

MODEL PORUŠENÍ ASFALTOBETONOVÉHO TĚSNĚNÍ

MODEL OF FAILURE OF ASPHALT CONCRETE SEALING

Karel Adam, Jan Jandora, Jaromír Říha, Miroslav Špano

Abstrakt:

Asfaltobeton je dnes již tradičním materiálem užívaným pro konstrukci návodního těsnění hrází přehrad, zejména horních nádrží přečerpávacích vodních elektráren. Asfaltobetonová vrstva bývá v horských oblastech často vystavována extrémnímu zatížení rychlým kolísáním teploty se značným rozkyvem. V příspěvku je popsáno modelové řešení mechanismu možného porušení asfaltobetonového pláště v důsledku teplotních změn. Řešení sestávalo ze shromáždění potřebných vstupních údajů pro výpočty, jako jsou materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev asfaltobetonového pláště a okrajové podmínky. Vlastní modelové řešení spočívalo v simulaci vedení tepla asfaltobetonovým pláštěm a z úlohy tepelné napjatosti a přetvoření konstrukce za předpokladu dokonale pružného materiálu. Součástí řešení byla kalibrace modelu vedení tepla s využitím naměřených hodnot in situ. Závěry studie umožní vysvětlení možných důvodů poruch asfaltobetonového těsnění. Numerické výpočty byly provedeny s využitím komerčního softwaru ANSYS.

Abstract:

Asphalt concrete sealing is commonly used as an upstream sealing of embankment dams namely of upper reservoirs of pumped hydro-power plants. The asphaltic layer is frequently exposed to a high range of temperatures during short time period. In the paper numerical modelling of the process of failure of the sealing due to temperature changes is discussed. Firstly material properties and boundary condition characteristics were assembled. The modelling consists of both heat transfer analysis and strain-stress analysis. In this study asphaltic concrete was assumed to be an elastic material. The values of temperatures from in situ measurements were used for the model calibration. This study allows explanation of the possible failure modes of asphaltic sealing. Numerical simulations were performed using the commercial software ANSYS.

Klíčová slova: asfaltobetonové těsnění, napjatost, vedení tepla, lokální poruchy pláště.

1. ÚVOD

Asfaltobetonové (AB) těsnění je jedním z často užívaných druhů návodního těsnění sypaných hrází a přehrad, zejména pak horních nádrží přečerpávacích vodních elektráren. Svrchní vrstva AB pláště je často namáhána extrémním zatížením v podobě značných výkyvů teploty, které jsou zapříčiněny řadou faktorů. V létě je tmavý povrch AB pláště během dne ohříván na relativně vysokou teplotu přesahující až 60 °C. Takto prohřátý AB plášť je pak rychle ochlazen vodou z nádrže při kolísání hladiny. Během zimních měsíců je povrch AB pláště za chladných, ale slunečných dnů, rozehríván a v noci pak vystaven záporným teplotám. Tepelné namáhání může přispívat ke vzniku popř. být jednou z možných příčin bodových poruch AB pláště, které se projevují tvorbou puchýřů (obr. 1).



Obr. 1: Porucha asfaltbetonového těsnění (fotoarchiv M. Špano)

Nejstarší dochované zmínky o prvních primitivních AB pláštích jsou v publikacích uváděny cca 1300 let před Kristem. Počátek moderní historie užívání asfaltbetonu se datuje do roku 1910, kdy byl AB použitý pro těsnění přehrady Central ve Spojených státech. Periodicky se otázkám (tzv. Questions) zaměřených na problematiku AB plášťů věnují mezinárodní přehradářské kongresy ICOLD, poznatky jsou shrnuty např. ve sbornících [1] a [2] z let 1973 a 1991. Jedná se o poměrně rozsáhlé publikace, které obsahují informace o návrhu, výstavbě, provozu a rekonstrukci souvisejících vodních děl. Souhrnně uvádí poznatky v dané problematice provádění AB těsnění Bulletin 114 ICOLDu z roku 1999 [3], který uvádí mimo základních typů uspořádání a řešení AB těsnění možné problémy vznikající během provozu. Rozsáhlá publikace [4] uvádí cenné informace přímo související s tvorbou puchýřů v AB pláštích.

V České republice se navrhování, provádění a zkoušení návodního těsnění z asfaltového betonu u sypaných přehradních hrází a nádrží řídilo do roku 2010 normou [5], která byla nahrazena normou [8]. Často je taktéž ve světě užívána německý metodický pokyn [6].

