

## **6. POSVETOVANJE SLOCOLD**

# **AKTUALNE TEME V PREGRADNEM INŽENIRSTVU – UPORABA RAČUNALNIŠKIH ORODIJ PRI NAČRTOVANJU IN UPRAVLJANJU VELIKIH PREGRAD**

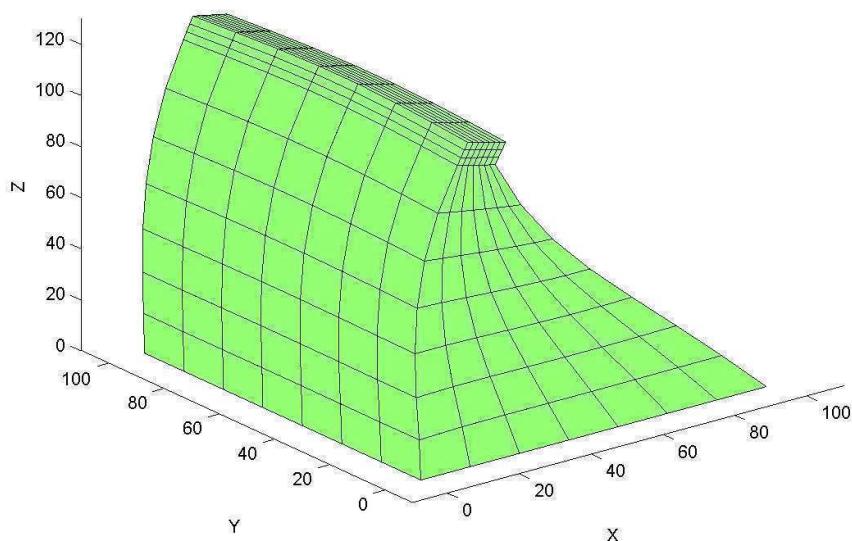
---

**zbornik prispevkov**

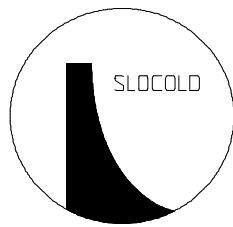
**urednika**

**Andrej Kryžanowski**

**Andrej Sedej**



**Ljubljana, april 2004**



## **6. POSVETOVAJJE SLOCOLD**

**AKTUALNE TEME V PREGRADNEM  
INŽENIRSTVU – UPORABA RAČUNALNIŠKIH  
ORODIJ PRI NAČRTOVANJU IN UPRAVLJANJU  
VELIKIH PREGRAD**

**zbornik prispevkov**

**urednika**

**Andrej Kryžanowski**

**Andrej Sedej**

**Ljubljana, april 2004**

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

627.8:004.9(497.4)(063)(082)  
621.311.21(497.4)(063)(082)

SLOVENSKI nacionalni komite za velike pregrade. Posvetovanje (6 ; 2004 ; Ljubljana)  
Aktualne teme v pregradnem inženirstvu:  
uporaba računalniških orodij pri načrtovanju in upravljanju velikih pregrad:  
zbornik prispevkov / 6. posvetovanje SLOCOLD, Ljubljana, april 2004 ;  
urednika Andrej Kryžanowski, Andrej Sedej. - Ljubljana : Slovenski nacionalni komite za  
velike pregrade - SLOCOLD, 2005

ISBN 961-90207-5-8  
1. Gl. stv. nasl. 2. Kryžanowski, Andrej, 1961-

220019712

**6. POSVETOVARJE SLOCOLD, AKTUALNE TEME V PREGRADNEM  
INŽENIRSTVU: UPORABA RAČUNALNIŠKIH ORODIJ PRI NAČRTOVANJU IN  
UPRAVLJANJU VELIKIH PREGRAD**

**ZBORNIK PRISPEVKOV**

Andrej Kryžanowski, Andrej Sedej (urednika)

izdal: Slovenski nacionalni komite za velike pregrade – SLOCOLD  
© SLOCOLD 2004

Naklada: 150 izvodov

## UVOD

Letošnje, šesto strokovno posvetovanje SLOCOLD smo posvetili predstavitvi računalniških orodij, kot pripomočku pri načrtovanju in upravljanju velikih pregrad. Namen posvetovanja je predstavitev računalniških orodij za uporabo v praksi pregradnega inženirstva in so plod domačega znanja. Ob tej priložnosti smo povabili tudi kolege iz Avstrijskega komiteja za velike pregrade (ATCOLD), s katerimi sodelujemo člani našega društva v okviru vseevropskega razvojnega projekta uvajanja računalniških aplikacij na področju velikih pregrad. V zborniku so prispevki predstavljeni v dveh tematskih sklopih:

V prvem sklopu so predstavljena računalniška orodja in razvoj aplikacij, ki ga pričenjamo s predstavljivo projekta internetne platforme (Gaisbauer), kot orodje in pripomoček načrtovalcem in uporabnikom za upravljanje z betonskimi velikimi pregradami. Sledi prispevek o razvoju programa za dinamično analizo pregrad v fazi načrtovanja (Planinc). Za podporo odločanju pri upravljanju vodnih virov se v svetu vse bolj poslužujejo kompleksnih računalniških orodij (Brilly), ki predstavljajo osnovno bazo z nadgraditvijo posebnih, namenskih orodij, kot je optimizacijski sistem upravljanja HE v verigi, predstavljen v prispevku (Zakrajšek), ki tudi zaključuje prvi tematski sklop.

V drugem sklopu so predstavljena orodja za upravljanje objektov, ki se prične s predstavljivo integralnega programa avtomatizacije tehničnega opazovanja HE v verigi (Prnaver). V nadaljevanju sta predstavljena aplikativna primera postavitve organizacije seizmičnega (Brenčič) in tehničnega opazovanja (Turk). S slednjim prispevkom so tudi sklenjene predstavitev v zborniku.

Na tem mestu se ponovno zahvaljujem vsem referentom, kolegom iz ATCOLD za sodelovanje pri pripravi posvetovanja ter s svojimi prispevki omogočili pripravo tega zbornika. Zahvala gre tudi vsem ostalim kolegom (Ciuha, Sternad), ki so podali ustne prispevke na posvetovanju. Posebno zahvalo naslavljam tudi na naše kolektivne člane, ki s podporo omogočajo strokovno delo našega društva, brez katere tudi ne bi mogli pripraviti letošnjega zbornika tako po vsebini, kot v obliki, ki je pred vami.

predsednik SLOCOLD:

mag. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 15. april 2004

## **PODPORNI ČLANI**

1. Dravske elektrarne Maribor d.o.o., Maribor
2. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana
3. GEOT d.o.o., Ljubljana
4. Geoinženiring d.o.o., Ljubljana
5. Gradbeno podjetje Grosuplje d.d., Ljubljana
6. Gradis GIZ d.o.o., Ljubljana
7. Gradis TEO d.d., Ljubljana
8. Holding Slovenske elektrarne d.o.o., Ljubljana
9. IBE d.d., Ljubljana
10. Imos Geateh, d.o.o., Ljubljana
11. IRMA d.o.o., Ljubljana
12. Jankovič s.p., Ljubljana
13. Ministrstvo za obrambo URSZR
14. Ministrstvo za okolje, prostor in energijo ARSO
15. Nuklearna elektrarna Krško, Krško
16. Primorje d.d., Ajdovščina
17. Rafael d.o.o., Sevnica
18. Savske elektrarne Ljubljana d.o.o., Medvode
19. Soške elektrarne Nova Gorica d.o.o., Nova Gorica
20. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana

## VSEBINA

<b>NW-IALAD - NETWORK INTEGRITY ASSESSMENT OF LARGE CONCRETE DAMS</b>	<b>1</b>
<i>Raimund GAISBAUER</i>	
<b>VPLIV VELIKOSTI IN OBLIKE AKUMULACIJSKEGA BAZENA NA DINAMIČNI ODZIV TEŽNOSTNE PREGRADE</b>	<b>15</b>
<i>Igor PLANINC, Matija GAMS, Gregor ARNŠEK</i>	
<b>PROGRAM ZA ODLOČANJE PRI UPRAVLJANJU Z VODARSKIMI SISTEMI RIVER WARE</b>	<b>23</b>
<i>Mitja BRILLY, Andrej VIDMAR</i>	
<b>OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA HE NA SAVI – II FAZA</b>	<b>29</b>
<i>Matjaž ČETINA, Majda ZAKRAJŠEK, Dušan ŽAGAR, Matej BRECELJ, Andrej ŠIRCA</i>	
<b>AVTOMATIZACIJA TEHNIČNEGA OPAZOVANJA GRADBENIH OBJEKTOV HE NA DRAVI</b>	<b>43</b>
<i>Alenka PRNAVER</i>	
<b>SEIZMOLOŠKO OPAZOVANJE PREGRADE VOGRŠČEK</b>	<b>53</b>
<i>Matija BRENČIČ, Andrej ŠIRCA</i>	
<b>ANALIZA OBNAŠANJA ZEMELJSKE PREGRADE DRTIJIŠČICA</b>	<b>61</b>
<i>Mojca RAVNIKAR TURK, Janko LOGAR</i>	

## **NW-IALAD - NETWORK INTEGRITY ASSESSMENT OF LARGE CONCRETE DAMS**

Raimund GAISBAUER, Verbund-AHP, Am Hof 6a; A-1010 Wien; Austria  
Phone: +43-1-53113-50407; E-mail: Raimund.Gaisbauer@verbund.at

### **SUMMARY**



The integrity and safety assessment of concrete dams plays an important role for the infrastructure of many states of the EU. However, the water reservoirs created by those dams are often considered as a potential hazard to the population. The safety of these important structures is of great concern to the owners, operators and engineers as well as to the public.

This was the motivation to establish a thematic network with member states of the EU, which brings together government authorities, researchers from universities and end users from companies to conduct a state of the art review on the integrity and safety assessment practice for concrete dams. The aims of the network are:

- to compare and critically review the current practice of dam operation, maintenance, rehabilitation and of dam safety assessment in different European countries in order to foster synergies;
- to conduct a systematic comparison of available models for the numerical simulation of the structural behaviour of concrete dams (benchmarking), and,
- based on the results of the state of the art review, to point out possible shortcomings and needs for improvement and to develop further plans and strategies apt to enhance the current practice.

## POVZETEK

Celovitost zagotavljanja varnosti betonskih pregrad je velikega pomena pri upravljanju infrastrukturnih objektov v večini držav EU. Vodni zadrževalniki, ki so ustvarjeni s temi objekti pa največkrat smatrajo kot potencialna nevarnost za okolico in prebivalstvo. Zagotavljanje varnost teh objektov je v velikega pomena tako lastnikov, upravljalcev in načrtovalcev, kot javnosti.

Zagotavljanje varnosti pregrad je bil tudi osnovni namen za ustanovitev strokovne povezave med članicami EU, s povezovanjem strokovnjakov na nivoju vladnih teles, univerzitetnih raziskovalcev in upravljalcev, z namenom izdelati pregled problematike celovitosti zagotavljanja varnosti in prakse na področju betonskih pregrad. Cilji povezovanja so naslednji:

- izdelati primerjave in kritični pregled obstoječe prakse pri obratovanju, vzdrževanju, prenovi in zagotavljanju varnosti pregradnih objektov v različnih evropskih državah z namenom pospešiti sinergijske vplive;
- izvesti sistematično primerjavo med razpoložljivimi modeli za numerične simulacije obnašanja konstrukcij betonskih pregrad;
- na osnovi rezultatov in poročil pregleda gradiv izpostaviti eventualne pomanjkljivosti in potrebe za izboljšave s predlogi za nadaljnje študijske dejavnosti in strategije za dosego izboljšav obstoječe prakse.

## 1. INTRODUCTION

Water with good quality and in sufficient quantity is a basic requirement for humanity. Reservoirs and concrete dams that create those reservoirs provide a means to balance the fluctuation of the natural water flow. The integrity and safety of concrete dams are vital requirements for the population living downstream in the river valley.

Concrete dams play a vital role in the infrastructure of many EU (European Union) states for the provision of water resources. Multipurpose reservoirs can serve for drinking water, irrigation in agriculture, production of clean renewable energy, recreation and flood protection.

The thematic network NW-IALAD (Integrity Assessment of Large Concrete Dams) responds to the specific EU program promoting competitive and sustainable growth. The key action is titled KA1 - Innovative Products, Processes and Organization. The target research action is TRA 1.9 "Infrastructure: Safe and Cost Effective Civil Infrastructures".

## 1 MOTIVATION

The ageing of dams in the EU states and necessary refurbishment measures become more and more an issue. In particular the surveillance of old structures needs to be carried out very carefully "ICOLD (1994)".

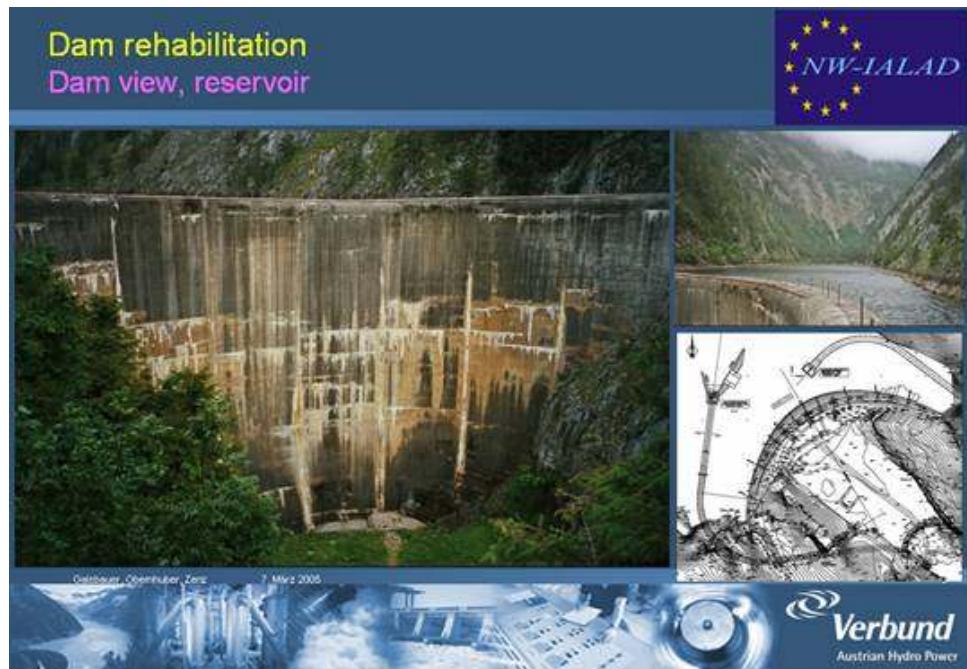


Figure 1: Example of an ageing dam

The state of the whole structure needs to be investigated. Damages encountered in the structure need to be recognized and studied for the reasons causing the damage. Based on the results of the findings rehabilitation measures need to be prepared. It has to be clarified if the damage endangers the overall safety of the structure. The state of the art in dam engineering has to be kept in mind.



Figure 2: Investigation of the state of the dam structure

When a necessity for action is identified a comprehensive study of the whole structure and reservoir need to be carried out as new requirements may have arisen since the time of planning and construction. This may mean that new demands besides safety have been formulated that may change during the lifetime of the dam. As normally during the construction phase economic criteria are dominant nowadays social and environmental factors get more and more importance.

Primarily the global behavior of the dam structure over time needs to be looked at and abnormal behavior needs to be detected if present. But besides the dam structure also auxiliary installations need to be considered in the refurbishment measures. Factors like bottom outlet capacity and spillway capacity may change over time and new design criteria may have to be met. Also the sediment management of the reservoir may become an issue over time.



*Figure 3: Factors to be considered during refurbishment*

## 2 THEMES OF THE NETWORK AND COMPOSITION

The water reservoirs created by large dams are often considered as a potential hazard by the population. The safety of these important structures is of great concern to the dam owners, operators and engineers as well as to the public due to the high damage potential (life, economic values, ecologic environment) in case of failure.

This was the motivation to establish a thematic network, which brings together government authorities, researchers and end users (industry, engineering) to conduct a state of the art review on the integrity and safety assessment practice for concrete dams. The thematic network NW-IALAD responds to the specific EU program promoting competitive and sustainable growth and is funded by the European Commission, "NW-IALAD (2005)".

The aims of the network are:

- to compare and critically review the current practice of dam operation, maintenance, rehabilitation and of the dam safety assessment in different European countries;
- to conduct a systematic comparison of available models for the numerical simulation of the structural behavior of concrete dams (benchmarking), and,
- based on the results of the state of the art review, to point out shortcomings and prevailing deficits.

Interested persons are invited to participate in the benchmark examples and to share their experience in dam operation and engineering. If there is interest there is also the possibility to actively participate and become member in task groups.

## 2.1 Network themes

The network is structured into 4 main sections that cover the topics:

- concrete dam calculation,
- concrete dam performance,
- concrete dam maintenance/repair and
- safety/integrity assessment of concrete dams.



Figure 4: Themes of NW-IALAD

These main sections are subdivided into different tasks as follows.

### 2.1.1 Specific problems in dam calculation practice

This work package is devoted to a review of the dam calculation practice employed by the end users in different European countries. Due to the lack of

regulations and guidelines, the procedures for the assessment of concrete dams differ from country to country and they are often based on simplified analysis models.

The following task groups have been specified:

- Calculation practice –methods and tools employed by the end users
- Continuum based material problems of dam concrete
- Joint/interface problems at concrete dams
- Fracture mechanics based problems for the analysis of dam concrete

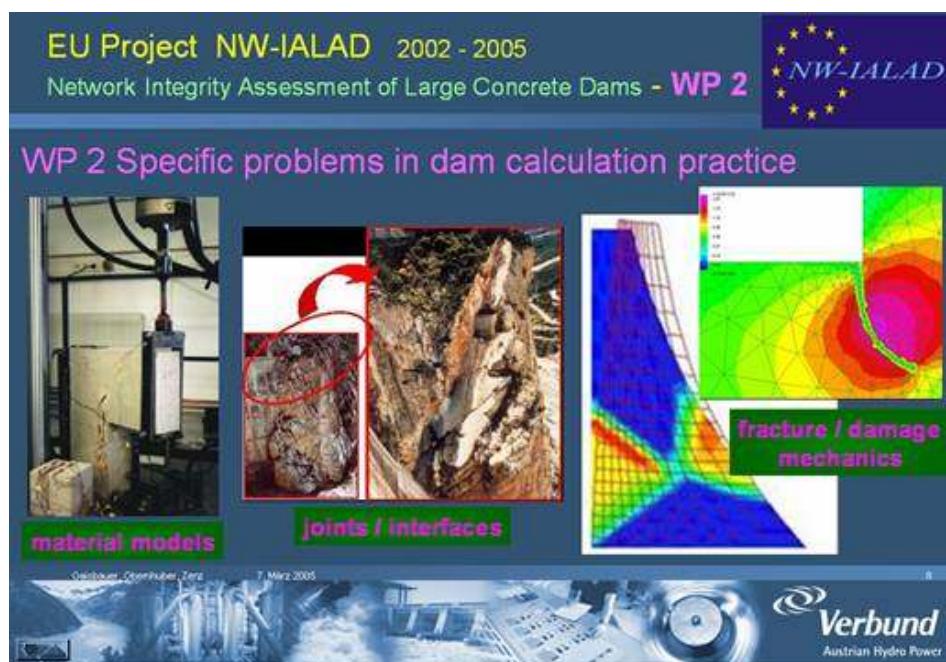


Figure 5: Themes of NW-IALAD - work package 2

### 2.1.2 Dam performance under normal and extraordinary load conditions

This work package focuses on the actual dam performance. This comprises dam surveillance through monitoring and collection and preparation of appropriate data in order to be able to properly assess the state of the dam. Benchmarking examples, partly from the ICOLD benchmark workshops, have been made available in order to be able to compare different approaches with the calculation.

The following task groups have been specified:

- Monitoring of concrete dams
- Performance of real concrete dams and scale models
- Parameter identification and ultimate limit-state analysis including rock foundations
- Benchmarking of available methods and tools



Figure 6: Themes of NW-IALAD - work package 3

### 2.1.3 Maintenance, repair and rehabilitation of concrete dams

Existing dams need to be improved and rehabilitated in order to maintain the economic value and to avoid a negative environmental impact. Appropriate maintenance will extend the life time of the dams. The substitution of existing dams by new ones would produce severe social impacts on the adjacent communities and also would produce negative environmental impacts on nature.

This work package deals with the maintenance, repair and refurbishment of concrete dams. The ageing process of the materials and the reaction to it plays an important role in the life time of a dam.

The following task groups have been specified:

- State of the art in concrete dam maintenance and philosophy of maintenance

- Ageing of dam concrete and repair work
- Significant repair and refurbishment measures at concrete dams



Figure 7: Themes of NW-IALAD - work package 4

#### 2.1.4 Strategies for concrete dam safety and integrity assessment

For a safe operation of our dams a close co-operation of all stakeholders is required. For the safety and integrity assessment a sound basis is necessary which comprises a comprehensive documentation of the dam history including the planning, design, construction and operation phases. Based on this reliable numerical models need to be applied that are able to simulate normal operational and extraordinary load conditions. Qualified personnel in sufficient numbers at all levels are an absolute requirement.

