

# Spremljanje stabilnosti Nuklearne elektrarne Krško

Simona Savšek-Safić \*

## Izvleček

Nuklearna elektrarna Krško (NEK) je za državo Slovenijo strateško pomemben objekt, saj s pridobivanjem električne energije, ki temelji na sproščanju toplotne energije ob cepitvi jeder v reaktorju, oskrbuje odjemalce v Sloveniji in na Hrvaškem. Letno proizvede nad pet milijard kWh električne energije, kar predstavlja približno 40% skupne proizvedene električne energije v Sloveniji in približno 17% na Hrvaškem. V NEK je pomembna visoka stopnja varnosti, zato se izvaja celovit nadzor posameznih objektov in naprav. Posebno pozornost se namenja varnostnim sistemom, med katere sodijo tudi meritve vertikalnih premikov reperjev in meritve horizontalnih premikov jezovne zgradbe na Savi. Periodična geodetska opazovanja se izvajajo na pomembnih tehnoloških objektih in obsegajo nuklearni otok, jez na Savi ter skladišče radioaktivnih odpadkov. V članku želimo predstaviti rezultate geodetskih opazovanj za ugotavljanje stabilnosti ter varnosti obratovanja tega pomembnega objekta.

## Uvod

Prve raziskave na Krškem polju je izvedla delovna skupina Poslovnega združenja energetike Slovenije v letih od 1964 do 1969, ko je to območje postalo možna lokacija za jedrsko elektrarno. Investitorja prve jedrske elektrarne sta bila Savske elektrarne Ljubljana in Elektroprivreda Zagreb, ki sta z investicijsko skupino izvedla pripravljala dela, razpis in izbrala najugodnejšega ponudnika. Avgusta 1974 sta investitorja sklenila pogodbo o dobavi opreme in graditvi jedrske elektrarne moči 632 MW z ameriškim podjetjem Westinghouse Electric Corporation, projektant je bilo podjetje Gilbert Associates Inc., izvajalca del na gradbišču sta bila domači podjetji Gradis in Hidroelektra, montažo pa sta izvajala Hidromontaža in Đuro Đaković. Prvega decembra 1974 je bil položen temeljni kamen za Nuklearno elektrarno Krško (v nadaljevanju NEK). Januarja 1984 je NEK pridobila dovoljenje za redno obratovanje (URL 1).

NEK komercialno obratuje že več kot dvajset let. V tem obdobju je izpolnila temeljna pričakovanja in usmeritve glede varnosti in stabilnosti obratovanja, konkurenčnosti proizvodnje v primerjavi z drugimi viri in sprejemljivosti v javnosti. NEK se danes po standardnih merilih jedrske varnosti in stabilnosti obratovanja uvršča v zgornjo četrtino obratujočih jedrskih elektrarn v svetu (URL 1).

Energija je ključni dejavnik človekovega življenja in razvoja. Ena najpomembnejših oblik energije je električna energija. Njena poraba v svetu narašča glede na raven in hitrost gospodarskega razvoja. V zadnjih desetih letih se je v državah Evropske unije poraba električne energije v povprečju povečala za dva odstotka na leto. Slovenija in Hrvaška nista izjemi, saj se rast porabe te energije v povprečju povečuje za tri odstotke na leto (URL 1). Električno energijo pridobivamo v elektrarnah iz različnih virov, kot so fosilna goriva (premog, nafta, plin), jedrska goriva (uran, plutonij, torij), voda, veter, biomasa in sonce. Na drugi strani se razpoložljivi viri primarne energije, na osnovi katerih pridobivamo električno energijo, krčijo ali pa so že v veliki meri izkoriščeni. Smisleno je

---

\* asist.dr. Simona Savšek-Safić, univ.dipl.inž.geod., UL-Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

torej izkoriščati vse razpoložljive vire. Tudi okoljske zahteve pri proizvodnji električne energije v klasičnih termoelektrarnah so vedno večje. Onesnaževanje atmosfere s škodljivimi plini postaja globalni problem. Zanesljivost oskrbe porabnikov z električno energijo strateško postaja tudi vse resnejše vprašanje za nacionalna gospodarstva. Električne energije namreč ni možno uvažati v neomejenih količinah, zato je visoka stopnja samooskrbe nujna. Električno energijo najpogosteje pridobivamo na različne načine.

- *V jedrskih elektrarnah* temelji pridobivanje električne energije na sproščanju toplotne energije ob cepitvi jeder v reaktorju. Sproščena energija je vir za proizvodnjo pare.
- *V termoelektrarnah* poteka pridobivanje električne energije s pretvarjanjem energije fosilnih goriv, kot so premog, plin in nafta, v električno. Ob izgorevanju goriv v kotlu nastaja toplota, ki uparja vodo. Paro vodijo na turbino, ta poganja generator, ki pretvarja mehansko energijo v električno. Iz turbine potuje para v kondenzator, kjer se utekočini in se vrača v kotel. Kondenzator hladijo s hladilnimi stolpi ali pretočno z vodo iz rek.
- *V hidroelektrarnah* proizvajajo električno energijo iz potencialne energije vode. Voda vrti turbino, ki poganja generator in pretvarja mehansko energijo v električno. Količina pridobljene energije je odvisna od padca in količine vode. Ločimo različne tipe hidroelektrarn: pretočne, akumulacijske in črpalne.
- *Z drugimi obnovljivimi viri* (veter, sonce) pretvarjamo energijo vetra pretvarjamo v električno energijo s pomočjo vetrnic, ki poganjajo električni generator. Sončno energijo pa je mogoče pretvoriti v električno energijo preko sončnih celic. Sončno energijo je mogoče izkoristiti za ogrevanje, osvetljevanje prostorov in pripravo tople vode.