2. CÍLE

Cílem této studie bylo modelové ověření průběhu teplot a napětí v jednoplášťovém AB těsnění při definovaných zatěžovacích stavech. Pro splnění tohoto cíle bylo užito dvojice modelů - vedení tepla a napjatosti. Součástí řešení byla rešerše materiálových vlastností a kalibrace modelu vedení tepla.

3. METODA ŘEŠENÍ

Pro popis chování AB pláště při zatížení byly vytvořeny dva samostatné modely. Nejdříve byla vyřešena úloha vedení tepla, které vyvolá v AB plášti tepelné zatížení. To bylo vstupem do modelu napjatosti.

3.1. Model vedení tepla

Předpoklady modelu

Předpokládá se, že vedení tepla probíhá pouze ve směru kolmém na vrstvy AB pláště v důsledku gradientu teploty uvnitř a vně konstrukce. Obecně by tedy postačil jednodimenzionální model vedení tepla. V našem případě byla náhradní oblast popsána modelem (1) ve třech dimenzích (3D), aby mohla být data z modelu vedení tepla přímo transformována do modelu napjatosti a přetvoření. Jednotlivé vrstvy AB pláště jsou uvažovány jako homogenní a izotropní s prostorově konstantními materiálovými charakteristikami. Uspořádání vrstev a tvar náhradní oblasti je zobrazen na obr. 2. Okrajová podmínka na horním líci pláště vycházela z naměřeného průběhu teplot na AB plášti (2), v hrázi v hloubce 1 m pod pláštěm byl uvažován nulový tepelný tok (3), teplota tedy může v této hloubce kolísat.

Řídící rovnice a okrajové podmínky

Pro řešení byla použita rovnice vedení tepla ve tvaru:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

kde T je teplota, λ je tepelná vodivost, c je specifické teplo, ρ je hustota a t je čas.

Okrajové podmínky jsou pro jednotlivé části hranice následující:

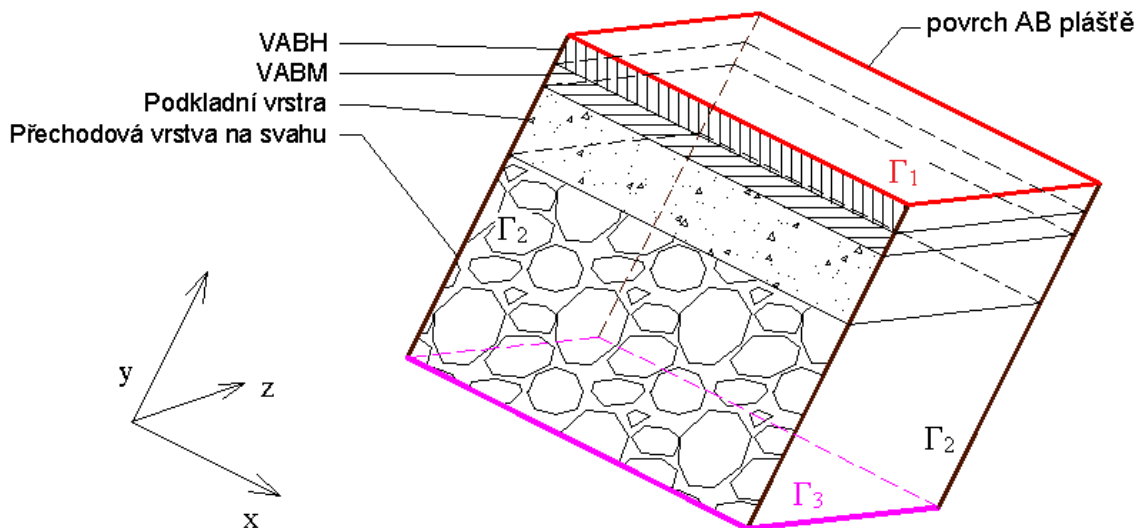
1. druhu pro Γ_1 - Dirichletova - známá teplota:

$$T(t)/\Gamma_1 = \bar{T}(t), \quad (2)$$

2. druhu pro Γ_2 - Neumannova - nulový tepelný tok:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = 0, \quad (3)$$

kde n_x , n_y a n_z jsou směrnice normálových vektorů k hranici Γ_2 .



Obr. 2: Schéma náhradní oblasti modelu vedení tepla

Numerické řešení

Pro numerické řešení bylo užito implicitní integrační metody v programu ANSYS. Diskretizace náhradní oblasti byla provedena metodou konečných prvků. Pro řešení bylo užito izoparametrického šestistěnu (dvanáctihranu) s trilineární aproximací hledané veličiny (teploty).