The following task groups have been specified:

- Education and training in dam engineering
- Dam safety and integrity assessment
- Exploitation, R&D Strategy and Plans, Dissemination

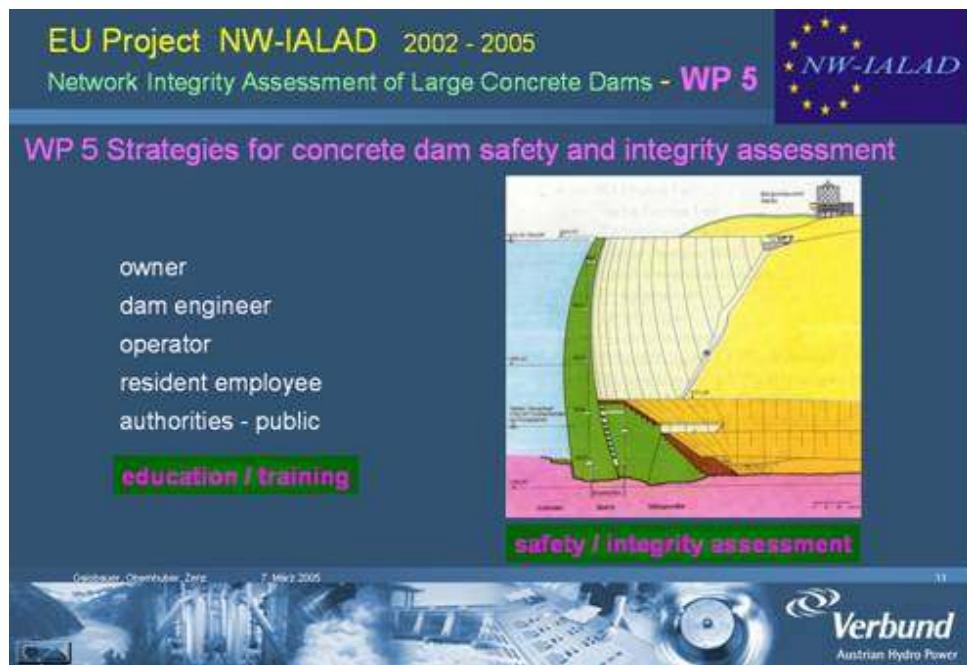


Figure 8: Themes of NW-IALAD - work package 5

## 2.2 Composition of the network consortium

The network NW-IALAD has 31 members from industry, research and government authorities from all over Europe and numerous passive users who also participate in the network. The basic idea behind selecting the membership was to find a good balance between the industry (end users) and research/development bodies. Public interests are brought into the network through the participation of government authorities. A geographical presentation of the partners can be seen in figure 1.



Figure 9: Geographical presentation of the partners of NW-IALAD

The main contractors and task group leaders are CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano - Giacinto Motta SpA) - Italy, EDF (Electricité de France) - France, IBFT (Institute for Structural Analysis and Strength of Materials, University of Innsbruck) - Austria, NTUA (Institute of Structural Analysis & Seismic Research, National Technical University of Athens) - Greece, POLIMI (Dept. of Structural Engineering, Politecnico di Milano) - Italy, UNIPADU I (Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova) - Italy, ETSECCPB-UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) - Spain, UWC (Division of Civil Eng., University of Wales Cardiff) - United Kingdom and Verbund (Verbund - Austrian Hydro Power AG, Verbundplan) - Austria that is the general co-ordinator of the project.

The other project members are AQT (Aquatris a.s.), BETCGB (Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages), BMLFUW (Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment, and Water Management - Federal Dam Supervision Section), CIMNE (International Center for Numerical Methods in Engineering), Dolsar (Dolsar Engineering Limited), DRAGADOS (Obras y Proyectos, S.A. – Obras Hidráulicas, Asesoría Técnica), EP-HYDRO (Energoproekt - Hydropower Ltd), EWE (Electrowatt-Ekono Ltd.), ENDESA (ENDESA Generacion, S.A. ), FEA (Finite Element Application), FOWG (Federal office for water and geology, Dam safety), HPI (Hydroprojekt Ingenieurgesellschaft mbH), IKW-TUW (Institut für Konstruktiven Wasserbau – TU-Wien Technische Universität Wien), LI (Lahmeyer International GmbH - Hydropower and Water Resources Division), Lombardi (Lombardi Ltd), NEKEAD (Natsionalna Elektricheska Kompania Dams and Cascades), SC-HIDEL (SC Hidroelectrica SA), TUCEB (Techn. Univ. of Civil Engineering Bucharest), Marcello (ING. ALDO MARCELLO), PPC (Public Power Corporation), SEL

(Savske-Elektrarne Ljubljana d.o.o.), UJF (Universite Joseph Fourier Directeur - Laboratoire "3S" Sols, Solides, Structures).

### 3 CONCLUSION

Preliminary results show the need for improvement in several areas of the dam business. Suggestions for future plans and strategies apt to enhance the current practice are developed.

The results of the NW-IALAD outcome can be differentiated into several topics - dam operation, surveillance and performance, numerical simulation, safety and integrity assessment.

#### 3.1 Dam operation, maintenance, repair and incidents

Different philosophies are used by the dam operators. The availability of successful examples for dam operation, maintenance and repair measures outside the own organization can help with the assessment of encountered situations and helps to avoid mistakes. Documented incidents are a valuable resource for enlarging the experience in dam operation and engineering.

#### 3.2 Dam surveillance and dam performance

According to the hazard potential of dams minimum requirements for the dam surveillance need to be met. Monitoring and interpretation of the measurement results must give reliable and sufficient information to assess the present state and behavior of a dam. Based on the historical record the future behavior of the dam needs to be predicted.

#### 3.3 Numerical tools for the simulation of concrete dams under several load conditions

The requirement of these tools is their applicability and practicability in dam engineering. As numerical simulations of dam behavior are carried out within the constraints of limited available time and limited financial resources the available tools need to be easy to handle and reproduce as closely as possible what is happening in the prototype. Requirements that have to be met in dam engineering primarily are the ability to simulate non-linear material behavior, joints, fracture and damage processes and all this in combination with the presence of pressurized water.

The dam foundation preferably should be able to be modeled with the same tools as used for the simulation of the dam concrete. A reliable method to determine the material parameters is required.

### 3.4 Dam safety and integrity assessment

For the safety and integrity assessment the availability of qualified, trained and sufficient personnel at all levels is a requirement.

The practice in various countries is different - minimum requirements need to be met. Different risk assessment procedures and philosophies are used. A possible introduction of new approaches that can be helpful for the assessment and the applicability for dam engineering is discussed.

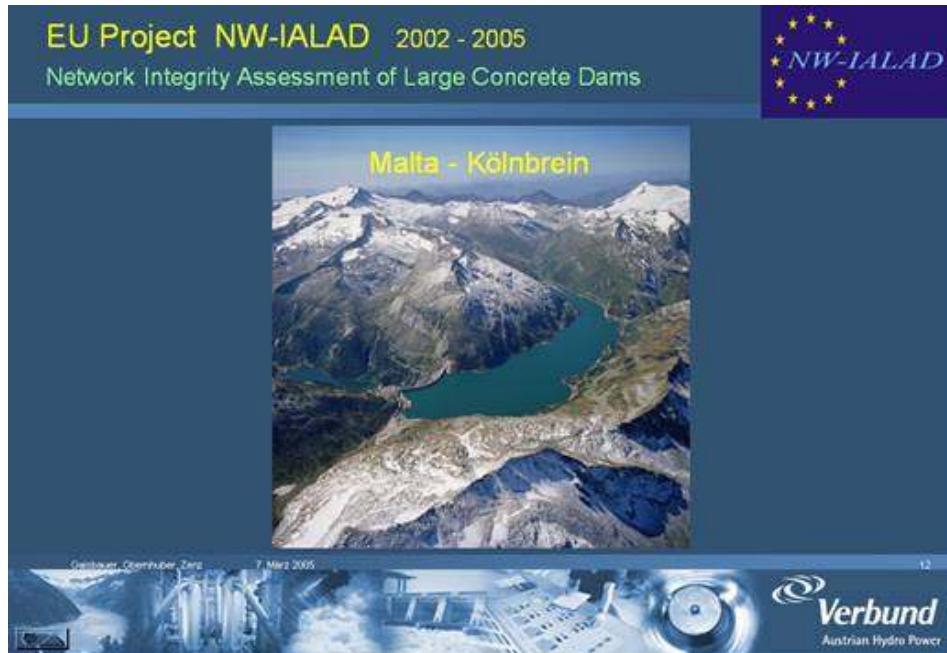


Figure 10: Multipurpose dam

#### 4 REFERENCES

ICOLD (1994) Ageing of Dams and Appurtenant Works. ICOLD-Bulletin 93.

NW-IALAD web site (2005) EU Network, NW-IALAD (Integrity Assessment of Large Concrete Dams) - <http://nw-ialad.uibk.ac.at/>.

# **VPLIV VELIKOSTI IN OBLIKE AKUMULACIJSKEGA BAZENA NA DINAMIČNI ODZIV TEŽNOSTNE PREGRADE**

doc. dr. Igor PLANINC, univ.dipl.inž.grad. in Matija GAMS, univ.dipl.inž.grad.  
FGG, Jamova 2, Ljubljana

Gregor ARNŠEK, univ.dipl.inž.grad.  
Biro za projektiranje, nadzor in svetovanje, Rostohar V., s.p., Golek 4, Krško

## **POVZETEK**

V članku predstavimo parametrično analizo vpliva velikosti in oblike akumulacijskega bazena na dinamično obnašanje težnostne pregrade. Pri tem si pomagamo z lastnim računalniškim programom DIN3D. Program je zasnovan na metodi končnih elementov, interakcijo med akumulacijskim bazenom in težnostno pregrado pa upošteva po t.i. principu adicijske matrike (H. Šolinc, 1983, Uporaba metode robnih elementov pri dinamični analizi elastičnih rezervoarjev, Doktorska naloga, Univerza v Ljubljani, FGG). S parametrično analizo smo ugotovili, da imata velikost in oblika akumulacijskega bazena dominanten vpliv samo na prvo lastno nihajno obliko pregrade. Za višje lastne nihajne oblike pregrade se ta vpliv relativno hitro izgublja.

## **SUMMARY**

In the analysis of the dynamic response of gravity dams, the effect of accumulation reservoir must be taken into account. The use of computer programs is obligatory to quantitatively determine these effects. One such programs is our finite element based computer program DIN3D. The speciality of this program is that it uses what is called addition matrix principle, in which the interaction can be taken into account (H. Šolinc, 1983, Use of Boundary Elements in dynamic analysis of elastic reservoirs, PhD Thesis (in Slovene), University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering). Finally, a simple parametric study of the effect of accumulation reservoir size on a period of a gravity dam is presented.

## 1. UVOD

V literaturi zasledimo številne računske postopke za dinamično analizo betonskih težnostnih pregrad. V grobem jih lahko razvrstimo v dve skupini, ki pa se med seboj tesno prepletata. V prvo skupino uvrstimo t.i. poenostavljene računske postopke za dinamično analizo oziroma dimenzioniranje betonskih težnostnih pregrad. Poglavitna prednost poenostavljenih računskih postopkov, ki so zasnovane na dostopnih eksperimentalnih rezultatih, je relativna matematična preprostost. Glavni slabosti pa sta (i) velika natančnost, kar ima prav gotovo za posledico neracionalno gradnjo tovrstnih objektov, in (ii) nejasne meje uporabnosti teh metod (Fenves in Chopra, 1986). Z intenzivnim razvojem računalništva, ki smo mu priča v zadnjih desetletjih, pa lahko pomankljivosti poenostavljenih metod do neke mere odpravimo oziroma jih nadomestimo z bolj natančnimi metodami oziroma bolj natančnimi računskimi postopki – računalniškimi programi. Te sestavljajo drugo skupino računskih postopkov za dinamično analizo betonskih težnostnih pregrad. Z razvojem računalništva se tudi te metode intezivno razvijajo, kar dokazuje obsežna strokovna literatura. Glavna značilnost teh t.i. 'točnih' računskih postopkov je že omenjena večja natančnost in posledično matematično zahtevnejši računski model. Prav zaradi matematične zahtevnosti so ti postopki zasnovani na numeričnih matematičnih metodah, najpogosteje na t.i. metodi končnih elementov (Cook et al., 1989, Prelog, 1975, Zienkiewicz in Taylor, 1989). Ker so osnove MKE inženirjem dobro znane, jih v tem kratkem prispevku detajlnejše ne predstavimo. Ker pa je, kljub veliki natančnosti teh metod, uporabnost teh metod še vedno omejena, v nadaljevanju na kratko predstavimo na kaj moramo biti pozorni, če pri dinamični analizi betonskih težnostnih pregrad oziroma konstrukcij na splošno uporabljamo komercialne računalniške programe. Če v nadaljevanju zanemarimo velik pomen 'prijaznosti' računalniškega programa za uporabnika, moramo komercialne računalniške programe za analizo konstrukcij oceniti glede na dva bistvena vidika. Prvega imenujemo verifikacija računskega postopka. S tem pojmom označujemo numerično natančnost računskega postopka, kar pomeni, da moramo ugotoviti, kako natančno smo rešili matematične enačbe s katerimi smo modelirali konstrukcijo. To seveda ni trivialen problem, saj točne rešitve za napetostno in deformacijsko stanje konkretnne konstrukcije ne poznamo, in kolikor nam je znano, je to še vedno predmet številnih raziskav. Drugi vidik za oceno primernosti računskega postopka in ustrezega računalniškega programa imenujemo validacija. Pri validaciji računskega postopka skušamo ugotoviti, kako natančen je računski model oziroma kako natančno z računskim modelom opišemo fizikalno obnašanje konstrukcije. To storimo s primerjavo verificirane rešitvije in dostopnih eksperimentalnih rezultatov. Če se eksperimentalni in numerični rezultati ujemajo v bistvenih značilnostih, govorimo o natančnem računskem postopku oziroma modelu. Vendar verifikacija in validacija računskega postopka za praktično uporabo računalniške programa, kljub temu da sta bistvenega pomena, še nista dovolj. Za inženirja je pomebna tudi 'hitrost' in relativna preprostost računskega postopka. Če povemo drugače, nas pri oceni kvalitete računalniškega programa zanima tudi, kako hitro dobimo natančne oziroma uporabne numerične rezultate o obnašanju konstrukcije. Iz povedanega sklepamo, da je uporaba računalniških programov pri dinamični analizi betonskih težnostnih pregrad in konstrukcij na splošno, v današnjem času nujna, toda kar tako na slepo zelo vprašljiva glede na racionalnost oziroma ekonomičnost gradnje tovrstnih objektov.

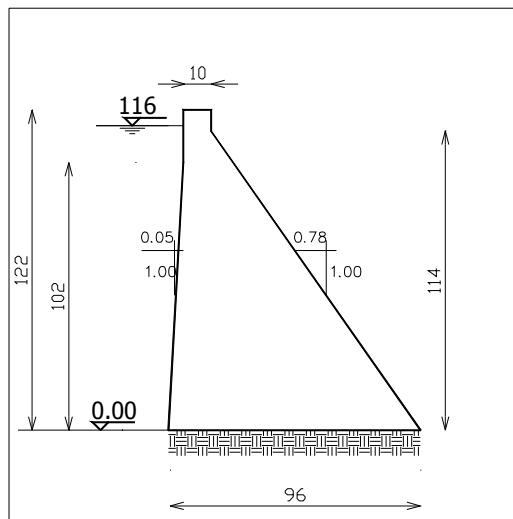
Danes obstajajo številni komercialni računalniški programi za analizo gradbenih konstrukcij (na primer LUSAS, ABAQUS in podobno). Kvalitetni programi so zelo dragi, zelo splošni in namenjeni predvsem uporabnikom z veliko specialnega znanja o obnašanju gradbenih konstrukcij in zahtevnih matematičnih postopkov. Njihova splošnost je pogosto tudi njihova pomankljivost. To pomeni, da splošni komercialni računalniški programi pogosto ne omogočajo preproste poti do želene rešitve, kar še posebej velja za dinamično analizo betonskih težnostnih pregrad. Zato se še vedno zdi upravičeno razvijati specializirane računalniške programe za inženirske gradbene konstrukcije, kot so to betonske težnostne pregrade. Poleg prilagojenosti teh računalniških programov konkretnim inženirskim konstrukcijam, razvoj teh specializiranih računalniških programov omogoča tudi relativno hitro aplikacijo novejših znanstvenih doganj na tem področju in sprotno prilagoditev oziroma dopolnitve računskega postopka novejšim eksperimentalnim rezultatom. Kot prvi približek tem osnovnim ciljem specializiranih računalniških programov sledi tudi program DIN3D, ki je namenjen dinamični analizi betonskih težnostnih pregrad z upoštevanjem vpliva akumulacijskega bazena. Program je zasnovan na metodi končnih elementov. Da je računski čas analize čim krajši, program DIN3D modelira interakcijo med pregradom in akumulacijskim bazenom po t.i. postopku adicijske matrike (Šolinc, 1983). Program za modeliranje pregrade in akumulacijskega bazena uporablja znane in preizkušene trilinearne briketne končne elemente (Cook et al., 1989, Prelog, 1975, Zienkiewicz in Taylor, 1989). Uporaba adicijske matrike za dinamično analizo težnostnih pregrad seveda ni najnatančnejša poznana metoda vendar, kot kažejo numerični rezultati, še dovolj natančna. Znano je, da jo lahko pri dinamični analizi konstrukcij uporabimo takrat, ko so izpolnjeni naslednji pogoji o gibanju in lastnosti tekočine v akumulacijskem bazenu: (1) tekočina je idealna in nestisljiva, (2) gibanje tekočine je irotacionalno, (3) v tekočini ni izvorov in ponorov, (4) amplituda površinskih valov je majhna in (5) pomiki osrednje ploskve končnega elementa pregrade na stiku z vodo so majhni.

Na obnašanje betonske težnostne pregrade vplivajo številni geometrijski in materialni parametri pregrade in akumulacijskega bazena, interakcija med njima ter interakcija pregrade in zemljine. Ker je taka splošna analiza zelo zahtevna in obsežna, se bomo v tem kratkem prispevku omejili samo na kvalitetno študijo vpliva velikosti in oblike akumulacijskega bazena na dinamično obnašanje težnostne pregrade. S tem želimo predvsem predstaviti oziroma grobo oceniti primernost računalniškega programa DIN3D za analizo težnostnih pregrad in inženirjem prikazati, kako velik vpliv imata oblika in velikost akumulacijskega bazena na dinamično obnašanje težnostnih pregrad.

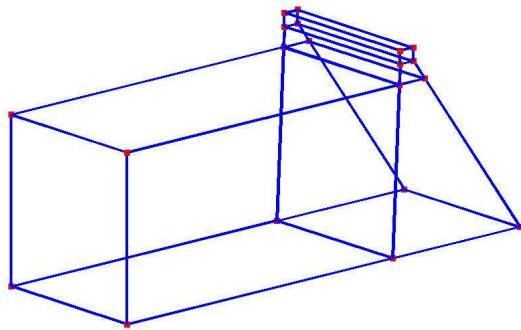
## 2 DINAMIČNA ANALIZA TEŽNOSTNE PREGRADE

Geometrijske podatke obravnavane betonske težnostne pregrade prikazuje slika 1, shemo pregrade in akumulacijskega bazena pa slika 2. Glede na veliko dolžino pregrade predpostavimo, da med obremenitvijo v pregradi nastopa ravninsko deformacijsko stanje in zato v analizi obravnavamo samo pas betonske pregrade širine 100 m.

## **18 Vpliv velikosti in oblike akumulacijskega bazena na dinamični odziv težnostne pregrade**

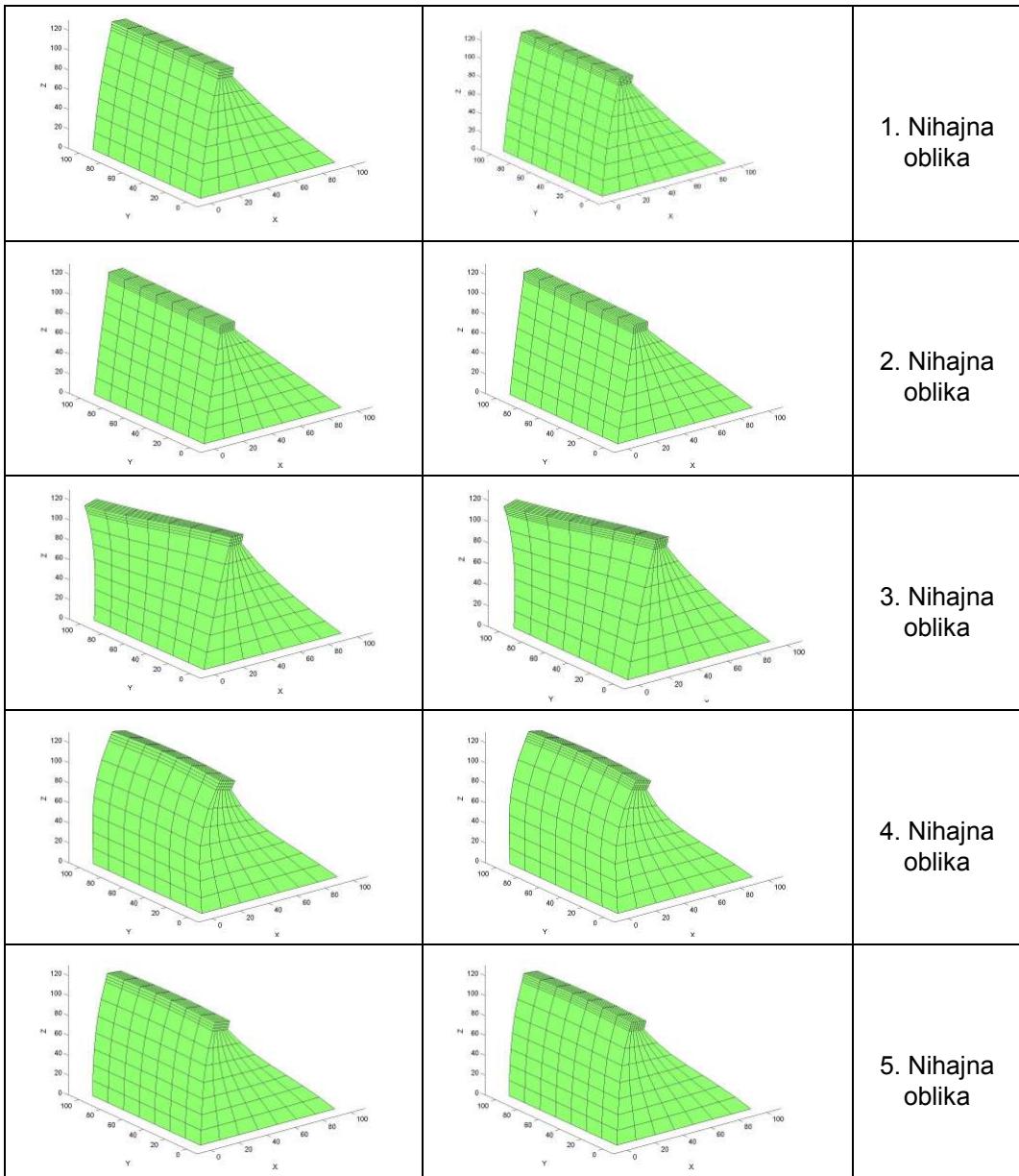


Slika 1: Geometrijski podatki prečnega prereza pregrade.



