Institute for Steel Construction
Udržitelnost lehkých kovových konstrukcí

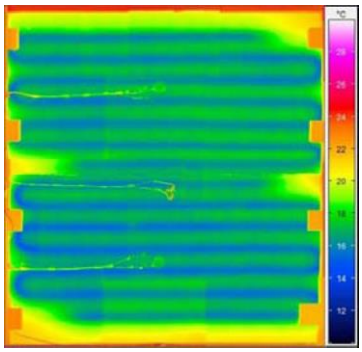
RWTH AACHEN UNIVERSITY

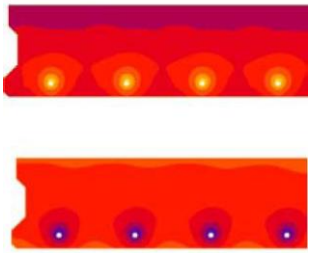
INSTITUT PRO UDRŽITELNÉ STAVBY AACHEN

Institut pro ocelové konstrukce
Prof. Dr.-Ing. M. Kuhnhenne
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

# Dennert DX Therm

# Měření a výpočet tepelného výkonu





- Výsledky měření na zkušebním zařízení, režim chlazení a režim topení
- Výsledky simulace FEM

Aachen, 31. ledna 2018

Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring

23 stran včetně titulní strany

Objednatel: Dennert Baustoffwelt GmbH & Co.KG
Veit-Dennert-Strasse 7 96132
Schlüsselfeld

Dodavatel: **AAINA GmbH Institut pro udržitelné stavby Aachen**
Grüner Weg 1
52070 Aachen

Tel.: +49 (0)241 990 356 47

Zpracoval: Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring
Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

Ve spolupráci s:

Institutem pro ocelové konstrukce
RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D–52074 Aachen

Strany: 1 - 23

# Obsah

1 Zadání ..... 4
2 Struktura stropních desek a měřicí technika ..... 5
2.1 Struktura stropních desek ..... 5
2.2 Měřicí technika ..... 6
3 Výsledky měření pro režim chlazení ..... 9
3.1 Proces zapnutí ..... 9
3.2 Stacionární stav ..... 9
3.3 Termografie v režimu chlazení ..... 12
4 Výsledky měření v režimu vytápění ..... 13
4.1 Proces zapnutí ..... 13
4.2 Řada měření se stacionárními stavy ..... 14
4.3 Termografie v režimu vytápění ..... 16
5 Výsledky simulace ..... 18
5.1 Režim chlazení ..... 18
5.2 Režim vytápění ..... 19
5.3 Proces zapnutí v režimu chlazení ..... 20
5.4 Proces zapnutí v režimu vytápění ..... 21
5.5 Doplňující informace k procesu zapnutí ..... 22
6 Shrnutí ..... 23

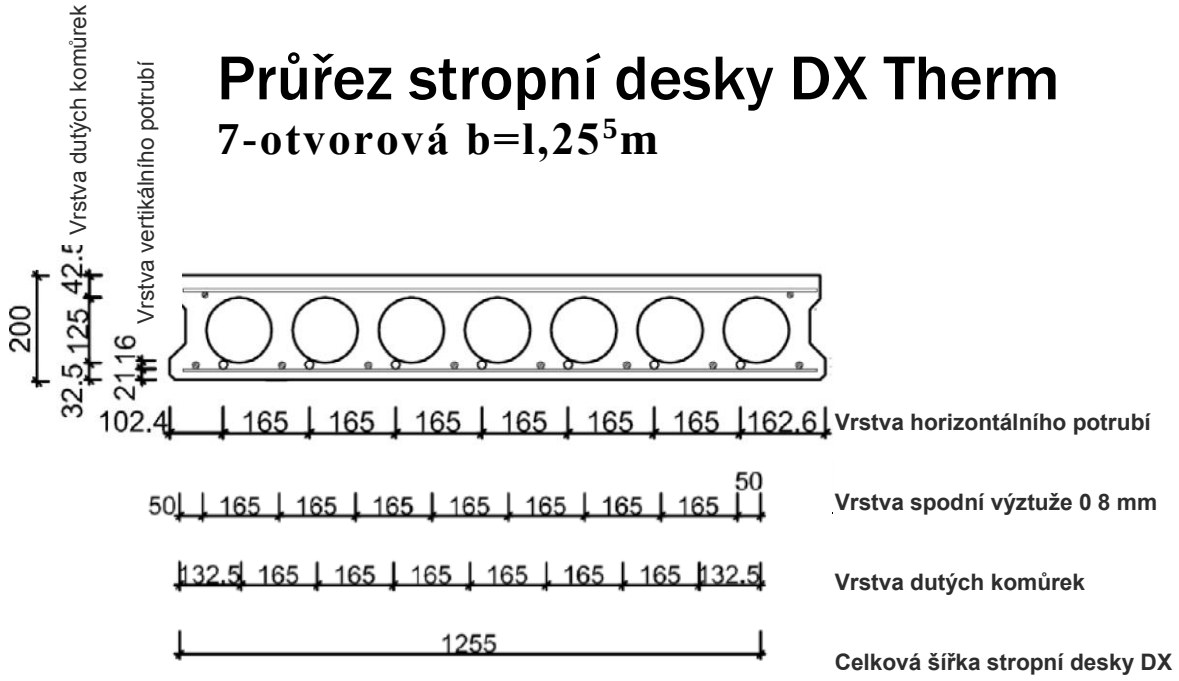
# 1 Zadání

Prefabrikované celomontované stropní desky s integrovaným systémem vytápění představují novou skupinu výrobků. Pro konkrétní provedení těchto prvků (stropní systém Dennert DX Therm) se má na základě měření na zkušebních vzorcích a prostřednictvím numerických výpočtů určit tepelný výkon pro režim vytápění a režim chlazení.

# 2 Struktura stropních desek a měřicí technika

## 2.1 Struktura stropních desek

Průřez stropních desek Dennert DX Therm, které jsou předmětem zkoumání, je znázorněn na Obr. 1.




Obr. 1: DX Therm 20, 7-otvorová, průřez (Zdroj: Dennert Pdf 2017)

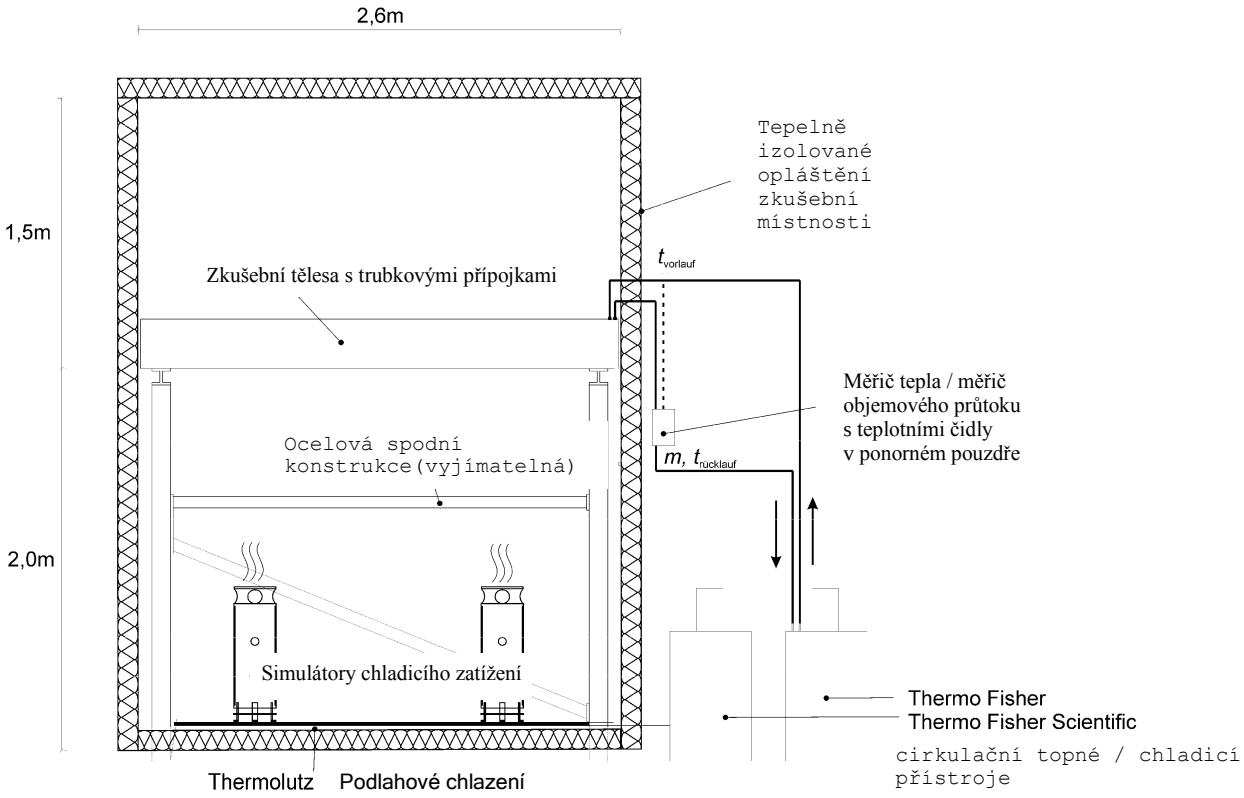
Zkušební vzorky prefabrikované stropní desky mají šířku 1,255 m a délku 2,5 m, tzn. plochu 6,275 $m^2$ a skládají se ze dvou prvků.

