ekologija z varstvom okolja, Ljubljana, Založba Obzorja, 174 str.

Ministrstvo za gospodarstvo: Predstavitev študij, ki opredeljujejo vodni vir – reko Savo, predstavitev iz dne 27.1.2009 v prostorih Agencije RS za varstvo okolja

MOP (2008): Smernice za načrtovanje prostorske ureditve k osnutku DPN za HE Brežice, Ljubljana

MOP (2002): Vodnogospodarsko dovoljenje Nuklearne elektrarne Krško, Ljubljana

NEK: Letno poročilo 2003 – 2007, dostopno na internetni strani NEK (www.nek.si)

NEK (2003): Final system design description, Circulating water system for Krško nuclear power plant, Krško

NEK (1998): USAR – Updated Safety Analysis Report, Revisio 3, Westinghouse, Krško

Ogawa H., Mitsch W. (2005): Modeling of power plant impact on fish population, Environmental management, Vol. 3, No. 4, 321 - 300

Polak J. (2003): Nitrification in the surface water of the Włocławek dam reservoir. The process contribution of biochemical oxygen demand (N – BOD), Polish Journal of Environmental Studies Vol. 13, No. 4 (2004), 415 - 424

Povž M. in sod. (1987): Ihtiološke raziskave reke Save od izliva Savinje do Jesenic na Dolenjskem, Zavod za ribištvo

Povž M., Sket B. (1990): Naše sladkovodne ribe, Ljubljana, Mladinska knjiga, 370 str.

Ricklefs R. E., Miller G. L. (1999): Ecology, 4. izdaja, New York, W. H. Freeman and Company

Rose J. (1991): Water and the environment, Pennsylvania, Gordon and Breach Scienca Publishers, 458 str.

Tarman K. (1992): Osnove ekologije in ekologija živali, Ljubljana, Državna založba Slovenije, 547 str.

Toman M. J. (2007): Voda kot biološka dobrina; Pomen biotehnologije in mikrobiologije za prihodnost, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, str. 1 - 9

Tome D. (2006): Ekologija: organizmi v prostoru in času, Ljubljana, Tehniška založba Slovenije, 344 str.

Savaprojekt d.d. in Acer d.o.o. (2008): Dopolnjen osnutek Državnega prostorskega načrta za HE Brežice

Schnoor J. L. (1996): Environmental modeling: Fate and transport of pollutants in water, air and soil, New York, John Wiley and Sons Inc., 682 str.

Sedej A. in sod. (2006): Napoved kvalitativnih sprememb v akumulacijskih hidroelektrarnah na spodnji Savi, Slovenski vodar 17, str. 7 - 10

Širca A. (2000): Toplotna obremenitev Save dolvodno od Trbovelj, Acta hydrotehnica 18, 29, str. 83 - 95

Širca A. (2004): Toplotna obremenitev Save po izgradnji spodnjesavskih stopenj, Acta hydrotehnica 22, 36, str. 57 – 73

a) Ur. I. RS (2002): Pravilnik o imisijskem monitoringu kakovosti površinske vode za življenje sladkovodnih vrst rib, št. 71

b) Ur. I. RS (2002): Uredba o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih vrst rib, št. 46

c) Ur. I. RS (2002): Zakon o vodah, št. 67

Virtanen T. in sod. (2001): Water Chemistry, Slovakia, Pedagogická spoločnosť Jána Amosa Komenského, 118 str.

Wilcock R.J. (1982): Atmospheric reaeration of the rivers and streams, aquatic oxygen seminar proceedings, Wellington, Water and Soil Miscellaneous Publication št. 29, str. 81 - 86

WTW (228): Priročnik za delo z OxiTopom® IS 12 – Monometric BOD measuring devices

Župec J. (2004): Strategija hladilnih stolpov poleti, SIAP ANALIZE, Maribor

PRILOGE

PRILOGA A: Prikaz akumulacijskega bazena HE Brežice

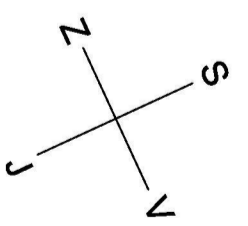
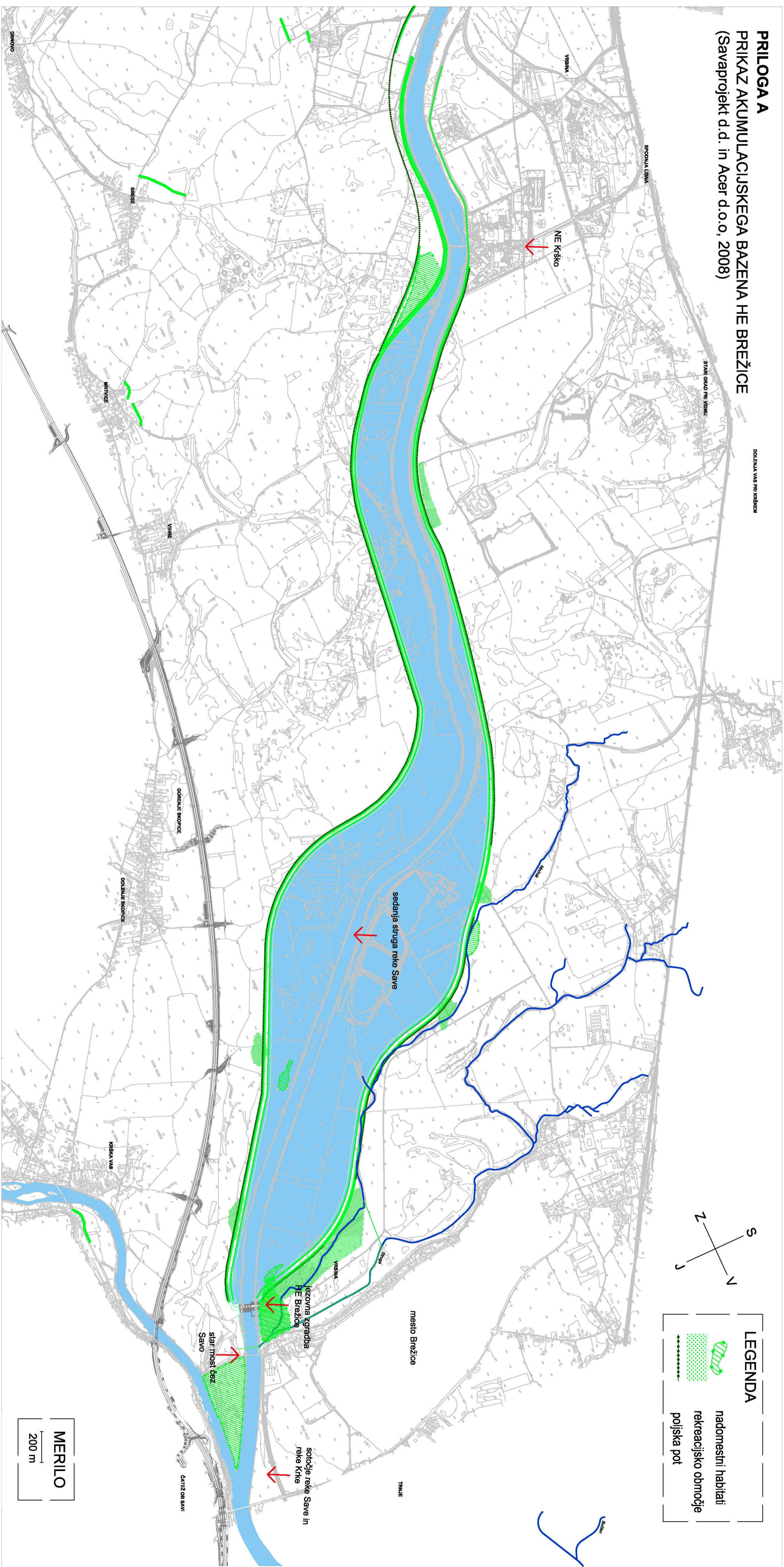
PRILOGA B: Ugotovitve študij v obdobju 2002 - 2007

