

Posouzení stavu tabulí hradidel na vtocích a výtocích vltavských vodních elektráren

Josef Mikulášek¹, Miroslav Varner²

Annotation

The structural performance assessment of existing intake gate, drain gate and emergency gate of hydropower plants located at the Vltava river is described. Technical documentation, results of visual check and dimensional check, steel mechanical properties measurement and stress analyses results and strength and fatigue lifetime evaluation using particular reliability coefficients are basis for the assessment. It was found that some gates does not met criteria prescribed by current standards.

Key words:

structural performance, gate, emergency gate, corrosion, strength, fatigue

1 Úvod

Tabule rychlouzávěřů slouží k provoznímu hrazení vtoků vodních turbín jednak do vyrovnaných hladin a zvláště do průtoku. Tabule provizorních hrazení vtoků a výtoků se využívají při revizích a opravách vodních turbín, přičemž se hradí vždy do vyrovnaných hladin. Po jisté době používání tabulí dochází k snižování jejich spolehlivosti. Snižování parametrů spolehlivosti tabulí může být způsobeno korozí, únavou tabulí či degradací podpor. U tabulí rychlouzávěřů se může při manipulaci vyskytnout přídavné zatížení vlivem zvýšeného tření mezi tabulí a podporami.

V roce 2002 havarovala tabule rychlouzávěře PVE Ružín. Došlo k vybočení stojin hlavních nosníků a ztrátě jejich stability. Rozbory okolností havárie a výsledků výpočtů napětí metodou konečných prvků (MKP) ukázaly, že příčiny havárie byly výřezy ve stojinách s vysokou koncentrací smykového napětí a imperfekce geometrie hlavních nosníků vzniklá během vytahování tabule se zvýšeným třením podvozku.

Preventivní kontrolou výkresové dokumentace tabulí rychlouzávěřů vodních děl na Slovensku byly vytipovány tabule s možným potenciálem havárie. Kontrolním výpočtem napětí pomocí MKP bylo zjištěno, že stojiny hlavních nosníků tabule rychlouzávěře PVE Liptovská Mara jsou opatřeny dírou způsobující zvýšení smykového napětí. Vizualní kontrolou byla v kritickém místě stojiny zjištěna imperfekce geometrie hlavních nosníků. Díra byla zavařena a stojina hlavního nosníku byla v kritické oblasti zpevněna přivařením výztuhy. Tyto jednoduché a ekonomicky nenáročné úpravy zajišťují požadovanou spolehlivost tabule rychlouzávěře.

V letech 2008 a 2007 bylo na základě požadavků ČEZ provedeno hodnocení spolehlivosti tabulí hrazení vtoků, výtoků a rychlouzávěřů některých vodních elektráren vltavské kaskády. V příspěvku se uvádí postup a výsledky hodnocení spolehlivosti tabulí.

2 Požadavky a rozsah hodnocení

Hodnocení spolehlivosti tabulí bylo dle požadavků ČEZ provedeno v souladu s normou ČSN ISO 13822 [1]. Ověření bezpečnosti a použitelnosti tabulí požadované normou [1] bylo

¹ Ing. Josef Mikulášek, ČKD Blansko Engineering,a.s., Čapkova 2357/5, 678 01 Blansko, Česká republika, Telefon: +420 533 309 515, E-mail: mikul.vhs@cbeng.cz

² Ing. Miroslav Varner, ČKD Blansko Engineering,a.s., Čapkova 2357/5, 678 01 Blansko., Česká republika, Mobil: +420 602 385 398, Telefon: +420 533 309 570, E-mail: varner.vhs@cbeng.cz

provedeno v souladu s normami ČSN 73 1401 [2] a ČSN 73 1404 [3]. V tabulce 1 jsou vyjmenovány vodní elektrárny s uvedením doby provozu a počtů hodnocených tabulí.

tabulka 1

Vodní elektrárna	Počet roků provozu	Počet hodnocených tabulí		
		vtoky	výtoky	rychlouzávěry
Vrané	70	4	2	2
Slapy	52	6	3	nehodnoceno
Kamýk	45	16	6	24
Orlík	44	12	4	4

Hodnocení vychází z výkresové dokumentace, výsledků vizuálních prohlídek, výsledků měření tvrdosti a mechanických vlastností oceli, analýzy vstupů a výsledků pevnostních výpočtů a ověření bezpečnosti a použitelnosti konstrukce.