Výška desky je 20 cm. V temperované stropní desce, která je předmětem zkoumání, jsou zabudovány vícevrstvé kompozitní trubky s integrovanou hliníkovou trubicí o vnějším průměru 16 mm. Trubky (16 x 2 mm) zabudované v dolní části dutinové stropní desky jsou uspořádány v mřížkách o rozměru 16,5 cm a jsou pokryty betonovou krycí vrstvou o tloušťce 2,1 cm.

Při měření a simulacích se předpokládá turbulentní proudění, které poskytuje součinitel přestupu tepla větší než 1000 $W/m^2K$. Při daném průměru potrubí vznikne turbulentní proudění při objemovém průtoku větším než 80 l/h.

## 2.2 Měřicí technika

Měření se provádí ve zkušebním zařízení pro stropní panely katedry pro ocelové a lehké kovové konstrukce univerzity RWTH Aachen. Obr. 2 znázorňuje princip a Obr. 3 představuje fotografii otevřeného zkušebního zařízení.




Obr. 2: Zkušební zařízení pro stropní desky (zobrazeno schematicky), režim chlazení

Obr. 3: Otevřené zkušební zařízení pro stropní desky s nainstalovanou měřicí technikou a izolací zkušebního tělesa

Obr. 4 ukazuje polohu použitých snímačů. K měření teploty povrchu, vzduchu a vody se používá celkem sedmnáct snímačů teploty.

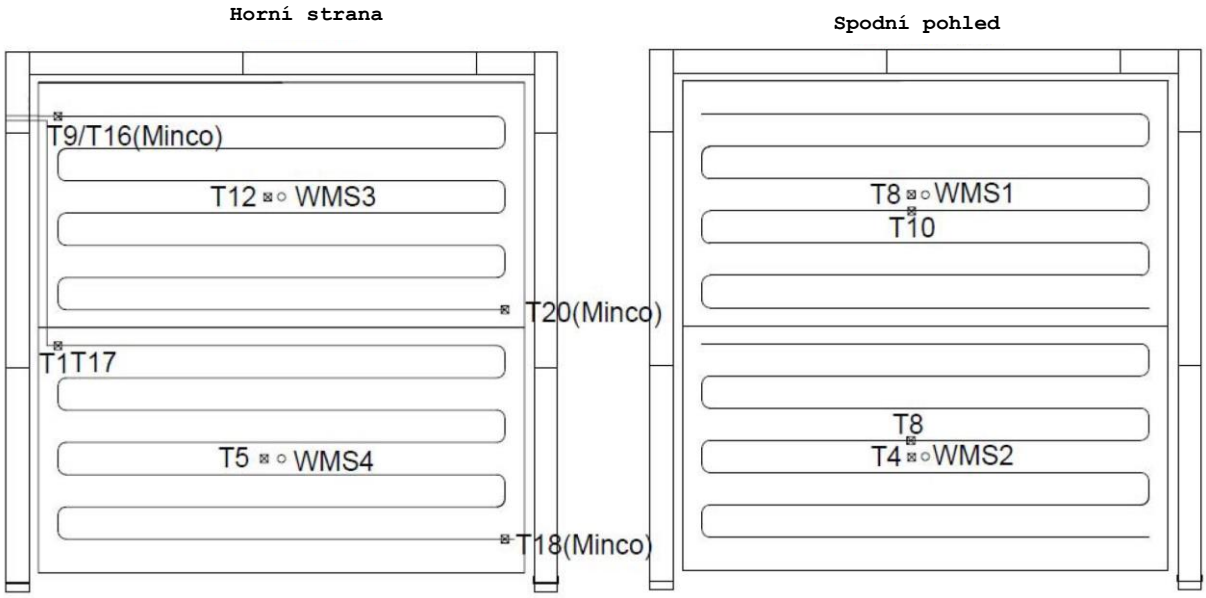
Snímače teploty T8, T10 a T2, T4 jsou umístěny na spodní straně stropní desky a ve dvojici zaznamenávají hodnoty teploty pod trubkou a mezi dvěma trubkami.

Na horní straně prefabrikované desky jsou nalepeny snímače teploty T12 a T5 ve výšce vodovodních trubek.

Dále se na každém povrchu stropní desky používá deska pro měření tepelného toku (WMS1-WMS4).

Snímače teploty T9/T16, T1/T17, T20 a T18 měří teplotu vody u trubek vždy na vstupu a výstupu vícevrstvých kompozitních trubek. Měřič tepla je umístěn mimo zkušební zařízení a zaznamenává údaje o teplotě na přívodu a odtoku a rychlost proudění. Pro analýzu možných teplotních výkyvů vzduchu v místnosti zaznamenává snímač teploty T14 teplotu vzduchu v hale.

Dále jsou použity čtyři desky pro měření tepelného toku (WSM1 – WSM4) a jeden měřič tepla (WMZ) pro topný a chladicí okruh.




Obr. 4: Měřicí snímače

Pro měření v režimu chlazení je zkušební zařízení ohříváno prostřednictvím simulátorů chladicího zatížení („maket“). Tyto elektricky vyhřívané simulátory chladicího zatížení jsou řízeny elektronickým regulátorem, pomocí kterého lze nastavit konstantní teplota ve zkušebním zařízení, a to nezávisle na teplotě v hale a na vstupní teplotě okruhu studené vody.