Slika 2: Shema pregrade in akumulacijskega bazena

Pri dinamični analizi pregrad in konstrukcij na splošno so lastni nihajni časi konstrukcije prav gotovo eni izmed najpomembnejših parametrov. Da ocenimo vpliv dolžine in globine akumulacijskega bazena (velikost in oblika bazena), smo s programom DIN3D analizirali vpliv teh parametrov na lastne nihajne oblike pregrade. Primerjavo med lastnimi nihajnimi oblikami pregrade za dva računska modela prikazuje slika 3. V prvem primeru (slika 3a) smo dinamično obnašanje pregrade določili brez upoštevanja vpliva akumulacijskega bazena, v drugem primeru pa z upoštevanjem akumulacijskega bazena (slika 3b). V obeh primerih smo pri analizi upoštevali velikost akumulacijskega bazena  $100 \times 200$  m, globino bazena pa 122 m. Kot lahko vidimo na sliki 3, akumulacijski bazen v kvalitativnem smislu nima bistvenega vpliva na lastne nihajne oblike pregrade, medtem ko so kvantitativne razlike opazne.

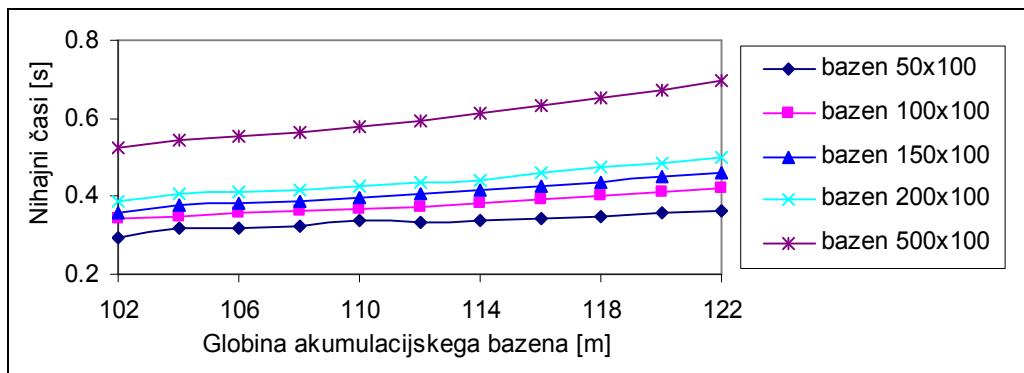


Slika 3: Primerjava med lastnimi nihajnimi oblikami pregrade glede na uporabljeni računski model: (a – levo) računski model brez upoštevanja vpliva akumulacijskega bazena in (b – desno) računski model z upoštevanjem vpliva akumulacijskega bazena.

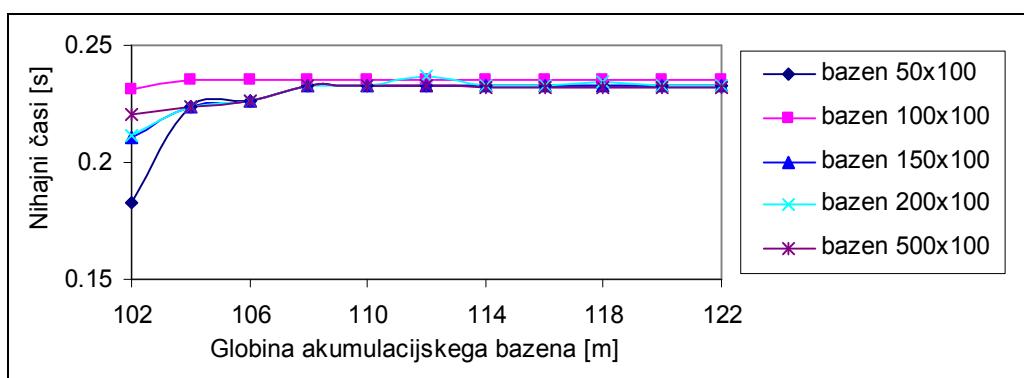
Bistveno večji je vpliv akumulacijskega bazena na lastne nihajne čase pregrade. Rezultati te analize so prikazani v slikah od 4 do 8. Kot vidimo, ima velikost akumulacijskega bazena največji vpliv na prvo lastno nihajno obliko (slika 4). Lastni nihajni časi prve nihajne oblike pregrade so pri večjih akumulacijskih bazenih večji, prav tako se lastni nihajni čas pregrade veča z večanjem globine akumulacijskega bazena. To je pričakovano, saj se skupna masa pregrade in akumulacijskega bazena v obeh primerih povečujeta, pa tudi lastno nihanje pregrade je v 'vplivni' smeri akumulacijskega bazena. Vpliv velikosti akumulacijskega bazena na drugo nihajno obliko je minimalen, razen pri

## **20 Vpliv velikosti in oblike akumulacijskega bazena na dinamični odziv težnostne pregrade**

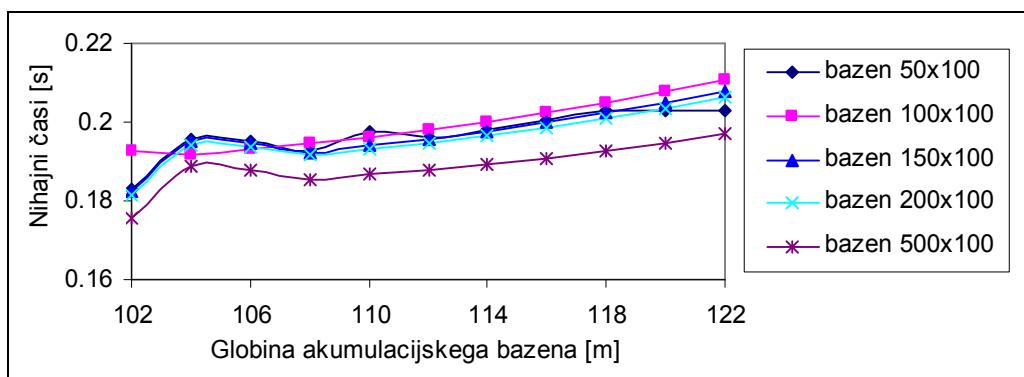
globini bazena 102 m. Da vpliv ni opazen je pričakovano, saj je lastno nihanje pregrade v drugi nihajni obliku v smeri prečno na pregrado (slika 5).



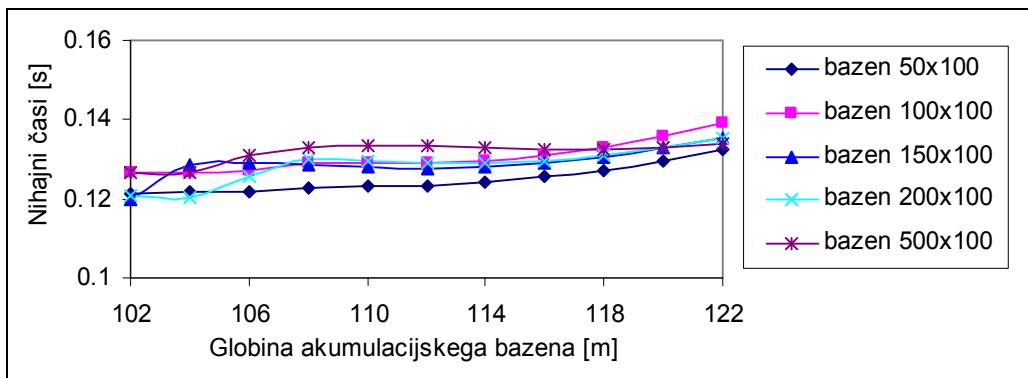
Slika 4: Primerjava velikosti prvega lastnega nihajnega časa pregrade v odvisnosti od globine in dolžine akumulacijskega bazena.



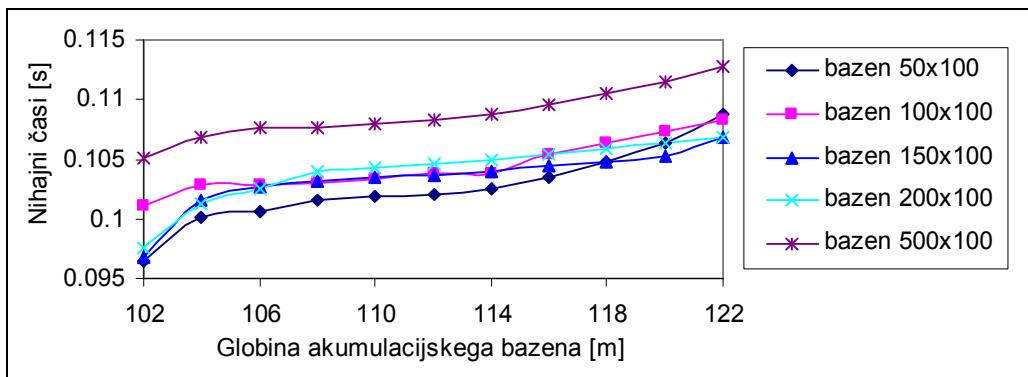
Slika 5: Primerjava velikosti drugega lastnega nihajnega časa pregrade v odvisnosti od globine in dolžine akumulacijskega bazena.



Slika 6: Primerjava velikosti tretjega lastnega nihajnega časa pregrade v odvisnosti od globine in dolžine akumulacijskega bazena.



Slika 7: Primerjava velikosti četrtega lastnega nihajnega časa pregrade v odvisnosti od globine in dolžine akumulacijskega bazena.



Slika 8: Primerjava velikosti petega lastnega nihajnega časa pregrade v odvisnosti od globine in dolžine akumulacijskega bazena.

Tretja lastna nihajna oblika pregrade je torzijska (slika 6). V tem primeru velikost akumulacijskega bazena zmanjšuje lastne nihajne čase pregrade, globina bazena pa jih povečuje. Četrta lastna nihajna oblika pregrade je zopet v 'vplivni' smeri akumulacijskega bazena, vendar je vpliv akumulacijskega bazena na to lastno nihajno obliko pregrade zanemarljiv (slika 7). V splošnem pa ima iste lastnosti, kot smo jih opazili pri prvi lastni nihajni obliku pregrade, torej povečevanje nihajnega časa pregrade s povečevanjem dolžine in globine akumulacijskega bazena. Peto lastno nihajno obliko pregrade predstavlja lastno nihanje v navpični smeri (slika 8), ki zopet ni v 'vplivni' smeri akumulacijskega bazena. Zato je tudi v tem primeru vpliv akumulacije bazena na lastni nihajni čas pregrade zelo majhen.

### 3 ZAKLJUČKI

V članku smo analizirali vpliv velikosti in oblike akumulacijskega bazena na dinamično obnašanje betonske težnostne pregrade. Parametrično študijo smo izdelali z računalniškim programom DIN3D. Program je zasnovan na metodi končnih elementov in upošteva vpliv akumulacijskega bazena na dinamično obnašanje težnostne pregrade s t.i. postopkom adicijske matrike. S parametrično analizo smo ugotovili, da imata dolžina in globina (velikost in oblika) akumulacijskega bazena dominanten vpliv samo na prvo lastno nihajno obliko pregrade. Za višje lastne nihajne oblike pregrade se ta vpliv relativno hitro izgublja.

Kljub temu, da so dosedanji rezultati dinamične analize betonskih težnostnih pregrad z računalniškim programom DIN3D relativno dobri, bo potrebno v nadaljnjih raziskavah preveriti natančnost programa s primerjavo med numeričnimi in dostopnimi eksperimentalnimi rezultati za konkretnе betonske težnostne pregrade v Sloveniji. Šele ta analiza (validacija računskega postopka) bo omogočila realnejšo oceno primernosti oziroma natančnosti računalniškega programa DIN3D za dinamično analizo betonskih težnostnih pregrad.

### 4 LITERATURA

- Cook, R. D., Malkus, S. D., Plesha, E. M. (1989). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons.
- Fenves, G., Chopra, A. K. (1986). Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete gravity dams, Report No. UCB/EERC-85/10.
- Prelog, E. (1975). Metoda končnih elementov. Univerza v Ljubljani, FGG.
- Šolinc, H. (1983). Uporaba metode robnih elementov pri dinamični analizi elastičnih rezervoarjev. Doktorska naloga, Univerza v Ljubljani, FGG.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. (1989). *The Finite Element Method*. McGraw-Hill Book Company.

# **PROGRAM ZA ODLOČANJE PRI UPRAVLJANJU Z VODARSKIMI SISTEMI RIVER WARE**

Mitja BRILLY, univ. dipl. inž grad., Andrej VIDMAR, univ. dipl. inž grad., FGG,  
Katedra za splošno hidrotehniko, Hajdrihova 28 , Ljubljana

## **POVZETEK**

Več agencij in vodnih uprav ZDA je razvilo model za podporo odločanju pri upravljanju za vodnimi viri RiverWare – River Basin Modeling for Today and Tomorrow (Simulacija porečij za danes in jutri). Program je uporaben za različne potrebe: za časovno razporejanje količin, napovedovanje, planiranje in analizo posledic različnih političnih odločitev. Njegova prednost je predvsem velika prilagodljivost s posebnim vmesnikom za oblikovanje strukture programa, graditev mreže in reševanje problemov z različnimi metodami ter upoštevanje operativnih posegov uporabnika programa.

## **SUMMARY**

Several US governmental agencies and water administrations have developed a model providing a decision support tool in managing water resources, i.e. River Ware – River Basin Modeling for Today and Tomorrow (Simulation of river basins for today and tomorrow). The program may be utilized in different ways: for scheduling, forecasting, planning and analysis of consequences of different political decisions. Its advantage lies primarily in the great adaptability owing to a specific interface for designing the program structure, network building and problem solving by way of different methods and with consideration to operative modifications of the program user.

## UVOD

Več agencij in vodnih uprav ZDA je razvilo model za podporo odločanju pri upravljanju za vodnimi viri RiverWare – River Basin Modeling for Today and Tomorrow (Simulacija porečja za danes in jutri). Pri izdelavi programskega orodja so sodelovali USGS – Geološki zavod ZDA odgovoren tudi za hidrološke meritve, HEC – enota ameriške vojske za hidrološke raziskave, USBR – zavod za upravljanje z vodnimi viri na zahodu ZDA in TVA – Urad za upravljanje z vodnimi viri porečja reke Tennessee. Pri delu je sodelovala tudi združenje gradbenih inženirjev ZDA (USACE).

Program je uporaben za različne potrebe: za časovno razporejanje količin, napovedovanje, planiranje in analizo posledic različnih političnih odločitev. Njegova prednost je predvsem velika prilagodljivost s posebnim vmesnikom za oblikovanje strukture programa, graditev mreže in reševanje problemov z različnimi metodami ter upoštevanje operativnih posegov uporabnika programa.

Program je nastajal v tesnem sodelovanjem z uradi zadolženimi za planiranje z vodnimi viri na terenu. Tako so pse problemi in potrebe prakse neposredno prenašali kot potrebe po raziskavah izvajalcem, ki so za naslednjo fazo projekta poiskali ustrezne rešitve. Sistem je bil prvič uspešno uporabljen pri upravljanju z spodnjim tokom reke Kolorado, leta 1994.

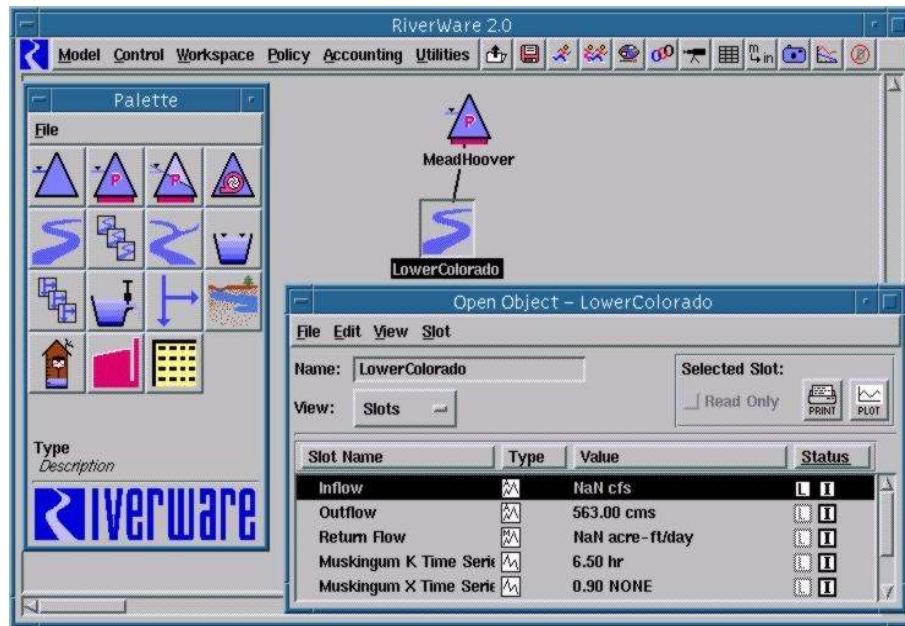
## 2 STRUKTURA PROGRAMA

Program je del sistema, ki ga poleg River ware sestavljajo še orodja za:

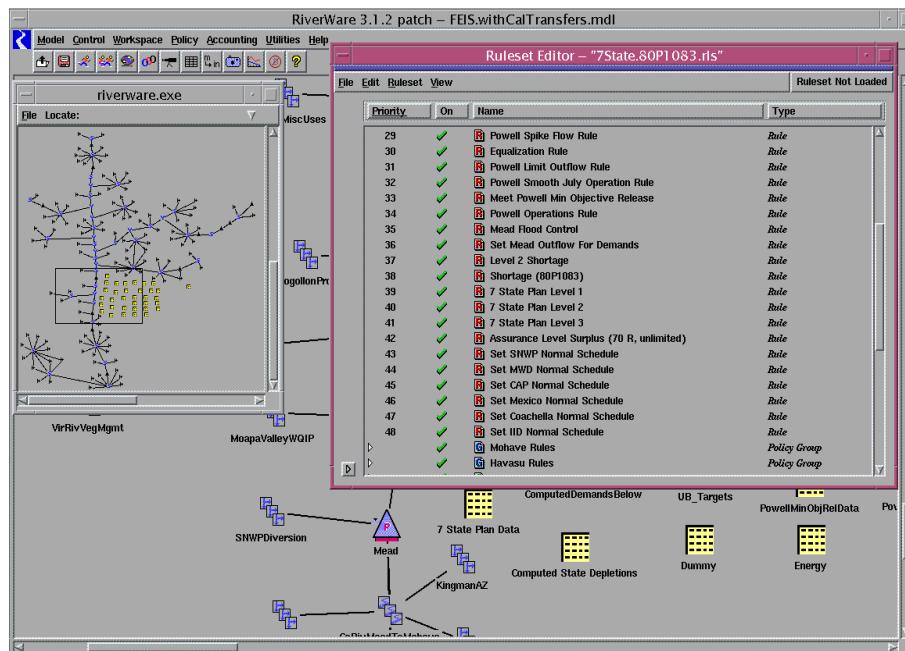
- zbiranje podatkov v realnem času,
- napoved vremena,
- bazo hidroloških podatkov,
- modularni sistem modelov,
- analizo kakovosti podatkov,
- oblikovanje informacije,
- obveščanje in učenje.

Uvodna stran programa omogoča hitro in enostavno graditev sistema na osnovi nabora posameznih delov strukture, slika 1. Posamezni tipski deli sistema - objekti: zbiralniki, deli vodotokov, sotočja in uporabniki vode, so na meniju programa in jih lahko z enim klikom miške vgrajujemo v sistem, pri tem jim moramo določiti osnovne parametre delovanja. Vsak nov objekt pričakuje povezavo z novimi podatki, preverja znane in neznane spremenljivke in rešuje neznane vrednosti. Sistem je določen oziroma je zelo dobra kombinacija vhodnih in izhodnih spremenljivk.

Simulacija se izvaja po vnaprej določenih pravilih. Pravila vodijo simulacijo. Posamezna pravila se lahko po potrebi tudi spremenijo ali izključijo. Optimizacija se izvaja na osnovi linearnega ciljnega programiranja. Cilji in omejitve se opredelijo s strani uporabnika, spremenljivke se avtomatično linearizirajo, pri tem pa uporabnik določa metode linearizacije. Fizične omejitve v programu določajo objekti opredeljeni v strukturi programa. Program omogoča tudi post-optimizacijsko simulacijo.



Slika 1. Okno za oblikovanje osnovne strukture programa



Slika 2. Mreža med seboj povezanih vozlišč modela in povezava z bazo podatkov

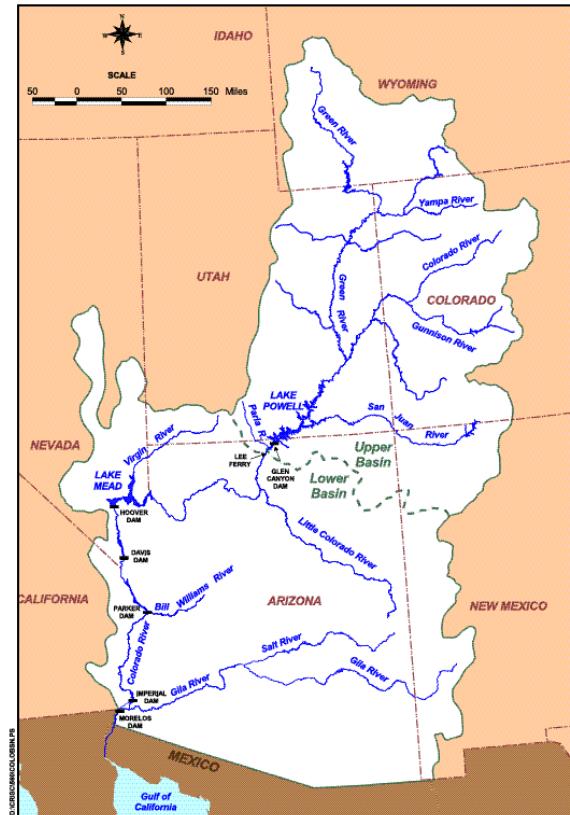
Program ima tudi močno podporo za avtomatično določanje parametrov na osnovi GIS podatkov. Predvsem so to podatki o mejah porečij, vegetaciji, rabi in vrsti tal ter geoloških podatki.