V NEK je pomembna visoka stopnja jedrske varnosti. V ta namen se opravlja celovit nadzor posameznih objektov, opreme in sistemov, pri tem pa posebno pozornost namenjajo varnostnim sistemom. Del varnostnih sistemov so tudi tehnična opazovanja, ki jih realizirajo različni izvajalci, obsegajo pa naslednja dela (Skube, 2006):

- opazovanja poškodb in razpok na objektih,
- meritve razpok in delovanja razpok,
- opazovanja dilatacij,
- geotehnično poročilo,
- koordinacija programa opazovanj,
- meritve vertikalnih premikov reperjev in
- meritve horizontalnih premikov jezovne zgradbe.

### **Tehnična opazovanja varnostnih objektov**

Že med izgradnjo NEK oziroma skupaj s projektom je bil izdelan plan stabilizacije reperjev za objekte nuklearnega otoka, za turbinske zgradbe in za hladilne stolpe, ter plan opazovanja vertikalnih in horizontalnih premikov. Opazovanja se izvajajo na pomembnih tehnoloških objektih, poleg tega so v program tehničnih opazovanj vključeni tudi drugi objekti, ki se po svoji funkciji ali konstrukciji smatrajo tako pomembni in zahtevni, da jih je potrebno sistematično opazovati (Kogovšek, 1990).

Opazovanja za ugotavljanje vertikalnih premikov se opravljajo na naslednjih objektih tehnološkega dela NEK: nuklearni otok, diesel generator, turbinska zgradba, jez na Savi, črpališče hladilne vode, izliv hladilne vode, hladilni stolpi, črpališče nujne vode, iztočni objekt nujne vode, zgradba za dekarbonatizacijo vode, rezervoar demineralizirane vode,

rezervoar reaktorske dodajne vode, rezervoar kondenzata, nevtralizacijski bazen, zgradba za radiološko zaščito, skladišče radioaktivnih odpadkov, prostor za dekontaminacijo in temelj za transformator. Opazovanja za ugotavljanje horizontalnih premikov pa se skladno s Pravilnikom o tehničnem opazovanju visokih pregrad (Ur. List, 1966) izvajajo le na jezu na Savi.

Najpomembnejši objekti z vidika sevalne in jedrske varnosti so nuklearni otok, jez na Savi in skladišče radioaktivnih odpadkov.

- *Nuklearni otok* vključuje reaktorsko zgradbo in pomožno reaktorsko zgradbo. Reaktorska zgradba je osrednja zgradba glavnih pogonskih objektov, ki je sestavljena iz zunanje armirano-betonske ščitne konstrukcije, jeklenega zadrževalnega hrama, notranje armirano-betonske konstrukcije in temeljne plošče. Pomožna reaktorska zgradba je sestavljena iz ščitne, pomožne, vmesne in komandne zgradbe ter zgradbe za ravnanje z gorivom in zgradbe za sisteme za hlajenje komponent. Za ugotavljanje vertikalne stabilnosti je v nuklearni otok vgrajenih 29 reperjev.
- *Jez na Savi* je zgrajen zato, da ustvari minimalno gladino Save in s tem omogoči črpanje vode za potrebe hlajenja NEK. Jezovna zgradba ima šest prelivnih polj, širokih po 15 metrov. Zaradi potresne varnosti je jez razdeljen na dve monolitni armiranobetonski okvirni konstrukciji. Gradbena višina objekta znaša 15,5 m, zato objekt sodi v skupino visokih pregrad in ga je potrebno tehnično opazovati. Na jezu je za ugotavljanje vertikalne stabilnosti stabiliziranih 19 reperjev, za ugotavljanje horizontalne stabilnosti objekta pa je stabiliziranih 7 kontrolnih točk. vzdolž iztoka je dodatno stabiliziranih 5 referenčnih opazovalnih stebrov.
- *Skladišče radioaktivnih odpadkov* je enonadstropna nadzemna armiranobetonska zgradba, namenjena začasnemu skladiščenju radioaktivnih odpadkov, ki izvirajo iz tehnoloških procesov in vzdrževanja naprav v NEK. V objekt je vgrajenih 8 reperjev za kontrolo vertikalne stabilnosti objekta.

### Stabilizacija točk in izvedba meritev

#### Višinska mreža

Izhodiščni reper R100 (Slika 1) ob skladišču radioaktivnih odpadkov je stabiliziran z globokim betonskim stebrom s podolžno ploščico, s kovinskim drogom in zaščitno kapo. Na vzhodu in zahodu platoja NEK sta stabilizirana še izhodiščna reperja RII in RIV (Slika 2), ki sta vodoravno vzdana v armiranobetonska opazovalna stebra s temeljem globoko pod zemljo.



Slika 1 - Stabilizacija reperja R100



Slika 2 - Stabilizacija reperja RIV

Kontrolne točke na objektih so stabilizirane v deformacijski sredini objekta tako, da se premikajo skupaj z objektom. Stabilizacija je izvedena z lepilom ali drugim povezovalnim materialom. V zunanjih prostorih objektov NEK so nizki reperji vzdani v stene, v notranjosti objektov pa so v večini primerov reperji stabilizirani na tleh.

Meritve so izvedene s preciznim digitalnim nivelirjem Leica 3003. V večji meri smo uporabljali 3-metrski invarni kodni nivelmanski lati – (GPCL3), ki ju redno kompariramo. V primerih, kjer zaradi ovir ni bilo mogoče uporabiti lat GPCL3, smo uporabili invarne kodne nivelmanske late GPCL2, GWCL92 in GWCL182 ali kodni invarni trak GWCL60. Poleg instrumenta in lat smo uporabili še opremo, brez katere izvedba meritev ne bi bila mogoča: stativ, dve stojali za lati, podnožki, merski trak, termometer in ročno svetilko.