3 Kontroly a zkoušky

Účelem kontrol a zkoušek bylo získat podklady pevnostního výpočtu reálného provedení tabulí v jejich aktuálním stavu.

Vizuální kontrola byla provedena v rámci prohlídky hradidel.

Bylo zkoumáno:

- shoda skutečného provedení tabulí s výkresovou dokumentací
- výskyt deformací
- výskyt trhlin
- výskyt koroze a stav nátěrů.

Rozměrová kontrola tabulí zahrnovala proměření tloušťek jednotlivých prvků tabulí důležitých z hlediska pevnosti, bezpečnosti a použitelnosti tabulí.

Měření tvrdosti oceli prvků hradidel bylo provedeno přenosným tvrdoměrem.

Byla stanovena tvrdost ocelí hlavních nosných prvků tabulí:

- stojiny a pásnice hlavních nosníků
- stojiny a pásnice bočních nosníků
- nýtů
- krycího plechu.

Mechanické vlastnosti oceli byly zjištěny na vzorcích odebraných z prvků tabulí rychlouzávěrů VE Vrané a VE Kamýk.

Vizuální kontrolou tabulí hradidel nebyly zjištěny významné odchylky provedení, deformace či trhliny. V řadě případů byly zjištěny korozní poškození tabulí a poškození jejich nátěrů. Rozměrovou kontrolou nebyly zjištěny odchylky rozměrů skutečného provedení od výkresové dokumentace s výjimkou případů zmenšení tloušťek prvků tabulí vlivem koroze. Největší hloubky korozního poškození vztažené k tloušťkám hlavních nosných prvků tabulí rychlouzávěrů jsou uvedeny v tabulce 2.

tabulka 2: Poměrné zmenšení tloušťek prvků a poměrná hloubka bodů [%]

Vodní elektrárna	Stojiny hlavních nosníků	Pásnice hlavních nosníků	Krycí plech
Vrané	5	6.6	8
Kamýk	0	0	0
Orlík	Body - hloubka 12	Body - hloubka 6	Body - hloubka 6

Výsledky měření tvrdosti oceli prvků tabulí odpovídají v dokumentaci předepsaným jakostem ocelí s výjimkou krycího plechu tabule hradidla vtoku VE Kamýk. Výsledky mechanických

zkoušek byly použity pro stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností ocelí tabulí rychlouzávěrů VE Vrané a VE Kamýk. Charakteristické hodnoty mechanických vlastností ocelí hlavního nosníku VE Kamýk neodpovídají mechanickým vlastnostem ocelí dle výkresové dokumentace a požadavkům [2] na hodnoty nárazové práce.

4 Analýza napětí

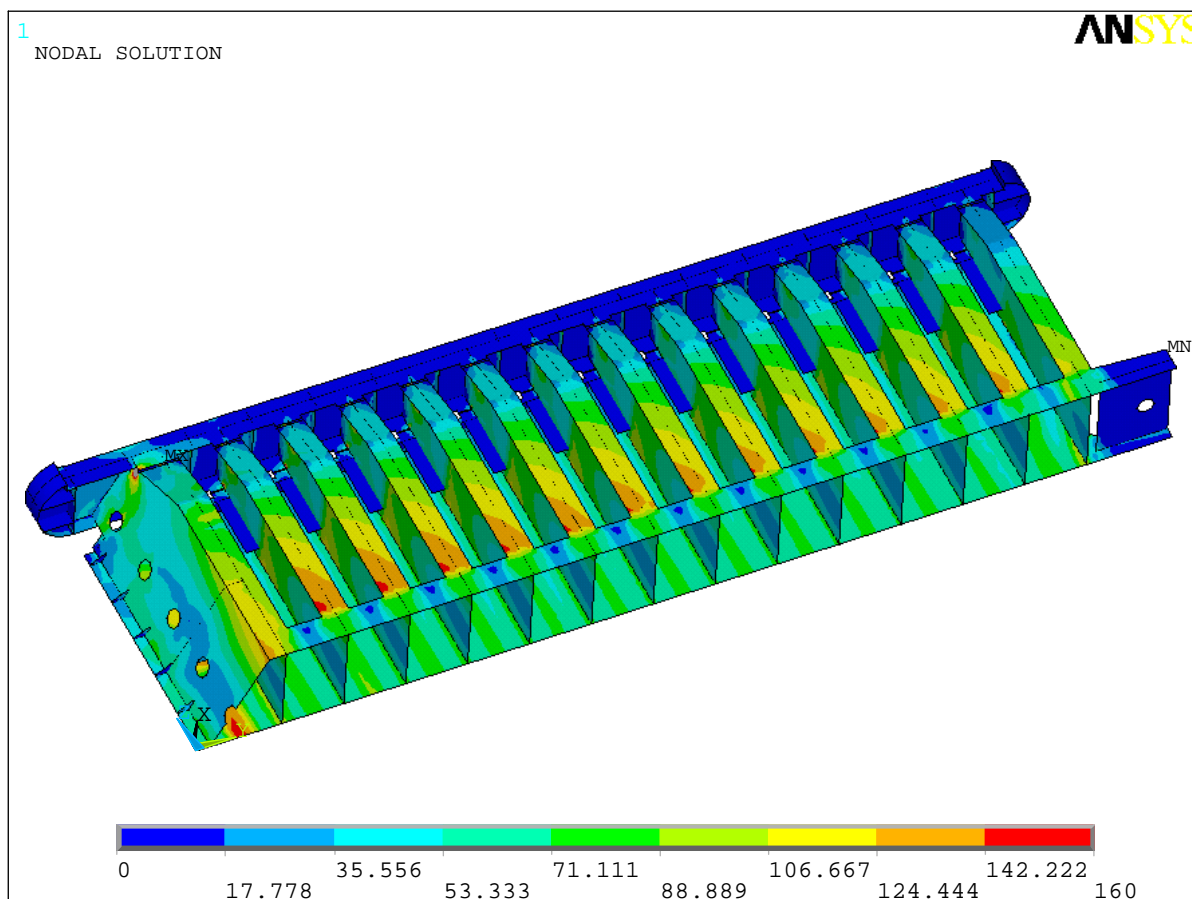
Analýza napětí a deformací metodou konečných prvků je realizována programovým systémem ANSYS [4].