### 3 PRIMER UPORABE SISTEMA

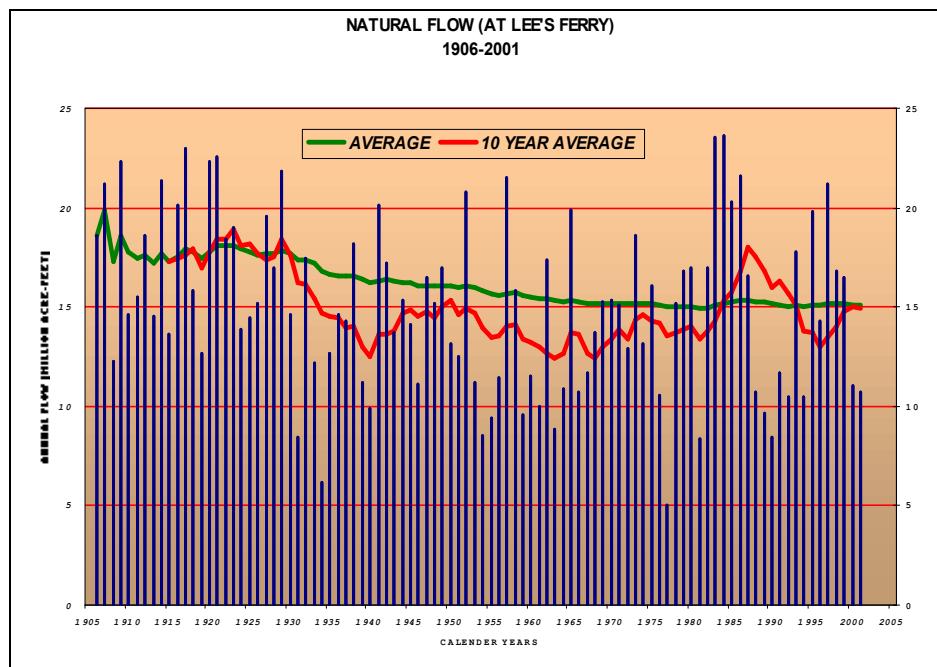
Sistem v svojem delu uporablja različne vodne uprave. Časovni korak je pri tem praviloma en mesec ali en dan. TVA uporablja program tudi v krajših, urnih časovnih korakih.

Značilen je primer uporabe sistema pri upravljanju z vodami spodnjega toka reke Kolorado. Kolorado je upravno razdeljen na zgornji in spodnji del porečja, slika 3. Spodnji del vodotoka zajema bolj sušna območja držav Arizone, New Meksika, Californije in Nevade. Količine vode kontrolirata predvsem dva velika umetna zbiralnika vode: jezero Mead in jezero Powell. Med obema zbiralnikoma se nahaja znani veliki naravni kanjon reke Kolorado. Zbiralniki so bili zgrajeni v letih pred drugo svetovno vojno, na osnovi podatkov meritev z začetke prejšnjega stoletja. takrat so bile tudi opredeljene vodne pravice. Obdobje z začetka tega stoletja je imelo opazno večjo količino padavin, kot kasnejša obdobja, slika 4. Zaporedna vsotna krivulja podatkov kaže vztrajen trend upadanja. V zadnjih desetletjih je povprečje vodne bilance padlo za 20%.

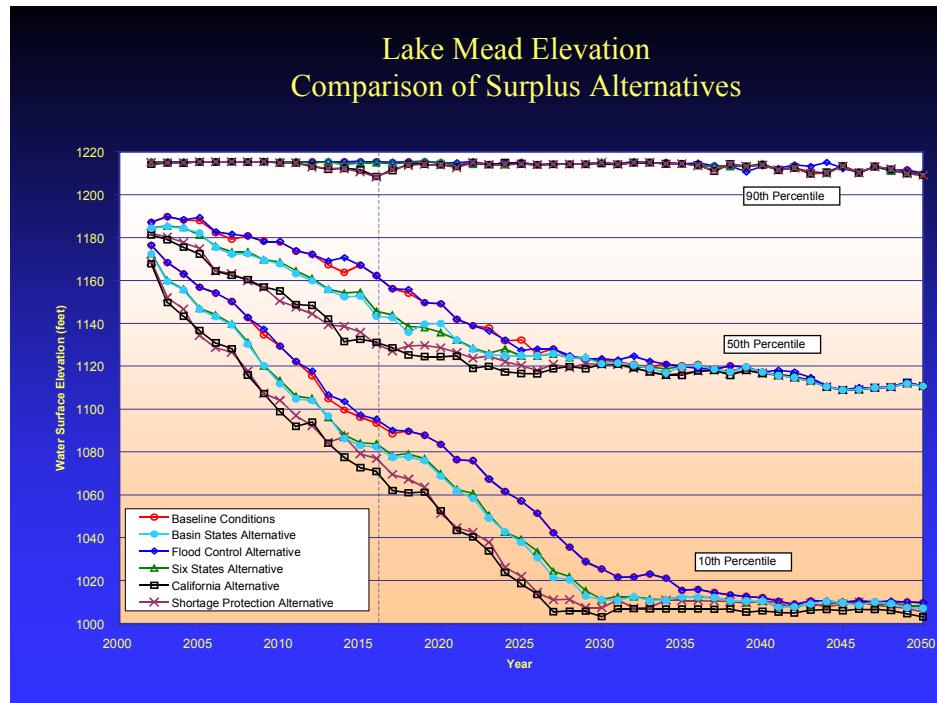
Ogromni zbiralniki se kljub omejitvam porabe praznijo in občasno dosegajo zelo nizke gladine v sušnem obdobju. S pomočjo programa RiverWare so izdelane napovedi različnih scenarijev z ukrepi za sanacijo razmer, slika 3. Simulirane so razmere do leta ##.



Slika 3. Vodna območja reke Kolorado



Slika 4. Vodna bilanca zbiralnika Mead od leta 1905 do 2002



Slika 5. Vpliv različnih scenarijev in politik izkoriščanja vodnih virov ter hidroloških razmer na potek gladin v jezeru do leta 2050

#### 4 ZAKLJUČEK

Program River Ware je zelo močno programsko orodje, ki pa zahteva urejeno in dobro vodeno bazo podatkov. Za naše razmere ima program bolj dolge časovne korake. S časovnim korakom, ena ura se lahko zadovoljivo planirajo tudi različni scenariji delovanja zbiralnikov verigi hidroelektrarn.

## **OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA HE NA SAVI – II FAZA**

izr. prof. dr. Matjaž ČETINA, univ. dipl. inž grad., Majda ZAKRAJŠEK, univ. dipl. inž grad., doc. dr. Dušan ŽAGAR, univ. dipl. inž grad., Matej BRECELJ, univ. dipl. inž grad., FGG, KMTe, Hajdrihova 28 , Ljubljana

dr. Andrej ŠIRCA, univ. dipl. inž grad., IBE d. d.

### **POVZETEK**

Prikazano je osnovno delovanje hidravličnega matematičnega modela za izračun obratovanja hidroelektrarne, ki je še v fazi razvoja. Program ima vgrajene notranje kontrole zahtev oz. omejitve pravilnika obratovanja posamezne elektrarne, ki jih podamo kot podatek za vsako HE posebej. Želeni način obratovanja (časovni potek turbinskega pretoka), ki ga podamo kot podatek na desnem robu, program korigira glede na dotok in razpoložljivi koristni volumen, tako da predpisani parametri obratovanja (maksimalna in minimalna obratovalna kota ter maksimalna hitrost naraščanja pretoka pod elektrarno) niso nikoli prekoračeni. Rezultat programa so hidravlični parametri toka na obravnavanem odseku reke ter moč, proizvedena energija ter donos v času, ki ga obravnavamo. Uporaba tega programa naj bi služila za izbiro najbolj ugodnega načina obratovanja za neko napovedano hidrološko situacijo glede na takratne zahteve porabe električne energije. Za obvladovanje bolj kompleksnih situacij (račun za verigo elektrarn, upoštevanje stranskih dotokov, račun obratovanja pri visokih pretokih, ko hkrati že poteka denivelacija na HE zaradi zagotavljanja poplavne varnosti v področju akumulacije) je potrebno izvesti še dodatne dopolnitve programa.

### **SUMMARY**

A mathematical model for computation the Hydro Power Plant production is described. It takes into account the demands and limitations of HPP operating, prescribed for a certain HPP that have to be given as data. The program modifies the prescribed mode of production (the planned turbine discharge with time - that is given as the data in the HPP cross section) according to the incoming discharge and the available volume in the water-storage reservoir in such a manner that prescribed limitations (maximum and minimum allowed water level in the reservoir and maximum speed of the discharge increasing downstream of HPP) are never exceeded. The results of the computation are hydraulic parameters of unsteady water flow in the reservoir, the energy production and the income for the given time period. This program is meant to be a useful tool for the HPP managers to choose the most appropriate way of the HPP operating in advance according to the hydrology forecast and the energy trade demands. To deal with more complex situations (computations for a chain of HPP; taking the tributaries into account; computation of the HPP operation in high water conditions, when the decreasing of water level at the HPP is demanded in order to prevent the upstream region from flooding) this program needs some further improvements.

## 1 UVOD

Osnovna ideja je bila razvoj kompleksnega matematičnega hidravličnega modela, ki bi služil za:

- pomoč obratovalcem pri določitvi najboljšega načina obratovanja posameznih HE in verige kot celote
- presojo sedanje in bodoče poplavne varnosti obrežnega prostora

V okviru naloge Optimizacija obratovanja HE na Savi, ki so jo financirale Savske elektrarne, smo v ta namen začeli z nadgrajevanjem programa za račun nestalnega toka v rečnih strugah.

V nadaljevanju je bila zamišljena nadgradnja s sedimentacijskim modulom in modulom kvalitete.

Vzporedno se je začel razvijati meteorološko – hidrološki model, ki bi dajal vhodne podatke za hidravlični model.

Za napovedane hidrograme v določenem delu porečja bi se vnaprej (za nekaj ur ali več) preračunalo več načinov obratovanj in izbralo najustreznejšega glede na zahteve porabe električne energije. Tako bi vnaprej precej natančno določili, koliko največ je možno ponuditi trgu.

V prvi fazi se je izvršila presoja nekaterih modelov in izbira osnovnega modela. V drugi fazi so bile narejene nekatere dopolnitve osnovnega modela, postavljena sta bila matematičnega modela za dve posamezni akumulaciji oz. HE (Moste in Vrhovo) in izvršeni računi hidravličnih in energijskih parametrov za različne načine obratovanja na posamezni HE pri napovedanem hidrogramu dotoka. Za lažje delo upravljalcev HE s programom smo razvili uporabniško prijazen vmesnik za pripravo podatkov, s katerim bo olajšano vstavljanje potrebnih vhodnih podatkov za posamezno simulacijo. Uredili smo tudi vmesnik za predstavitev rezultatov, ki ima povezavo na program Excel, tako da rezultate takoj predstavi tudi v grafični obliki. Oba vmesnika sta medsebojno povezana.

## 2 OSNOVNI MATEMATIČNI MODEL

### 2.1 Osnovne enačbe

Nestalni tok s prosto gladino matematično opišemo s t.i. St. Venantovima enačbama:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad \text{kontinuitetna enačba} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSI \quad \text{dinamična enačba} \quad (2)$$

Pomen oznak:

- $x$  - razdalja, -  $t$  - čas, -  $Q$  - pretok, -  $S$  - prečni presek, -  $z$  - kota gladine
- $I$  - naklon energijske črte, ki ga računamo po Manningu.

## 2.2 Metoda reševanja

V programu IMP01, ki je bil osnova za sedanji program IMP2002, sistem enačb za nestalni tok rešujemo z implicitno metodo končnih razlik. Računske področje je pokrito z numerično mrežo, ki deli razdaljo oz. čas na enake fiksne intervale. Pretok in gladina se v vsakem časovnem koraku računata v vseh točkah numerične mreže hkrati – torej se rešuje sistem enačb, ki zajema kontinuitetno in dinamično enačbo za vse odseke (oz. notranje točke mreže) ter enačbi robnih pogojev v začetnem in končnem profilu računskega področja. Uporabljena je Dronkersova shema, ki je posebna oblika Preissmanove sheme. (lit. 1).

## 2.3 Začetni in robni pogoji

### 2.3.1 Začetni pogoji

Ob začetku računa morajo biti poznane gladine v vseh računskih profilih pri začetnem pretoku. Dobimo jih z računom stalnega neenakomernega toka. Dinamično enačbo se rešuje iteracijsko od profila do profila, kot robni pogoj moramo podati koto gladine v spodnjem profilu, kjer se (za mirni tok) račun začne.

### 2.3.2 Robni pogoji

Levi robni pogoj: V osnovnem programu sta dani dve možnosti in sicer  $Q(t)$  ter  $Z(t)$ .

Desni robni pogoj: Dane so tri možnosti:  $Q(t)$ ,  $Z(t)$  in  $Q(Z)$ .

### 3 DOPOLNJEVANJE IN USPOSABLJANJE MODELA

V tej fazi smo izvedli nadgradnjo samega modela IMP01 glede na pravila polnjenja in praznjenja koristnega volumna akumulacije (IMP2002) in izdelali dva vmesnika za lažje delo z modelom.

#### 3.1 Vgraditev zahtev pravilnika obratovanja v matematični model

Za osnovo nam je služil pravilnik o obratovanju HE Vrhovo. Predpisano ima minimalno in maksimalno obratovalno gladino, med katerima sme nihati vodna gladina med obratovanjem, poleg tega pa ima predpisano tudi najhitrejše dovoljeno naraščanje pretoka, kadar gre za povečevanja pretoka na turbinah na račun izkoriščanja koristnega volumna akumulacije (pri majhnih naravnih dotokih). Da bi lahko obratovalci za naslednje ure ali dni za napovedane dotoke čim točneje ugotovili, koliko energije so sposobni ponuditi trgu, ob tem pa bi imeli zagotovljeno, da bodo zahteve iz pravilnika izpolnjene, smo temu ustrezno dopolnili model.

Kadar na desnem robu podamo potek želenega pretoka na turbinah s časom, imamo na obeh robovih kot robni pogoj funkcijo  $Q(t)$ .

Če so zahteve po proizvodnji energije v določenem trenutku večje, kot jo omogoča naravni dotok, se začne bazen prazniti. Če tako stanje traja toliko časa, da je porabljen ves koristni volumen in se torej gladina bazena zniža na spodnjo dovoljeno koto, program preide na drug tip dolvodnega (desnega) robnega pogoja in sicer na pregradi drži konstantno gladino, dokler naravni dotok ne naraste na oz. nad želeni turbinski pretok. Program sam krmili naraščanje in upadanje pretoka na turbini glede na želje upravljalca ter glede na možnosti, tako da:

- začne porabljati koristni volumen takrat, ko to želi upravljalec (ta mu poda želeni pretok na turbinah kot desni robni pogoj),
- pretok narašča s hitrostjo, ki je dopustna po pravilniku,
- začne zmanjševati pretok na turbinah, predno gladina v bazenu doseže minimalno koto, tako da se ob dosegu le-te pretok na turbinah čim bolj približa vrednosti dotoka,
- nikoli ne dopusti znižanja gladine pod dovoljeno spodnjo koto vode.

Če so zahteve po proizvodnji energije manjše od možnosti, ki jo nudi naravni dotok, potem:

- Pretok na turbinah teče po želenem diagramu, ki ga poda upravljalec.

- Če je v trenutku, ko dotok preseže želeni pretok na turbinah, kota gladine bazena manjša od nominalne kote zajezebe, se prične s polnjenjem bazena s presežkom pretoka (nad  $Q_t$ ), dokler ni koristni volumen spet zapolnjen, oziroma dokler imamo presežek dotoka.
- če je gladina bazena že na maksimalni koti, se presežni del pretoka preliva preko prelivnih polj,
- pri polnjenju bazena program krmili prelivanje tako, da najprej vso presežno vodo akumulira, ko pa se gladina bazena približuje maksimalni dovoljeni koti, se količina prelivanja povečuje, tako da se vsota pretoka preko turbin in prelitega pretoka ob koncu polnjenja približa vrednosti dotoka. Ko (če) je nominalna kota bazena dosežena, program preide na drug tip robnega pogoja in sicer konstantno gladino s časom, ki velja, dokler je dotok večji od turbinskega pretoka;
- maksimalna dovoljena gladina ni nikoli presežena.

V primerih, ko imamo na desnem robu pogoj, da obratujemo pri konstantni gladini, je pretok na turbinah enak dotoku. Kadar je dotok večji od požiralnosti turbin, preostanek prevajamo preko prelivov.

Na osnovi možnih pretokov na turbinah, razlike gladin zgornje in spodnje vode se izvrši račun moči in energije za definirani čas računa ter finančni donos. Gladine spodnje vode določimo v vsakem časovnem koraku iz relacije  $Z_{sp}(Q)$ , ki jo moramo vnesti kot podatek za vsako HE. Pri računu so upoštevane tudi vse izgube sistema (razen zamašitve grabelj na vtoku) in izkoristek agregatov.

Kot rezultat nam program izpiše dve datoteki rezultatov. V prvi nam poleg vseh podatkov zapiše v izbranih časih pretoke, gladine, povprečne hitrosti, prečne preseke, omočene gladine in Froudovo število v vseh prečnih profilih. V drugi datoteki, ki je uporabljena tudi za prikaz rezultatov z vmesnikom, pa so zapisani:

- dotok v prvem profilu akumulacije kot funkcija časa (podatek za levi robni pogoj),
- želeni pretok na turbini kot funkcija časa (podatek za desni robni pogoj),
- možni pretok na turbini (kot funkcija časa), ki se razlikuje od želenega tam, kjer dane možnosti ne zadostijo potrebam (rezultat),
- celotni pretok v pregradnjem profilu kot funkcija časa (rezultat),
- pretok, ki ga prevajamo preko prelivnih objektov (kadar je to potrebno) kot funkcija časa (rezultat),
- gladina akumulacije v pregradnjem profilu kot funkcija časa (rezultat, kadar je kot desni robni pogoj podan  $Q(t)$  na turbini ali pa podatek za desni robni pogoj),

- moč elektrarne kot funkcija časa (rezultat),
- proizvedena energija v določenem časovnem obdobju (rezultat),
- vrednost energije (donos) v določenem časovnem obdobju (rezultat).

### 3.2 Izdelava vmesnikov

#### 3.2.1 Vmesnik za pripravo podatkov

Podatke bi lahko glede na pogostnost obravnave oz. spremiščanja razdelili na dve skupini.

1. Podatki, ki jih obdelamo le enkrat za posamezno akumulacijo in ostajajo pri vseh računih enaki (stalne podatkovne datoteke):
  - geometrijski podatki o prečnih profilih struge,
  - podatki o hidravličnih izgubah v pretočnem traktu elektrarne,
  - podatki o izkoristku turbin,
  - podatki o spodnji vodi,
  - podatki o zahtevah pravilnika o obratovanju.
2. Podatki, ki jih spremiščamo za vsak obravnavani primer obratovanja (spremenljive podatkovne datoteke):
  - izbrani primer (Moste ali Vrhovo),
  - podatki o začetnem stanju - pretok stalnega toka in gladina v profilu elektrarne,
  - podatki o pretokih v prvem profilu obravnavanega področja - t.i. levi robni pogoji,
  - podatki o pretokih ali gladinah v zadnjem profilu, to je profil HE - t.i. desni robni pogoji,
  - čas računanja - trajanje obdobja, ki ga želimo analizirati,
  - čas (ura) začetka računa,
  - podatki o razmerju cen energije v posameznih obdobjih dneva glede na najcenejšo (nočno),
  - najnižja cena energije,
  - imena datotek za zapis vnešenih podatkov o robnih pogojih ter numeričnih rezultatov.

Z vmesnikom podajamo za vsak primer samo podatke iz druge skupine, ostale pa program samodejno čita iz stalnih podatkovnih datotek oz. so vgrajeni v program, če so podani v obliki funkcije posameznih parametrov (hidravlične izgube, izkoristek, spodnja voda).

### 3.2.2 Vmesnik za prikaz rezultatov

Da bi bili rezultati čim bolj pregledni in bi bile s tem omogočene čim hitrejše odločitve pri izbiranju najbolj ugodnega načina obratovanja v nekem primeru, smo izdelali ustrezен vmesnik. Z njim dobimo takoj časovne diagrame vseh relevantnih parametrov (v Excelu):

- vhodni hidrogram –  $Q_{dot}(t)$  (podatek za levi robni pogoj),
- diagram želenih pretokov na turbinah (podatek za desni robni pogoj),
- izhodni hidrogram –  $Q_{od}(t)$  v profilu HE (rezultat),
- diagram možnih pretokov na turbinah (rezultat),
- diagram pretokov, ki jih je potrebno odvajati preko prelivov (rezultat),
- časovni potek gladine v profilu HE (rezultat),
- diagram moči v profilu HE (rezultat),
- diagram proizvedene energije v profilu HE (rezultat),
- diagram donosa (rezultat).

Diagrame pretokov in gladine lahko izrišemo na eni, diagrame zadnjih treh parametrov pa na drugi sliki.

Urejena je tudi možnost, da se neposredno na diagramu pretokov lahko spremeni desni robni pogoj – to je definiranje drugačnega načina obratovanja, s katerim želimo narediti nov račun.

Vmesnika sta povezana, tako da se takoj po koncu računa, ki ga sprožimo z vmesnikom za pripravo podatkov, aktivira vmesnik za prikaz rezultatov.

## 3.3 Omejitve pri delu s programom in omejitve področja uporabnosti

- vrednost pretoka stalnega toka se mora ujemati s prvo vrednostjo pretoka v hidrogramu levega robnega pogoja,
- prva vrednost za čas v obeh krivuljah robnega pogoja in pri podatkih o cenovnih obdobjih mora biti ista, to je čas začetka računa,

- pri krivuljah robnega pogoja ne sme biti hipnih sprememb – v istem času ne moremo imeti dveh različnih vrednosti pretoka,
- na levem robu lahko podajamo  $Q(t)$ , na desnem robu pa  $Q(t)$  ali  $Z(t) = \text{konst}$  (to je obratovanje po dotoku),
- s to verzijo programa IMP2002 je možen preračun obratovanja HE Vrhovo do pretoka  $Q=1200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Robni pogoj zniževanja kote v profilu elektrarne, ko pretok narašča nad omenjeno vrednost, še ni zajet;
- na začetku akumulacije Vrhovo podajamo seštete pretoke za Savo in Savinjo. Možnost upoštevanja stranskih pretokov bo urejena v naslednji fazi.

