

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**ALEŠ MEZERA**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební  
Katedra betonových a zděných konstrukcí

# **Analýza vývoje teploty betonu při betonáži masivní konstrukce**

Vypracoval: **Aleš Mezera**  
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bílý Ph.D.**

Praha 2020

## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za odborného vedení vedoucího bakalářské práce. Dále prohlašuji, že použitá literatura a podkladové materiály jsou uvedeny na konci bakalářské práce v seznamu literatury.

V Praze, dne

.....

Aleš Mezera

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Mezera</u>	Jméno: <u>Aleš</u>	Osobní číslo: <u>468226</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Analýza vývoje teploty betonu při betonáži masivní konstrukce</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Analysis of concrete temperature development during concreting of massive construction</u>	
Pokyny pro vypracování: - Specifika betonáže masivních betonových konstrukcí - Popis řešené konstrukce a stanovení okrajových podmínek pro výpočty - Popis použitých metod a postupů - Vyhledání potřebných materiálových charakteristik pro numerickou analýzu - Sestavení numerického modelu - Analýza teplot v průběhu betonáže pomocí tohoto modelu	
Seznam doporučené literatury: - Bílý, P.: Úvod do problematiky betonu pro masivní konstrukce. Výzkumná zpráva. ČVUT v Praze, 2011. - Šmilauer, V. a kol: Využití úletových popílků pro betonáž masivních konstrukcí. BETON TKS 2/2014, s.60-65. - Teoretický manuál a tutoriály softwaru ATENA - Samostatně vyhledejte další vhodnou literaturu	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Petr Bílý, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>17.2.2020</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>17.5.2020</u> Údaj uveďte v souladu s datem
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího práce

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>18.2.2020</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Poděkování**

Mé poděkování patří rodině, která mě podporovala po celou dobu studia. Velké poděkování také patří vedoucímu této práce panu Ing. Petru Bílému, Ph.D. za jeho rady, pomoc, podporu, a hlavně za skvělý přístup a vedení během psaní této práce.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřená na problematiku betonáže masivních betonových konstrukcí. Cílem bylo stanovení optimálního záběru betonáže pro betonáž části předpjaté tlakové obálky jaderného reaktoru, aby nedocházelo k vysokému teplotnímu spádu a vysokému hydratačnímu teplu v betonu.

V první části této práce je pojednáno obecně o masivních betonových konstrukcích a jejich rizicích, které mohou při realizaci těchto konstrukcí vznikat.

Druhá část je zaměřena na výpočet teplot pro různá složení betonu. Pro modelování této úlohy byl použit software GiD, který je používán jako pre a post procesor pro numerické simulace. Výpočtová část byla provedena pomocí softwaru ATENA Science, vyvinutého českou firmou Červenka Consulting.

## **Klíčová slova**

Masivní konstrukce, beton, cement, teplotní gradient, hydratační teplo

## **Abstract**

The object of this study is focused on the issue of concreting massive concrete structures. The main goal was to determine the optimal advance of concreting for concreting a part of prestressed pressure vessel of the nuclear reactor, in order to avoid a high temperature gradient and high hydration heat in the concrete.

The first part of this study deals in general with massive concrete structures and their risks that may appear in the implementation of these structures.

The second part of this study is focused on the calculation of temperature for different concrete compositions. To model this task, GiD software was used, which is used as pre and post processor for numerical simulations. The computational part was performed using ATENA Science software, developed by the Czech company Červenka Consulting.

## **Key words**

Massive structures, concrete, cement, temperature gradient, hydration heat

## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Příklady masivních betonových konstrukcí .....	12
3	Rizika při betonáži .....	14
3.1	Teplotní spád v důsledku rozdílné rychlosti hydratace .....	14
3.2	Vysoká teplota jádrového betonu (hydratační teplo).....	15
3.3	Smršťování .....	16
3.4	Teplotní spád následkem klimatických jevů .....	16
4	Opatření proti vzniku poruch .....	17
4.1	Optimalizace návrhu betonové směsi .....	17
4.1.1	Cement .....	17
4.1.2	Vodní součinitel .....	18
4.1.3	Kamenivo .....	18
5	Rovnice vedení tepla .....	19
5.1	Parciální diferenciální rovnice.....	19
5.2	Analytické řešení .....	20
5.3	Okrajové podmínky PDR .....	20
6	Teplotní analýza (software ATENA) .....	22
6.1	Numerické řešení pomocí prostorové diskretizace.....	24
6.2	Numerické řešení pomocí časové diskretizace .....	27
6.2.1	Crank – Nicholsonova metoda .....	28
6.2.2	Adams – Bashforthova metoda .....	29
6.3	Vstupní parametry pro teplotní analýzu .....	30
6.4	Vstupní parametry pro okrajové podmínky ATENA Science.....	32
6.4.1	Moisture Temperature Boundary for Surface .....	32
6.4.2	Fire Boundary for Surface.....	32
7	Analýza vývoje teploty při betonáži masivní konstrukce .....	33
7.1	Popis řešené konstrukce.....	33
7.2	Popis výpočetního modelu.....	34
7.3	Nomogram pro odhad maximální teploty v betonu.....	35
8	Beton z Jaderné elektrárny Temelín.....	36
8.1	Složení betonu z JE Temelín .....	36
8.2	Okrajové podmínky pro letní betonáž .....	38
8.3	Výsledné teploty pro letní betonáž .....	39
8.3.1	Stěna s maximální přípustnou výškou.....	39



8.3.2	Stěna vysoká 1500 mm .....	45
8.3.3	Stěna vysoká 2000 mm .....	47
8.4	Shrnutí výsledných výpočtů pro letní betonáž .....	50
8.5	Okrajové podmínky pro zimní betonáž .....	50
8.6	Výsledné teploty pro zimní betonáž .....	51
8.6.1	Stěna s maximální přípustnou výškou.....	51
8.6.2	Stěna vysoká 1500 mm .....	55
8.6.3	Stěna vysoká 2000 mm .....	57
8.7	Shrnutí výsledných výpočtů pro zimní betonáž .....	59
9	Beton z Jaderné elektrárny Civaux.....	60
9.1	Složení betonu z JE Civaux .....	60
9.2	Okrajové podmínky pro letní betonáž .....	62
9.3	Výsledné teploty pro letní betonáž .....	62
9.4	Shrnutí výsledných výpočtů pro letní betonáž .....	68
9.5	Okrajové podmínky pro zimní betonáž .....	69
9.6	Výsledné teploty pro zimní betonáž .....	69
9.6.1	Stěna s maximální přípustnou výškou.....	69
9.6.2	Stěna vysoká 2000 mm .....	74
9.7	Shrnutí výsledných výpočtů pro zimní betonáž .....	76
10	Globální shrnutí výpočtů.....	77
11	Závěr.....	79
12	Literatura .....	84



# 1 Úvod

Pojem masivní betonová konstrukce může být pro spoustu lidí označení takové konstrukce, která dosahuje extrémních rozměrů. Ovšem tato představa může být často mylná, protože masivní konstrukce nejsou pouze přehrady nebo velké základové konstrukce. S masivními konstrukcemi se lze setkat i u běžných konstrukcí. V tabulce 1 je uvedeno rozdělení masivních betonových konstrukcí.

Dopravní konstrukce	Trámy a podpory (opěry, pilíře) mostů
	Portály tunelů
Konstrukce pozemních staveb	Extrémně namáhané trámy a sloupy
	Komunikační jádra, Smykové stěny
Průmyslové konstrukce	Nádrže
	Ochranné zdi
Vodohospodářské konstrukce	Přehradní hráze
	Jezy
Geotechnické konstrukce	Plošné základy
	Velkopřůměrové piloty

*Tabulka 1 - Rozdělení masivních betonových konstrukcí*

Norma ČSN EN 1208 [1] definuje střední masivní konstrukce – tloušťka od 1 do 2 m, a masivní konstrukce – tloušťka větší než 2 m. ŘSD TKP 18 [2] definuje pojem masivní konstrukce, pokud tloušťka je větší než 0,6 m.

Obecně se uvažuje tloušťka kolem 1 m, ovšem nebezpečné mohou být konstrukce z hlediska vývinu hydratačního tepla již při tloušťce 0,6 m. Dle předpisů ACI (American Concrete Institute) je doporučeno na tenčí konstrukce nahlížet jako na masivní, pokud beton obsahuje urychlovače tuhnutí nebo tvrdnutí nebo více než 355 kg cementu a hydraulicky aktivních přísad na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi. U těchto směsí se teplo může uvolňovat daleko rychleji než u klasických betonových směsí.

## 2 Příklady masivních betonových konstrukcí

Masivní betonové konstrukce se navrhují, pokud ze statického hlediska nelze navrhnout konstrukci štíhlejší. Tyto konstrukce jsou poté odolnější na tlakové a ohybové zatížení, velká vlastní tíha zajišťuje stabilitu.

Největších rozměrů dosahují přehradní konstrukce. Rozlohou největší přehradní dílo v České republice je přehradní hráz Lipno, která byla postavena v letech 1952 až 1957. V koruně dosahuje šířka 10 m a v patě 130 m a délka hráze je 296 m.



Obrázek 1 - Hráz nádrže Lipno [9]

V dopravních stavbách představují masivní konstrukce např. podporové pilíře mostů. Na obrázku 2 jsou pilíře pro mostní estakádu nad železniční tratí v Nových Spořicích. Tento most je dlouhý 375 m o dvanácti polích při rozpětí 27 až 31 m. Dominantou pro tento most jsou stěnové pilíře s obloukovým rozšířením do hlavice.



Obrázek 2 - Stěnové pilíře [8]

Neodmyslitelnou část masivních konstrukcí tvoří vojenské stavby. Do této kategorie lze zahrnout podzemní kryty nebo bunkry. V České republice patří k nejznámějším stavbám tvrz Hanička v Orlických horách, která byla postavena v letech 1936 až 1938.



Obrázek 3 - Tvrz Hanička [10]

Masivní konstrukci představují také jaderné kontejnmenty, které slouží jako ochranná železobetonová obálka jaderného reaktoru. Nároky na tyto konstrukce jsou extrémní, betonáž takových konstrukcí vyžaduje správný návrh a realizaci, aby tyto stavby byly nepropustné a nevyskytovaly se v nich trhliny. V roce 2019 byla dokončena výstavba jaderného kontejnmentu 2. bloku Ostrověcké jaderné elektrárny (JE) v Bělorusku [7]. Vnější kupole je vysoká 15,6 m. Vnější průměr je 51,6 m. Tloušťka stěny z předpjatého betonu je 0,8 m a bylo spotřebováno přes 3000 m<sup>3</sup> speciálního betonu.



*Obrázek 4 - Kontejnment 2. bloku Ostrověcké JE, Bělorusko [7]*

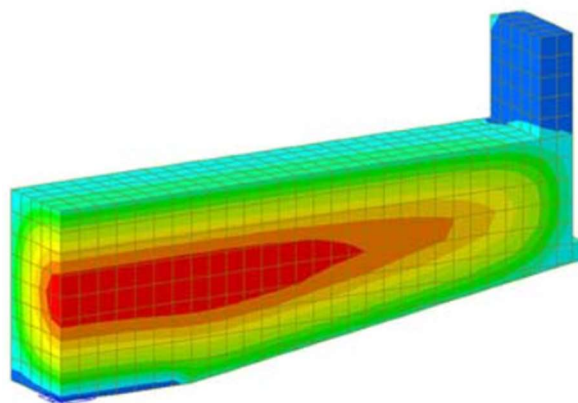
### 3 Rizika při betonáži

Obecně při betonáži masivních betonových konstrukcí hrozí vznik vysokých teplot uvnitř konstrukce, což vede ke snížení kvality betonu. Proto je zapotřebí zajistit nízké teploty v konstrukci a také nízký teplotní spád. Velké teplotní rozdíly během tuhnutí betonu způsobují tepelné napětí, které má negativní dopad zejména na dlouhodobou pevnost betonu a trvanlivost konstrukce. V této kapitole budou popsána jednotlivá rizika při realizaci masivních betonových konstrukcí.

#### 3.1 Teplotní spád v důsledku rozdílné rychlosti hydratace

Hydratace v cementu je exotermický proces (vznik tepla). Vývoj hydratačního tepla postihuje všechny betonové konstrukce. U běžných (nemasivních) konstrukcí však teplo přechází do vnějšího prostředí téměř stejnou rychlostí jako je vytvářeno, z tohoto důvodu nepředstavuje žádnou velkou komplikaci při návrhu a realizaci.

U masivních konstrukcí rozlišujeme obalový a jádrový beton. Obalový (chladný) beton je namáhán tahem, zatímco jádrový (teplejší) tlakem. Rozdíl těchto teplot  $\Delta T$  mezi nejteplejším a nejchladnějším místem konstrukce nazýváme teplotní spád (teplotní gradient). Tahovou deformaci obalového betonu lze vypočítat z následujícího vztahu:



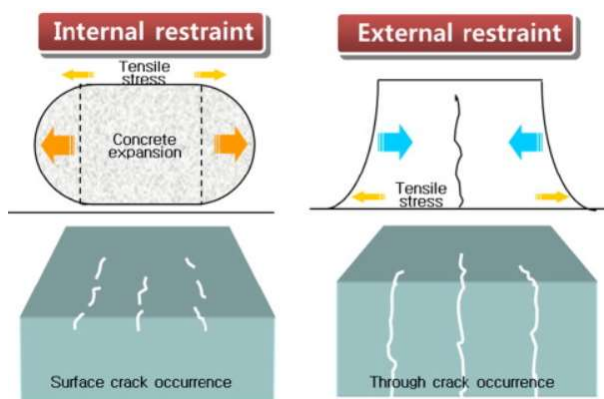
Obrázek 5 - Jádrový beton (červeně) a obalový beton (světle modře) [27]

$$\varepsilon(t) = \Delta T \alpha \quad (1)$$

kde  $\Delta T$  je teplotní gradient [K]

$\alpha$  je koeficient teplotní roztažnosti betonu  $\approx 10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]

Vznik této napjatosti uvnitř konstrukce je nejdůležitějším problémem pro masivní konstrukce. Při překročení okamžité tahové pevnosti vznikají hydratační trhliny. Tyto trhliny jsou rizikovou



Obrázek 6 - Hydratační trhliny způsobené vlivem napjatosti. Vlevo trhliny způsobené vnitřním pnutím, vpravo vnějším [3]

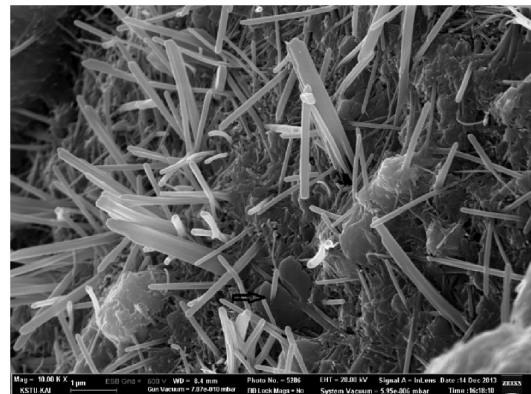
oblastí v betonu – umožňují přístup vody a oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>). Trhliny mohou snižovat únosnost, protože průřez s trhlinami není celistvý.

Nejčastěji je uváděna maximální hodnota teplotního spádu  $\Delta T=20$  °C, při této hodnotě dosahuje deformace hodnoty 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  a vznikají tak povrchové trhliny. Ovšem jde pouze o orientační hodnotu. Faktor ovlivňující vznik trhlin není pouze teplotní spád, ale také složení betonové směsi.

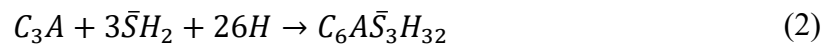
### 3.2 Vysoká teplota jádrového betonu (hydratační teplo)

Při hydrataci betonové směsi se nevyskytuje pouze problém teplotního spádu, ale také absolutní hodnoty teploty jádrového betonu.

Pokud v jádrové oblasti dojde k dosažení teploty okolo 70 °C, může později během životnosti konstrukce dojít v důsledku této teploty k opožděné tvorbě ettringitu (tzv. cementový bacil). Ettringit je hydratovaný sulfát označovaný v cementářské notaci zkratkou  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ . V ideálním případě se vytváří v počátcích hydratace cementu při reakci trikalciualuminátu se sádrou a vodou:



Obrázek 7 - Krystaly ettringitu [6]



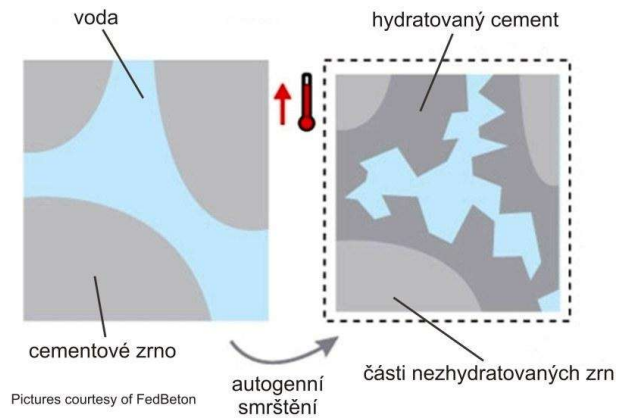
Ettringit v čerstvém betonu vystupuje jako regulátor tuhnutí cementu a nemá žádné vedlejší negativní účinky. Problém je, pokud ettringit začne vznikat už v zatvrdlém betonu po dlouhé době (měsíce, roky). Při vysoké teplotě v jádrovém betonu se ettringit vzniklý na začátku hydratace rozloží. V důsledku tohoto rozkladu se v betonu vyskytují síranové anionty a ty v kombinaci s vodou vytváří opět ettringit a dochází k opožděné tvorbě ettringitu. Při tomto procesu vznikají krystalizační tlaky v řádu desítek MPa. Tomuto napětí tahová pevnost betonu nemůže odolávat a vznikají trhliny.



Obrázek 8 - Železobeton poškozený opožděnou tvorbou ettringitu [5]

### 3.3 Smršťování

Smršťování se projevuje objemovou změnou betonu před hydratací a po hydrataci. V souvislosti s touto změnou v masivních konstrukcích mohou vznikat deformace a napětí od smršťování. Při autogenním smršťování dochází k jevu, kdy objem pojiva a vody před hydratací je větší než konečný objem ztvrdlého betonu. Důvodem této objemové změny je vznik hydratačního tepla během hydratace betonu. Druhou nedílnou částí je diferenční smršťování, které vzniká důsledkem různé rychlosti vysychání jádrového a obalového betonu.



Obrázek 9 – Princip autogenního smršťování [11]

### 3.4 Teplotní spád následkem klimatických jevů

Vliv na teplotní spád u betonových konstrukcí může mít i působení klimatických faktorů. Mezi tyto faktory můžeme zařadit působení slunce, deště nebo větru. Tyto faktory mají zanedbatelný vliv například pro základové konstrukce, které těmto faktorům prakticky nejsou vystavovány. Pro různé konstrukce je důležité zvážit, zda vliv těchto jevů je zanedbatelný či nikoliv. Z dlouhodobých hydrologických a meteorologických měření lze statisticky zpracovat údaje o průběhu extrémních teplot těchto klimatických jevů během roku v lokalitě stavby a následně určit průběhy teplot na určitých místech v konstrukci.



## 4 Opatření proti vzniku poruch

V předchozí kapitole byly popsány poruchy, které se mohou při realizaci vyskytnout. V této kapitole je popsáno, jak těmto problémům předcházet nebo je případně eliminovat.

### 4.1 Optimalizace návrhu betonové směsi

Optimalizace směsi je nejdůležitějším opatřením proti problémům popsaných v předchozí kapitole. Ostatní opatření vedou k větší pracnosti, nákladům a náročnosti technologického provedení. Máme několik možností, jak vylepšit betonovou směs – cement s malým množstvím uvolnění tepla při hydrataci, snížení vodního součinitele, použití hrubšího kameniva.

#### 4.1.1 Cement

Pokud navrhujeme masivní betonovou konstrukci, je potřeba použít cement, který při hydrataci uvolňuje co nejméně tepla. Podle normy ČSN EN 1208 [1] by se pro masivní konstrukce neměly používat cementy CEM I a CEM II R, nebo takové cementy, u kterých vývin hydratačního tepla během prvních 7 dní překročí hodnotu  $Q_h = 290$  kJ/kg. V normě ČSN EN 197-1 ed.2 [12] a ČSN EN 14216 - ed.2 [13] jsou specifikovány cementy s nízkým hydratačním teplem pod označením LH nebo VLH.

Z tabulky 2 je patrné, že se jedná zejména o cementy třídy III až IV – to jsou cementy: vysokopecní, pucolánové a směsné. Snížení hydratační teploty je dosaženo pomocí hydraulických příměsí (S – vysokopecní struska, V – popílký).

Druh cementu	Označení	Obsah slínku [%]	Obsah složky [%]	Typ složky	$Q_h$ [kJ/kg]
I. Portlandský	CEM I	100	-	-	330-380
II. Portlantský směsný	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	S	260-350
	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	S	
	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20	S,D,P,Q,V,W,T,L	
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35	S,P,Q,V,W,T,L	
III. Vysokopecní	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	S	250-290
	CEM III/B	20 - 34	66 - 80	S	
	CEM III/C	5 - 19	81 - 95	S	
IV. Pucolánový	CEM IV/A	65 - 89	11 - 35	D,P,Q,V	
	CEM IV/B	45 - 64	36 - 55	D,P,Q,V	
V. směsný	CEM V/A	82 - 70	18 - 30	S,P,Q,V	
	CEM V/B	50 - 70	30 - 50	S,P,Q,V	

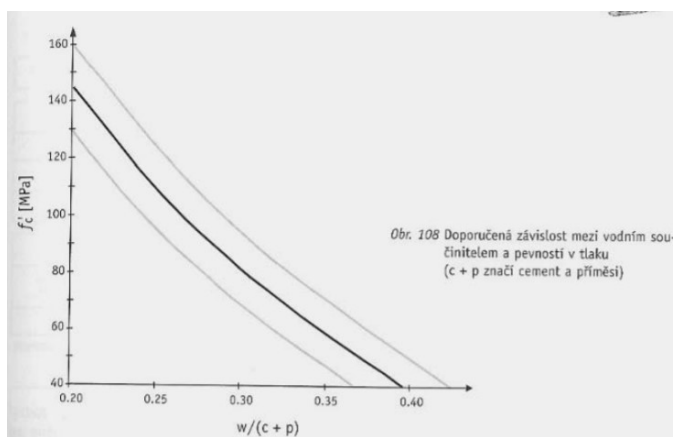
Tabulka 2 – Druhy a složení cementů dle normy [12]

Tuhnutí těchto směsí probíhá méně exotermicky. Výhoda těchto směsí spočívá v působení proti pozdnímu vzniku ettringitu. Betony těchto směsí mají nízkou počáteční pevnost, ale pevnost konečná může být vysoká. Tyto vlastnosti je nutné vyzkoušet na zkušebních vzorcích.

Tato technologie byla použita při betonáži základové desky budovy AZ Tower Brno s nadzemní výškou 111 m [15]. Jednalo se o desku o rozměrech 92,25 x 60,45 m o tloušťce 0,75 m pod výškovou budovou a 0,45 m v ostatních částech. Zde byl použit beton s příměsí úletového popílku. Použit byl beton pevnostní třídy C25/30 XA2 S3, v receptuře byla použita kombinace černouhelného popílku z elektrárny Dětmarovice v dávkování 80 kg/m<sup>3</sup> současně s jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou spolu s cementem CEM I 42,5 a plastifikační přísadou na bázi polykarboxylátu.

#### 4.1.2 Vodní součinitel

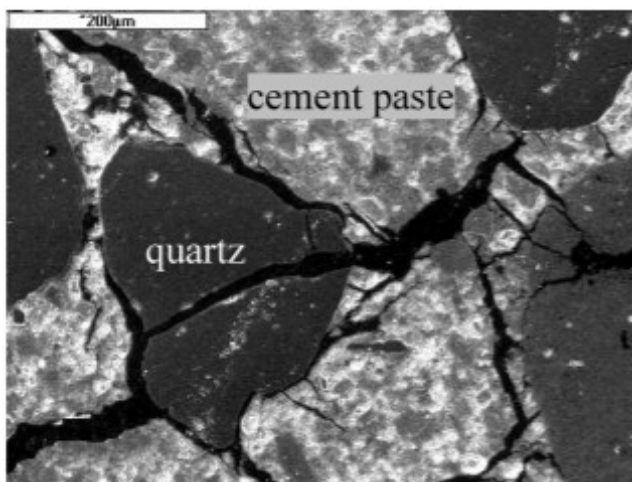
Vodní součinitel je podíl hmotnosti vody k hmotnosti cementu. Betonové směsi s nízkým vodním součinitelem vykazují lepší mechanické vlastnosti, mezi které patří – pevnost a modul pružnosti.



Obrázek 10 - Závislost mezi vodním součinitelem s pevností v tlaku [16]

#### 4.1.3 Kamenivo

Kamenivo tvoří 70 až 80 % objemu betonové směsi. Při ohřátí betonové směsi se zvětšuje objem kameniva i cementu, ovšem různou rychlostí vzhledem k rozdílným roztažnostem a tepelným vodivostem. V místě kontaktu cementu a kameniva dochází k poškození betonu a vznikají trhliny důsledkem rozdílných teplot. Na obrázku 11 lze vidět tyto trhliny na betonovém vzorku zahřátém na teplotu 600 °C.



Obrázek 11 - Trhliny v zahřátém betonu s pevností 75 MPa na 600 °C [17]

Jako preventivní opatření je vhodné použití hrubších a dobře zrněných kameniv.

## 5 Rovnice vedení tepla

Fyzikální obor termomechanika se zabývá vedením tepla v prostoru a čase (nestacionární úloha). Z poznatků o druhém termodynamickém zákoně se teplo šíří samovolně z místa s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší [19]. Tento děj vyrovnávání teplot v tělese se nazývá vedení tepla. V této kapitole bude tento problém obecně popsán.

### 5.1 Parciální diferenciální rovnice

Pro praktické inženýrské úlohy nelze provést pouze výpočet tepelného toku, ale je nutné znát kompletní tepelné pole daného objektu – rozložení izoterem a teplotních gradientů. Jako matematický operátor pro tyto úlohy slouží parciální diferenciální rovnice (PDR) vedení tepla.

Základní zákon vedení tepla popisuje Fourierův zákon:

$$\dot{q} = -\lambda \nabla t \quad (3)$$

kde  $\dot{q}$  – hustota tepelného toku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\lambda$  – tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$\nabla t$  – gradient teploty [ $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Pro homogenní 3D těleso s vnitřním generováním tepelné energie v kartézském souřadném systému rovnice vedení tepla má tvar [21]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

kde  $\rho_{(T)}$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$c_{(T)}$  – tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$T$  – teplota  $T=T(x,y,z,t)$  [K]

$t$  – čas [s]

Pro předpoklad konstantní tepelné vodivosti  $\lambda$  v celém tělese se rovnice 4 zjednoduší a zavádí se veličina teplotní vodivosti:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (5)$$

## 5.2 Analytické řešení

Tento postup řešení PDR lze využít pouze pro jednoduché geometrické modely se speciálními okrajovými podmínkami [20]. Jeden z příkladů takové úlohy je jednorozměrné vedení tepla na nekonečně velké desce s počáteční teplotou  $T_0$ , konečnou tloušťkou  $d$  a konstantními materiálovými vlastnostmi ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ) v prostředí s konstantní teplotou  $T_\infty$  se součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ . Řešení tohoto problému dle [18] pak vypadá následovně:

$$\frac{T(x, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\sin(\beta_i) e^{-\beta_i F_0}}{\beta_i + \sin(\beta_i) \cos(\beta_i)} \cos\left(\frac{\beta_i x}{d}\right) \quad (6)$$

kde  $\beta_i$  jsou kořeny transcendentních rovnic (to jsou rovnice, které obsahují proměnou v transcendentní funkci, kterou nelze vyjádřit polynomem. Mezi takové funkce patří logaritmické nebo exponenciální funkce.):

$$\tan(\beta) = \frac{B_i}{\beta} \quad (7)$$

$F_0$  je Fourierovo číslo (charakterizující přechodné vedení tepla):

$$F_0 = \frac{\lambda t}{d^2} \quad (8)$$

$B_i$  je podíl vnitřního a vnějšího termického odporu tzv. Biotovo číslo:

$$B_i = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (9)$$

V dnešní době se pro výpočty takových problémů využívá řešení pomocí numerických metod. Mezi nejvyužívanější metody patří metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných objemů (MKO). MKP je numerická metoda založená na diskretizaci spojitého kontinua na konečný počet prvků. Ale ani tyto softwarové výpočty nemusejí být správné, pokud se do nich nevloží správné okrajové podmínky (OP).

## 5.3 Okrajové podmínky PDR

OP jsou klíčovou záležitostí pro řešení většiny inženýrských problémů. Proto je dobré se na ně soustředit.

- Dirichletova okrajová podmínka popisuje hranici řešené oblasti  $\Gamma$ . Předepisuje teplotu  $T_\Gamma$  tělesa:

$$T(x, y, z, t) = T_\Gamma(t) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (10)$$

- Neumannova podmínka předepisuje na hranici  $i$  měrný tepelný tok  $\dot{q}_\Gamma$  hranicí  $\Gamma$ :

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = \dot{q}_r(t) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (11)$$

kde  $\vec{n}$  je vnější normála zkoumané plochy

Pro případ izolovaného tělesa je pravá strana rovnice 11 rovna nule.

- Newtonova podmínka popisuje proudění tekutiny na povrchu tělesa

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = U(T_\infty - T_r(t)) \quad \forall x, y, z \in \Gamma \quad (12)$$

kde  $T_\infty$  je teplota proudící kapaliny [K]

$U$  je součinitel prostupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

## 6 Teplotní analýza (software ATENA)

Chování masivních betonových konstrukcí závisí na vlhkosti a teplotních podmínkách. Software ATENA umožňuje vzít v úvahu též faktor dotvarování a historii vlhkosti a teploty. Díky těmto přesnějším výpočtům dokáže ATENA lépe předpovídat konkrétní chování modelované konstrukce. Pro výpočet transportní analýzy se používá modul nazvaný CCStructuresTransport. Statická analýza se zohledněním účinků smršťování a dotvarování se provádí v modulu CCStructuresCreep.

Transportní a statická analýza by měly být prováděny zároveň, ale šíření vlhkosti a tepla významně nezávisí na strukturálních deformacích. Proto oddělená analýza poskytuje dostatečně přesné výsledky.