Podkladem pro tvorbu geometrického modelu je konstrukční dokumentace a výsledky prohlídek. Nálezy vizuálních a rozměrových kontrol byly zohledněny při modelování korozních přídavků.

V případě nýtovaných konstrukcí byly vytvořeny dva modely. V prvním jsou průřezy snýtovaných prvků považovány za kompaktní, v druhém modelu zaměřený na výpočet nýtů je „přínýtován“ pouze hlavní nosník a je počítána „spodní“ část tabule.

Model zatížení konstrukce vychází z rozložení tlaku vody na tabuli.

Jmenovité hodnoty vlastnosti materiálu použité pro analýzy a ověření jsou převzaty z příslušných norem s respektováním konstrukční dokumentace. Výsledky výpočtů napětí tabule rychlouzávěru VE Orlík jsou na obr. 1.



Obr. 1 Napětí [MPa] – tabule rychlouzávěru VE Orlík

V případě tabulí rychlouzávěrů VE Vrané a VE Kamýk jsou pro ověření použity charakteristické hodnoty mechanických vlastností odhadnutých na základě výsledků mechanických zkoušek jako 5% kvantil [1].

Modelové nejistoty materiálu resp. zatížení jsou uvažovány dílčími součiniteli spolehlivosti [2], možnost vzniku chvění způsobeného zatížením za provozu se uvažuje dynamickým

součinitelem [3] a zvláštnosti působení oceli, konstrukčních prvků, spojů a celých konstrukcí jsou zohledněny použitím součinitele podmínek působení [3].

5 Hodnocení pevnosti

Ověření funkční způsobilosti a spolehlivosti konstrukce [1] vychází z hodnocení pevnosti s využitím součinitelů a z hodnocení životnosti konstrukce [2] a [3] pro odhadnuté počty cyklů zatížení při hrazení do vyrovnaných hladin a při hrazení do průtoku. Pevnostní podmínku plechů, profilů a nýtů podle [2] a [3] lze vyjádřit nerovnostmi:

$$\text{pro normálová napětí} \quad \sigma \leq \frac{f_y \cdot \gamma_u}{\gamma_M \cdot \gamma_F \cdot \phi} = f_\sigma, \quad (1)$$

$$\text{pro smyková napětí} \quad \tau \leq \frac{0.6 \cdot f_{ur} \cdot \gamma_u}{\gamma_{Mr} \cdot \gamma_F \cdot \phi} = f_\tau, \quad (2)$$

kde:

- σ, τ jsou napětí vypočítaná MKP,
- f_y je mez kluzu oceli,
- f_{ur} je mez pevnosti oceli nýtů,
- γ_u je součinitel podmínek působení,
- γ_M je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu,
- γ_F je dílčí součinitel spolehlivosti zatížení,
- γ_{Mr} je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu nýtů,
- ϕ je dynamický součinitel,
- f_σ je přípustná hodnota napětí plechů a profilů,
- f_τ je přípustná hodnota napětí nýtů.