Uporabljena metoda je bila geometrični nivelman z niveliranjem iz sredine. Z navezavo točk na reper, ki ima podano višino v absolutnem smislu, določimo točkam nadmorske višine. Geometrični nivelman velja za najnatančnejšo geodetsko metodo, ker je merski postopek v osnovi zelo enostaven, teorija geometričnega nivelmana pa je izdelana do podrobnosti. Najbolj pomembno pri metodi niveliranja iz sredine je, da so razdalje med instrumentom in lato zadaj ter lato spredaj čim bolj enake. S tem tudi eliminiramo večino sistematičnih vplivov (nehorizontalnost vizurne osi, vpliv nivelmanske refrakcije in vpliv ukrivljenosti Zemlje) na pogreške. Z metodo merjenja lahko odpravimo tudi pogreške posedanja ali dviganja stativa in podnožk, na katerih so postavljene late (Skube, 2006).

Pomembna je tudi temperaturna odvisnost dimenzij razdelbe nivelmanske late, ki jo moramo pri najnatančnejših meritvah upoštevati. Pogrešek je majhen in ima sistematičen značaj. Določen je linearni razteznostni koeficient invarnega traku late  $\alpha$ , ki je podan tovarniško ali pa je določen ločeno s komparacijo. Temperaturni popravek je določen z naslednjo enačbo:

$$\Delta l_t = \alpha(T - T_0), \quad (1)$$

kjer so

$T$  dejanska temperatura,

$T_0 = 20$  °C referenčna temperatura in

$\alpha$  linearni razteznostni koeficient invarnega traku

Popravek višinske razlike zaradi temperaturnega popravka in popravka razdelbe lat (dobljeni s komparacijo) so imeli tako rekoč neznamenit vpliv na višinske razlike, saj se njihova vrednost giblje pod stotinko milimetra, kar pa je precej manj od natančnosti meritev, ki se gibljejo v okviru 0,2–0,5 mm. Vzrok za tako minimalne popravke so majhne višinske razlike med merjenimi reperji na platoju elektrarne in razmeroma majhne razlike med dejanskimi temperaturami in referenčno temperaturo. Pogrešek popravka pete late ali pogrešek začetne črtice razdelbe je sistematičen pogrešek, ki smo ga eliminirali z metodo dela tako, da smo na začetni in končni reper postavili vedno isto lato (Skube, 2006).

### Horizontalna mreža

Referenčne točke osnovne mreže, s katerih izvajamo meritve, so stabilizirane z betonskimi stebri, kar predstavlja klasično stabilizacijo položajnih geodetskih točk za deformacijska merjenja. Izbrana stabilizacija omogoča prisilno centriranje instrumenta in reflektorja - sistem *Leica Wild*.

Stabilizacija kontrolnih točk na pregradi prav tako omogoča prisilno centriranje reflektorja – sistem *Leica Wild*. Kontrolne točke so stabilizirane z vijakom v betonsko podlago, kamor je mogoče priviti podnožje z nosilcem prizme z možnostjo horizontiranja. Slika 3 prikazuje stabilizacijo in signalizacijo referenčne in kontrolne točke.

V mikro trigonometrični mreži Krško je izbrana klasična terestrična izmera. Meritve so izvedene s preciznim elektronskim tahimetrom *Leica TC2003*, ki je namenjen najnatančnejšim meritvam kotov in dolžin v preciznih terestričnih geodetskih mrežah (Savšek-Safić in drugi, 2007). Za prisilno centriranje instrumenta, signalizacijo merskih točk ter merjenje meteoroloških parametrov je uporabljen preizkušen in kalibriran dodatni pribor (reflektorji, podnožja z nosilci reflektorjev, psihrometer, barometer).



Slika 3 - Stabilizacija in signalizacija opazovalnega stebra in kontrolne točke

Za določitev horizontalnih koordinat referenčnih in kontrolnih točk sta uporabljeni metodi *triangulacije in trilateracije*. Na ta način pridobimo večje število nadštevilnih opazovanj, kar zagotavlja večjo natančnost in zanesljivost položajev kontrolnih točk. Pri metodi trilateracije so za redukcijo dolžin uporabljene nivelirane nadmorske višine referenčnih in kontrolnih točk. Koordinate referenčnih točk se določajo z namenom ugotavljanja njihove položajne stabilnosti ter določitve geodetskega datuma mreže. Horizontalni koti so merjeni po girusni metodi, obojestransko med referenčnimi točkami in enostransko na kontrolne točke. Istočasno so merjene tudi poševne dolžine in zenitne razdalje. Metoda izmere zagotavlja ugotavljanje statistično značilnih horizontalnih premikov kontrolnih točk na jezu.

### **Določitev geodetskega datuma in izračun**

#### **Višinska mreža**

Geodetski datum višinske mreže je realiziran z izhodiščnimi reperji R100, RII in RIV, ki imajo podano nadmorsko višino. V štirih letih je prišlo do napetosti med izhodiščnimi reperji v okviru 1 mm, kar je z vidika določitve natančnosti 0,1 mm prevelik premik.



Tako je izravnava potekala v dveh korakih. Najprej smo na osnovi danega reperja R100 izravnali ostala dva izhodiščna reperja RII in RIV. S tem smo odpravili napetost v mreži in posledično pridobili boljšo globalno oceno natančnosti. Nato smo dani reper R100 in oba izravnana izhodiščna reperja RII in RIV v drugem koraku izravnave privzeli kot dane količine in izravnali celotno višinsko mrežo. S postopkom dvakratne izravnave smo pridobili informacijo o relativnih premikih med izhodiščnimi reperji in s tem primernost njihove uporabe v prihodnjih meritvah.