Řídící rovnice pro přenos vlhkosti má tvar:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial(w_e + w_n)}{\partial t} = -div(J_w) \quad (13)$$

kde  $w$  je vodní součinitel v čase  $t$

$w_e$  je volný obsah vody

$w_n$  je fixní obsah vody

$J_w$  je vlhkostní tok [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$t$  je čas [s]

$div$  je divergenční operátor (objemová změna jednotkového objemu za jednotku času)

Vlhkostní tok se vypočítá jako:

$$J_w = -D_w \nabla w_e \quad (14)$$

kde  $D_w$  je tensor vlhkosti betonu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\nabla w_e$  je gradient vlhkosti

Vlhkostní tok lze vypočítat pomocí relativní vlhkosti:

$$J_w = -D_h \nabla h \quad (15)$$

kde  $D_h$  je tensor relativní vlhkosti betonu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\nabla h$  je gradient relativní vlhkosti

Přenos tepla je v softwaru ATENA definován rovnicí:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial(C_T(T - T_{ref}))}{\partial t} = C_T \frac{\partial T}{\partial t} = -div(J_T) \quad (16)$$

kde  $Q$  je množství energie na jednotku objemu [ $J \cdot m^{-3}$ ]

$C_T$  je tepelná kapacita [ $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ ]

$J_T$  je tepelný tok [ $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ]

Pokud potřebujeme do rovnice přidat hydratační teplo, rovnice vedení tepla bude mít následující tvar:

$$\frac{\partial(C_T(T - T_{ref} + Q_h))}{\partial t} = C_T \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial Q_h}{\partial t} = -div(J_T) \quad (17)$$

kde  $Q_h$  je hydratační teplo [ $J \cdot m^{-3}$ ]

Tepelný tok se vypočítá jako:

$$J_T = -K_T \nabla T \quad (18)$$

kde  $K_T$  je teplotní vodivost [ $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\nabla T$  je gradient teploty

Pro velké časové intervaly je možné zanedbat hydratační teplo, jeho dopad na velké časové úseky je malý. Ovšem nelze opomenout spotřebu vlhkosti při hydratačním procesu, přibližná spotřeba vody dle [23]:

$$w_h \approx 0,21c \left( \frac{t_e}{\tau_e + t_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

kde  $\tau_e = 23$  dní

$t_e$  odpovídá hydratačnímu času pro vodu o teplotě 25 °C

$c$  parametr závislí na množství cementu

Pokud se teplota pohybuje v rozmezí od 0 do 100 °C, parametr  $t_e$  se vypočítá:

$$t_e = \int \beta_h \beta_T dt \quad (20)$$

kde  $\beta_h$  a  $\beta_T$  jsou součinitele vlhkosti

$$\beta_h = \frac{1}{1 + (3,5 - 3,5 h)^4} \quad (21)$$

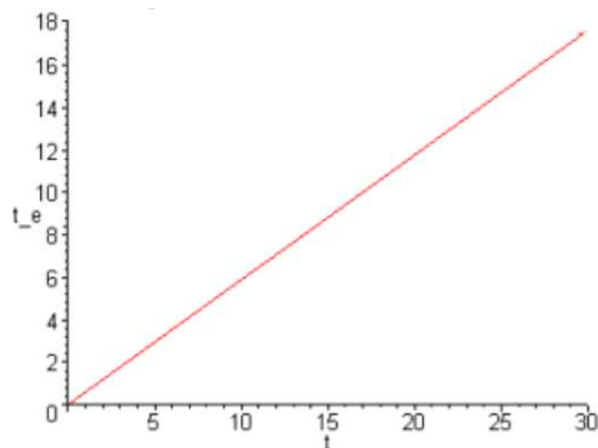
kde  $h$  je relativní vlhkost

$$\beta_T = \exp \left[ \frac{U_h}{R} \left( \frac{1}{\hat{T}_0} - \frac{1}{\hat{T}} \right) \right] \quad (22)$$

kde  $\frac{U_h}{R} = 2700$  K (podíl aktivní energie  $U_h$  a plynové konstanty  $R$ )

$\hat{T}_0$  je referenční teplota [K]

$\hat{T}$  je skutečná teplota v betonu [K]



Obrázek 12 - Graf závislosti času a hydratačního času pro  $T = 15$  °C a vlhkost 80 % [24]

## 6.1 Numerické řešení pomocí prostorové diskretizace

Pro inženýrské úlohy ATENA využívá MKP v prostoru. Výsledkem těchto výpočtů jsou nespojitě soubory nelineárních rovnic a ty jsou řešeny pomocí iterací. Pro nespojitě intervaly jsou levé části označovány  $LHS_h$ ,  $LHS_T$  (left-hand side) a popisují teplotu v závislosti na teplotní vodivosti. Pravé části jsou označovány  $RHS_h$ ,  $RHS_T$  (right-hand side) a nezahrnují divergenční operátory. Dolní index  $h$  je označení vlhkosti a dolní index  $T$  je označení pro teplotu.



$$LHS_h = \frac{\partial}{\partial t} (w + w_h) \quad (23)$$

$$LHS_T = C_T \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial Q_h}{\partial t} \quad (24)$$

$$\overline{RHS}_h = -\bar{J}_w = -\bar{J}_h \quad (25)$$

$$\overline{RHS}_T = -\bar{J}_T \quad (26)$$

Čára nad symbolem značí vektor. Pomocí divergenčního operátoru a znalostí rovnice 16 lze rovnice 24 a 26 sloučit do vztahu:

$$\overline{LHS}_T = \text{div}(\overline{RHS}_T) \quad (27)$$

Časová derivace vlhkosti se vypočítá následovně:

$$\frac{\partial w_h}{\partial t} = \frac{\partial w_h}{\partial t_e} \frac{\partial t_e}{\partial t} = \frac{\partial w_h}{\partial t_e} \beta_h \beta_T \quad (28)$$

Pro následující odvození předpokládáme diskretizaci neznámých proměnných následovně [25]:

$$h = \bar{N}^T \bar{h}; \quad \bar{\nabla} h = [\bar{\nabla} \bar{N}]^T \bar{h} \quad (29)$$

$$w = \bar{N}^T \bar{w}; \quad \bar{\nabla} w = [\bar{\nabla} \bar{N}]^T \bar{w} \quad (30)$$

$$T = \bar{N}^T \bar{T}; \quad \bar{\nabla} T = [\bar{\nabla} \bar{N}]^T \bar{T} \quad (31)$$

kde  $\bar{h}, \bar{w}, \bar{T}$  zastupují vektory příslušných proměnných, vektory mají  $n$  dimenzí, které jsou rovny počtu konečných uzlů.

$\bar{N}$  je vektor tvarových funkcí

$$[\bar{\nabla} \bar{N}]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Výsledná množina rovnic je řešena pomocí MKP (dle [26] jsou tvarové funkce použity jako funkce hmotnostní):

$$\int_V \bar{N} (LHS_h - \text{div}(\overline{RHS}_h)) dV = 0 \quad (33)$$

$$\int_V \bar{N} (LHS_T - \text{div}(\overline{RHS}_T)) dV = 0 \quad (34)$$

kde  $V$  je objem zkoumaného tělesa [ $\text{m}^3$ ]

Výše uvedené rovnice představují množinu rovnic s dimenzí rovnou počtu konečných uzlových bodů  $n$ . Vektory  $RHS$  jsou v těchto rovnicích skaláry.

Rovnice 33 a 34 jsou řešeny po částech, první část se vypočítá:

$$\begin{aligned} \int_V \bar{N}(LHS_h)dV &= \int_V \bar{N}(c_{hh}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + c_{hw}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + c_{hT}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + c_{h0})dV = \\ &= [cc_{hh}] \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + [cc_{hw}] \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \dots \bar{c}c_{h0} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \int_V \bar{N}(LHS_T)dV &= \int_V \bar{N}(c_{Th}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + c_{Tw}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + c_{TT}\bar{N}^T \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + c_{T0})dV = \\ &= [cc_{Th}] \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + [cc_{Tw}] \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \dots \bar{c}c_{T0} \end{aligned} \quad (36)$$

Prvky matice  $[cc]$  (tepelná kapacita) jsou vypočteny:

$$[cc_{hh}] = \int_V cc_{hh}\bar{N}\bar{N}^T dV; [cc_{hw}] = \int_V cc_{hw}\bar{N}\bar{N}^T dV; \dots \bar{c}c_{h0} = \int_V c_{h0}\bar{N}dV \quad (37)$$

$$[cc_{Th}] = \int_V cc_{Th}\bar{N}\bar{N}^T dV; [cc_{Tw}] = \int_V cc_{Tw}\bar{N}\bar{N}^T dV; \dots \bar{c}c_{T0} = \int_V c_{T0}\bar{N}dV \quad (38)$$

Druhá část integrace pro rovnice 33 a 34 využívá pro výpočet Greenův (křivkový) integrál:

$$\begin{aligned} \int_V \bar{N}(-div(\overline{RHS}_h))dV &= - \oint_S \bar{N}(\bar{n}_s^T \overline{RHS}_h)dS + \int_V [\bar{\nabla}N]\overline{RHS}_h dV = \\ &= - \oint_S \bar{N}\bar{n}_s^T ([k_{hh}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{h} + [k_{hw}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{w} + [k_{hT}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{T} + \bar{k}_{h0})dS + \\ &+ \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}]([k_{hh}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{h} + [k_{hw}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{w} + [k_{hT}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T \bar{T} + \bar{k}_{h0})dV \end{aligned} \quad (39)$$

kde  $S$  je strukturální povrch s definovanými OP  $[m^2]$

Pro případ vedení tepla lze odvodit podobně jako pro rovnice 37 a 38 zavedením prvků matic  $[kk]$  (tepelný tok):

$$[kk_{hh}] = \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}][k_{hh}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T dV \quad (40)$$

$$[kk_{hw}] = \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}][k_{hw}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T dV \quad (41)$$

$$\bar{k}k_{h0} = \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}]\bar{k}_{h0}dV \quad (42)$$

...

$$[kk_{TT}] = \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}][k_{TT}][\bar{\nabla}\bar{N}]^T dV \quad (43)$$

$$\bar{k}k_{T0} = \int_V [\bar{\nabla}\bar{N}]\bar{k}_{T0}dV \quad (44)$$

Stejným způsobem lze stanovit i hodnoty tepelných a vlhkostních toků. Maticový zápis pro složky deformací lze zapsat následovně:

$$[\bar{\nabla}\bar{u}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x} & \frac{\partial u_1}{\partial y} & \frac{\partial u_1}{\partial z} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x} & \frac{\partial u_2}{\partial y} & \frac{\partial u_2}{\partial z} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x} & \frac{\partial u_3}{\partial y} & \frac{\partial u_3}{\partial z} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial u_n}{\partial x} & \frac{\partial u_n}{\partial y} & \frac{\partial u_n}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (45)$$

## 6.2 Numerické řešení pomocí časové diskretizace

Řídící rovnice pro přenos tepla a vlhkosti lze zapsat:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}{}^{t+\Delta t}\underline{\psi} + {}^{t+\Delta t}\mathbf{C}\frac{\partial}{\partial t}({}^{t+\Delta t}\underline{\psi}) = {}^{t+\Delta t}\underline{J} \quad (46)$$

kde  ${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}$  a  ${}^{t+\Delta t}\mathbf{C}$  jsou nesymetrické matice příslušných prvků  $kk$  (tepelný tok) a  $cc$  (tepelná kapacita)

${}^{t+\Delta t}\underline{J}$  je vektor koncentrovaných uzlových toků

${}^{t+\Delta t}\underline{\psi}$  je vektor přírůstků

Modul CCStructureTransport podporuje integrační výpočty dle metod Crank – Nicholson a Adams – Bashforth. Metoda Crank – Nicholson je počítána lineárním integračním postupem prvního řádu a metoda Adams – Bashforth počítá integraci druhého řádu a měla by být přesnější.

### 6.2.1 Crank – Nicholsonova metoda

Tato metoda byla v polovině 20. století vyvinuta Johnem Crankem a Phyllis Nicholsonovou. V oblasti numerické analýzy se tato metoda konečných diferencí používá pro numerické řešení tepelných rovnic a PDR [28]. Čím menší je časový krok pro výpočet použitý, tím menší chyby se vyskytují ve výsledcích. Při výpočtech záleží na použití parametru  $\theta$ . Soustavy rovnic se poté řeší pro čas  $t+\Delta t$  a hledá se vektor neznámých proměnných, který se vypočítá jako lineární kombinace odpovídajících vektorů v čase  $t+\Delta t$ . Proto platí:

$${}^{t+\Delta t}\underline{\psi} = {}^{t+\Delta t}\underline{\psi}(1 - \theta) + {}^t\underline{\psi}\theta \quad (47)$$

Výsledky závisí na konkrétní hodnotě parametru  $\theta$ . Pro parametr  $\theta = 1$  dostaneme Eulerovo implicitní schéma, což je nejjednodušší metoda pro řešení obyčejných diferenciálních rovnic (ODR). Pro hodnotu  $\theta = 0,5$  dostáváme řešení v podobě lichoběžníkového Crank – Nicholsonova schématu. Pokud použijeme při výpočtu  $\theta = 2/3$ , výpočet probíhá Galerkinovou integrační metodou. Pro  $\theta = 0$  vede výpočet na Eulerovo explicitní schéma, které nemusí být vždy stabilním řešením.

Odhad řešení:

$${}^{t+\Delta t}\psi = {}^t\psi + \Delta t \frac{\partial {}^t\psi}{\partial t} \quad (48)$$

Opravné řešení:

$$\frac{\partial {}^{t+\Delta t}\psi}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} ({}^{t+\Delta t}\psi - {}^t\psi) \quad (49)$$

Po matematických úpravách lze odvodit vztahy pro matice  $\tilde{\mathbf{K}}$  a  $\tilde{\mathbf{j}}$ .

$$\tilde{\mathbf{K}} = \left( \mathbf{K}\theta + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{C} \right) \quad (50)$$

$$\tilde{\mathbf{j}} = \bar{\mathbf{j}} - \mathbf{K}(\theta {}^{t+\Delta t}\psi + (1 - \theta) {}^t\psi) - \mathbf{C} \frac{1}{\Delta t} ({}^{t+\Delta t}\psi - {}^t\psi) \quad (51)$$

$$\Delta\psi = (\tilde{\mathbf{K}})^{-1} \tilde{\mathbf{j}} \quad (52)$$

## 6.2.2 Adams – Bashforthova metoda

Adamsovy metody jsou založeny na aproximacích integrační proměnné s polynomem na časovém intervalu  $t+\Delta t$ . Explicitní metoda se nazývá Adams – Bashforthova metoda [29]. Pro odvození Adams – Bashforthova schématu lze použít převod derivací za pomoci polynomiální interpolace nebo pomocí Taylorova rozvoje pro dvoustupňovou Adams – Bashforthovu metodu.

Odhad řešení:

$${}^{t+\Delta t}\psi = {}^t\psi + \frac{\Delta t}{2} \left[ \left( 2 + \frac{\Delta t}{\Delta t_{prev}} \right) \frac{\partial {}^t\psi}{\partial t} - \frac{\Delta t}{\Delta t_{prev}} \frac{\partial {}^t\psi}{\partial t} \right] \quad (53)$$

kde index  $_{prev}$  označuje časové období před časem  $t$

Opravné řešení:

$$\frac{\partial {}^{t+\Delta t}\psi}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} ({}^{t+\Delta t}\psi - {}^t\psi) - \frac{\partial {}^t\psi}{\partial t} \quad (54)$$

$$\frac{\partial {}^t\psi}{\partial t} = \frac{\Delta t_{prev}}{\Delta t + \Delta t_{prev}} \left( \frac{{}^{t+\Delta t}\psi - {}^t\psi}{\Delta t} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta t + \Delta t_{prev}} \left( \frac{{}^t\psi - {}^t\psi_{prev}}{\Delta t_{prev}} \right) \quad (55)$$

Obdobně jako pro Crank – Nicholsonovu metodu:

$$\tilde{\mathbf{K}} = \Delta t_{n-1} (\mathbf{K} \Delta t_n (\Delta t_n + \Delta t_{n-1}) + \mathbf{C} (2\Delta t_n + \Delta t_{n-1})) \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{j}} = & -\mathbf{K} {}^{t+\Delta t}\psi ((\Delta t_n)^2 \Delta t_{n-1} + \Delta t_n (\Delta t_{n-1})^2) \\ & + \mathbf{C} (-{}^{t+\Delta t}\psi (2\Delta t_{n-1} \Delta t_n + (\Delta t_{n-1})^2) \\ & + {}^t\psi (2\Delta t_{n-1} \Delta t_n + (\Delta t_{n-1})^2 + (\Delta t_n)^2) - {}^{t-\Delta t}\psi (\Delta t_n)^2) \\ & + \mathbf{J} ((\Delta t_n)^2 \Delta t_{n-1} + \Delta t_n (\Delta t_{n-1})^2) \end{aligned} \quad (57)$$

$$\Delta \psi = (\tilde{\mathbf{K}})^{-1} \tilde{\mathbf{j}} \quad (58)$$

### 6.3 Vstupní parametry pro teplotní analýzu

Vstupní parametry pro všechny inženýrské úlohy patří k nejdůležitějším bodům pro řešení daných problémů. Obecně platí, že čím přesnější vstupní údaje jsou, tím přesnější výsledky z výpočtů získáme.

Pro analýzu softwarem ATENA Science je potřeba vytvoření modelu v softwaru GiD, který slouží jako pre a post procesor pro numerické simulace inženýrských úloh. Pro teplotní analýzu je nutné software GiD nastavit před vytvářením modelu na transportní analýzu.

Pro analýzu vývoje teploty budeme používat model CERHYD definovaný uživatelem. Tento model umožňuje uživateli zadávat vlastnosti vlhkosti a tepla, které se dají laboratorně změřit. Model CERHYD počítá transportní parametry (tepelná vodivost, tepelná kapacita) na základě konkrétního složení betonové směsi. Model také bere v úvahu hydratační proces při vytvrzování betonu, vývoj hydratačního tepla a trhlin pomocí nelineární analýzy vedení tepla a vlhkosti. Do tohoto modelu se ručně zadávají následující parametry:

#### Hmotnosti složek na 1 m<sup>3</sup> betonu

- CEMENT MASS – jednotková hmotnost cementu [kg]
- AGGREGATE MASS – jednotková hmotnost kameniva [kg]
- FILLER MASS – jednotková hmotnost příměsí [kg]

#### Objemové hmotnosti složek betonu

- CEMENT DENSITY – objemová hmotnost cementu [kg·m<sup>-3</sup>]
- AGGREGATE DENSITY – objemová hmotnost kameniva [kg·m<sup>-3</sup>]
- FILLER DENSITY – objemová hmotnost příměsí [kg·m<sup>-3</sup>]
- WATER DENSITY – objemová hmotnost vody [kg·m<sup>-3</sup>]

#### Měrné tepelné kapacity složek betonu

- C CEMENT TEMP TEMP – měrná tepelná kapacita cementu [J·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>]
- C AGGREGATE TEMP TEMP – měrná tepelná kapacita kameniva [J·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>]
- C FILLER TEMP TEMP – měrná tepelná kapacita příměsí [J·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>]
- C WATER TEMP TEMP – měrná tepelná kapacita vody [J·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>]

## Tepelné vodivosti složek betonu

- K CEMENT TEMP TEMP – tepelná vodivost cementu [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- K AGGREGATE TEMP TEMP – tepelná vodivost kameniva [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- K FILLER TEMP TEMP – tepelná vodivost příměsí [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- K WATER TEMP TEMP – tepelná vodivost vody [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- K AIR TEMP TEMP – tepelná vodivost okolního vzduchu [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

## Ostatní

- W F – množství vody v receptuře betonu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
- H80 – relativní vlhkost [-]
- W80 – nasycení vodou [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
- TEMP0 – parametr zohledňující výpočet tlaku nasycené vodní páry ( $T > 0\text{ °C}$ ) [K]
- A WV – parametr pro tlak nasycené vodní páry [-]
- A W – koeficient vodní nasákavosti [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$ ]
- MI WV – odpor proti šíření vodní páry [-]
- TEMP0 ICE – parametr zohledňující výpočet tlaku nasycení vodní páry ( $T < 0\text{ °C}$ ) [K]
- A WV ICE – parametr pro tlak nasycené vodní páry [-]
- B1, B2 – koeficienty popisující kinetiku hydratace [ $\text{h}^{-1}$ ], [-]
- ALPHAINF – konečný stupeň hydratace [-]
- ETA – koeficient prostupu volné vody zhydratovaným cementovým tmelem [-]
- A – materiálový parametr pro výpočet snížení kapilární vlhkosti [-]
- EA – aktivační energie [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]
- QH POT – potenciální hydratační teplo [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
- QW POT – potenciální spotřeba vlhkosti [-]

## 6.4 Vstupní parametry pro okrajové podmínky ATENA Science

V našem modelu budeme pracovat s OP nazvanými **Moisture Temperature Boundary for Surface** a **Fire Boundary for Surface**, které popisují hraniční teploty a vlhkosti pro povrchové plochy modelu. Tyto OP simulují okolní prostředí a jeho působení na model. Pro následující podmínky uživatel může vložit uvedené parametry:

### 6.4.1 Moisture Temperature Boundary for Surface

- Ambient Temperature – teplota okolního prostředí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- Humidity – relativní vlhkost okolního prostředí [-]
- Convection T – součinitel přestupu tepla na hranici [ $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
- Emissivity T – Emisivita (schopnost tělesa vyzařovat teplo) [-]
- EVAPORATION HEAT – skupenské teplo vypařováním vody [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
- Convection W – součinitel odvodu vlhkosti z povrchu vedením [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- EVAPORATION MOISTURE – součinitel odpařování vlhkosti z povrchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- AIR PRESSURE – tlak okolního vzduchu [Pa]
- AIR VELOCITY – průměrná rychlost proudění okolního vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

### 6.4.2 Fire Boundary for Surface

- Convection – součinitel přestupu tepla na hranici [ $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
- Emissivity – emisivita [-]
- Temperature Max – maximální teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- Temperature Min – minimální teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]



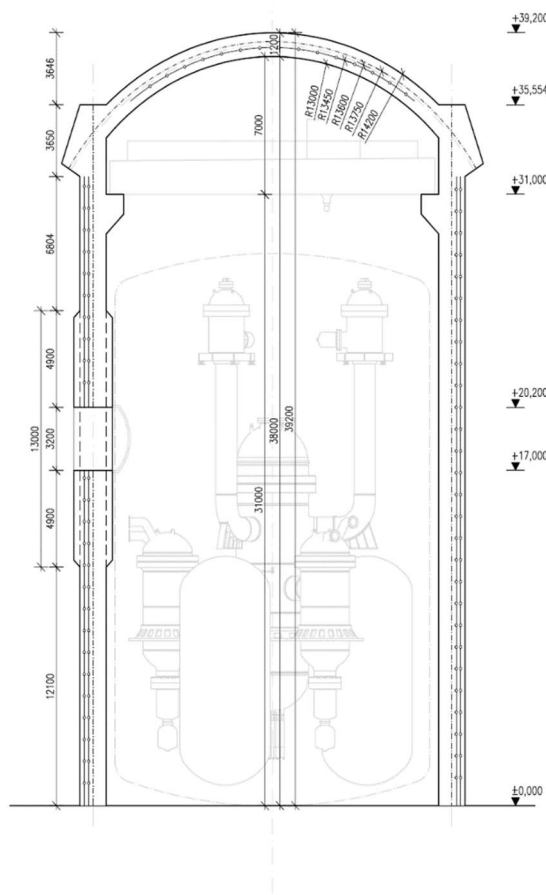
## 7 Analýza vývoje teploty při betonáži masivní konstrukce

### 7.1 Popis řešené konstrukce

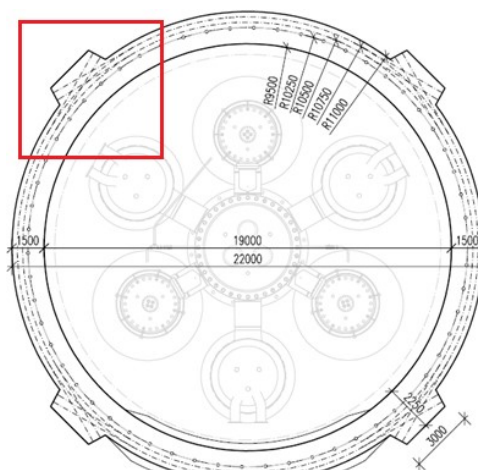
Řešená konstrukce v této práci se zabývá částí předpjaté tlakové obálky pro rychlý heliem chlazený reaktor z betonu běžné pevnosti s vnitřní ocelovou vystýlkou. Betonová stěna má tvar válce a kopule je ve tvaru kulového vrchlíku. Tato práce se zaměřuje na část obálky v místě paty kotevního žebra pro předpínací kabely, která je nejširším místem konstrukce. Autorem výkresů je Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Parametry konstrukce:

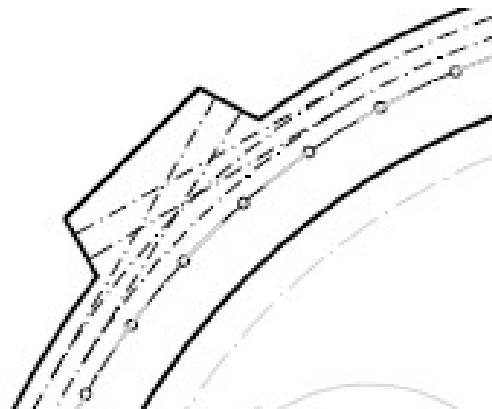
- Vnitřní průměr obálky  $D_{in} = 19000$  mm
- Vnitřní výška obálky  $H_{in} = 38000$  mm
- Vnitřní poloměr kopule  $R_d = 13000$  mm
- Tloušťka stěny obálky  $t_w = 1500$  mm
- Tloušťka kopule  $t_d = 1200$  mm
- Poloměr hlavního otvoru  $R_o = 16000$  mm



Obrázek 14 - Svislý řez tlakovou obálkou



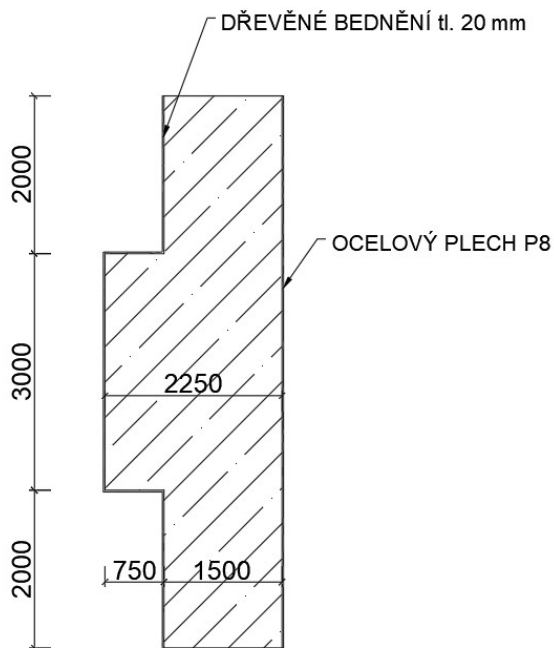
Obrázek 13 – Vodorovný řez tlakovou obálkou s vyznačením řešené oblasti



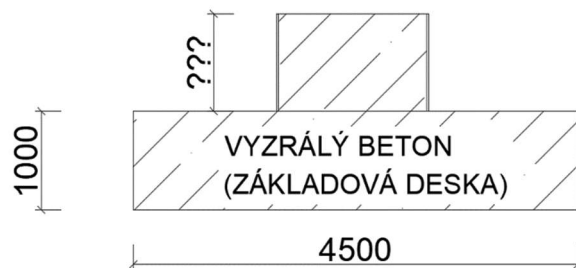
Obrázek 15 - Řešená oblast

## 7.2 Popis výpočetního modelu

Pro analýzu vývoje teploty při betonáži betonové obálky jaderného reaktoru nebude model zohledňovat půdorysné zaoblení, které na průběh teplot nemá vliv, ale bude modelován jako přímý úsek. Uvažovaná geometrie pro výpočetní model je vyznačena na obrázcích 16 a 17.



Obrázek 16 - Půdorys řešené oblasti



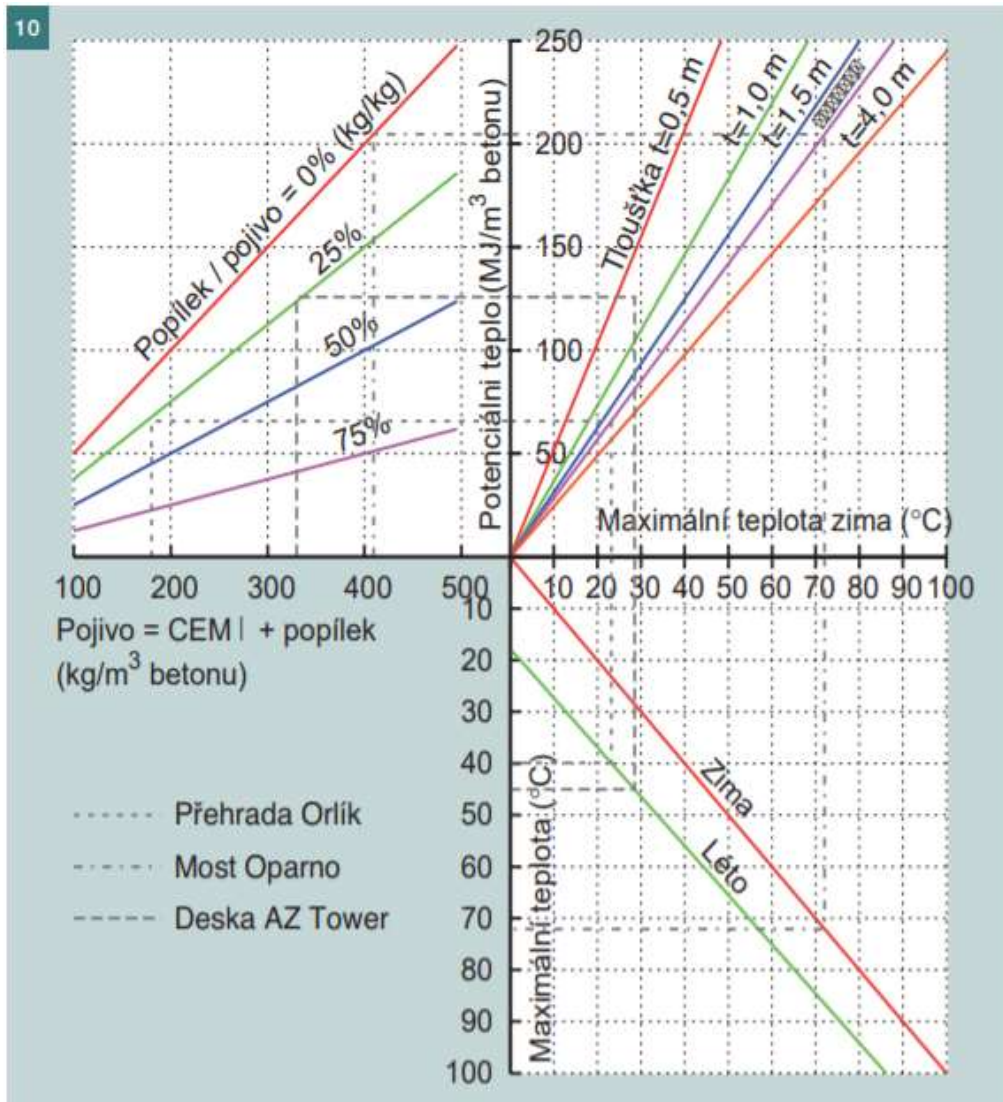
Obrázek 17 - Řez řešenou oblastí

Cílem výpočtu je určit maximální výšku záběru betonáže, při které teplota v konstrukci nepřesáhne 70 °C a teplotní spád bude maximálně 25 °C. Model bude vyzkoušen na dvě různá složení betonu. Základová deska bude modelována jako vyztužený beton, výřez desky bude odsazený metr od krajů obálky. Půdorysné rozměry základu jsou tedy 9 x 4,5 m a výška 1 m. Na základové desce nebude probíhat žádná hydratace. Základová deska bude mít teplotu shodnou s teplotou okolního prostředí a vlhkost 90 %.