## 4 OBRAVNAVANI PRAKTIČNI PRIMERI

### 4.1 Primeri za HE Moste

Obravnavana sta bila dva primera. Geometrijski podatki in podatki za robne pogoje so za oba primera isti, razlika je le v tem, da imamo v prvem primeru na začetku računa gladino akumulacije na maksimalni, v drugem primeru pa na minimalni koti.

Začetni pogoj:  $Q_0 = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Z_0 = 524.75 \text{ m}$  (**Moste\_P1**) oz.  $518.5 \text{ m}$  (**Moste\_P2**)

Levi robni pogoj:  $Q(t)$  za poplavni val z maksimalnim pretokom  $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$

Desni robni pogoj  $Q(t)$  na turbinah; diagram konične porabe – jutranja in opoldanska konica z maksimalno možnim pretokom  $28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (tri turbine; med 5. in 8. uro oz. med 12. in 15. uro) ter večerna konica s pretokom  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  (dve turbini; med 18. in 21. uro).

### 4.2 Primeri za HE Vrhovo

Za HE Vrhovo je bilo obravnavanih pet računskih primerov.

#### 4.2.1 Vhodni podatki

Primeri **Vrhovo\_P1**, **Vrhovo\_P2** in **Vrhovo\_P3** imajo isti začetni ter levi robni pogoj.

Začetni pogoj:  $Q_0 = 105 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Z_0 = 191 \text{ m}$ .

Levi robni pogoj:  $Q(t)$  za poplavni val z maksimalnim pretokom  $936 \text{ m}^3/\text{s}$ .

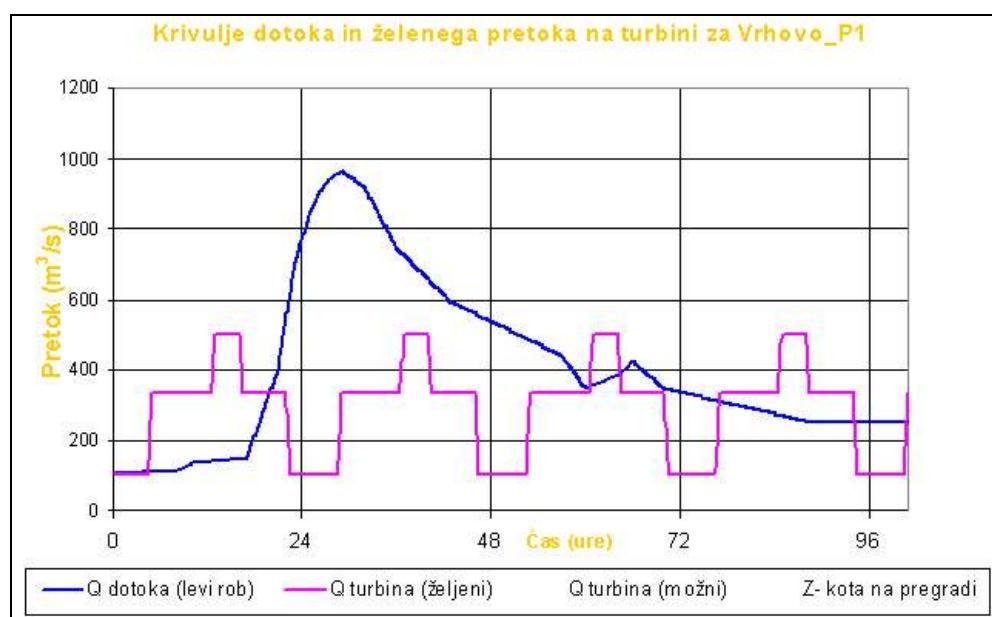
Desni robni pogoj: za prvi in drugi primer imamo podan pretok na turbinah. V prvem primeru gre za enakomerni trapezni diagram obremenitve, v drugem primeru pa je v obdobjih, ko poraba presega možnost proizvodnje (majhen dotok) in nam koristni volumen ne zadošča za kritje vseh potreb, poraba koristnega volumna prestavljena v čas največje porabe energije. V tretjem primeru imamo za desni robni pogoj podan potek gladine  $Z(t)$  in sicer imamo obratovanje pri kostantni nominalni koti v profilu HE.

Primera **Vrhovo\_P4** in **Vrhovo\_P5** imata naslednje začetne in robne pogoje:

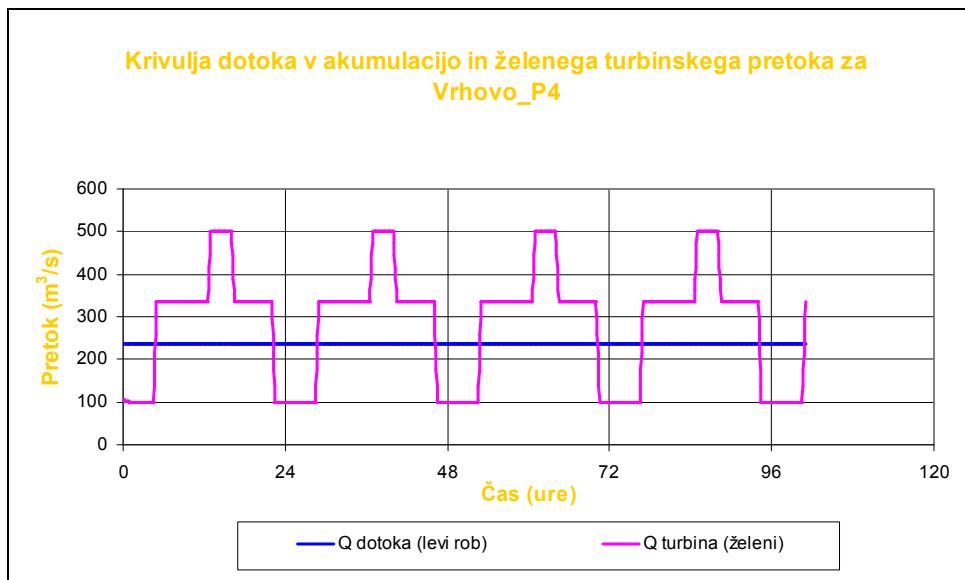
Začetni pogoj:  $Q_0 = 235 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Z_0 = 191 \text{ m}$ .

Levi robni pogoj:  $Q(t)$  - stalni dotok  $Q = 235 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Desni robni pogoj: v prvem primeru imamo enakomerni trapezni diagram obremenitve (kot za **Vrhovo\_P1**), v drugem primeru pa se uporablja koristni volumen v času največje porabe, v času srednje porabe pa je pretok na turbinah enak dotoku.

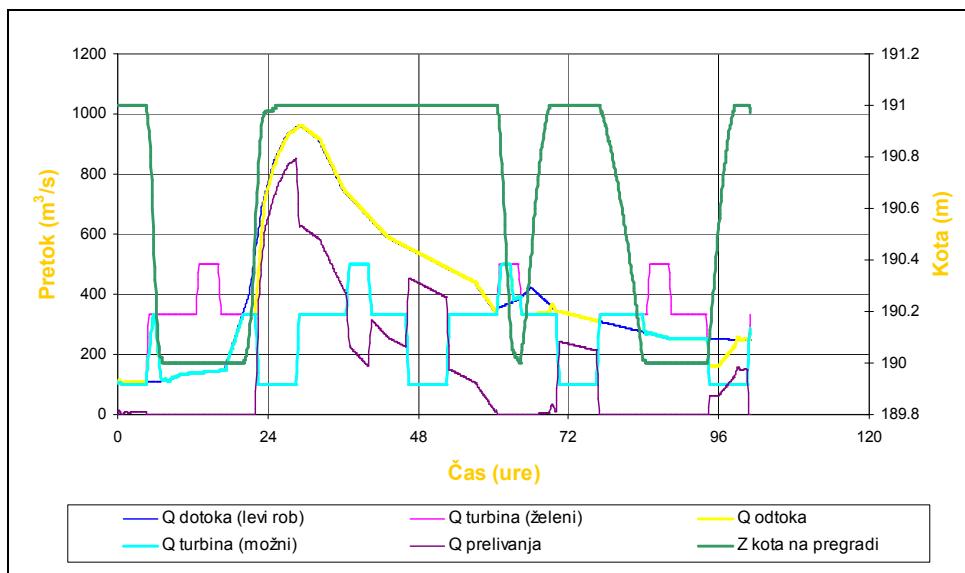


Slika 1: Vhodni podatki na levem in desnem robu akumulacije HE Vrhovo za primer **Vrhovo\_P1**



Slika 2: Vhodni podatki na levem in desnem robu akumulacije HE Vrhovo za primer Vrhovo\_P4

#### 4.2.2 Rezultati



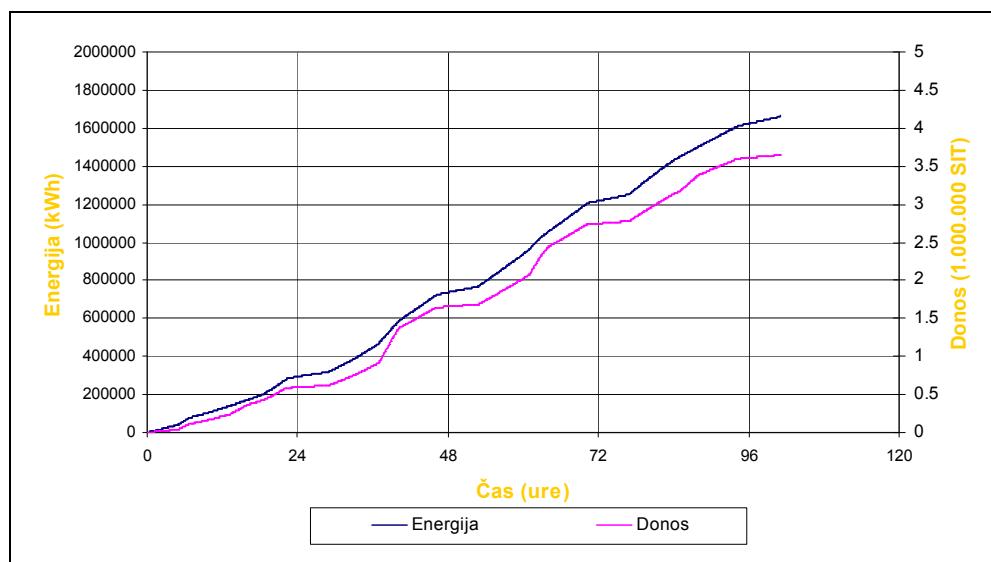
Slika 3: Potek pretokov in gladine za primer Vrhovo\_P1

Na slikah 1 in 3 imamo prikazana diagrama obeh robnih pogojev in vseh rezultatov za primer Vrhovo\_P1, ko imamo v začetnem profilu akumulacije dotok visokovodnega vala, potrebe po energiji pa karakterizira trapezni diagram obremenitve. Primerjava krivulj želenih in možnih turbineskih pretokov na sliki 3 nam kaže, kako program krmili turbineske pretoke glede na dane razmere. Ko želeni turbineski pretok preseže vrednost dotoka, se prične prazniti koristni volumen akumulacije. Z dvema turbinama lahko polno obratujemo le kratek čas,

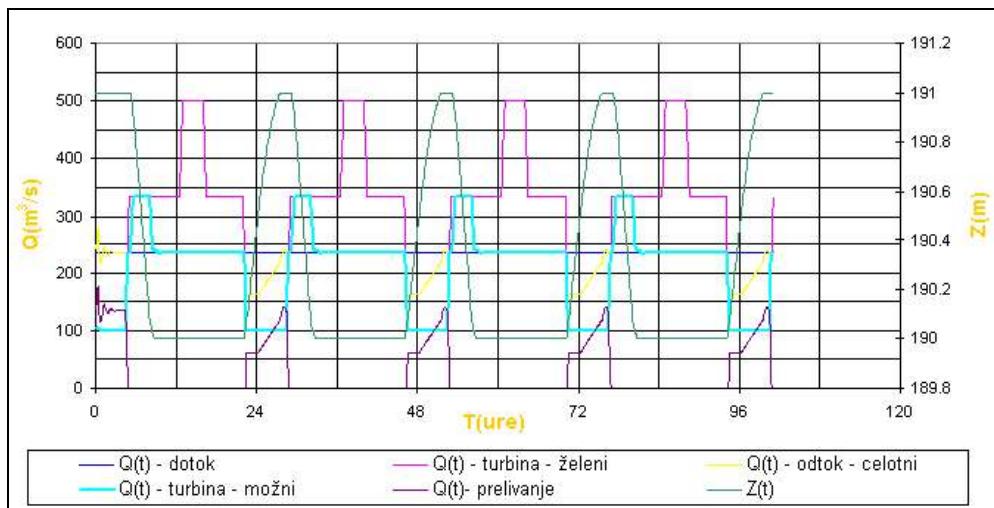
potem pa je potrebno turbinski pretok postopoma zmanjševati , tako da se približa dotoku, ko se gladina bazena približuje spodnji koti koristnega volumna. Potem elektrarna obratuje pri konstantni spodnji koti , nato pa se bazen začne polniti, ko dotok preseže želeni turbinski pretok. V fazi polnjenja druge polovice koristnega volumna postopoma povečujemo prelivanje, tako da se pretok na HE približuje dotoku, ko gladina narašča proti nominalni gladini. V časovnem intervalu, ko dotoki presegajo turbinski pretok in imamo bazu na nominalni gladini, presežek pretoka prelivamo. Proses praznjenja in polnjenja se tekom računskega obdobja ponovi še dvakrat, kar je razvidno tudi iz diagrama poteka gladine s časom.

Na slikah 2 in 5 imamo prikazana diagrama obeh robnih pogojev in vseh rezultatov za primer Vrhovo\_P4, ko imamo v začetnem profilu akumulacije ves čas računa konstanten dotok, potrebe po energiji pa karakterizira trapezni diagram obremenitve. Koristni volumen se vedno, ko imamo porabo večjo od pretoka, porabi že v prvih urah, tako da ves nadaljnji čas vključno z dobo največje porabe energije, HE obratuje na minimalni koti, polni pa se v nočnih urah.

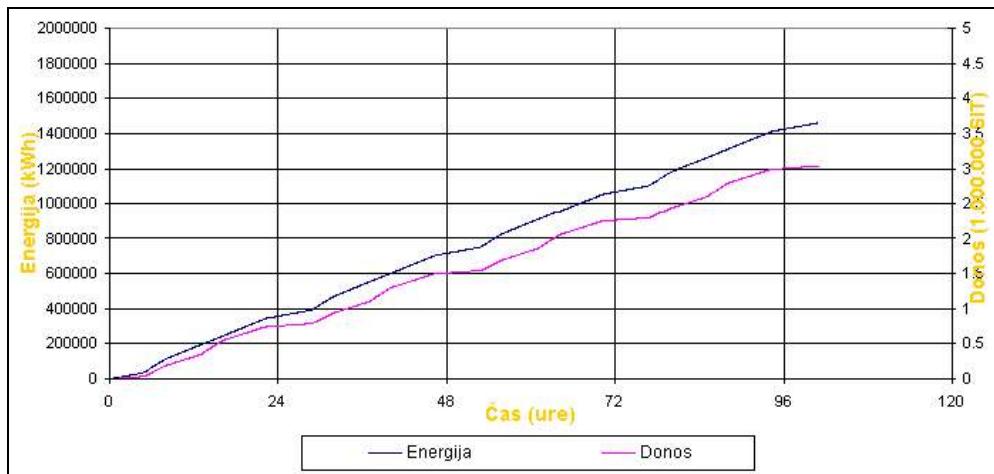
Prikazani primeri so sicer preprosti, vendar nakazujejo možnosti, ki jih nudi program IMP2002.



Slika 4: Potek energije in donosa za primer Vrhovo\_P1



Slika 5: Potek pretokov in gladine za primer Vrhovo\_P4



Slika 6: Potek energije in donosa za primer Vrhovo\_P4

## 5 POTREBNE NADALJNJE DOPOLNITVE MODELA

V nadaljevanju dela bo potrebno narediti nekatere že prej predvidene, pa tudi nekatere dodatne dopolnitve oz. spremembe v programu.

Od prvih bo potrebno narediti še:

- vgraditev člena za dodatne izgube v sistem enačb za nestalni tok,
- ureditev možnosti upoštevanja stranskega dotoka,
- nadgraditev modela za račun v verigi HE oz. z večjim številom kanalov (vključno z dotoki),

- nadgraditev modela za račun pri visokih vodah v akumulacijah tipa Vrhovo, kjer moramo pri pretokih nad  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  zniževati gladino v profilu elektrarne, da niso presežene maksimalne dopustne kote v gorvodnem delu akumulacije).

V drugi skupini pa so dopolnitve, po katerih se je pokazala potreba pri računu prikazanih primerov:

- drug način računa volumnov pri iteracijskem postopku iskanja načina polnjenja in praznjenja koristnega volumna akumulacije, ker je sedanji preobčutljiv na določene kombinacije parametrov in v nekaterih primerih tudi premalo točen,
- v nekaterih primerih prihaja do nihanja pretokov pri prehodu iz stalnega v nestalni tok, kar kaže na možnost, da kompatibilnost med rezultati stalnega in nestalnega toka ni najboljša. Če se bo pokazalo, da se to pogosto pojavlja in ne pokvari rezultatov samo v kratkem začetnem časovnem intervalu, temveč so napake občutnejše, bo potrebna zamenjava numerične metode za račun stalnega toka;
- ko bo program toliko dopolnjen, da bo računska natančnost zadovoljiva, bi bilo smotorno dodati še izračun potrebne odprtosti zapornic v slučajih prelivanja (sedaj se računa le pretok, ki ga je potrebno prelivati).

## 6 ZAKLJUČKI

Program IMP2002 v sedanji obliki in oba vmesnika so osnova za načrtovani prispevek k optimizaciji obratovanja in pomoč pri delu obratovalcem, ki jo bo potrebno dopolnjevati in izboljševati glede na njihove izkušnje in predloge pri delu s programom. Šele na podlagi njihovega dela se bo pokazalo, kaj bo potrebno spremeniti oz. dodati v sedanji verziji programa, poleg že načrtovanih dopolnitev z naše strani. Čim bolj bi bilo treba preveriti točnost izračunov že v fazi, ko obravnavamo le posamezno akumulacijo, saj se bo to obrestovalo pri računih obratovanja HE v verigi, ko se bo s pravo optimizacijo obratovanja šele res začelo.

Potrebno bo najti tudi najboljši možni način povezave dela našega hidravličnega modela z optimizacijo, ki jo izvajajo strokovnjaki elektrotehniške stroke.

## 7 LITERATURA

Kompare, Boris: Diplomska naloga, FGG, Ljubljana, 1980.

Poslovnik o obratovanju in vzdrževanju objektov in naprav HE Vrhovo, SEL, d.o.o., Ljubljana, Medvode, 2002.

HE Moste, Meritve energetskih karakteristik hidroelektrarne, Turboinštitut, Ljubljana, 1993

Sotočje Javorniškega potoka in Save Dolinke, Načrt vodnogospodarske ureditve, VGI družba za gospodarjenje z vodami d.o.o., Ljubljana, 2000.

Matematični model Save, odsek D – sedanje stanje, Poročilo, FGG, 1984.

# **AVTOMATIZACIJA TEHNIČNEGA OPAZOVANJA GRADBENIH OBJEKTOV HE NA DRAVI**

Alenka Prnaver dipl. ing. grad., Vladimir Šega univ. dipl. ing. el.

Dravske elektrarne Maribor

## **POVZETEK**

V članku je predstavljena obnova in avtomatizacija sistema tehničnega opazovanja na hidrotehničnih objektih na verigi HE na Dravi. Prikazani so postopki izvedbe avtomatizacije, način zajema podatkov, predvsem sistem spremjanja delovanja dilatacij z dilatometri (x, y in z os), meritve piezometričnih pritiskov in temperatur vode, meritve specifične prevodnosti vode v bočnih vrtinah, meritve vzgonskih tlakov in meritve temperatur vode v vrtinah ter programska oprema, ki je potrebna za delovanje sistema.

## **SUMMARY**

The article presents reconstruction and automation of technical observation on river Drava's hydroelectric power stations. It presents methods of automation, data collection methods, above all the system of dilatation control with dilatometers (x,y and z axis), piezometric pressure and water temperatures, measurements of specific water conductibility in side wells, measurements of bouyancy pressure and water temperatures in wells, as well as software needed for system operation.

## 1. UVOD

Dravske elektrarne Maribor sestavlja osem proizvodnih objektov - hidroelektrarn. Šest pregrad je akumulacijskih s betonsko-težnostnimi pregradami, od Maribora dolvodno pa sta zgrajeni dve elektrarni kanalskega tipa.

Glede na gradbeno višino, količino zajezne vode in maksimalni pretok po klasifikaciji (Pravilnik o tehničnem opazovanju visokih jezov Uradni list SFRJ št. 7 z dne 13.02.1966) spadajo vsi objekti med visoke jezove, zato so bili za vsak objekt posebej izdelani projekti tehničnega opazovanja, na osnovi katerih so bili v letih 1969 do 1972 vzpostavljeni sistemi tehničnega opazovanja na in ob objektih HE na Dravi.

Do vzpostavitve tehničnega opazovanja po projektih, ki so bili v letih od 1969 leta dalje izdelani v skladu z veljavno zakonodajo je znano, da je na posameznih objektih potekalo le opazovanje vertikalnih deformacij in posamezni vizualni ogledi.

Po letu 1970 pa je vzpostavljen na vsakem objektu HE na Dravi sistem opazovanja. Opazovanje obsega zasledovanje dinamičnih in hidrostatičnih razmer na objektu, v kontaktu pod objektom in v okolini objekta. Omenjene meritve pa dopoljujejo vizualni pregledi objektov.