V Tabulce 3 jsou uvedeny výsledky hodnocení pevnosti tabulí hradidel a tabulí rychlouzávěřů. Z tabulky vyplývá, že tabule provizorních hrazení vyhovují požadavkům norem z hlediska pevnosti s výjimkou zkorodované tabule na vtoku VE Slapy. Tabule rychlouzávěřů VE Kamýk a VE ORLÍK nevyhovují požadavkům norem na pevnost.

Tabulka 3

Vodní elektrárna	výsledky hodnocení pevnosti tabulí		
	vtoky	výtoky	rychlouzávěře
Vrané	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
Slapy	nevyhovuje	vyhovuje	nehodnoceno
Kamýk	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje
Orlík	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje

6 Posouzení na únavu

Hodnocení na únavu plechů a profilů se provádí na základě rozkmitů nominálního napětí $\Delta\sigma$ vypočítaných MKP s využitím únavových křivek stanovených pro konstrukční detaily. Konstrukčním detailům se přiřazuje kategorie detailu $\Delta\sigma_c$ označená číslem vyjadřujícím referenční hodnotu únavové pevnosti pro 2 mil.cyklů. Počet cyklů napětí N_i s rozkmitem $\Delta\sigma$, potřebných pro vznik porušení se vypočte vzorci:

$$\text{pro} \quad \Delta\sigma \geq \frac{\Delta\sigma_D \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} \quad \text{je} \quad N_i = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D \cdot \varphi_t \cdot \varphi_r}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma} \right)^3; \quad (3)$$

$$\text{pro } \frac{\Delta\sigma_D \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} > \Delta\sigma > \frac{\Delta\sigma_L \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} \quad \text{je } N_i = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D \cdot \varphi_t \cdot \varphi_r}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma} \right)^5; \quad (4)$$

$$\text{pro } \Delta\sigma \leq \frac{\Delta\sigma_L \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} \quad \text{je } N_i \Rightarrow \infty; \quad (5)$$

- kde :

$\Delta\sigma$ je největší rozkmit napětí v návrhovém spektru pro jednotlivé prvky konstrukce vypočítaný MKP

$\gamma_{Ff} = \gamma_F \cdot \Phi / \gamma_u$ je dílčí součinitel spolehlivosti únavového zatížení;

γ_{Mf} je dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti;

φ_r je součinitel asymetrie cyklu;

φ_t je součinitel vlivu tloušťky materiálu;

$\Delta\sigma_D$ je mez únavy při konstantní amplitudě při $5 \cdot 10^6$ cyklů v MPa,

$\Delta\sigma_D$ je rozkmit napětí na mezi únavy při počtu kmitů $N_D = 5 \cdot 10^6$,

$\Delta\sigma_L$ je prahový rozkmit napětí při počtu kmitů $N_L = 10^8$.

Za dobu provozu konstrukce bylo realizováno n_1 cyklů zatížení při hrazení do průtoku a n_2 cyklů zatížení při hrazení do vyrovnaných hladin.

Celkové poškození únavou se vypočítá vztahem:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i}. \quad (6)$$

Z hlediska únavy plechových prvků a profilů jsou tabule hradidel a tabule rychlouzávěrů schopné provozu nejméně dalších 500 let.

Hodnocení na únavu nýtů se provádí na základě rozkmitů nominálního napětí $\Delta\tau$, vypočítaných MKP s využitím únavových křivek stanovených pro konstrukční detaily.

Konstrukčním detailům se přiřazuje kategorie detailu $\Delta\tau_C$ označené číslem vyjadřujícím referenční hodnotu únavové pevnosti pro $N_C = 2$ mil. cyklů. Počet cyklů napětí N_i s rozkmitem smykového napětí $\Delta\tau$, potřebných pro vznik porušení se vypočte vzorci:

$$\text{pro } \Delta\tau > \frac{\Delta\tau_L \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} \quad \text{je } N_i = N_C \cdot \left(\frac{\Delta\tau_C \cdot \varphi_t \cdot \varphi_r}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau} \right)^5; \quad (7)$$

$$\text{pro } \Delta\tau \leq \frac{\Delta\tau_L \cdot \varphi_r \cdot \varphi_t}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff}} \quad \text{je } N_i \Rightarrow \infty; \quad (8)$$

kde $\Delta\tau_L$ je prahový rozkmit napětí při počtu kmitů $N_L = 10^8$.