Simulace betonáže budou provedeny pro letní a zimní období. Před výpočtem pomocí softwaru ATENA Science bude proveden odhad maximální teploty vzniklé uvnitř konstrukce pomocí nomogramu z práce [15].

### 7.3 Nomogram pro odhad maximální teploty v betonu

Na základě tohoto nomogramu z práce [15], budou pro každý model odhadnuty maximální teploty pro hrubé ověření finálních výsledků.



Obrázek 18 - Nomogram [15]

Pomocí regrese lze hodnoty z obr. 18 zapsat pomocí lineárních rovnic ve tvaru:

$$\text{Potenciální teplo} = 0,5 \cdot \text{Pojivo} \cdot \left(1 - \frac{\text{Popílek}}{\text{Pojivo}}\right) \quad (59)$$

$$\text{Max. teplota zima} = \frac{\text{Potenciální teplo}}{\text{koeficient závisící na tloušťce kce}} \quad (60)$$

$$\text{Max. teplota léto} = 0,954 \cdot \text{Max. teplota zima} + 17,8 \quad (61)$$

## 8 Beton z Jaderné elektrárny Temelín

### 8.1 Složení betonu z JE Temelín

Beton pevnostní třídy C40/50. Betonová směs je tvořena z portlandského cementu CEM I 32,5R, kamenivo tvoří žula a pískovec. Stanovení váženého průměru objemové hmotnosti složky kameniva je vypočítáno v rovnici 62. V jednom kubíku betonové směsi je 710 kg pískovce a 990 kg žuly. Objemová hmotnost pískovce –  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , objemová hmotnost žuly –  $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hodnoty objemových hmotností viz. [33] str. 34, Tab. 6.4

Materiálová charakteristika	Hodnota	Zdroj hodnoty
CEMENT MASS [kg]	499	[30]
AGGREGATE MASS [kg]	1700	[30]
FILLER MASS [kg]	0	-
CEMENT DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3110	[32]
WATER DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1000	-
AGGREGATE DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2575	-
FILLER DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2200	-
C AGGREGATE TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2130000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
C FILLER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2200000	-
C CEMENT TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2420000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
C WATER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	4180000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
WF [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	215	[30]
H80 [-]	0,8	[24] str. 283
W80 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	80	[24] str. 284
K AGGREGATE TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	2	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K FILLER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1,2	-
K CEMENT TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1,55	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K WATER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,604	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K AIR TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,026	[34]
TEMP0 ( $T > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [K]	234,18	[24] str. 283
A WV [-]	17,08	[24] str. 283
A W [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$ ]	0,6	[24] str. 284
MI WV [-]	235	[24] str. 284
TEMP0 ICE ( $T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [K]	272,44	[24] str. 283
A WV ICE [-]	22,44	[24] str. 283
B1 [ $\text{h}^{-1}$ ]	0,5846	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
B2 [-]	0,0014	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
ALPHAINF [-]	0,85	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
ETA $\eta$ [-]	7	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
A [-]	7,5	[24] str. 283
EA [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	38300	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
QH POT [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	471150	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
QW POT [-]	0,24	[31]
TEMPERATURE CONST [ $^\circ\text{C}$ ]	15	-
HUMIDITY CONST [-]	0,9728	Defaultní hodnota ATENA

Tabulka 3 - Vstupní parametry modelu CERHYD pro beton z JE Temelín

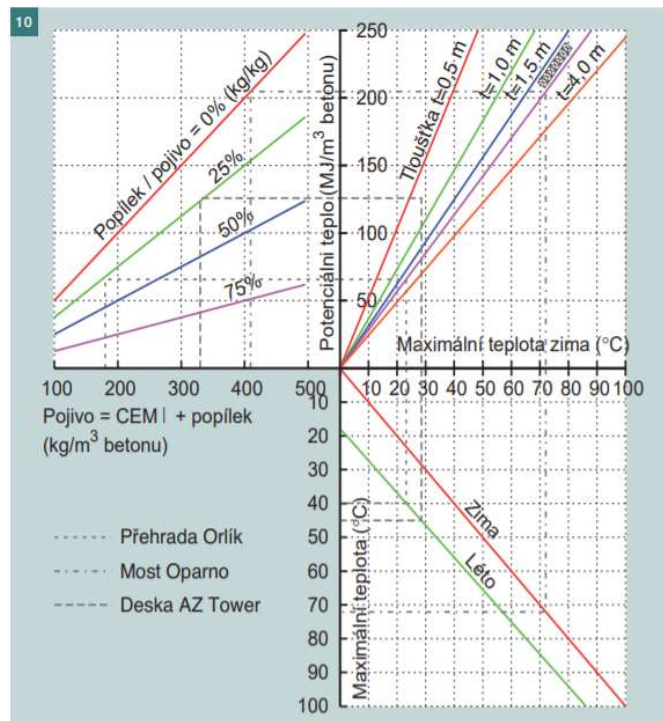
Stanovení objemové hmotnosti kameniva:

$$\frac{710 \cdot 2400 + 990 \cdot 2700}{710 + 990} = 2575 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (62)$$

Typ složky	Jednotkové množství [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
Kamenivo – písekovec	710
Kamenivo – žula	990
Cement CEM I 32,5 R	499
Voda	215

Tabulka 4 - Základní složení betonu z JE Temelín [30]

Pro stanovení maximální teploty pro beton z JE Temelín za pomoci nomogramu z práce [15] bude jednotková hmotnost cementu v betonu redukována na 80 %. Nomogram je stanoven pro cement CEM I 42,5 R, v našem betonu je ovšem CEM I 32,5 R. U tohoto cementu lze předpokládat vývoj hydratačního tepla a špičkové teploty přibližně o 20 – 25 % nižší než u cementu CEM I 42,5 R. Uvažovaná hodnota jednotkové hmotnosti pro orientační stanovení špičkové teploty z nomogramu je tedy  $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .



Obrázek 19 – Nomogram [15]

V našem betonu nejsou využity úletové popílky, dostáváme tedy hodnotu potenciálního tepla  $200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ . Uvažovaná tloušťka konstrukce je 2,0 m, dostáváme hodnotu maximální teploty v létě okolo  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro tloušťku 1,5 m dostaneme hodnotu zhruba  $76 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pro zimní betonáž dostáváme hodnotu pro tloušťku 2,0 m zhruba  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  a pro tloušťku 1,5 m se dostáváme do hodnoty  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 8.2 Okrajové podmínky pro letní betonáž

OP se vztahují na skutečné umístění JE Temelín, hodnoty pro OP jsou převzaty z map pro různé meteorologické jevy. Pro každou plochu budou nastaveny různé OP, každý povrch se bude chovat jinak. Pro horní plochu bude uvažováno zakrytí fólií po betonáži, bude docházet k výměně teploty a vyloučí se tím vliv vlhkosti a proudění okolního vzduchu.

Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Convection [ $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ ]	7	[41]
Emissivity [-]	0,85	[38] str. 293, Tab. 181
Temperature Max [ $^{\circ}C$ ]	22	[37]
Temperature Min [ $^{\circ}C$ ]	22	[37]

Tabulka 5 - OP pro horní povrch betonu z JE Temelín (letní betonáž)

Pro plochu čerstvého betonu chráněnou bedněním nebude započítán vliv okolní rychlosti větru a nebude docházet k odvodu vlhkosti z povrchu. Probíhat bude pouze tepelná výměna s okolním prostředím. Uvažováno je bednění z voděodolných nenasákavých dřevěných desek.

Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Ambient Temperature [ $^{\circ}C$ ]	22	[37]
Humidity [-]	1,0	-
Convection T [ $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ ]	5	[15]
Emissivity T [-]	0,94	[43]

Tabulka 6 - OP pro plochu na kontaktu bednění a čerstvého betonu z JE Temelín (letní betonáž)

Pro plochu čerstvého betonu chráněnou ocelovou vystýlkou opět není uvažován vliv rychlosti okolního vzduchu a výměny vlhkosti s okolím. Ocelová vystýlka jaderného reaktoru je z uhlíkaté nízkolegované oceli.

Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Ambient Temperature [ $^{\circ}C$ ]	22	[37]
Humidity [-]	1,0	-
Convection T [ $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ ]	7,9	[45]
Emissivity T [-]	0,52	[43]

Tabulka 7 - OP pro plochu na kontaktu ocelové vystýlky a čerstvého betonu z JE Temelín (letní betonáž)

Pro spodní plochu betonu není nastavena žádná OP, v modelu je tato plocha v kontaktu s vyzrálým betonem pro základovou desku. Parametry základu jsou popsány v kapitole 7.2.

## 8.3 Výsledné teploty pro letní betonáž

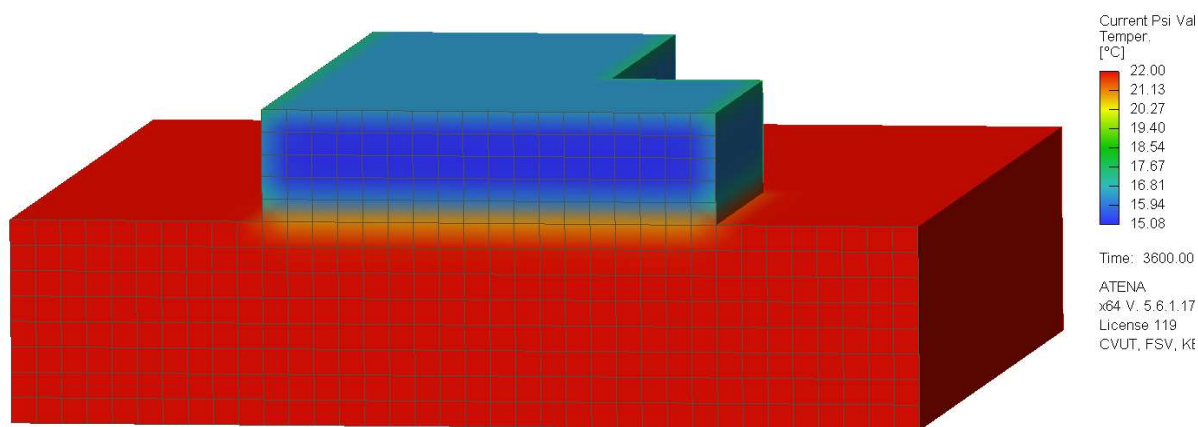
### 8.3.1 Stěna s maximální přípustnou výškou

Vstupní parametry a OP byly popsány v předchozích kapitolách. Tato kapitola bude ukazovat průběhy teplot v konstrukci během letního období. Výpočet byl simulován na 28 dní s postupným prodlužováním jednotlivých intervalů měření. Počáteční zkoumaná výška záběru pro betonáž byla 1,0 m. Pro tuto výšku byl příliš vysoký teplotní spád a docházelo k vysokým teplotám jádrového betonu. Proto byla poté zkoumána výška záběru 0,5 m, jak se dle výpočtu ukázalo, byla zde rezerva pro navýšení. Výsledná výška záběru vyhovující podmínkám je tedy 0,55 m. Síť pro výpočetní model byla z původního kroku sítě 25 mm zmenšena na 12,5 mm za účelem přesnějšího výpočtu. Teplotní spád pro 0,55 m vypočten v rovnici 63.

Čas [dny]	Počet kroků měření	Délka kroku [hod]
1	24	1
2	8	3
3	4	6
4 – 7	6	12
8 – 28	21	24

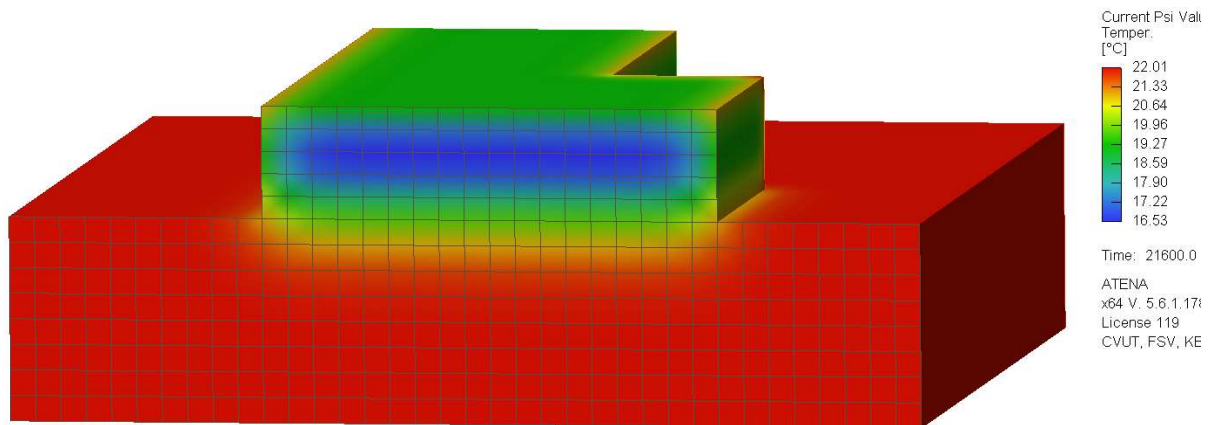
Tabulka 8 – Časové intervaly pro výpočet

Omezení pro výsledné teploty nás limitovalo maximální teplotou jádrového betonu 70 °C a teplotním spádem  $\Delta T=25$  °C. Předpokládaný průběh teploty byl, že beton bude na svislých stěnách teplejší než na horním povrchu a postupně se bude zvyšovat teplota uprostřed průřezu a směrem k základové desce.



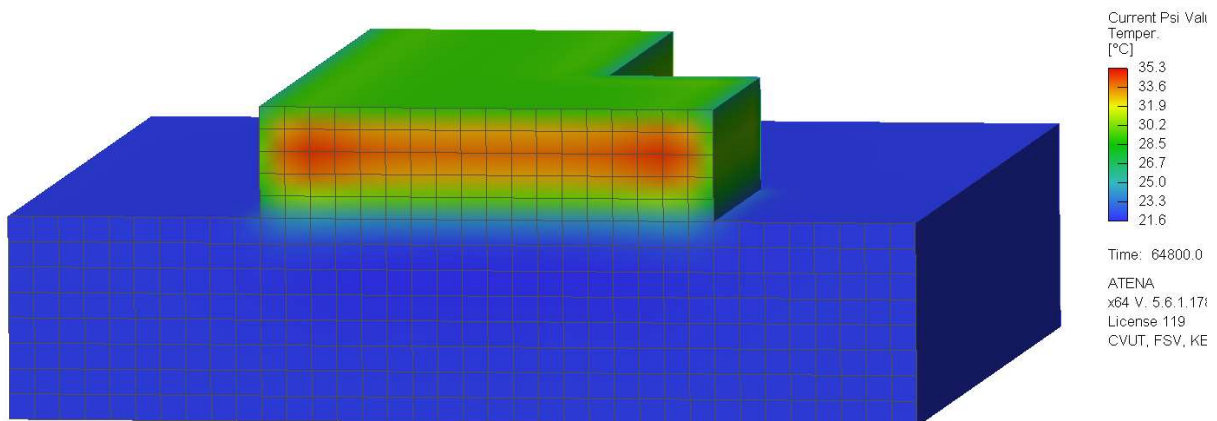
Obrázek 20 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Z obrázku 20 je patrné, že teplota betonu po první hodině na odkrytých stěnách modelu je přibližně o jeden stupeň vyšší (16 °C) než původní teplota čerstvého betonu. To odpovídá původnímu předpokladu. Tento fakt je způsoben tím, že bednění, ocelová vystýlka a fólie působí jako tepelná a vlhkostní izolace povrchu. Základová deska má teplotu stále 22 °C, což odpovídá teplotě okolního prostředí. Na rozhraní základové desky a čerstvého betonu začíná probíhat tepelná výměna.



Obrázek 21 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

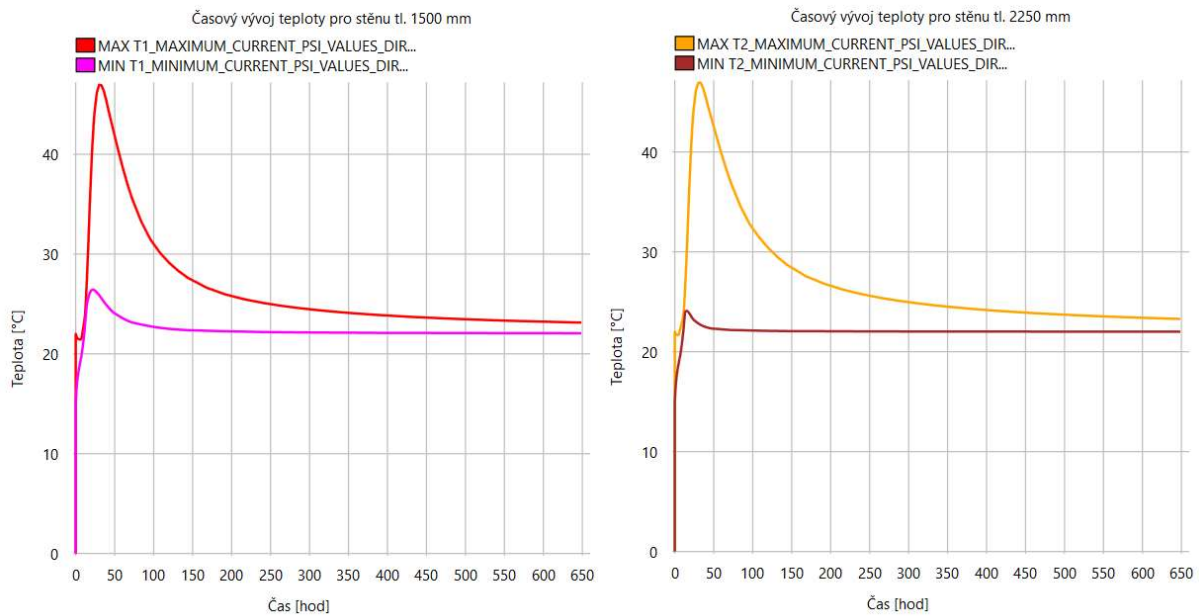
Už po 6 hodinách je z obrázku 21 patrné, že dochází k oteplování betonu na krajních plochách vlivem tepelné výměny s okolním prostředím. Základová deska se v místě kontaktu s čerstvým betonem ochladila na hodnotu přibližně 21 °C. Základová deska byla na počátku teplejší než čerstvý beton, dochází tedy k vyrovnávání teplot. Obalový beton v tomto časovém období dosahuje hodnot 20 °C. Teplo z obalového betonu by se mělo začít postupně šířit do středu konstrukce betonové obálky. Teplo jádrového betonu generované hydratačním procesem se zatím neprojevuje.



Obrázek 22 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



Po 18 hodinách lze z obrázku 22 vyčíst, že základová deska se v místě kontaktu s čerstvým betonem oteplila na hodnotu přibližně 24 °C. Horní povrch se také otepluje z původních 15 °C na hodnotu 27 °C. Oteplování povrchu způsobuje především teplo generované v jádrovém betonu. Maximální teplota jádrového betonu v tomto čase už dosahuje 35 °C.



Obrázek 23 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm

(hodnoty pro stěnu vysokou 550 mm, letní betonáž)

Z grafů na obrázku 23 je vidět, že maximální teplota a teplotní spád nastává pro obě tloušťky přibližně ve stejném časovém období. Takový výsledek je předvídatelný, protože výška stěny je v obou případech stejná (550 mm) a je výrazně menší než ostatní rozměry, takže teplo z konstrukce uniká nejrychleji horním povrchem ve směru výšky.

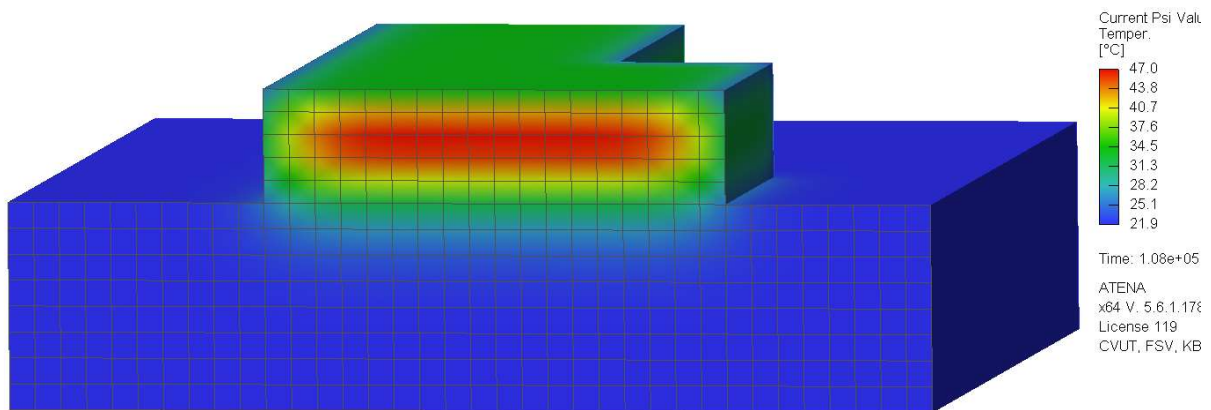
Pro ověření výpočtu stanovíme očekávanou hodnotu tepla pro stěnu tloušťky 550 mm z nomogramu z práce [15]. Pro letní betonáž dostáváme hodnotu okolo 55 °C. Naše nejvyšší teplota z výpočtů je 47 °C. Rozdílná teplota je tedy 8 °C (15 % odchylka). Nomogram slouží pouze pro hrubý odhad, tudíž předpokládáme, že výpočetní model je nastaven správně a lze pokračovat ve zkoumání tohoto modelu.

Vrchol teplotní křivky odpovídá hodnotě času 108000 s (30 hodin). To znamená, že exotermická reakce v betonu dosáhne svého vrcholu za letních podmínek přibližně po 30 hodinách, v místě stěny o tloušťce 1500 mm. Ve stejném čase je teplota ve stěně tl. 2250 mm 46,9 °C s vyšším teplotním spádem. Teplotní spád v tomto okamžiku pro stěnu tl. 2250 mm je stanoven v rovnici 63.

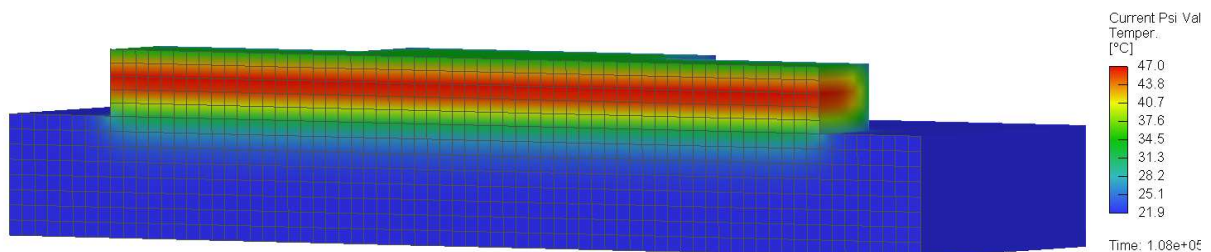
$$\Delta T_{1,letní} = T_{int} - T_{ext} = 46,9 - 22,8 = 24,1 \text{ °C} < 25 \text{ °C} \quad (63)$$

kde  $T_{int}$  je teplota jádrového betonu [°C]

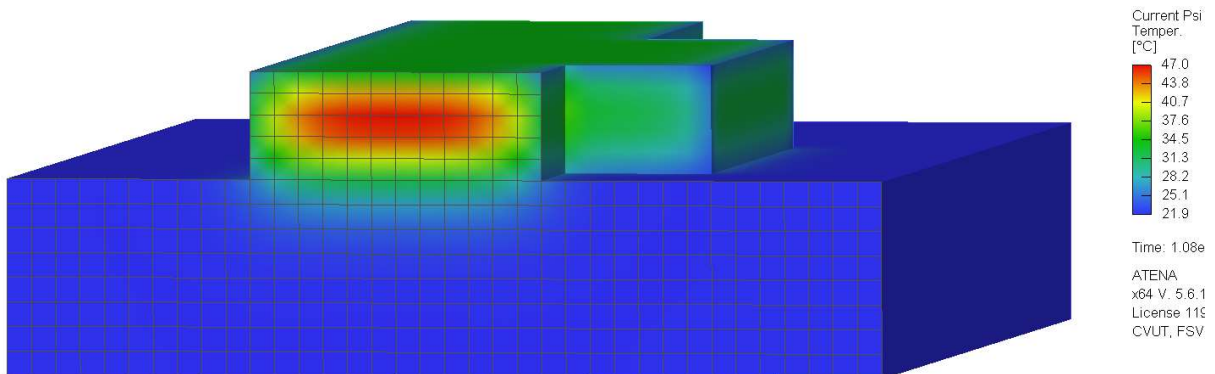
$T_{ext}$  je teplota obalového betonu [°C]



Obrázek 24 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

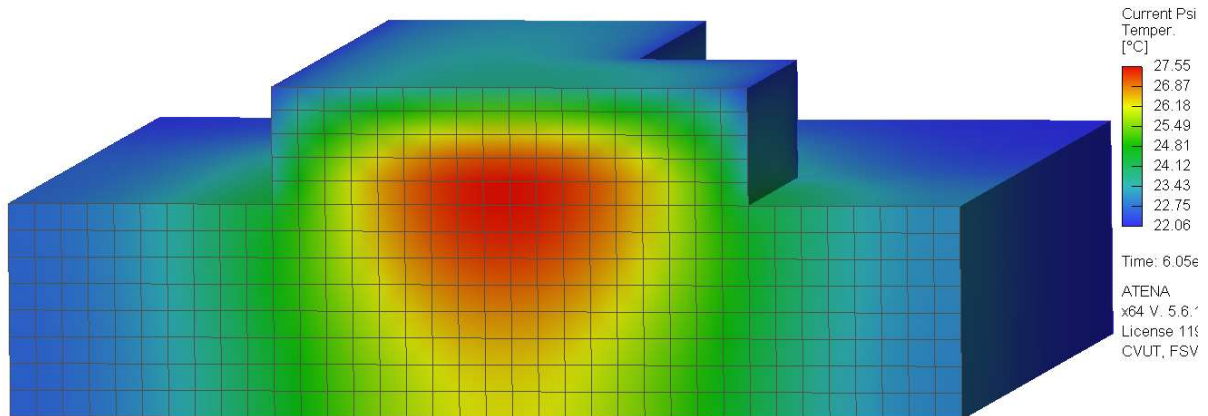


Obrázek 25 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez)

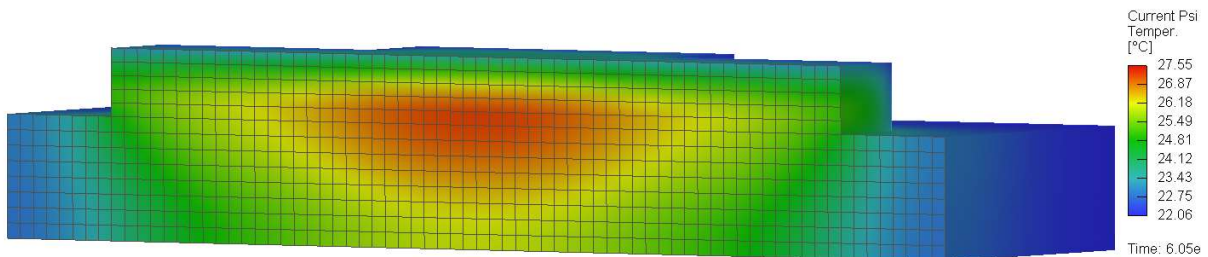


Obrázek 26 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm)

Obrázky 24, 25 a 26 opět odpovídají předpokladu šíření teploty v konstrukci. Největší teplota je uprostřed konstrukce a chladnější základová deska pohlcuje teplotu z nově vybetonované stěny, což odpovídá předpokladu 2. termodynamického zákona o šíření tepla. Horní vnější povrchy se ohřály na teplotu 34 °C.