3.2. Model tepelné napjatosti

Předpoklady modelu

Vzhledem k prostorovému charakteru poruchy (puchýřek) se předpokládá trojrozměrný model (3) až (11). Jednotlivé vrstvy materiálů jsou homogenní a izotropní s prostorově konstantními materiálovými charakteristikami. Uspořádání vrstev a tvar náhradní oblasti je zobrazen na obrázku 3. Ve vrstvě hutného asfaltobetonu (VABH) byla v hloubce 6 cm pod povrchem AB pláště umístěna dutina reprezentující počáteční skrytou poruchu v plášti. Okrajovými podmínkami jsou neposuvné uchycení uvnitř hráze (hranice Γ_3), a uchycení posuvné pouze ve směru kolmém na rovinu AB pláště (hranice Γ_2). Počáteční podmínkou jsou nulové posuny ve všech místech náhradní oblasti. Zatížení je vyvoláno změnami teploty. Asfaltobeton je materiál, který se přetváří pružně-plasticky, má složité reologické a viskózní vlastnosti [7]. Jejich stanovení je v současné době předmětem laboratorních výzkumů. Pro vytvoření předběžného názoru na chování AB pláště zatíženého teplotou byl v první fázi prezentované v tomto článku použit model pružné látky. Uvedené výsledky mají proto pouze kvalitativní význam, skutečné hodnoty napětí a přetvoření budou kvantitativně jiné.

Řídící rovnice a okrajové podmínky

Pro řešení byla užita následující rovnice přetvoření:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}, \quad (4)$$

kde $\{\sigma\}$ je vektor napětí, $[D]$ je matice pružnosti a $\{\varepsilon\}$ je vektor celkových přetvoření. E je modul pružnosti (obecně modul tuhosti), μ je Poissonovo číslo a G je smykový modul.

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T, \quad (5)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} E & \frac{E}{\mu} & \frac{E}{\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{\mu} & E & \frac{E}{\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{\mu} & \frac{E}{\mu} & E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T, \quad (7)$$

Celkové poměrné přetvoření je definováno následovně:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{el}\} + \{\varepsilon^{th}\}, \quad (8)$$

kde $\{\varepsilon^{el}\}$ je přetvoření způsobené vnějším zatížením a $\{\varepsilon^{th}\}$ je přetvoření od změny teploty. Teplotní přetvoření je definováno následovně:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha \quad \alpha \quad \alpha \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad (9)$$

kde ΔT udává změnu teploty a α je teplotní roztažnost.

Okrajové podmínky jsou následující:

Na hranicích Γ_2 jsou předepsány nulové posuny ve směrech kolmých k hranici Γ_2 :

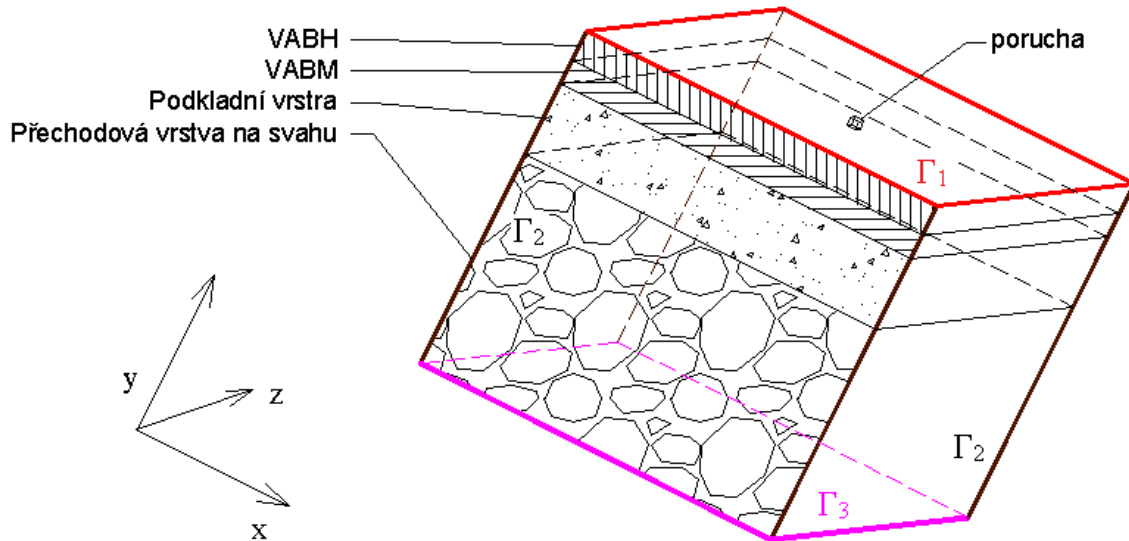
$$u n_x + v n_y + w n_z = 0, \quad (10)$$

kde n_x , n_y a n_z jsou směrnice normálových vektorů k hranici Γ_2 .