### Horizontalna mreža

Geodetski datum horizontalne mreže določata dve dani domnevno stabilni točki – referenčni točki O1 in O5. Na osnovi ohranitve identične geometrije mreže, metode izmere ter opazovanj smo najprej testirali stabilnost referenčnih točk. Primerjava sprememb koordinat med zadnjimi izmerami je pokazala, da sta stebra O1 in O5 najbolj stabilna. Na ta način določen datum v mreži zagotavlja ugotavljanje statistično značilnih premikov kontrolnih točk z večjo verjetnostjo (Savšek-Safić in drugi, 2007).

Horizontalne koordinate so preračunane v obstoječi lokalni koordinatni sistem mreže na nivo najnižje točke (referenčna točka O4). Opazovanja so testirana za morebitno prisotnost grobih pogreškov po danski metodi. Vhodni podatek za horizontalno izravnava so reducirane sredine treh girusov ter reducirane poševno merjene dolžine na izbrani nivo. Pri redukciji dolžin smo upoštevali instrumentalne, meteorološke, geometrične in projekcijske popravke (Kogoj, 2005). Zenitne razdalje so opazovane za ugotavljanje višinske stabilnosti referenčnih in kontrolnih točk. Opazovanja v horizontalni mreži so izravnana po metodi posrednih opazovanj. Najprej izvedemo izravnava proste mreže, s čemer pridobimo nepristransko oceno opazovanj, v naslednji fazi pa mrežo izravnamo kot vpeto, kjer geodetski datum določata domnevno najstabilnejši referenčni točki O1 in O5. Rezultat horizontalne izravnave so najverjetnejše vrednosti horizontalnih koordinat merskih točk v lokalnem koordinatnem sistemu s pripadajočimi ocenami natančnosti.

### Stabilnost varnostnih objektov

#### Testiranje vertikalnih premikov

Osnova za ugotavljanje premikanja zgrajenega objekta je določitev spremembe položajev točk objekta. O premikih točk med dvema terminskima izmerama govorimo takrat, ko gre za statistično značilne premike identičnih točk, izmerjenih v dveh terminskih izmerah. Po izravnavi dveh terminskih izmer lahko določimo premike točk s pripadajočimi merili natančnosti premikov. V praksi se pogosto uporablja test za ugotavljanje statistične značilnosti premika kot razmerje med premikom in pripadajočo natančnostjo premika točke. Testno statistiko zapišemo v obliki:

$$T = \frac{dH}{\sigma_{dH}}, \quad (2)$$

kjer vertikalni premik izračunamo po enačbi:

$$dH = H_{t+\Delta t} - H_t, \quad (3)$$

varianco vertikalnega premika pa po enačbi:

$$\sigma_{dH}^2 = \sigma_{H_t}^2 + \sigma_{H_{t+\Delta t}}^2. \quad (4)$$

Testno statistiko (3) testiramo glede na postavljeno ničelno in alternativno hipotezo:

$H_0 : dH = 0$  : točka se v obdobju dveh terminskih izmer ni premaknila in

$H_0 : dH \neq 0$  : točka se je premaknila v obdobju dveh terminskih izmer.

Testno statistiko (2) primerjamo glede na kritično vrednost, ki jo izračunamo na podlagi porazdelitvene funkcije. Izračunamo jo za premik vsake točke med posameznimi serijami meritev, pri tem pa predpostavimo, da so premiki točk porazdeljeni po normalni verjetnostni funkciji. V primeru, ko je testna statistika manjša od kritične vrednosti ob izbrani stopnji značilnosti testa  $\alpha$ , je tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze preveliko. V tem primeru zaključimo, da premik ni statistično značilen. Če je vrednost testne statistike večja od kritične vrednosti porazdelitvene funkcije, pa zaključimo, da je tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze manjše od izbrane stopnje značilnosti testa  $\alpha$ . Zato upravičeno zavrnemo ničelno hipotezo in tako potrdimo, da je obravnavani premik statistično značilen.

Za lažjo odločitev izračunamo dejansko tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze. Dejansko tveganje  $\alpha_T$  izračunamo iz porazdelitvene funkcije pri izračunani vrednosti testne statistike  $T$ . Dejansko tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze primerjamo s stopnjo značilnosti testa  $\alpha$ . Uporabnik glede na dejansko tveganje in posledice napačne odločitve presodi, ali je tveganje zanj še sprejemljivo ali ne. Odločitev ima za posledico uvrstitev določene točke med stabilne ali nestabilne (Savšek-Safić in drugi, 2003).

Testirali smo značilnost vertikalnih premikov kontrolnih točk na jezu na Savi med izmerami v časovnem obdobju od decembra 2003 do oktobra 2007, torej smo obravnavali devet primerljivih izmer.

Preglednica 1 - Kumulativni vertikalni premiki kontrolnih točk na jezu na Savi v obdobju od decembra 2003 do oktobra 2007

Točka	Premik $dH$ [mm]	$\sigma_{dH}$ [mm]	$T$	$T_{crit}$ ( $\alpha = 1\%$ )	$\alpha_T$ (%)
H1	0,7	0,5	1,4052	2,5758	16,00
H2	1,3	0,5	2,7214	2,5758	0,65
H3	1,7	0,5	3,4992	2,5758	0,05
H4	0,6	0,5	1,2315	2,5758	21,81
H5	1,8	0,4	4,1010	2,5758	0,00
H6	2,0	0,4	4,8346	2,5758	0,00
H7	1,3	0,4	3,1768	2,5758	0,15

Med posameznimi meritvami v obdobju od decembra 2003 do oktobra 2007 lahko zasledimo statistično značilne vertikalne premike praktično na vseh kontrolnih točkah velikostnega reda  $\pm 3$  mm. Ti premiki med posameznimi meritvami imajo izrazito periodičen značaj, medtem ko za celotno obdobje 4 let kumulativni vertikalni premiki niso statistično značilni za kontrolni točki H1 in H4, saj testna statistika pri teh dveh kontrolnih