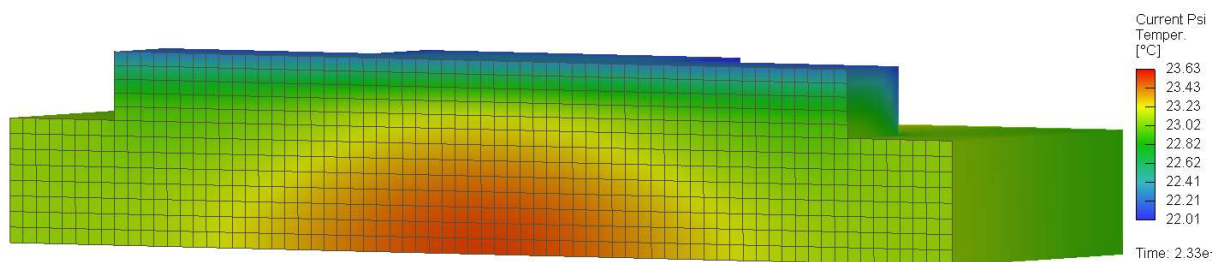
Obrázek 27 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



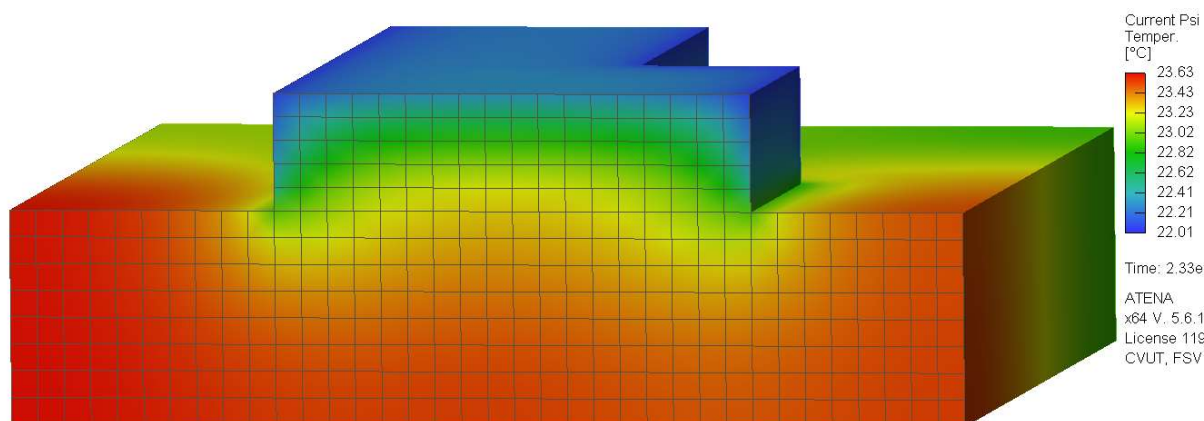
Obrázek 28 – Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez)

Grafy na obr. 23 ukazují, že po týdnu dochází k ustálení teplot a teploty už se pozvolna přibližují a nedochází k žádným teplotním skokům. V tomto časovém období je nejteplejším místem konstrukce vnitřní část stěny tl. 2250 mm. Maximální teplota jádrového betonu v tomto časovém období je necelých 28 °C. Vnější povrchové teploty se začínají ustalovat a přibližují se k hodnotě 22 °C. Po týdnu vykazují povrchy teplotu zhruba 23 °C.

Od tohoto okamžiku v konstrukci nedochází k velkým teplotním změnám. Teplota základové desky a stěny obálky se vyrovnává. Na obrázcích 29 a 30 jsou ukázané teploty po 28 dnech od betonáže.



Obrázek 29 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez)



Obrázek 30 - Teploty konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Po 28 dnech se teplota usazuje a pohybuje se kolem hodnoty 22 °C. Horní povrch dosahuje hodnoty 22 °C. Teplo se z čerstvého betonu postupně šíří do základové konstrukce. Ta je ovšem mnohem masivnější než konstrukce betonové obálky, tudíž teplota se v této konstrukci rozloží a po 28 dnech již teplota v základové desce dosahuje necelých 24 °C. Tento výsledek lze považovat za jistou nepřesnost modelu, který nezohledňuje tepelnou výměnu se zbytkem základové desky a okolní zeminou. Reálně lze tudíž předpokládat, že by základová deska v této době měla teplotu nižší, než byla počáteční teplota 22 °C. Vliv na teploty stěny by však nebyl velmi podstatný, a jelikož nejsou známy konkrétní rozměry základové desky a parametry okolních zemin, nemá význam model v tomto ohledu dále zpřesňovat.

Z výpočtu vyplývá, že nejvíce kritické období nastává během druhého dne po betonáži. V tomto období nastává prudký nárůst a poté i prudký pokles teploty v masivní konstrukci jaderného kontejnmentu. Maximální výška záběru betonáže pro tuto konstrukci v letních podmínkách je tedy dle simulovaného výpočtu 550 mm kvůli maximálnímu teplotnímu spádu. Ten je pouze o necelý stupeň nižší, než byla stanovená maximální hodnota.

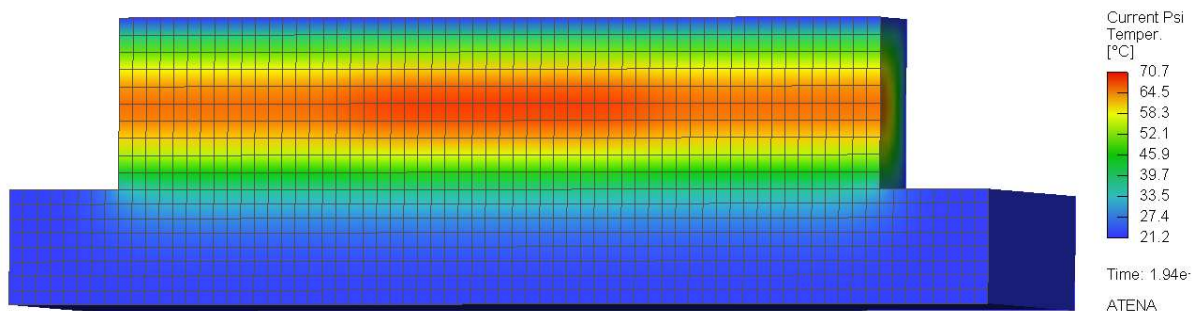
### 8.3.2 Stěna vysoká 1500 mm

Pro získání představy o chování konstrukce při větší výšce betonové stěny se pokusíme nasimulovat maximální teploty a teplotní spády v konstrukcích o výšce 1500 mm a 2000 mm. Ověříme tím také spolehlivost nomogramu, ze kterého odhadujeme potenciální maximální teploty vzniklé v konstrukci. Tyto modely nebudou zkoumány stejně podrobně jako předešlý model, jde nám jen o zjištění extrémních teplot. Budou uvažovány stejné OP, síť pro výpočet bude přibližně stejně zahuštěna. Intervaly výpočtu zůstávají zachovány.

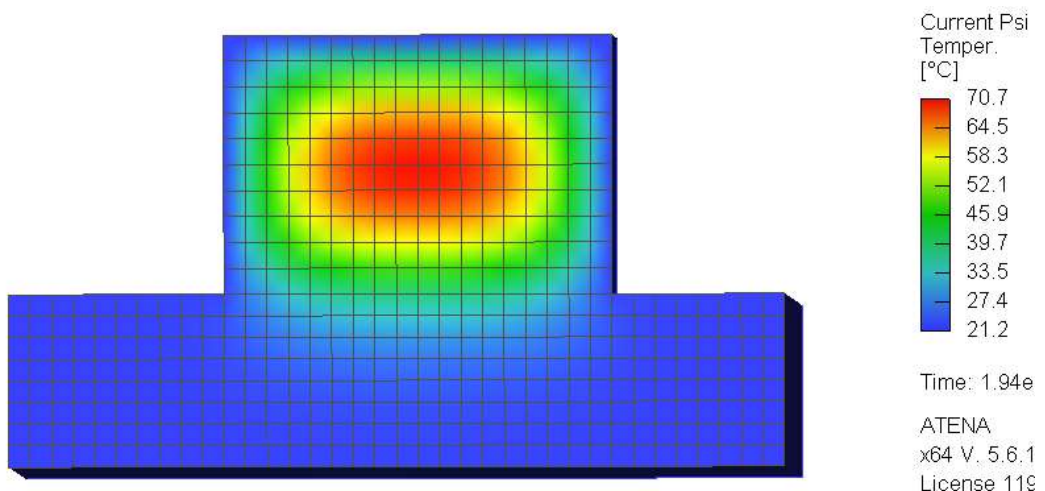
Pro letní podmínky a tloušťku 1500 mm jsme původním odhadem z nomogramu dospěli k hodnotě 76 °C. Výsledná maximální hodnota ze simulovaného výpočtu je 70,7 °C (odchylka 7 %). Pro takovou teplotu v konstrukci nastává problém ohledně tvorby ettringitu, viz kapitola 3.2. Dosažení této teploty nastává v časovém období 54 hodin po simulované betonáži. Teplotní spád v tomto období je následující:

$$\Delta T_{1,letní(1500\text{ mm})} = T_{int} - T_{ext} = 70,7 - 21,5 = 49,2\text{ °C} \gg 25\text{ °C} \quad (64)$$

Teplotní spád 49,2 °C je obrovský a docházelo by k popraskání betonu.

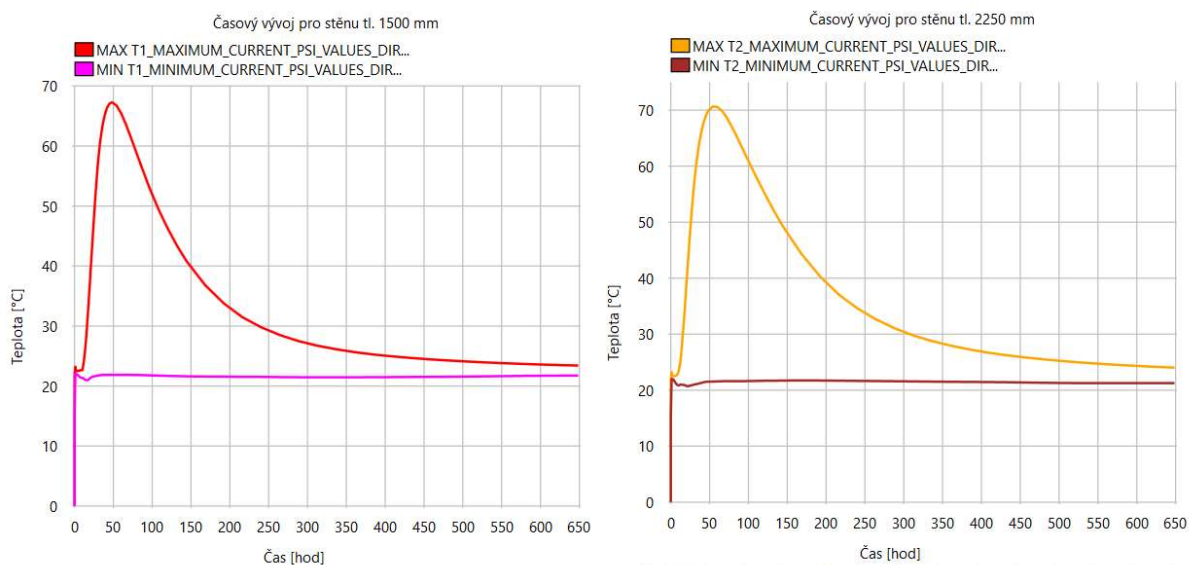


Obrázek 31 – Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez)



Obrázek 32 – Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou 2250 mm)

Z obrázků 31 a 32 je vidět, že obalový beton začíná dosahovat přibližně teploty okolního prostředí, která je 22 °C. Vývoj teploty odpovídá předpokladům, nejvyšší teplota se nachází v jádrovém betonu. Na obrázku 33 je znázorněn časový vývoj teploty, obdobně jako pro konstrukci 550 mm.

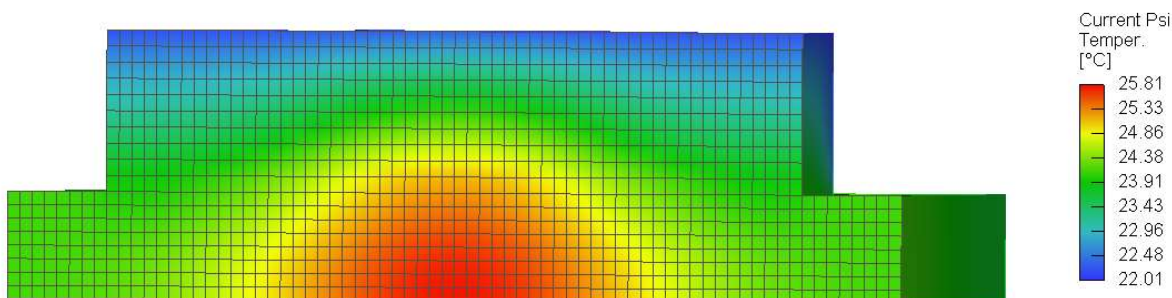


Obrázek 33 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

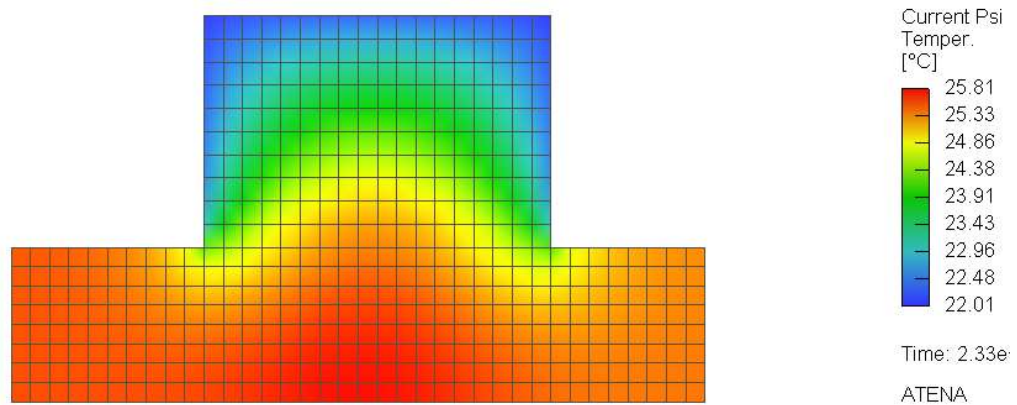
Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm  
(hodnoty pro stěnu vysokou 1500 mm, letní betonáž)

Z grafů na obr. 33 lze vidět, že obalový beton dosahuje teploty 22 °C přibližně po 12 hodinách, to je dříve než pro konstrukci vysokou 550 mm. Mnohem teplejší jádrový beton v této konstrukci ohřívá vnější povrchy rychleji. Také vidíme, že ve stěně tl. 1500 mm nedosahujeme hodnoty 70 °C, ale ve stěně tl. 2250 mm tuto hodnotu přesahujeme.

V následujících obrázcích budou ukázány teploty po 28 dnech od betonáže.



Obrázek 34 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez)



Obrázek 35 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Vývoj teploty odpovídá předpokladům, teplota se šíří stejným způsobem jako pro stěnu výšky 550 mm. Teplota obalového betonu je shodná s teplotou okolního prostředí, tedy 22 °C. Maximální teploty jádrového betonu dosahují téměř 26 °C, což je přibližně o 2 °C více než pro předchozí konstrukci.

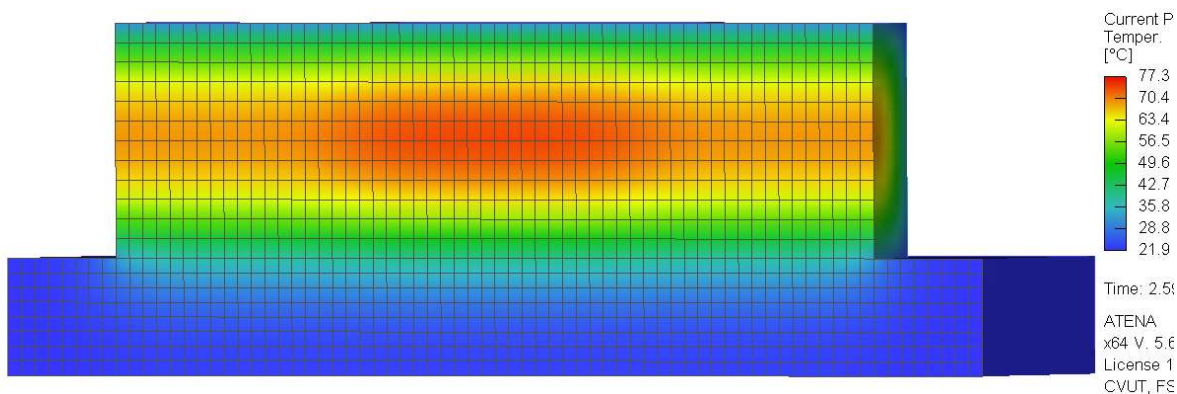
### 8.3.3 Stěna vysoká 2000 mm

Pro konstrukci výšky 2000 mm jsme odhadli maximální teplotu během betonáže za letních podmínek 85 °C. Maximální hodnota teploty dosahuje 77,3 °C (odchylka 11 %). U této konstrukce je znatelný rozdíl v maximální teplotě pro stěnu tl. 1500 a pro stěnu tl. 2250 mm. Zatímco ve stěně tl. 2250 mm dosahujeme již zmíněnou hodnotu 77,3 °C, ve stěně tl. 1500 mm nám maximální teplota dosahuje hodnoty 72,5 °C (viz obr. 38). Pro takovou konstrukci by opět vznikl problém spojený s tvorbou ettringitu. Nejvyšší hodnota teplotního spádu je stanovena v rovnici 65 následovně:

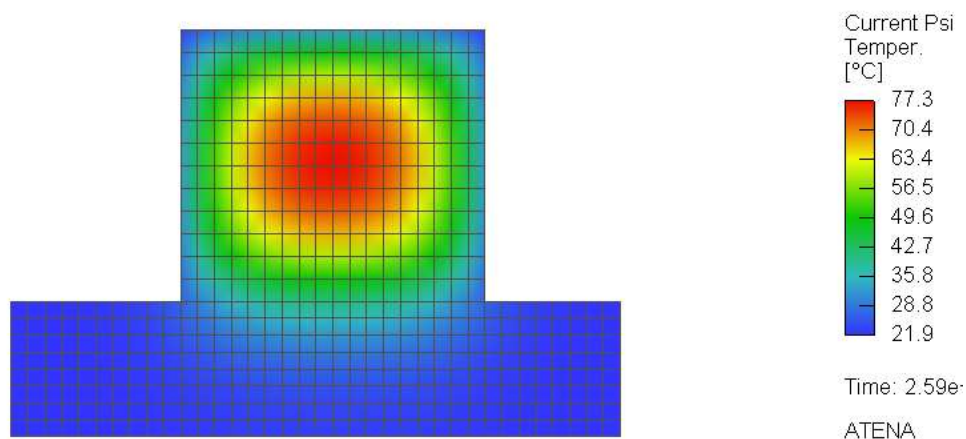
$$\Delta T_{1,letní(2000\text{ mm})} = T_{int} - T_{ext} = 77,3 - 21,9 = 55,4\text{ °C} \gg 25\text{ °C} \quad (65)$$

Pro tak vysokou hodnotu teplotního spádu by opět docházelo k popraskání betonu.

Na obrázcích 36 a 37 jsou znázorněny hodnoty teplot v období dosažení maximálních hodnot jádrového betonu.



Obrázek 36 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez)

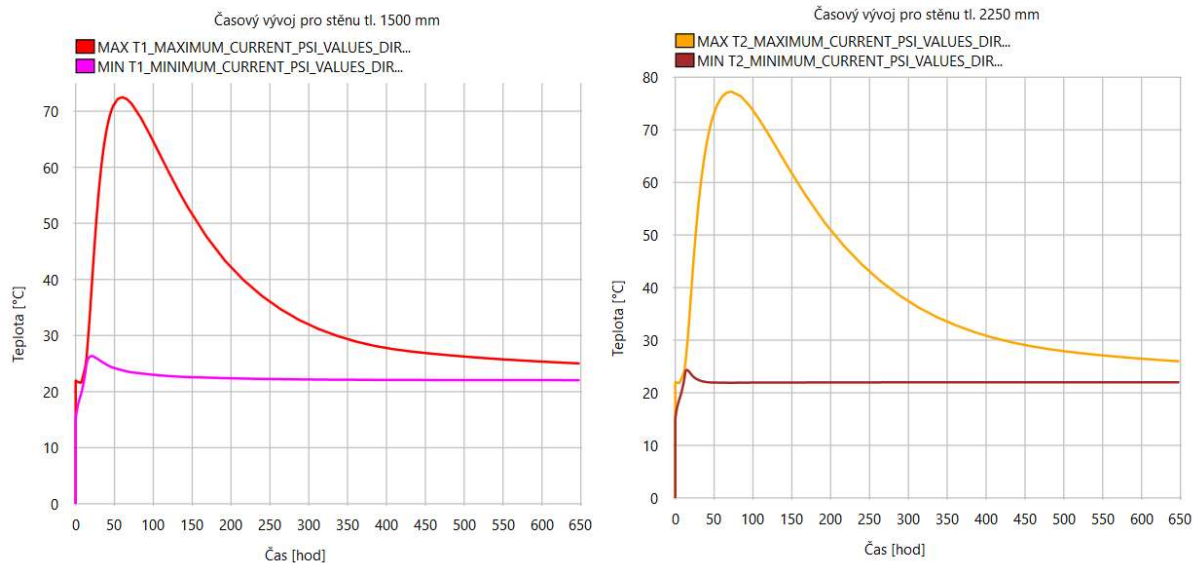


Obrázek 37 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

K maximálním hodnotám na obr. 36 a 37 dochází v časovém období 72 hodin po betonáži. To je tedy o 18 hodin později než u konstrukce vysoké 1500 mm. Princip šíření tepla zůstává stále stejný, nejvyšší teplota se vyskytuje v jádrovém betonu a základová deska přebírá teplo ze stěny.

Na obrázku 38 je opět znázorněn časový průběh extrémních teplot pro obě tloušťky stěn. Vidíme, že maximální teplota ve stěně tl. 1500 mm nastává dříve (z výpočtu přibližně o 10-12 hodin). Vidíme, že oproti stěně vysoké 1500 mm, v tomto případě přesahují hodnotu 70 °C obě stěny. Je také patrné, že stěna tl. 1500 mm se rychleji ochlazuje než stěna tl. 2250 mm.

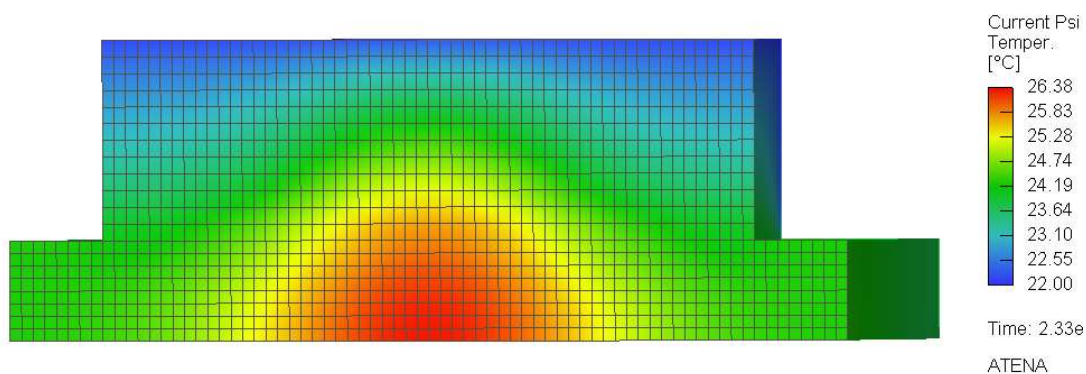




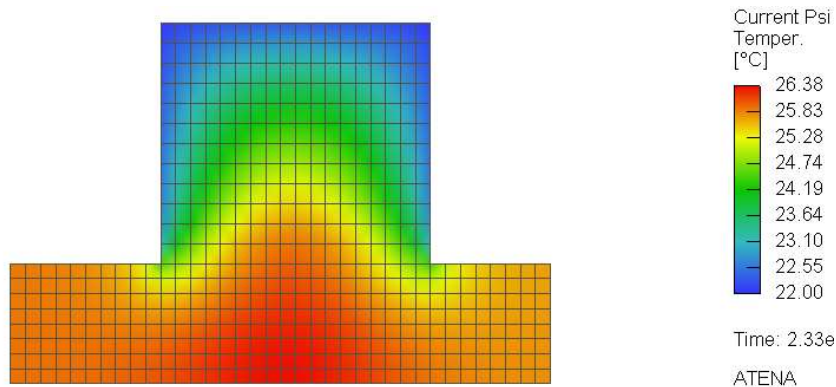
Obrázek 38 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm  
(hodnoty pro stěnu vysokou 2000 mm, letní betonáž)

V následujících obrázcích budou opět ukázány teploty 28 dní po betonáži.



Obrázek 39 - Teploty po 28 dnech v konstrukci vysoké 2000 mm (podélný řez)



Obrázek 40 – Teploty po 28 dnech v konstrukci vysoké 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Z obrázků 39 a 40 je patrné, že teplota obalového betonu je shodná s okolní teplotou prostředí. Největších teplot dosahuje opět základová deska, maximální teplota ve stěně se pohybuje kolem hodnoty 26 °C. Princip šíření tepla je opět stejný jako v předešlých případech.

#### 8.4 Shrnutí výsledných výpočtů pro letní betonáž

Při modelování konstrukce jsme se iteračním postupem dostali k optimální výšce s přípustným teplotním spádem maximálně 25 °C. Tato výška pro letní podmínky je 550 mm. Pro vyšší záběr betonáže by se konstrukce vystavovala rizikům popsaným v kapitole 3. Také jsme se přesvědčili, že zadání OP je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím konečné výsledky z výpočtu.

Ověřovali jsme přesnost odhadu maximálních hodnot z nomogramu z obr. 18, výsledné odchylky mohou mít několik důvodů – nomogram slouží k odhadu (nestanovuje přesnou hodnotu), nomogram neuvažuje vliv OP, přesnost výpočtu závisí na zahuštění sítě. Odchylky nejsou zas tolik znepokojující, maximální stanovená odchylka je 15 % a je na straně bezpečné, což je pro zjednodušený odhad vyhovující. Ovšem i přes tyto odchylky je znát, že modely fungují, jak je předpokládáno, teplo se šíří dle logických úvah.

#### 8.5 Okrajové podmínky pro zimní betonáž

Teplota základové desky je opět uvažována shodná s teplotou okolního prostředí, tedy 5 °C. To je nejnižší povolená teplota pro betonáž. Teplota čerstvého betonu je uvažována pro zimní betonáž 8 °C. Počáteční vlhkost základu je opět 90 %.

Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Ambient Temperature [°C]	5	Min. teplota pro betonáž
Humidity [-]	1,0	-
Convection T [W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ]	7	[41]
Emissivity T [-]	0,85	[38] str. 293, Tab. 181

Tabulka 9 - OP pro horní povrch betonu z JE Temelín (zimní betonáž)

Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Ambient Temperature [°C]	5	Min. teplota pro betonáž
Humidity [-]	1,0	-
Convection T [W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ]	5	[41]
Emissivity T [-]	0,94	[43]

Tabulka 10 - OP pro plochu na kontaktu bednění a čerstvého betonu z JE Temelín (zimní betonáž)

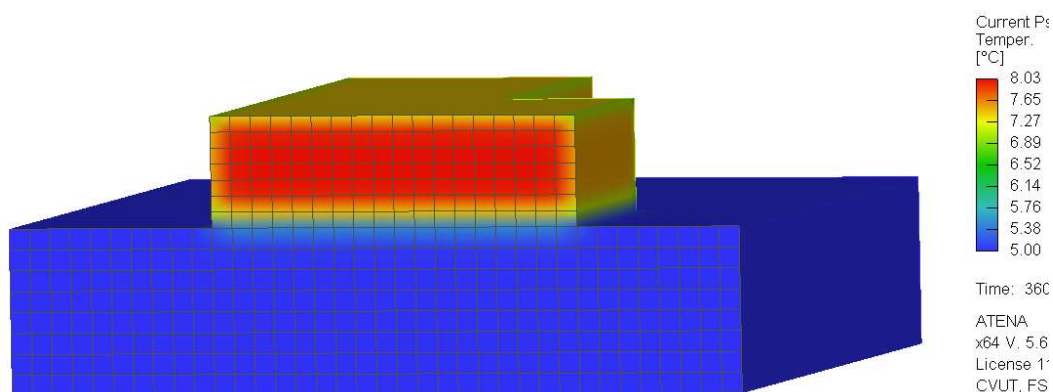
Typ OP	Hodnota	Zdroj hodnoty
Ambient Temperature [°C]	5	Min. teplota pro betonáž
Humidity [-]	1,0	-
Convection T [W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ]	7,9	[45]
Emissivity T [-]	0,52	[43]

Tabulka 11 - OP pro plochu na kontaktu ocelové vystýlky a čerstvého betonu z JE Temelín (zimní betonáž)

## 8.6 Výsledné teploty pro zimní betonáž

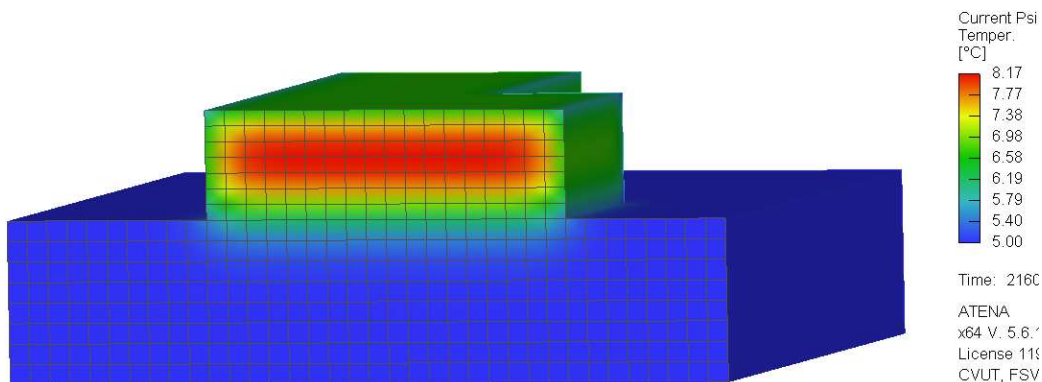
### 8.6.1 Stěna s maximální přípustnou výškou

Po postupných iteračních výpočtech různých výšek byla výsledná výška stanovena na hodnotu 0,67 m. Předpokládané šíření tepla pro zimní podmínky je takové, že studená základová deska začne ochlazovat spodní část vybetonované stěny a stejně jako pro letní podmínky se uvnitř betonové stěny začne vytvářet hydratační teplo, které bude postupně prostupovat do základové desky.



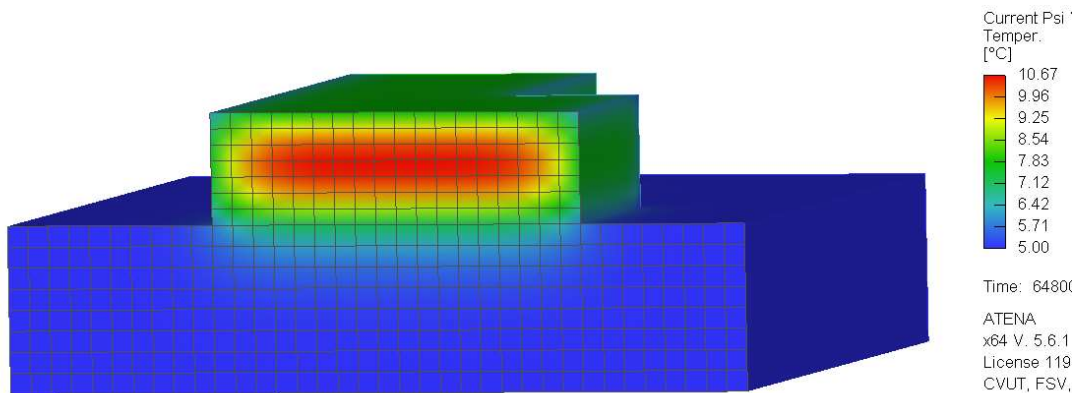
Obrázek 41 – Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Na obrázku 41 si můžeme všimnout, že po první hodině se začínají ochlazovat vnější plochy od okolní teploty 5 °C. Základová deska má teplotu 5 °C.



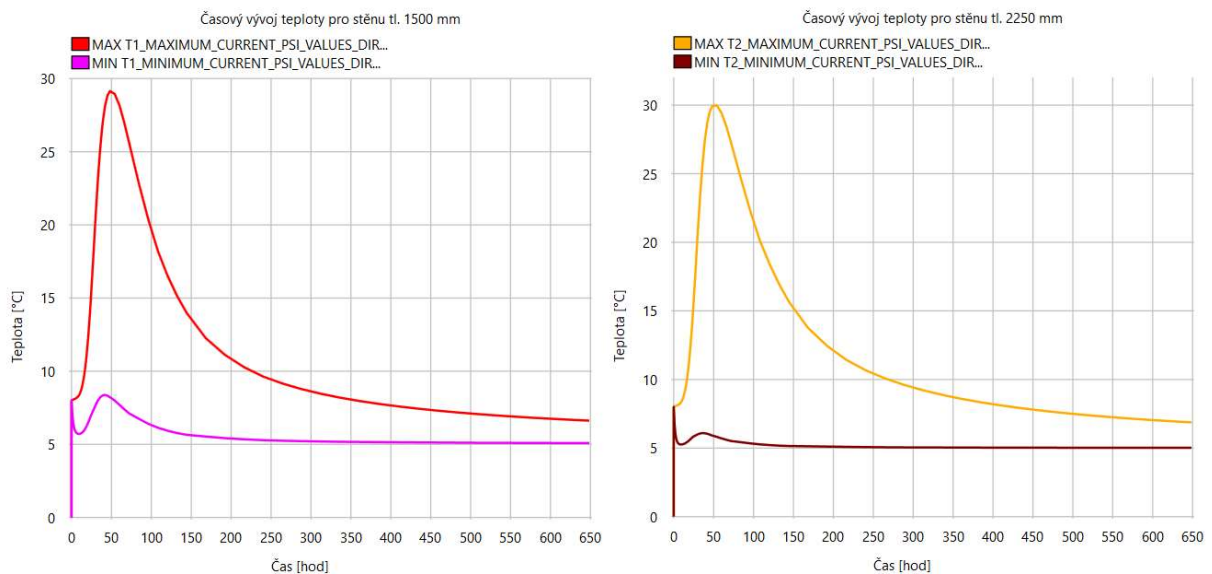
Obrázek 42 – Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Na obrázku 42 je vyznačený průběh teplot v čase 6 hodin po betonáži. Je zřejmé, že chladné okolní prostředí rychle ochlazuje obalový beton. V tomto čase je obalový beton přibližně o 1 °C chladnější. Vlivem tohoto ochlazování se jádrový beton ohřál pouze o 0,2 °C.



Obrázek 43 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Po 18 hodinách se začíná projevovat interakce základové desky s betonovou stěnou a vliv hydratace. Jádrový beton se ohřál na teplotu 10,7 °C a obalový beton má teplotu okolo 8 °C.



Obrázek 44 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm (hodnoty pro stěnu vysokou 670 mm, zimní betonáž)

Z grafů na obrázku 44 je vidět, že teplotní křivka dosahuje vrcholu okolo 50. hodiny. Je také zřejmé, že ve stěně tl. 2250 mm vzniká vyšší teplota a vyšší teplotní spád. Zvýšení teploty

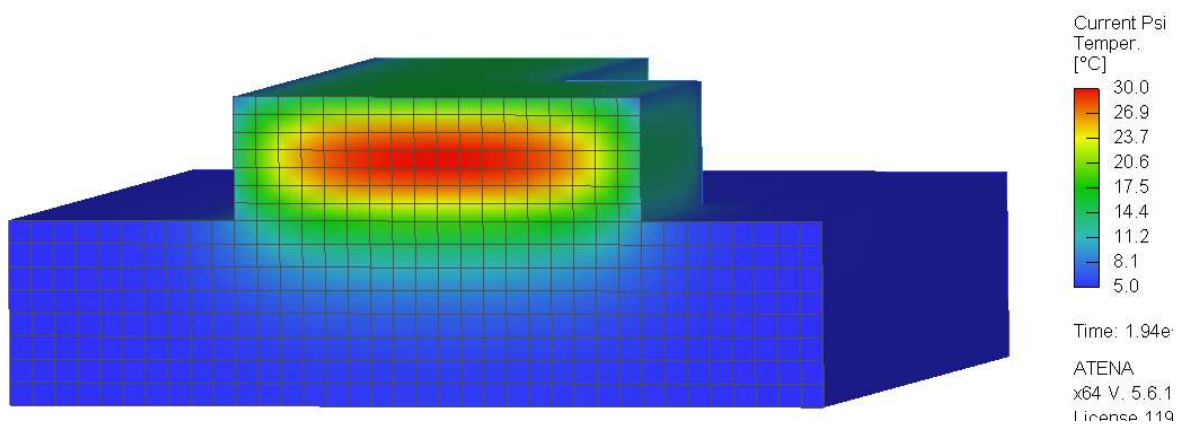
obalového betonu v tomto čase je způsobeno ohřátím od jádrového betonu. Rozhodující teplotní spád je v tomto případě pro stěnu 2250 mm, a to v čase 54 hodin po betonáži.

$$\Delta T_{1,zimní} = T_{int} - T_{ext} = 30 - 5,8 = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C} < 25^\circ\text{C} \quad (66)$$

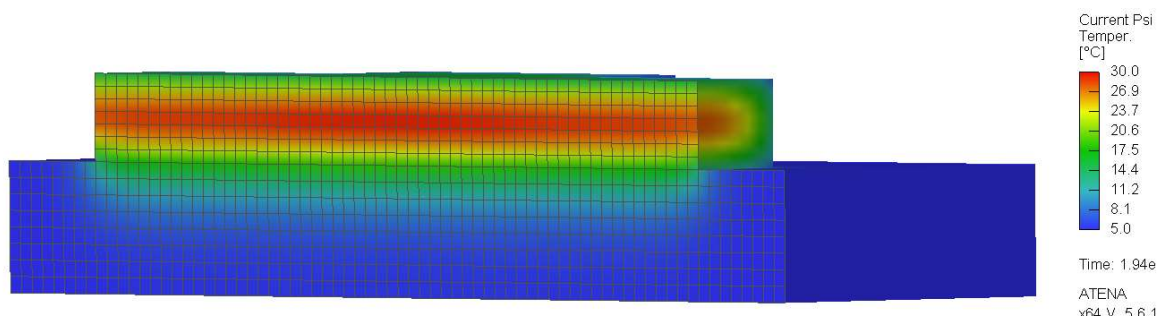
kde  $T_{int}$  je teplota jádrového betonu [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{ext}$  je teplota obalového betonu [ $^\circ\text{C}$ ]

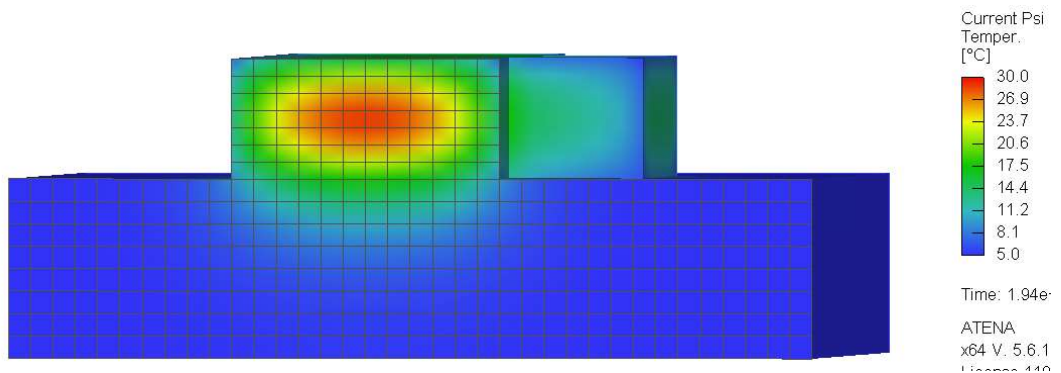
Pro ověření správného výpočtu provedeme odhad maximální teploty z nomogramu z práce [15]. Pro výšku 670 mm dostáváme hodnotu zhruba  $43 \text{ } ^\circ\text{C}$  (odchylka 30 %). Taková odchylka může být opět způsobena našimi OP a složením betonu, ale jsme na bezpečné straně.



Obrázek 45 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

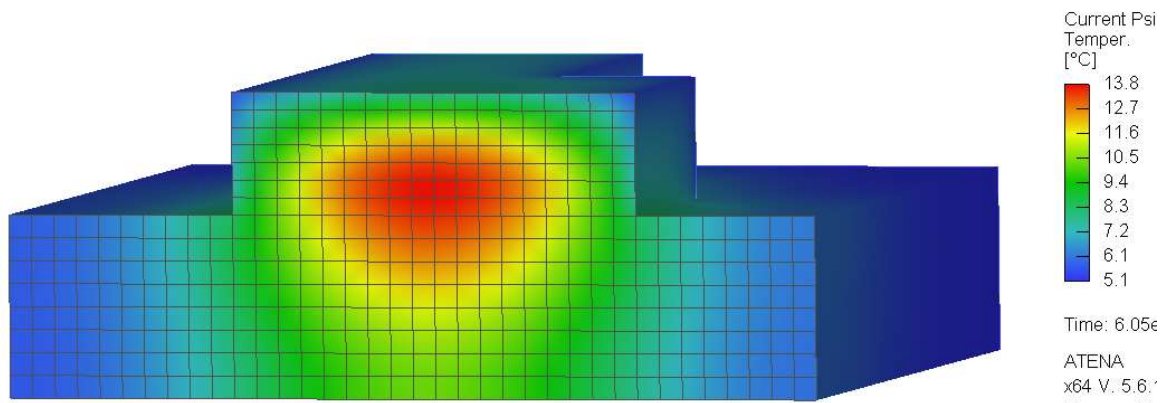


Obrázek 46 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez)

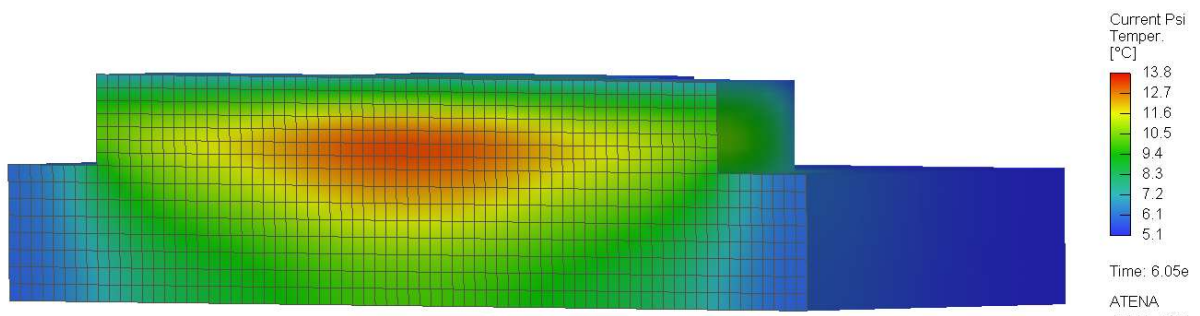


Obrázek 47 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm)

Na obrázcích 45, 46 a 47 jsou znázorněné teploty při dosažení maximálních hodnot. Vidíme, že šíření tepla opět odpovídá předpokladům. Základová deska se otepluje pod vybetonovanou stěnou na hodnotu 14 °C. Vnější stěny jsou vlivem teploty jádrového betonu otepleny na hodnotu 17 °C a krajní teploty hran se pohybují okolo 6 °C. Teplo by mělo postupně postupovat do základové desky a vlivem okolní teploty se bude celá konstrukce ochlazovat.

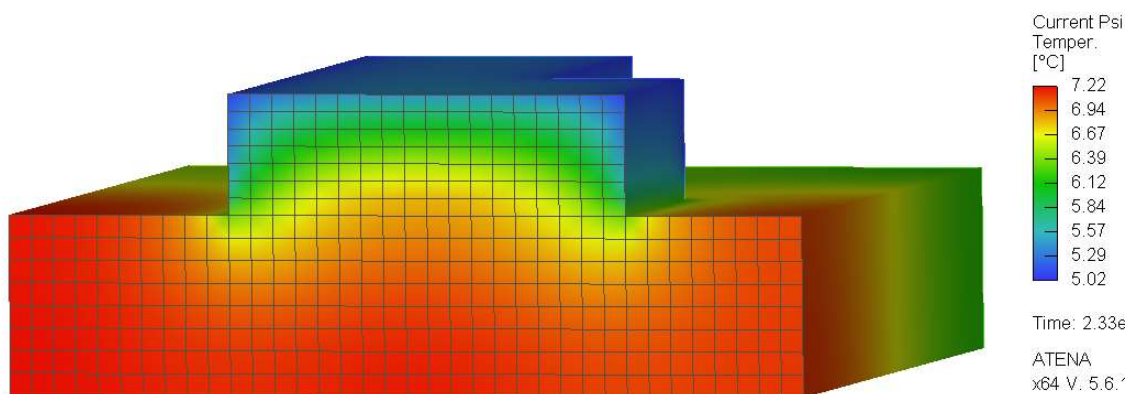


Obrázek 48 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

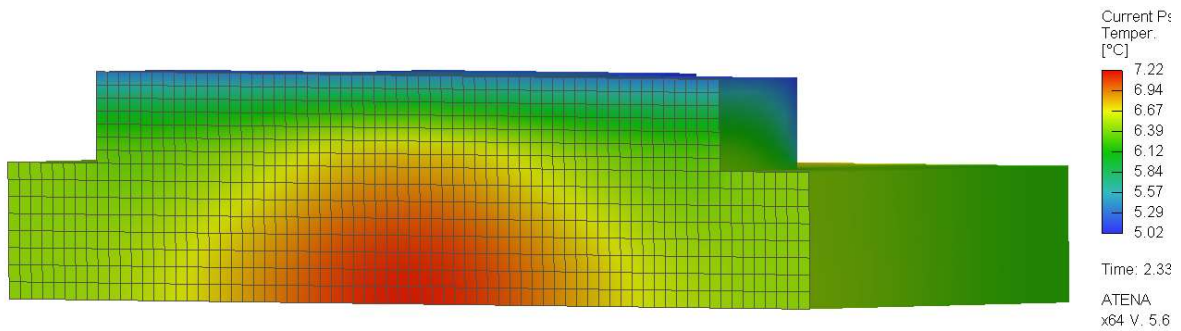


Obrázek 49 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez)

Po týdnu od betonáže maximální teploty jádrového betonu dosahují hodnot 14 °C. Teplo se rozšířilo do základové desky a vnější plochy se dostávají na teplotu okolního prostředí.



Obrázek 50 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



Obrázek 51 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez)

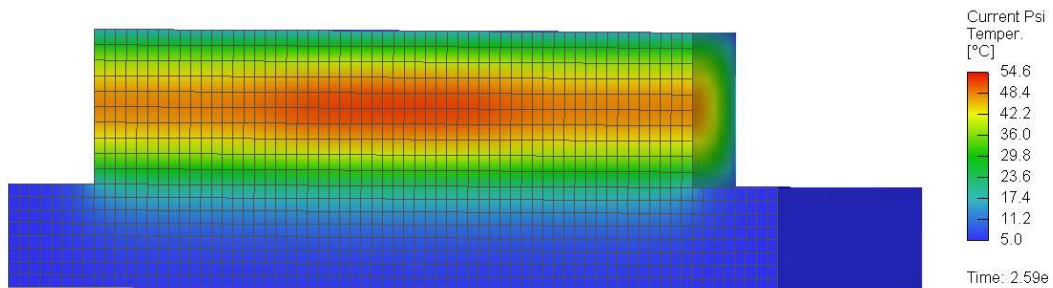
Po 28 dnech mají vnější stěny teplotu 5 °C. Maximální teplota ve stěně je přibližně 7 °C a základová deska je ohřáta na teplotu 7,2 °C. Základová deska by reálně měla nižší teplotu z důvodů popsaných ve výsledcích pro letní betonáž.

### 8.6.2 Stěna vysoká 1500 mm

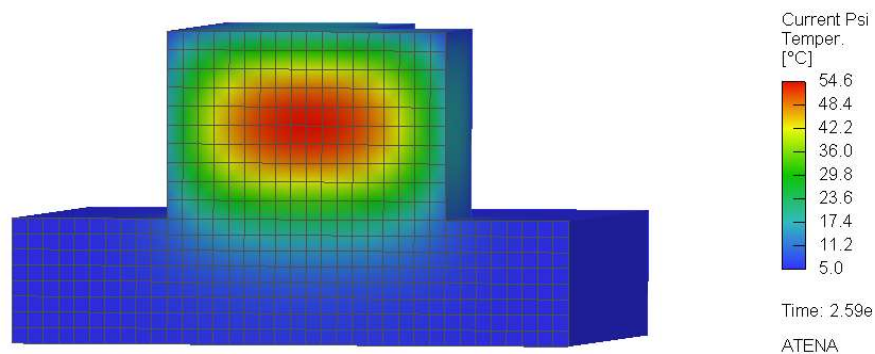
Pro zimní betonáž jsme odhadli v kapitole 8.1 maximální teplotu pro tloušťku 1500 mm jako 65 °C. V čase 72 hodin dostáváme maximální hodnotu ve stěně tl. 2250 mm 54,6 °C (odchylka 16 %). Teplotní spád v tomto okamžiku je vypočítán v následující rovnici:

$$\Delta T_{1,zimní(1500\text{ mm})} = T_{int} - T_{ext} = 54,6 - 5,3 = 49,3\text{ °C} \gg 25\text{ °C} \quad (67)$$

Pro takový teplotní spád by opět vznikaly trhliny. V následujících obrázcích jsou vidět hodnoty teplot pro tento časový úsek.

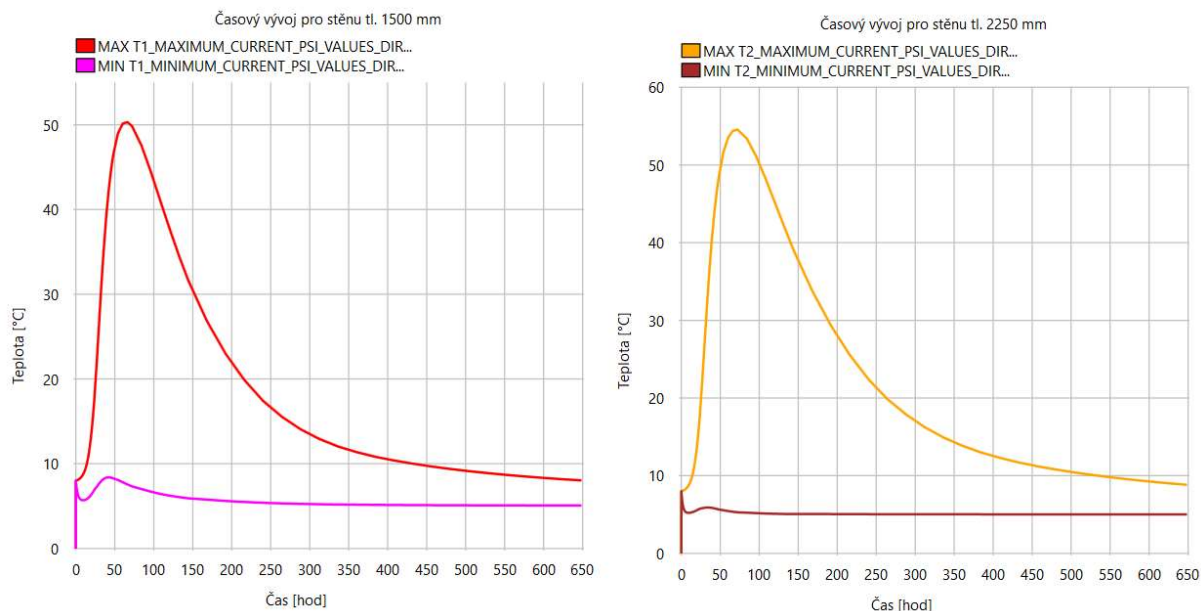


Obrázek 52 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez)



Obrázek 53 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Vidíme, že v období pro maximální teploty je opět rozdělení teplot stejné jako v předchozích případech. Jádrový beton uvnitř dosahuje téměř 55 °C, povrchová teplota obalového betonu se pohybuje okolo 15 °C. Základová deska se začíná pomalu oteplovat.

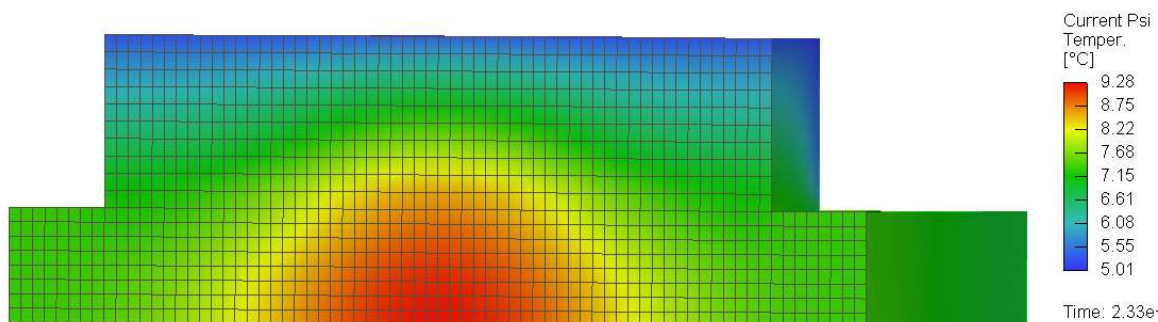


Obrázek 54 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm (hodnoty pro stěnu vysokou 1500 mm, zimní betonáž)

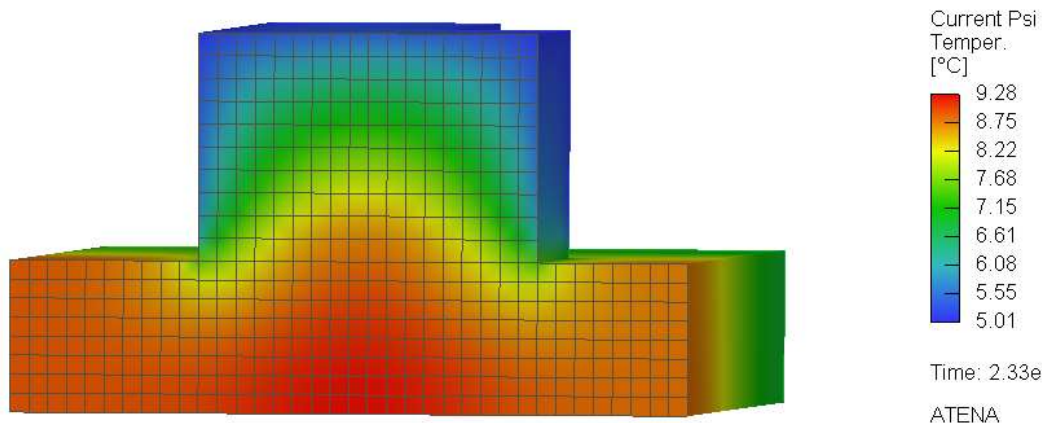
Na grafech na obrázku 54 jsou znázorněny průběhy extrémních teplot a lze vyčíst, že stěna tl. 2250 mm dosahuje opět vyšších teplot než stěna tl. 1500 mm. Pro nejnižší teplotu ve stěně tl. 1500 dochází během druhého dne po betonáži k nárůstu teploty, to je opět způsobeno oteplováním od jádrového betonu.

V následujících obrázcích budou znázorněny teploty v čase 28 dní.



Obrázek 55 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez)





Obrázek 56 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

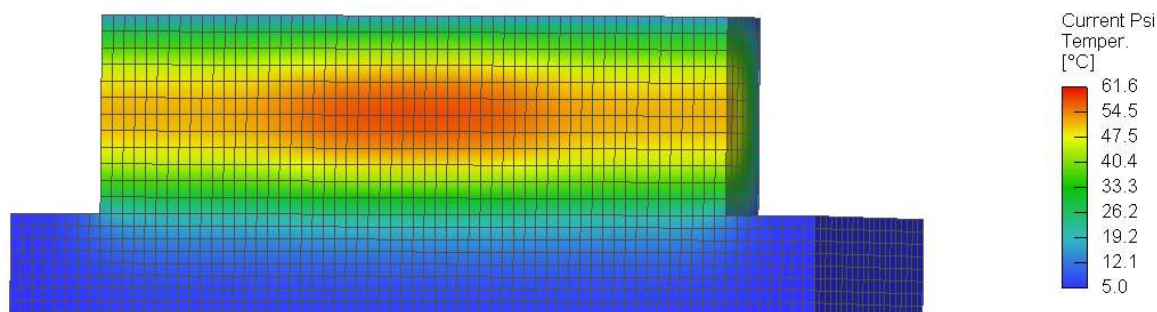
Teploty po 28 dnech opět odpovídají předpokladům o šíření teplot. Maximální hodnota v základové desce dosahuje hodnoty 9,3 °C. Reálně by opět základová deska byla nejspíše chladnější. Teploty na vnějších stěnách se shodují s teplotou okolního prostředí.

### 8.6.3 Stěna vysoká 2000 mm

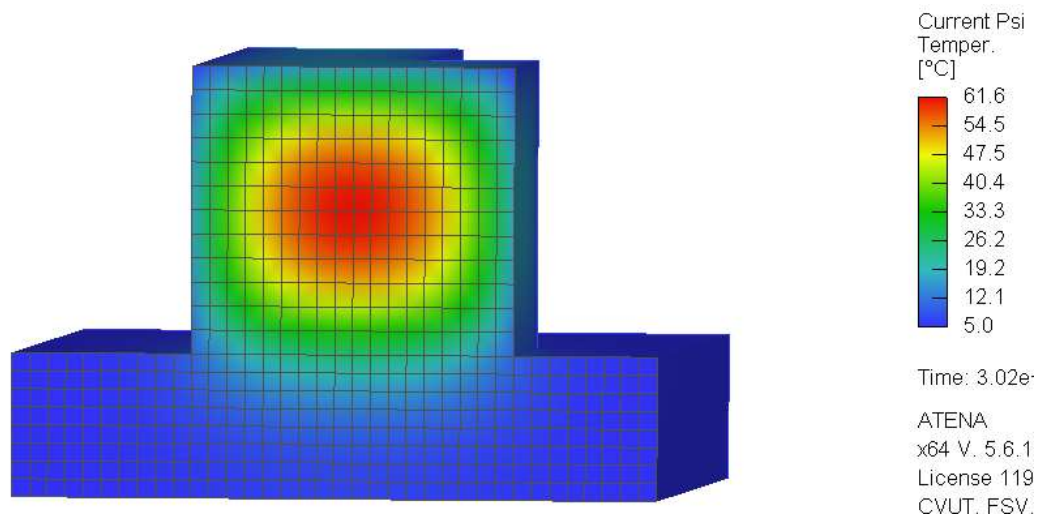
Pro takto vysokou stěnu jsme odhadli maximální teplotu 70 °C. Maximální hodnota pro tento výpočet je v čase 84 hodin 61,6 °C (odchylka 12 %). Teplotní spád pro toto období je stanoven v následující rovnici:

$$\Delta T_{1,zimní(2000\text{ mm})} = T_{int} - T_{ext} = 61,6 - 5,2 = 56,4\text{ °C} \gg 25\text{ °C} \quad (68)$$

Pro takový teplotní spád opět vzniká riziko vzniku trhlin.