Na hranici Γ_3 jsou předepsány nulové posuny ve všech směrech:

$$u/\Gamma_3 = v/\Gamma_3 = w/\Gamma_3 = 0, \quad (11)$$

kde u , v , w jsou posuny ve směrech os x , y a z .



Obr. 3: Schéma náhradní oblasti modelu napjatosti

Numerické řešení

Pro numerické řešení bylo užito softwaru ANSYS. Diskretizace náhradní oblasti byla provedena metodou konečných prvků. Pro řešení bylo užito formálně shodného elementu jako u úlohy vedení tepla.

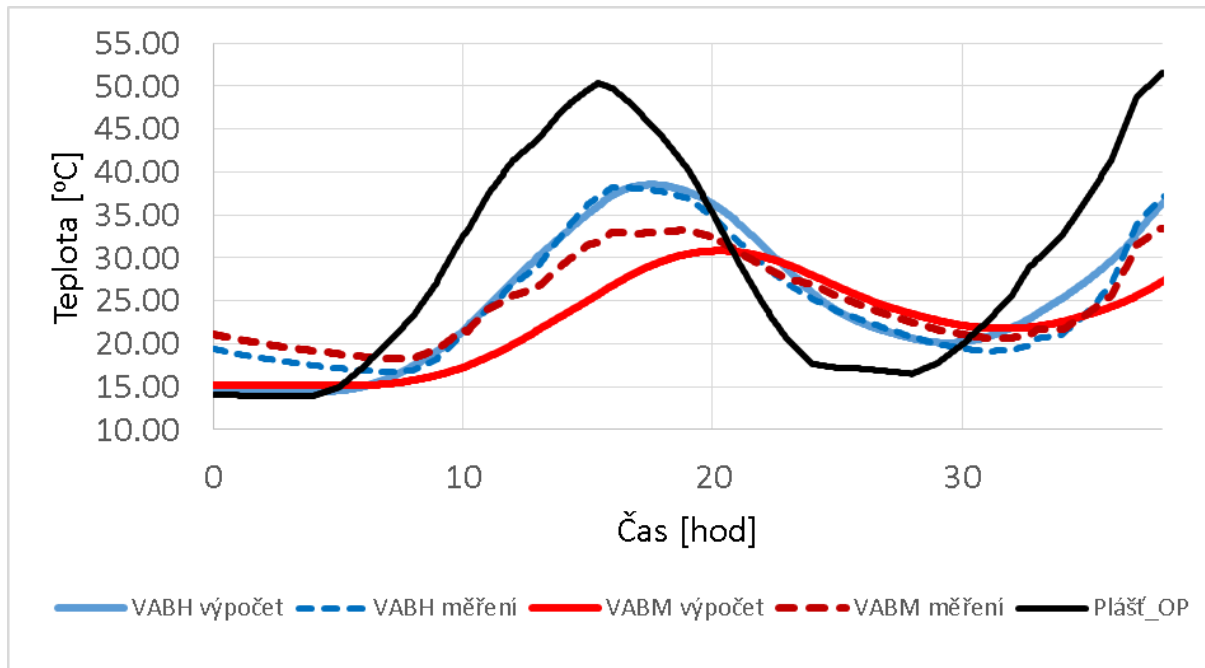
4. VSTUPNÍ DATA

Pro modely bylo nutné zajistit potřebné vstupy. To bylo do určité míry obtížné, protože vlastnosti asfaltobetonových směsí jsou závislé nejenom na jejich složení a kvalitě složek, ale podstatně se mění i s teplotou. Pro model vedení tepla byly na základě dostupných podkladů zvoleny parametry uvedené v tabulce 1. Uvedené vlastnosti byly ověřeny kalibrací modelu, využívající naměřené hodnoty teplot na povrchu pláště a v hloubce 80 mm a 180 mm pod jeho povrchem. Výsledky kalibrace modelu jsou uvedeny na obr. 4. Z obrázku je patrné, že bylo dosaženo přijatelné shody mezi naměřenými a vypočtenými teplotami. Určité rozdíly jsou dány nestejnou tloušťkou jednotlivých vrstev AB pláště, nepřesností při měření teplot čidly a také chybou danou časoprostorovou diskretizací numerického modelu.