PRILOGA C: Grafični prikaz delovanja črpalk v odvisnosti od delta T in pretoka za leto 2006, 2007 in 2008

PRILOGA D: Tabele izračunov profila raztopljenega kisika pri različnih temperaturah in z različnimi prezračevalnimi konstantami

PRILOGA A
PRIKAZ AKUMULACIJSKEGA BAZENA HE BREŽICE
 (Savaprojekt d.d. in Acer d.o.o, 2008)

DOLENA VAS PRI KRŠKEM



| LEGENDA | |
|---------|----------------------|
| | nadomestni habitati |
| | rekreacijsko območje |
| | poljska pot |

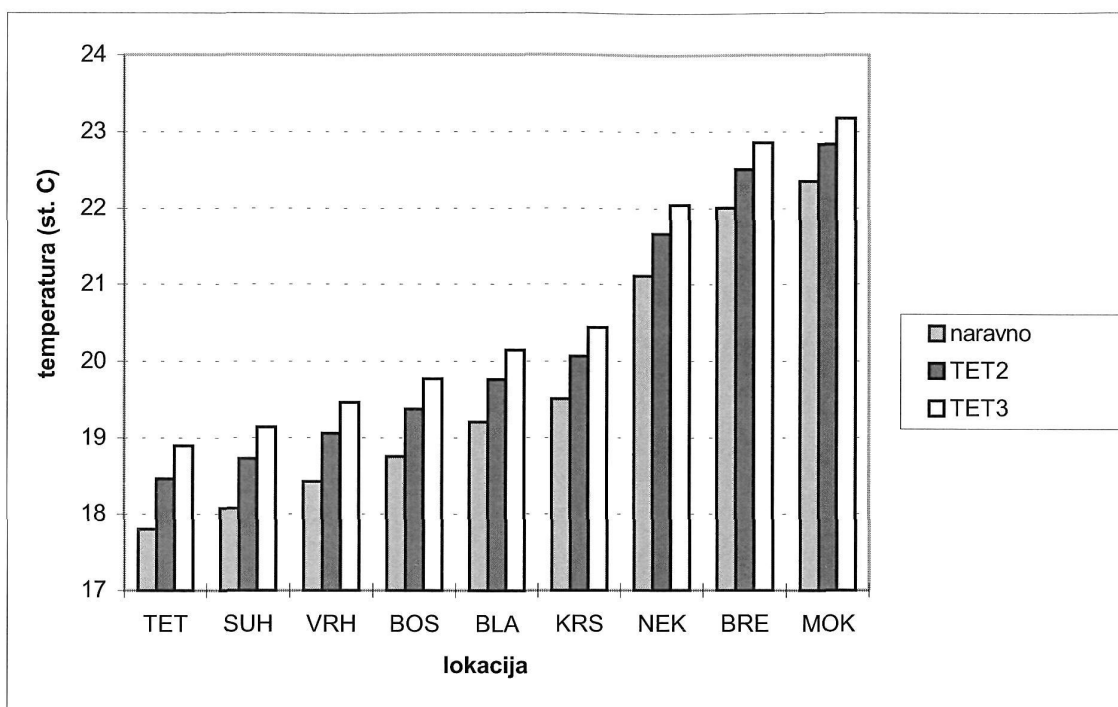
MERILLO
 200 m

PRILOGA B

UGOTOVITVE ŠTUDIJ V OBDOBJU 2002–2007

Pred izgradnjo TET3 je bilo zahtevano, da se jasno definirajo ekološki in s tem povezani ekonomski pogoji za obratovanje tega objekta. Narejena je bila študija »Toplotna obremenitev Save dolvodno od Trbovelj«. V tehnološko – ekološkem delu študije so bile obravnavane tri kombinacije objektov: obstoječe stanje (potrebna je bila izdelava analize stanja), bodoče stanje brez spodnje verige hidroelektrarn in z novo TET3 ter bodoče stanje z verigo hidroelektrarn in TET3 (napoved s pomočjo modeliranja). V študiji je bil ovrednoten vpliv spodnjesavske verige HE na temperaturno stanje Save. Rezultati so pokazali, da se bodo vzdolž bazenov temperature Save v kritičnih poletnih razmerah zaradi naravnega segrevanja na površini zvišale (slika B1). Ugotovili so tudi, da TET3 ne povzroča bistvenih težav s toplotnim onesnaženjem reke Save (Širca, 2000).

Kasneje je bila v povezavi s to študijo opravljena še ena raziskava, ki ima poudarek na temperaturnih spremembah v profilih NEK in HE Mokrice v toplih mesecih (april – september). Rezultati kažejo, da se bodo srednje mesečne rečne temperature po izgradnji celotne verige HE pri NEK povečale do 0,4 °C, pri HE Mokrice pa do 1,6 °C. V razmerah s povratno dobo 4 leta se bo temperatura pri NEK povišala za 2,0 °C, pri HE Mokrice pa za 2,1 °C. Pri povratni dobi 40 let pa bo povišanje temperature znašalo 2,0 °C pri NEK in 2,2 °C pri HE Mokrice (Širca, 2004).



Slika B1: Naraščanje temperature Save vzdolž toka v kritičnih razmerah

V sklopu izdelave Državnega prostorskega načrta (DPN) za HE Brežice je bilo potrebno izdelati študije toplotnih obremenitev Save s strani NEK. Ravno tako pa so

bile podane tudi zahteve s strani NEK, ki predvideva spremembe v obratovanju zaradi izgradnje akumulacijskega bazena. Narejenih je bilo več študij, tu pa sta omenjeni dve, ki sta bili izdelani v zadnjih dveh letih. Prva obravnava v glavnem spremembo temperature Save v bazenu HE Brežice zaradi delovanja NEK, druga pa predvsem spremembo delovanja NEK zaradi izgradnje HE Brežice in nastanka akumulacijskega bazena, vendar je del namenjen tudi toplotnemu onesnaženju zaradi odvajanja odvečne toplote v reko.

»Analiza sprememb radioloških in toplotnih vplivov NE Krško na okolje po zgraditvi HE Brežice« (IJS, 2007)

Študija obravnava prenos in razpršitev toplote in snovi med normalnim obratovanjem pri štirih različnih pretokih Save: $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in $242 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ugotovili so, da se bo Sava pri pretokih pod $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bolj segrevala kot do sedaj in bo pri temperaturah Save med 22 in $24 \text{ }^\circ\text{C}$ lahko sprejela le del odpadne toplote proizvedene pri polni moči elektrarne. Ti deleži naj bi se gibali med 36% pri pretoku $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 54% pri pretoku $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, in 89% pri pretoku $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. V teh primerih bo treba delovati s hladilnimi celicami ali z nižjo močjo elektrarne. Študija predlaga ponovno ovrednotenje vplivov višje temperature Save na organizme ter v primeru, da ni zaznanih negativnih vplivov, spremeniti omejitev za segrevanje Save iz VGD za NEK.

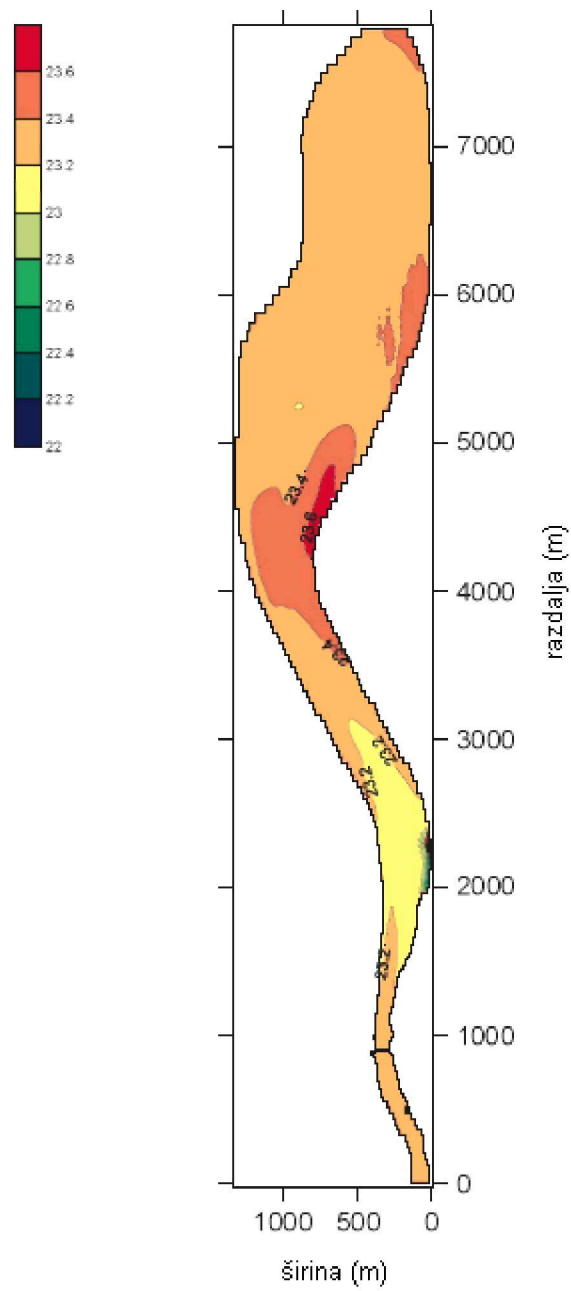
V razmerah upočasnjenega toka Save v jezeru ne bo več mogoče izvajati meritev segrevanja Save zaradi NEK na sedanjem mestu, v točki mešanja. Kot izhaja iz študije bo treba v VGD na novo določiti merilno točko za spremljanje segrevanja Save zaradi izpustov odpadne toplote NEK, npr. ob prelivu pregrade HE Brežice.

»Zagotavljanje potrebnih zmogljivosti hlajenja NE Krško po izgraditvi HE Brežice in HE Mokrice« (IBE, 2006)

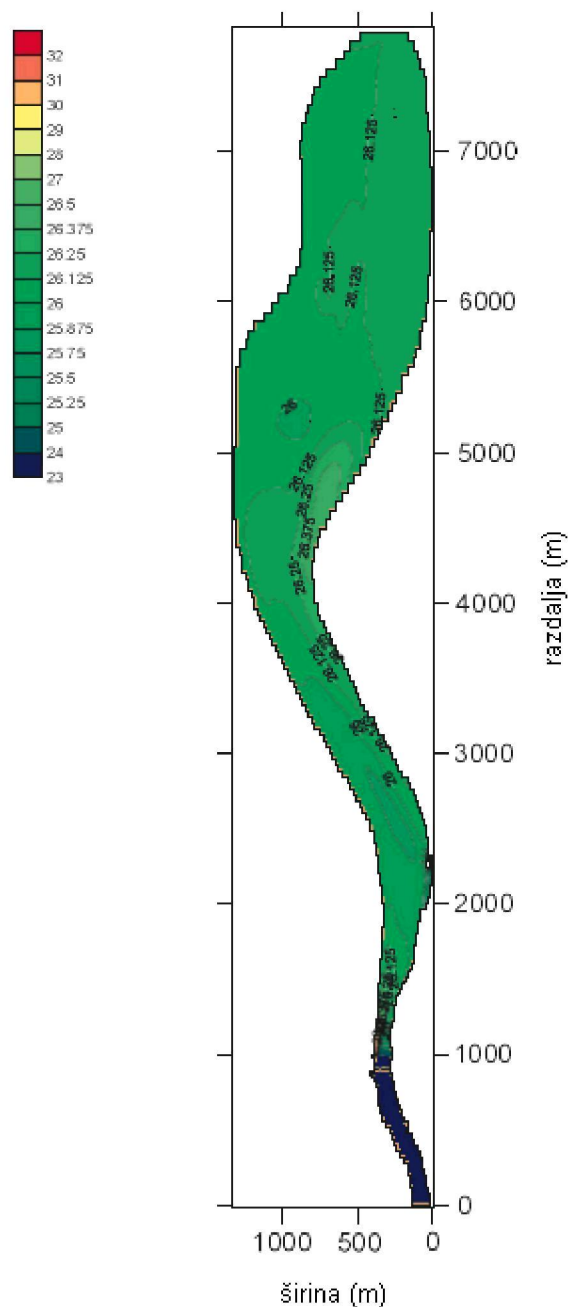
Študija obravnava termične vplive posameznih objektov na reko Savo kot celoto ter možne medsebojne vplive NEK in verige HE. Izdelanih in zagnanih je bilo več simulacij, ki prikazujejo stanja akumulacije HE Brežice v primeru, ko NE Krško obratuje in ko NE Krško ne obratuje. Ker je obratovalnih pogojev veliko (kombinacije velikosti pretoka Save, temperatura Save, temperatura ozračja in sončno sevanje) so za vhodne podatke uporabili kritične razmere. Kot kritične razmere so določili pretok Save $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in temperaturo Save $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Tako kot v prejšnji študiji je tudi tukaj upoštevana kota zaježitve HE Brežice $152,50$.

Rezultati modeliranja so pokazali naslednje:

V primeru brez obratovanja NEK je temperatura vode po šestih dneh v večjem delu bazena med $23,2$ in $23,6 \text{ }^\circ\text{C}$. V primeru obratovanja NEK pa je temperatura med $25,5$ in $26,2 \text{ }^\circ\text{C}$. V delu bazena v neposredni bližini iztočnega kanala NEK in delno dolvodno od njega pa je temperatura povišana za več od te vrednosti, vendar je cona, kjer je temperatura nad $27 \text{ }^\circ\text{C}$ velika le približno $275 \times 35 \text{ m}$, to je približno 9600 m^2 . Slika B2 prikazuje površinsko sliko temperature za primer, če NEK sploh ne obratuje; pretok Save je $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, NEK pa ne odvzema nobenega pretoka. Slika B3, sloj 13 ($0,4 \text{ m}$ globine) pa prikazuje primerjalno sliko za kritični primer, ko je pretok Save $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pri tem pa NEK odvzema in segreva 25% pretoka ($18,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) in ga vrača v Savo s temperaturo $34,8 \text{ }^\circ\text{C}$.



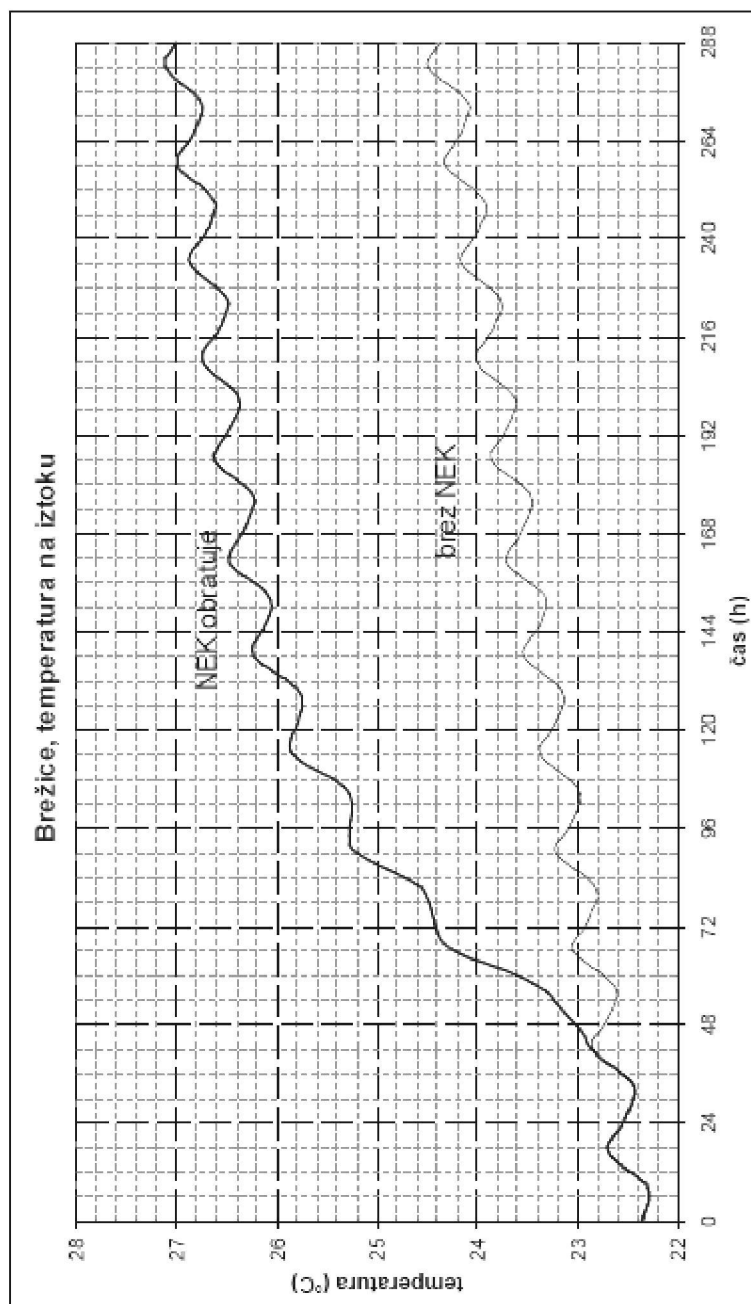
Slika B2: Prikaz temperaturnih razmer na globini 0,4 m, ko je pretok Save $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pri tem pa NEK odvzema in segreva 25 % pretoka (IBE, 2006)



Slika B3: Prikaz temperaturnih razmer na globini 0,4 m, ko je pretok Save $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in NEK ne izpušča segrete vode v Savo (IBE, 2006)

Najbolj merodajno primerjavo pokaže slika B4. Ta kaže povprečne temperature na iztoku bazena (turbinski iztok) za primera z in brez obratovanja NEK pri pretoku Save $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Simulacija je narejena za 12 dni, vidi pa se, da po približno 5 dneh temperaturna razlika med primeroma z in brez vpliva NEK postane skoraj konstantna in znaša $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Torej je povišanje temperature na iztoku iz bazena manjše od predpisanih $3 \text{ }^\circ\text{C}$, celo ob strogih pogojih, kot so kritične razmere.

Omenili so tudi, da bi bilo skoraj nemogoče izpolniti pogoj, da v nobeni točki bazena temperaturna razlika ne bi bila večja od 3 °C.

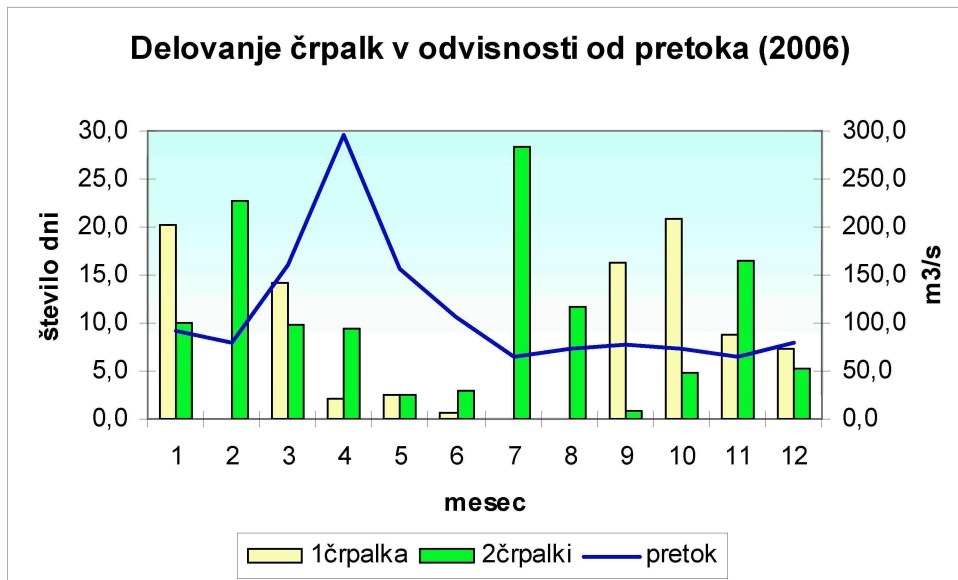
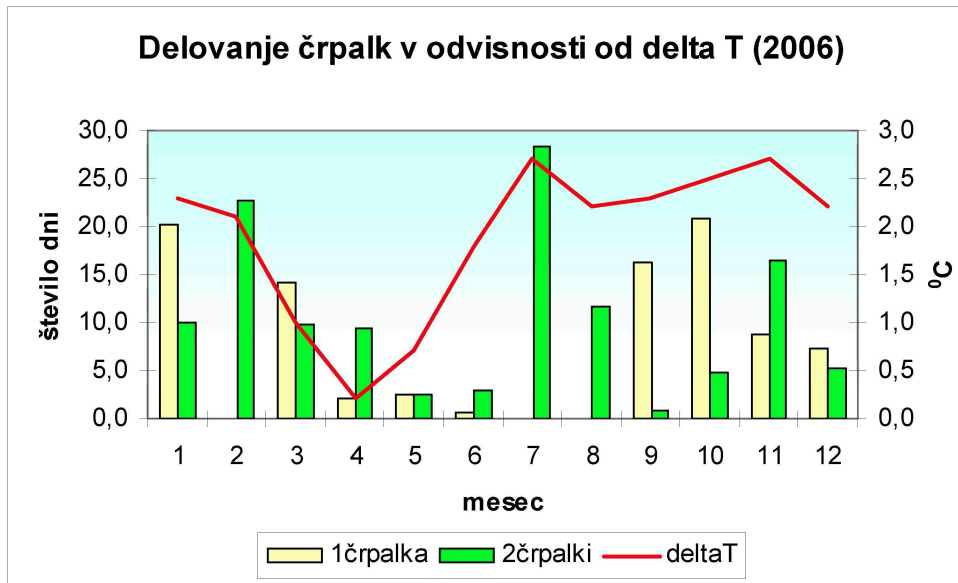


Slika B4: Prikaz povprečne temperature na iztoku bazena (turbinski iztok) za primera z in brez obratovanja NEK (IBE, 2006)

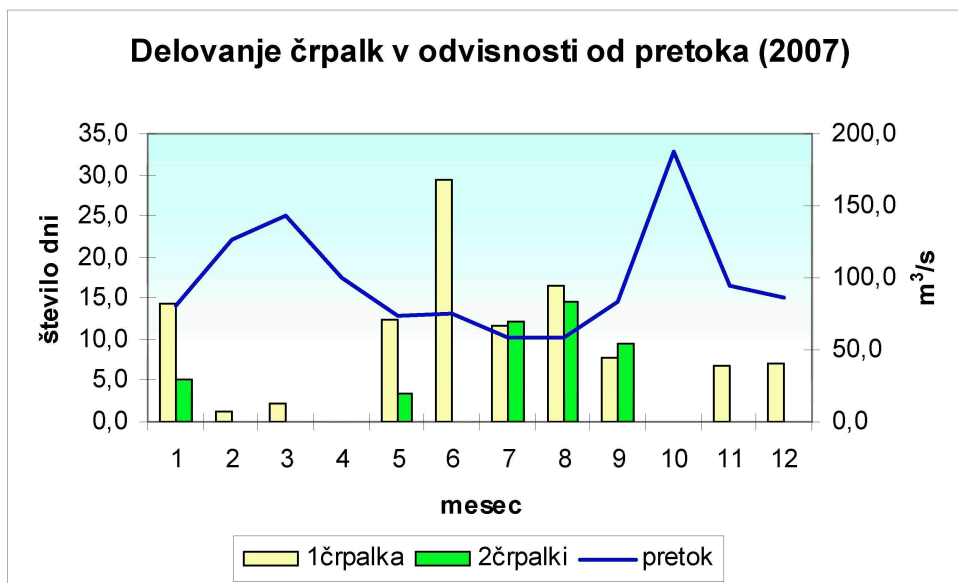
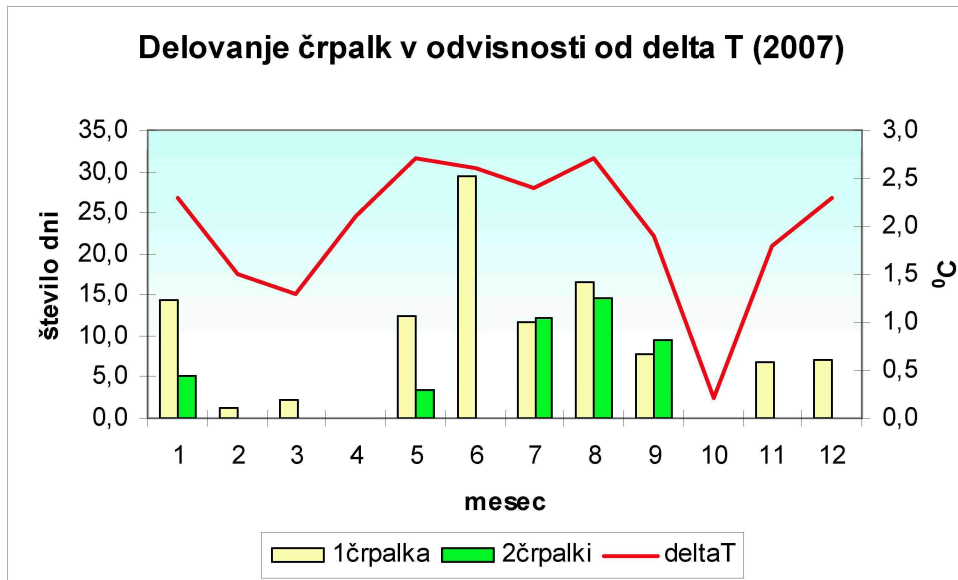
PRILOGA C

GRAFIČNI PRIKAZ DELOVANJA ČRPALK V ODVISNOSTI OD DELTA T IN PRETOKA ZA LETO 2006, 2007 IN 2008

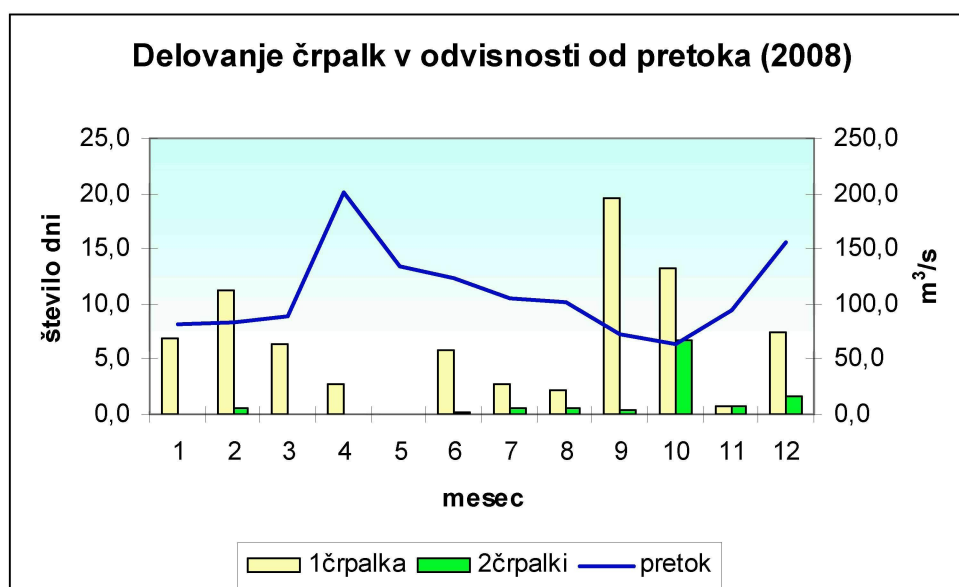
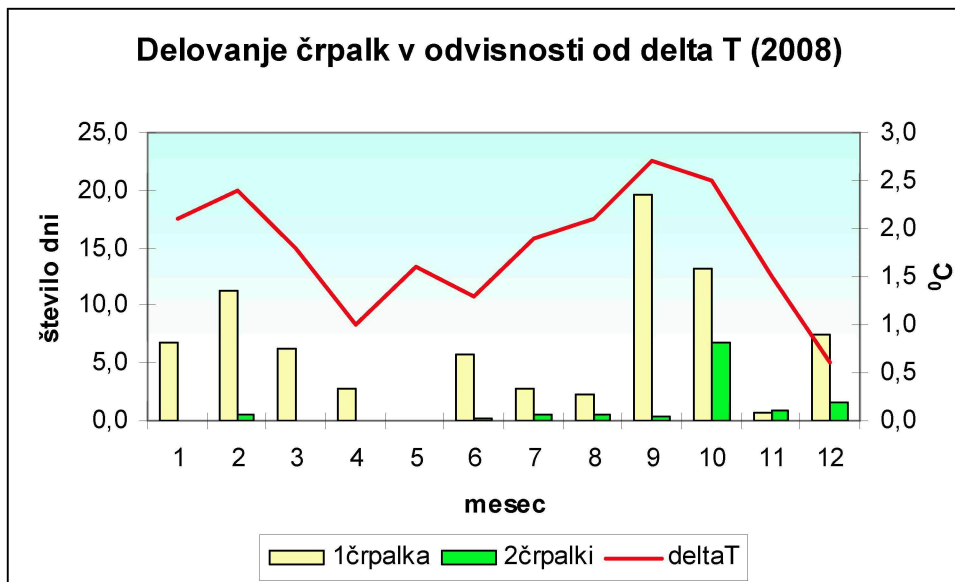
Leto 2006



Leto 2007



Leto 2008



PRILOGA D

TABELE IZRAČUNOV PROFILA RAZTOPLJENEGA KISIKA PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH IN Z RAZLIČNIMI PREZRAČEVALNIMI KONSTANTAMI

Izračun profila raztopljenega kisika pri 20 °C in izbranim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,10 | 0,08 | 0,60 | 0,02 | 0,06 | 8,50 |
| | 8 | 4 | 0,18 | 0,07 | 0,66 | 0,03 | 0,04 | 8,44 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,25 | 0,15 | 0,70 | 0,03 | 0,12 | 8,40 |
| | 16 | 4 | 0,40 | 0,10 | 0,82 | 0,03 | 0,07 | 8,28 |
| | 20 | 4 | 0,50 | 0,10 | 0,89 | 0,04 | 0,06 | 8,21 |
| 1 | 24 | 12 | 0,60 | 0,10 | 0,95 | 0,10 | 0,00 | 8,15 |
| | 36 | 12 | 0,70 | 0,20 | 0,95 | 0,10 | 0,10 | 8,15 |
| 2 | 48 | 12 | 0,90 | 0,05 | 1,04 | 0,11 | -0,06 | 8,06 |
| | 60 | 12 | 0,95 | 0,05 | 0,98 | 0,11 | -0,06 | 8,12 |
| 3 | 72 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,92 | 0,10 | -0,10 | 8,18 |
| | 84 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,82 | 0,09 | -0,09 | 8,28 |
| 4 | 96 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,73 | 0,08 | -0,08 | 8,37 |
| | 108 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,65 | 0,07 | -0,07 | 8,45 |
| 5 | 120 | | 1,00 | | 0,58 | | | 8,52 |

Izračun profila raztopljenega kisika pri 25 °C in izbranim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,15 | 0,15 | 0,60 | 0,03 | 0,12 | 8,50 |
| | 8 | 4 | 0,30 | 0,10 | 0,72 | 0,03 | 0,07 | 8,38 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,40 | 0,15 | 0,79 | 0,04 | 0,11 | 8,31 |
| | 16 | 4 | 0,55 | 0,15 | 0,90 | 0,04 | 0,11 | 8,20 |
| | 20 | 4 | 0,70 | 0,10 | 1,01 | 0,05 | 0,05 | 8,09 |
| 1 | 24 | 12 | 0,90 | 0,40 | 1,06 | 0,15 | 0,25 | 8,04 |
| | 36 | 12 | 1,30 | 0,30 | 1,32 | 0,18 | 0,12 | 7,78 |
| 2 | 48 | 12 | 1,60 | 0,10 | 1,43 | 0,20 | -0,10 | 7,67 |
| | 60 | 12 | 1,70 | 0,20 | 1,33 | 0,19 | 0,01 | 7,77 |
| 3 | 72 | 12 | 1,80 | 0,15 | 1,34 | 0,19 | -0,04 | 7,76 |
| | 84 | 12 | 1,90 | 0,10 | 1,31 | 0,18 | -0,08 | 7,79 |
| 4 | 96 | 12 | 2,00 | 0,00 | 1,22 | 0,17 | -0,17 | 7,88 |
| | 108 | 12 | 2,00 | 0,00 | 1,05 | 0,15 | -0,15 | 8,05 |
| 5 | 120 | | 2,00 | | 0,90 | | | 8,20 |

Izračun profila raztopljenega kisika pri 30 °C in izbranim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,20 | 0,15 | 0,60 | 0,04 | 0,11 | 8,50 |
| | 8 | 4 | 0,35 | 0,20 | 0,71 | 0,04 | 0,16 | 8,39 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,55 | 0,30 | 0,87 | 0,05 | 0,25 | 8,23 |
| | 16 | 4 | 0,85 | 0,15 | 1,12 | 0,07 | 0,08 | 7,98 |
| | 20 | 4 | 1,00 | 0,20 | 1,20 | 0,07 | 0,13 | 7,90 |
| 1 | 24 | 12 | 1,20 | 0,50 | 1,33 | 0,23 | 0,27 | 7,77 |
| | 36 | 12 | 1,70 | 0,50 | 1,60 | 0,27 | 0,23 | 7,50 |
| 2 | 48 | 12 | 2,20 | 0,20 | 1,83 | 0,31 | -0,11 | 7,27 |
| | 60 | 12 | 2,40 | 0,25 | 1,72 | 0,29 | -0,04 | 7,38 |
| 3 | 72 | 12 | 2,65 | 0,20 | 1,68 | 0,29 | -0,09 | 7,42 |
| | 84 | 12 | 2,85 | 0,15 | 1,59 | 0,27 | -0,12 | 7,51 |
| 4 | 96 | 12 | 3,00 | 0,00 | 1,47 | 0,25 | -0,25 | 7,63 |
| | 108 | 12 | 3,00 | 0,05 | 1,22 | 0,21 | -0,16 | 7,88 |
| 5 | 120 | | 3,00 | | 1,06 | | | 8,04 |

Izračun profila raztopljenega kisika pri 20 °C in izračunanim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,10 | 0,08 | 0,6 | 0,06 | 0,02 | 8,5 |
| | 8 | 4 | 0,18 | 0,07 | 0,62 | 0,06 | 0,01 | 8,48 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,25 | 0,15 | 0,63 | 0,06 | 0,09 | 8,47 |
| | 16 | 4 | 0,40 | 0,10 | 0,72 | 0,07 | 0,03 | 8,38 |
| | 20 | 4 | 0,50 | 0,10 | 0,74 | 0,07 | 0,03 | 8,36 |
| 1 | 24 | 12 | 0,60 | 0,10 | 0,77 | 0,23 | -0,13 | 8,33 |
| | 36 | 12 | 0,70 | 0,20 | 0,64 | 0,19 | 0,01 | 8,46 |
| 2 | 48 | 12 | 0,90 | 0,05 | 0,65 | 0,19 | -0,14 | 8,45 |
| | 60 | 12 | 0,95 | 0,05 | 0,50 | 0,15 | -0,10 | 8,60 |
| 3 | 72 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,40 | 0,12 | -0,12 | 8,70 |
| | 84 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,28 | 0,08 | -0,08 | 8,82 |
| 4 | 96 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,06 | -0,06 | 8,90 |
| | 108 | 12 | 1,00 | 0,00 | 0,14 | 0,04 | -0,04 | 8,96 |
| 5 | 120 | | 1,00 | | | | 0,00 | 9,00 |

Izračun profila raztopljenega kisika pri 25 °C in izračunanim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,15 | 0,15 | 0,6 | 0,07 | 0,08 | 8,5 |
| | 8 | 4 | 0,30 | 0,10 | 0,68 | 0,08 | 0,02 | 8,42 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,40 | 0,15 | 0,70 | 0,08 | 0,07 | 8,40 |
| | 16 | 4 | 0,55 | 0,15 | 0,76 | 0,09 | 0,06 | 8,34 |
| | 20 | 4 | 0,70 | 0,20 | 0,82 | 0,10 | 0,10 | 8,28 |
| 1 | 24 | 12 | 0,90 | 0,40 | 0,92 | 0,34 | 0,06 | 8,18 |
| | 36 | 12 | 1,30 | 0,30 | 0,98 | 0,36 | -0,06 | 8,12 |
| 2 | 48 | 12 | 1,60 | 0,10 | 0,92 | 0,34 | -0,24 | 8,18 |
| | 60 | 12 | 1,70 | 0,20 | 0,68 | 0,25 | -0,05 | 8,42 |
| 3 | 72 | 12 | 1,90 | 0,05 | 0,63 | 0,23 | -0,18 | 8,47 |
| | 84 | 12 | 1,95 | 0,05 | 0,45 | 0,16 | -0,11 | 8,65 |
| 4 | 96 | 12 | 2,00 | 0,00 | 0,33 | 0,12 | -0,12 | 8,77 |
| | 108 | 12 | 2,00 | 0,00 | 0,21 | 0,08 | -0,08 | 8,89 |
| 5 | 120 | | 2,00 | | 0,13 | | | 8,97 |

Izračun profila raztopljenega kisika pri 30 °C in izračunanim K_2

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|-----|----------------|------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| dni | ure | Δt (h) | BPK (mg/L) | ΔO_2 (mgO ₂ /L) | D (mgO ₂ /L) | $K_2 D \Delta t$ (mgO ₂ /L) | ΔC (mgO ₂ /L) | C (mgO ₂ /L) |
| | 4 | 4 | 0,20 | 0,15 | 0,6 | 0,09 | 0,06 | 8,5 |
| | 8 | 4 | 0,35 | 0,20 | 0,66 | 0,10 | 0,10 | 8,44 |
| 0,5 | 12 | 4 | 0,55 | 0,30 | 0,76 | 0,11 | 0,19 | 8,34 |
| | 16 | 4 | 0,85 | 0,15 | 0,95 | 0,14 | 0,01 | 8,15 |
| | 20 | 4 | 1,00 | 0,20 | 0,95 | 0,14 | 0,06 | 8,15 |
| 1 | 24 | 12 | 1,20 | 0,50 | 1,01 | 0,47 | 0,03 | 8,09 |
| | 36 | 12 | 1,70 | 0,50 | 1,05 | 0,48 | 0,02 | 8,05 |
| 2 | 48 | 12 | 2,20 | 0,20 | 1,06 | 0,49 | -0,29 | 8,04 |
| | 60 | 12 | 2,40 | 0,25 | 0,78 | 0,36 | -0,11 | 8,32 |
| 3 | 72 | 12 | 2,65 | 0,20 | 0,67 | 0,31 | -0,11 | 8,43 |
| | 84 | 12 | 2,85 | 0,15 | 0,56 | 0,26 | -0,11 | 8,54 |
| 4 | 96 | 12 | 3,00 | 0,00 | 0,45 | 0,21 | -0,21 | 8,65 |
| | 108 | 12 | 3,00 | 0,00 | 0,24 | 0,11 | -0,11 | 8,86 |
| 5 | 120 | | 3,00 | | 0,13 | | | 8,97 |