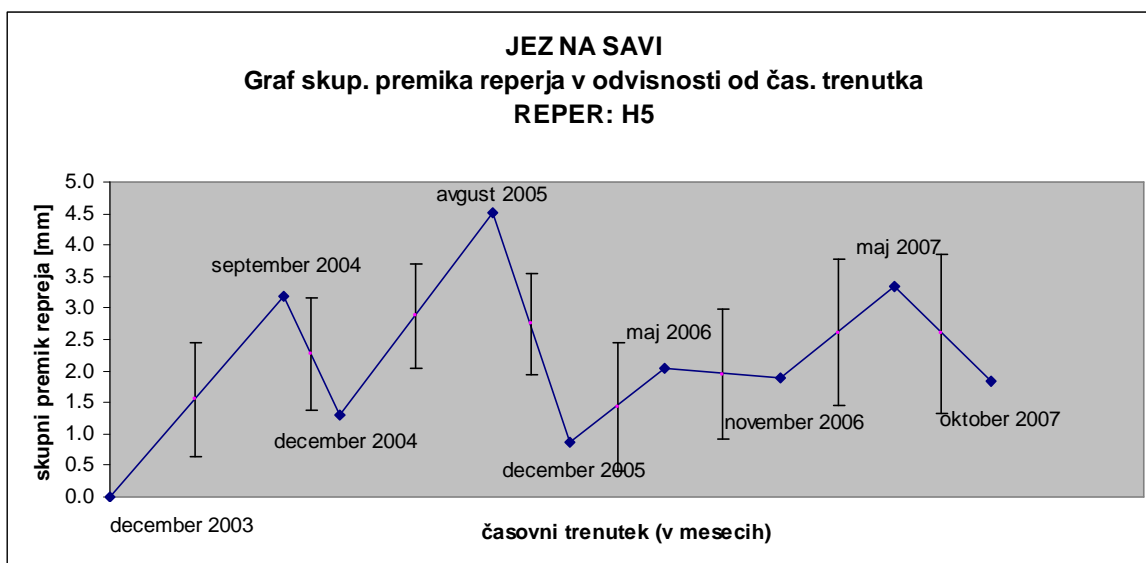
točk ne preseže kritične vrednosti, kar se vidi tudi iz preglednice 1. Ker je jez na Savi podvržen velikim silam Save, je logično, da prihaja do tako izrazitih vertikalnih premikov med posameznimi izmerami, vendar v daljšem časovnem obdobju. Zaradi njihove periodičnosti premiki niso izraziti.

#### Časovni potek vertikalnega gibanja kontrolnih točk na jezu na Savi

Funkcijo spremembe vplivne količine smo predstavili s kinematičnim deformacijskim modelom. Za vse reperje v višinski mreži, pri katerih smo zasledili premik ob določeni stopnji značilnosti testa, smo izdelali grafikone, ki predstavljajo funkcijo spremembe višine reperja v odvisnosti od časa.

V prispevku smo izbrali kontrolno točko H5 kot reprezentativno točko objekta. Druge točke na jezu na Savi se obnašajo podobno.

Vodoravna os na Sliki 4 prikazuje časovni trenutek, kjer ena enota predstavlja en mesec. Izhodišče  $t = 0$  mesecev je v začetni izmeri *decembra 2003*. Premik med dvema terminskima izmerama predstavlja daljica. Natančnost določitve premika, izračunana pri izbrani stopnji značilnosti testa  $\alpha = 1\%$  (standardna deviacija premika je torej pomnožena s 2,576) pa prikazuje vertikalna linija, postavljena na premici premika med dvema izmerama. Višino kontrolne točke glede na začetno izmero predstavlja vertikalna os oziroma graf prikazuje gibanje kontrolne točke, in sicer v odvisnosti od časovne komponente glede na začetno izmero.



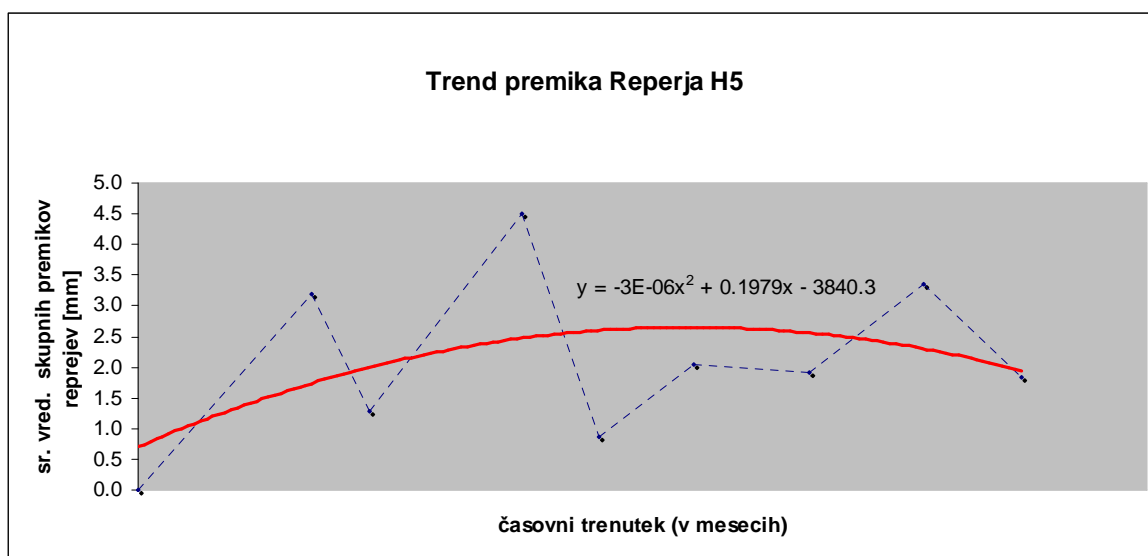
Slika 4 - Grafični prikaz premika reperja H5 v časovnem obdobju štirih let

Iz izrisanih premikov in pripadajočih standardnih deviacij premikov od decembra 2003 do oktobra 2007 bi lahko sklepali, da so premiki statistično značilni pri izbrani stopnji značilnosti testa. Zaradi očitne periodičnosti premikanja pa kumulativni premiki niso statistično značilni. Po decembru 2005 ugotavljamo, da so premiki in kumulativni premiki statistično neznačilni.

Dogajanje premikov objektov v NEK smo poskušali predstaviti z regresijsko krivuljo, ki smo jo aproksimirali za vsak objekt, za del objekta ali za vsak reper posebej. Na osnovi reperjev, ki pripadajo določenemu objektu in imajo podoben značaj premikov, smo izračunali povprečni premik celotnega ali dela objekta in ga aproksimirali s krivuljo poligona druge stopnje, s katere lahko enostavno razberemo preteklo dogajanje na objektu



in predvidimo, kako se bo objekt obnašal v prihodnje. Pred izračunom trendovske krivulje smo predpostavili, da se vse meritve nanašajo na začetno serijo meritev izvedenih decembra 2003.



Slika 5 - Grafični prikaz trenda premika reperja H5 na jezu na Savi

Rdeča krivulja predstavlja enačbo druge stopnje, ki aproksimira graf povprečnega premika reperja H5, ki je stabiliziran na jezu na Savi. Iz njene oblike lahko razberemo, da je hitrost premika pozitivna (celotna trendovska krivulja je pozitivna), medtem ko je pospešek negativen (krivulja je konveksna), kar pomeni, da se objekt s časom umirja in lahko pričakujemo trend umirjanja tudi v prihodnje. Velikost pospeška lahko razberemo iz enačbe krivulje, prav tako pa iz enačbe regresijske krivulje lahko izračunamo, kdaj se bo objekt vrnil na nivo začetne meritve izvedene decembra 2003.

#### Testiranje horizontalnih premikov

Na območju NEK obravnavamo horizontalno stabilnost jezu na Savi na podlagi devetih primerljivih terminskih izmer. Decembra 2003 smo s prehodom na nov način meritev (metoda izmere, instrument, geometrija mreže) ter z določitvijo novega geodetskega datuma v mikro mreži Krško izpolnili pogoje za ugotavljanje statistično značilnih premikov z večjo verjetnostjo. Po izravnavi najmanj dveh terminskih izmer je mogoče določiti premik točke  $d$  po enačbi (5) ter varianco premika  $\sigma_d^2$  po enačbi (6).

$$d = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2} = \sqrt{(y_{t+\Delta t} - y_t)^2 + (x_{t+\Delta t} - x_t)^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_d^2 = \left(\frac{\Delta y}{d}\right)^2 (\sigma_{y_t}^2 + \sigma_{y_{t+\Delta t}}^2) + 2 \frac{\Delta y}{d} \frac{\Delta x}{d} (\sigma_{y_t x_t} + \sigma_{y_{t+\Delta t} x_{t+\Delta t}}) + \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2 (\sigma_{x_t}^2 + \sigma_{x_{t+\Delta t}}^2). \quad (6)$$

Podobno kot pri testiranju vertikalnih posedkov obe količini uporabimo v statističnem testu:

$$T = \frac{d}{\sigma_d}. \quad (7)$$

Potrebno je poudariti, da izračunani premik ni linearna funkcija spremenljivk  $\Delta y$  in  $\Delta x$ , zato se testna statistika (7) ne porazdeljuje po standardni normalni verjetnostni porazdelitvi. Verjetnostjo funkcijo za testno statistiko (7) določimo empirično s simulacijami in jo primerjamo s kritično vrednostjo glede na izbrano stopnjo značilnosti testa  $\alpha$ . Premike točk je mogoče z zadostno verjetnostjo odkriti šele tedaj, ko so premiki statistično značilno večji od natančnosti ocene premikov (Savšek-Safić, 2002).

Testno statistiko testiramo glede na postavljeno ničelno in alternativno hipotezo:

$H_0 : d = 0$  : točka je stabilna in

$H_a : d \neq 0$  : točka ni stabilna.

Testno statistiko (7) primerjamo glede na kritično vrednost, ki jo izračunamo na osnovi simulirane porazdelitvene funkcije. Če je testna statistika manjša od kritične vrednosti ob izbrani stopnji značilnosti testa  $\alpha$ , je tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze preveliko. V tem primeru zaključimo, da premik ni statistično značilen. Če je testna statistika večja od kritične vrednosti, je tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze manjše od izbrane stopnje značilnosti testa  $\alpha$ . Zato upravičeno zavrnemo hipotezo in tako potrdimo, da je obravnavani premik statistično značilen.

Testiramo značilnost horizontalnih premikov kontrolnih točk na jezu na Savi med izmerami v časovnem obdobju od decembra 2003 do oktobra 2007, torej obravnavamo devet primerljivih izmer.

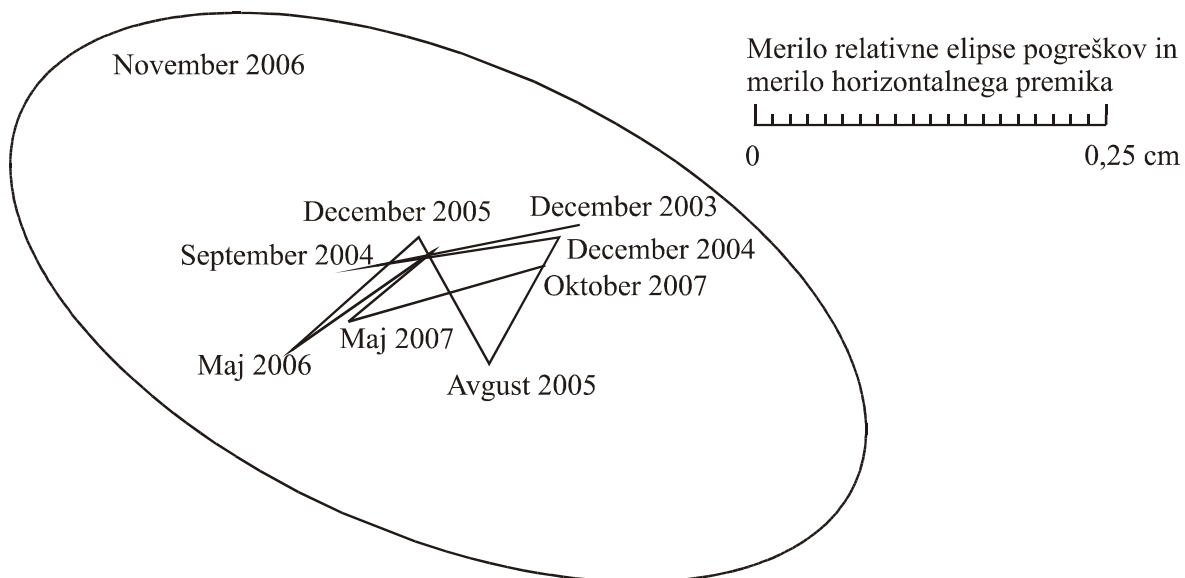
Preglednica 2 - Kumulativni horizontalni premiki kontrolnih točk na jezu na Savi v obdobju od decembra 2003 do oktobra 2007

Točka	Premik $d$ [mm]	$\sigma_d$ [mm]	$T$	$T_{crit}$ ( $\alpha = 1\%$ )	$\alpha_T$ (%)
H1	4,8	0,9	5,6010	2,9608	0,00
H2	0,4	0,5	0,6732	2,8787	76,26
H3	0,8	0,8	0,9814	2,8682	56,39
H4	0,6	0,9	0,6459	2,8691	77,40
H5	0,4	0,6	0,7670	2,8437	69,74
H6	1,2	0,6	2,1511	2,8154	6,21
H7	1,4	0,9	1,5839	2,7981	21,08

Ugotovljamo, da med posameznimi izmerami, izvedenimi od decembra 2003 do oktobra 2007, v večini primerov točki H1 in H7 izkazujeta značilne premike, ki se v povprečju gibljejo od 4 do 7 mm s povprečno standardno deviacijo premika od 1 do 1,5 mm. Ko obravnavamo kumulativni premik v obdobju štirih let, lahko zaključimo, da so dejanski kumulativni premiki dosti manjši od periodičnih sezonskih premikov med spomladansko in jesensko izmero. Iz preglednice 2 se vidi, da ob izbrani stopnji značilnosti testa  $\alpha = 1\%$  le za točko H1 lahko trdimo, da se je značilno premaknila v obravnavanem obdobju. Premik je statistično značilen in znaša 4,8 mm. Za ostale obravnavane točke na jezu ne moremo trditi, da so se značilno premaknile, saj so premiki premajhni, natančnosti določitve premikov pa zelo visoke.

## Časovni potek horizontalnega gibanja kontrolnih točk na jezu na Savi

Časovni potek horizontalnega gibanja točk na jezu na Savi smo predstavili s premiki kontrolnih točk in pripadajočimi relativnimi elipsami premikov, ki se nanašajo na premike med dvema izmerama. Relativne elipse premikov izračunamo iz natančnosti določitve točk v posamezni izmeri.



Slika 6 - Grafični prikaz premika kontrolne točke H5 v časovnem obdobju štirih let

Na Sliki 6 prikazujemo premik reprezentativno izbrane kontrolne točke H5 v času. Velikost premika med posameznimi izmerami je od 0,5 mm do 1,8 mm. Tudi pri analiziranju horizontalnih premikov vidimo periodičnost gibanja točk na Jezu na Savi. Na Sliki 6 prikazujemo tudi relativno elipso premika med dvema izmerama, izračunano pri izbrani stopnji značilnosti testa  $\alpha = 1\%$  (dolžini osi standardne elipse sta torej pomnoženi s 3,035), ki je najmanjša od vseh relativnih elips premikov med posameznimi izmerami, in smo jo narisali kar v težišču premikov kontrolne točke. Iz slike je razvidno, da premik kontrolne točke H5 ni statistično značilen ob izbrani stopnji značilnosti testa.

## Zaključki

NEK je zaradi svoje strateške pomembnosti izpostavljena podrobnim ocenam stabilnosti objekta ter varnosti obratovanja. Na območju NEK se izvajajo periodična geodetska merjenja z namenom določitve vertikalnih in horizontalnih premikov reperjev in kontrolnih točk na objektih in napravah. Najpomembnejši objekti z vidika sevalne in jedrske varnosti so nuklearni otok, jez na Savi in skladišče radioaktivnih odpadkov. Zaradi sprememb v merski tehniki in celovitejšega pristopa določanja premikov obravnavamo opazovanja iz zadnjih štirih let, ki so ocenljiva in zagotavljajo določanje premikov z veliko verjetnostjo. Pridobljeni rezultati so sestavni del letnih poročil obveznih tehničnih opazovanj, ki se izvajajo na objektih in napravah v NEK. Interpretacija stabilnosti in trend premikov sta z vidika varnega delovanja pomembna in zanimiva tudi za širšo javnost.

Na večini objektov, ki so vključeni v vseh devet serij meritev, so ugotovljena periodična nihanja, kar pomeni, da se pojavljajo vertikalni premiki izmenoma različnih predznakov. V poletnem obdobju so se reperji navadno dvignili, v zimskem pa zopet posedli. Potrebno je

poudariti, da poleg temperaturnih razlik na višino reperjev vplivajo tudi drugi dejavniki, kot je remont, saj v tistem času jedrska elektrarna miruje.

V zadnjih štirih letih je vsaj enkrat prišlo do večjega (do 5 mm) vertikalnega premika na vseh navedenih treh objektih. V avgustovski seriji 2005 je prišlo na nuklearnem otoku do velikega premika (do 5 mm), vendar so se že v naslednji seriji meritev decembra 2005 reperji vrnili na prejšnjo raven. Vzrok za premik ni popolnoma znan. Situacija ni kritična, saj na tem delu objekta niso odkrili poškodb, prav tako pa so se reperji premaknili za približno enako vrednost že v naslednji seriji meritev.

Jez na Savi je specifičen objekt NEK, saj je podvržen velikim silam pretoka Save, razlikam v polnjenju in praznjenju akumulacije in tako razlikam med visoko in nizko vodo. Zato lahko pričakujemo tudi večje premike celotnega jezua. Vertikalni premiki imajo izrazito periodičen značaj in so glede na premike reperjev drugih objektov precej veliki. Največji vertikalni premiki se pojavljajo med zaporednimi meritvami in dosežejo vrednosti tudi nad  $\pm 3$  mm. Ko ocenjujemo kumulativne vertikalne premike reperjev na jezua v časovnem obdobju štirih let, ugotavljamo, da premiki reperjev praktično niso statistično značilni. Podobno lahko zaključimo, da skrajni kontrolni točki H1 in H7 na jezua med zaporednimi izmerami izkazujeta periodične horizontalne premike od 4 do 7 mm, medtem ko drugih kontrolnih točk ne moremo obravnavati kot nestabilnih. Če ocenjujemo kumulativne horizontalne premike kontrolnih točk v obdobju štirih let, lahko zaključimo, da so v povprečju zelo majhni, le na točki H1 zaznamo kumulativni premik, ki pa je manjši od 5 mm, kar je z vidika dopustnih odstopanj premikov za jedrske objekte zanemarljivo malo.

Premiki reperjev skladišča za radioaktivne odpadke so izrazito periodični, vrednosti se pri najbolj problematičnem reperju R49 gibljejo od  $-2,8$  mm do 3 mm. Do velikega premika je prišlo v seriji meritev avgusta 2005. Vzrok je glede na neodkrite poškodbe objekta, neznan. Že v naslednji seriji meritev se je reper premaknil za isto vrednost na prejšnjo raven. Premiki ostalih reperjev se gibljejo v mejah od  $-2,2$  mm do 2,2 mm. Med prvo in zadnjo serijo meritev so bili prav tako odkriti statistično značilni vertikalni premiki reperjev, njihova vrednost pa je glede na zaporedne meritve precej manjša kot med zaporednimi serijami meritev.

Možna razlaga izmerjenega periodičnega nihanja reperjev je tudi v višini podtalnice pod Krškimi poljem. To bi bilo možno spremljati s piezometri. Dodatno pa bi periodično nihanje lahko določili z navezavo višinske mreže oziroma izhodiščnih reperjev na stabilno okolico.

Pospešek krivulje trenda je pri večini objektov negativen, kar pomeni, da se objekti s časom umirjajo in lahko glede na trend v prihodnosti pričakujemo, da se bodo počasi dokončno umirili. Pri tem je potrebno opozoriti, da je trendovska krivulja izračunana na osnovi povprečnih premikov reperjev, kar pomeni, da je trend v večji meri samo predpostavka in ne z visoko geodetsko natančnostjo pridobljena informacija. Kljub temu nam omogoča predvideti prihodnje dogajanje na objektu. Vrednosti maksimalnih dopustnih premikov objektov so opredeljene glede na tip konstrukcije in vrsto tal in se gibljejo od 7,5 cm za opečne zgradbe do 30 cm za težke betonske konstrukcije (Kogovšek, 1990). Splošno gledano so objekti NEK glede na maksimalne dopustne premike reperjev in kontrolnih točk stabilni, saj se povprečni statistično značilni premiki z redkimi izjemami gibljejo v okviru  $\pm 2,0$  mm.

**Zahvala:** Zahvaljujemo se družbi IBE, d.o.o., in odgovornemu sodelavcu za tehnična opazovanja NEK g. B. Kogovšku za uporabo merskih podatkov v znanstveno-raziskovalne namene in Mateju Ključevšku, ki je opravil večino nivelmanskih meritev.

## Literatura

- Kogovšek, B. (1990): Projekt tehničnega opazovanja Nuklearne elektrarne Krško, Inženirski biro elektroprojekt, Ljubljana.
- Kogoj, D. (2005): Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji, UL-FGG, Ljubljana.
- Savšek-Safić, S. (2002): Optimalna metoda določanja stabilnih točk v deformacijski analizi, UL-FGG, Doktorska disertacija, Ljubljana.
- Savšek-Safić, S., Ambrožič T., Stopar B., Turk G. (2003): Ugotavljanje premikov točk v geodetski mreži, Geodetski vestnik, 47/1&2, 7 – 17.
- Savšek-Safić, S., Kogoj, D., Marjetič, A., Jakljič, S. (2007): 49. geodetska izmera horizontalnih premikov geodetskih točk NEK, UL-FGG, Tehnično poročilo.
- Skube, K. (2006): Vertikalni premiki reperjev na objektih NE Krško med leti 2002 in 2006, UL-FGG, Diplomsko naloga, Ljubljana.
- Pravilnik o tehničnem opazovanju visokih pregrad, Ur. list SFRJ 7/66.
- URL 1: Nuklearna elektrarna Krško, <http://www.nek.si/sl/>, (12.11.2007).