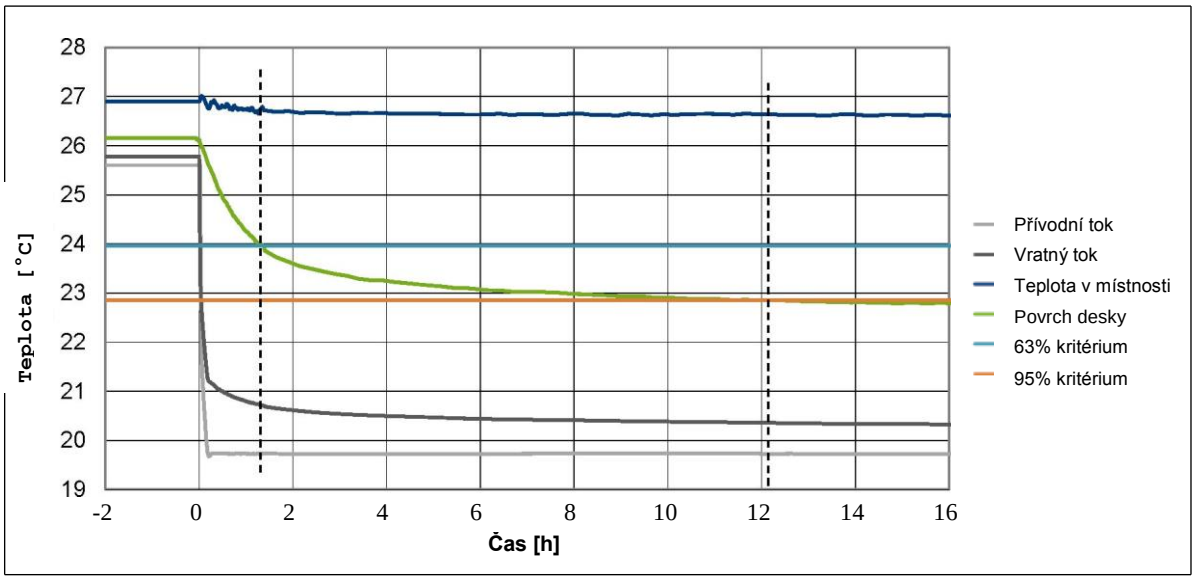
V režimu vytápění se v podstatě používá stejná technika, ale experimentální sestava pro simulaci topného zatížení je poněkud složitější, než generování chladicího zatížení pomocí „maket“: Za tímto účelem je na podlaze zkušebního zařízení nainstalován okruh pro rozvod vody, který je propojen s dalším termostatem cirkulačního čerpadla, které dodává studenou vodu. Tento termostat cirkulačního čerpadla pracuje vždy na maximální chladicí výkon. Aby se ve zkušebním zařízení dosáhly nastavitelné a konstantní teploty, jsou simulátory chladicího zatížení navíc řízeny pomocí regulátoru.

# 3 Výsledky měření pro režim chlazení

Níže jsou uvedeny výsledky zkoušky experimentálního zkoumání stropního systému v nestacionárním stavu (proces zapnutí) a ve stacionárním stavu.

## 3.1 Proces zapnutí

Pro režim chlazení jsou jako příklad uvedeny výsledky měření pro proces zapnutí přívodní (vstupní) teploty. U desky ve stacionárním stavu se vstupní teplotou 26 °C se teplota vody v čase t = 0 skokově sníží na přibližně 20 °C a teplota v místnosti se – pokud je to možné – po celou dobu trvání zkoušky udržuje konstantní na 26,7 °C (Obr. 5).

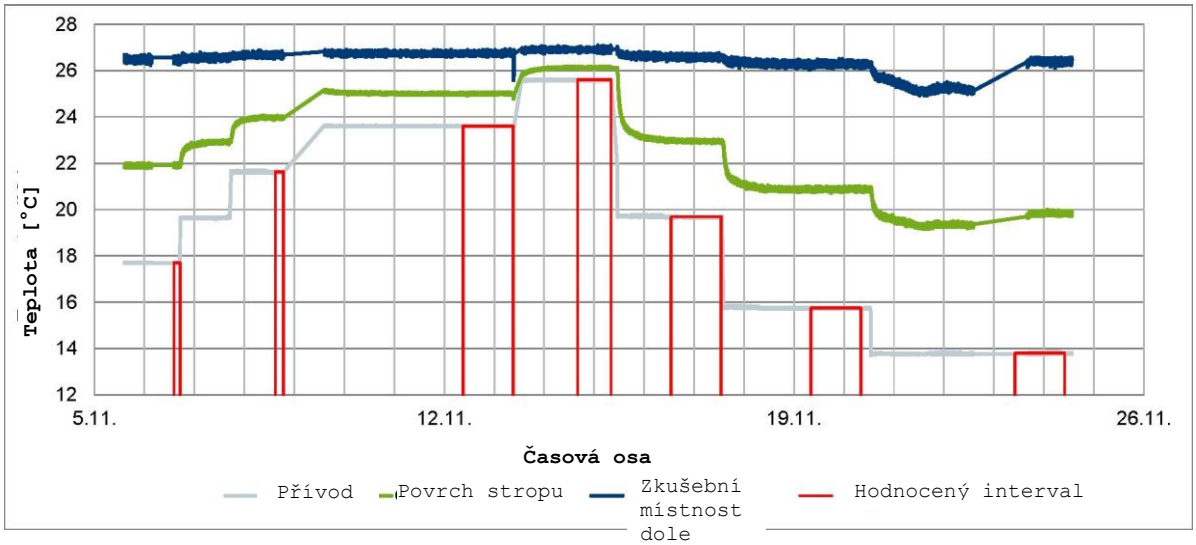



Obr. 5: Průběh teploty vybraných snímačů při zapnutí vstupní teploty v režimu chlazení

Deska se ochladí, po 83 minutách se dosáhne 63 % nového stacionárního stavu, tato hodnota se označuje jako časová konstanta. Po asi 12:15 hod. se dosáhne 95 % nového stacionárního stavu, takže přechodový proces je tímto prakticky ukončen.

## 3.2 Stacionární stav

Po dobu asi tří týdnů byla prováděna řada měření, při kterých byla vstupní teplota nastavována v krocích po dvou stupních mezi 14 °C a 26 °C (Obr. 6). Trvá přibližně 15 hodin, než se dosáhne stacionární stav (viz kap. 3.1). Po dosažení stacionárního stavu lze naměřená data vyhodnotit. Výběr hodnocených intervalů je rovněž zobrazen na Obr. 6.

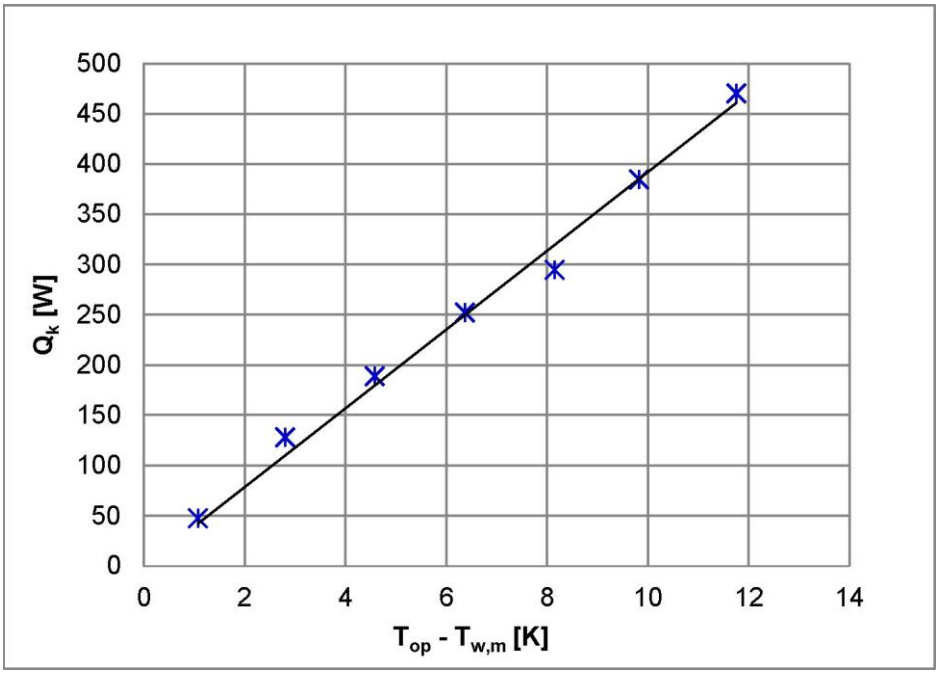



Obr. 6: Teploty vybraných snímačů po celou dobu měření (režim chlazení) a označení hodnocených intervalů