Za dobu provozu konstrukce bylo realizováno n_1 a n_2 cyklů zatížení při hrazení do průtoku a do vyrovnaných hladin. Celkové poškození nýtů únavou se vypočítá vztahem (6).

Z hlediska únavy nýtů jsou tabule rychlouzávěrů schopné provozu nejméně dalších cca 1900 let.

7 Analýza údajů

Aktuální stav konstrukce byl ověřen kontrolami, případné odchylky od dokumentace, které ovlivňují výsledky analýz a ověření byly zahrnuty do výpočtových modelů. Zjištěné rozsahy korozního poškození byly uvažovány při tvorbě výpočtového modelu. Tvrdost ocelí prvků tabulí odpovídají v dokumentaci předepsaným jakostem ocelí s výjimkou krycího plechu tabule hradidla vtoku VE Kamýk. Přípustné hodnoty napětí použité při hodnocení napětí tabulí hradidla vtoku VE Kamýk byly konzervativně korigovány s ohledem na výsledky měření tvrdosti.

Výsledky mechanických zkoušek byly použity pro stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností ocelí tabulí rychlouzávěrů VE Vrané a VE Kamýk. Charakteristické hodnoty mechanických vlastností ocelí hlavního nosníku tabule rychlouzávěru VE Kamýk neodpovídají mechanickým vlastnostem ocelí dle výkresové dokumentace a požadavkům norem na hodnoty nárazové práce. Na základě zkušeností, výsledků zkoušek rázem v ohybu podle Charpyho [5] a požadavků konzervativního přístupu při hodnocení tabulí vyrobených z ocelí třídy 10 je nutné uvažovat se sníženou odolností tabulí vůči křehkému lomu.

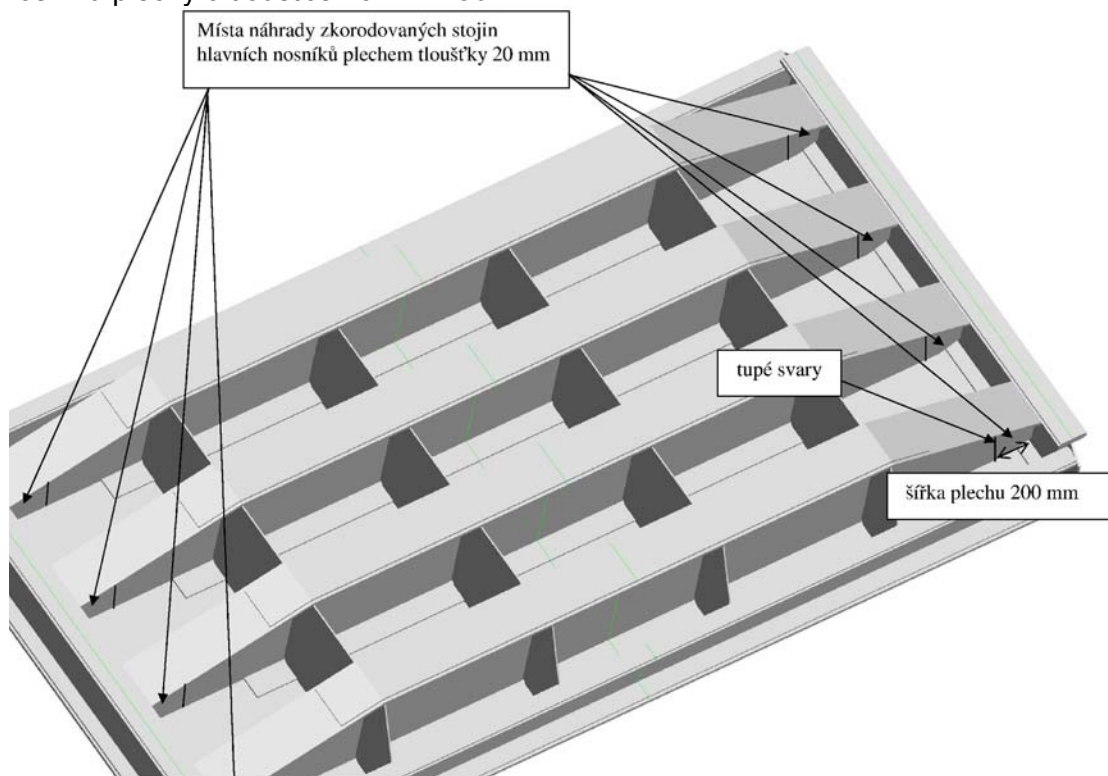
Správnost výsledků analýz napětí a ověření jsou však vedle modelovaného stavu samotných tabulí hradidel ovlivněny i modelovaným stavem podpor. Vedle stavu podpor je třeba sledovat výskyt extrémních zatížení a nesprávné použití konstrukce