Po projektu tehničnega opazovanja so definirane stalne, periodne, obdobne in izredne meritve. Za vse meritve razen izrednih, ki jih izvajamo ob izrednih dogodkih ali pojavih, je izdelan letni plan meritev. Meritve se izvajajo ročno in strojno. Rezultati se zborejo, obdelajo in nato na osnovi analiz izdela končno poročilo z zaključki, opozorili in napotki.

## 2 AVTOMATIZACIJA

Na vseh objektih se stalno izvajajo meritve za ugotavljanje hidrostatičnih in hidrodinamičnih razmer. Z razvojem tehnologij in zaradi množice rezultatov meritev, se je izkazalo za zelo primerno avtomatiziranje posameznih meritev.

### 2.1 Začetki avtomatizacije - HE FALA

Že leta 1990 smo pri Dravskih elektrarnah izvedli delno avtomatizacijo na HE Fala. Ta sistem deluje še danes in zajema meritve nivojev in temperatur v dveh B vrtinah, šestih K vrtinah, dveh vrtinah v kontrolnem hodniku - novi del (agregati 9 in 10). Avtomatsko se merijo nivo in temperatura zgornje in spodnje vode, temperatura zraka in betona v kontrolnem hodniku, meritve dilatacij na dveh mestih, temperatura zraka in zračni pritisk na krovu.

V času instalacije sistema je bil programski paket za obdelavo podatkov še zelo preprost z nekaj popravki pa je moderniziran.



Slika 1: Prikaz programskega paketa za obdelavo podatkov

## 2.2 Nadaljevanje avtomatizacije

Do leta 2000 je bila končana I.faza prenove HE na Dravi. Obnovljeni so bili objekti HE Dravograd, HE Vuzenica in HE Mariborski otok.

V letu 2001 smo pristopili tudi k obnovi in avtomatizaciji sistema tehničnega opazovanja na teh objektih. Avtomatizacija je zajela le določeno skupino stalnih meritev.

V svetu je obilo možnosti za avtomatizacijo meritev v okviru tehničnega opazovanja objektov. Nekatere med njimi potrebujejo zelo zahtevno tehnično opremo (tudi velika finančna sredstva), zato smo v prvi fazi avtomatizirali predvsem meritve hidrostatičnih in del hidrodinamičnih razmer.

### 2.2.1 Cilji naročnika

Glavni cilj naročnika pri avtomatizaciji so bili:

- varnost objekta,
- zanesljivost meritve (ročne meritve imajo posledično večkratno napako),
- pogostost meritve,
- združiti vse podatke na enem mestu s čim manj ročnega dela,
- dostop in analiza do vseh podatkov,
- enostavna, transparentna in hitra obdelava podatkov,
- možnost dostopa do podatkov od kjerkoli v okviru dovoljenj – dlančnik, osebni računalnik ali prenosni računalnik,
- alarmiranje ob izrednih pojavih.

Avtomatizacija , ki je izvedena v I.fazi pokriva naslednje sklope meritev :

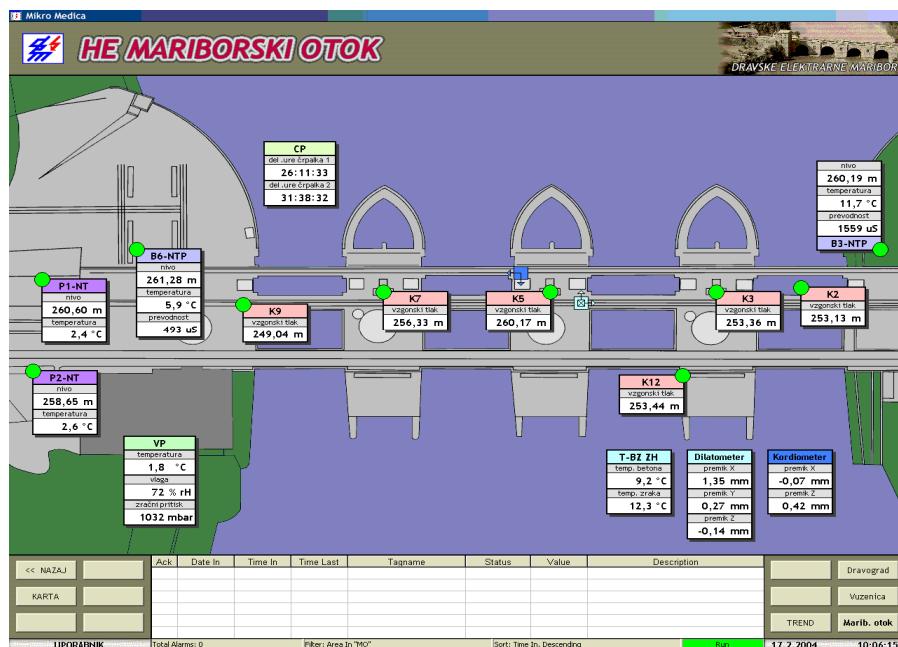
- Na posameznih elektrarnah imamo vzpostavljen sistem spremljanja delovanja dilatacij z dilatometri (x,y in z os), na Mariborskem otoku pa je v inštaliran tudi koordimeter za meritve zdrsov. V kontrolnih hodnikih merimo tudi količino precejnih vod.
- Avtomatizirali smo meritve piezometričnih pritiskov in temperatur vode, meritve specifične prevodnosti vode v bočnih (B) vrtinah, ter meritve vzgonskih tlakov in meritve temperatur vode v (K) vrtinah na kontaktu. Na območju objekta je postavljena vremenska postaja, kjer se izvajajo meritve temperatur zraka in vlažnosti ter zračnega tlaka. Vzdolž akumulacije elektrarne HE Vuzenica je postavljena tudi skupina merilnikov nivoja in temperatur reke Drave.

## 2.3 Postopki izvedbe

### 2.3.1 Gradbeni del

Priprava opazovalnih vrtin je zajemala obnovo obstoječih piezometričnih vrtin in pripravo za montažo merilne opreme ter izvedbo novih poiezometrilččnih vrtin. Nove B vrtine so klasični piezometri, K vrtine pa so izvedene vodotesno na kontaktu in pod vrhom zaradi preperečevanja vdora površinske vode. Kapa je izvedena kot vodotesni pakard v katerem je vgrajen merilnik , pipa za možnost odzračevanja in občasne ročne meritve iztokov.

Po končanih delih so izvedene geodetske izmere vseh mernih mest. Gradbeni izvajalec je pripravil tudi ostala merna mesta na in v objektu (dilatacije, vremenska postaja, vrtina za montažo koordimetra, trase za kable, priprava cevi za merilnike na akumulaciji za montažo GSM).



Slika 2: Tloris HE - pozicija mernih mest

## 2.4 Elektro del - oprema

### 2.4.1 Registrator – loger

Družino registratorjev GSR 110 sestavlja dva registratorja: tip GSR 110-NT, ki meri in registrira nivo in temperaturo vode ter tip GSR 110-NTG, ki poleg nivoja in temperature meri in registrira tudi el. prevodnost vode.

Registrator je sestavljen iz potopnega ohišja iz nerjavečega jekla v katerem je elektronika s senzorjem nivoja in temperature ter (tip GSR 110-NTP) dvema elektrodama za meritev el. prevodnosti vode, povezovalnega kabla in ohišja z baterijo, komunikacijskim priključkom RS 485 in pretvornikom RS485/232 (opcija).

Srce elektronike v potopni sondi je mikrokontroler, ki merjene podatke iz senzorjev v določenih časovnih intervalih shranjuje v posebno spominsko vezje (EEPROM), komunicira s krmilnikom/koncentratorjem preko komunikacijske mreže RC 485 ali GSM modemom ter seveda po potrebi s prenosnim osebnim računalnikom. Mikrokontroler meri tudi napetost baterije in posreduje uporabniku podatek o njenem stanju.

Druga družina sond so Akcelerografi (senzorji pospeška), kateri merijo vektorje pomika tal. Le-ti so inercijskega, aktivnega in zaprto-zračnega tipa in imajo tri ortogonalne komponente.

#### 2.4.2 Osnovni tehnični podatki GSR sond

- Meritev in registracija nivoja, temperature in el. prevodnosti vode,
- nastavitev parametrov registratorja s pomočjo osebnega računalnika,
- registracija in arhiviranje podatkov nivoju, temperaturi in el. prevodnosti,
- zelo mala merilna napaka,
- baterijsko napajanje 3,6 V DC,
- komunikacijski izhod RS 485 ali RS 232 (opcija),
- male dimenzije potopne sonde,
- kapaciteta spomina 100.000 meritev,
- čas vzorčenja 1 min do 99 ur (v primeru neposredne povezave z PC računalnikom ali GSM modemom je čas vzorčenja cca. 1 s).

#### 2.4.3 Komunikacije

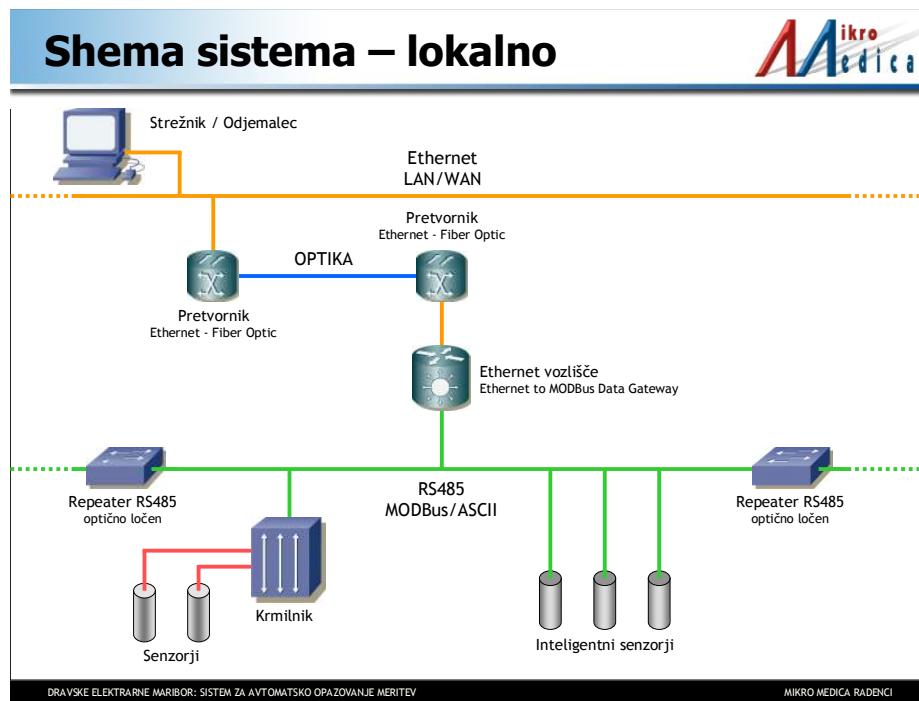
Signalom ki potekajo po RS 485 zanki dodelimo TCP/IP adreso Posamezna merilna mesta so povezana preko kontrolerjev ali direktno kot samoatojne inteligentne sonde na lokalno Ethernet omrežje DEM preko ethernet MODBus vozlišč. Ethernet omrežje je del inteligentnega TK omrežja DEM, katero nudi s svojo strukturo visoko redundanco. Sonde katerih lokacija je takšna (na kanalih), da ozičenje ne bi bilo smiselno, delujejo kot samostojni oddaljeni objekti in komunicirajo preko GSM omrežja.

#### 2.4.4 Center za zajemanje podatkov

Center za zajemanje podatkov je v upravni zgradbi DEM . Opremljen je z delovno postajo za zajemanje podatkov ter parametriranje in diagnostiko vseh sond. Postaja je srednje zmogljiv PC podprt z UPS zaščito in možnostjo arhiviranja podatkov in varnostnih kopij na CDR/CDRW nosilec. Povezan je na lokalno ethernet LAN/WAN računalniško omrežje (TCP/IP) in na lokalno telekomunikacijsko omrežje (X 21).

#### 2.4.5 Programska oprema

Operacijski sistem nameščen na delovni postaji je Windows 2000 Professional. Programska oprema, katera skrbi za diagnostiko, parametriranje, branje podatkov ... je INTELUTION iFix 2.6 Za shranjevanje, obdelavo in analizo podatkov skrbi INTELUTION iHistorian 1.0. Programska paketa omogočata uvoz/izvoz podatkov v ASCII obliki in s tem izvoz/shranjevanje iz Microsoft Excelove baze, kar omogoča obdelavo ročno vnesenih podatkov preko ali avtomatsko preko SQL vmesnika.



Slika 3: Sistem za avtomatsko opazovanje meritev

### 3 ROČNE MERITVE - KOMPATIBILNOST SISTEMOV

Ker je sistem tehničnega opazovanja vzpostavljen od leta 1970, so bile do vzpostavitev avtomatizacije vse meritve izvajane ročno. Rezultati so se prikazovali v zveznih diagramih na papirju.

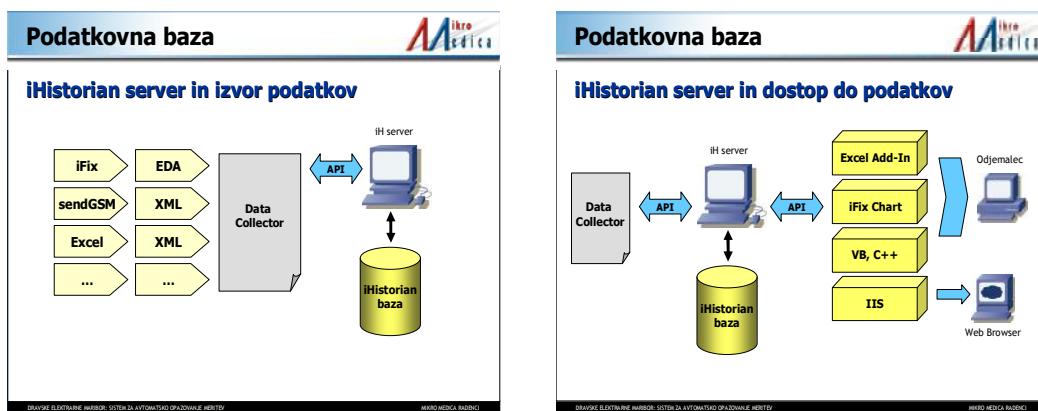
Meritve so bile izvajane kontinuitrano vendar v različnih časovnih intervalih. Od leta 1994 smo pričeli podatke vnašati v računalnik in obdelovati rezultate meritev v programu Excel. To je zelo olajšalo delo vendar so bili diagrami popačeni, ker os x ne more zaznati datuma kot časovni interval temveč le kot enega izmed podatkov.

Ker avtomatizacija meritev zajema le del mernih mest, se ostala še vedno merijo ročno. Zahteva naročnika je bila, da se poda možnost obdelave rezultatov tako, da bo možno v vsakem trenutku primerjati rezultate (za neko časovno obdobje) avtomsatkih meritev in meritev, ki smo jih pridobili ročno.

Za ta namen je pripravljena nova programska zasnova v katero je prenesena vsa baza obstoječih podatkov. Ko so podatki za nazaj vneseni v popolnosti jih pregledamo in prenesemo v novo podatkovno bazo, kjer lahko potem podatke primerjamo tudi z drugimi meritvami v sistemu.

Prenos obstoječih podatkov v nov sistem je izveden z naslednjo programsko opremo:

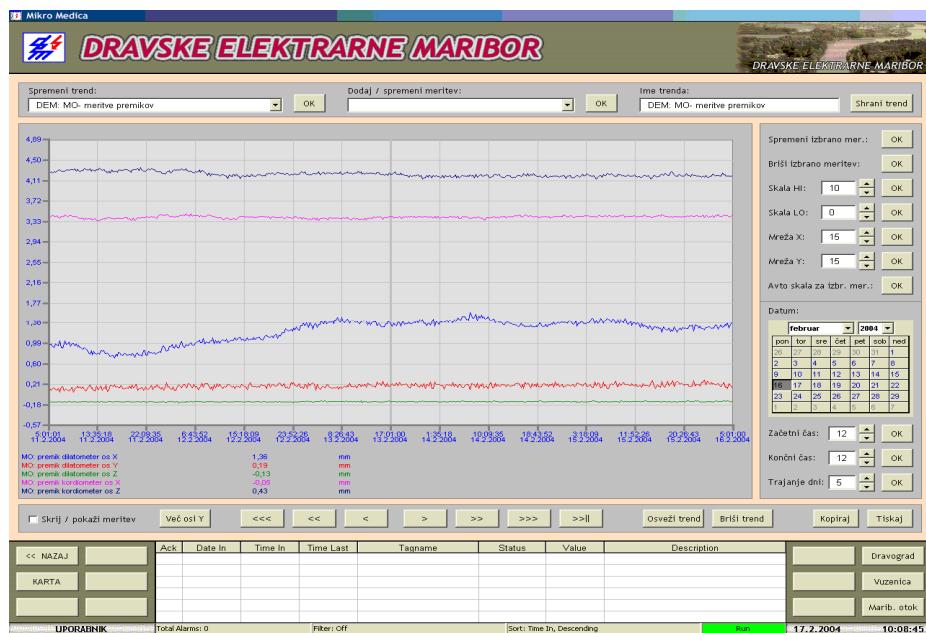
- data collector- XML in CSV,
- vnos ročnih meritev v nov sistem - avtomatsko preko XML ali SQL, uporaba dlančnika, prenosnega računalnika, ročni vnos podatkov v bazo preko XML (API)



Slika 4: Prenos baze podatkov

**Osnovne lastnosti in pregled online** podatkov nam dajejo možnost: shematskega prikaza objektov, zbiranje in shranjevanje podatkov, pregleda aktualnih dnevnih podatkov, avtomatsko osveževanje podatkov, alarmiranje ter določanje parametrov.

Diagrami in analiza podatkov nam dajejo možnost: pregleda posameznih meritev, izbira časovnih obdobjij, kreiranje skupnih diagramov, zoomiranje (vertikalno in horizontalno).



Slika 5: drsni trak za pregled podatkov, skaliranje, prikaz več osi, interpolacija, izpis

#### 4 ZAKLJUČEK

Avtomatizacijo tehničnega opazovanja smo pričeli z delnim avtomatiziranjem zajema stalno merjenih količin na treh že obnovljenih objektih.

V mesecu decembru 2003 smo uspešno zaključili poskusno obratovanje. V tem času je sistem deloval brezhibno. Pojavljale so se le manjše konstrukcijske napake, ki jih je izvajalec nemudoma odpravil. O vseh popravkih so napravljene zabeležke.

Glavne prednosti, ki so se izkazale v letu delovanja so te, da je sistem odprt in popolnoma nadgradljiv, uporabljene so standardne tehnologije in orodja, pripravljena je širitev v vse smeri (tako število podatkov in meritev, število senzorjev kot komunikacijske poti, dostop do podatkov), upoštevane so zahteve naročnika, uporabljena je nova tehnologija, možna je podpora s strani

proizvajalca in nenehen razvoj programske opreme ter kompatibilnost programske opreme z MS Windows platformo.

Sistem je zanesljiv, končni output pa uporabniku zelo prijazen.

Zelo pomembno je, da je omogočeno neposredno primerjanje ročno merjenih podatkov z avtomatskimi brez obilice vmesnih korakov.

V pripravi je tudi vzpostavitev sezmičnega opazovanja objektov z možnostjo vključitve v obstoječ monitoring.

V letu 2004 želimo nadaljevati z avtomatizacijo v obsegu, ki bi nas vsaj delno približal enakim objektom po Evropi. V Evropi je avtomatizacija meritev zelo napredovala in menimo, da je tudi naša vizija v tem, da pridobimo rezultate, ki so predvsem uporabni za diagnostiko stanja objektov in namenjeni hitremu ukrepanju.

## **SEIZMOLOŠKO OPAZOVANJE PREGRADE VOGRŠČEK**

Matija BRENČIČ, univ.dipl.inž.grad. in dr. Andrej ŠIRCA, univ.dipl.inž.grad.

IBE, d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring, Hajdrihova 4, 1000 Ljubljana

### **POVZETEK**

Leta 1999 je izšel "Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade" - UL RS št. 92/99 (v nadaljevanju »Pravilnik«), ki je poostril zahteve za seizmično opazovanje velikih pregrad.

Nasuta zemeljska pregrada Vogršček je bila zgrajena leta 1988. Seizmološko opazovanje je na pregradi sicer vzpostavljeno in obratuje, vendar zaradi novega pravilnika ni več ustrezno. Zato je bil leta 2003 narejen projekt za izvedbo sistema seizmološkega opazovanja pregrade, ki je bil v letu 2004 tudi izveden.

V članku so opisani projektna izhodišča, načrtovanje in gradbena izvedba treh merskih jaškov, podzemnih kanalov za NN napajalne in signalne vode s šest elektro revizijskimi jaški ter NN napajalna oprema.

### **SUMMARY**

'The Slovenian Code of regulations for observation of seismicity in the area of large dam', issued in 1999, in Official Gazette of the RS no. 92/99 (in the following text 'Code'), introduced higher levels of observation of seismicity.

Earth dam Vogršček was built in 1988. Seismological observations on the dam has been established and is active, however, due to the new regulations, it is no longer adequate. Thus detailed design of seismological observation of the dam was adopted in 2003 and applied in 2004.

Design starting points, planing and civil construction of three measuring shafts, underground ducts for LV supply and signal lines with six electrical revision shafts as well as a LV supply equipment are described in the article.

## 1. UVOD

Leta 1999 je izšel "Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade" (UL RS št. 92/99), ki predpisuje način opazovanja inducirane seizmičnosti zaradi vode v zbiralniku, način dinamičnega obnašanja telesa in temelja velikih pregrad ter prostega površja v njihovi neposredni bližini med potresom, tehnične normative seizmoloških instrumentov in pogoje, ki jih mora izpolnjevati izvajalec tovrstnega opazovanja.

Obsežnost sistema opazovanja je odvisna od višine pregrade. Pravilnik definira več razredov pregrad. Za opazovanje inducirane seizmičnosti ločuje med pregradami do 40 m, od 40 do 100 m in pregrade nad 100 m višine. Za opazovanje dinamičnega obnašanja pregrade so vpeljani razredi do 30 m višine, za katere je potrebna mreža najmanj dveh akcelerografov, od 30 do 60 m, na katerih mora biti postavljena mreža najmanj treh instrumentov in na pregrade nad 60 m z zahtevanimi štirimi meritci.