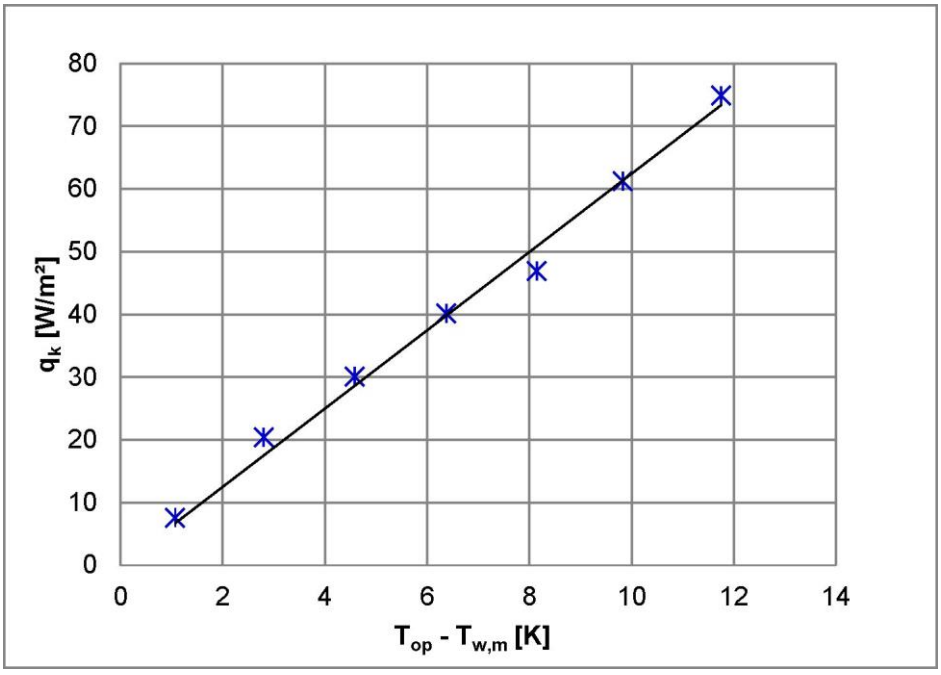
Pokud známe objemový průtok a přívodní a vratnou teplotu, může se určit tepelný výkon, který se odvádí přes stropní desky.

Současně se pro kontrolu hodnověrnosti provádí měření pomocí desek pro měření tepelného toku.

Na níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky hodnocených intervalů (Obr. 7, Obr. 8). Důležité pro charakterizaci tepelné účinnosti je teplotní rozdíl mezi vodním okruhem (střední teplota $T_{w,m}$) a provozní teplotou ve zkušební místnosti $T_{op}$.




Obr. 7: Chladicí výkon stropního prvku při různých teplotních rozdílech




Obr. 8: Specifický chladicí výkon stropního prvku při různých teplotních rozdílech

Tyto naměřené hodnoty jsou nejprve lineárně interpolovány. Lineární interpolace poskytne následující provozní charakteristiku:

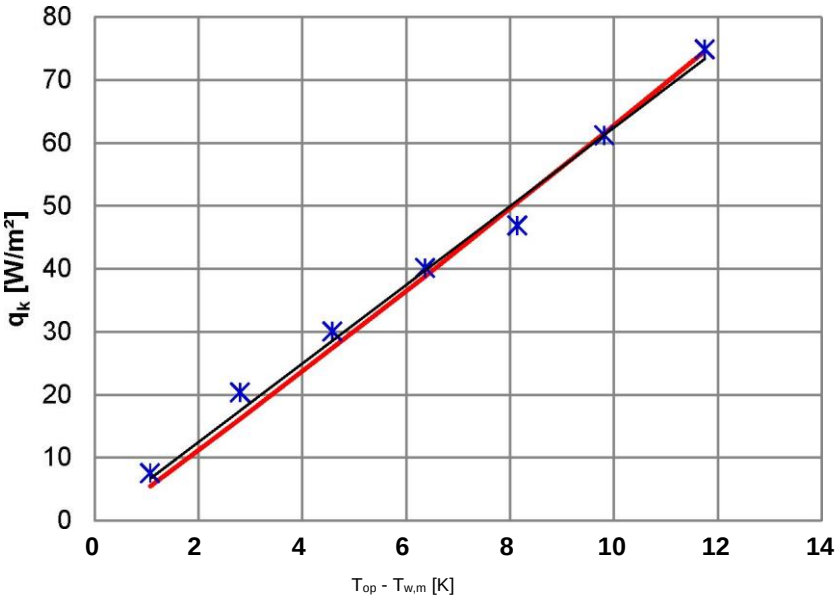
$q_k = 6{,}24\ W/m^2K \bullet \Delta T$ [v K]

s $\Delta T = T_{op} - T_{w,m}$

a $T_{w,m}$ střední teplota vody

$T_{op}$ provozní teplota v místnosti

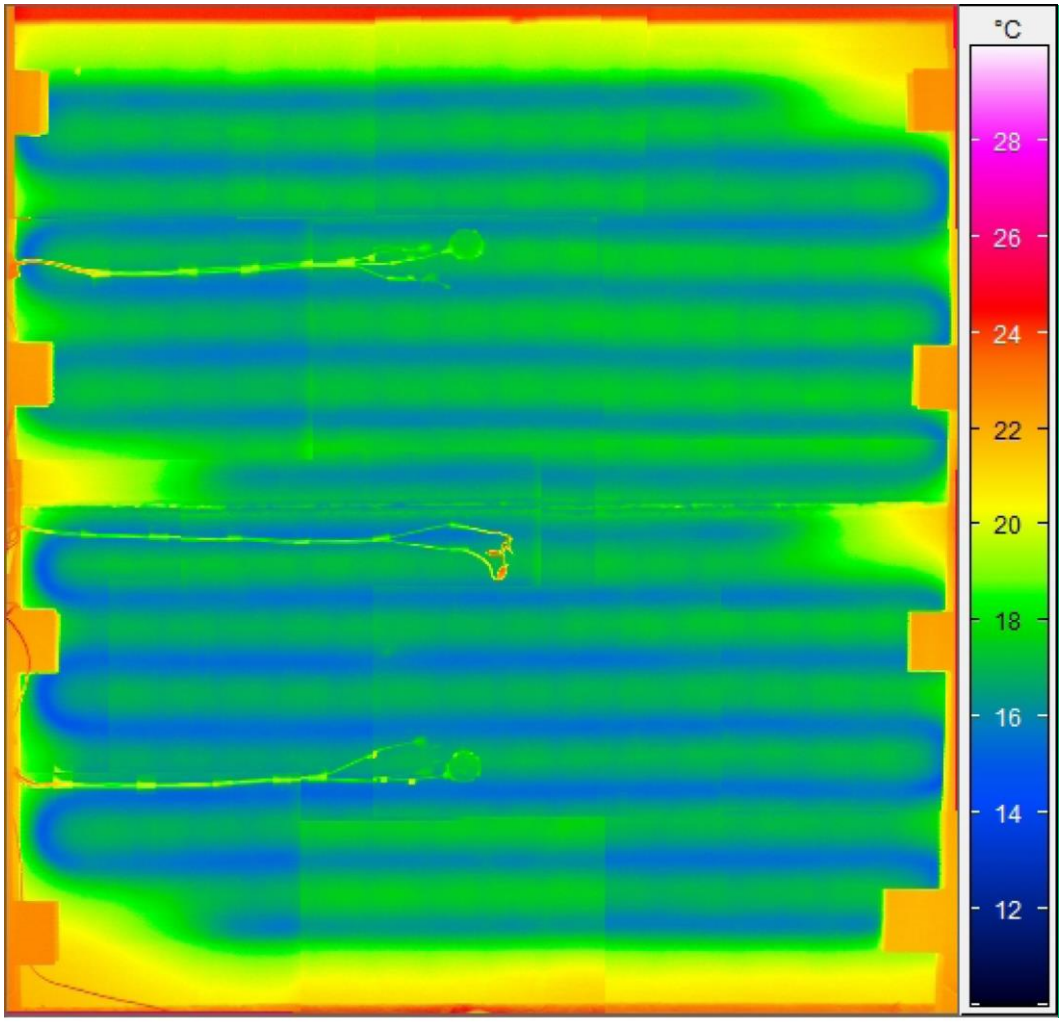
Za předpokladu, že přenos tepla při vzestupném tepelném toku závisí na teplotním rozdílu, dostaneme lehce nadprůměrnou proporcionální křivku, což znamená, že při dvojnásobném teplotním rozdílu je přenášený výkon více než dvakrát vyšší. Při podlahovém vytápění, popř. stropním chlazení se používá tzv. základní charakteristika (DIN EN 1264-2). Obr. 9 ukazuje interpolaci s přihlédnutím k základní charakteristice (červená) a navíc lineární interpolaci (černá).