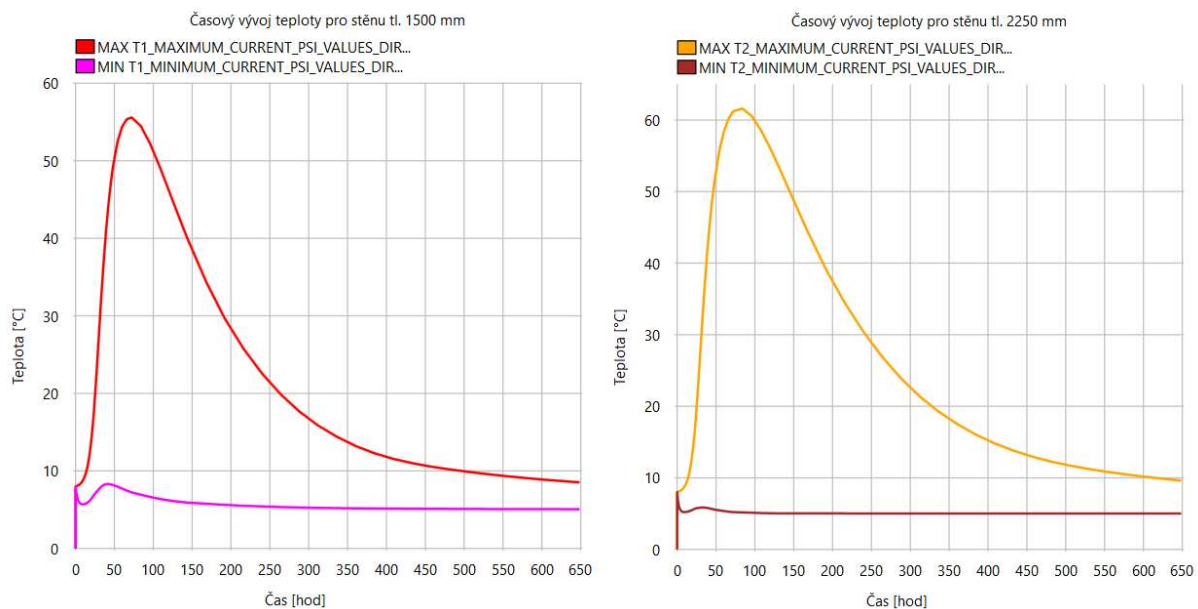


Obrázek 57 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez)



Obrázek 58 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

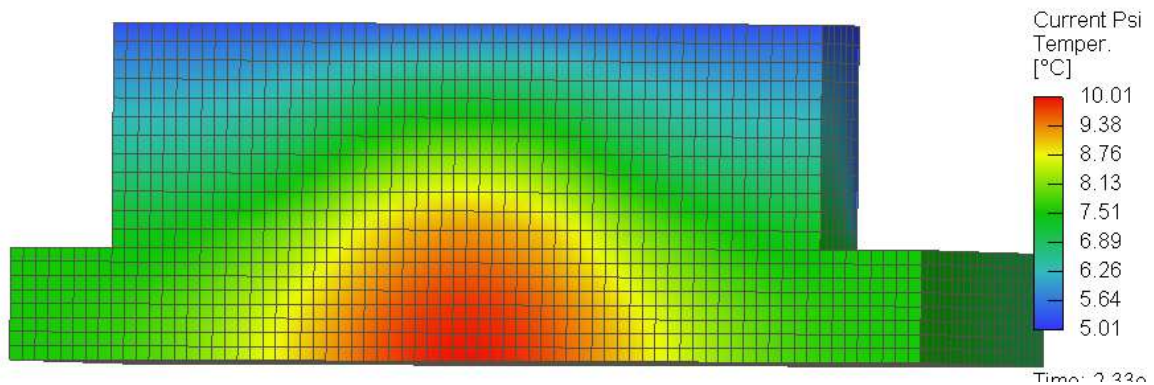
Opět vidíme, že teplo se šíří stejným předpokládaným způsobem. Jádrový beton dosahuje teploty téměř 62 °C, obalový beton na povrchu má teplotu převážně kolem 19 °C. Teplo se pozvolna začíná šířit do základové desky.



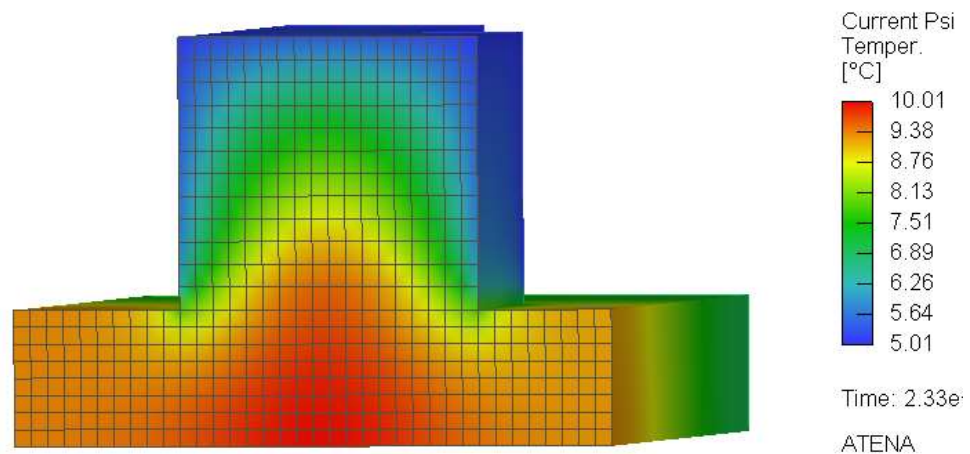
Obrázek 59 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm  
(hodnoty pro stěnu vysokou 2000 mm, zimní betonáž)

Z grafů na obrázku 59 opět vidíme, že největší teplota vzniká ve stěně tl. 2250 mm. Maximální teplota pro stěnu tl. 1500 mm je 56 °C. Opět dochází k zvýšení minimální teploty pro tuto stěnu díky oteplování od jádrového betonu.



Obrázek 60 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez)



Obrázek 61 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Maximální teploty se opět vyskytují v základové desce, ale víme, že z důvodů uvedených výše by reálně byly nižší. Povrchová teplota stěny je shodná s teplotou okolního prostředí. Maximální teploty ve stěně jsou přibližně 9 °C. Šíření tepla je opět stejné jako pro předchozí modely a odpovídá předpokladům.

## 8.7 Shrnutí výsledných výpočtů pro zimní betonáž

Dle očekávání v důsledku nižších teplot se dalo předpokládat, že maximální výška záběru pro betonáž bude vyšší než pro letní betonáž. To také bylo prokázáno vypočteným modelem pro zimní betonáž. Z grafů pro časové průběhy teplot lze sledovat, že teplota klesá rychleji po okamžiku dosažení svého maxima.

## 9 Beton z Jaderné elektrárny Civaux

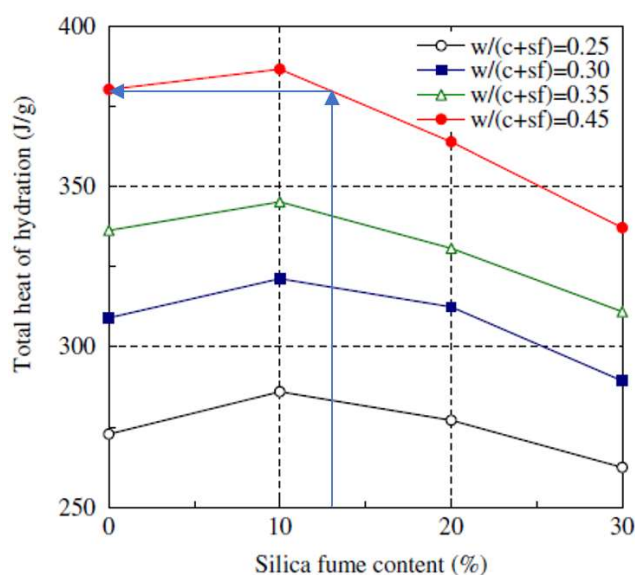
### 9.1 Složení betonu z JE Civaux

Beton pevnostní třídy C45/55. Betonová směs je tvořena z portlandského směsného cementu s vápencem CEM-II/A-LL 42,5 R. Uvažované množství vápence v cementu je 13 %. Ve směsi je použito kamenivo z lokality Arlaut (drcený polotvrdý vápence). Jako interní příměs je použita vápenná moučka v dávce  $87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , jako latentně hydraulická příměs pak mikrosilika v dávce  $40,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tato receptura betonu je navržena pro nízký vývoj hydratačního tepla.

Vápenná moučka je uvažována jako filer, mikrosilika díky latentní hydraulicitě přispívá k vývoji hydratačního tepla a je nutno ji částečně zahrnout do množství cementu. V naší použité směsi tvoří mikrosilika  $40,3/(40,3+266) = 13,2 \%$  složek pojiva. Vodní součinitel je poté tedy  $w/(c+sf) = 161/(40,3+166) = 0,53$ .

Z dat naměřených Kadrim a Duvalet [49] (obr. 62) lze odečíst, že pro  $w/(c+sf) = 0,45$  odpovídá hydratační teplo vyvinuté pojivem s 13,2 % podílem mikrosiliky téměř přesně hydratačnímu teplu vyvinutému čistým portlandským cementem. Pro vyšší  $w/(c+sf)$  lze z tendence křivek pro jednotlivé hodnoty  $w/(c+sf)$  předpokládat, že by hydratační teplo vyvinuté pojivem s 13,2 % mikrosiliky bylo mírně nižší, bezpečně však budeme předpokládat identickou hodnotu vyvinutého hydratačního tepla.

Z praktického hlediska to znamená, že bychom měli pro modelování hydratace navýšit množství cementu na  $266+40,3 = 306,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Další změnou bude snížení potenciální hodnoty hydratačního tepla vyvinutého směsným cementem CEM-II/A-LL 42,5 R o 13 % oproti portlandskému cementu CEM I 42,5 R, a to následovně:  $0,87\cdot 495330 = 430937 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ .



Obrázek 62 - Celkové hydratační teplo v závislosti na pojivovém součiniteli a množství mikrosiliky [49]

Materiálová charakteristika	Hodnota	Zdroj hodnoty
CEMENT MASS [kg]	306,3	[46]
AGGREGATE MASS [kg]	1886	[46]
FILLER MASS [kg]	87	[46]
CEMENT DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3110	[32]
WATER DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1000	-
AGGREGATE DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2370	[48]
FILLER DENSITY [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2711	[47]
C AGGREGATE TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2310000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
C FILLER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2200000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
C CEMENT TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2420000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
C WATER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	4180000	[24] str. 284, Tab. 7.3-2
WF [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	161	[46]
H80 [-]	0,8	[24] str. 283
W80 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	80	[24] str. 284
K AGGREGATE TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1,3	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K FILLER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1,3	-
K CEMENT TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1,55	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K WATER TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,604	[24] str. 285, Tab. 7.3-3
K AIR TEMP TEMP [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,026	[34]
TEMP0 ( $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [K]	234,18	[24] str. 283
A WV [-]	17,08	[24] str. 283
A W [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$ ]	0,6	[24] str. 284
MI WV [-]	235	[24] str. 284
TEMP0 ICE ( $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [K]	272,44	[24] str. 283
A WV ICE [-]	22,44	[24] str. 283
B1 [ $\text{h}^{-1}$ ]	1,2667	[24] str. 283, Obr. 7.3
B2 [-]	0,000008	[24] str. 283, Obr. 7.3
ALPHAINF [-]	0,85	[24] str. 283, Obr. 7.3
ETA $\eta$ [-]	7,4	[24] str. 283, Obr. 7.3
A [-]	7,5	[24] str. 283
EA [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	38300	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
QH POT [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	430937	[24] str. 283, Tab. 7.3-1
QW POT [-]	0,24	[31]
TEMPERATURE CONST [ $^{\circ}\text{C}$ ]	15	-
HUMIDITY CONST [-]	0,9728	Defaultní hodnota ATENA

Tabulka 12 - Vstupní parametry modelu CERHYD pro beton z JE Civaux

Typ složky	Jednotkové množství [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Kamenivo Arlout 12,5/25 mm	791
Kamenivo Arlout 4/12,5 mm	309
Kamenivo Arlout 0/5 mm	786
Portlandský cement CEM II/A-LL 42,5 R	266
Vápenná moučka	87
Mikrosilika	40,3
Voda	161

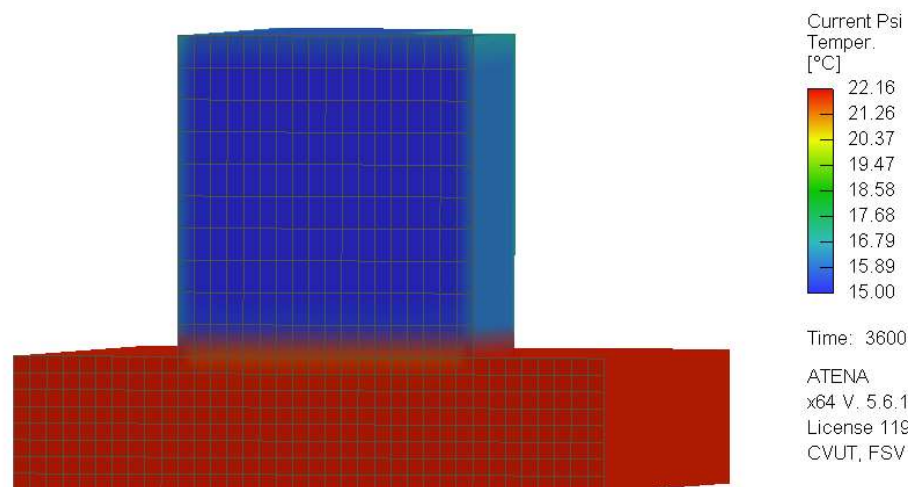
Tabulka 13 - Základní složení betonu z JE Civaux [46]

## 9.2 Okrajové podmínky pro letní betonáž

Okrajové podmínky jsou shodné s OP pro letní betonáž betonové směsi z JE Temelín. Nejdůležitějším faktorem je opět okolní teplota vzduchu 22 °C. Výpočetní síť je zahuštěna stejně jako pro předchozí modely, tedy po 12,5 mm, popř. pokud výška modelu je vyšší než 2 m, je krok sítě po výšce zvětšen na 20 mm. Časové intervaly výpočtu jsou stejné jako v tabulce č. 7.

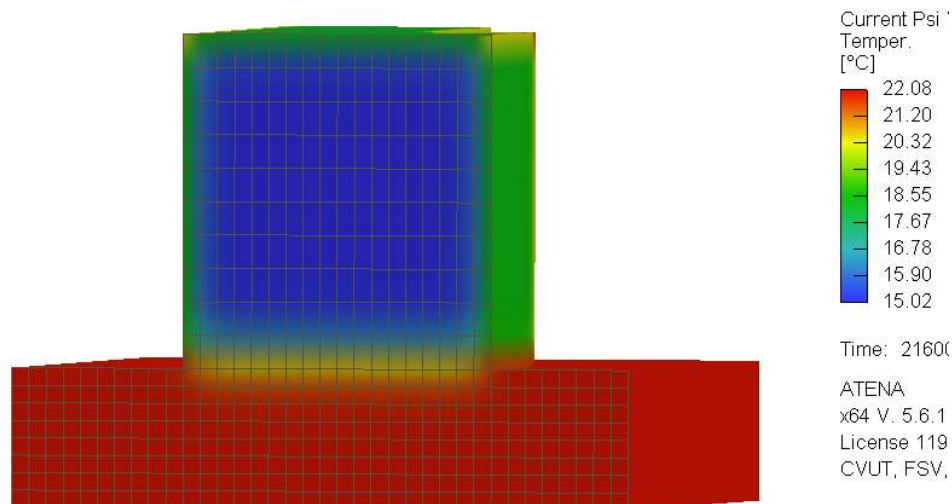
## 9.3 Výsledné teploty pro letní betonáž

Maximální přípustná výška dle vypočítaného modelu byla stanovena na 2,39 m. Takto vysoký záběr vyhovující našim podmínkám je způsobený faktem nižšího obsahu cementu v betonové směsi a také fakt, že tato betonová směs byla navržena na nízký vývoj hydratačního tepla. Také OP, které simulují letní období (hlavně okolní teplota vzduchu), způsobují ohřívání obalového betonu a tím pádem nedochází k tak vysokému teplotnímu spádu. Pro zpřesnění tohoto vlivu by bylo nutno simulovat vývoj teploty vzduchu během dne, což však přesahuje rámec této práce.



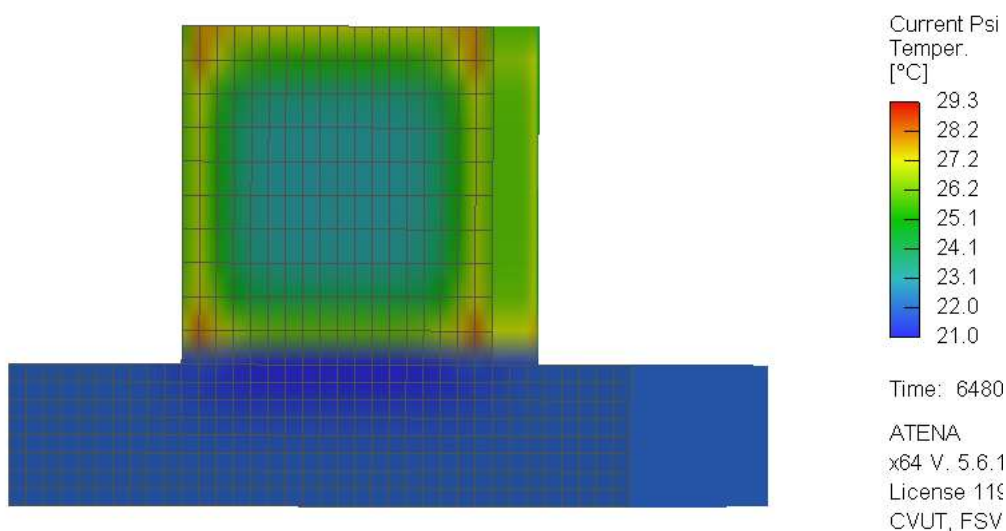
Obrázek 63 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Po první hodině lze vidět začínající interakci mezi vyzrálou základovou deskou a čerstvým betonem. Teplota na vnějších plochách betonové stěny se zvýšila na teplotu přibližně 16 °C.



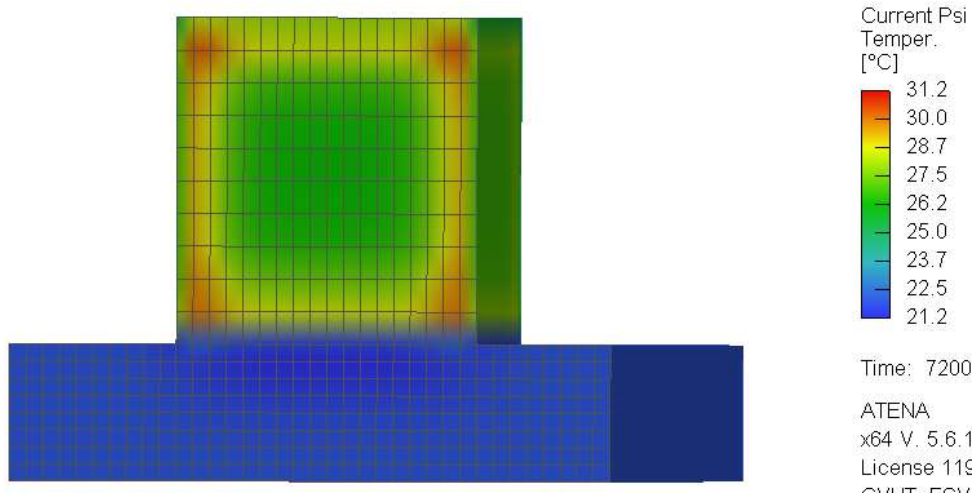
Obrázek 64 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Po šesti hodinách lze pozorovat, že začíná docházet k ohřívání obalového betonu. Z původní teploty 15 °C se hodnota zvýšila na teplotu přibližně 19 °C.

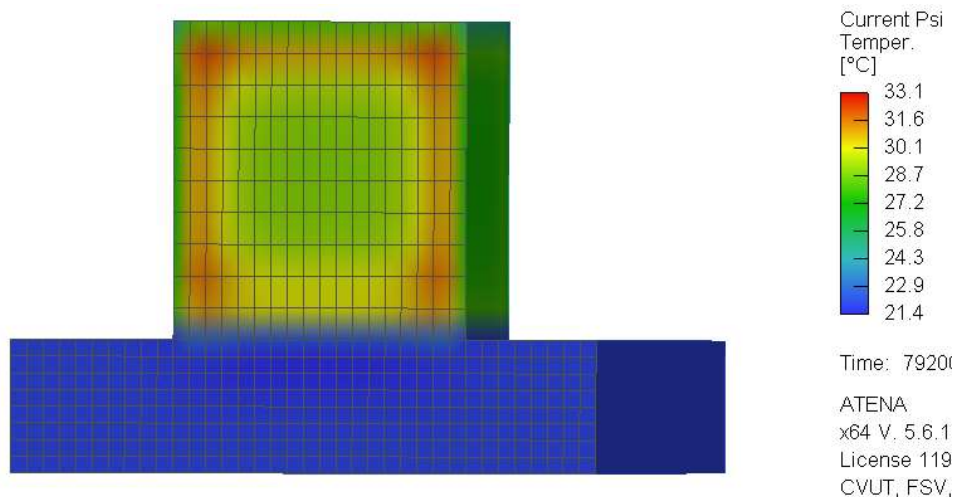


Obrázek 65 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

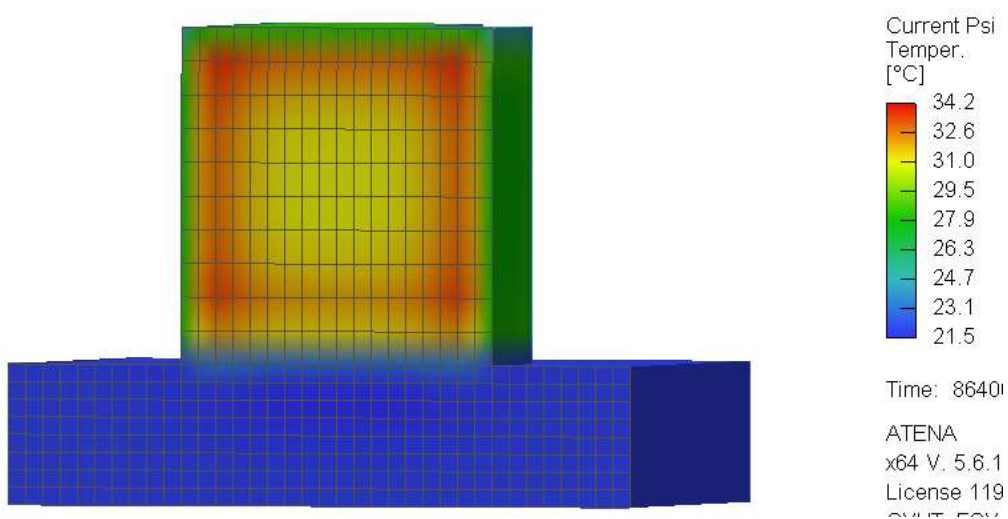
Po 18 hodinách na obrázku 65 vidíme, že v konstrukci se začíná vytvářet teplo generované hydratačním procesem. Teploty jsou prozatím vyšší v rozích konstrukce, kde se sčítá vliv hydratace s vlivem teploty okolního prostředí. Postupně by se měla výrazněji zvyšovat teplota ve středu konstrukce. Beton na kontaktu stěny a základové desky má teplotu 21 °C, což je přibližně o 0,5 °C více než v čase 6 hodin. Dochází tedy k vyrovnávání teplot v tomto místě. Pro jistotu o správném šíření tepla si v následujícím obrázku ukážeme řez v čase 20, 22 a 24 hodin po betonáži.



Obrázek 66 - Teploty v konstrukci v čase 20 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



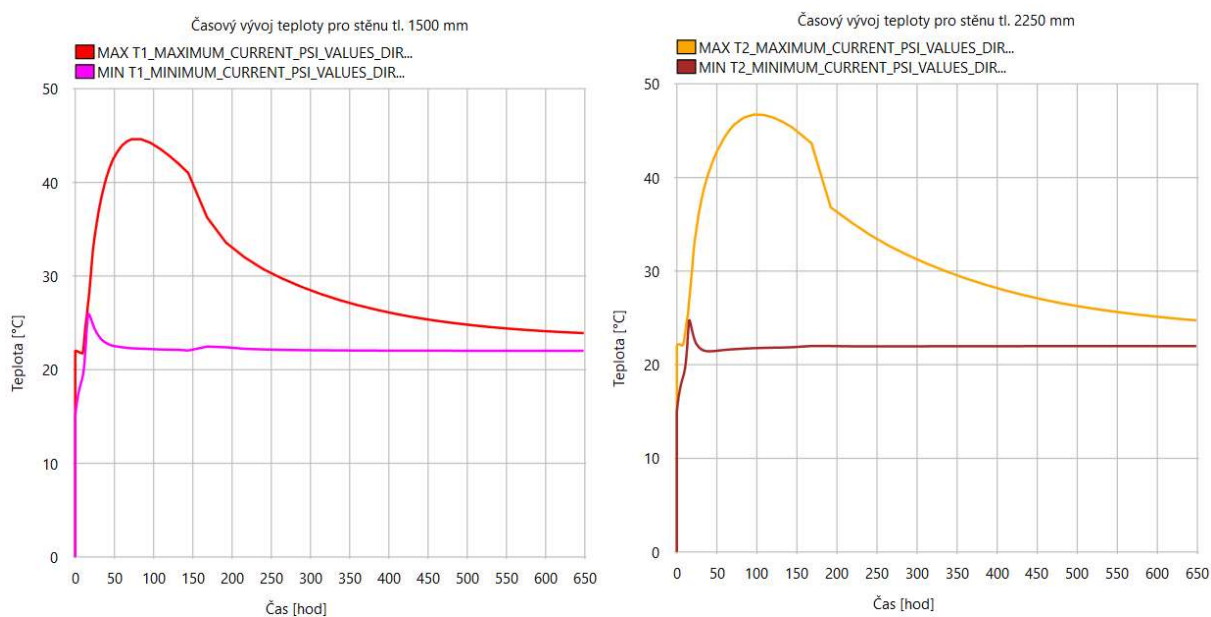
Obrázek 67 - Teploty v konstrukci v čase 22 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



Obrázek 68 - Teploty v konstrukci v čase 24 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



Z obrázků 66 až 68 vidíme, že se začíná výrazně generovat teplo ve středu konstrukce. Maximální teploty jádrového betonu je dosaženo v čase 96 hodin (viz obrázek 69). Pro ověření toho, že tento časový vývoj je správný, použijeme fakt, že pro model popsáný v kapitole 8.3.3 je maxima dosaženo v čase 72 hodin a druhý fakt, že betonová směs pro tento model byla vyvinuta pro nízký vývoj hydratačního tepla. Z těchto dvou argumentů se dá vyvodit, že model pracuje správně.

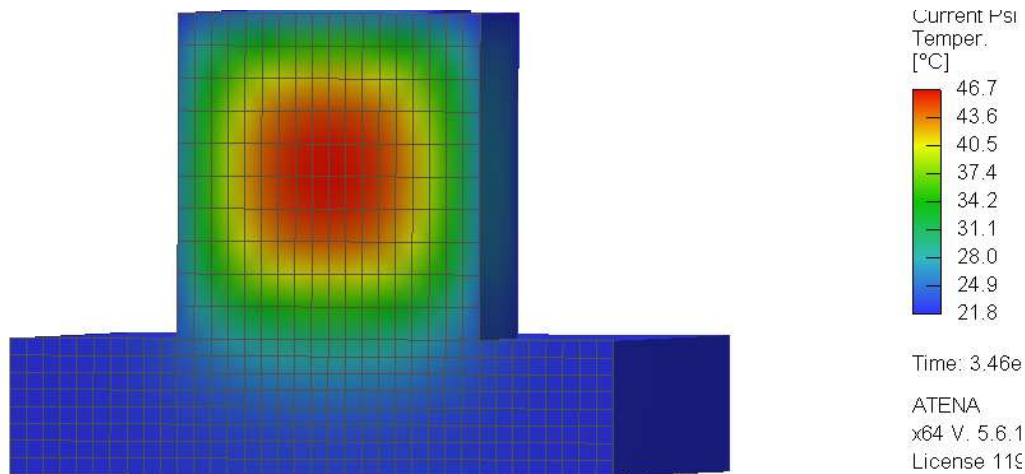


Obrázek 69 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

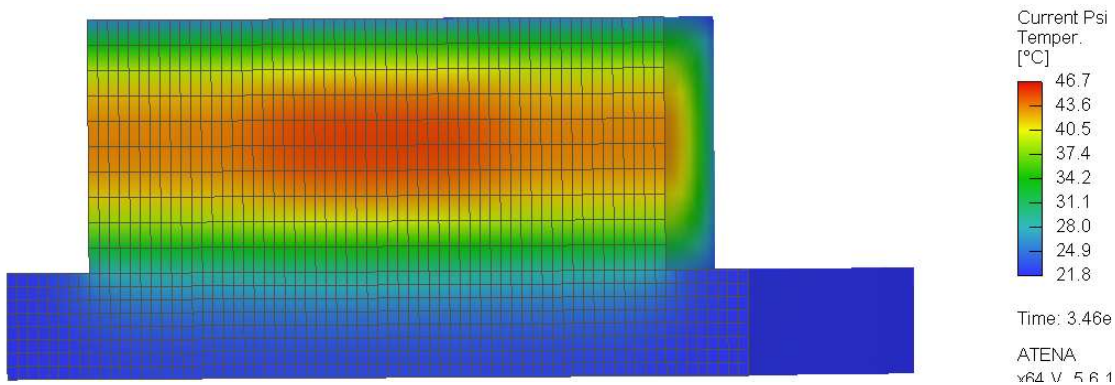
Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm (hodnoty pro stěnu vysokou 2390 mm, letní betonáž)

Z grafu pro stěnu tl. 2250 mm na obrázku 69 dostáváme maximální teplotu 46,7 °C. Pro ověření modelu provedeme opět odhad maximální teploty z nomogramu z práce [15] pro stěnu tl. 2000 mm. Výchozím bodem je množství pojiva 306,3 kg·m<sup>-3</sup>. Pro orientační stanovení budeme velmi zjednodušeně uvažovat, že vápenec a křemičitý úlet mají na vývoj teplot obdobný vliv jako popílek, jehož podíl na množství pojiva je zohledněn v nomogramu. Použijeme tedy křivku odpovídající 25 % podílu popílku v pojivu, pro letní betonáž dostáváme hodnotu přibližně 56 °C (odchylka 17 %). Teplotní spád v okamžiku dosažení maximální teploty je následující:

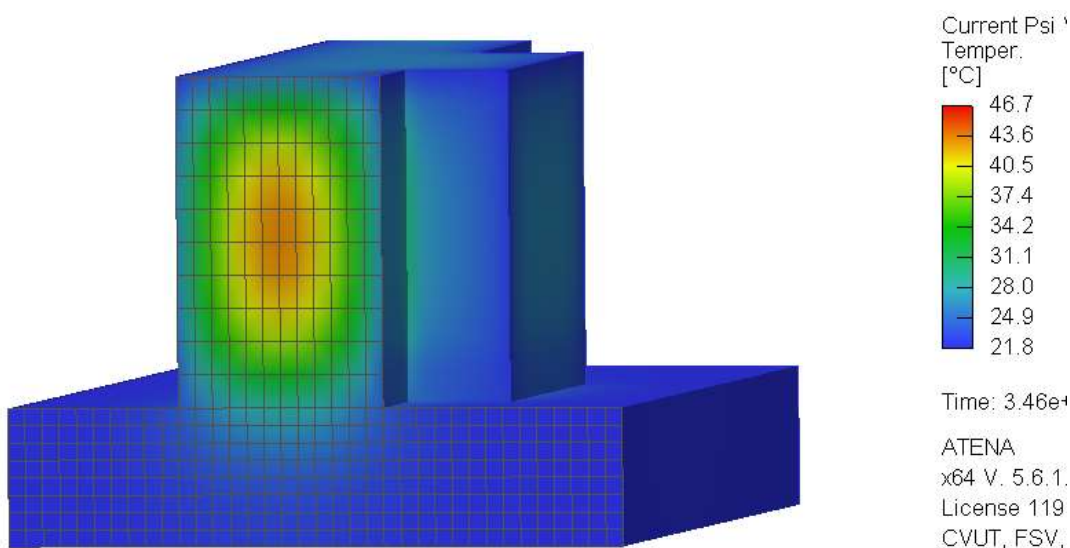
$$\Delta T_{2,letní} = T_{int} - T_{ext} = 46,7 - 21,8 = 24,9 \text{ °C} < 25 \text{ °C} \quad (69)$$



Obrázek 70 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

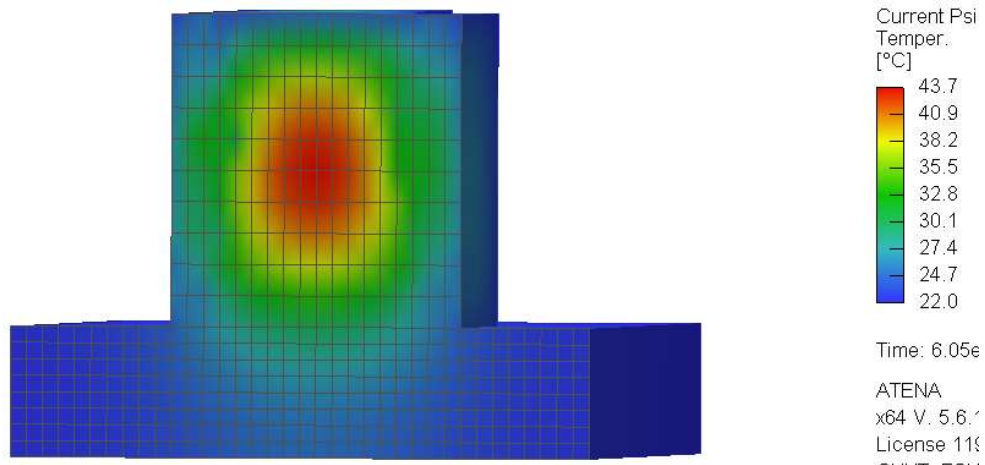


Obrázek 71 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez)

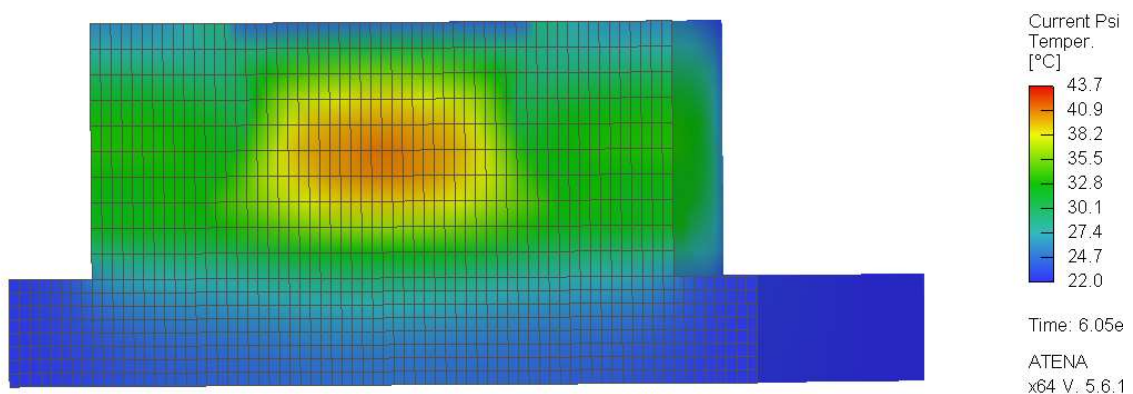


Obrázek 72 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm)

Z obrázků 70 až 72 můžeme vidět, že maximální teplota vzniká ve stěně tl. 2250 mm (to odpovídá grafům na obrázku 70). Maximální teplota je tedy 46,7 °C a vnější povrchy mají teplotu okolo 22 °C. Šíření tepla opět odpovídá předpokladům. Vidíme, že v místě styku základové desky a stěny teplota dosahuje 28 °C.

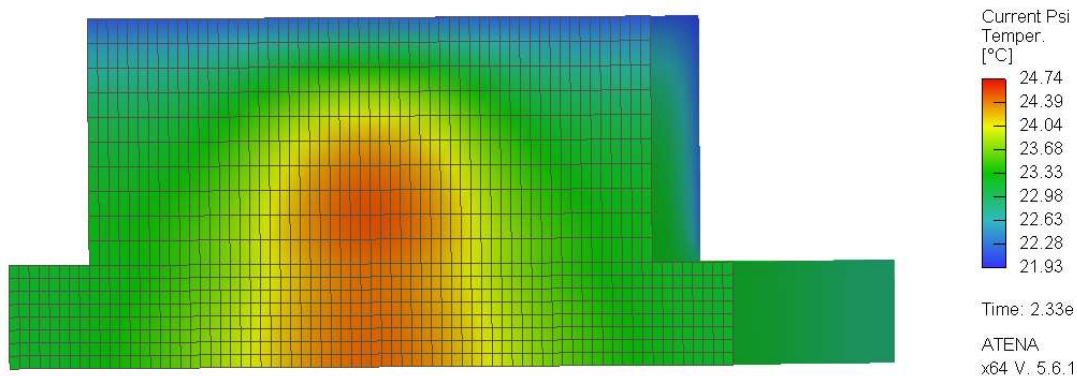


Obrázek 73 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

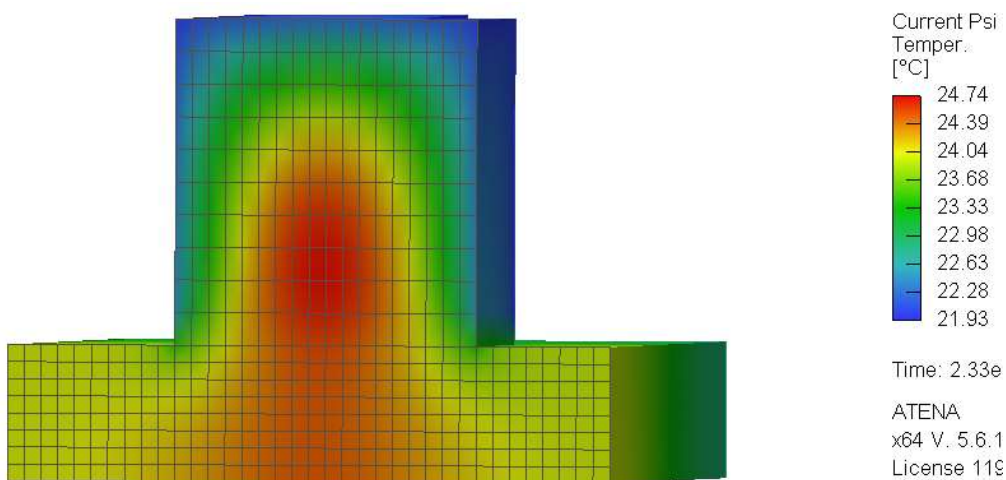


Obrázek 74 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez)

Můžeme pozorovat, že po týdnu od betonáže je maximální teplota jádrového betonu 43,7 °C. V čase 96 hodin byla maximální teplota pouze o 3 °C vyšší, takto nízký pokles způsobuje samotná velikost konstrukce. Velké objemy mění svoji teplotu pomaleji než objemy menší. Ale vidíme, že převážná část stěny má teploty v rozmezí  $33 \pm 3$  °C. Z grafů časových průběhů extrémních hodnot teplot (viz obrázek 69) je zřejmé, že po tomto období už nedochází k žádným podstatným změnám, proto následující obrázky budou ukazovat teploty po 28 dnech od betonáže.



Obrázek 75 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez)



Obrázek 76 – Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Vidíme, že maximální teplota po 28 dnech je necelých 25 °C. Základová deska je také oteplena na 24 °C, v reálu by opět byla teplota jiná, ovlivněná působením okolní zeminy a ostatních faktorů. Šíření tepla odpovídá předpokladům a předchozím modelům.

#### 9.4 Shrnutí výsledných výpočtů pro letní betonáž

Při hledání maximální povolené výšky byla stanovena hodnota 2390 mm. Jak je uvedeno v úvodu pro tuto betonovou směs, byla navržena na nízký vývoj hydratačního tepla. Dalo se tedy předpokládat, že maximální výška bude vyšší než pro předchozí betonovou směs z JE Temelín. Betonová směs použita v JE Civaux patří mezi nejmodernější receptury, které se dají v literatuře dohledat. Naše hodnoty vycházejí z dat, která jsou dostupná z literatury, mají tudíž pouze orientační charakter. Pro stanovení přesnějších hodnot by bylo zapotřebí podrobit betonovou směs experimentálními pokusy a stanovit přesné hodnoty vstupních parametrů modelu, zejména potenciálního hydratačního tepla.

Hodnota maximálního záběru je tedy pouze orientační a nelze s jistotou tvrdit, že odpovídá reálnému chování betonu pro takto masivní konstrukci. Protože jsme stanovili maximální přípustnou výšku větší než 2,0 m, nebudeme pro tuto betonáž porovnávat jiné modely jako v předchozím případě.

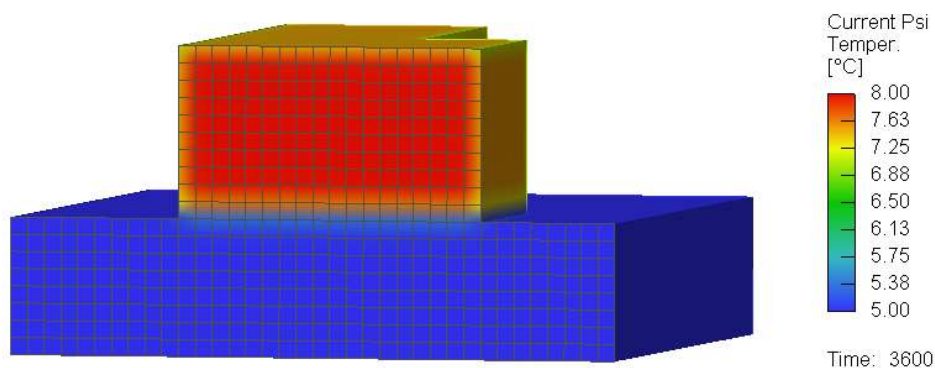
## 9.5 Okrajové podmínky pro zimní betonáž

OP pro zimní betonáž jsou opět stejné jako pro předchozí modely zkoumané při letní betonáži. Vstupní parametry betonu jsou také shodné, pouze počáteční teplota je 8 °C.

## 9.6 Výsledné teploty pro zimní betonáž

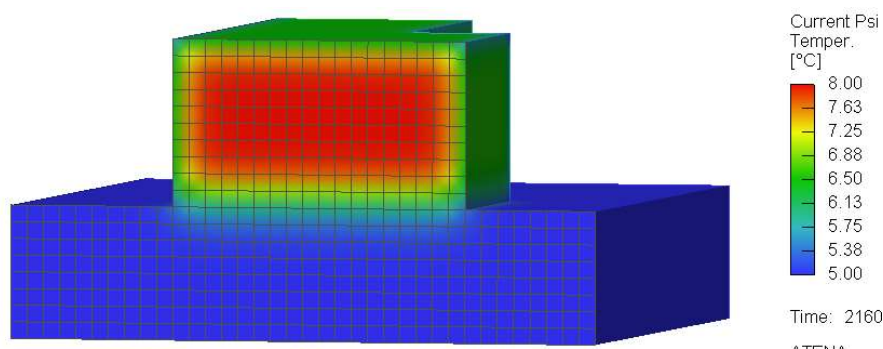
### 9.6.1 Stěna s maximální přípustnou výškou

Opět po několika iteračních výpočtech pro různě vysoké modely byla stanovena maximální přípustná výška 1,26 m. Předpokládané šíření tepla je opět stejné jako pro předchozí zimní betonáž, základová deska bude ochlazovat spodní část betonové stěny a v jádrovém betonu se začne vytvářet hydratační teplo.



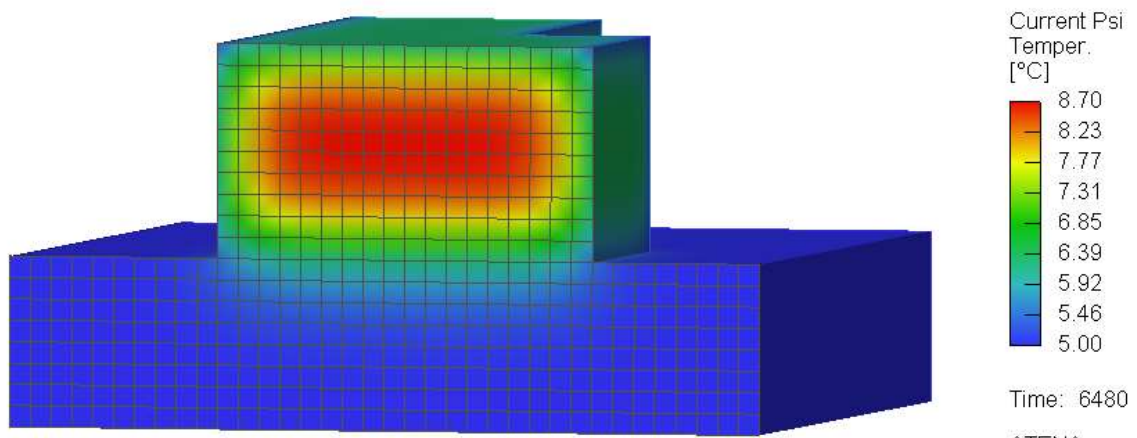
Obrázek 77 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Z obrázku 77 je patrné, že po první hodině po betonáži dochází k ochlazení vnějších povrchů na teplotu 7,6 °C.



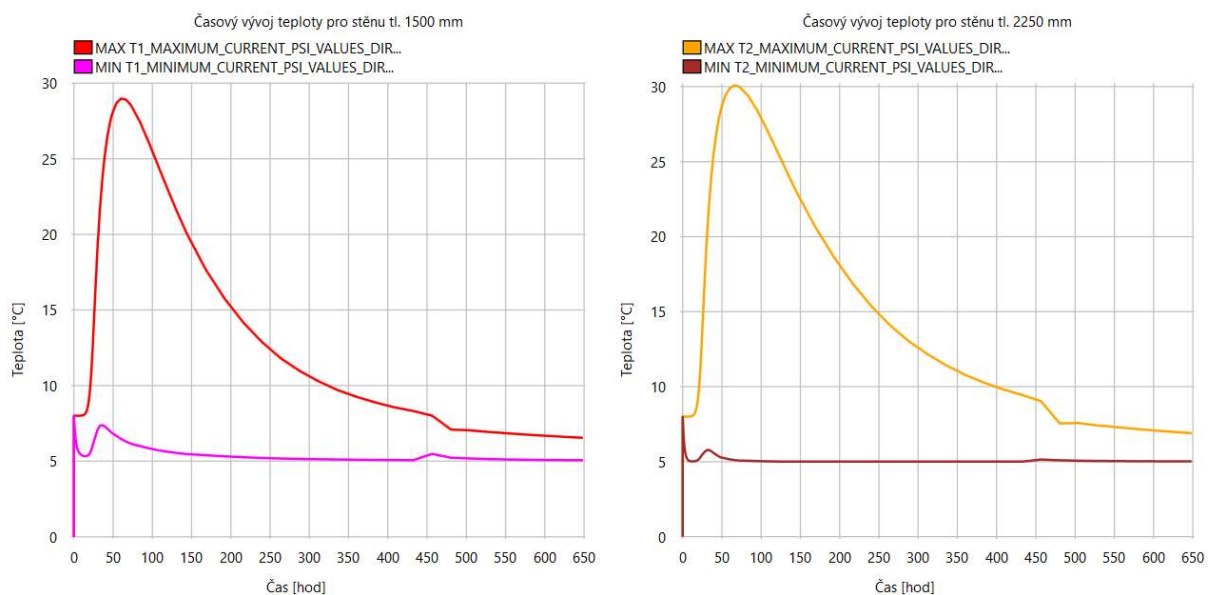
Obrázek 78 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Vidíme, že dochází k ochlazování povrchů, jádrový beton se ještě nezačal oteplovat. Lze si všimnout, že základová deska začíná reagovat s čerstvým betonem.



Obrázek 79 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

Po 18 hodinách je zjevné, že probíhá vyrovnávání teplot mezi stěnou a základem. Jádrový beton dosahuje teploty 8,7 °C.



Obrázek 80 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

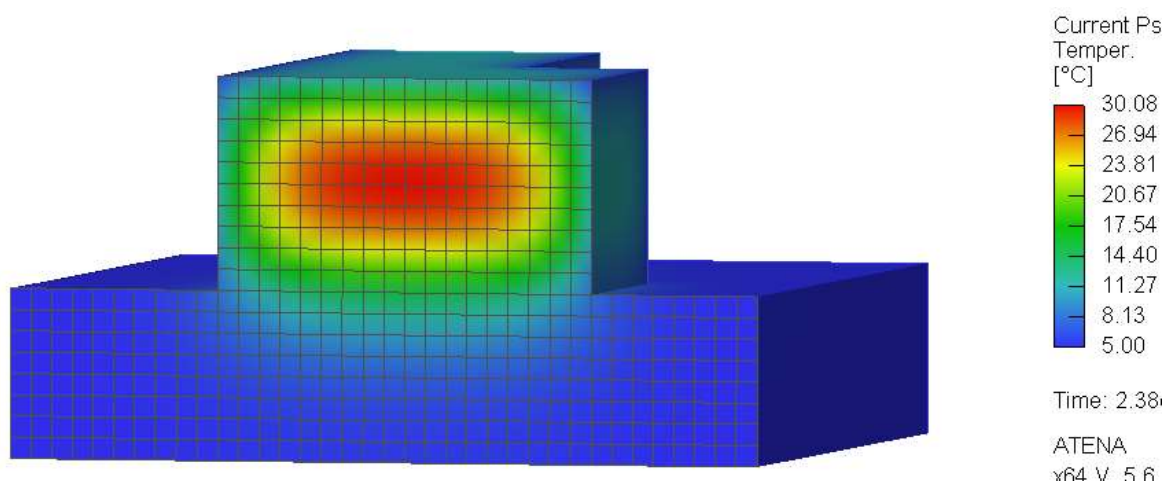
Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm (hodnoty pro stěnu vysokou 1260 mm, zimní betonáž)

Z grafů na obrázku 80 vidíme, že vyšší teplota vzniká opět ve stěně tl. 2250 mm. Maximální hodnota teploty je 30,08 °C v čase 66 hodin. Na grafu v časovém intervalu mezi

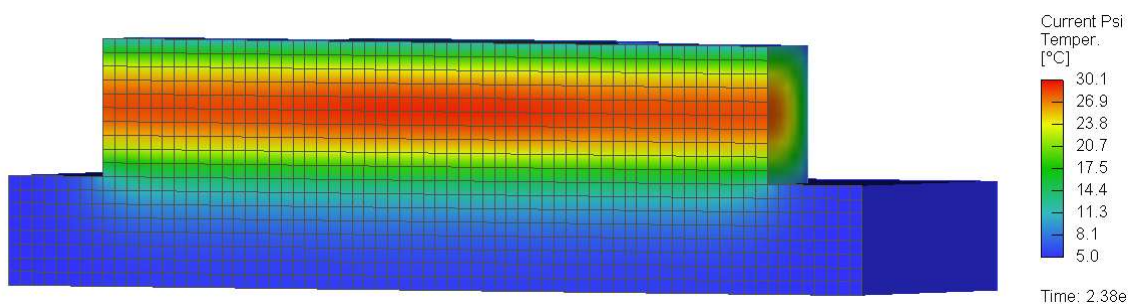
450 a 500 hodinami dochází ke zlomu, tato časová oblast již není důkladně řešena a tento skok je nejspíše způsoben tím, že měření zde probíhá po 24 hodinách. Maximální teplotní spád je stanoven v následující rovnici:

$$\Delta T_{2,zimní} = T_{int} - T_{ext} = 30,08 - 5,11 = 24,97 \text{ } ^\circ\text{C} < 25^\circ\text{C} \quad (70)$$

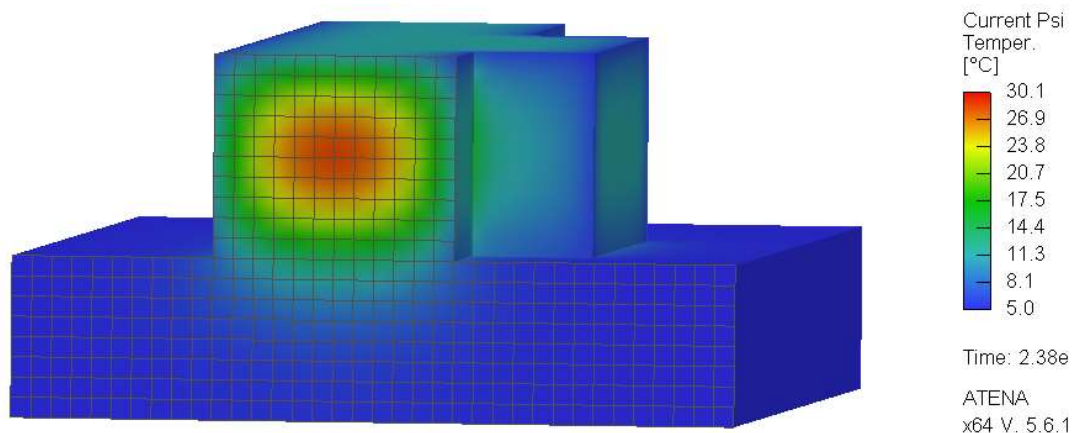
Dostáváme teplotní spád pouze o 0,03 °C nižší, než byla stanovena maximální hodnota. Opět provedeme odhad maximální teploty z nomogramu z práce [15]. Pro množství cementu  $306,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a tloušťku konstrukce 1,25 m dostáváme hodnotu maximální teploty pro zimní betonáž přibližně 35 °C (odchylka 14 %). Následující obrázky ukazují rozložení a hodnoty teplot v okamžiku nejvyšších teplot a největšího teplotního spádu.



Obrázek 81 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

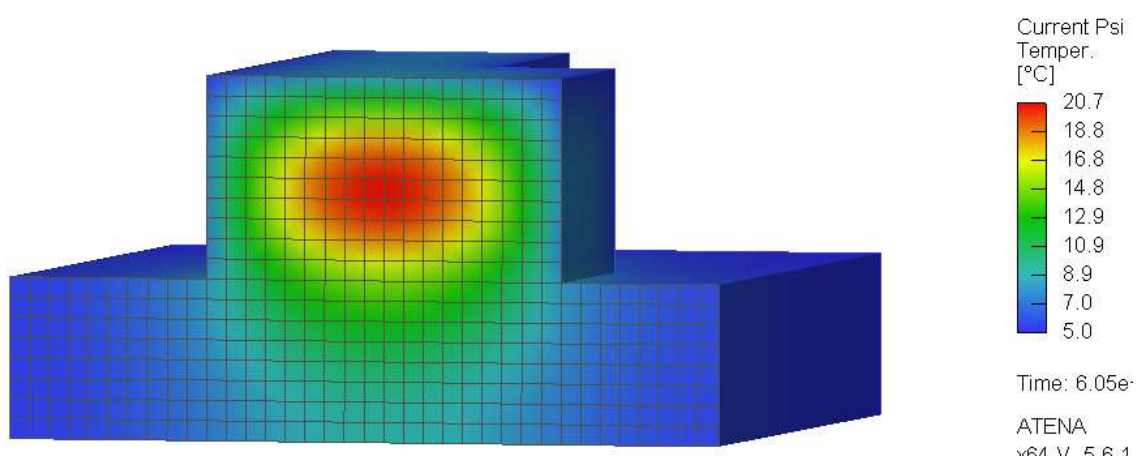


Obrázek 82 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez)

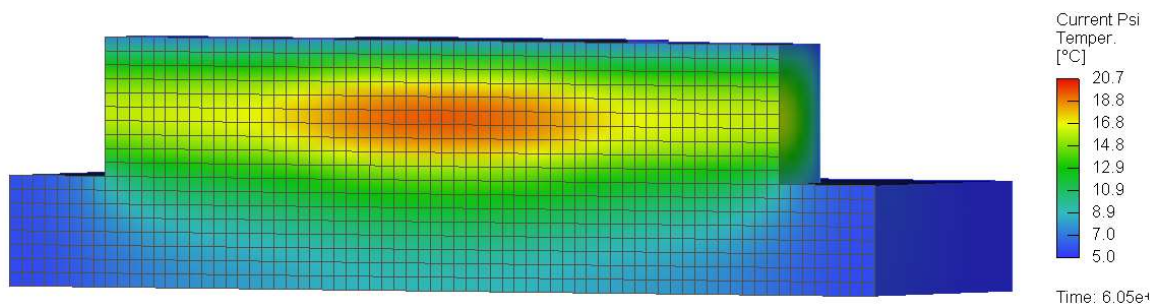


Obrázek 83 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm)

Z obrázků 81 – 83 lze vyčíst, že šíření tepla opět odpovídá našim původním předpokladům. Jádrový beton uvnitř stěn má teplotu 30,08 °C a teploty vnějších povrchů se pohybují okolo 12-14 °C vlivem oteplení od jádrového betonu. Krajiní teploty u hran se pohybují okolo 5 °C. Teplo by se opět mělo postupně šířit do základové desky a celá konstrukce se bude vlivem okolní teploty ochlazovat.



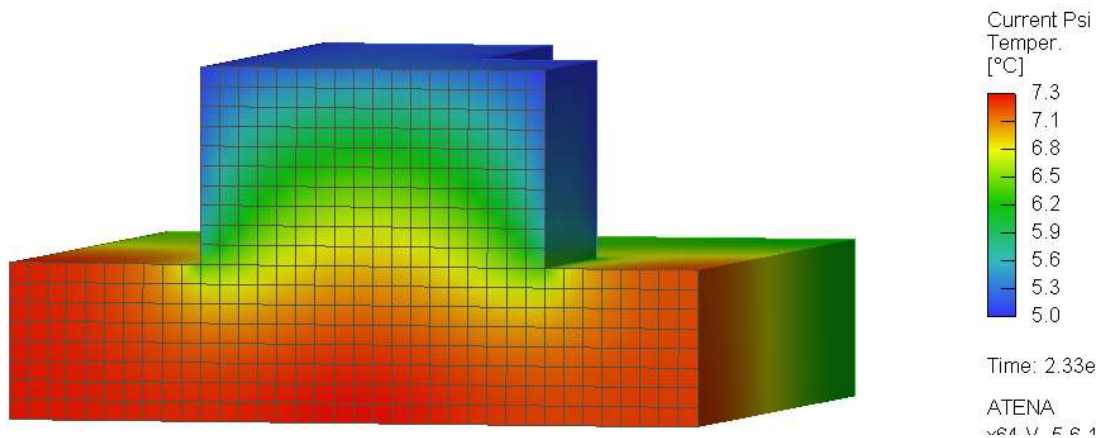
Obrázek 84 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



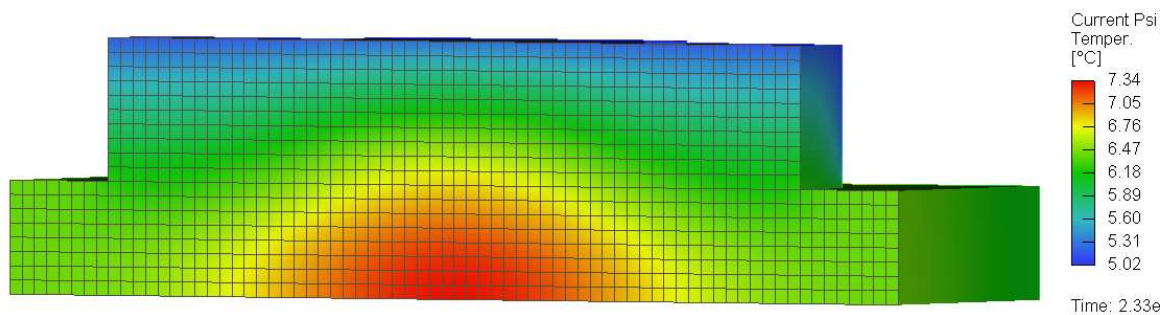
Obrázek 85 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez)



Po týdnu je maximální teplota jádrového betonu necelých 21 °C. Teplo se rozšířilo do základové desky a vnější teplota povrchů se přibližuje k hodnotě teploty okolního prostředí, která je 5 °C.



Obrázek 86 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)



Obrázek 87 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez)

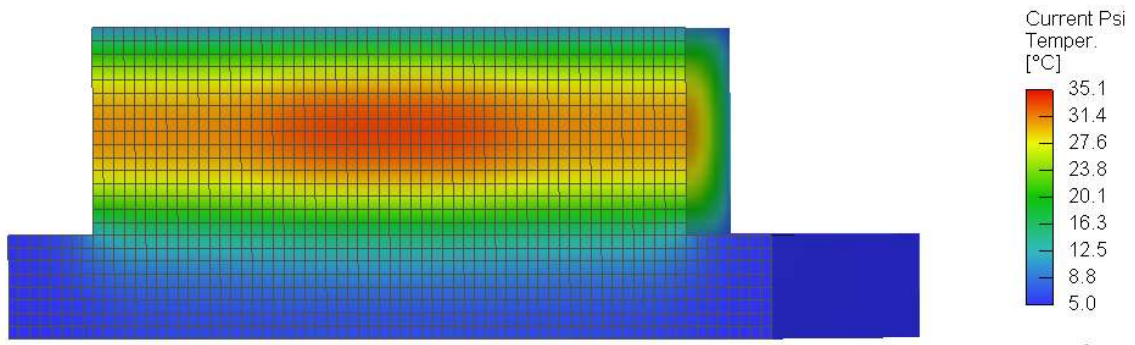
Po 28 dnech jsou hodnoty teplot vnějších povrchů 5 °C a maximální teplota ve stěně je přibližně 7 °C. To jsou stejné hodnoty jako pro předchozí zimní betonáž. Maximální hodnota v základové desce je 7,34 °C. Ve skutečnosti by byla jiná, viz kapitola 8.3.1, důvody jsou upřesněné v závěru.