Tab. 1 Vlastnosti použité při modelování vedení tepla

Vrstva	Tloušťka d	Tepelná vodivost λ	Měrná tepelná kapacita c	Objemová hmotnost ρ
	[mm]	[W/m/K]	[J/kg/K]	[kg/m ³]
VABH (včetně mastixu)	80	1,17 (1,40)*	930	2409
VABM	70	1,27 (1,80)*	942	2154
Podkladní vrstva	250	2,49 (2,50)*	1200	1960
Vyrovnávací vrstva	600	2,00 (2,50)*	1200	1960

* čísla v závorkách jsou hodnoty potvrzené kalibrací



Obr. 4: Výsledky kalibrace modelu vedení tepla

Pro řešení úlohy napjatosti a přetvoření byly z dostupných literárních pramenů a také laboratorních zkoušek stanoveny fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev AB pláště (tab. 2). Pro jejich ověření nebyly bohužel k dispozici potřebné kalibrační údaje.

Tab. 2 Vlastnosti použité při modelování napjatosti

Vrstva	Modul pružnosti E	Poissonovo číslo μ	Tepelná roztažnost α
	[GPa]	[-]	[1/K]
VABH (včetně mastixu)	10,02 (-5 °C) 7,05 (10 °C) 5,93 (15 °C)	0,32	$8,1 \cdot 10^{-6}$
VABM	3,60 (25 °C) 0,96 (40 °C)		
Podkladní vrstva	0,6	0,2	$1 \cdot 10^{-5}$
Vyrovnávací vrstva	0,6	0,2	$1 \cdot 10^{-6}$

5. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

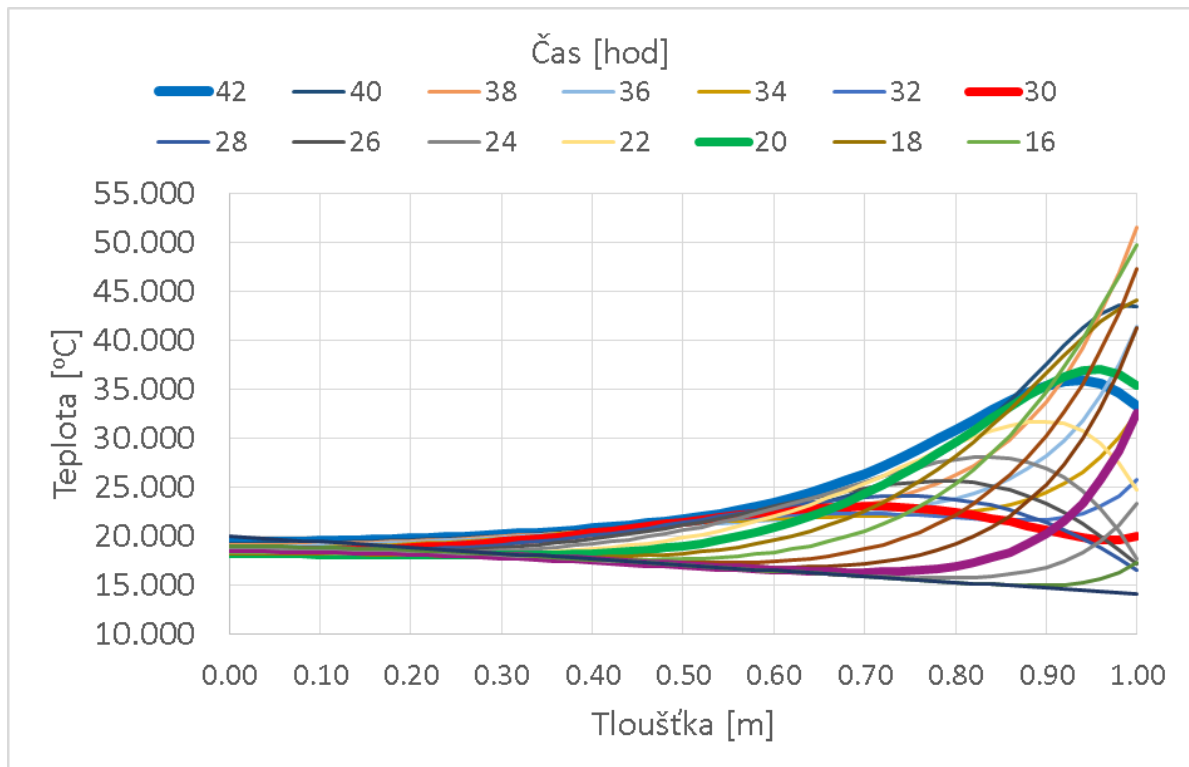
5.1 Vedení tepla

Prvním krokem při modelování vedení tepla byla kalibrace modelu (kapitola 4). Pro vlastní simulace byly vybrány tři scénáře s pracovními názvy "letní", "podzimní" a "zimní". Řešení zahrnuje ve všech variantách období 2,5 dne. Ukázka výsledku "letní" varianty je na obr. 5.

Výsledky modelových výpočtů ukázaly následující skutečnosti:

- Při oslunění dochází k prohřátí AB pláště v celé jeho tloušťce až do podkladní vrstvy.
- V rámci denního cyklu se teplota v hrázi ustálí zhruba v hloubce 0,8 m s kolísáním cca $\pm 1,5$ °C (obr. 5). V rámci sezónních fluktuací venkovních teplot kolísá teplota cca 1,0 m pod povrchem pláště v závislosti na průměrné denní teplotě od 1 °C do 22 °C.
- Jak v letním, tak i v podzimním období jsou při ochlazování pláště vytvořeny podmínky pro kondenzaci vodních par v plášti (VABM i v VABH).

- V zimním období při mrazivých dnech dochází k úplnému promrznutí vrstev VABH i VABM, k možnému zamrznání kondenzované vody v pórech AB a k vytváření ledových vloček v obou AB vrstvách pláště.



Obr. 5: Průběh teplot při "letní" variantě (pořadnice tloušťky 1,0 m odpovídá povrchu AB pláště)

5.2 Tepelná napjatost

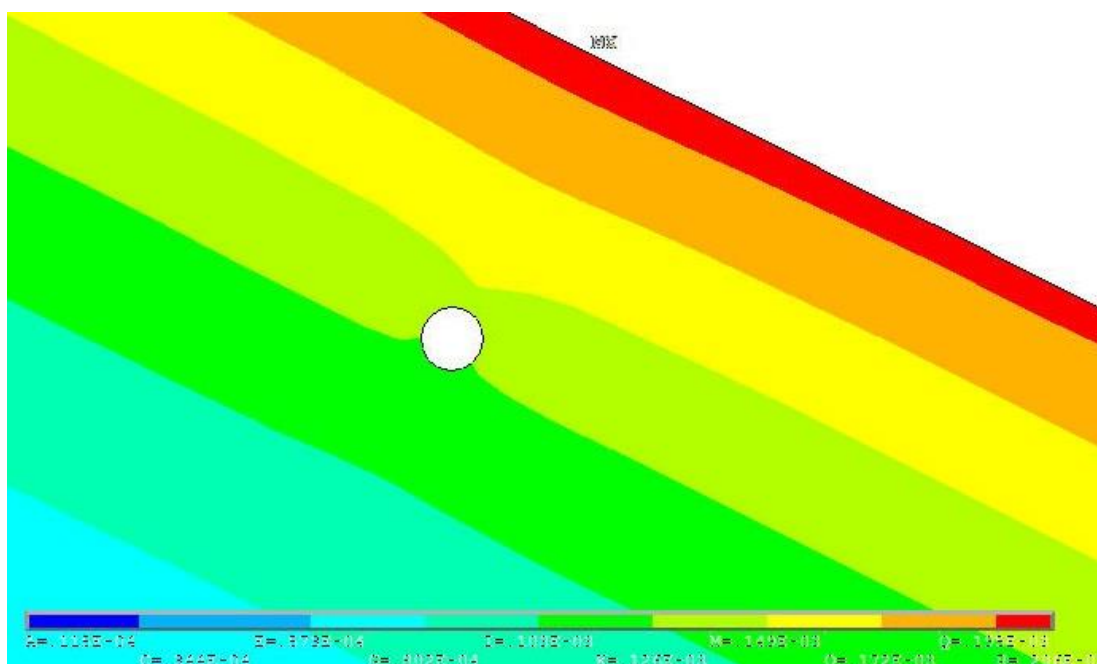
Výsledky řešení ukazují, že za předpokladu pružného materiálu vrstev AB pláště dochází k nárůstu tloušťky pláště z důvodu tepelné roztažnosti. Nárůst je dán superpozicí vlivu samotné objemové tepelné roztažnosti a příčného přetvoření v důsledku vzniklých normálových napětí v rovině AB pláště. Za předpokladu homogenního materiálu pláště a konstantní tloušťky jednotlivých vrstev pláště bez lokálních imperfekcí a dutin je zvětšení tloušťky pláště rovnoměrné - konstantní po celé ploše pláště.