Obr. 9: Specifický chladicí výkon stropního prvku při různých teplotních rozdílech, interpolace s přihlédnutím k základní charakteristice

## 3.3 Termografie v režimu chlazení

Pro získání vizuálního dojmu o rozložení teploty byl ve zkušebním zařízení stropních desek pořízen termografický snímek při vstupní teplotě 12 °C (Obr. 10).

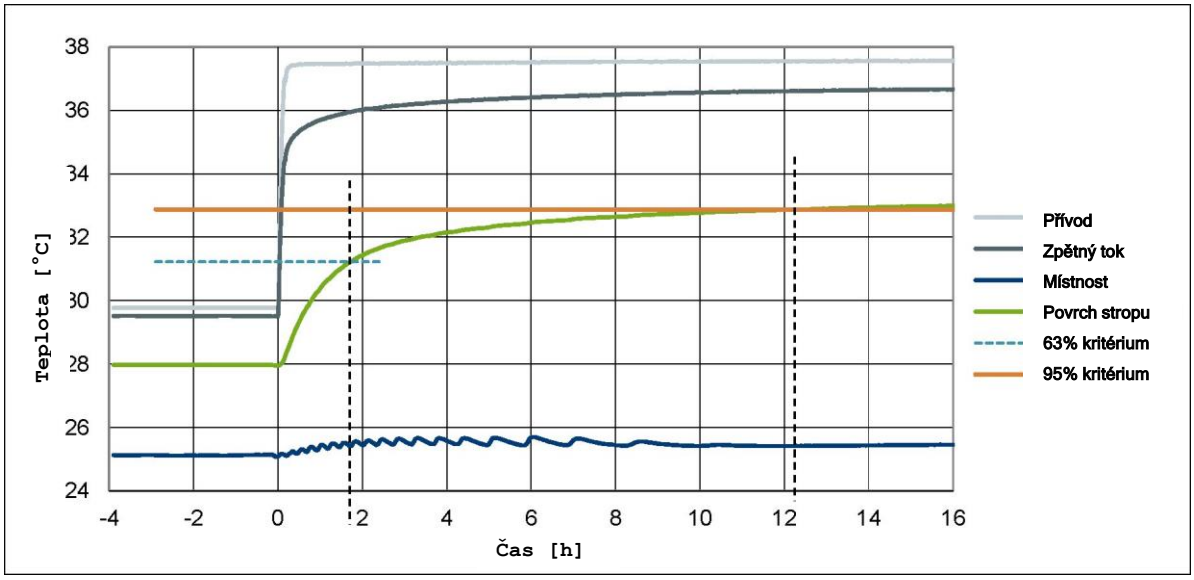



Obr. 10: Termografický snímek v režimu chlazení (vstupní teplota 12 °C, teplota v místnosti 26 °C)

# 4 Výsledky měření v režimu vytápění

## 4.1 Proces zapnutí

Pro režim vytápění jsou jako příklad uvedeny výsledky měření pro proces zapnutí vstupní teploty. U desky ve stacionárním stavu se vstupní teplotou 29,8 °C se teplota vody v čase t = 0 skokově zvýší na přibližně 37,5 °C a provozní teplota v místnosti se – pokud je to možné – po celou dobu trvání zkoušky udržuje konstantní na 25 °C (Obr. 11).

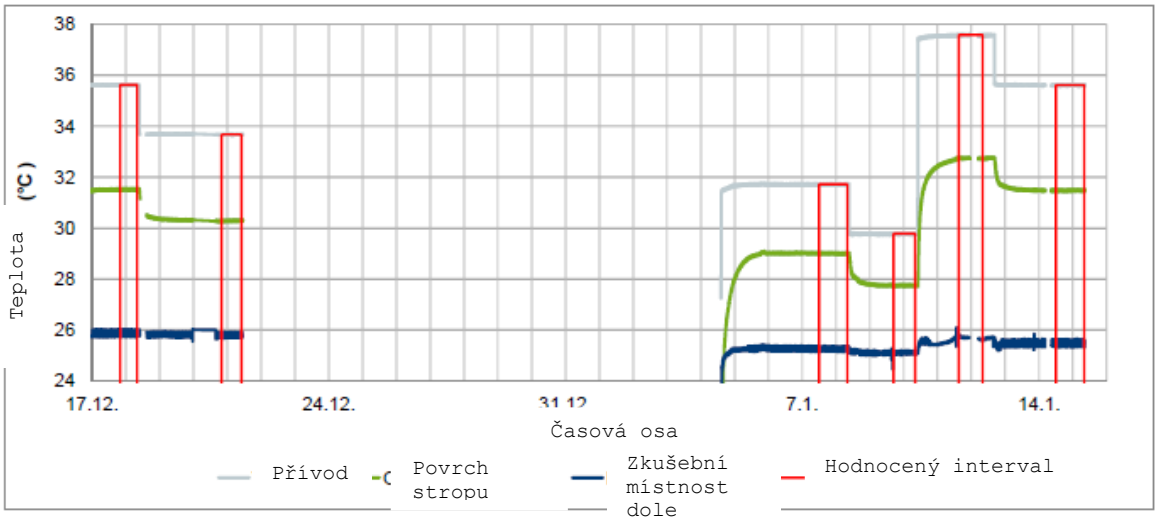



Obr. 11: Průběh teploty vybraných měřicích snímačů při sepnutí vstupní teploty v režimu vytápění

Deska se ohřívá, po 103 minutách se dosáhne 63 % nového stacionárního stavu, tato hodnota se označuje jako časová konstanta. Po přibližně 12:15 hod. se dosáhne 95 % nového stacionárního stavu, takže přechodový proces je tímto prakticky ukončen.

## 4.2 Řada měření se stacionárními stavy

Po dobu přibližně čtyř týdnů (s přerušením necelých dvou týdnů na přelomu roku 2017/18) byla prováděna řada měření, při kterých byla vstupní teplota nastavována v krocích po dvou stupních mezi 30 °C a 38 °C (Obr. 6). Poté trvá přibližně 15 hodin, než se dosáhne stacionární stav (viz kap. 4.1). Po dosažení stacionárního stavu lze naměřené údaje vyhodnotit. Výběr hodnocených intervalů je rovněž zobrazen na Obr. 12.

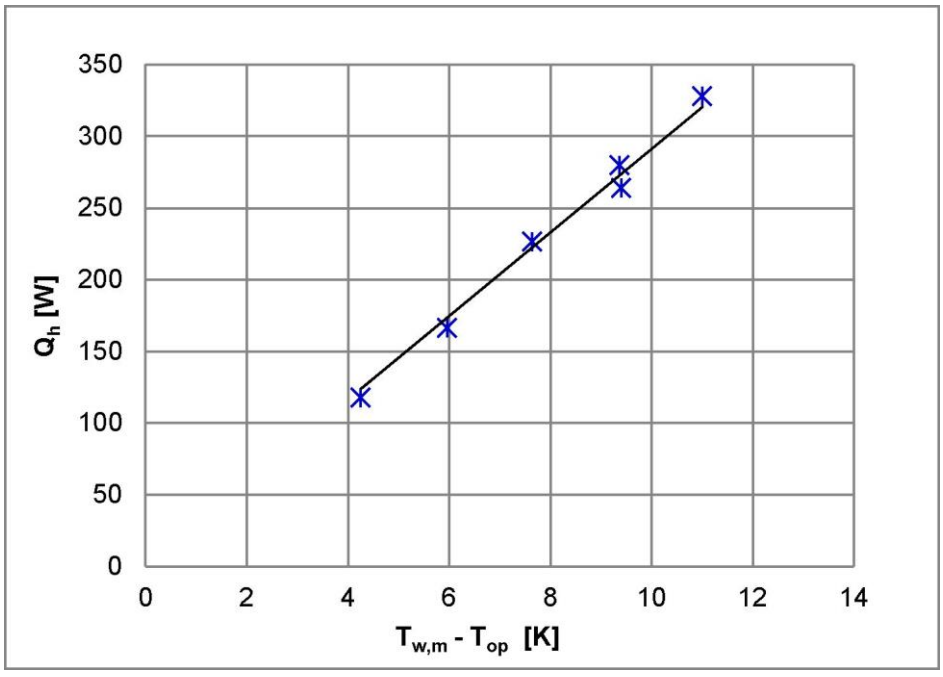



Obr. 12: Teploty vybraných snímačů po celou dobu měření (režim vytápění) a označení hodnocených intervalů

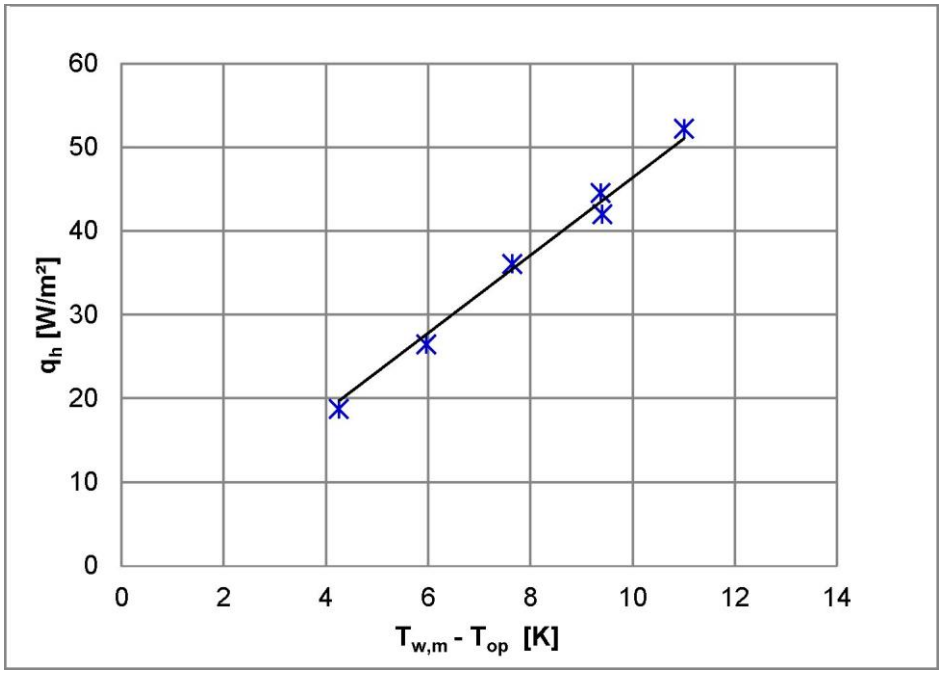
Podobně jako v režimu chlazení lze z objemového průtoku a přívodní a vratné teploty stanovit tepelný výkon, který je přiváděn do místnosti přes stropní desky.

Současně se pro kontrolu hodnověrnosti provádí měření pomocí desek pro měření tepelného toku.

Níže uvedený graf zobrazuje výsledky hodnocených intervalů (Obr. 13, Obr. 14). Důležité pro charakterizaci tepelné účinnosti je teplotní rozdíl mezi vodním okruhem (střední teplota $T_{w,m}$) a provozní teplotou ve zkušební místnosti $T_{op}$.




Obr. 13: Topný výkon stropního prvku při různých teplotních rozdílech




Obr. 14: Specifický topný výkon stropního prvku při různých teplotních rozdílech

Tyto naměřené hodnoty jsou lineárně interpolovány. Lineární interpolace poskytne následující provozní charakteristiku:

$q_h = 4{,}64\ W/m^2K \bullet \Delta T$ [in K]

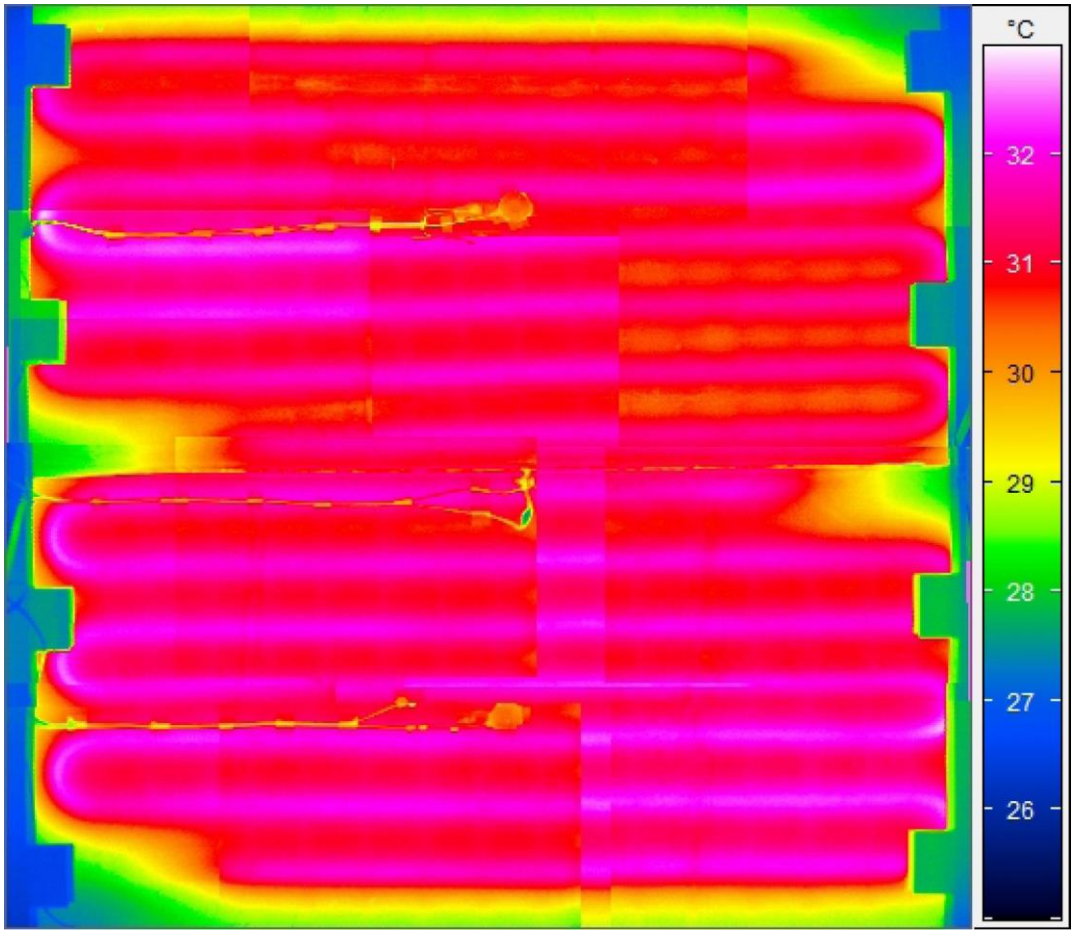
s $\Delta T = T_{w,m} - T_{op}$

a $T_{w,m}$ střední teplota vody
$T_{op}$ provozní teplota v místnosti

V případě klesajícího tepelného toku je přenos tepla jen mírně závislý na teplotním rozdílu, takže zde – na rozdíl od režimu chlazení – není třeba provádět žádnou diferencovanou analýzu.

## 4.3 Termografie v režimu vytápění

Pro získání vizuálního dojmu o rozložení teploty byl ve zkušebním zařízení stropních desek pořízen termografický snímek při vstupní teplotě 26 °C a provozní teplotě v místnosti 26 °C (Obr. 15).

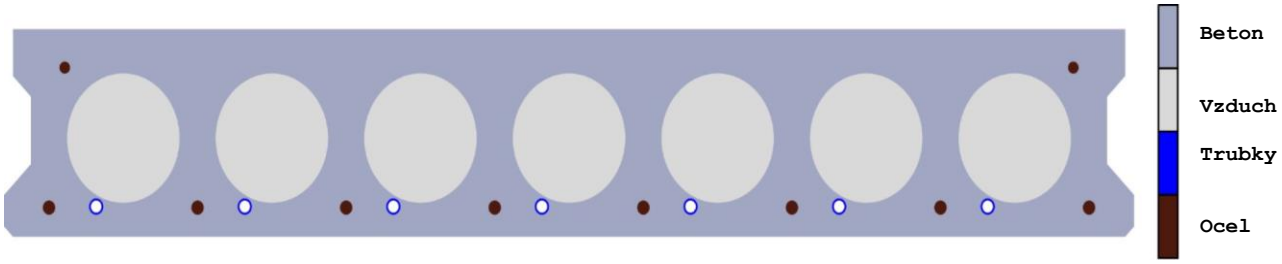



Obr. 15: Termografický snímek v režimu vytápění (vstupní teplota 34 °C, teplota v místnosti 26 °C)

# 5 Výsledky simulace

## 5.1 Režim chlazení

S použitím softwaru metody konečných prvků společnosti Marc Mentat se vytvoří FEM model průřezu stropní desky. Na ocelovou síťovou výztuž se zde nebere ohled, protože tato má jen nepatrný vliv na výsledky. Obr. 16 ukazuje geometrii zkušebního tělesa a souvisejících materiálů.




Obr. 16: Průřez stropní desky pro FEM simulaci

Další mezní podmínky a předpoklady pro simulaci:

Střední teplota vody: 20 °C

Provozní teplota místnosti nad a pod: 26 °C

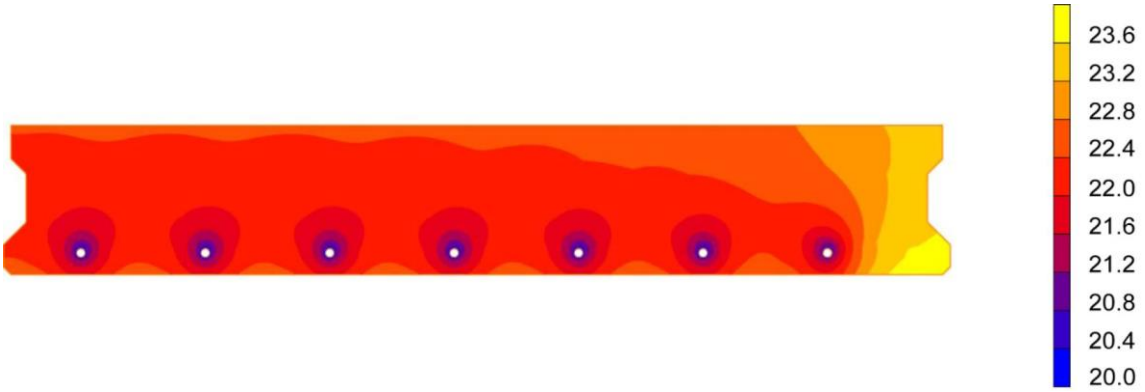
Tepelný odpor podlahové konstrukce: 0,8 $m^2K/W$

U podlahové konstrukce nad stropním prvkem (izolace, podlahová krytina) byly vzaty v úvahu dvě varianty:

a) tepelný odpor 0,8 $m^2K/W$, což např. odpovídá 20 mm izolaci s $\lambda$ = 0,025 W/mK (typický případ pro mnoho podlahových konstrukcí)

b) tepelný odpor 3 $m^2K/W$, u něhož dochází pouze k velmi malému přenosu tepla přes podlahovou plochu, což odpovídá experimentální struktuře s 10 cm PU izolací nad stropní deskou

Obr. 17 znázorňuje rozložení teploty v součásti pro režim chlazení, variantu (a).




Obr. 17: Výsledek simulace pro režim chlazení, varianta (a)

U výše uvedeného případu se tak přenáší chladicí výkon 38,95 W/m$^2$, a pokud je hodnota vztažena k teplotnímu rozdílu místnosti a střední teploty vody, lze stanovit následující provozní charakteristiky (viz výsledek měření kap. 3.2):

$q_k$ = 6,49 W/m$^2$K • ΔT [v K] (varianta a)

$q_k$ = 6,23 W/m$^2$K • ΔT [v K] (varianta b)

s $\Delta T = T_{op} - T_{w,m}$

$T_{w,m}$ střední hodnota teploty vody

$T_{op}$ provozní teplota v místnosti

## 5.2 Režim vytápění

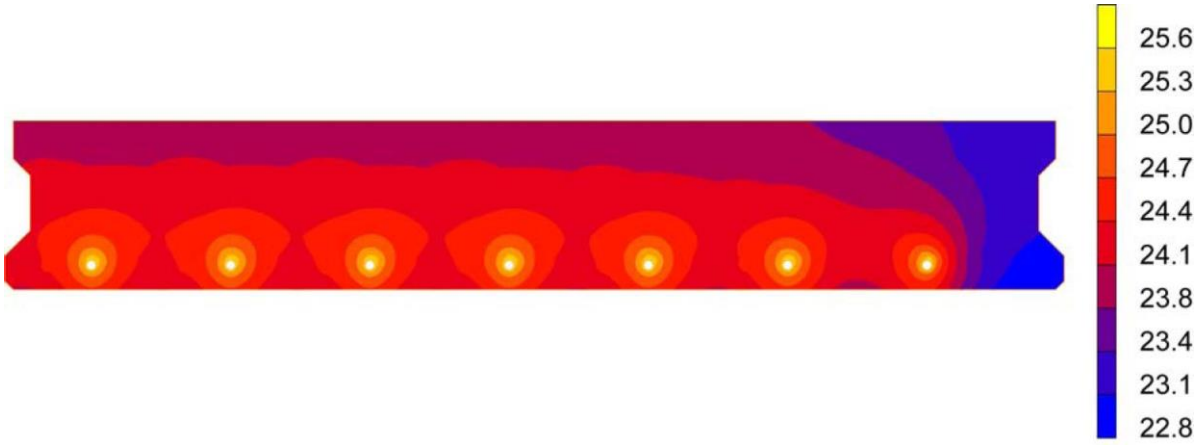
Při stejném FEM modelu jako pro režim chlazení byl režim vytápění zkoumán numericky, zde také s variací podlahové struktury.

Další mezní podmínky nebo předpoklady pro simulaci:

Střední teplota vody: 26 °C

Provozní teplota v místnosti nad a pod: 20 °C

Obr. 17 ukazuje rozložení teploty v součásti pro režim vytápění (varianta a).




Obr. 18: Výsledek simulace pro režim vytápění

U výše uvedeného případu se přenáší topný výkon 26,86 W/m$^2$, a pokud se hodnota vztahuje k teplotnímu rozdílu místnosti a průměrné teploty vody, lze stanovit následující provozní charakteristiky (viz výsledek měření kap. 4.2):

$q_h$ = 4,82 W/m$^2$K • ΔT [v K] (varianta a)

$q_h$ = 4,48 W/m$^2$K • ΔT [v K] (varianta b)