Nasuta zemeljska pregrada Vogršček je bila zgrajena leta 1988 za namen namakanja, visokovodne zaščite, rekreacije in ribištva na potoku Vogršček nad naseljem in gradom Vogrsko v občini Nova Gorica. S konstruktivno višino 37 m, dolžino krone 200 m in prostornino zaježitve 8 500 000 m<sup>3</sup> je naša najvišja nasuta pregrada. Seizmološko opazovanje je na njej sicer vzpostavljeno in obratuje, vendar zaradi novega pravilnika, s katerim so se zahteve za seizmično opazovanje zaostrike, ni več ustrezno. Zato je bil leta 2003 narejen projekt za izvedbo sistema seizmološkega opazovanja pregrade, ki je bil v letu 2004 tudi izveden.

Pregrada spada s 37 m konstruktivne višine v razred, za katere je predpisana mreža najmanj treh akcelerografov, od katerih eden zaznava gibanje pregrade, drugi meri gibanje temeljnih tal pod pregradom, tretji pa gibanje terena izven vplivnega območja pregradnega objekta

Dotrajani ali celo neizvedeni so tudi nekateri drugi sklopi sistema za opazovanje pregrade, zato je bilo potrebno ob snovanju in dimenzioniranju infrastrukture za seizmično opazovanje upoštevati tudi bodočo razširitev opazovanja na parametre obratovanja, tehnične varnostne parametre pregrade in parametre kakovosti akumulirane vode.

Predmet projekta je bila gradbena izvedba treh merskih jaškov, podzemnih kanalov za NN napajalne in signalne vode s šest elektro revizijskimi jaški ter NN napajalna oprema.



*Slika 1: Pregrada Vogršček*

## 2 OPIS SEDANJEGA STANJA

Na pregradi je izveden sistem seizmološkega opazovanja, sestavljen iz dveh merskih točk - na kroni pregrade in na raščenem terenu v neposredni bližini desnega boka pregrade. Glavne pomanjkljivosti obstoječega sistema so:

- premajhno število instrumentov (akcelerografov),
- neustrezne tehnične lastnosti akcelerografov,
- neustrezna namestitev akcelerografov,
- zastarela strojna in programska oprema sistema za opazovanje pregrade.

Dotrajani ali celo neizvedeni so tudi nekateri drugi sklopi sistema za opazovanje pregrade, zato naj bi ob snovanju in dimenzioniraju infrastrukture za seizmično opazovanje upoštevali tudi bodočo razširitev opazovanja na parametre obratovanja (pretoki, gladine, položaji zapornic, ...), tehnične varnostne parametre pregrade (piezometrske gladine, drenažni iztoki) in parametre kakovosti akumulirane vode (temperatura, kisik, ...).

Zasnova novega lokalnega informacijskega sistema pregrade Vogršček bo usklajena z načrtovanim širšim informacijskim sistemom za nadzor in upravljanje vodnega režima v območju reke Soče, ki bo vključeval tudi nekatere druge vodnogospodarske objekte v upravljanju VGP Soča (suha zadrževalnika Plikolud in Plik, jezove na Vipavi, dežemerno postajo na Kekcu, itd).

### 3 OPIS SISTEMA

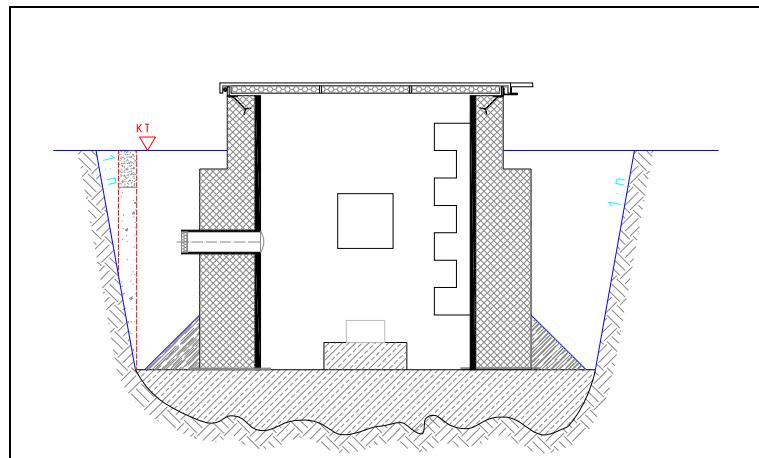
Na kroni pregrade Vogršček, na zračni strani ob njenem vznožju in na oddaljenosti 100 m od pregrade, na raščenem terenu levega boka, se v ustrezne objekte namesti tri akcelerografe (slika 1). Situacije merskih točk so določene po Pravilniku, edino merska točka izven vplivnega območja pregradnega objekta pa omogoča nekaj manevrskega prostora v smislu izbora ugodne lege za izvedbo, razgaljenosti kontaktne hribine, urejenosti lastništva same lokacije in dostopa ter odmaknjenosti od virov nemira in rizikov vandalizma. Merska točka ob vznožju pregrade nadomešča po Pravilniku zahtevano mersko točko v temelju pregrade, ki bi jo bilo pri tem tipu pregrade (brez galerije v temelju) težko ali vsaj drago (instrument v vrtini) izvesti.

Za vse merske točke se uredita NN napajanje in gradbeni del omrežja za prenos podatkov (kanali) do obstoječe priključne točke v nadzornem objektu pregrade na desnem bregu. Za NN napeljavo se za namen kasnejšega dograjevanja sistema na treh mestih uredijo in zavarujejo dodatna priključna mesta in sicer:

- za piezometer v levem boku,
- za zapornice talnega izpusta in merjenje iztoka iz drenaže ter
- za odvzemni objekt (stolp) namakalne vode.

Elementi posamezne opazovalne točke so akcelerograf, komunikacijsko – informacijska oprema in električna oprema, ki zagotavlja napajanje naprav. Vsa oprema bo nameščena v tipskem PEHD merilnem jašku, ki bo dodatno obbetoniran.

Merilni jašek ob vznožju pregrade (slika 2) je okroglega tlorisa in sega do temeljnih tal. Dno jaška je betonsko in nearmirano. Stene vstopnega dela jaška segajo 30 cm nad nivo terena. Za vse betonske dele jaška se uporabi vodotesen beton. V notranjosti jaška so PEHD stopalke (kot lestev) in dva nosilca za pritrditev opreme. V steni jaška se vodotesno izvede ustrezno število kabelskih izvodov za električni kabel in signalne instalacije. Na dnu jaška se izvede betonski podstavek za akcelerometer. Jašek je na vrhu zaprt z jeklenim pokrovom.



Slika 2: Merilni jašek

Jašek na kroni pregrade (slika 3) je enostavnejše izvedbe, ker ni nevarnosti talne vode, pokrit pa je s povoznim pokrovom. Ker s tem jaškom posegamo v tesnilno jedro pregrade, je bila pri zaključnih delih izvedbe potrebna posebna pazljivost.



Slika 3: Jašek na kroni pregrade

Jašek ob vznožju pregrade je širši in globlji. Ob izvedbi se je izkazalo da so temeljna tla globje kot je bilo predvideno, zato je bil poglobljen za 2 m, na 5 m globine. Ta jašek je najbolj pod udarom talne vode, zato je bil betoniran izven

gradbene jame in nato z dvigalom nameščen na mesto. Takšen način gradnje se je izkazal za neuspešnega, ker ni bila zagotovljena vodotesnost.



Slika 4: Izveden jašek na levem boku (izven telesa pregrade)

Za povezavo jaškov s komandnim objektom so bili izvedeni podzemni kanali za napajalne in signalne vode s šest elektro revizijskimi jaški preko celotne krone pregrade in po zračni strani pregrade do jaška ob vznožju pregrade.

Sistem seizmološkega opazovanja se za potrebe napajanja in servisiranja napaja z električno energijo iz javnega elektro omrežja. Zaradi visoke vrednosti opreme sistema je vgrajena tronivojska prenapetostna zaščita, instalacija za ozemljitev in za izenačevanje potencialov.

Prenapetostne zaščite se izvedejo v glavni priključni omarici KPMO, v elektrorazdelilni omarici R-VSM, na samih vtičnicah in pa pri odcepnu za napajanje naprave v jašku.

#### 4 ZAKLJUČEK

Sistem za nadzor in upravljanje se uvršča v sklop sekundarne opreme objektov. Primarna oprema so naprave za opravljanje osnovne dejavnosti. Sekundarna oprema je primarni nadrejena in z njo upravlja na ustrezni, varen in gospodaren način. Integralni sistem za nadzor in upravljanje vodnega režima, kot tudi sistem opazovanja seizmičnosti na območju pregrade spada med enostavne objekte, postavljene na objekte gospodarske javne infrastrukture ki so neposredno namenjeni upravljanju gospodarske javne infrastrukture. Zanje kot take ni potrebno pridobiti niti gradbenega dovoljenja, niti lokacijske informacije.

Sistem na pregadi Vogršček še ne obratuje (stanje februar 2005). Razlogi za to so že omenjena hidravlična netesnost jaška v temelju ter neusklajenost nekaterih instalacijskih detajlov s predvideno merilno opremo.

Glavni vzrok je po naši oceni odsotnost projektanta in ustreznih službe investitorja (Urada za seismologijo in geologijo) ob izvedbi. Priporočamo upoštevanje teh izkušenj pri nadalnjem opremljanju slovenskih pregrad v skladu s Pravilnikom.



# **ANALIZA OBNAŠANJA ZEMELJSKE PREGRADE DRTIJIŠČICA**

Mojca Ravnikar Turk, univ.dipl.inž.grad., ZAG Ljubljana, Dimičeva ulica 12,  
Ljubljana

Janko Logar, univ.dipl.inž.gradb., FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem,  
Jamova 2, Ljubljana

## **POVZETEK**

Zemeljska pregrada Drtjiščica je bila zgrajena leta 2002 za potrebe zadrževanja visoke vode Radomlje in Drtjiščice. Pregrada je sestavljena iz glinenega jedra, jalovine na suhi strani in drobljenca na vodni strani. Dolžina krone znaša 265m, širina pregrade na koti temelja pa 150m. Pregrada je visoka 20m, kar jo po veljavnem pravilniku uvršča med visoke pregrade. Temeljna tla sestavlja plast rahlega, močno stisljivega melja, debeline tri do pet metrov, globlje pa se nahaja tektonsko pretr skrilavec in meljevec. Pregrada se je gradila v letih 2001 in 2002. Med gradnjo se je opazovalo posedanje temeljnih tal na osmih mestih, po gradnji pa je bil vzpostavljen sistem opazovanja na površini in v telesu pregrade.

V prispevku so podani rezultati meritev posedanja pregrade med gradnjo in po njej. Na podlagi rezultatov meritev smo po metodi končnih elementov izvedli povratno analizo obnašanja pregrade Drtjiščica. Uporabili smo Mohr-Coulombov materialni model za ravninsko stanje, kakor tudi dva materialna modela, ki upoštevata odvisnost stisljivosti zemeljin od napetostnega stanja. V prispevku so prikazane izmerjene in s povratno analizo izračunane deformacije zemeljske pregrade.

## **SUMMARY**

An earth dam named Drtjiščica was constructed in 2002 to regulate waters of Drtjiščica and Radomlja waterstream. It consists of a clay core, a random fill of silty and coarse material on the downstream side, and of rock fill on the upstream side. The crest length is 265m and the dam base thickness is 150m. The height above the lowest foundation level is around 20 metres therefore with regard to the national regulations it is defined as a large dam. The subsoil consists of a layer of loose, highly compressible clayey-silty material, three to five meters thick, overlying bedrock made of tectonically altered clayey shists and siltstones. During construction of the dam, settlements of the subsoil were measured at eight locations and after the construction a larger monitoring system was established.

The paper deals with the analysis of the results of measurements taken during and after the construction of the Drtjiščica earth dam. Back-analyses of the performance of the dam during construction were made using FEM calculations. The numerical analyses were performed in plane strain conditions using the Mohr-Coulomb material model as well as two soil models which take into account the stress-dependency of soil stiffness. In the paper the results of calculated settlements for drained and undrained loading and measured settlements are presented.

## 1. UVOD

Izgradnja nove avtoceste v zelo ozki dolini potoka Radomlje je povzročila zmanjšanje poplavne varnosti. Zato se je zgradil 670m dolg vodni rov premera 4m, ki povezuje to dolino z dolino potoka Drtijščice. Visoke vode Radomlje bodo preusmerjene skozi rov v dolino Drtijščice in regulirane pred zadrževalnikom. Potok Drtijščica se zliva v potok Radomljo.

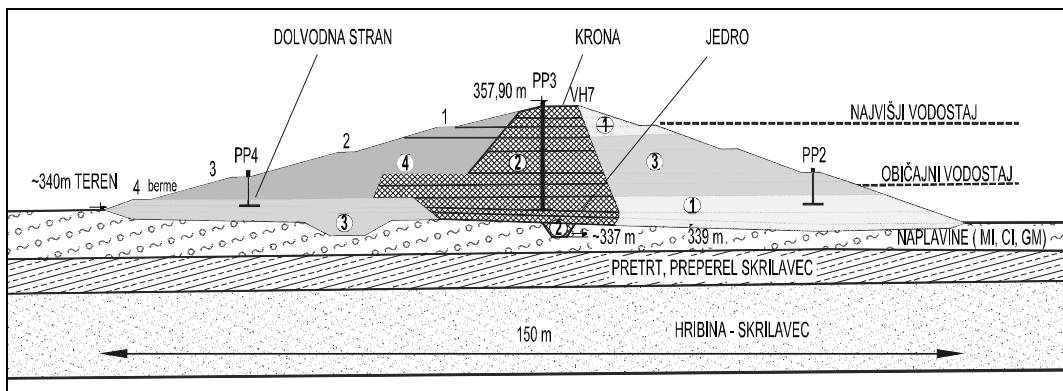
Krona pregrade Drtijščica je dolga 254m, širina pregrade znaša okoli 150m. Absolutna višina krone je bila ob izgradnji 357,9m. Običajna gladina zaježitve je 13,1m pod koto krone, vendar pa se ob deževjih nivo vode dvigne do višine 3,3m pod krono pregrade. Pregrada je visoka 20m, kar jo po veljavnem pravilniku uvršča med visoke pregrade. Po Eurocode 7 spada pregrada v geotehnično kategorijo 3. Temeljna tla sestavlja plast rahlega, močno stisljivega melja, debeline tri do pet metrov, globlje pa se nahaja tektonsko pretr skrilavec in meljevec. Pregrada se je gradila v letih 2001 in 2002. Karakteristični prerez zadrževalnika je prikazan na sliki 1. Zemljinsko pregrado sestavlja glineno jedro (material označen s št. 2), na dolvodni strani je pregrada iz nasutja jalovine iz kamnoloma Lukovica in melja (št. 4) ter iz nasutja drobljenca na vodni strani (št. 3 in 1).

V sklopu zemeljske pregrade so bili zgrajeni tudi armiranobetonski vtočni objekt, zapornični objekt, talni izpust, preliv, tesnilna zavesa in sistem namakanja habitatata za žabe. Preliv (kamen v betonu) je izведен le za primer, da se vtočni objekt zamaši z naplavinami. Zgrajena sta bila tudi dva mostička ter več prepustov za lokalno cesto, ki vodi okoli bodočega jezera.

## 2 PREDHODNE PREISKAVE

Za preliminarne raziskave je bilo na vplivnem območju pregrade izvedenih deset geomehanskih vrtin v dolžini 95m, od tega 37 metrov v glinastih skrilavcih. Odvzetih je bilo pet intaktnih vzorcev stisljivega meljasto glinenega sloja (označen z 'Naplavine') za laboratorijske preiskave stisljivosti in direktnega striga. Pred gradnjo so se preverile karakteristike razpoložljivih materialov iz trase avtoceste, ki so bili primerni za glineno jedro. Uporabljen je bil visoko plastični melj iz bližnjega ukopa za traso avtoceste. Na šestih vzorcih so se določile lezne meje, specifična teža in CBR. Zemljina se je zbila v kalupih za izvedbo Proctorjevega testa za določitev optimalne gostote. Na treh po takem postopku ponovno zgoščenih preizkušancih pa so se izvedle tri preiskave stisljivosti, en triosni strižni preizkus ter štirje direktni strižni preizkusi.

Po slovenskem predstandardu OSIST ENV 1998-1-1, ki upošteva povratno dobo potresov 475 let, spada pregrada Drtijščica v območje z vrednostjo projektnega pospeška tal  $a_g=0,20g$ , tla pa se uvršča v razred A.



Slika 1: Karakteristični prerez pregrade Drtijščica

### 3 PROJEKTNI IZRAČUNI

Projektni računski posedek temeljnih tal je na najvišjem delu pregrade (pod krono) znašal 33 do 38 cm. Za določitev poteka konsolidacije temeljnih tal je bil z laboratorijskimi preiskavami vzorcev določen koeficient vodoprepustnosti, vendar pa so se rezultati preiskav močno razlikovali. Zato je bilo ocenjeno, da bo konsolidacija tal pod pregrado znašala od najmanj šest mesecev do največ (manj verjetno) pet let.

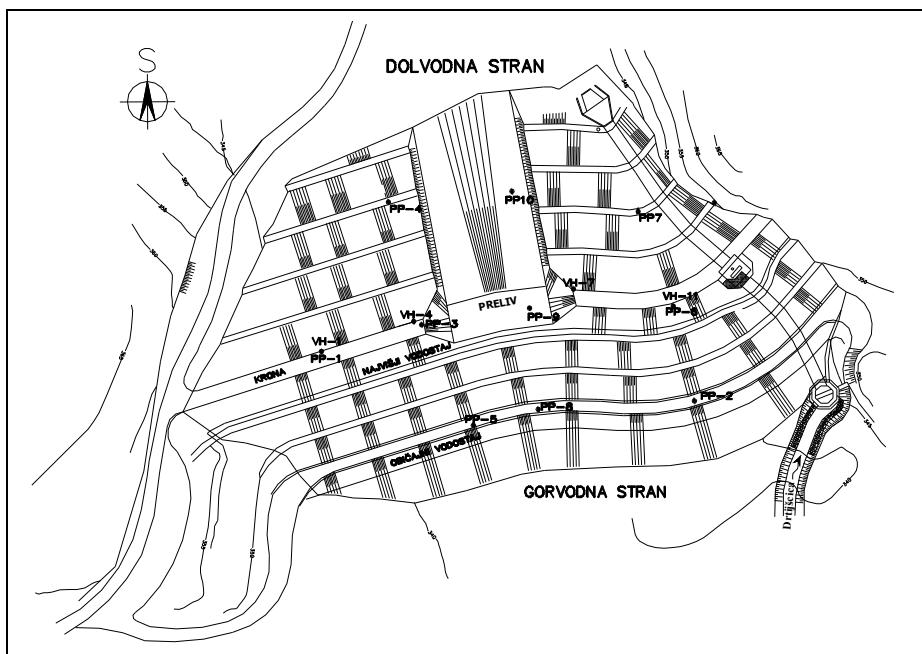
Varnost zemeljske pregrade je bila računsko določena za tri obtežne primere: A običajni vodostaj v bazenu, B najvišji možni vodostaj, C obtežba takoj po upadu iz najvišjega na običajni vodostaj z zastojnimi tlaki v glinenem jedru. Računski varnostni faktor za primer A je bil 2,0 za B 2,1 in za C 2,0.

### 4 IZGRADNJA

Gradnja pregrade se je pričela februarja 2001, kota krone je bila dosežena novembra 2001 in vsa dela so bila končana februarja 2002. Situacija pregrade, s prelivom, talnim izpustom in z lokacijo posedalnih plošč je prikazana na sliki 2. Na sliki 3 je prikazana dinamika gradnje v bližini posedalnih plošč. Nasipavanje ni potekalo z enako dinamiko po celotni površini. Na desni strani pregrade je bil najprej zgrajen talni izpust, zato se je na tem delu nasipavanje pričelo kasneje.

Kontrola kvalitete izgradnje zemeljske pregrade kakor tudi spremiševalnih objektov se je izvajala skladno z vnaprej predvidenim programom (določene so bile vrste in pogostost preiskav). Na gorvodni strani se je drobljenec zgoščeval z vibracijskimi valjarji (dovažali sta se dve vrsti materiala iz kamnoloma Lukovica – stena I in stena II). Za zgoščevanje glineno-meljnega jedra so se uporabljali statični valjarji (imenovani ježi). Na dolvodni strani se je v spodnjih plasteh (do višine 2m) ravno tako uporabljjal drobljenec, višje pa jalovina iz kamnoloma in

vgradljiv material iz ukopov na trasi avtoceste. Zaradi mešanja dveh zelo različnih materialov so se karakteristike zemljine na dolvodni strani lokalno zelo spremenjale. Zemljinski material se je razgrinjal in zgoščeval v slojih debeline 40 do 50cm. Redno so se jemali vzorci materialov, da se je ugotavljala optimalna gostota in vlaga (standardni oziroma modificirani Proctorjev test). Gostota vgrajenega materiala se je preverjala s postopkom z izotopskim merilnikom. V glinenem jedru je bilo izvedenih 775 meritev na dolvodni strani 79 in na gorvodni strani 280 meritev.