V případě lokálních nerovnoměrností, popř. lokálních imperfekcí v podobě dutin vyplněných např. plyny (vodní párou), vzniká v místě imperfekce koncentrace napětí a deformace ve tvaru "vyboulení" povrchu pláště. Deformace pole celkových posunů kolem otvoru průměru 1 cm v hloubce 6 cm pod povrchem AB pláště je patrné z obr. 6. Míra deformace povrchu pláště závisí na řadě faktorů, kterými jsou mechanické (přetvárné) vlastnosti asfaltobetonu, umístění a velikost imperfekce (otvoru), velikost vnitřního tlaku v otvoru (např. tlak nasycených par, plynů, ledu, apod.), teplota a další.

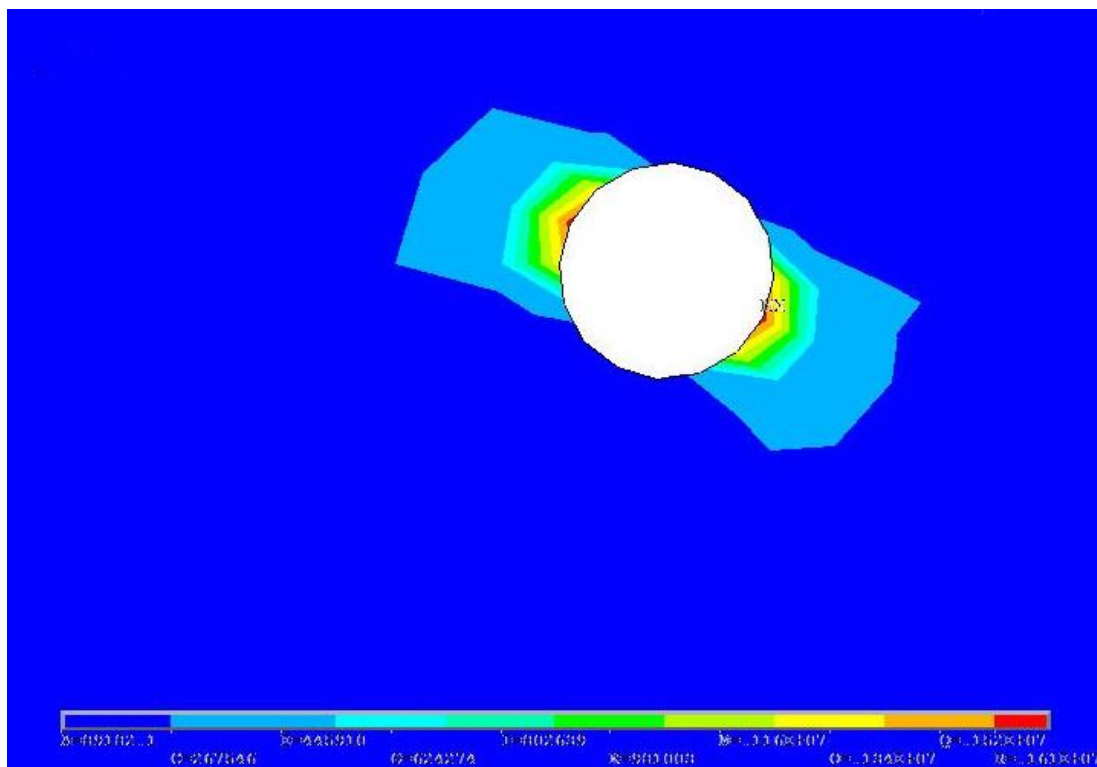
Současně dojde k vývoji tahových napětí na bočních stranách dutiny (v případě na obr. 7 s maximem cca 1 MPa). V případě vyšších teplot AB pláště (i více než 50°C), kdy klesá tahová pevnost asfaltobetonu až na cca 0,2 MPa, dojde ke vzniku trhlinek v okolí otvoru.

Na přečerpávacích vodních elektrárnách dochází ke stovkám cyklů teplotních změn ročně. Ty mohou postupně vyvolat zvětšování i velmi malých dutin na otvory velikosti 4 až 5 cm (obr. 8) s následným vznikem souvislých trhlin. Těmi se do dutin v AB plášti dostává voda z nádrže, která v zimním období zamrzá a vyvolá po určité době vznik otevřeného puchýřku

(obr. 1). Další vývoj bodové poruchy může způsobit lokální degradaci celé vrstvy těsnicí hutné vrstvy vodostavebního asfaltobetonu a postupné zvyšování průsaků AB pláštěm s nutností opravy porušeného místa.



Obr. 6: Deformace pole celkových posunů v okolí dutiny v AB plášti



Obr. 7: Charakter izolinií tahových napětí v okolí otvoru



Obr. 8: Odvrt z AB pláště se skrytou poruchou průměru 1,5 až 2 cm

6. ZÁVĚR

V článku je popsán model vedení tepla v asfaltbetonovém plášti přečerpávací vodní elektrárny. Na tento model navazuje řešení tepelné napjatosti v AB plášti za předpokladu pružného chování asfaltbetonu. Toto řešení je značně schematizované vzhledem ke skutečnému pružně-plastickému a viskóznímu, tepelně závislému chování asfaltbetonu. Výsledky řešení nicméně poskytují kvalitativní obraz o chování AB pláště při teplotním zatížení.

Ukazuje se, že při teplotních změnách dochází ke značnému prohřátí, resp. prochlazení obou vrstev AB pláště (mezerovité i hutné). V případě lokálních imperfekcí, např. drobných dutinek v plášti, dochází ke vzniku tepelné napjatosti v jejich okolí. Tahová napětí mohou při vyšších teplotách překročit tahovou pevnost asfaltbetonu, což může vést k propagaci dutin do okolního AB pláště. Při provozu nádrže, kdy je prohřátý plášť periodicky ochlazován při kolísání hladiny v nádrži a následně prohříván při jejím poklesu, dochází k postupnému zvětšování dutin vedoucím k vývoji skrytých a následně otevřených poruch.

Další výzkum problematiky směřuje k modelování tepelné napjatosti AB pláště s použitím přiléhavého materiálového modelu zohledňujícího skutečné pružně-plastické a vazko-pružně-plastické chování. Materiálový model musí vystihnout jak časový průběh pružných a plastických přetvoření, tak závislost přetvárných a pevnostních charakteristik na teplotě. Použití takového modelu vyžaduje rozsáhlý laboratorní a numerický výzkum zaměřený na kvantifikaci uvedených charakteristik.

SEZNAM LITERATURY

- [1] Eleventh International Congress on large dams, Volume III, Questions N° 42-43 – Madrid 1973, La Chapelle Montligeon, 1973.
- [2] Seventeenth International Congress on large dams, Volume 2, Questions N° 65 – Vienna 1991, La Chapelle Montligeon, 1991.
- [3] Bulletin No. 114 Embankment dams with bitumenous concrete facing, Review and recommendations, ICOLD, s. 144, ISSN 0534-8293, Paříž, 1999.
- [4] The Shell Bitumen Hydraulics Engineering Handbook, Shell International Petroleum Company Ltd, Shell Centre London, SE1 7NA (CD ROM Version).
- [5] ČSN 736852 Asfaltobetonové plášt'ové těsnění.
- [6] Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (EAAW), 5. Ausgabe 2008, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.(DGGT).
- [7] Garba, G. Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixtures. Norwegian University of Science and Technology, DCTE, Trondheim, 2002.
- [8] ČSN 752020 Asfaltové vrstvy hydrotechnických staveb

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za podpory projektu „SUPMAT CZ.1.07./2.3.00/20.0111 – Podpora pracovníků center pokročilých stavebních materiálů“ a projektu specifického výzkumu FAST-J-14-2270 - Problematika tepelné napjatosti betonových přehrad.

AUTOŘI

Ing. Karel Adam

Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
Žižkova 17, Brno 602 00, Česká republika
e-mail: adam.k@fce.vutbr.cz

Doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
Žižkova 17, Brno 602 00, Česká republika
e-mail: jandora.j@fce.vutbr.cz

Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
Žižkova 17, Brno 602 00, Česká republika
e-mail: riha.j@fce.vutbr.cz

Ing. Miroslav Špano, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
Žižkova 17, Brno 602 00, Česká republika
e-mail: spano.m@fce.vutbr.cz