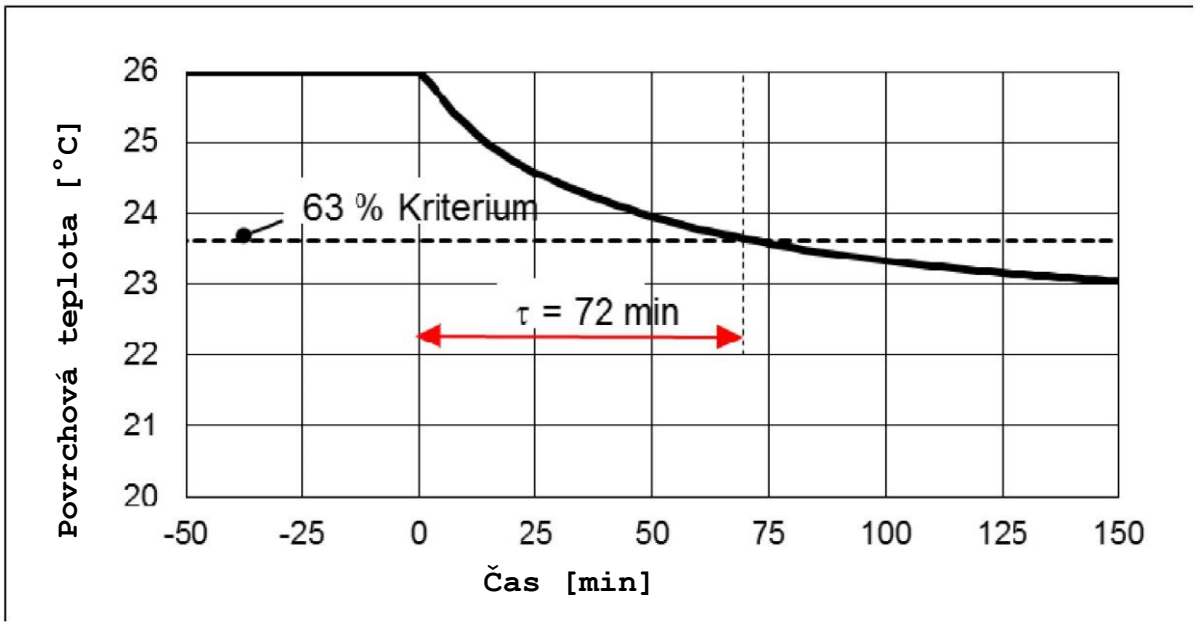
s $\Delta T = T_{w,m} - T_{op}$

$T_{w,m}$ střední hodnota teploty vody

$T_{op}$ provozní teplota v místnosti

## 5.3 Proces zapnutí v režimu chlazení

Za účelem zkoumání chování v nestacionárním stavu je brán v úvahu proces zapnutí. Výchozím předpokladem je to, že strop a voda v potrubích mají stejnou teplotu 26 °C jako vedlejší místnost. Následně proběhne zapnutí v simulaci tak, aby teplota vody skokově klesla na 20 °C v čase t = 0. Ve skutečnosti se k časové konstantě samotného stropního prvku připočítává setrvačnost vyplývající z ohřevu vody a rychlosti proudění přes prvek. Tyto účinky jsou ale nezávislé na stropním systému a nejsou zde dále brány v úvahu.

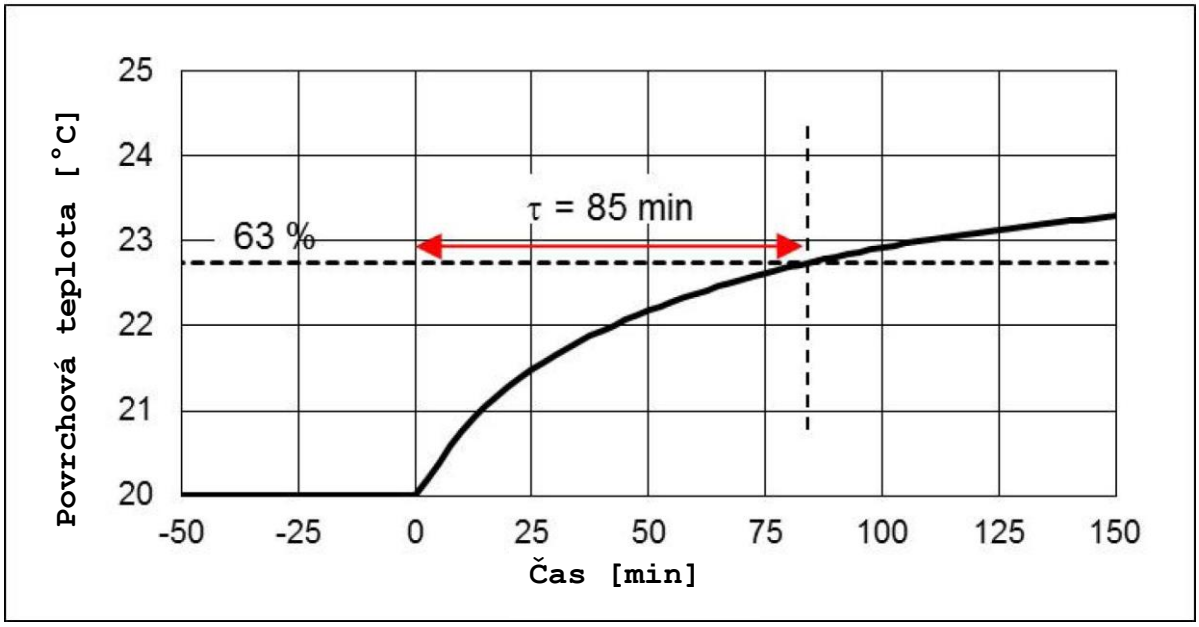



Obr. 19: Časový průběh povrchové teploty při procesu zapnutí v režimu chlazení

Charakteristickou veličinou k popisu procesu zapnutí je časová konstanta x. Udává, v jakém čase funkce dosáhne 1/e podíl konečné hodnoty (= 63 %). Pro uvažovaný případ časová konstanta činí 72 minut, po této době je k dispozici 63 % chladicího výkonu (Obr. 19). Výsledek odpovídá hodnotě z měření (kap. 3.1).

## 5.4 Proces zapnutí v režimu vytápění

Také zde byla vzata v úvahu skoková změna teploty vody (Obr. 20). Numericky vypočtená časová konstanta je 85 minut. Tato hodnota se mírně odchyluje od výsledků měření (103 minut), příčinou mohou být nepřesností v měření, v regulaci, ale také výrobní tolerance, ale vcelku se výsledek měření potvrzuje.




Obr. 20: Časový průběh povrchové teploty při procesu zapnutí v režimu vytápění

## 5.5 Doplňující informace k procesu zapnutí

Plošný výkon (W/m2) se určí pomocí hodnot tepelné vodivosti, popř. hodnot tepelného odporu. Pokud použijeme materiál s vysokou vodivostí (např. kovy) a pokud vytvoříme malé vzdálenosti mezi vodovodními trubkami a povrchem přenášejícím teplo, lze dosáhnout vyšší výkony. Hmotnost nemá žádný vliv na stacionární výkon.

Časová konstanta, která popisuje proces zapnutí, se získá z poměru hmotnosti k tepelnému odporu, k tomu se navíc přidává geometrický vliv, tzn. aspekt, ve kterém se hmota nachází.

Z toho vyplývá, že mezi výkonem a časovou konstantou neexistuje žádný jednoduchý vztah. Vyšší výkon ve stacionárním stavu může vést v závislosti na struktuře stropního systému k vyšší nebo nižší časové konstantě.

# 6 Shrnutí

Tepelná účinnost prefabrikovaných stropních panelů Dennert DX Therm byla pro režim vytápění a chlazení určena na základě měření a výpočtů (FEM). Parametry stanovené měřením a výpočty přibližně odpovídají, takže nejsou potřebné žádné další interpretace nebo kalibrace.

Tabulka 1: Specifické topné a chladicí výkony (všechny údaje v W/m$^2$K)

| | Zkušební zařízení stropních panelů | FEM | |
|---|---|---|---|
| | | Varianta a – tepelný odpor podlahy 0,8 m$^2$K/W | Varianta b – tepelný odpor podlahy 3,0 m$^2$K/W |
| Režim vytápění | 4,64 | 4,82 | 4,48 |
| Režim chlazení | 6,24 | 6,49 | 6,23 |

Korelace získaných výsledků je dobrá, srovnávací měření pomocí desek pro měření tepelného toku tyto hodnoty potvrzují. Navrhuje se specifikovat naměřené hodnoty zkušebního zařízení stropních panelů jako návrhové hodnoty.

V případě vytápění, kde dominuje výměna tepla prostřednictvím sálání, se zvýší rychlost proudění vzduchu v místnosti např. prostřednictvím ventilačního systému, a tím se zajistí vyšší specifické topné výkony.

**Časová konstanta**

Časové konstanty lze stanovit z nestacionárních zkoušek na základě metody konečných prvků (FEM), rovněž jako ze spínacích operací ve zkušebním zařízení.

Pro režim chlazení vychází:

$x_k$ = 72 min (simulace FEM) 83 minut (měření)

Pro režim vytápění vychází:

$x_h$ = 85 min (simulace FEM) 103 minut (měření)

Vzhledem k nepřesnostem měření, ale také v důsledku výkyvů při regulaci teploty a z důvodu výrobních tolerancí nelze vyloučit určité odchylky.