Slika 2: Situacija pregrade in lokacije posedalnih plošč

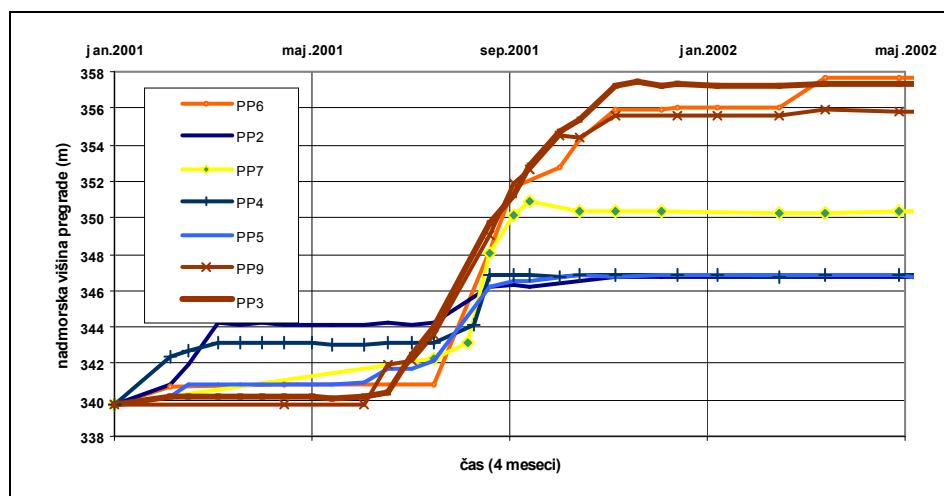
#### 4.1 Meritve

Projekt pregrade je zajemal tudi tehnično opazovanje med in po gradnji pregrade. Med gradnjo se je izvajalo opazovanje posedanja temeljnih tal z devetimi posedalnimi ploščami, ki so bile vgrajene en do dva metra nad prvotnim terenom. Ena plošča je bila med gradnjo uničena, veliko so jih poškodovali z gradbenimi stroji. V tabeli 1 so prikazani rezultati meritev posedkov. Podana je oznaka plošče, absolutna kota plošče, višina nasipa nad ploščo in razlika teh dveh višin ter izmerjeni posedek na višinski koti plošče. Lokacije plošč so prikazane na sliki 2. Posedek tal je bil merjen tudi v 54m dolgem profilu s horizontalnim hidrostatskim inklinometrom.

Tabela 1: Izmerjeni posedki temeljnih tal na lokacijah posedalnih plošč

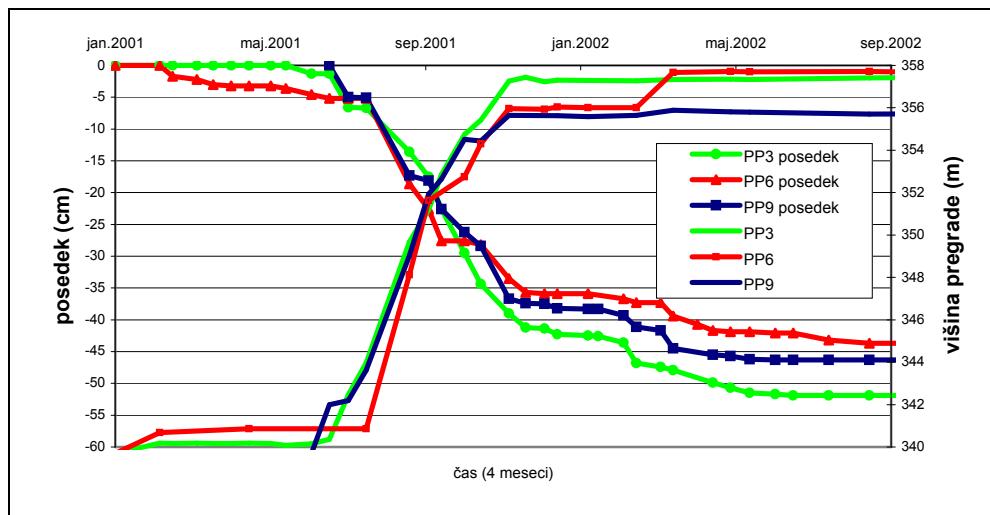
oznaka plošče	kota plošče (m)	kota pregrade (m)	višina nad ploščo (m)	posedek (cm)	lokacija
PP4	341.4	347.1	5.7	25	dolvodno
PP7	342.1	350.9	8.8	23	dolvodno
PP3	340.2	357.7	17.5	52	jedro
PP9	341.7	356.3	14.6	46	jedro
PP6	340.8	350.9	10.1	44	jedro
PP2	340.8	346.8	6.0	25	jedro
PP8	340.7	346.0	5.3	17	gorvodno
PP5	340.0	346.6	6.6	21	gorvodno

Meritve vertikalnih pomikov so se začele takoj po vgradnji posedalnih plošč in so se izvajale dvakrat mesečno. Na sliki 4 je prikazana dinamika gradnje pregrade in izmerjeni posedki plošč PP3, PP6 in PP9, ki so vse locirane pod korno pregrade. Iz časovnega diagrama je razvidno, da je konsolidacija temeljnih tal trajala približno šest mesecev, kot je bilo tudi predvideno s projektom.



Slika 3: Dinamika gradnje pregrade na lokacijah posedalnih plošč

Ker višina pregrade presega 15m, spada po mednarodnih merilih med velike pregrade, za katere je potrebno skladno s 'Pravilnikom o tehničnem opazovanju visokih jezov' izvajati tehnično opazovanje. Za pregrado Drtijščica le-to zajema meritve nivojev vode v devetih piezometrih, meritve pornih tlakov na dveh lokacijah v glinenem jedru in horizontalne deformacije v jedru na lokacijah štirih vertikalnih inklinometrov ter geodetske meritve. Tri mesece po doseženi koti krone pregrade, se je vzpostavil s projektom predvideni opazovalni sistem na pregradi, tako da je bila osnovna meritev za večino merskih mest izvedena februarja 2002. Za vzpostavitev osnovne mreže stebrov za geodetske meritve je bilo potrebno dalj časa, tako da je bila osnovna meritev dvanajstih reperjev (X;Y;Z) šele decembra 2002.



Slika 4: Časovni diagram posedenja tal pod kroho pregrade

## 5 POVRATNE ANALIZE

Pregrada ni bila v celoti zgrajena skladno s projektom, saj so se na dolvodni strani vgrajevali drugačni materiali, kot je bilo prvotno predvideno. Izmerjeni posedki temeljnih tal so bili večji od tistih, ki so bili predvideni v projektnih izračunih. Zato smo, na osnovi analize rezultatov meritev med gradnjo in delno tudi po njej, kalibrirali vhodne računske podatke. Izvedli smo povratne analize z metodo končnih elementov, pri katerih smo uporabili tri materialne modele zemljin. V teh analizah smo izbirali togostne in trdnostne parametre zemljin temeljnih tal in pregrade tako, da smo dobili čim boljše ujemanje med izmerjenimi in računskimi vertikalnimi pomiki pregrade. Prerez pregrade smo modelirali kot je bil dejansko izveden - na osnovi dejanskih podatkov o vgrajenih materialih in njihovih karakteristikah. Pri računih pa smo upoštevali tudi dejansko dinamiko gradnje (konsolidacijo telesa pregrade in tal med gradnjo). Na osnovi modeliranja dejanskega obnašanja objekta med gradnjo pa je možno oceniti nadaljnje obnašanje in varnost objekta.



Slika 5: Izgradnja pregrade Drtijščica - september 2001

## 5.1 Projekt - vhodni parametri in materialni model

Za projektne izračune varnosti in posedkov so uporabili program PLAXIS (v7.2) ravninsko stanje, Mohr-Coulomb-ov materialni model, drenirano stanje (projekt je izdelal Vodnogospodarski inštitut, d.o.o.). V tabeli 2 so prikazani vhodni računski parametri, ki so bili uporabljeni za izračune v fazi projektiranja, in so bili izbrani na podlagi laboratorijskih preiskav in primerljivih izkušenj.

*Tabela 2: Materialne karakteristike v projektnih izračunih*

sloj zemljine	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	c' kPa	$\phi'$ °	k m/dan	$E_{ref}$ MPa
naplavine (melji in gline)	19,0	5	24	$9 \cdot 10^{-4}$	4
preperel skrilavec	25,0	0	36	$9 \cdot 10^{-4}$	30
skrilavec	25,0	0	40	$9 \cdot 10^{-3}$	200
1 - gorvodna stran – skala I	21,0	0	36	100	60
4 – dolvodna stran	18,0	10	18	$9 \cdot 10^{-4}$	10
2 – jedro meljna glina	18,0	10	18	$9 \cdot 10^{-6}$	10

## 5.2 Povratna analiza - vhodni parametri in materialni modeli

Povratne analize smo izvedli z istim računalniškim programom, vendar pa smo uporabili več različnih materialnih modelov in sicer Mohr-Coulomb-ov ter 'Soft-soil' in 'Hardening-soil' materialna modela. Zadnja dva upoštevata odvisnost togosti zemljin od napetostnega stanja, uporabili pa smo ju le za stisljive sloje zemljin ('2-jedro' in 'naplavine'), medtem ko smo za manj stisljive zemljinje upoštevali Mohr-Coulomb-ov model pri vseh analizah. Materialni modeli in njihovi parametri so podrobno opisani v PLAXIS-ovem priročniku.

Najprej smo predpostavili, da so zemljine drenirane (kar zlasti za slabo prepustne zemljine ne drži). Za sloja '2-jedro' in 'naplavine' smo s poskušanjem ugotavljali najboljšo kombinacijo parametrov stržne trdnosti in stisljivosti, da smo se z izračuni čim bolj približali izmerjenih deformacijam. Nato smo predpostavili, da so zemljine nedrenirane, kar je bolj realna predpostavka. Upoštevali smo dinamiko gradnje in izvršeno konsolidacijo ter izračunali nadaljnji potek konsolidacije telesa pregrade.

Stržne in deformacijske karakteristike materialov, kot so bile privzete v povratnih analizah, so prikazane v tabelah 3 in 4. Razlike med vhodnimi parametri v projektnih izračunih in v povratnih analizah so naslednje:

- Vodostaj je v povratni analizi nižji. V projektnih računih je bil upoštevan običajni vodostaj, ki je pričakovana za celotno življenjsko dobo objekta, vendar

pa je bila pregrada grajena v sušnem obdobju in je bila dolina suha. Tudi eno leto in pol po končani gradnji je bil zadrževalnik pretežno suh. Nižji računski vodostaj, ki ustreza dejanskim razmeram, je povzročil povečanje računskih in seveda tudi dejanskih posedkov.

- Zaradi vgradnje drugih materialov kot je bilo predvideno v projektu (na dolvodni strani se je namesto melja vgradila jalovina iz kamnoloma Lukovica) se je povečala tudi sama teža pregrade. Na osnovi rezultatov meritev, izvedenih v okviru kontrole materialov in gradnje, smo izračunali dejansko težo vgrajenih materialov.
- Na osnovi laboratorijskih preiskav, izkušenj in meritev posedanja smo za Mohr-Coulomb-ov materialni model privzeli karakteristike tal, ki se nekoliko razlikujejo od projektnih vhodnih parametrov. V tabeli 3 so te vrednosti poudarjene.

*Tabela 3.: Materialne karakteristike za Mohr-Coulomb-ov materialni model*

sloj zemljine	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	c' kPa	$\phi'$ $^{\circ}$	k m/dan	$E_{ref}$ MPa
naplavine (melji in gline)	19,0	5	24	$9 \cdot 10^{-4}$	<b>3</b>
preperel skrilavec	25,0	0	36	$9 \cdot 10^{-4}$	30
skrilavec	25,0	0	40	$9 \cdot 10^{-4}$	<b>100</b>
1-gorvodna stran – skala 1	<b>22,7</b>	0	36	100	60
<b>3-gorvodna stran – skala 2</b>	<b>22,7</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>100</b>	<b>40</b>
<b>4-dolvodna stran</b>	<b>21,0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b><math>9 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b>20</b>
2-jedro (plastični melj)	<b>18,7</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	$9 \cdot 10^{-6}$	10

- Za spodnji del glinenega jedra (v debelini dva metra nad prvotno koto terena) smo upoštevali manjši prekonsolidacijski tlak. To je realno, saj so meritve zgostitve materiala dejansko kazale, da je bilo zgoščanje v spodnjih slojih manjše kot kasneje. Na zelo podajnih tleh in v relativno ozkem jarku je težko doseči optimalno zgostitev materiala. Za spodnje sloje smo tako privzeli začetni prekonsolidacijski tlak (POP) 50kPa, višje pa 200kPa. To je bila groba predpostavka, ki ni bila podprta s preiskavami.

Tabela 4: Materialne karakteristike za 'Soft soil' ozziroma 'Hardening soil'

materialni model (stanje), sloj	$\lambda^*$	$\kappa^*$	$\nu_{ur}$	POP (kPa)
Soft soil (drenirano in nedrenirano stanje), 'Naplavine'	0,040	0,008	0,15	0
	$E_{50}$ (MPa)	$E_u$ (MPa)	$E_{oed}$ (MPa)	POP (kPa)
Hardening soil (drenirano in nedrenirano stanje) 'Naplavine'	2,3	7,8	2,9	0
Hardening soil (drenirano in nedrenirano stanje) '2-jedro'	9,0	27,0	11,0	200 (50)

- Karakteristike materiala jedra pregrade so izbrane po inženirski presoji (na podlagi preiskav in meritev). Pred gradnjo so bile karakteristike tega materiala določene na ponovno zgoščenih preizkušancih. Med in po gradnji niso bili odvzeti vzorci jedra pregrade, na katerih bi bilo mogoče ugotoviti dejanske strižne in deformacijske parametre. Prav tako nismo merili posedkov na različnih višinah telesa pregrade, s pomočjo katerih bi lahko izvrednotili stisljivost in hitrost konsolidacije materialov telesa same pregrade.

Že prvi sloji nasipa pregrade so povzročili relativno velike posedke tal saj tla sestavlajo naplavine (meljne gline v rahlem stanju). Ker pa so se posetalne plošče vgradile šele ko je nasip dosegel višino okoli dva metra nad prvotno koto terena, se je del posedkov temeljnih tal izvršil še pred osnovno meritvijo posedkov. Dejanski posedki tal na mestih posetalnih plošč so zato večji od izmerjenih.

### 5.3 Izmerjeni in s povratno analizo izračunani posedki

Parametre zemljin smo najprej kalibrirali za drenirano stanje, da smo dobili približno ujemanje med izmerjenimi in računskimi posedki. Rezultate računskih analiz smo primerjali s posedki na štirih karakterističnih lokacijah – temeljna tla pod krono, gorvodna stran, dolvodna stran, krona pregrade. Tri karakteristične lokacije ustrezajo lokacijam posetalnih plošč PP3, PP2 in PP4 (glej slike 1 in 2). Višinske kote karakterističnih točk in vrednosti posedkov so prikazane v tabeli 5. Meritve posedkov na kroni pregrade so se pričele štiri mesece po končanju del, tako da je dejanski posedek krone pregrade večji od izmerjenega.

Tabela 5: Drenirano stanje – računski in izmerjeni posedki (v cm)

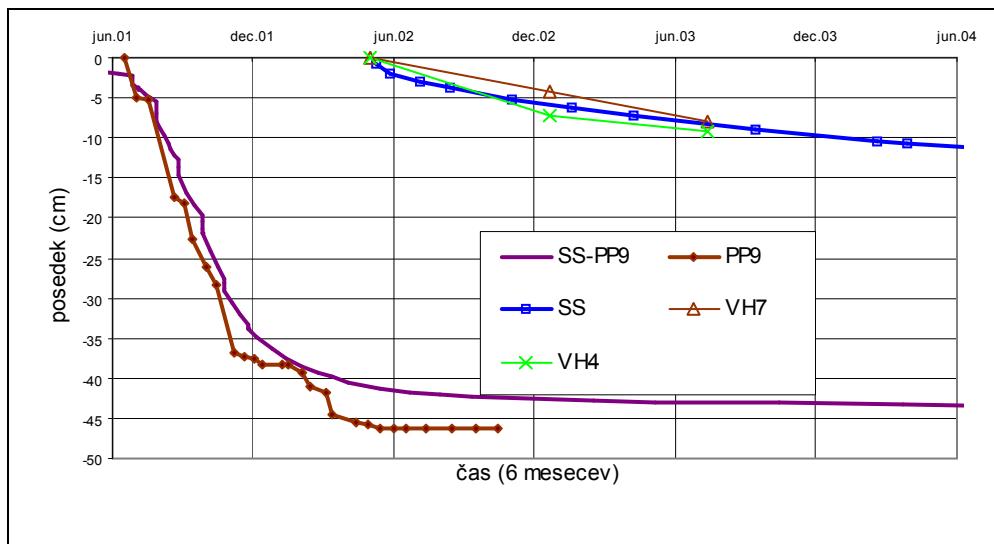
računske analize (štiri) materialni model	Mohr- Coulomb (projekt)	Mohr- Coulomb (povratna)	Soft soil (povratna)	Hard. Soil (povratna)	izmerjene vrednosti
temelja tal pod jedrom PP3 (342,0m)	27	50	40	41	~45cm
gorvodna stran PP2 (342,0m)	11	22	24	23	~20
dolvodna stran PP4 (342,0m)	10	24	26	25	~25
krona pregrade (357,5m)	50	74	69	64	>70cm

S slike 3 je razvidno, da je gradnja zadrževalnika Drtijščica trajala približno devet mesecev. V povratni analizi smo upoštevali devet gradbenih faz – hipna izvedba nasipa debeline 0,8m do 2,0m, ki ji sledi faza konsolidacije. Celotni upoštevani konsolidacijski čas je bil 270 dni. V tabeli 6 so prikazani izračunani posedki na istih karakterističnih lokacijah in sicer za stanje takoj po dokončanju del (t=0) ter končni posedek.

Tabela 6: Nedrenirano stanje – računski in izmerjeni posedki (v cm)

računske analize (tri) - materialni modeli	Mohr-	Mohr-	Soft	Soft	Hardening	Hardening
	Coulomb	Coulomb	soil	soil	Soil	Soil
	t=0	končni	t=0	končni	t=0	končni
temelja tal pod jedrom	37	52	34	42	34	45
gorvodna stran	22	23	24	25	24	24
dolvodna stran	22	23	24	25	25	25
krona pregrade	66	93	55	94	66	98

Pri vseh računih, ki upoštevajo nedrenirano stanje (kar je realno), so končni posedki večji kot pri preprostem računu za drenirano stanje in sicer ne glede na izbrani materialni model. Posedanje (konsolidacija) tal pod pregrado, izračunano s povratno analizo, se zelo dobro ujema z dejansko izmerjenimi posedki. Na časovnem diagramu na sliki 6 so prikazani izmerjeni posedki na lokaciji posetalne plošče PP9 (označeno 'PP9') ter izračunano posadanje za 'Soft-soil' materialni model (označeno s 'SS-PP9'). Poleg tega so na sliki prikazani izmerjeni posedki krone pregrade (reperja 'VH4', 'VH7') ter izračunani posedki na kroni pregrade za isto časovno obdobje ('SS').



Slika 6: Izračunani in izmerjeni posedki

## 6 ZAKLJUČEK

Objekti izvedeni iz zemljinskih materialov se običajno obnašajo drugače od računsko predvidenega. Zemljine so naravni material; so nehomogene, anizotropne, deformacije so odvisne od napetosti in časa, poleg tega vplivajo na obnašanje vsa pretekla napetostna stanja (obremenjevanje in razbremenjevanje). Terenske in laboratorijske preiskave imajo omejitve, karakteristike lahko določimo le točkovno. Zaradi omejitev materialnih modelov, heterogenosti materialov in vplivnega prostora, tudi z numeričnimi analizami ne moremo natančno predvideti obnašanja objektov.

Kljud temeljitim geološko-geomehanskim raziskavam tal, dobremu projektu ter podrobnim navodilom o tehnologiji gradnje, ne moremo izključiti vremenskih vplivov in človeškega faktorja. Zato je smiselno, da se za geotehnične objekte, ki po EC7 spadajo v geotehnično kategorijo 3, vedno izvaja:

- vsestranski nadzor materialov in gradnje (QC),
- tehnično opazovanje med gradnjo in po njej ter
- se na osnovi podatkov iz časa gradnje izvede povratno analizo obnašanja geotehničnega objekta.

Za zemeljske pregrade naj se v okviru kakovosti gradnje:

- ugotavlja skladnost med projektnimi zahtevami oziroma predpostavkami ter dejanskimi razmerami - sestava temeljnih tal po celotnem vplivnem območju, kakovost materialov in kakovost vgradnje (zgoščevanja, kontrolne vrtine s preiskavami vgrajenih materialov...).

Za zemeljske pregrade naj se v okviru tehničnega opazovanja med gradnjo:

- meri posedke temeljnih tal (posedalne plošče, posedanje v profilu), posedke v telesu pregrade na različnih višinah (osnovna geodetska mreža mora biti vzpostavljena pred pričetkom del),
- meri horizontalne pomike v temeljnih tleh in v telesu pregrade (vertikalni inklinometri),
- meri porne tlake (samo v slabše prepustnih zemljinah – gline),
- sproti analizira rezultate opazovanj.

Za zemeljske pregrade naj se v okviru povratne analize:

- izbere primerne materialne modele zemljin,
- kalibrira računski model,
- računsko predvidi nadaljnje obnašanje in varnost izvedene pregrade, ki pa se s časom spreminja (zaradi konsolidacije, cikličnih obremenitev, erozije...),
- postavi mejne vrednosti za vzpostavljeni opazovalni sistem objekta (v celotni življenjski dobi).

Povratne analize s kalibracijo vhodnih podatkov so običajno zamudne. Analize za pregrado Drtijščica so pokazale, da je za določitev projektnih končnih posedkov primeren Mohr-Coulomb-ov model, medtem ko je za povratne analize in za določitev mejnih vrednosti potrebno izbrati materialne modele, ki upoštevajo odvisnost deformacijskih modulov od napetostnega stanja, upoštevati pa je potrebno tudi stopnjo dreniranja (konsolidacijo pri kohezivnih zemljinah).

Povratne analize kažejo, da se je konsolidacija temeljnih tal končala v letu 2003. Še nekaj let pa se bo nadaljevala konsolidacija samega telesa pregrade, kar bo povzročilo vertikalne in horizontalne deformacije v pregradi. Te pomike naj se v celotni življenjski dobi objekta primerja z računsko predvidenimi. S kalibriranim modelom smo računsko predvideli tudi deformacije pregrade zaradi polnitve zadrževalnika do maksimalne kote zajezitve. Vendar pa je ob prvi polnitvi bazena potrebno izvesti kontrolne meritve na vzpostavljenem opazovalnem sistemu in preveriti ustreznost računskega modela za ta slučaj.

## 7 REFERENCE

Brinkgreve, R.B.J. and P.A. Vermeer [1998]. "PLAXIS, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 7", A.A.Balkema

Viktor Pirc [2000]. "Zadrževalnik Drtijščica, Projekt za izvedbo del", Vodnogospodarski inštitut. d.o.o.

Mojca Ravnikar Turk, Janko Logar [2004]. "Numerical Analyses of the Performance of the Drtijščica Earth Dam", Proceedings: Fifth International Conference on case Histories in Geotechnical Engineering, paper No 2.29