Protože naše maximální přípustná výška byla stanovena na 1260 mm, bude proveden výpočet pro stěnu vysokou 2000 mm.

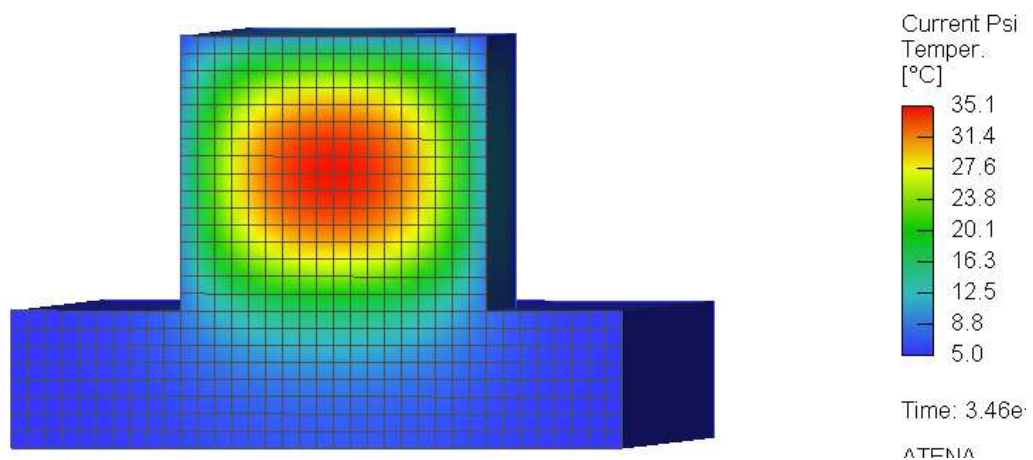
### 9.6.2 Stěna vysoká 2000 mm

Z nomogramu z práce [15] odhadneme opět maximální teplotu. Ta pro konstrukci tloušťky 2,0 m je přibližně 42 °C. Naše maximální teplota je 35,1 °C (odchylka 17 %). Největší hodnota teplotního spádu je stanovena následovně:

$$\Delta T_{2,zimní(2000\text{ mm})} = T_{int} - T_{ext} = 35,1 - 5,1 = 30\text{ °C} > 25\text{ °C} \quad (71)$$

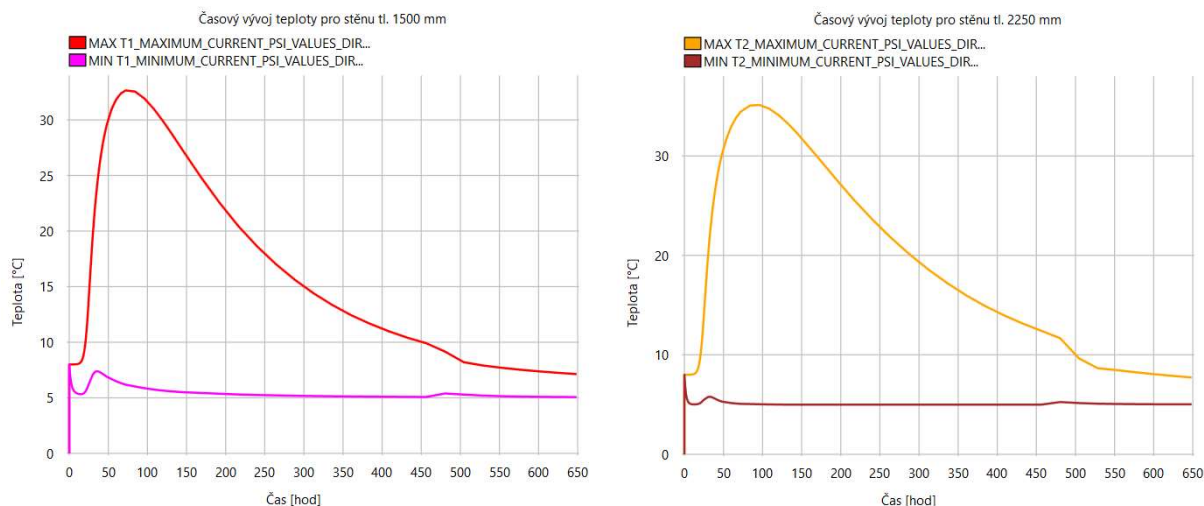


Obrázek 88 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez)



Obrázek 89 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm)

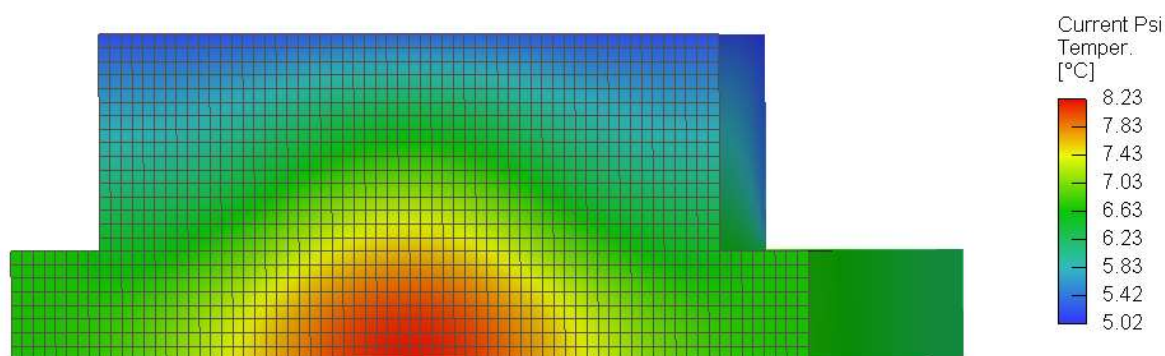
Šíření tepla opět odpovídá předpokladům. Maximální teploty dosahují 35 °C a vnější povrchy mají teplotu 5 °C.



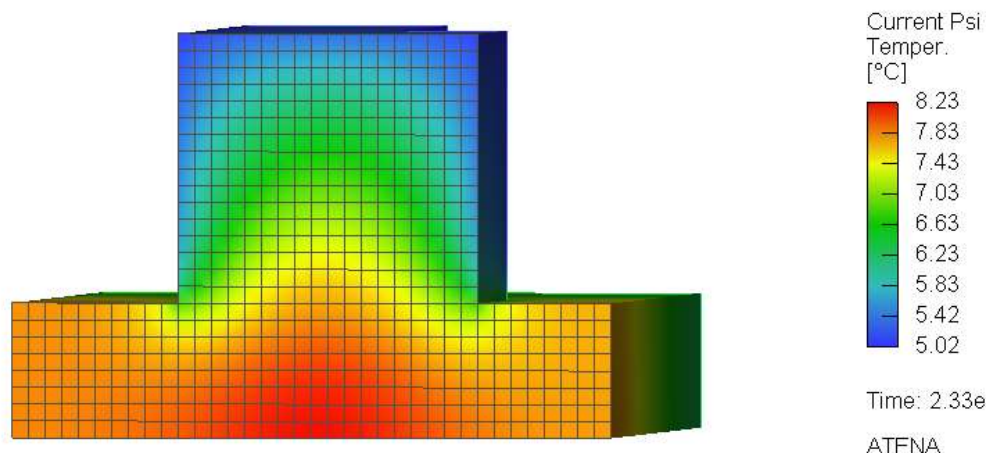
Obrázek 90 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm

Vpravo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (žlutá) a minimální teploty obalového betonu (hnědá) stěny tl. 2250 mm  
(hodnoty pro stěnu vysokou 2000 mm, zimní betonáž)

Z grafů na obrázku 90 vidíme, že největší teplota vzniká ve stěně tl. 2250 mm a dosahuje již zmíněné hodnoty 35,1 °C. Ve stěně tl. 1500 mm je maximální teplota 32,7 °C. Také lze vyčíst, že vnější povrchy se rychle ochladí vlivem okolní teploty a už nejsou dále ovlivněné teplotou jádrového betonu.



Obrázek 91 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez)



Obrázek 92 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tů. 2250 mm)

Po 28 dnech se opět nejvyšší teplota vyskytuje v základové desce s hodnotou 8,2 °C. V betonové stěně se maximální teploty pohybují okolo 7,5 °C. Povrchové teploty jsou shodné s teplotou okolního prostředí.

## 9.7 Shrnutí výsledných výpočtů pro zimní betonáž

Dle očekávání byla díky faktoru nízkého vývoje hydratačního tepla stanovena maximální výška záběru vyšší než pro předchozí betonovou recepturu. Pro betonovou směs z JE Civaux byla pro zimní období stanovena maximální výška 1260 mm. Z grafů pro časové průběhy můžeme vidět, že povrchová teplota klesá rychleji po dosažení maximální hodnoty než pro případ letní betonáže.

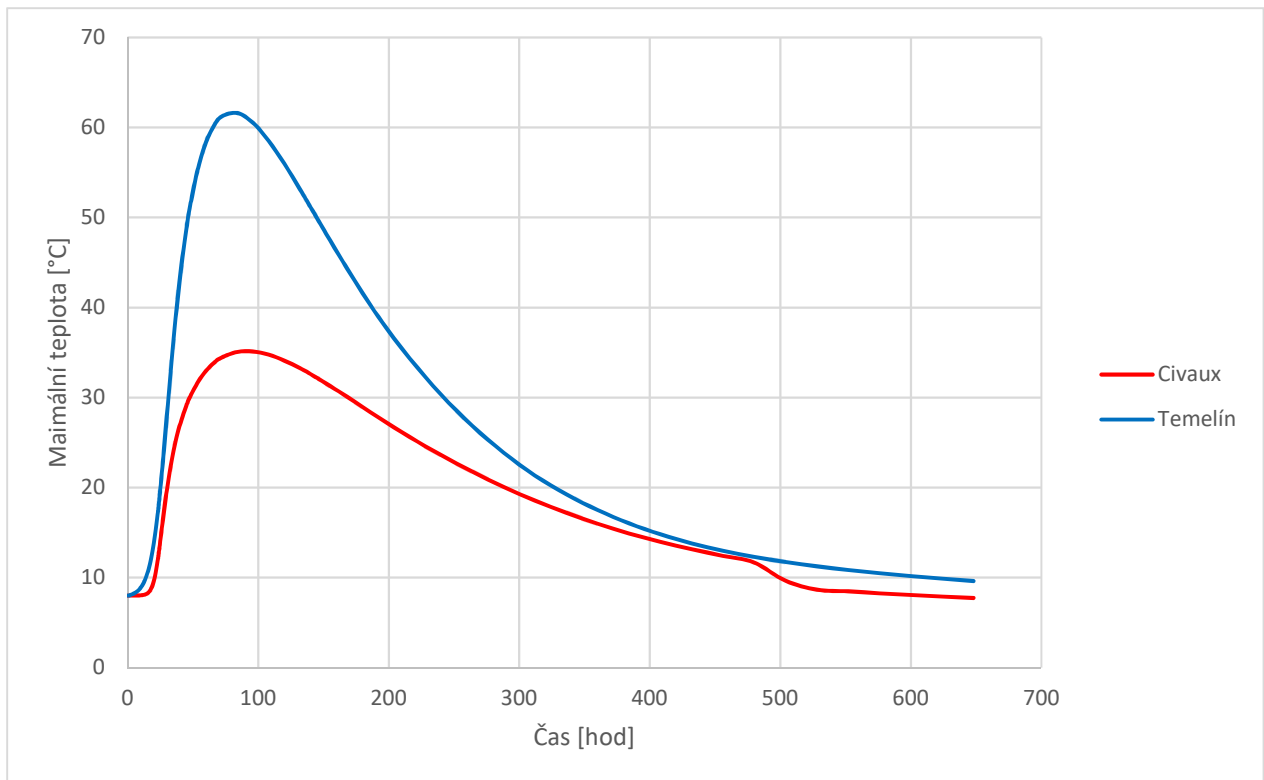
## 10 Globální shrnutí výpočtů

V této práci byly zkoumány vývoje teploty v betonu pro masivní betonové konstrukce, podařilo se namodelovat a stanovit požadované záběry pro betonáže pro dvě různé betonové směsi za různých podmínek. V tabulce 14 jsou shrnuty důležité hodnoty pro všechny spočítané modely.

Beton	Období	Výška [mm]	Max. teplota [°C]	Čas pro max. teploty [hod]	Teplotní spád [°C]
JE Temelín	Léto	550	47	30	24,1
		1500	70,7	54	49,2
		2000	77,3	72	55,4
	Zima	670	30	54	24,2
		1500	54,6	72	49,3
		2000	61,6	84	56,4
JE Civaux	Léto	2390	46,7	96	24,9
	Zima	1260	30,08	66	24,97
		2000	35,1	72	30

Tabulka 14 - Shrnutí důležitých hodnot pro všechny modely

Z tabulky č. 14 je patrné, že pro beton z JE Civaux jsme dostali větší výšky modelů, které vyhovují našim limitním podmínkám (tj. max. teplotní spád = 25 °C, max teplota betonu = 70 °C). Beton z JE Civaux obsahuje menší množství cementu a betonová směs je navržena na nízký vývoj hydratačního tepla, je tedy předpokládáno, že limitní výšky pro jednotlivé podmínky budou vyšší. Pro srovnání vývoje maximálních teplot je na obrázku 93 graf pro zimní betonáž (výška 2000 mm) se stejnými OP. Vidíme, že beton z JE Temelín se ohřívá rychleji a dosahuje vyšších teplot než beton z JE Civaux s nízkým vývojem hydratačního tepla. Z tohoto důvodu je tedy vhodné pro betonáže masivních konstrukcí využívat speciálně navržené betony, z výpočtu lze odvodit, že to má své opodstatnění.



Obrázek 93 - Časový graf pro maximální teploty během zimní betonáže (výška stěny 2000 mm)

## 11 Závěr

Tato závěrečná práce byla zaměřena na vývoj teplot v masivních betonových konstrukcích. Teoretická část práce je zaměřena na seznámení čtenáře s masivními betonovými konstrukcemi a problémy, které při betonáži těchto konstrukcí mohou nastat a jak jim předejít. Dále jsou v této části popsány matematické nástroje, které pro výpočet využívá software ATENA Science, ve kterém byly provedeny výpočty v praktické části.

V praktické části jsou provedeny výpočty pro dvě odlišné betonové směsi. Výpočty jsou simulovány v letním i v zimním období. Pro obě betonové směsi se podařilo stanovit maximální výšku záběru pro stanovené limitní podmínky a také byly provedeny výpočty vyšších záběrů pro lepší představu chování těchto konstrukcí. Parametry betonových směsí byly převzaty z literatury a simulace okrajových podmínek byly po celý průběh analýzy konstantní.

Při zpracovávání této práce jsem se prakticky naučil pracovat v softwaru ATENA Science, který je v praxi pro tyto účely využíván. Při zpracovávání tohoto tématu bylo nutné nastudovat i některé záležitosti nad rámec učiva studijního oboru Konstrukce a dopravní stavby, což považuji za pozitivní rozšíření mých znalostí do budoucího studia a praxe v oboru.

Jako podněty k další práci navrhuji experimentálně stanovit tepelné parametry betonu, simulovat reálný průběh teplot okolního prostředí v čase během výpočtu a vytvořit sdružený termo-mechanický model, kterým budou stanoveny přesné limitní velikosti teplotních spádů s ohledem na vývoj tahové pevnosti betonu a vznik trhlin. Vhodné by také bylo se podrobněji zabývat postupem betonáže a stanovit, kdy je možné začít s betonáží dalšího záběru s ohledem na teplo generované nově nabetonovanou částí. Tyto podněty by mohly být zpracovány v navazující diplomové práci.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Hráz nádrže Lipno [9] .....	12
Obrázek 2 - Stěnové pilíře [8] .....	12
Obrázek 3 - Tvrz Hanička [10] .....	12
Obrázek 4 - Kontejnment 2. bloku Ostrověcké JE, Bělorusko [7].....	13
Obrázek 5 - Jádrový beton (červeně) a obalový beton (světle modře) [27].....	14
Obrázek 6 - Hydratační trhliny způsobené vlivem napjatosti .....	14
Obrázek 7 - Krystaly ettringitu [6].....	15
Obrázek 8 - Železobeton poškozený opožděnou tvorbou ettringitu [5].....	15
Obrázek 9 – Princip autogenního smršťování [11] .....	16
Obrázek 10 - Závislost mezi vodním součinitelem s pevností v tlaku [16] .....	18
Obrázek 11 - Trhliny v zahřátém betonu s pevností 75 MPa na 600 °C [17] .....	18
Obrázek 12 - Graf závislosti času a hydratačního času pro T = 15 °C a vlhkost 80 % [24]....	24
Obrázek 13 – Vodorovný řez tlakovou obálkou s vyznačením řešené oblasti.....	33
Obrázek 14 - Svislý řez tlakovou obálkou .....	33
Obrázek 15 - Řešená oblast.....	33
Obrázek 16 - Půdorys řešené oblasti .....	34
Obrázek 17 - Řez řešenou oblastí.....	34
Obrázek 18 - Nomogram [15] .....	35
Obrázek 19 – Nomogram [15] .....	37
Obrázek 20 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	39
Obrázek 21 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	40
Obrázek 22 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	40
Obrázek 23 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	41
Obrázek 24 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	42
Obrázek 25 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez).....	42
Obrázek 26 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm) .....	42
Obrázek 27 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	43
Obrázek 28 – Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez) .....	43
Obrázek 29 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez).....	44
Obrázek 30 - Teploty konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	44
Obrázek 31 – Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez) .....	45
Obrázek 32 – Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou 2250 mm) .....	45
Obrázek 33 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	46
Obrázek 34 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez).....	46
Obrázek 35 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	47
Obrázek 36 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez).....	48
Obrázek 37 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	48



Obrázek 38 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	49
Obrázek 39 - Teploty po 28 dnech v konstrukci vysoké 2000 mm (podélný řez) .....	49
Obrázek 40 – Teploty po 28 dnech v konstrukci vysoké 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	49
Obrázek 41 – Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	51
Obrázek 42 – Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	51
Obrázek 43 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	52
Obrázek 44 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	52
Obrázek 45 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	53
Obrázek 46 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez).....	53
Obrázek 47 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm) .....	53
Obrázek 48 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	54
Obrázek 49 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez) .....	54
Obrázek 50 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	54
Obrázek 51 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez).....	55
Obrázek 52 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez).....	55
Obrázek 53 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	55
Obrázek 54 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	56
Obrázek 55 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (podélný řez).....	56
Obrázek 56 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 1500 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	57
Obrázek 57 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez).....	57
Obrázek 58 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	58
Obrázek 59 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	58
Obrázek 60 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez).....	59
Obrázek 61 – Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	59
Obrázek 62 - Celkové hydratační teplo v závislosti na pojivovém součiniteli a množství mikrosiliky [49].....	60
Obrázek 63 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	62
Obrázek 64 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (Příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	63
Obrázek 65 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	63
Obrázek 66 - Teploty v konstrukci v čase 20 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	64
Obrázek 67 - Teploty v konstrukci v čase 22 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	64
Obrázek 68 - Teploty v konstrukci v čase 24 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	64
Obrázek 69 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	65
Obrázek 70 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	66

Obrázek 71 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez).....	66
Obrázek 72 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm) .....	66
Obrázek 73 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	67
Obrázek 74 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez) .....	67
Obrázek 75 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez).....	68
Obrázek 76 – Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	68
Obrázek 77 - Teploty v konstrukci v čase 1 hodina (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	69
Obrázek 78 - Teploty v konstrukci v čase 6 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	69
Obrázek 79 - Teploty v konstrukci v čase 18 hodin (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	70
Obrázek 80 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	70
Obrázek 81 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	71
Obrázek 82 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (podélný řez).....	71
Obrázek 83 - Teploty v konstrukci při dosažení maximální teploty (příčný řez stěnou tl. 1500 mm) .....	72
Obrázek 84 - Teploty v konstrukci po týdnu (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	72
Obrázek 85 - Teploty v konstrukci po týdnu (podélný řez) .....	72
Obrázek 86 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (příčný řez stěnou tl. 2250 mm).....	73
Obrázek 87 - Teploty v konstrukci po 28 dnech (podélný řez).....	73
Obrázek 88 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez).....	74
Obrázek 89 - Maximální teploty pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	74
Obrázek 90 - Vlevo: Časový průběh maximální teploty jádrového betonu (červená) a minimální teploty obalového betonu (fialová) stěny tl. 1500 mm .....	75
Obrázek 91 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (podélný řez).....	75
Obrázek 92 - Teploty po 28 dnech pro konstrukci vysokou 2000 mm (příčný řez stěnou tl. 2250 mm) .....	76
Obrázek 93 - Časový graf pro maximální teploty během zimní betonáže (výška stěny 2000 mm) .....	78

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdělení masivních betonových konstrukcí .....	11
Tabulka 2 – Druhy a složení cementů dle normy [12].....	17
Tabulka 3 - Vstupní parametry modelu CERHYD pro beton z JE Temelín.....	36
Tabulka 4 - Základní složení betonu z JE Temelín [30] .....	37
Tabulka 5 - OP pro horní povrch betonu z JE Temelín (letní betonáž) .....	38
Tabulka 6 - OP pro plochu na kontaktu bednění a čerstvého betonu z JE Temelín (letní betonáž).....	38
Tabulka 7 - OP pro plochu na kontaktu ocelové vystýlky a čerstvého betonu z JE Temelín (letní betonáž).....	38
Tabulka 8 – Časové intervaly pro výpočet.....	39
Tabulka 9 - OP pro horní povrch betonu z JE Temelín (zimní betonáž) .....	50
Tabulka 10 - OP pro plochu na kontaktu bednění a čerstvého betonu z JE Temelín (zimní betonáž).....	50
Tabulka 11 - OP pro plochu na kontaktu ocelové vystýlky a čerstvého betonu z JE Temelín (zimní betonáž).....	51
Tabulka 12 - Vstupní parametry modelu CERHYD pro beton z JE Civaux.....	61
Tabulka 13 - Základní složení betonu z JE Civaux [46] .....	61
Tabulka 14 - Shrnutí důležitých hodnot pro všechny modely .....	77

## 12 Literatura

- [1] ČSN 73 1208 *Navrhování betonových konstrukcí vodohospodářských objektů*. ÚNMZ, Praha 2010.
- [2] ŘSD TKP 18 *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací – část 18: Betonové konstrukce a mosty*. MD-OPK, Praha 2016.
- [3] BÍLÝ, P.: *Úvod do problematiky betonu pro masivní konstrukce*. Výzkumná zpráva. ČVUT v Praze 2011.
- [4] HA, JU-HYUNG et al: *Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system*. 2014.
- [5] RENAUD-PIERRE, M.: *Delayed Ettringite Formation in Concrete*. Dostupný z webu: <https://www.emms.ifsttar.fr/en/the-institute/mast/laboratories/emms/research-topics/delayed-ettringite-formation-in-concrete/>
- [6] *Mikrofotografie krystalů ettringitu*. Dostupný z www: [https://www.researchgate.net/figure/Needle-like-particles-of-cement-Ettringit-in-the-BREX-surrounded-by-the-bentonite\\_fig5\\_272385714](https://www.researchgate.net/figure/Needle-like-particles-of-cement-Ettringit-in-the-BREX-surrounded-by-the-bentonite_fig5_272385714)
- [7] *Fotografie 2. bloku Ostrověcké JE*. Dostupný z www: <http://www.allforpower.cz/clanek/betonovani-kupole-kontejnmentu-2-bloku-ostrovecke-je-bylo-dokonceno/>
- [8] *Fotografie stěnových pilířů*. Dostupný z www: <http://www.pragoprojekt.cz/cz/mosty1/r7-drouzkovice---nove-sporice-estakada-nad-zeleznicni-trati>
- [9] *Fotografie vodního díla Lipno*. Dostupný z www: <http://www.pvl.cz/pro-media-a-verejnost/fotogalerie/vd-lipno-i>
- [10] *Fotografie tvrže Hanička*. Dostupný z www: <http://www.hanicka.cz/>
- [11] *Obrázek principu autogenního smršťování*. Dostupný z www: <http://www.ebeton.cz/pojmy/autogenni-smrstovani>
- [12] ČSN EN 197-1 ed.2 *Cement – část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. ČNI, Praha 2012.
- [13] ČSN EN 14216 – ed.2 *Cement – Složení, specifikace a kritéria shody speciálních cementů s velmi nízkým hydratačním teplem*. ČNI, Praha 2016.
- [14] COLLEPARDI, M.: *Masivní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo informační centrum ČKAIT, 2009.
- [15] ŠMILMAUER, V. et al: *Využití úletových popílků pro betonáž masivních konstrukcí*. Praha 2014.

- [16] AITCIN, P.-C.: *Vysokohodnotný beton*, 1. české vydání: Praha, Informační centrum ČKAIT, 2005.
- [17] HAGER, I.: *Behaviour of high performance concretes at high temperatur – evolution of mechanical properties*. Disertační práce, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Francie 2004.
- [18] JÍCHA, M.: *Přenos tepla a látky*. CERM Brno, 2001.
- [19] SAZINA, M. et al: *Teplo*. SNTL, Praha 1989.
- [20] HORÁK, A.: *Návrh experimentu pro řešení inverzní úlohy tepla*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně. Brno 2010.
- [21] KIM, S. G.: *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*. Diplomová práce, Iowa State University. USA 2010.
- [22] SHOWUNMI, T. P.: *Finite infrared thermography study on concrete and steel-concrete composite structures*. Diplomová práce, Lehigh University, Pennsylvania. USA 2013.
- [23] BAŽANT, Z. P.: *Mathematical modelling of moisture diffusion and pore pressure*. Department of Civil Engineering, Northwestern University of Illinois. USA 1993.
- [24] ČERVENKA, V. et al: *ATENA Program Documentation, Part 1 – Theory*. Praha 2018.
- [25] CELIA, M. A., P. BINNING,: *A Mass Conservative Numerical Solution for Two – Phase Flow in Porous Media with Application to Understand Flow*. USA 1992.
- [26] TIENKIEWICZ, O. C., R. L. TAYLOR,: *The finite Element Method, Volume 1: Basic Formulation and Linear Problem*. Londýn 1989.
- [27] CARRASQUILLO ASSOCIATES: *Heat Flow Analysis of Mass Concrete*. Dostupný z www: <http://m.carrasquilloassociates.com/project/heat-flow-analysis-of-mass-concrete/>
- [28] CRHONKOVÁ, P.: *Parabolické rovnice řešené metodou konečných prvků*, Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, přírodovědecká fakulta. Olomouc 2014.
- [29] ZELTKEVIC, M.: *Adams Methods*, MIT. USA 1998. Dostupný z www: [http://web.mit.edu/10.001/Web/Course\\_Notes/Differential\\_Equations\\_Notes/node6.html](http://web.mit.edu/10.001/Web/Course_Notes/Differential_Equations_Notes/node6.html)
- [30] VODÁK, F.: *Trvanlivosti a stárnutí betonových konstrukcí jaderných elektráren*. Praha, 1999.
- [31] PYTLÍK, P.: *Technologie betonu*, Brno: VUTIUM, 2000.
- [32] *Technický list Portlandského cementu od výrobce Českomoravský beton, a.s.*, dostupný z www: <http://files.ferar-usti-nad-orlici.webnode.cz/200001154-c9062ca00a/tlportlandskycementcemi425rmokra.pdf>
- [33] BARTÁK, J., PRUŠKA, J.: *Podzemní stavby*, ČVUT v Praze, Fakulta Stavení. Praha 2011.

- [34] *Součinitele prostupu tepla*, dostupný z www: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>
- [35] *Beaufortova stupnice rychlosti větru*, dostupný z www: <https://www.meteogram.cz/beaufortova-stupnice-rychlosti-vetru/>
- [36] *Tabulka průměrných hodnot stavů vzduchu pro vybrané hodiny*, dostupný z www: <https://www.qpro.cz/Prumerny-stav-vzduchu-dle-vyberu-hodin>
- [37] *Mapa průměrných letních teplot v roce 2019 v ČR*, dostupný z www: <https://magazin.gnosis.cz/leto-2019-bylo-v-cr-nejteplejsi-od-zacatku-mereni/#prettyPhoto>
- [38] ČERVENKA, V. et al: *ATENA Program Documentation, Part 6 – ATENA Input File Format*. Praha 2018.
- [39] *Fyzikální vlastnosti živých organismů, Termomechika*. ZČU, oddělení fyziky dostupný z www: <https://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/thermodynamics/phase/phase3.htm>
- [40] GALÁN-CHÁVEZ, J. et al: *Convective heat transfer coefficients: Experimental estimation and its impact on thermal building design for walls made of different mexican building materials*. University of Mexico. Mexiko 2014.
- [41] LEE, Y. et al: *Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete*. South Korea 2009.
- [42] KROPÍK, M.: *Bezpečnostní systémy jaderných reaktorů*. ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Praha 2016.
- [43] *Hodnoty emisivit pro běžné materiály*, dostupný z www: [https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services\\_knowledgeable\\_thermography\\_emissivity\\_table](https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table)
- [44] *Tabulka vlhkostí dřeva*, dostupný z www: <https://lesynachod.cz/vlastnosti-dreva>
- [45] *Tabulka součinitelů prostupu tepla*, dostupný z www: [https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d\\_284.html](https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html)
- [46] MALIER, Y.: *High performance concrete: from material to structure*. CRC Press, 2018.
- [47] *Fyzikálně – chemické vlastnosti vápence*, dostupný z www: <https://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/limestone>
- [48] *Tabulka objemových hmotností stavebních materiálů*, dostupný z www: <https://www.rfcafe.com/references/general/density-building-materials.htm>
- [49] KADRI, H., DUVAL, R.: *Hydration heat kinetics of concrete with silica fume*. Francie 2007