Predikce doby bezpečného provozu tabulí hradidel předpokládá rovněž dobrý stav nátěrů, který zabezpečuje protikorozní ochranu konstrukce.

8 Možné varianty opatření

Možná úprava normám nevyhovujícím tabulí rychlouzávěrů (VE Orlík, VE Kamýk) svařením pásnic hlavního nosníku s pásnicí bočního nosníku a zesílení pásnic hlavních nosníků představuje základní opatření vedoucí k zvýšení spolehlivosti tabulí na přijatelnou úroveň. Obecně, provedení hybridních spojů prvků ocelových konstrukcí předpokládá, že třecí spoje (nýty, šrouby) budou utaženy na plnou sílu předpětí až po dokončení svařování. Technologický postup úpravy tabule svařováním pásnic tedy musí zahrnovat demontáž nýtových spojů, vlastní svařování a následnou montáž nýtových resp. třecích šroubových spojů. Dalším opatřením je zesílení nýtových spojů vhodnou kombinací zvětšení průměru nýtů a zvýšení počtu nýtů. Odborné provedení nýtových spojů bude v současné době obtížné realizovat, jako vhodné řešení je možné uvažovat náhradu nýtových spojů třecími šroubovými spoji. Výměna tabule rychlouzávěru za novou svařovanou tabuli představuje, jak z hlediska výroby, tak z hlediska bezpečnosti a použitelnosti optimální variantu.

Optimální varianta úpravy, normám nevyhovující tabule provizorního hrazení (vtok VE Slapy), spočívá v nahrazení zkorodované stojiny do vzdálenosti cca 200mm od bočních nosníků plechy o tloušťce 20mm – obr. 2.



Obr. 2 Navrhovaná úprava tabule na vtoku VE Slapy

Další opatření vedoucí k zvýšení spolehlivosti tabulí souvisí s provozem a údržbou hradidel. Funkční způsobilost tabulí je podmíněna prováděním řádné údržby – zejména udržování nátěru v dobrém stavu. Doporučujeme periodické vizuální kontroly před a po použití konstrukce a rovněž kontrolu stavu podvozku a podpor. Zvýšené tření mezi podvozkem a podporami při manipulacích s tabulí vede k přetížení konstrukce, zejména v stojině hlavního nosníku v blízkosti bočního nosníku. Při nálezů nadměrné deformace, trhlin nebo korozního poškození, či stavu podvozku a podpor, který může vést k zvýšení tření, je třeba odborným šetřením stanovit a vhodným opatřením odstranit příčinu nálezů.

9 Závěry

Bylo posouzeno celkem 83 ks tabulí hradidel vodních elektráren vltavské kaskády. Deformace a trhliny nebyly zjištěny. Na tabulích bylo zjištěno korozní poškození, tloušťka prvků se zmenšila až o 8 %.

Tabule na vtoku VE Slapy a tabule rychlouzávěrů VE Orlík a VE Kamýk nevyhovují požadavkům norem na pevnost. Všechny hodnocené tabule vyhovují z hlediska únavy.

Oceli třídy 10 obecně nevyhovují požadavkům norem na hodnoty nárazové práce materiálu tabulí. Výsledky hodnocení umožnily navrhnout pro jednotlivé tabule opatření (oprava, rekonstrukce, výměna) zajišťující funkční způsobilost hradidel.

10 Literatura

1. ČSN ISO 13822, Zásady navrhování konstrukcí – hodnocení stávajících konstrukcí
2. ČSN 73 1401 se změnami Z1(červenec 2001) a Z2 (květen, 2002), Navrhování ocelových konstrukcí, březen 1998
3. ČSN 73 1404, Navrhování ocelových konstrukcí vodohospodářských staveb, březen 1999
4. www.ansys.com
5. ČSN EN 10 045-1, Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho