

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VLIV FÁZOVÉ PŘEMĚNY VODY V ZEMINĚ NA PRŮBĚH TEPLOTNÍHO KMITU

EFFECT OF SOIL WATER PHASE CHANGE ON THE SOIL TEMPERATURE OSCILLATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ TRLICA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID BEČKOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ondřej Trlica
Název	Vliv fázové přeměny vody v zemině na průběh teplotního kmitu
Vedoucí práce	Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

(1) Směrnice děkana č. 19/2011 s dodatkem a přílohami; (2) Katalogy a odborná literatura; (3) Stavební zákon č. 183/2006 Sb. ve znění zákona č. 350/2012 Sb.; (4) Vyhláška č. 499/2006 Sb. ve znění vyhlášky č. 62/2013 Sb.; (5) Vyhláška č. 268/2009 Sb.; (6) Vyhláška č. 398/2009 Sb.; (7) Platné normy ČSN, EN.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zadání:Rámcové cíle práce jsou měření parametrů stavebních konstrukcí a studium procesů v nich probíhajících. Přesné stanovení cílů bude dohodnuto s vedoucím práce na základě odborné rozpravy v průběhu řešení teoretické části práce. **Výstupy:** VŠKP bude členěna v souladu se směrnicí děkana č. 19/2011 a jejím dodatkem a přílohami. Případné části dokumentace budou vloženy do složek s klopami formátu A4 opatřených popisovým polem a uvedením obsahu na vnitřní straně každé složky. Všechny části dokumentace budou zpracovány s využitím PC v textovém a grafickém CAD editoru. Výkresy budou opatřeny popisovým polem. Textová část bude obsahovat i položky h) "Úvod", i) "Vlastní text práce" j a j) "Závěr". VŠKP bude mít strukturu dle manuálu umístěného na www.fce.vutbr.cz/PST/Studium.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem promrzání zemin z hlediska fázové přeměny vody obsažené v zemině na souvrství zelené střechy. Cílem této práce je ověřit vliv fázové přeměny vody na průběh teplotního kmitu. Nejprve byly popsány základní vlastnosti zemin obecně, poté byly popsány děje probíhající při fázové přeměně vody v zemině

a dále bylo provedeno experimentální ověření vlivu vlhkosti v zemině na průběh teplotního kmitu. V celkovém hodnocení práce byla provedena analýza vlivu fázové přeměny vody v zemině na průběh teplotního kmitu a z toho plynoucí závěr práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zmrzlá půda, promrznutí, vlhkost, střešní zahrady, fázový posun, teplotní kmit.

ABSTRACT

This thesis deals with the study of soils freezing in terms of phase change of water contained in the soil strata on green roofs. The aim of this work is to verify the effect of phase transformation of water on the course of temperature oscillation. First described the basic characteristics of soils generally, and subsequently described processes occurring during phase transformation of water in the soil and has been carried out experimental verification of the effect of moisture in the soil on the course of temperature oscillation. In the overall evaluation of the work, an analysis of the effect of phase change water in soil on the course of temperature oscillation and the resulting conclusion of work.

KEYWORDS

Frozen soil, frost, moisture, green roof, phase change, heat wave.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ondřej Trlica *Vliv fázové přeměny vody v zemině na průběh teplotního kmitu.*
Brno, 2017. 97 s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. David
Bečkovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2017

Bc. Ondřej Trlica
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2017

Bc. Ondřej Trlica
autor práce

TATO DIPLOMOVÁ PRÁCE BYLA ZPRACOVÁNA S VYUŽITÍM INFRASTRUKTURY CENTRA ADMAS.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Davidu Bečkovskému Ph.D. za velmi užitečné rady, čas strávený konzultacemi a jeho trpělivost. Jeho zkušenosti a vědomosti obohatily nejen mou práci, ale i mě samotného.

Dále bych chtěl poděkovat Rodině za lásku, oporu a zázemí pro studium i osobní život.

V neposlední řadě, kamarádům a spolužákům, se kterými bylo studium mnohdy i zábavou a životním stylem. A nakonec všem lidem z VUT.

V Brně dne 12. 1. 2017

Bc. Ondřej Trlica
autor práce

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Základní poznatky o zeminách.....	13
2.1	Vznik zemin.....	13
2.2	Zemina jako disperzní soustava.....	14
2.3	Vliv velikosti zrn na vlastnosti zeminy.....	14
2.4	Jevy na fázovém rozhraní.....	15
2.5	Mineralogické složení zemin.....	15
2.6	Zemina jako trojfázový systém.....	15
2.7	Pevná fáze v zemině.....	16
2.8	Zrnitost zemin.....	16
2.9	Pórovitost, číslo pórovitosti.....	17
2.10	Vlhkost.....	18
2.11	Druhy vody v zemině.....	18
2.12	Konzistence zemin.....	20
2.13	Struktura zemin.....	20
2.14	Promrzání zemin.....	21
	Promrzání zemin obecně.....	22
	Promrzání sypkých zemin.....	23
	Promrzání soudržných zemin.....	23
2.15	Teplota půdy.....	25
3	Základy a podzemní část objektu.....	29
3.1	Základové zeminy a horniny.....	29
3.2	Základové poměry.....	29
3.3	Hloubka založení.....	30
4	Střešní zahrady.....	31
4.1	Názvosloví.....	31
4.2	Výhody střešních zahrad.....	31
	Porovnání drenážních vrstev.....	33
4.3	Formy střešních zahrad.....	35
4.3	Vrstvy střešních zahrad.....	37
4.4	Typy souvrství střešních zahrad.....	39
4.5	Varianty skladby střešní zahrady.....	39

	Varianta A - bez zeminy tzv. „hydroponní“	39
	Varianta B – Lehčený substrát.....	42
	Varianta C – Plnohodnotná zemina	43
5	Děje spojené s fázovou přeměnou vody.....	44
5.1	Studium krystalizace vody.....	44
5.2	Tvorba ledových čoček.....	44
5.3	Rozmrzáni a tání	45
5.4	Fázové přeměny.....	46
5.5	Latentní teplo	46
5.7	Sálání jasné oblohy	49
5.6	Termodynamika fázové přeměny	49
5.8	Druhy fázových přeměn.....	50
6	Cíle práce	52
6.1	Analýza klimatických podmínek ČR pro využití efektu fázové přeměny vody v zemině.....	53
	Podmínky	53
	Průměrná roční teplota.....	54
	Otopná sezona.....	54
	Výskyt zimy	57
	Sněhová pokrývka.....	58
	Denní chod teploty vzduchu v Brně	58
6.2	Experimentální ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy	59
	Původ vzorků	59
	Návrh zkušebního boxu	61
	Charakter teplotní rampy	69
	Ověření vlivu charakteru teplotní rampy	71
	Závěr z ověření vlivu charakteru teplotní rampy	82
6.3	Experimentální ověření míry nasycení zeminy v souvrství zelené střechy vodou na fázovou přeměnu vody.....	83
	Příprava vzorků pro experimentální ověření	83
	Porovnání fázového posunu z programu TEPLO 2014	90
	Závěr z experimentálního ověření míry nasycení zeminy	92
7	Závěr	93

8	Seznam použité literatury	95
9	Seznam použitých zkratek a symbolů	97
10	Přílohy	98

1 Úvod

Zamrzání zeminy je velice důležitá vlastnost především v dopravním stavitelství, kde vlivem mrazového zdvihu dochází k nejčastějším vznikům poruch konstrukcí vozovky. Neméně důležité, ale na druhou stranu méně rozšířené je toto téma u pozemních staveb, kde se promrzáním základů zabýváme jen okrajově a to především z hlediska dodržení nezámrné hloubky základové spáry a dostatečného zateplení základů. Dále využití zeminy v konstrukcích střešních zahrad a jejich vliv na rychlost promrzání a průběhu teplotního kmitu.

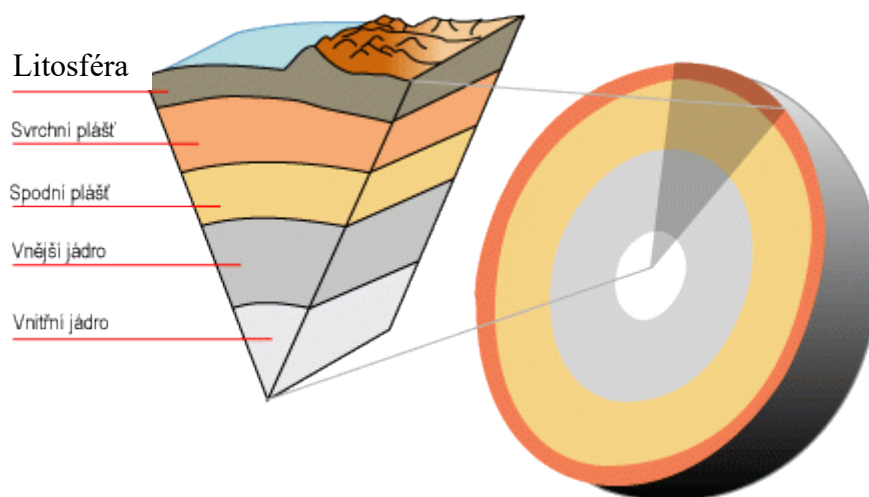
Tématem této práce je právě zaměření se na promrzání zeminy z hlediska pozemních staveb, zejména potom v rámci skladby střešních zahrad. Empirické hodnoty nezámrné hloubky byly stanoveny určitým způsobem a tato práce má za úkol posouzení jednotlivých druhů mrazu v souvislosti s hloubkou promrznutí, a jaký to má vliv na průběh teplot v zemině.

2 Základní poznatky o zeminách

Zemina byla zpočátku uvažována jako stejnorodá hmota a teprve později se začala uvažovat jako prostředí, které se skládá ze tří fází: pevné (zrna zeminy), kapalné (voda) a plynné (vzduch). Každá fáze má jiné fyzikální vlastnosti. Tato složitost hmoty byla příčinou, že se mechanika zemin rozvíjela velmi pomalu a opožděně proti jiným stavebním naukám. [1]

2.1 Vznik zemin

V horních vrstvách zemské kůry dochází k denním, sezónním a ročním výkyvům teplot, v prasklinách, puklinách a pórech cirkuluje podzemní voda, která obsahuje rozpustné plyny. Horniny, které jsou jim vystavené, podléhají rozrušení, tvoří současnou kůru zvětrávání na povrchu litosféry (viz *obr. 1*). Mocnost zvětrávání závisí na mnoha činitelích a pohybuje se od několika metrů až do stovek metrů. V průběhu zvětrávání nastává postupný rozpad skalních hornin mechanickými a chemickými procesy, vznikají nahromaděny úlomků skalních hornin a minerálních zrn s případnými příměsi nazýváme v inženýrské praxi zeminami. Horniny kůry zvětrávání tvoří v dnešní době základovou půdu pro většinu inženýrských a občanských staveb, často se v nich budují podzemní stavby a velmi často slouží jako stavební materiál při budování zemních těles násypů a hrází. Druh původní horniny, podmínky vzniku a geologická minulost v určité míře ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti zemin a jejich chování při různých způsobech mechanického zatěžování. Při studiu těchto vlastností je potřeba vycházet z geologických podkladů, které poskytují velmi cenné kvalitativní informace. [1]



Obr. 1 Řez zemí [2]

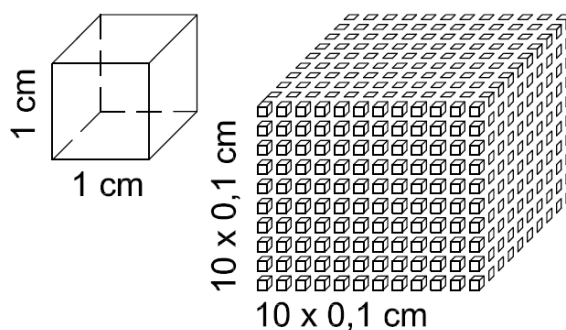
2.2 Zemina jako disperzní soustava

Následkem postupného mechanického a chemického zvětrávání se rozkládají pevná zrna, v zemině narůstá množství jemnějších částic, které často dosahují rozměrů 0,001–0,000001 mm. Tyto částice mají na vlastnosti zeminy značný vliv, i v tom případě, když jejich hmotnostní podíl dosahuje jen několik procent. Ovlivňují nejen fyzikální vlastnosti (např. pórovitost, objemovou hmotnost, konzistenci) ale taky mechanické vlastnosti (stlačitelnost, pevnost ve smyku a propustnost). Rozhodující vliv nejjemnějších částic na vlastnosti zeminy vyplývá především ze vzájemných vztahů mezi pevnými částicemi a vodou, která je v přírodě obklopuje. Na základě těchto vztahů se studium zemin řeší jako vícefázový systém. Pevné částice jsou v přírodě vždy obklopená alespoň tenkou blankou vody, při vyšších vlhkostech jsou jí mezery mezi pevnými částicemi, tzv. póry, částečně nebo úplně vyplněné. Zeminu tedy pokládáme za vícefázovou disperzní soustavu s pevným disperzním podílem a s kapalným disperzním prostředím. [1]

2.3 Vliv velikosti zrn na vlastnosti zeminy

Zmenšení rozměrů pevných částic vede při překročení určitých hranic k výrazné změně vlastností disperzního systému. U zemin, na rozhraní mezi pevnou a kapalnou fází, se odehrávají jevy, které jsou velmi důležité. Důležitost tohoto jevu vynikne, pokud si vyčíslíme sumární plochu fázového rozhraní v jednotce objemu anebo hmotnosti, tzv. *specifický povrch* zeminy. Představme si kostku pevné látky o obsahu 1 cm^3 , délka hrany je 1 cm, povrch 6 cm^2 . Když ji postupně rozdělíme na kostky s délkou hrany 0,1 cm, 0,01 cm atd. vzrůstá specifický povrch při nezměněném objemu pevné látky (viz obr. 2). Pevné částice zemin, mají ale obvyčejné tvary, které se od kostek velmi podstatně liší, jsou to často plotýnky nebo tyčinky. Když tuto kostku rozdělíme u tyčinek s poměrem stran 1:1:10 tak specifický povrch naroste dokonce na 42 m^2 . Jevy odehrávající se v takto malém množství látky na tak obrovském povrchu ovlivňují vlastnosti této látky ve velmi značné míře. [1]

OBJEM:	1 cm^3	1 cm^3
DÉLKA HRANY:	1 cm	0,1 cm
SPECIFICKÝ POVRCH:	6 cm^2	60 cm^2



Obr. 2 Specifický povrch (archiv autora, 2016)

2.4 Jevy na fázovém rozhraní

Povrchová energie a povrchové napětí kapalin

Přitažlivé síly mezi molekulami jsou uvnitř kapalin vyrovnané. Na povrchu se sčítají molekulární přitažlivé síly do tahové síly, směřující dovnitř kapaliny. Zvětšení povrchu kapaliny je spojené s přesunem molekul zevnitř na povrch, přičemž se musí vynaložit práce na překonání této síly. Potřebná práce je úměrná ploše S nově vytvořeného povrchu, její relativní hodnota je vztáhnuta na 1 cm^2 nového, izotermicky vytvořeného povrchu a nazývá se povrchovou energií. Na povrchu voda – vzduch, který je u zemin nejčastější, je hodnota povrchového napětí při teplotě $+10 \text{ °C}$ asi 74 μN/m . U zemin má povrchové napětí vody značný význam, zapříčiňuje kapilární jevy v zeminách a má značnou úlohu v neúplně nasycených zeminách. [1]

Úloha vodních molekul v zeminách

V případě skutečných zemin, působí voda, jako slabí elektrolyt. Molekuly vody představují, následkem svých nesymetricky rozdělených nábojů tzv. dipóly. Pod vlivem elektrostatických sil zaujímají v silovém poli orientovanou polohu. Působením adsorpčních a elektrostatických sil, se na povrchu pevných částic shromažďují molekuly vody. Okolo částic se vytváří vodní obal tzv. lyosféra. Lyosféru tvoří orientované molekuly vody, uspořádané ve více vrstvách. Vnitřní vrstvy jsou připoutané obrovskou silou, které dosahují až $20\,000 \text{ kP/cm}^2$, při takovém tlaku se voda chová jako pevná látka, její fyzikální vlastnosti se mění, stoupá měrná hmotnost a klesá bod mrazu. Další vrstvy molekul vody jsou méně pevně vázané, chovají se jako hustá kapalina. Až v určité vzdálenosti od povrchu pevné částice, ztrácejí molekuly vody svoji orientovanost a nabývají plnou pohyblivost. [1]

2.5 Mineralogické složení zemin

V zemské kůře se vyskytuje zhruba asi 2000 známých minerálů, asi 200 nejrozšířenějších označujeme za tzv. horninotvorné minerály, a podstatnou součástí hornin je jen asi 40 minerálů. Podle způsobu vzniku dělíme minerály na prvotní a druhotné. Prvotní přicházejí do zemin v nezměněném složení z mateční horniny, a naopak druhotné, které vznikají v průběhu dezintegrace a přeměny prvotních minerálů. V inženýrské geologii nerozlišujeme zeminy takto dopodrobna, tam pro nás z hlediska zakládání staveb je dělení rozlišeno pouze do tří skupin, horniny zpevněné, nezpevněné a horniny zvláštní. [1]

2.6 Zemina jako trojfázový systém

Zemina v přírodě obsahuje složky všech tří skupenství: pevná zrna, vodu a vzduch, případně jiné plyny. Po fyzikální stránce je to složité prostředí, u kterého číselné vyjádření naráží na těžkosti, které se u homogenních a izotropních stavebních látek nevyskytují. Charakterizovat vícefázový systém předpokládá dokonalou znalost

vlastností jednotlivých fází. O vlastnostech systému jako celku rozhoduje zastoupení jednotlivých fází a vztahy mezi nimi. Z hlediska mechanického chování zeminy při různých způsobech namáhání zavádíme určitou schematizaci, bez toho aby vznikly vážnější odchylky od skutečnosti:

1) Jednofázový systém – suchá zemina, resp. zrna jsou tak velká, že blána adsorbované vody neovlivňuje mechanické vlastnosti zeminy, vzduch v pórech nemá vliv na mechanické vlastnosti,

2) Dvojfázový systém – póry zeminy spojitě vyplněny vodou,

3) Trojfázový systém – póry zeminy obsahují jak vodu, tak vzduch:

- a) Vzduch je přítomný ve formě malých uzavřených bublin v pórové vodě,
- b) Vlhkost v zemině je malá, takže voda v pórech může volně komunikovat. [1]

2.7 Pevná fáze v zemině

Měrná hmotnost zemin

Je hmotnost jednotkového objemu látky. Jednotka měrné hmotnosti je g/cm^3 , kg/m^3 , mg/m^3 nebo t/m^3 . U zemin se zjišťuje laboratorně pomocí pyktometrů. Měrná hmotnost zeminy je definována jako poměr hmotnosti pevných částic zemin k jejich objemu, objem pevných částic se zjišťuje jako objem jimi vytlačené kapaliny. Pro schematickou představu se jedná o hmotnost kostky s délkou hrany 1 cm, vyplněné materiálem pevných zrn bez pórů a bez vody. Zeminy obsahují zpravidla pevná zrna s různým mineralogickým složením, mono minerální zeminy bez příměsí se vyskytují jen velmi vzácně. Měrná hmotnost zemin jako směsí minerálů je uvedena v *tab. 1*. Skutečné hodnoty měrné hmotnosti se mohou v jednotlivých případech od průměru značně odlišovat (např. vlivem příměsí, nebo vyšším obsahem těžkého minerálu). [1]

Tab. 1: Průměrné hodnoty měrné hmotnosti zemin [1]

Zemina	Měrná hmotnost [kg/m^3]
Štěrký a písky	2 650
Prachovité písky, písčité hlíny	2 670
Prachovité hlíny	2 700
Jíly	2 750

2.8 Zrnitost zemin

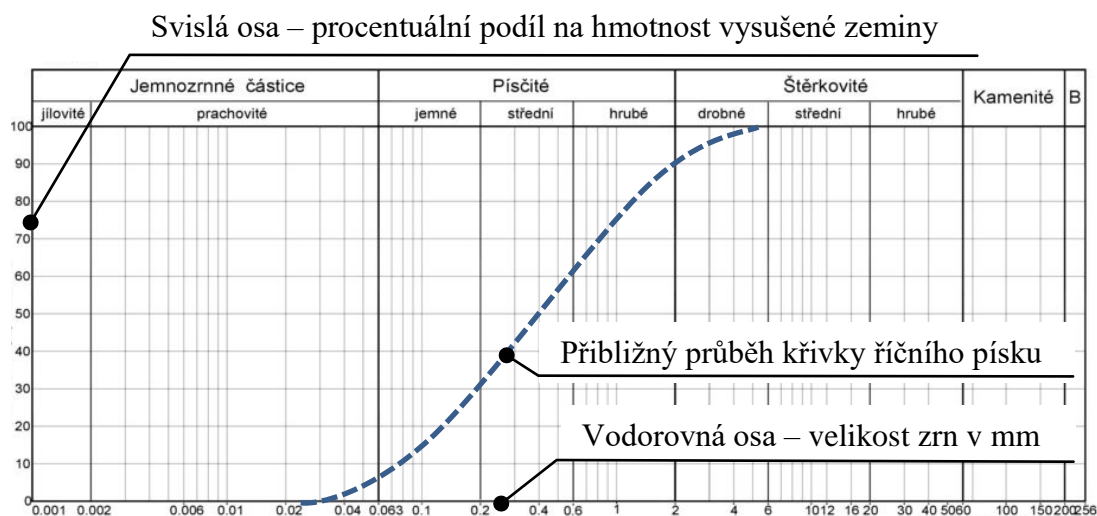
Určení názvu zrn na základě jejich velikosti

Zrnitost anebo granulometrické složení zemin, udává hmotností podíl určitých velikostních skupin zrn na celkovém složení zeminy. Vytříděnou část zeminy omezenou maximálním a minimálním průměrem zrn nazýváme frakcí (podílem). Frakce se

vymezují podle určitých společných vlastností zrn na určitém rozpětí rozměrů. Přechody od charakteristických vlastností jedné frakce k druhé jsou v přírodě postupné, hranice mezi nimi jsou určené smluvně, na základě dohody a nemají tedy přesně vymezený fyzikální význam. U nás norma rozeznává čtyři hlavní frakce: šterky, písky, prachy a jíly. [1]

Křivka zrnitosti zemin

Granulometrické složení zemin graficky znázorňujeme pomocí křivky zrnitosti (viz obr. 3), kterou vynášíme jako součtovou křivku do souřadnicového systému, kde na vodorovné ose jsou v logaritmické stupnici průměry zrn, na svislé ose je procentuální podíl na hmotnosti vysušené zeminy. Každý bod křivky udává hmotnostní podíl součtu všech zrn stejných a menších, jako je průměr odpovídající na osy úseček danému bodu křivky. Vzhledem k tomu, že menší zrna mají na vlastnosti zeminy jako celku podstatně větší vliv než zrna velké, vynášejí se průměry zrn na logaritmické stupnici. Účinný průměr zrna se určuje na základě požadavku, aby idealizovaná zemina, skládající se z pravidelných kulatých zrn stejného průměru, vykazovala v určitém ohledu stejné vlastnosti, jako má skutečná zemina. Značí se d_{ef} a určí se odhadem, pokusem anebo výpočtem. Účinný průměr se pohybuje v oblasti malých zrn, protože ty mají na vlastnosti zeminy všeobecně největší vliv, platí to především pro vlastnosti zeminy, které souvisejí s pohybem vody. [1]



Obr. 3 Tabulka pro vyznačení křivky zrnitosti zemin.

2.9 Pórovitost, číslo pórovitosti

Drobné mezery mezi pevnými částicemi zemin nazýváme póry. Póry v zemině vytváří, klikatou, rozvětvenou síť vzájemně mnohonásobně souvisejících kanálků, jejich průřez se co do tvaru a průřezu místo od místa liší. Tato vlastnost je důležitá především z hlediska vody v zemině a její fyzikální procesy při přechodu do jiných fází. Pórovitost n je definována jako poměr objemu pórů v určitém množství zeminy k celkovému objemu: [1]

$$n = \frac{V_p}{V} [\%] \quad (1.1)$$

Číslo pórovitosti e určujeme z poměru objemu pórů k objemu pevných částic v zemině:

$$e = \frac{V_p}{V_z} [-] \quad (1.2)$$

Ve skutečnosti pórovitost zemin kolísá v širokých hranicích, závisí na způsobu vzniku zeminy, průběhu křivky zrnitosti, tvaru zrn a u soudržných zemin i na vlhkosti. Čím nerovnozrnitější zemina, tím menší bývá její pórovitost, protože menší zrna dobře vyplňují mezery mezi většími. Dále bývá pórovitost tím větší, čím větší je poměr povrchu jednotlivých zrn k jejich objemu. Zeminy s přibližně kulatými zrny mají pórovitost menší, než když jsou zrna ostrohranná a nepravidelná. Tab. 2 udává přibližné meze, v kterých se pohybují pórovitosti a číslo pórovitosti různých zemin. [1]

Tab. 2: Pórovitost a číslo pórovitosti u zemin [1]

Druh zeminy	Písky	Hlíny	Jílové zeminy	Jíly	Bentonity
n [%]	25–38	36–44	40–48	45–55	65
e [-]	0,33–0,61	0,56–0,61	0,67–0,92	0,85–1,22	1,86

2.10 Vlhkost

Voda se vyskytuje v zeminách v různých formách. Když hovoříme o vlhkosti zemin, máme na mysli v mechanice zemin tu část vody, která se dá ze zeminy dostat vysušováním při teplotě okolo +105 °C. Vlhkost w je definována jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti pevných částic v určitém objemu zeminy:

$$w = \frac{G_v}{G_s} [\%] \quad (1.3)$$

Vlhkost zeminy se určuje laboratorně dle příslušné normy, vysušováním v sušičce při teplotě +105 °C. [1]

2.11 Druhy vody v zemině

Různé formy vody v zemině můžeme rozdělit do následujících kategorií:

Voda chemicky vázaná – tvoří součást minerálů, z kterých se skládají pevné částice zeminy. Jsou to vlastně hydroxylové skupiny, dají se ze zeminy odstranit jen pomocí velmi vysokých teplot, přičemž se změní chemické i mineralogické složení částic.

Voda krystalová – tvoří součást krystalů, odstraňuje se při vyšších teplotách, přičemž se minerály, z kterých se uvolňuje, mění na bezvodé formy a rozpadají se. Na rozdíl od chemicky vázané vody zachovává krystalová voda svoji molekulární formu.

Voda vázaná – vytváří kolem pevných částic vodní obal, tzv. lyosféru z orientovaných dipólových molekul vody, jako i z molekul v hydratačním obalu iontů, adsorbovaných na povrchu nebo tvořících součást difúzního obalu pevných částic. Dále se dělí:

a) Pevně vázaná (adsorbovaná, sorpční) – kterou tvoří vnitřní vrstvy orientovaných molekul vody v těsné blízkosti negativně nabitého povrchu pevné částice. Při hydratování vysušených minerálních částic vzniká tzv. smáčecí teplo, z velikosti smáčecího tepla je možno vypočítat síly, které poutají vodu k povrchu částic. Tyto síly podle různých autorů dosahují deseti tisíce kP/cm². Při takto obrovských tlacích se voda chová jako pevná látka, její hmotnost narůstá, bod mrazu klesá pod 0 °C. Proces zamrzání začíná až pod teplotou -1,5 °C, dle některých autorů obsahuje jíl nezamrzlou vodu ještě při teplotě -21 °C. Mění se též elektrická vodivost a dielektrická konstanta. Tloušťka obalu závisí od mineralogického složení pevné částice, od druhu adsorbovaných iontů, od teploty atd., dosahuje maximálně 10 molekul. Pevně vázaná voda se nedá ze zeminy mechanicky odstranit, uniká jen při vysušování při teplotě vyšší než +100 °C.

b) Slabě vázaná (obalová, osmotická) – vzniká v zemině, když její vlhkost přesahuje množství vody, odpovídající pevně vázaným molekulám H₂O. Sestává se z dalších vrstev orientovaných dipólů vody, poutaných molekulárními přitažlivými silami a elektrostatickými účinky orientovaných molekul a iontů adsorbované vrstvy. Slabě vázaná voda zahrnuje i hydratované ionty difúzního obalu pevné částice. Tloušťka obalu slabě vázané vody se odhaduje na maximálně 0,5 μm, tato hranice se nedá přesně určit, protože přechod od slabě vázané vody k volné vodě je plynulý. Hmotnost slabě vázané vody je > 1 g/cm³, chová se jako viskózní kapalina. Bod mrazu je nižší než u volné vody. Zde vidíme, že mocnost obalu pevně a slabě vázané vody je oproti rozměrům jemných částic relativně velká. Když zvážíme i velký specifický povrch jemnozrnných zemin, pochopíme, že vázaná voda propůjčuje jemnozrnným zeminám kvalitativně odlišné vlastnosti, je příčinou plasticity jemnozrnných zemin.

c) Hygroskopická – je ta část vázané vody, kterou vysušená zemina je schopná přijmout a poutat na povrchu částic přímo ze vzduchu. Maximální hygroskopická vlhkost odpovídá množství vody v zemině, kterou přijme ze vzduchu při 100% relativní vlhkosti vzduchu a při teplotě +20 °C. Maximální hygroskopická písků je 1–2 %, u jílu přesahuje 10 %. Dle některých názorů odpovídá hygroskopická vlhkost pevně vázané vodě.

Voda volná – nepodléhá ani adsorpčním, ani elektrostatickým a molekulárním přitažlivým silám. Vyplnuje v nasycených zeminách souvisle zvyšující objem pórů, má

fyzikální vlastnosti obyčejné vody, podléhá síle zemské přitažlivosti. Volnou vodu dále dělíme:

- a) **Kapilární**, která následkem povrchového napětí vody vystupuje v pórech nad souvislou hladinou podzemní vody v zemině,
- b) **Gravitační**, která souvisle vyplňuje póry zeminy pod hladinou podzemní vody a podléhá jen zemské přitažlivosti.

Vodní pára – vyskytuje se v nenasyčených zeminách, když vlhkost zeminy dosahuje maximální hygroskopicitu, vládne v atmosféře pórů 100% relativní vlhkost vzduchu. Vodní páry pohybující se z míst s větší tenzí k místům, kde tlak pár je menší, z míst s vyšší teplotou do míst chladnějších. Význam vodní páry v zemině je ten, že je to jediná forma vody schopná pohybu i při nízkých vlhkostech zeminy, a že její kondenzací můžou vzniknout ostatní formy výskytu vody. Důležitou úlohu hraje zejména při zamrznání zemin, a ve vodně teplotním režimu podloží cest, letištních ploch, hrází i násypů. [1]

2.12 Konzistence zemin

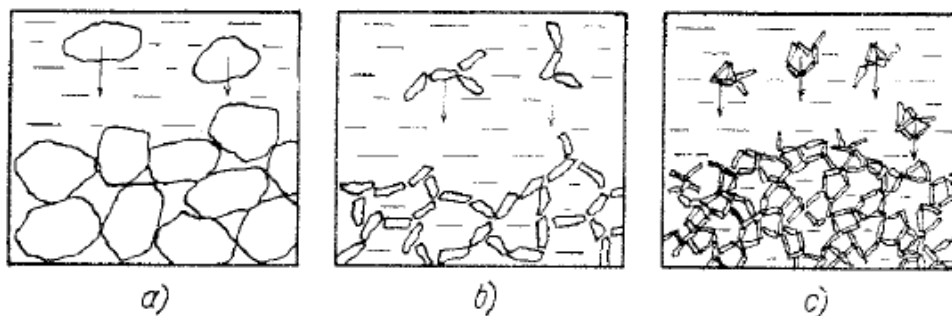
Vázaná voda se vyskytuje na povrchu částic jak u hrubozrnných tak u jemnozrnných zemin. U štěrků a písků rozměry zrn převyšují tisícinásobně tloušťku blán obalové vody, jejich specifický povrch je malý, vliv vlhkosti na vlastnosti těchto zemin je nepatrný. Naopak u jemnozrnných zemin se tloušťky blán obalové vody přibližují rozměrům zrn. Celkové množství vázané vody v těchto zeminách je velké a značně ovlivňuje jejich vlastnosti, propůjčuje jim soudržnost. Mechanické vlastnosti soudržných zemin závisí v rozhodující míře na vlhkosti. Fyzikální stav soudržné zeminy, závislý na vlhkosti, nazýváme konzistencí anebo konzistenčním stavem. Rozeznáváme konzistenční stav tvrdý, pevný, plastický, kašovitý nebo tekutý. [1]

2.13 Struktura zemin

Vlastnosti zemin jako vícefázové disperzní soustavy závisí kromě uvedených okolností v značné míře i na uspořádání pevných částic v zemině. Uspořádání částic je podmíněné způsobem vzniku zeminy, zrnitostí a silovými účinky, které se na jejím vzniku podíleli.

Pojmem struktura (vnitřní stavba) zeminy označujeme vzájemné uspořádání pevných částic zeminy v prostoru i síly, které se na vytváření a zachování tohoto uspořádání zúčastní. Když zemina vzniká z poměrně hrubých zrn usazováním ve vodě, rozhoduje o průběhu sedimentace síla gravitace. Takto vznikající zeminy mají zrnitou strukturu. Je charakteristická pro sypké zeminy, jako jsou písky a štěrky. Když póry nejsou vyplněné jemnějšími zrny, jsou silně nebo středně propustné. Při usazování jílových zrn ve vodním prostředí převažují nad gravitačními silami síly elektro molekulární a adsorpční. Když probíhá sedimentace ve sladkovodním prostředí, narážejí

jednotlivé částice při Brownově pohybu na sebe a spojují se v dotkových bodech adsorpčními silami, vytvářejí tak řetězce o několika článcích. Zvýšená tíže takto vzniklého prvku překonává Brownův pohyb, klesá ke dnu, kde vytváří sediment s kyprou tzv. voštinovou strukturou. Při usazování v elektrolytu (např. voda obsahující rozpuštěné soli) dochází chemickými vlivy ke koagulaci jemných částic v disperzním prostředí, vznikají vločky jemných částic, klesají na dno a vytvářejí houbovitou strukturu (viz obr. 4).



Obr. 4 Struktura dle Terzaghiho: a) zrnitá, b) voštinová, c) houbovitá [1]

Houbovitou a voštinovou strukturu mají jíly, jsou silně stlačitelné, při změnách vlhkosti podléhají objemovým změnám, jejich konzistence závisí na vlhkosti. Navzdory velké celkové pórovitosti jsou běžně prakticky nepropustné, protože rozměry jednotlivých pórů jsou malé a póry jsou částečně nebo úplně uzavřené slabě vázanou vodou. Otázka struktury zemin hraje mimořádně důležitou roli při sledování fyzikální podstaty pevnosti jílových zemin jak v rostlém tak v zhutněném stavu (při budování zemních konstrukcí). Zkoumání struktury jílu je možné jen komplikovanými nepřímými metodami. [1]

2.14 Promrzání zemin

Zimní promrzání půdy je významným meteorologickým a klimatickým činitelem jak z hlediska geografického a biologického, tak i technického. Definice zmrzlé půdy nebo zeminy není jednoduchá a jednoznačná. Nejčastěji používané určování hloubky promrzání pomocí nulové izotermy v půdě není spolehlivé hlavně proto, že půda neobsahuje vodu, ale půdní roztok s různou teplotou tuhnutí. Navíc změny teploty půdy ve větších hloubkách jsou poměrně pomalé a kromě toho jsou významně ovlivňovány i jinými faktory. Mezi nejdůležitější z nich patří:

- Teplota povrchu půdy a zásoba tepla ve spodních vrstvách profilu,
- Půdní druh a typ (včetně obsahu vody a vzduchu a dalších fyzikálních charakteristik),
- Reliéf terénu (terénní prolákliny promrzají do menších hloubek než vodorovný povrch, vyvýšené místa a severní svahy naopak hlouběji),
- Porost a sněhová pokrývka svými tepelně izolačními vlastnostmi hloubku promrzání všeobecně zmenšují.

Z uvedených důvodů se rozlišuje půda polozmrzlá a půda tvrdě zmrzlá a určuje se přímým měřením pomocí půdních mrazoměrů neboli kryometrů. Během zimního období promrzá půda ve střední Evropě v nížinách víceméně pravidelně do hloubky 0,4–0,5 m, v tuhých zimách za dlouhotrvajících holomrazů do 1 m (v ojedinělých případech i hlouběji). Změny počasí během zimy a postupné jarní prohřívání povrchu půdy působí často střídání vrstev polozmrzlých s tvrdě zmrzlými i s vodou v tekutém stavu. Změny objemu při střídání zmrznutí a rozmrzání povrchu působí značné škody. Nezámrazná hloubka je důležitou technickou charakteristikou při projektování sítí (vodovody, kanalizace). Na evropském kontinentu se pohybuje od 40 cm na jihu území do 2 m i více na severovýchodních hranicích, v ČR technické normy předepisují bezpečnou minimální hloubku 1,2 m.

V oblastech, kde je průměrná roční teplota vzduchu nižší než 0 °C se může teoreticky vyskytovat věčně zmrzlá půda neboli permafrost. V takovém případě povrch půdy během léta rozmrzá a obnovuje se vegetace, přičemž ve větších hloubkách se udržuje trvale půda zmrzlá. Prakticky se vyskytuje permafrost v místech, kde je průměrná roční teplota vzduchu nižší než –2 °C. Na severní polokouli zaujímá permafrost asi 22 % souše a největší hloubky dosahuje podzemní led v severovýchodní Asii v Jakutské oblasti (i přes 1 km). Proměnlivá změna hloubky rozmrzání působí deformace půdy (vlivem změny objemu zmrzlé půdy v hloubce) a je příčinou mnoha problémů ve stavebnictví a dopravě. [3]

Promrzání zemin obecně

V zimním období odevzdává teplejší půda své naakumulované teplo chladnějšímu vzduchu na povrchu zeminy. V důsledku toho dochází k posunu nulové izotermy do spodnějších půdních vrstev. Dochází tak k promrzání zeminy. V pórech zeminy je voda, která když mrzne, zvětší svůj objem, neboť objem ledu je o 9 % větší než objem vody. Toto zvětšení se projeví u zeminy nasycené vodou okamžitým zvýšením povrchu o hodnotu:

$$\Delta h = 0,09 * n * h \quad (1.4)$$

Kde h je hloubka promrznutí. Je rozdíl, mrzne-li zemina sypká nebo zemina soudržná. Zmrzlá voda v uzavřeném prostoru vyvozuje velký tlak. Při teplotě –1 °C činil tlak 132 atm a při teplotě –5 °C činil 650 atm. Přibližné hloubky, do nichž půda promrzne, jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3: Hloubky promrznutí [1]

Nadmořská výška [m]	< 250	250–400	400–700	700–900
Hloubka promrznutí h_z [m]	0,75–0,85	0,8–0,95	0,9–1,10	1,1–1,30

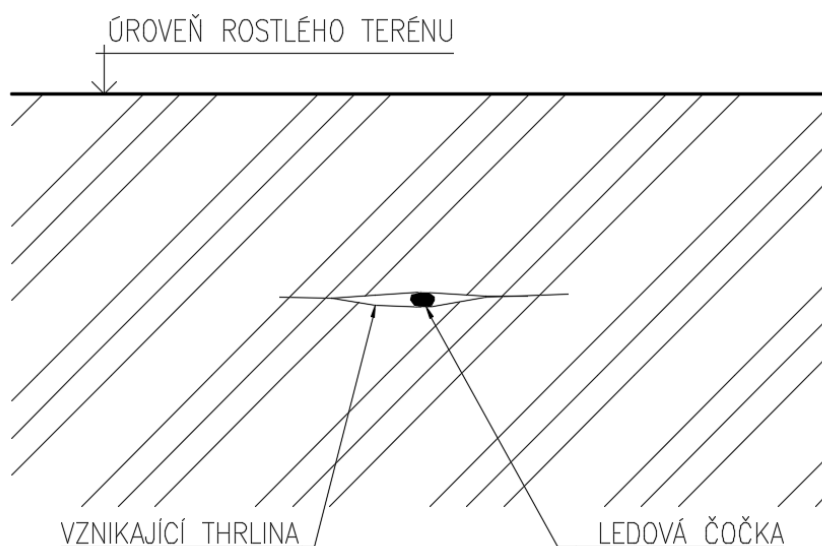
V našich poměrech se počítá s hloubkou promrznutí 0,8–1,2 m. Zmrzlá zemina má velkou pevnost, a tím i únosnost, po rozmrznutí je tomu naopak. [1]

Promrzání sypkých zemin

V sypkých zeminách, jsou-li nasyceny vodou a promrznou, tvoří led krystalky. Zemina nemá soudržnost a proto v místě, kde zemina zmrzá, se zrna písku nadzvedají a posouvají, takže mohou vytvořit krystaly ledu. Písky jsou propustné a mají malou vzlínavost, takže za mrazu jen málo vody vzlíná do písku. Po rozmrznutí voda z nich rychle odteče a neprojevují se u nich žádné poruchy. Proto písky označujeme jako nenamrzavé, neboť zvýšení povrchu je zanedbatelné. [1]

Promrzání soudržných zemin

Při zmrznutí soudržné zeminy, když v jednom místě přechází voda v led a zvětšuje objem, zrna soudržné zeminy se nemohou volně posunout, jako je tomu u písku a proto se soudržná zemina trhá (viz obr. 5).



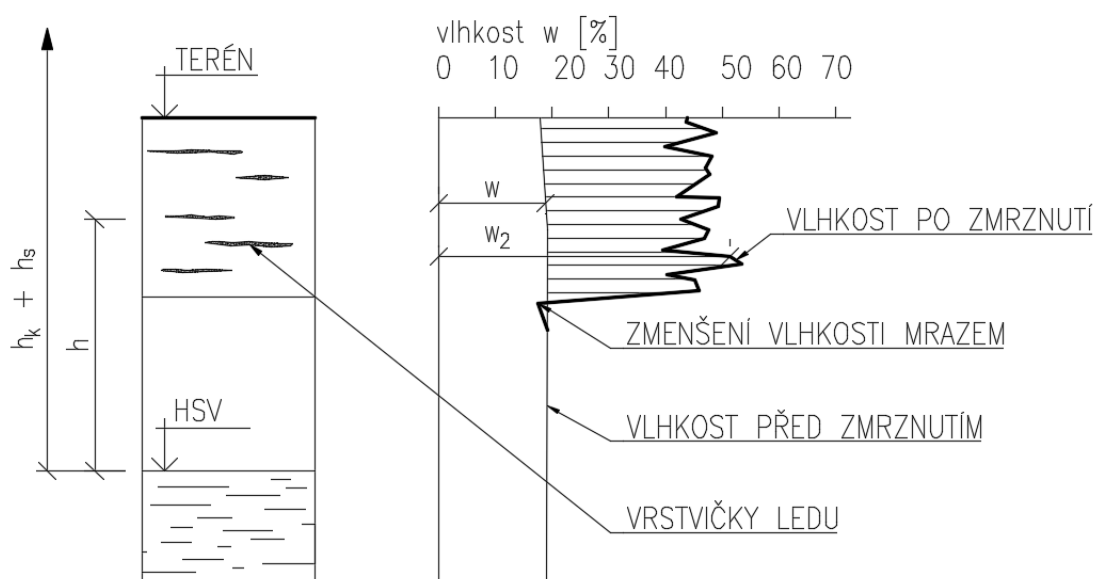
Obr. 5 Trhlina v soudržné zemině, vlivem mrznutí vody, upraveno [1]

V zemině se vytvoří vodorovná mezera a v ní působí vlivem zvětšování objemu sání. Např. v londýnském jílu činila sací síla až 10 kP/cm^2 , čemuž odpovídá sací výška $h_s = 100 \text{ m}$. Voda vsakuje do vzniklé mezery, kde zmrzá, a proto se v jílech tvoří ledové čočky nebo vrstvy tlusté i několik centimetrů. U jílu je kapilární výška h_k sice velká, avšak propustnost, je velmi malá. Zvýšení povrchu silnic, v jejichž podloží je jíl, nebývá velké. Voda adsorbovaná na povrchu zrn mrzne při teplotě nižší, než je $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Tak např. ve hlíně bylo naměřeno 10 % nezmrzlé vody při teplotě $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a v jílu při teplotě $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ bylo dokonce 12,5 % nezmrzlé vody. Byly provedeny zkoušky v kapilárách a byla měřena teplota, při níž voda mrzne v závislosti na průměru kapiláry, jak je uvedeno v tab. 5. [1]

Tab. 4: Teplota mrznutí vody v kapiláře [1]

Průměr kapiláry [mm]	1,57	0,24	0,15	0,06
Teplota mrznutí vody [°C]	-6,4	-13,3	-14,6	-18,5

Promrzne-li zemina, nezmění se všechna voda v led, nýbrž absorbovaná voda zůstane nezmrzlá a voda se proto může pohybovat od hladiny podzemní vody do zmrzlé vrstvy, kde zmrzá a mění se v led. Během trvání mrazu se zemina obohacuje o led a její vlhkost se zvětšuje (viz obr. 6).



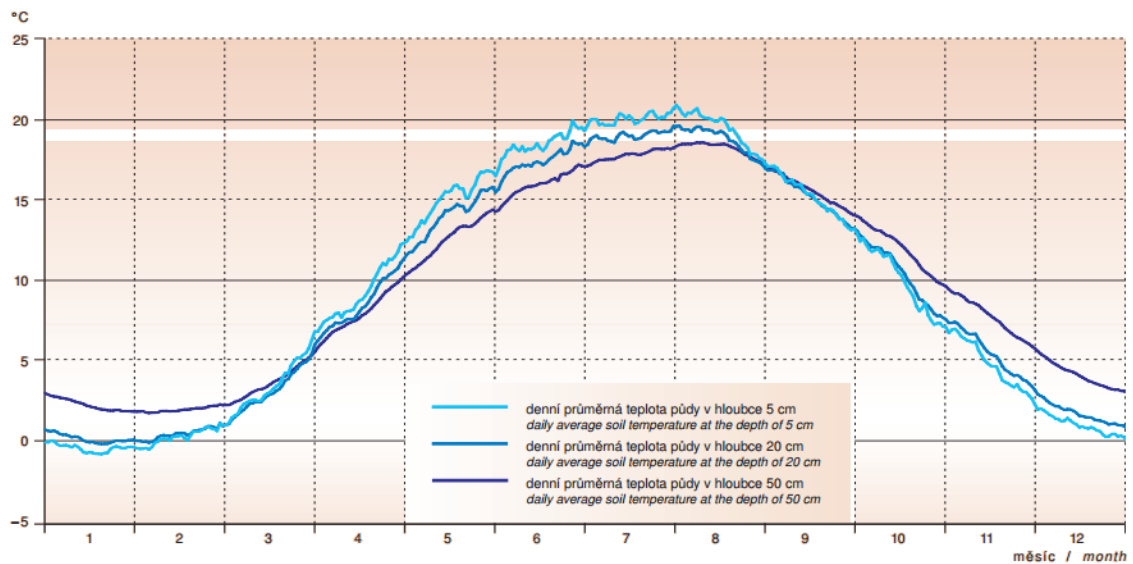
Obr. 6 Zvětšení vlhkosti zemin vlivem promrznutí, upraveno [1]

Těsně pod zmrzlou vrstvou se vlhkost zeminy o něco zmenší vlivem sacích sil, které vznikají při zmrzáni zeminy. O tom svědčí skutečnost, že se za mrazu vytvoří na kalužích tenká ledová vrstvička v úrovni hladiny vody a pod ní není žádná voda, neboť ji nasála zemina při promrzáni. Soudržné zeminy jsou namrzavé, nejvíce namrzavé jsou hlinité písky a prachové stejnozrné zeminy, u nichž průměr zrn bývá 0,02 mm. Podle Casagrandeho jsou stejnozrné zeminy namrzavé, jestliže obsahují více než 10 % zrn větších 0,02 mm. Jsou-li zeminy nesterjnozrné, jsou namrzavé, obsahují-li více než 3 % zrn větších 0,02 mm.

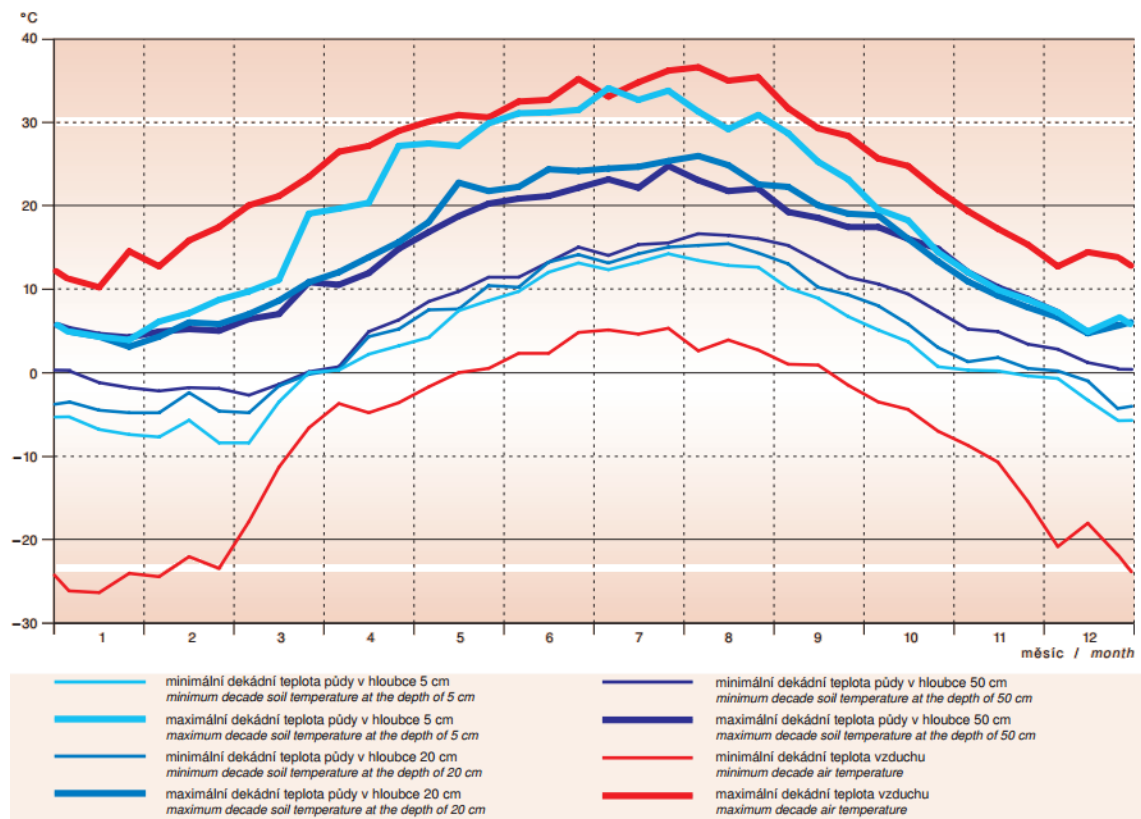
Stavby, které se zakládají na namrzavých zeminách, se musí zakládat, až v hloubce kam maximálně sahá mráz, jinak by se po promrznutí zeminy stavba nadzvedla. Z jara, po rozmrznutí zeminy, by stavba sedla tím, že by namrzlá zemina konsolidovala. Uvnitř stavby, kam mráz nesáhá a kde půda nepromrzne, by se zdi nezvedaly. Nestejnoměrným zvedáním zdí stavby za mrazu by na stavbě vznikly trhliny. [1]

2.15 Teplota půdy

Neustálé změny energetické bilance aktivního povrchu působí jeho proměnlivé ohřívání nebo ochlazování. Oběh planety země je příčinou pravidelné roční změny související se střídáním ročních dob, které se projevují jako roční chod teploty půd, nejvyšší hodnoty teploty půdy jsou v povrchových vrstvách pozorovány v průběhu vrcholícího léta a nejnižší hodnoty v druhé polovině zimy (viz graf 1, 2). [3]

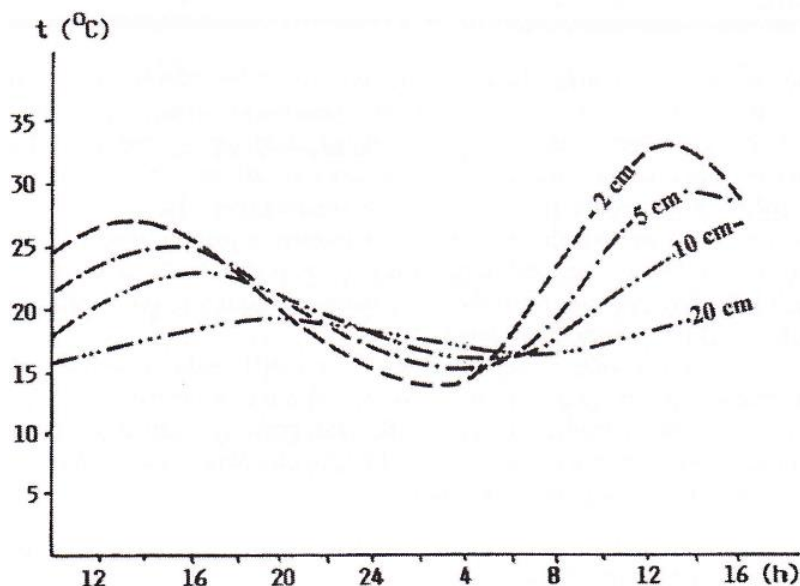


Graf 1 Roční chod průměrné denní teploty půdy v hloubkách 5, 20 a 50 cm na stanici v Olomouci [4]



Graf 2 Absolutní dekádní extrémy teploty půdy v hloubkách 5, 20 a 50 cm na stanici v Olomouci [4]

Nejzřetelnější pravidelné periodické změny vyvolává zdánlivý pohyb slunce na obloze během dne a určuje tak denní chod teploty půdy. V tomto průběhu se nejčastěji vyskytuje nejvyšší hodnota teploty půdy povrchu kolem 13. hodiny pravého místního času, denní minimum je proměnlivé a připadá zpravidla na dobu těsně před východem slunce (viz graf 3).



Graf 3 Denní chod teploty půdy bez porostu během bezoblačného dne (Praha, Suchdol, 12.–13. 6. 1975) [3]

Teoretické zákonitosti proměnlivého teplotního pole v povrchových vrstvách půdy formuloval Fourier (1822) následovně: [3]

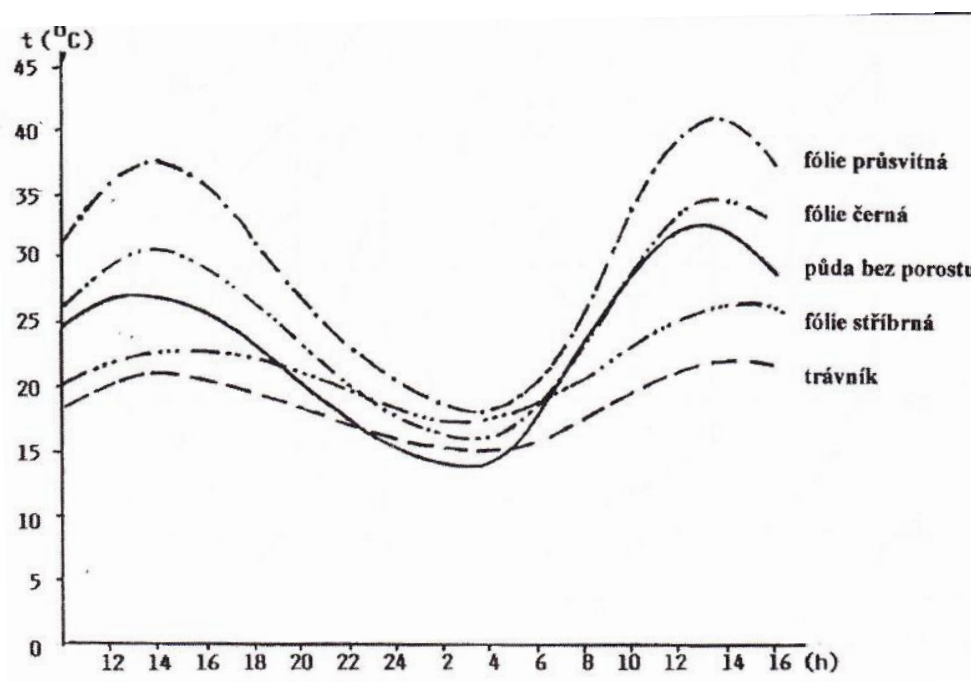
- Perioda časových změn teploty půdy se s rostoucí hloubkou nemění (tj. u denního chodu zůstává 24 hodin a u ročního chodu 1 rok)
- Amplituda časových změn se s rostoucí hloubkou zmenšuje (největší rozdíl mezi denním maximem a minimum je na povrchu a nulový rozdíl je v hloubce stálé denní teploty, asi v 50 cm; hloubka stálé roční teploty je asi ve 20 m)
- Extrémy se s rostoucí hloubkou opožďují (denní maximum i minimum se v ČR opožďují asi o 3 hodiny na každých 10 cm hloubky; opožďování ročních extrémů je asi 25 dnů na každý metr hloubky)
- Poměr denních a ročních period je rovný druhé odmocnině poměru denní a roční amplitudy (v ČR asi v poměru 1:20)*

*Uvedené teoretické vztahy jsou značně idealizované a mají pouze orientační platnost, přesto jsou však užitečné pro studium všeobecných charakteristik teplotního režimu půdy na povrchu i ve větších hloubkách.

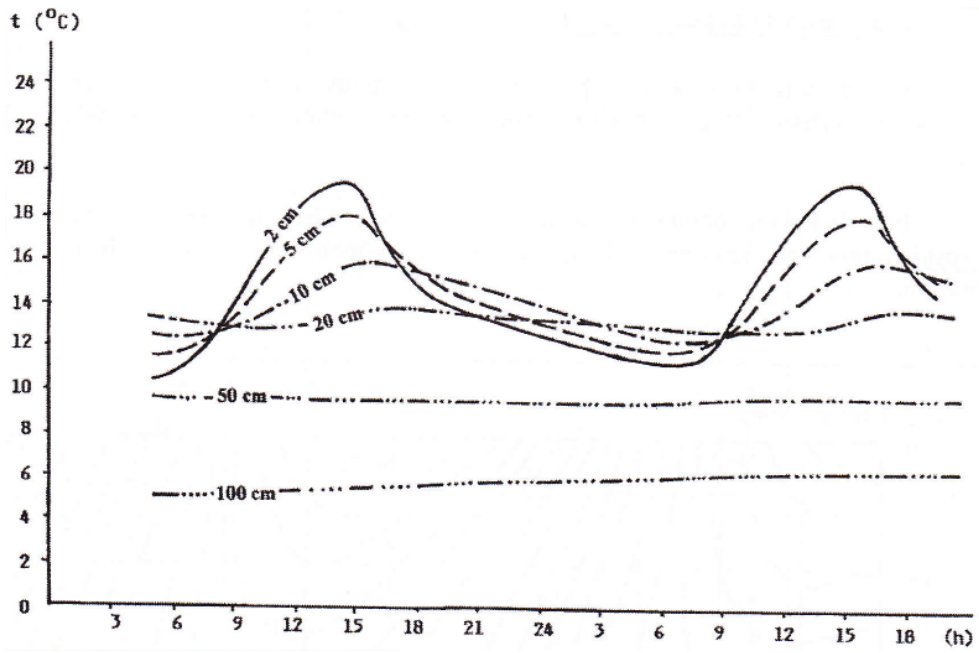
V reálných přírodních podmínkách zjišťujeme poměrně velké odchylky od zmiňovaných teoretických pravidel. Denní chod teploty půdy je ve všech hloubkách více ovlivňován současným působením následujících faktorů:

- Expozicí (sklonem svahu a jeho orientací ke světovým stranám, údolní nebo vrcholovou polohou lokality),
- Stavem půdy, zejména obsahem vody a vzduchu, utužením půdy, nakypřením povrchu (utužené půdy s větším obsahem vody vykazují na povrchu menší amplitudu než půdy suché a nakypřené),
- Výškou a hustotou porostu, sněhové pokrývky, případně i aktivním ovlivněním nastýlanými materiály,
- Počasím – krátkodobé neperiodické změny vyvolané oblačností a srážkami jsou zřetelné zejména v povrchových vrstvách několikadenní kolísání hladiny stálé denní teploty půdy vyvolané změnou synoptické povětrnostní situace, se projevuje i ve větších hloubkách (nepravidelný posun izotermní hladiny),
- Podnebím – zmenšující se zeměpisná šířka zvětšuje denní amplitudu díky pravidelným vysokým denním maximům (přičemž paradoxně roční amplituda průměrných hodnot zůstává v rovníkových oblastech celoročně malá), naproti tomu rostoucí zeměpisná šířka roční amplitudu výrazně zvětšuje.

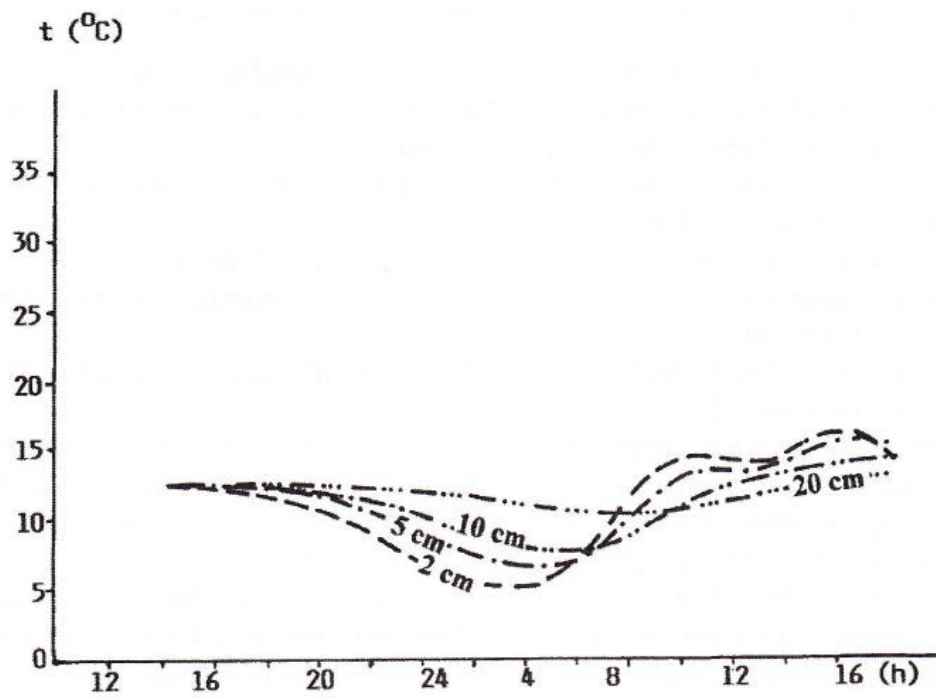
Popisované zkušenosti dokumentujeme pomocí grafů s naměřenými charakteristickými denními chody za odlišných situací (viz *graf 4,5,6*). [3]



Graf 4 Ovlivnění denního chodu teploty půdy různými druhy aktivního povrchu v hloubce 2 cm za bezoblačného dne (Praha, Suchdol, 12.–13. 6. 1975) [3]



Graf 5 Posun denní izotermní vrstvy ve větších hloubkách při postupném ohřívání půdy na jaře (Praha Suchdol) [3]



Graf 6 Ovlivnění denního chodu teploty půdy v povrchových vrstvách chladným oblačným počasím s přeháňkou (Praha Suchdol, 2.–3. 6. 1975) [3]

3 Základy a podzemní část objektu

3.1 Základové zeminy a horniny

Dle ČSN 73 1001 *Základová půda pod plošnými základy* se z hlediska inženýrské geologie rozlišují:

- Horniny zpevněné, tj. skalní a poloskalní,
- Horniny nezpevněné, tj. horniny nesoudržné a soudržné (označujeme jako zeminy),
- Zeminy zvláštního složení, tj. např. zeminy organické umělé, zemědělské půdy, navážky apod.

Z hlediska mineralogického složení se tedy zeminy velmi zjednodušují a nerozlišují se do takových podrobností.

- Skalní a poloskalní horniny – malé objemové změny při mrazu.
- Nesoudržné zeminy – jsou nenamrzavé a propustné.
- Soudržné zeminy – patří mezi namrzavé zeminy.
- Nevhodné základové půdy – zakládání na těchto půdách vyžaduje zvláštní opatření. [5]

3.2 Základové poměry

Dle ČSN 73 1001 *Základová půda pod plošnými základy* se v závislosti na složitosti rozlišují základové poměry:

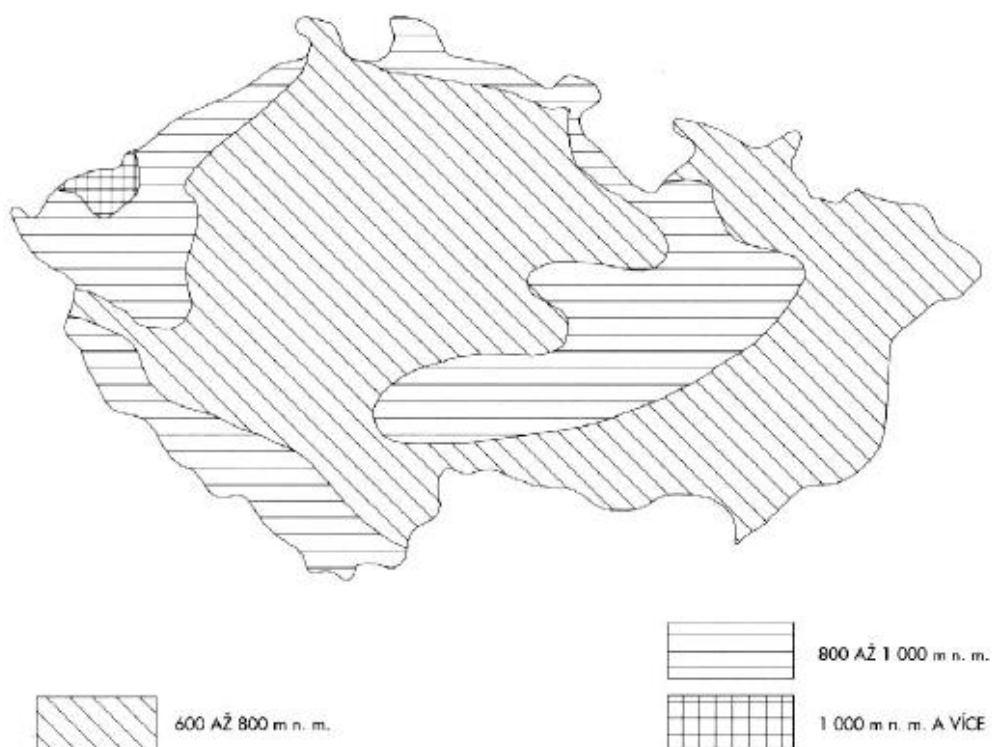
Jednoduché základové poměry – základová půda se v rozsahu stavebního objektu podstatně nemění, jednotlivé vrstvy mají přibližně stálou mocnost a jsou uloženy vodorovně nebo téměř vodorovně. Podzemní voda neovlivňuje uspořádání objektů a návrh jejich konstrukce,

Složité základové poměry – základová půda se v rozsahu stavebního objektu místo od místa podstatně mění nebo vrstvy mají proměnlivou mocnost anebo jsou nepravidelně uloženy. Podzemní voda se nepříznivě uplatňuje při návrhu objektu a znesnadňuje postup jejich zakládání. Za složité základové poměry se považují také případy, kdy základová půda má nepříznivé vlastnosti nebo ji tvoří zvláštní zeminy či skalní horniny.

Podle náročnosti, s přihlédnutím ke statickým hlediskům, se stavební konstrukce rozlišují na nenáročnou konstrukci a náročnou konstrukci. [5]

3.3 Hloubka založení

Hloubka založení je dána vzdáleností mezi nejnižším bodem upraveného terénu kolem základů a nejvyšší úrovní základové spáry. U podsklepené budovy, která nemá ve sklepě tuhou podlahu, měříme hloubku založení od úrovně podlahy podzemního podlaží. Při menší hloubce je nebezpečí, že základová půda zvětšováním svého objemu zvedne základy a stavba se poruší. Minimální hloubka základové spáry plošných základů je vzhledem k promrznání 0,8 m u nenamrzavých (nesoudrzných) zemin a 1 m u namrzavých (soudrzných) zemin, pokud je hladina spodní vody nejméně 2 m pod upraveným terénem. Je-li hladina podzemní vody v hloubce menší než 2 m pod terénem, je nejmenší hloubka základové spáry v soudrzných zeminách 1,2 m pod terénem. V případě, že základovou půdu tvoří jíly nebo slíny, je třeba s ohledem na cyklické objemové změny (nabývání, sesychání) zakládat v hloubce 1,4 m. Není nutné, aby základ zasahoval betonem až do této hloubky, podle výpočtu se může nahradit štěrkopískovou vrstvou. [5]



Obr. 7 Mapa ČR hloubek promrznání základové půdy [5]

4 Střešní zahrady

Zelené střechy jsou občas považovány za ekologickou novinku. Jako architektonický prvek jsou však známy již dlouho. Pro širokou veřejnost jsou dost možná něčím neznámým, protože u nás nemají velkou tradici (na rozdíl např. od Skandinávie). Přesto je o nich stále více slyšet – a to nejen v České republice, ale hlavně v zahraničí. Zeleným střechám je věnováno stále více knih, článků a výzkumů. Zelené střechy mají podle mnohých odborníků výhody, které mohou obzvláště současně městské aglomerace využít ke zlepšení svého životního prostředí. [6]

4.1 Názvosloví

V rámci tvorby zeleně na střešních konstrukcích dosud existuje nejednotnost v terminologii, která by byla všeobecně uznávána a používána. Nejednotnost v terminologii je dána často rozdílnými překlady cizojazyčné literatury. Základní současná definice tvorby zeleně na střešních konstrukcích:

Výsadba na konstrukci

Rostliny vysazené do vegetační vrstvy půdy, oddělené od rostlého terénu stavební konstrukcí, např. výsadba na střechách, terasách, v nádobách. (ČSN 83 9001, červen 1999, s účinností od 1. Července 1999).

Střešní zeleň

Zeleň na střechách nadzemních budov, řadí se do zeleně na konstrukcích. (ČSN 83 9001, červen 1999, s účinností od 1. Července 1999).

Střešní zahrada

Představuje soubor skladebných prvků (vegetačních a technických), založených na uměle vytvořeném stavebním základu. Stavební základ je součástí konstrukce, ukončující shora předmětnou stavbu a odděluje pěstební profil od rostlého terénu.

Střešní zahrada je střecha částečně nebo zcela pokrytá vegetací a půdou, nebo pěstebním substrátem vysazovaným nad hydroizolační membránu. Střecha také může obsahovat další vrstvy, jako například kořenovou bariéru, odvodnění a zavlažování. [6]

4.2 Výhody střešních zahrad

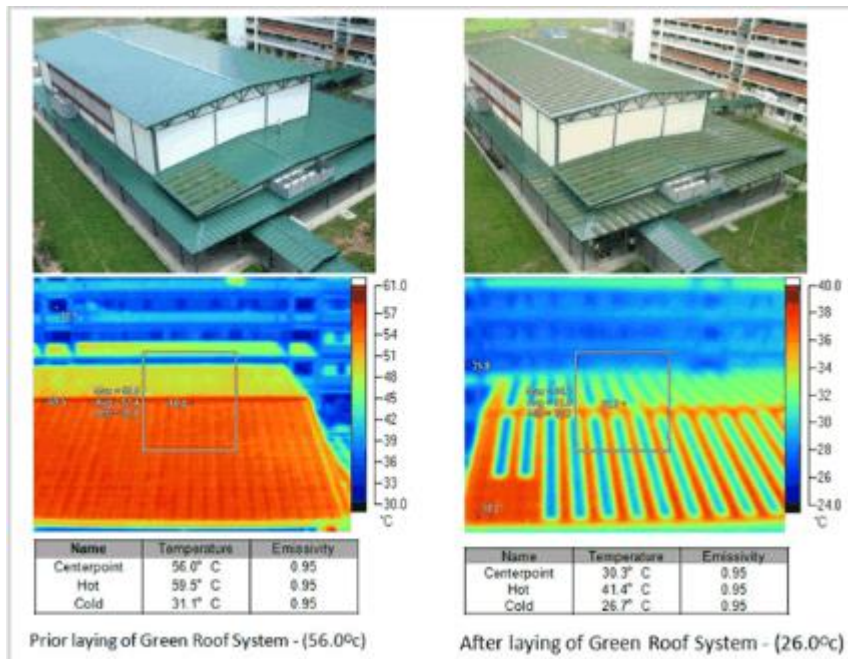
Stále více se začínají prosazovat i na našich budovách jak z důvodu estetických, tak i praktických neboť plní funkci doplňkové tepelné a zvukové izolace. Chrání střechu před mechanickým poškozením a vnějšími vlivy. Zde uvádím výčet nejdůležitějších výhod:

Prodloužení životnosti hydroizolace

zabránění působení UV záření, bránění akumulaci velkého množství tepla, ochrana před mechanickým poškozením vlivem krupobití, větru.

Vliv na tepelnou stabilitu interiéru

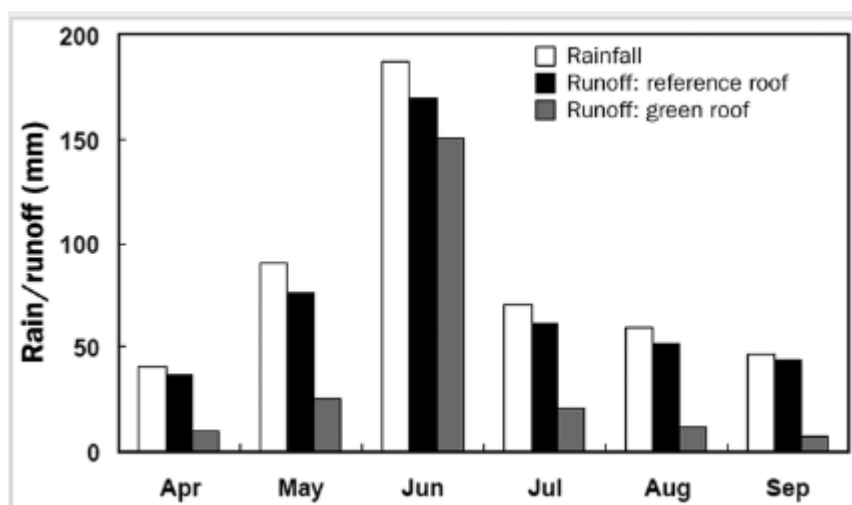
Souvrství střešní zahrady působí jako tepelná izolace domu, akumuluje tepelnou energii podle své aktuální potřeby, účinně reguluje extrémní teplotní výkyvy v průběhu roku, snižuje nároky na klimatizaci.



Obr. 8 Prostup tepla před a po položení zelené střechy [7]

Retence srážkových vod

Odlehčení kanalizační sítě při přívalových deštích, část vody se postupně odpaří zpět do atmosféry a zbytek postupně oteče do kanalizační sítě (viz graf 7).



Graf 7 Srovnání odtoku dešťové vody z klasické a zelené střechy při výšce substrátu 15 cm [6]

Porovnání drenážních vrstev

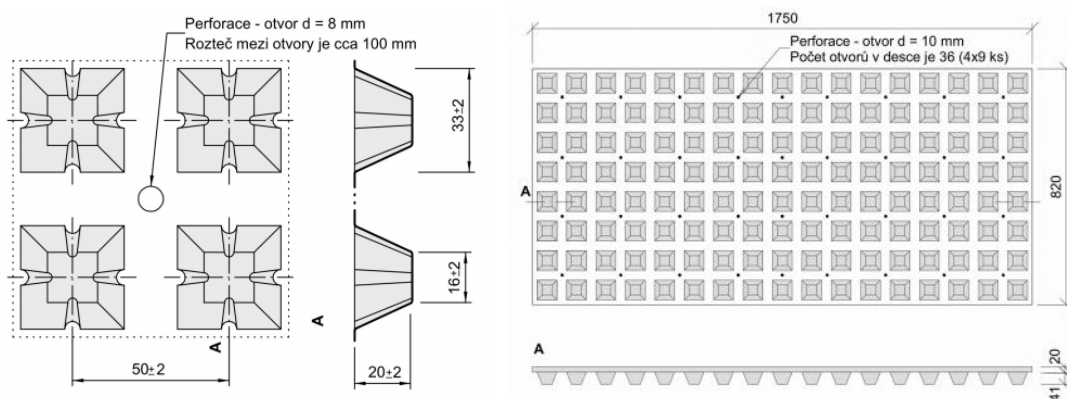
Nopová fólie – LITHOPLAST

Nopovou fólií byla zvolena od českého výrobce Lithoplast®, typ fólie DREN, určená pro zelené střechy. Je vyrobena z vysoko hustotního polyetylénu HDPE a barviva. Životnost minimálně 50 let (pokud není vystavena UV záření).

Použití ve stavebnictví tam kde je potřeba drenáž dle normy ČSN EN 13967 (fólie pro zajištění akumulace a odvodu vody ve skladbě střešních zahrad na plochých střechách, terasách, v atriích uvnitř budov, na vytváření zelených ploch nad podzemními garážemi apod.). Spojování rolí se provádí oboustranně lepící butylkaučukovou páskou v přeložení fólií (spoj je nutné trvale zatížit). Na obr. 9 jsou uvedeny informace z technického listu výrobce.

PARAMETRY VÝROBKU V DESCE:

Označení		40/1,5	60/1,6	80/2,0	Tolerance
Objemová hmotnost	kg/m ³	950	950	950	+/- 50 kg/m ³
Tloušťka výchozí fólie	mm	1,5	1,6	2,0	+/- 10%
Šířka	mm	820	810	800	+/- 4%
Délka	bm	1,75	1,75	1,75	+/- 4%
Výška nopu	mm	41	61	78	+/- 2 mm
Objem nopů	l/m ²	10,6	16,4	20,8	+/- 10%
Objem zadržené vody v nopech	l/m ²	8,3	12,2	15,7	+/- 10%
Objem vzduchu mezery	l/m ²	30,4	44,6	57,2	+/- 10%
Pevnost v tlaku	N/mm ²	0,12	0,06	0,05	-
Balení	ks	10	10	10	+/- 0,7 m ²
Plošná hmotnost	kg/m ²	1,57	1,66	2,11	+/- 10%
Hmotnost balení	kg	22,53	23,53	29,54	+/- 10%



Obr. 9 Parametry a schéma výroby LITHOPLAST DREN 40/1,5 [technický list výrobce]

Recyklovaná textilní rohož – RETEX

Tento výrobek se prozatím testuje ve výzkumném centru AdMas. Je zabudován ve skladbě zelených střech jako drenážní a retenční vrstva (retence a drenážní schopnosti

ověřeny testem a výpočtem ve VUT Brno, AdMas). Jedná se o netkanou textílii vyrobenou technologií Airlay z recyklovaného polyesteru, pojenou bikomponentními polyesterovými vlákny. Materiálové složení PES Bico (10 %) a textilní druhotné suroviny (90 % polyester).

Výhodou je opakovatelná recyklovatelnost, ekologická nezávadnost, neobsahuje změkčovadla ani formaldehyd, nereaguje s plasty, měkčeným PVC ani jinými fóliemi (není nutné jej separovat). Materiál je v testování a prozatím nemá kompletní technický list, proto jsou přiloženy pouze dostupné informace z materiálového listu (viz obr. 10).

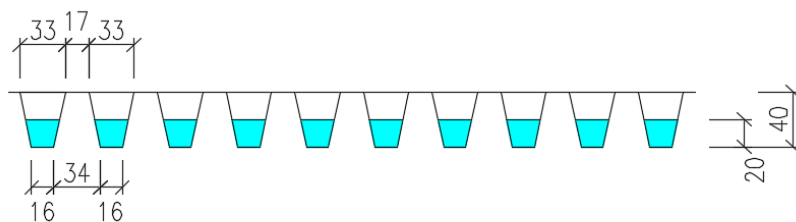
Ukazatel	Měrná jednotka	Hodnoty	Povolená odchylka
Plošná hmotnost: ČSN EN 29073-1	g.m ⁻²	1500	± 15 %
Tloušťka při tlaku 0,1 kPa ČSN EN ISO 9073-2	mm	15	±15 %
Retence vody při sklonu 0°	l/m ²	8	+ - 20%
Drenážní schopnost při sklonu 25%	l/s/m	6,4	+ - 20%

Obr. 10 Konstrukční a technologické parametry [materiálový list výrobce]

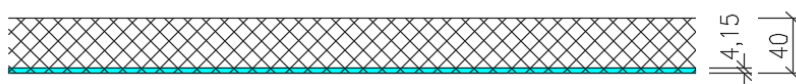
Porovnání množství zadržené vody

Ve vzorovém příkladu je zvolena výška nopové fólie 40 mm, objem vody zadržené v nopech 8,3 l/m². Pokud uvažujeme pouze 50% zaplnění vodou, zbytek budou tvořit kořínky a jemné částice zeminy, jedná se o přibližný objem 4,15 l/m².

NOPOVÁ FÓLIE – LITHOPLAST DREN 40/1,5

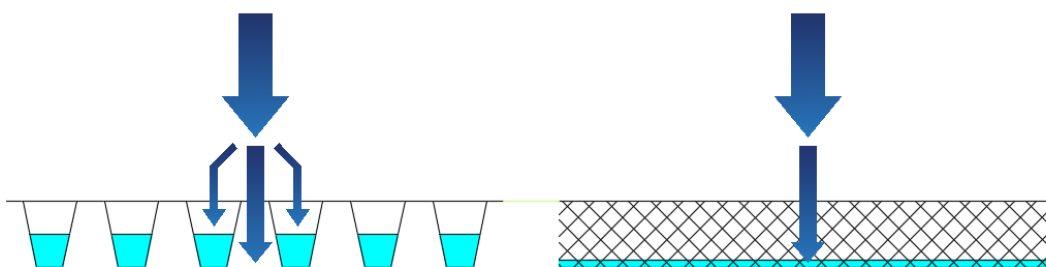


RECYKLOVANÁ TEXTILNÍ ROHOŽ – RETEX 40mm



Obr. 11 Porovnání stejného množství vody v drenážní vrstvě (archiv autora, 2016)

U nopové fólie bude voda zadržena bodově, při tepelném toku a pronikání mrazu do konstrukce by se rozdělil v určitém poměru závislém na více faktorech (venkovní teplota, vlhkost, teplota vody v pórech a další) mezi pronikání skrz nopy nebo mimo nopy jak je zobrazeno na *obr. 12*. U Retexu by byl teplotní tok v ploše přibližně stejný, protože rohož v sobě zadržanou vodu rozloží rovnoměrně po celé ploše souvrství zelené střechy.



Obr. 12 Schéma pronikání mrazu do konstrukce (archiv autora, 2016)

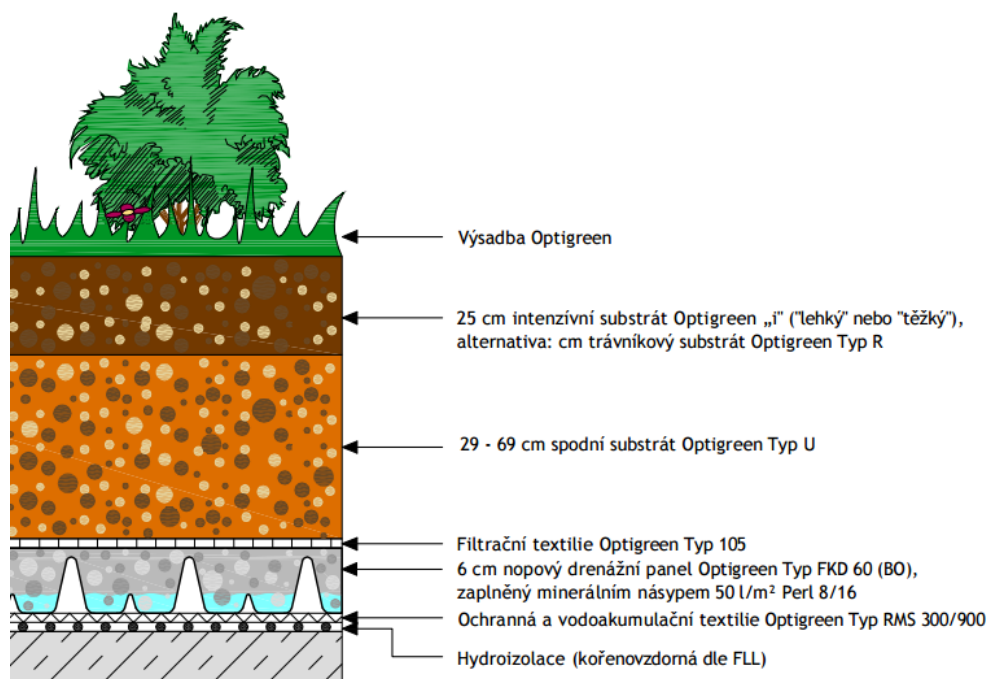
Další výhody zelené střechy:

- přispívá k evaporizaci vzduchu
- zajišťuje vyšší akustickou odolnost objektu
- snižuje náklady na vytápění a chlazení objektu
- zvyšuje požární odolnost objektu. [7]

4.3 Formy střešních zahrad

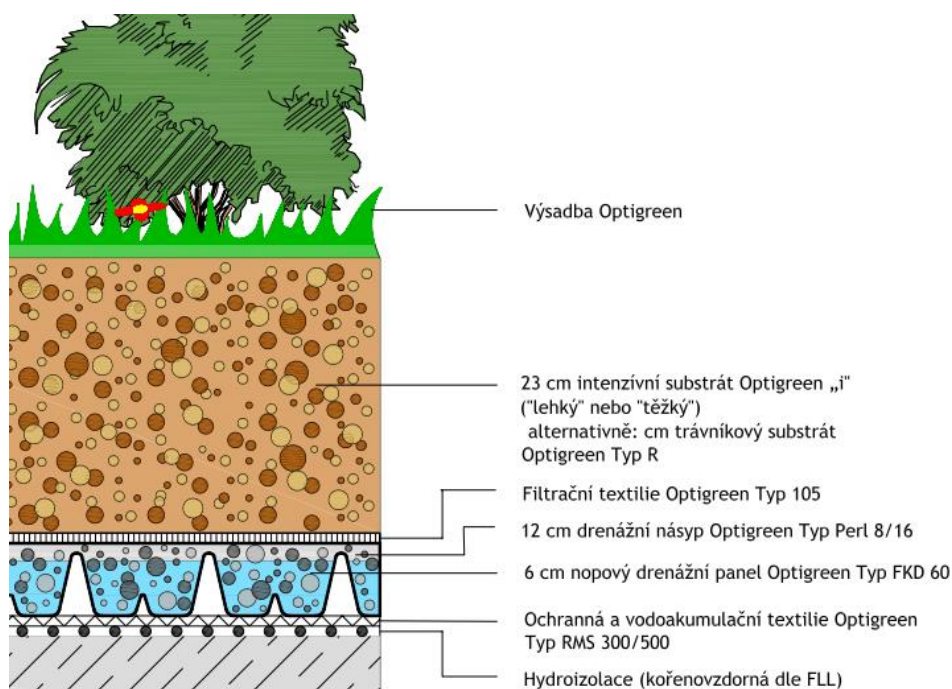
Stěžejním faktorem pro normalizaci a tvorbu jednotného názvosloví se stalo rozdělení střešních zahrad podle intenzity údržby.

Náročné intenzivní střešní zahrady – zahrnují plochy s trávničky, trvalkami a dřevinami. Použité rostliny mají vysoké nároky na konstrukci půdního profilu a na pravidelné zásobování vodou a živinami. Tato forma ozelenění je udržitelná pouze při zajištění pravidelné péče. Výška souvrství se pohybuje v rozmezí 150–1000 mm, hmotnost od 180–1300 kg/m² (viz *obr. 13*).



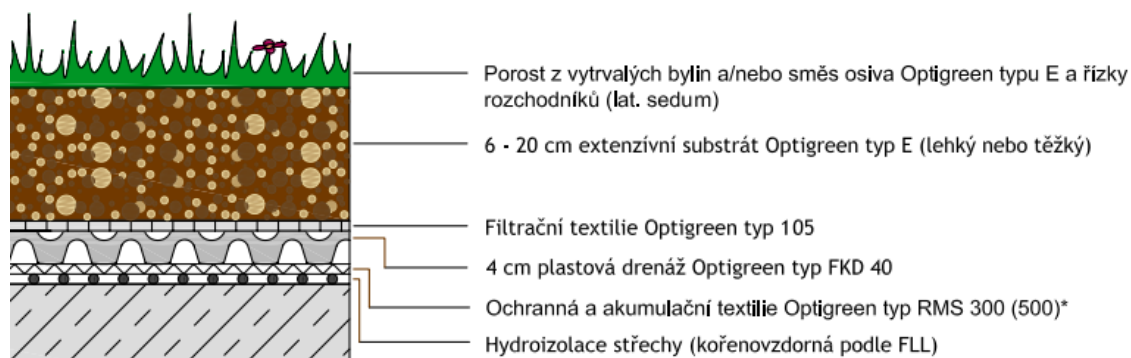
Obr. 13 Systémové řešení Optigreen „Parková střecha“ [8]

Jednoduché intenzivní střešní zahrady – tvoří zpravidla trávniky, trvalky a dřeviny. Mnohotvárnost uspořádání a užitku je v porovnání s náročnými intenzivními zahradami omezena. Použité rostliny mají menší nároky na skladbu půdního profilu stejně jako na hospodaření s vodou. Také péče je méně náročná. Výška souvrství se pohybuje v rozmezí 120–250 mm, hmotnost od 120–200 kg/m² (viz obr. 14).



Obr. 14 Systémové řešení Optigreen „Střešní zahrada“ [8]

Extenzivní střešní zahrady – jsou místně přizpůsobené vegetační formy, které se plošně vyvíjejí na relativně tenkých pěstebních vrstvách. Zavádějí se cílenými vegetačně-technickými prostředky a opatřeními. Zásobení vodou a živinami je ponecháno přírodním koloběhům. Trvanlivé a konkurence schopné rostliny jsou pouze ty, které jsou morfologicky a fyziologicky přizpůsobené extrémním podmínkám, hlavně nedostatku vody. Vytváření forem vegetace je ponecháno sukcesivním procesům. Udržovací péče je minimální. Výška souvrství se pohybuje v rozmezí 60–200 mm, hmotnost od 60–150 kg/m² (viz obr. 15). [9]



Obr. 15 Systémové řešení Optigreen „Přírodní střecha“ [8]

4.3 Vrstvy střešních zahrad

Pro vytvoření optimálních podmínek pro růst rostlin jsou používány různé vrstvy a materiály, které mají vykazovat vlastnosti co nejvíce podobné přirozenému stanovišti, kde je rostlina schopna se vyvíjet a prosperovat. Základními předpoklady pro vhodný růst vegetace jsou dostatečně prokořitelný prostor, dostatečné zásobování vodou a živinami, vhodné složení a vlastnosti substrátu a samozřejmě také vhodný výběr vegetace pro stanovištní podmínky.

Hydroizolační vrstva – může být vytvořena z nejrůznějších materiálů. Tato vrstva je ve smyslu ČSN 73 0600 namáhána tlakovou vodou. Je třeba ji dimenzovat tak, aby odolávala tomuto hydrofyzikálnímu namáhání s přihlédnutím k přístupnosti hydroizolační vrstvy při případných opravách. A dále zpravidla slouží i jako ochrana proti prorůstání kořenů. V opačném případě je nutné ji doplnit speciální ochrannou vrstvou.

Ochranná vrstva proti prorůstání kořenů – měla by chránit hydroizolaci a bránit prorůstání kořinek rostlin. Specializované firmy dodávají obvykle vlastní složení ochranných vrstev, které jsou označovány interními názvy. Bývají tvořeny například z těchto materiálů: *rouna z recyklovaných hmot, rohože z pěnových vložek z recyklovaných materiálů, pletené rohože, textilní rohože, polyetylenová, polypropylenová a polyuretanová rouna.*

Drenážní vrstva – pojímá protékající vodu a odvádí ji ke střešním vtokům. Současně slouží k akumulaci vody, zvětšuje prostor pro růst kořenů a přejímá ochrannou funkci pro pod ní ležící vrstvy. Volba materiálu a dimenzování vrstvy je závislé na nárocích vegetace a na únosnosti konstrukce. Materiál musí být odolný vůči biologické korozi a snést zatížení od vrstev nad sebou a provozu. Materiály vhodné pro drenážní vrstvy například: *šterkopísek, šterk, keramzit, škvára, struska, pěnové sklo, rohož se strukturou rouna, rohož z pěnových vložek, desky z pěnové hmoty, desky z modifikované pěnové hmoty...*

Volba materiálu a dimenzování závisí na možnosti sdružení více funkcí do jedné vrstvy. Je-li u drenážních vrstev ze sypkých materiálů požadována vyšší schopnost akumulace vod, je třeba použít nasákové minerální materiály.

Filtrační vrstva – zamezuje vyplavování jemných částic ze substrátu nebo hydroakumulační vrstvy do drenážní vrstvy. Zamezuje tak zanášení drenážní vrstvy, omezování kapacity odvodňovacích prvků a úbytku sypkých vrstev. Musí být dobře vodopropustná. Materiál musí být odolný vůči biologické korozi a nesmí omezovat růst kořenů. V minulosti se proti vyplavování jemných částic používaly sypké materiály. Jejich nevýhodou byla vysoká zátěž střešní konstrukce, pracnost a finanční náročnost. Dnes tuto roli přebírají modernější materiály – geotextilie, vyrobené z polypropylenu, polyesteru, akrylu nebo polyamidu a jejich směsí. Filtrační vrstva se pokládá buď ve zvláštním pracovním kroku na drenážní vrstvu, nebo je součástí vyrobených drenážních vrstev.

Hydroakumulační vrstva – zajišťuje ve vegetačních střehách nutné minimální množství vody pro růst rostlin a omezuje průtok dešťových vod při krátkodobých intenzivních srážkách. Význam hydroakumulační vrstvy zadržující srážkovou vodu se zvětšuje se snižující tloušťkou substrátu. Materiály musí být odolné vůči biologické korozi. Vrstva může být tvořena: *syké nasákové materiály, hrubovláknitou rašelinou, hydrofilními deskami, netkanými textiliemi, deskami z nasákových pěnových plastů, plastovými nopovými fóliemi.*

Vrstva substrátu – tvoří nosnou vrstvu pro vegetaci, ve které rostliny zakořeňují. Slouží jako zásobárna živin a vody a fixuje rostliny. Vlastnosti a složení substrátu záleží na typu navrženého ozelenění střechy. Musí splňovat následující požadavky: nízká hmotnost ve stavu nasyceném vodou, možnost dopravy foukáním, vysoká nasákovost, nízký obsah solí a uhličitánů, trvalá kvalita (podle příslušných směrnic a norem), dostatečná drenážní schopnost, dostatečný objem vzduchových pórů. Obecně se rozlišují tyto typy substrátů: *zeminy, syké materiály, substrátové desky, vegetační rohože.*[9][10]

4.4 Typy souvrství střešních zahrad

Základní rozdělení podle množství a konstrukce vrstev:

- **Jednovrstvá konstrukce**
substrát musí být vhodný pro růst vegetace a také splňovat drenážní funkci.
- **Dvojevrstvá konstrukce**
skládá se z vegetační vrstvy a vrstvy drenážní.
- **Třívrstvá konstrukce**
skládá se z vegetační vrstvy, filtrační vrstvy a drenážní vrstvy.

U střešních zahrad se nedoporučuje používat inverzní skladbu. Důvodem je to, že pod tepelnou izolaci jsou ideální podmínky pro rozvoj kořenového systému rostlin (stálá vlhkost, teplota). Kořenový systém může zvětšováním svého objemu narušovat spojitost vrstvy tepelné izolace. Tím může dojít k oslabení až ztrátě funkce tepelné izolace.[9]

4.5 Varianty skladby střešní zahrady

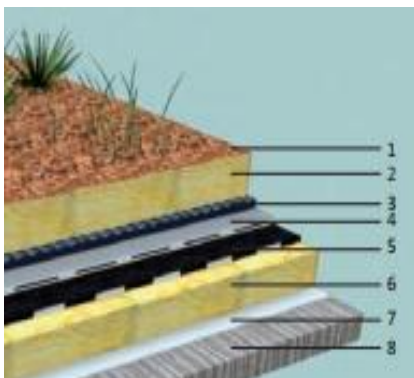
Dle substrátu se střešní zahrady dají rozdělit do tří skupin:

- a) **bez zeminy tzv. „hydroponní“**
- b) **lehčený substrát**
- c) **plnohodnotná zemina**

Varianta A - bez zeminy tzv. „hydroponní“

Společnost Isover jako první na trhu přišla ve svém výrobním programu s hydrofilní deskou „Cultilene“. Tyto desky se používají pro hydroponní pěstování rostlin bez styku s půdou. Semínka rostlin nebo předpěstované sazenice se vkládají do předem připravených otvorů, nebo do otvorů vytvořených po položení těchto desek. Desky jsou díky své speciální hydrofilní přísadě velmi nasákové s minimálním úbytkem gravitační vody. Oproti skladbám střešních zahrad se zeminou mají výrazně menší hmotnost, takže jsou vhodné do rekonstrukcí, kde zatěžují konstrukci výrazně méně než systémy se zeminou. Po tomto vzoru přišli i další dodavatelé systému střešních zahrad se svým řešením pro hydroponní typ. [11]

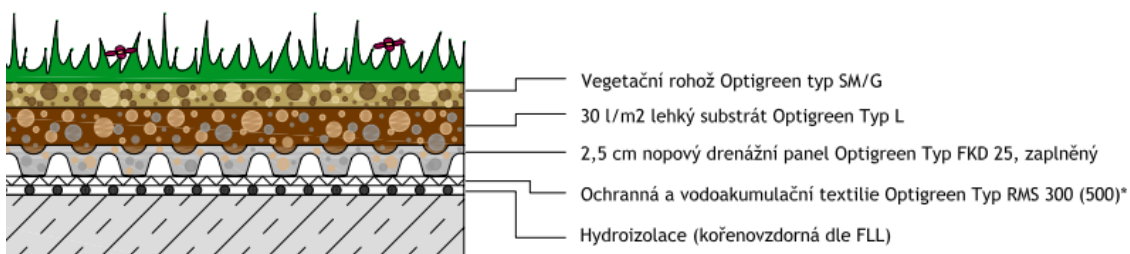
Základní skladba střešní zahrady systému ISOVER



Obr. 16 Skladba střešní zahrady systému ISOVER [11]

1. Krycí vrstva
2. Vegetační vrstva – desky CULTILENE
3. Drenážní
4. Separační vrstva
5. Hydroizolační souvrství
6. Tepelná izolace
7. Parozábrana
8. Nosná konstrukce

Základní skladba střešní zahrady systému OPTIGREEN



Obr. 17 Skladba střešní zahrady systému Optigreen [8]

Výhody použití vegetačních rohoží pro vrstvy zelených střech oproti tradičním systémům vegetačních střech se zeminou:

- Nižší pracnost při realizaci
- Podstatně nižší hmotnost souvrství cca 10–15 kg/m² v suchém stavu
- Přispívá k lepší tepelně technické stabilitě v letním či zimním období v místnostech pod střechou
- Minerální vlna odolává UV záření
- Výsadbu vegetace je možné provést předem na dílcích a pak uložit na střechu
- Při jakékoli poruše souvrství je možno potřebný díl minerální vlny vyjmout, nebo nahradit novým dílem.
- Minerální vlna umožňuje ozelenění i při větším sklonu střechy – desky se nesesouvají a neodplavují se žádné částice jako u hlíny
- Minerální vlna nemůže poškodit u stěn rohů hydroizolaci, naopak působí jako ochranná vrstva. Může oddělovat šterkový pás u stěn a okrajů a tím chránit hydroizolaci.
- Součinitel tepelné vodivosti desek Cultilene je ve vlhkém stavu 0,14 W.m⁻¹.K⁻¹. Běžná vlhká zemina vede teplo 10x více než středně vlhká minerální vlna. [11]

První vegetační střecha s použitím hydrofilní izolace

Po provedených zkouškách potřebných pro realizaci a využití minerální vaty Cultilene byla v roce 1996 realizována vůbec poprvé v ČR pokusná plocha s tímto systémem na zkušební střeše v Brně.

Výsledky 15 letých zkušeností na vzorové střeše:

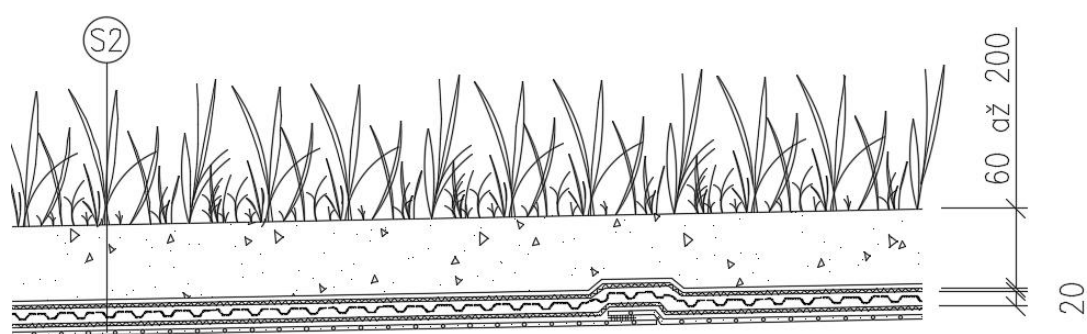
- Nedošlo k viditelné objemové změně minerální vlny
- Méně než 10 % povrchových změn (stlačení minerální vaty, změna barevného pigmentu v neosázených místech) způsobených růstem a množením vegetace, působením srážkové a závlahové vody, působením UV záření, vlivem chemikálií z hnojiv
- Celková skladba nevykazovala žádné negativní změny, naopak pozitivní růst a nárůst vegetace a vytvoření celistvé zelené plochy podstatně ovlivňující okolní prostředí

Tato střecha má „Osvědčení o užitém vzoru“ na úřadu průmyslového vlastnictví ČR a řadu ocenění na mezinárodních výstavách.

Studium z hlediska fázové přeměny vody by v tomto případě bylo velmi složité a není předmětem mé diplomové práce. Tato kapitola byla pouze informativní, co se týče nových variant, které nám nabízí moderní střešní zahrady. Dále se tímto typem střešní zahrady nebudu zabývat. [11]

Varianta B – Lehčený substrát

Střešní substrát na stavbu zelené střechy má klíčovou roli, proto je důležité jej správně zvolit. Použití běžné ornice je nevhodné z hlediska chemismu, který většinou neodpovídá osazované vegetaci. Dále má nízkou vodopropustnost (hlinité a jílovité půdy), dochází k nepravidelnému zásobení vegetace vodou, vymývání jemných a prachových částic a odnosu materiálu, zanášení konstrukčních prvků atd. Opakem jsou písčité půdy, které jsou až příliš vodopropustné a mají tak nízkou schopnost zadržet potřebnou vláhu. V neposlední řadě je zde též faktor hmotnostní, běžná zemina má až dvojnásobnou hmotnost při stejném objemu, což zvyšuje požadavky na únosnost konstrukcí a tím stavbu neúměrně prodražuje. Proto je vhodnější použít pro zelenou střechu nějaký druh lehčeného střešního substrátu. Je mnoho typů substrátů, dle různých přísad, volba druhu závisí na typu zelené střechy a požadovaných vlastnostech. [12]



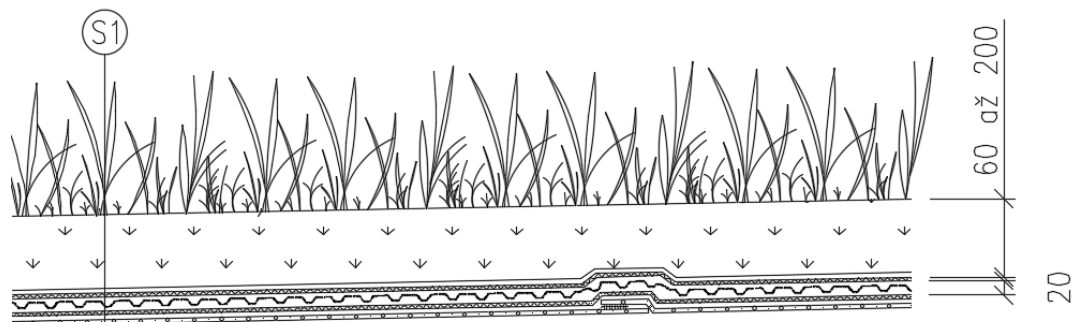
Obr. 18 Skladba extenzivní ploché střechy s lehčeným substrátem, upraveno [13]

Tab. 5: Skladba S2 [13]

FUNKCE	TYPOVÉ OZNAČENÍ	POPIS	TL. [mm]
VEGETAČNÍ HYDROAKUMULAČNÍ	LEHČENÝ SUBSTRÁT	tloušťka dle vegetace	60 až 200
FILTRAČNÍ	GEOTEXILIE	Netkaná textilie z polypropylenu	-
DRENÁŽNÍ HYDROAKUMULAČNÍ	NOPOVÁ FOLIE	S perforacemi na horním povrchu	20
SEPARAČNÍ	GEOTEXILIE	Netkaná textilie z polypropylenu	-
HYDROIZOLAČNÍ	1) FÓLIE Z PVC 2) ASFALTOVÉ PÁSY	Určené pro vegetační střechy, odolnost proti prorůstání kořenů	min. 1,8 min. 8

Varianta C – Plnohodnotná zemina

V tomto případě je vhodné jako substrát použít okolní zeminu do 1 km od stavby. Na střeše potom budou vytvořeny obdobné podmínky, aby se zde dařilo stejným druhům rostlin (travin) jako v okolí stavby. Tloušťka substrátu je nejčastěji v našich podmínkách 20 cm. Tento typ střešní zahrady byl použit na experimentální ověření vlivu fázové přeměny vody v souvrství zelené střechy v praktické části diplomové práce.



Obr. 19 Skladba extenzivní ploché střechy s plnohodnotným substrátem, upraveno [13]

Tab. 6: Skladba S1

FUNKCE	TYPOVÉ OZNAČENÍ	POPIS	TL. [mm]
VEGETAČNÍ HYDROAKUMULAČNÍ	SUBSTRÁT	tloušťka dle vegetace	60 až 200
FILTRAČNÍ	GEOTEXTILIE	Netkaná textilie z polypropylenu	-
DRENÁŽNÍ HYDROAKUMULAČNÍ	NOPOVÁ FOLIE	S perforacemi na horním povrchu	20
SEPARAČNÍ	GEOTEXTILIE	Netkaná textilie z polypropylenu	-
HYDROIZOLAČNÍ	1) FÓLIE Z PVC 2) ASFALTOVÉ PÁSY	Určené pro vegetační střechy, odolnost proti prorůstání kořenů	min. 1,8 min. 8

5 Děje spojené s fázovou přeměnou vody

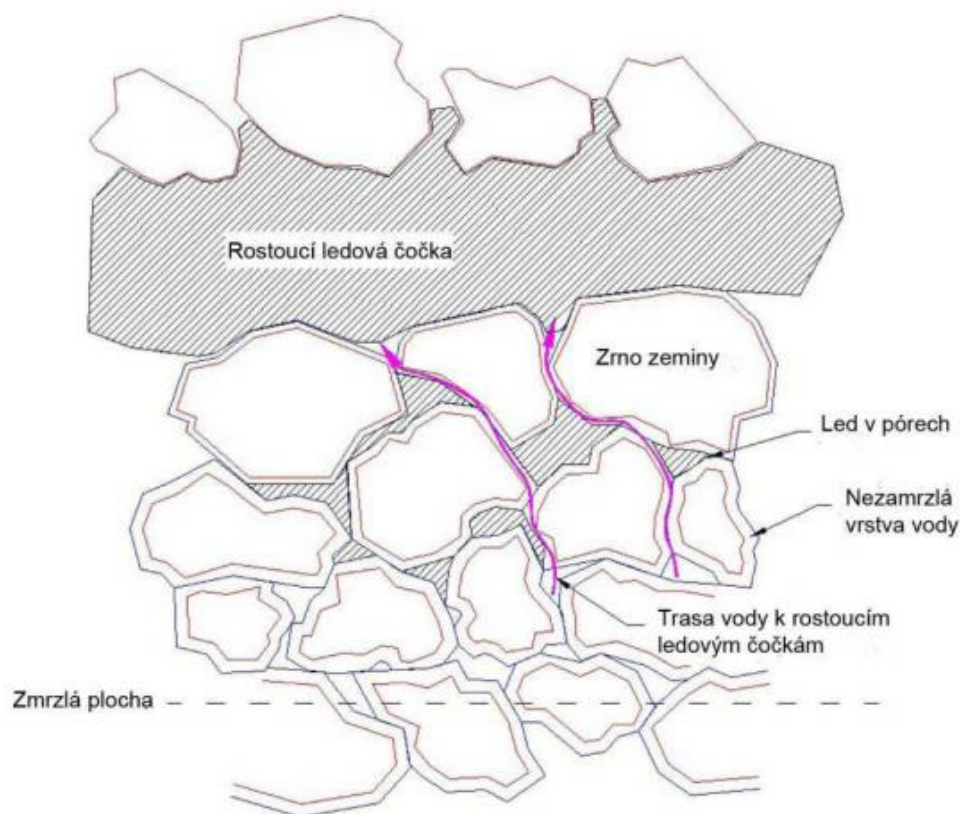
Voda je natolik spjata s našim životem, že bývá považována za typickou kapalinu. Ve skutečnosti je ale tak málo typická, jak jen si lze představit. Nejznámější podivností je však anomálie vody, voda má maximální hustotu při teplotě 3,98 °C a hustota kapalně vody je vyšší nežli hustota ledu. Při teplotě 4 °C se voda rozpíná, ať už ji zahříváme (což je obvyklé), nebo ochlazujeme (což je neobvyklé).

5.1 Studium krystalizace vody

Při krystalizaci nevzniká pevné skupenství okamžitě. Podmínkou je přítomnost iniciačních jader. Vytvoření zárodku iniciačních jader probíhá buď formou homogenní nukleace, kdy vznikají prvotní shluky atomů, které dále rostou, nebo formou heterogenní nukleace, kdy zárodky pevné fáze vznikají na cizích površích, jako jsou například prachové částice. V zemině probíhá heterogenní nukleace, která je energeticky výhodnější. Přibližně k ní dochází při přechlazení na teplotu $T = 0,98 T_{tání}$. Krystalizace kapaliny při dané teplotě a tlaku probíhá tehdy, když je děj doprovázen poklesem Gibbsovy volné energie G , v místech iniciačních jader se začne projevovat určitá uspořádanost v rozmístění částic, což vede k vytváření krystalové mřížky. Při tomto ději se uspořádává pohyb molekul, který se postupně mění v tepelné kmity kolem určitých středních poloh. Voda krystalizuje nejčastěji v hexagonální soustavě, která je stabilní pro širokou škálu teplot. Důvodem je lomený tvar molekuly vody s úhlem 104,95°. Molekuly se uspořádávají do šestiúhelníkového tvaru tak, že na jednu molekulu vody se vážou celkem čtyři další. Vznikají tak volné prostory ve struktuře krystalu a jeho uspořádání je rozvolněnější než v kapalném stavu. To je důvod menší objemové hustoty ledu oproti kapalně vodě. [14]

5.2 Tvorba ledových čoček

Při teplotě pod 0 °C dochází v zemině k tvorbě ledových čoček z vod, které jsou v zemině obsaženy. Ledová čočka vzniká v místě největší hloubky působení mrazu. Rozdíl mezi zmrzlou vodou kdekoliv v hloubce působením mrazu a místem její maximální hloubky je ten, že ke vzniku ledové čočky napomáhá neustálý přísun vody z nezamrzlých vrstev, kdy na sebe vzniklé ledové krystalky neustále váží další vodu, která je působením mrazu v okolí ochlazená a postupně vzlíná, a při vzájemném kontaktu dojde k vytvoření dalších krystalků ledu. Tím pokračuje jejich růst a vede k vytvoření ledové čočky a to do doby, dokud není přerušen přísun vody ze spodních vrstev nebo dokud teplota nestoupne nad bod mrazu. Zásobování vodou pro ledovou segregaci je zajištěno podzemní vodou, nachází-li se její hladina během roku do 1,5 m od posuzovaného podloží. Je-li hladina podzemní vody ve více než 3 m od posuzovaného podloží, zdroj vody bude přítomen, bude-li zemina obsahovat dostatečný podíl jemnozrnné složky. [14]



Obr. 20 Schéma tvorby ledových čoček [14]

5.3 Rozmrzáání a tání

Nejnebezpečnější období nastává ke konci zimy nebo na začátku jara, kdy se teploty vzduchu začnou pohybovat nad bodem mrazu. Rozmrzáání promrzlé zeminy probíhá jak z horní, tak i z dolní části a dá se rozdělit do tří možných průběhů:

Od spodní části vzhůru

Je-li teplota vzduchu těsně pod bodem mrazu po dostatečně dlouhou dobu, tak rozmrzáání zamrzlé zeminy probíhá od spodní části směrem vzhůru. Rozmrzáání probíhá díky vedení tepla ze zemského jádra. Izolační pokrývka sněhu podporuje tento typ tání. Z hlediska pozemního stavitelství je tento typ rozmrazení žádoucí, neboť rozpuštěná voda z ledových čoček má snahu odtéct směrem dolů a takový odtok vody nezatěžuje systém povrchového odvodnění a nesnižuje stabilitu podloží z důvodu nasycení.

Od horní části dolů

Stoupne-li teplota nad bod mrazu a zůstane tak po dostatečně dlouhou dobu dojde k rozmrazení od shora dolů, kdy zmrzlé vrstvy zůstanou pod rozmrzlým podložím. Rozmrzáání půdy mezi povrchem a zmrzlou vrstvou obsahují nadměrné množství vlhkosti v důsledku tání ledu. To bohužel znemožní odtok rozmrzlé vody směrem dolů, výsledkem čehož je přesycení zeminy a tím snížení stability podloží, což vede ke vzniku poruch.

Z obou částí zároveň

Při teplotě těsně nad bodem mrazu dojde k rozmrazení z obou stran zároveň, což má také za následek snížení stability zeminy, ale již ne v takovém rozsahu jako při rozmrzání od shora dolů. [14]

5.4 Fázové přeměny

K fázové přeměně dohází tehdy, pokud dojde ke změně skupenství nebo krystalové struktury v tuhých látkách. Z technologického hlediska jsou fázové přeměny velmi významné, jelikož umožňují řízeným procesem měnit strukturní charakteristiku materiálů a také podstatně měnit jejich vlastnosti. Ke změně skupenství může dojít zahříváním nebo ochlazováním látky, změna teploty sebou nese také změny fyzikálních vlastností látek. Mění se například objem, hustota, viskozita, ale také se změnou teploty dochází ke změně termo-fyzikálních veličin, jako jsou tepelná vodivost, teplotní vodivost a tepelná kapacita, to znamená, že látka musí přijmout či odevzdat část energie, aby mohlo k fázovému přechodu dojít. Fázové přeměny mohou být několika typů, rozlišujeme fázové přeměny I. druhu, změnu krystalické struktury pevné látky a fázové přeměny II. druhu. [15]

5.5 Latentní teplo

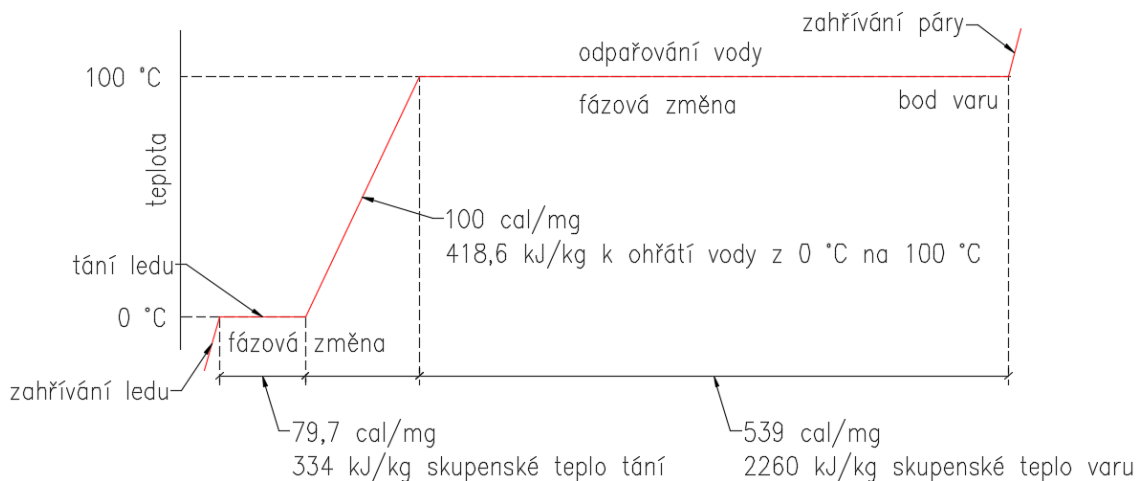
Při některých termo-fyzikálních dějích se teplota látky nemění, i když je do soustavy dodáváno nebo odebíráno teplo. Takové děje souvisí právě se změnou skupenství. Teplo dodávané do soustavy nebo ze soustavy odebírané, je spotřebováno na změnu fáze a nikoliv na změnu teploty, nazýváme latentním teplem. Někdy také bývá označováno jako skupenské teplo. Pokud tedy máme pevnou látku, jejíž teplota leží pod bodem tání a dodáváme jí tepelnou energii, pak se látka nejprve ohřívá až na teplotu tání. Jakmile je dosažena teplota tání látky, růst teploty se zastaví a dochází k fázové přeměně z pevné látky na kapalnou. Po dobu fázové přeměny, kdy koexistují v soustavě dvě fáze (pevná i kapalná) má soustava konstantní teplotu. Po úplné přeměně začne opět teplota soustavy narůstat. Latentní teplo je fyzikální veličina s označením L_t , a všechny latentní tepla mají jednotku Joule. Pokud je přijaté nebo odevzdané teplo vztažené na jednotkovou hmotnost, hovoříme o měrném latentním (skupenském) teple. Měrné latentní teplo se značí l a jednotkou je J.kg^{-1} . Vztah mezi latentním teplem a měrným latentním teplem je vyjádřen jako: [16]

$$l = \frac{L}{m} \quad (1.5)$$

Pro různé fázové přeměny se používají různá latentní tepla, pro náš případ jsou důležité tyto dvě:

- Latentní teplo tání – množství tepla, které je nutno dodat, aby se pevná látka při teplotě tání změnila na látku kapalnou o stejné teplotě
- Latentní teplo tuhnutí – množství tepla, které je nutno odebrat, aby se kapalná látka při teplotě tuhnutí změnila na látku pevnou a stejné teplotě

Tuhnutí, které nastane na začátku zimy s nástupem nulových a záporných teplotních hodnot, kdy dojde k zamrznání vody v zemině (změna vody v ledové krystaly). A latentní teplo tání, ke kterému dojde koncem zimy případně začátkem jara, při nástupu kladných hodnot, a opětovnému rozmrznání zeminy (změny ledových krystalů ve vodu, případně zemní vlhkost). [16]



Graf 8 Fázová přeměna vody a energie potřebné pro přechod [16]

Z grafu 8 je patrné, jak velká energie je potřeba pro fázový přechod ledu ve vodu. Pro představu o jak velkou energii se jedná, byl použit následující teoretický příklad: Máme 1 kg ledu, $l_{\text{tání,led}} = 334 \text{ kJ/kg}$, kolik je potřeba energie aby se celý 1kg ledu změnil na vodu?

$$Q = m \cdot l$$

$$Q = 1 \cdot 334$$

$$Q = 334 \text{ kJ}$$

Pokud by stejné teplo bylo dodáno 1 kg vody o 1 °C, $c_{\text{vody}} = 4180 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, o kolik stupňů by se ohřál 1 kg vody o dané teplotě?

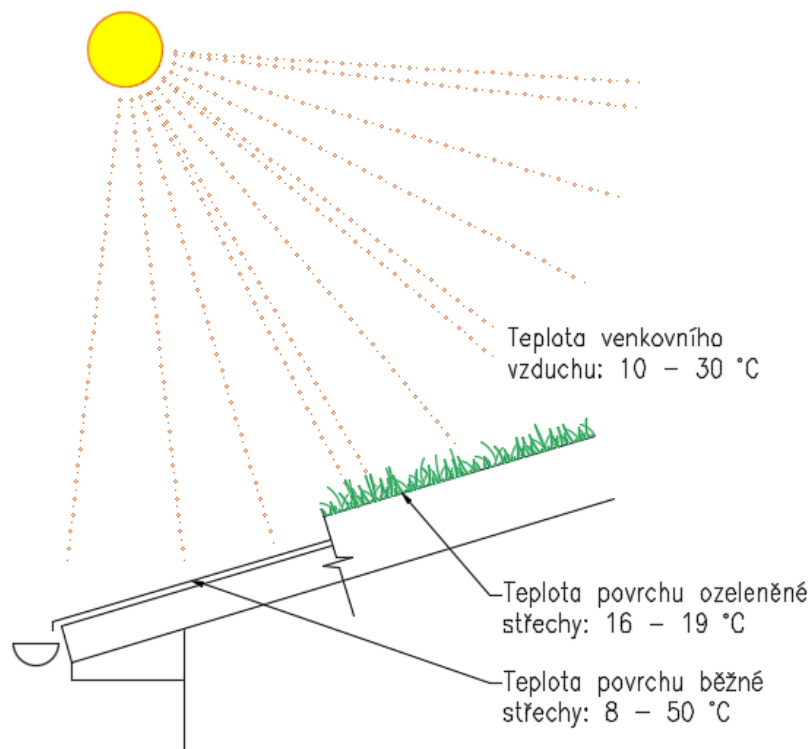
$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

$$334 = 1 \cdot 4180 \cdot (t_2 - 1)$$

$$t_2 = 80,9 \text{ °C}$$

Z toho vyplývá, že stejné množství energie, které je potřeba k přeměně kostky ledu ve vodu, by dané množství vody ohřála o necelých 80 °C.

V praxi by to mohlo znamenat například toto. Během měsíce srpna se teplota na povrchu běžné střechy v průběhu 24 hodin pohybuje v rozmezí 20–60 °C, zatímco na ozeleněném povrchu během téhož dne bude teplota v rozmezí 20–30 °C. V zimních měsících je pak průměrná teplota povrchu klasické střechy –3,6 °C, zatímco na střeše s vegetačním povrchem je průměrná teplota –0,8 °C. Ozelenění střech tedy zabraňuje extrémnímu kolísání teploty na střeše během dne. Na následujícím schéma (viz obr. 21) je znázorněn konkrétní den, kdy byli měřeny a porovnány dva typy střech. Množství sluneční energie dopadající na povrch v ČR je v rozmezí 1000–1100 kWh/m².

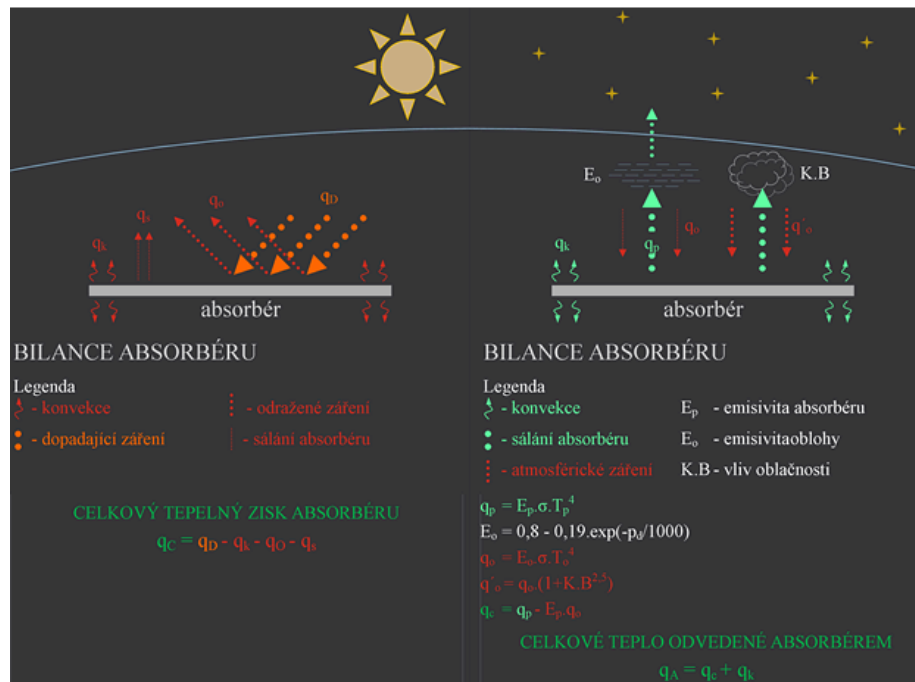


Obr. 21 Teploty na střeše za daných podmínek
(archiv autora, 2016)

Nejvyšší tepelné ztráty nastávají ve chvíli, kdy jsou rozdíly mezi vnitřní a vnější teplotou nejvyšší, zpravidla tedy v ranních hodinách. Rostliny tyto ztráty kompenzují tvorbou rosy, díky které se teplota ve vegetaci zvyšuje. Důvodem je, že při kondenzaci 1 g vody se uvolňuje 530 cal tepla. Obdobné úspory nastávající při změně vody v led (při přeměně 1 g vody se spotřebuje 80 cal tepla). Ač venkovní teplota již vykazuje záporné hodnoty, zemina si ještě dlouho drží teplotu 0 °C. Je-li venkovní teplota –20 °C, vnitřní +20 °C a naměřená hodnota substrátu 0 °C, jsou tepelné ztráty prostupem u střešní konstrukce sníženy o 50 %. V případě tání ledu se naopak spotřebuje cca 80 cal na 1 g ledu. Potřebná energie je však ve velké míře odnímána ze vzduchu, takže v celkové bilanci dojdeme k tepelnému zisku. [17]

5.7 Sálání jasné oblohy

Každý běžný povrch, který je natočen na oblohu vyzařuje teplo dlouhovlnným zářením proti obloze a může být tedy považován za sálavou plochu. Tepelná ztráta sáláním probíhá ve dne i v noci, ale pouze během noci vychází celková bilance sálavé plochy záporná. Během denních hodin sálavá plocha pohlcuje sluneční záření, které působí proti chladicímu efektu dlouhovlnného vyzařování. Během dne je tedy sálavou plochou produkován tepelný zisk. Naopak během noci je sálavé chlazení nejčastější za jasné oblohy, když je teplo vyzařováno z povrchu země nebo střechy. Vesmír vyzařuje teplotu kolem $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, účinek je však oslaben okolní zemskou atmosférou, zejména obsaženou vodní párou, takže zdánlivá teplota oblohy je mnohem vyšší než z vesmíru. Stejný princip radiačního chlazení nastává za jasných nocí, kdy se tvoří náledí a námraza na površích vystavené jasné noční obloze, i když okolní teplota neklesne pod bod mrazu. Například, za jasné zimní noci je ochlazování země velmi intenzivní, protože dochází k vysávání tepla z jejího povrchu téměř 200 W z 1 m^2 , dále střecha o velikosti 100 m^2 s emisivitou povrchu 85% (tedy bez sněhu) sálá do jasné oblohy 17 kW . [18],[19]



Obr. 22 Analýza tepelného působení absorptoru přes den a v noci [18]

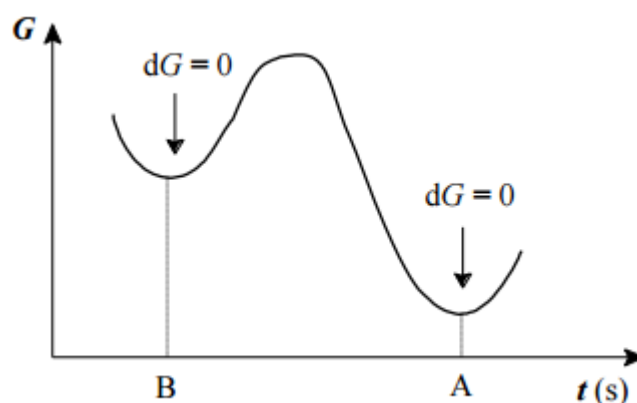
5.6 Termodynamika fázové přeměny

Při fázových změnách nás především zajímá, za jakých podmínek se fázová změna uskuteční. Jedna fáze se mění v druhou. Výchozí strukturní materiál se při změně podmínek stává nestabilní ve srovnání s novým stavem, který je stabilní. Stabilitu fáze nám popisuje termodynamika. V případě přeměny, kdy se materiál nachází za

konstantní teploty a tlaku, je relativní stabilita popsána rovnicí Gibbsovy volné energie, což je část energie, která je využita na přeměnu jiné formy energie: [16]

$$G = H - TS \quad (1.6)$$

Kde: G volná Gibbsova energie [J]
 H entalpie [J]
 T absolutní teplota [K]
 S entropie [$J \cdot K^{-1}$]



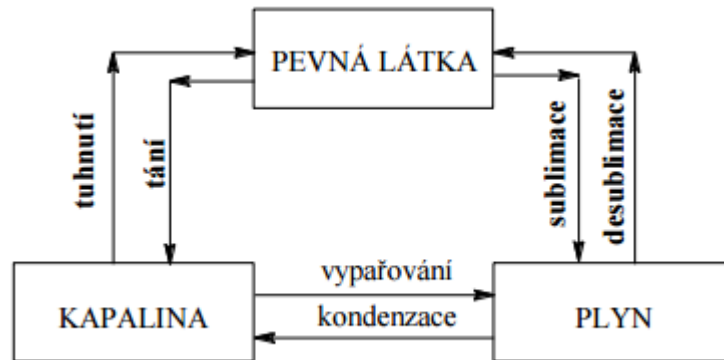
Graf 9 Změna Gibbsovy volné energie v závislosti na uspořádání atomů [16]

Jestliže neexistuje žádná hnací síla, nedochází ke změnám a systém se nachází v rovnováze. Pokud bude mít systém nejmenší možnou hodnotu Gibbsovy volné energie, bude uzavřen při konstantní teplotě a tlaku (s konstantní hmotností a složením). Na grafu 9 je znázorněn systém v rovnováze. Osa x značí jednotlivé složky zahrnující atomy nebo molekuly. Soustava může být ve stavu stabilním, což je stav s nejnižší energií znázorněn jako A, dál se už soustava samovolně nemění. Nebo se může nacházet ve stavu rovnovážném metastabilním znázorněn bodem B, jehož energie je v lokálním minimu. Soustava v tomto stavu se snaží dostat do stavu stabilního. Musí vynaložit potřebné množství energie pro překonání energetické bariéry. Pokud se soustava nachází mimo lokální nebo absolutní minima, hovoříme o stavu nestabilním, kdy samovolně přechází do stavu stabilního.[15][16]

5.8 Druhy fázových přeměn

Fázové přeměny I. druhu

Zde patří všechny změny skupenství (viz obr. 23). Dochází ke změně vnitřní energie soustavy, mění se měrný objem. Uvolňuje se, nebo se přijímá teplo fázové přeměny (latentní teplo), teplota soustavy se nemění.



Obr. 23 Schéma fázové přeměny I. druhu [19]

V našem případě všechny změny, které se odehrají při experimentu, budou patřit mezi fázové přeměny I. druhu.

Změna krystalické struktury pevné látky

Někdy se změna může řadit k přechodům I. druhu, jindy zase mezi přechody II. druhu. Závisí na látce, ve které změna probíhá. Krystaly jedné látky mohou mít různou strukturu, od toho se odvíjí i další vlastnosti přeměny. Z toho důvodu mají materiály různé optické vlastnosti, jsou různě pevné apod. (např. grafit-diamant).

Fázové přeměny II. druhu

Jsou například magnetické přeměny nebo přechody do supratekutého stavu a přechod do supravodivého stavu. Na rozdíl od I. druhu nedochází ke změně vnitřní energie soustavy, tedy ani objemu. Soustava nepřijímá ani neodevzdává tepelnou energii, tudíž neprobíhá fázová přeměna a pro latentní teplo platí $L = 0$. [19]

6 Cíle práce

Analýza klimatických podmínek ČR pro využití efektu fázové přeměny vody v zemině

- Studium klimatických podmínek v daných lokalitách na území ČR,
- Studium trvání zimy na území ČR, počet denostupňů, délka otopné sezóny,
- Zohlednění zjištěných teplotních charakteristik na průběh teplotní rampy pro následující experimenty.

Experimentální ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy

- Rámcová metodika pro provedení experimentálního ověření,
- Návrh charakteru teplotní rampy, na základě předchozí analýzy klimatických podmínek na daném území ČR,
- Porovnání vlivu charakteru teplotní rampy na délku fázového posunu v souvrství zelené střechy.

Experimentální ověření míry nasycení zeminy v souvrství zelené střechy vodou na fázovou přeměnu vody

- Rámcová metodika pro provedení experimentálního ověření,
- Porovnání závislosti míry nasycení zeminy vodou v souvrství zelené střechy na délku fázového posunu,
- Porovnání fázového posunu z výpočetního programu TEPLO 2014 Edu v souvrství zelené a klasické střechy.

6.1 Analýza klimatických podmínek ČR pro využití efektu fázové přeměny vody v zemině

Podmínky

Následující informace jsou převzaty z díla „Atlas podnebí Česka“, kde jsou uvedené informace, grafy, měření a další z období od roku 1961 – 2000, pokud budou informace z jiného časového období, objeví se to v popisu dané mapy, grafu nebo tabulky. Koncepce i metodika zpracování vycházejí z obecných teoretických principů i současné úrovně poznání v klimatologii, geoinformatice a kartografii. Pro zpracování jednotlivých charakteristik byla využita data klimatologické databáze ČHMÚ CLIMADATA.[20]

Pro mou diplomovou práci byly zvoleny dvě oblasti, které se podstatně a co nejvíce liší v klimatologických podmínkách (průměrná roční teplota, úhrn srážek, výška sněhové pokrývky atd.)

První oblast:

Název stanice:	Brno, Žabovřesky
Typ stanice:	AKS1 – automatizované klimatologická stanice I. typu
Nadmořská výška stanice:	236 m n. m.

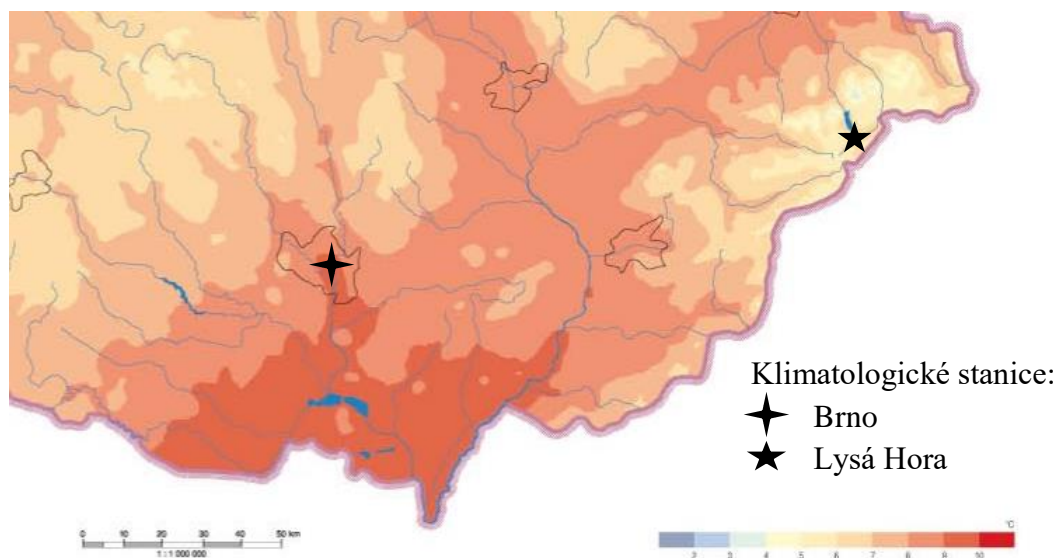
Tato stanice byla zvolena z důvodu, že ve vzdálenosti přibližně jednoho kilometru se nachází výzkumné centrum AdMaS - Vysoké učení technické v Brně. V tomto areálu jsou vybudovány vzorky zelených střech, na kterých proběhne samotné měření praktické části (viz obr. 14).

Druhá oblast:

Název stanice:	Lysá Hora
Typ stanice:	AMS1- automatizovaná meteorologická stanici kombinovaného typu ČHMÚ
Nadmořská výška stanice:	1322 m n. m.

Druhá oblast byla zvolena poblíž mého bydliště, konkrétně na klimatologické stanici, která je umístěna na horském vrcholu Lysá hora, jedná se o nejvyšší vrchol Moravskoslezských Beskyd, kde se podstatně liší zimní období. Hlavní důvod byl co nejmenší vzdálenost a co největší převýšení oproti Brnu, abychom mohli porovnat a posoudit jaký vliv na skladbu zelené střechy má umístění dané stavby i v rámci České republiky. A jaký by to poté mělo dopad na skladbu, kdyby se daná stavba nacházela v severněji položeném státu.

Průměrná roční teplota



Obr. 24 Průměrná roční teplota vzduchu [20]

Průměrná roční teplota vzduchu v posuzovaných oblastech:

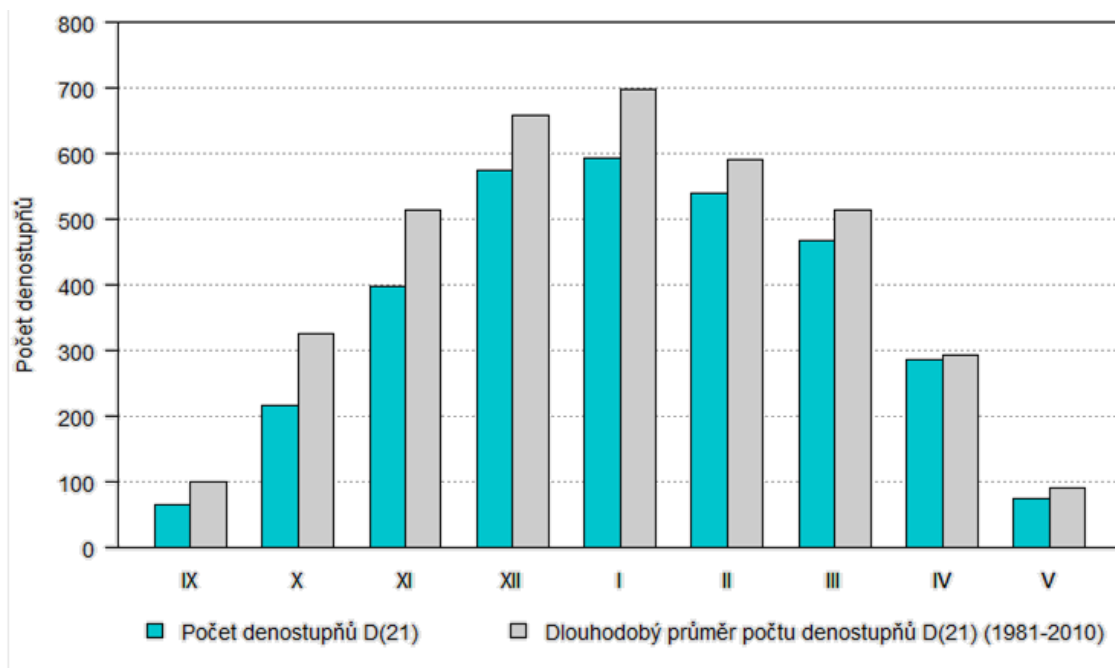
Brno – v rozmezí 9–10 °C

Lysá Hora – v rozmezí 2–3 °C

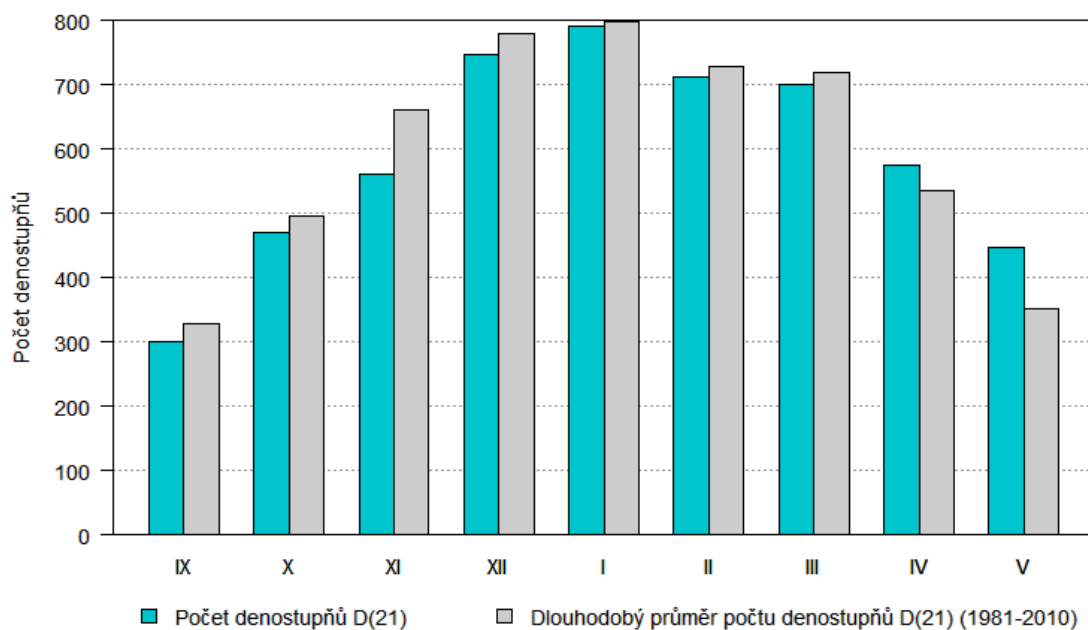
Otopná sezona

Dle vyhlášky Ministerstva obchodu a průmyslu začíná otopné období na území ČR 1. září a končí 31. května. Dodávka tepelné energie v otopném období začíná, když průměrná denní teplota venkovního vzduchu v příslušné lokalitě klesne pod +13 °C ve dvou po sobě následujících dnech a podle vývoje počasí nelze očekávat zvýšení této teploty nad +13 °C pro následující den. Vytápění se omezí nebo přeruší v otopném období tehdy, jestliže průměrná denní teplota venkovního vzduchu v příslušném místě nebo lokalitě vystoupí nad +13 °C ve dvou dnech po sobě následujících a podle vývoje počasí nelze očekávat pokles této teploty pro následující den. Při následném poklesnutí teploty venkovního vzduchu pod +13 °C se vytápění obnoví. Pro určení spotřeby tepla na vytápění v dané otopné soustavě se používá charakteristika **počet denostupňů**, na základě které lze provést porovnání intenzity jednotlivých zimních období mezi sebou. Počet denostupňů otopného období vychází z počtu topných dní a rozdílu průměrné venkovní teploty v otopných dnech a průměrné vnitřní teploty. Ve výpočtu je předpokládána hodnota vnitřní teploty +21 °C, počet topných dnů je určen jako počet dní v otopném období s průměrnou teplotou nižší nebo rovnou +13 °C (N_{13}) a průměrná teplota těchto dní je (T_{13}) je uvažována jako průměrná venkovní teplota v topných dnech. Počet denostupňů (D_{21}) je pak určen: [21]

$$D_{21} = (21 - T_{13}) \cdot N_{13} \quad (1.9)$$

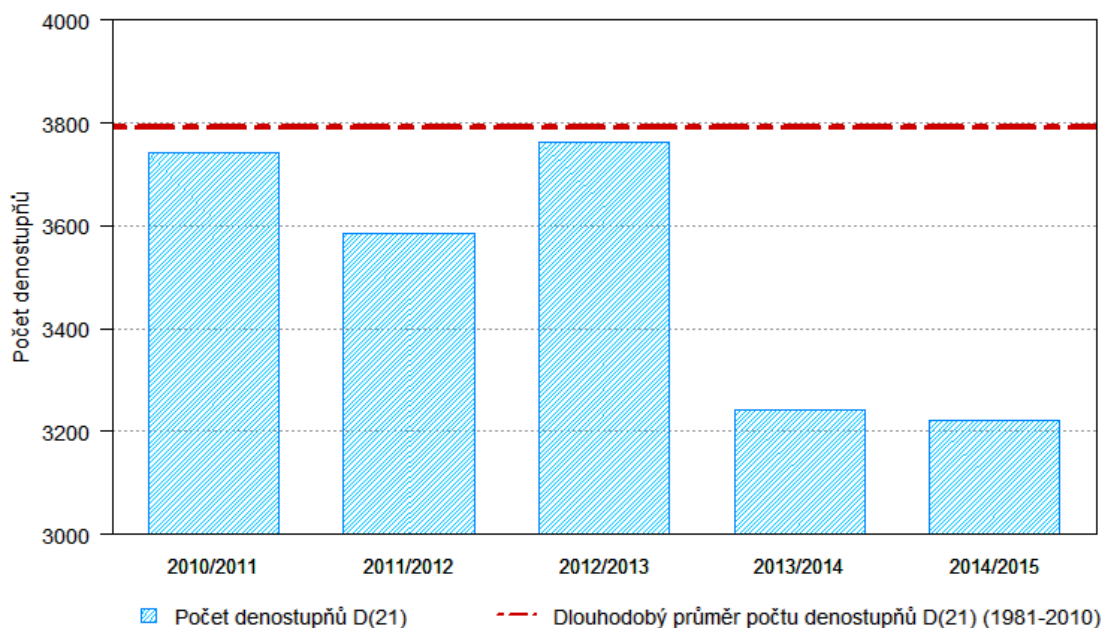


Graf 10 **Brno**. Počet denostupňů D_{21} v měsících otopného období 2014/2015 ve srovnání s dlouhodobým průměrem 1981 – 2010 [20]

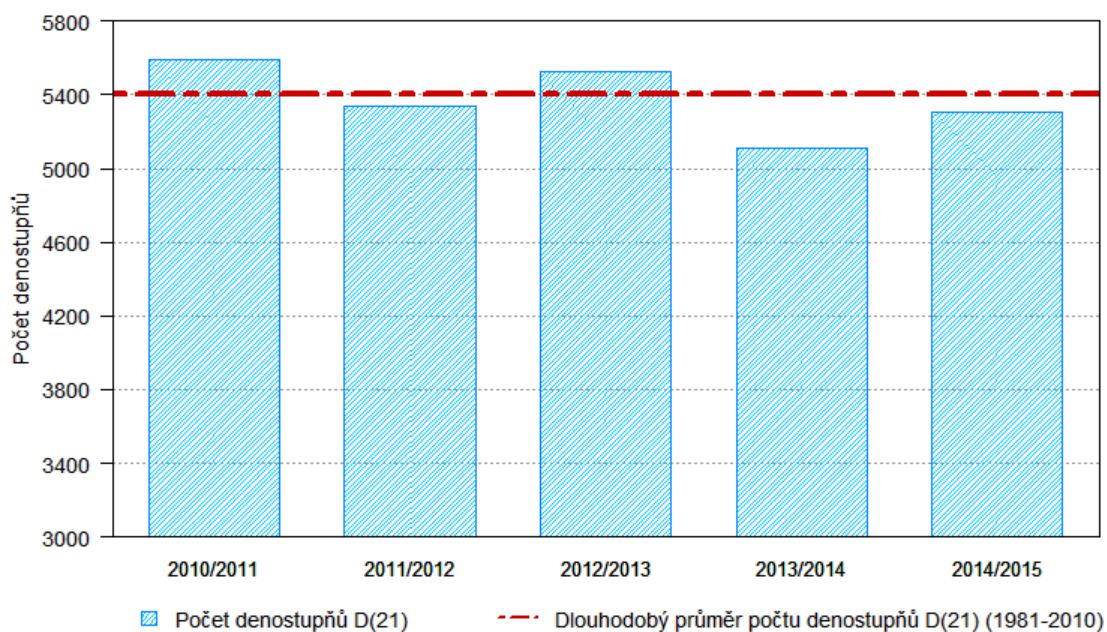


Graf 11 **Lysá hora**. Počet denostupňů D_{21} v měsících otopného období 2014/2015 ve srovnání s dlouhodobým průměrem 1981 – 2010 [20]

Z grafů 10 a 11 je patrný rozdíl v počtu denostupňů přibližně o 150 v jednotlivých měsících mezi zvolenými klimatologickými stanicemi. U grafu Brna je navíc zřejmé, že počty denostupňů byly v této otopné sezoně podprůměrné oproti dlouhodobému průměru za období 1981 až 2010.



Graf 12 Brno. Počet denostupňů za otopné období ve srovnání s dlouhodobým průměrem 1981 – 2010 [20]



Graf 13 Lysá hora. Počet denostupňů za otopné období ve srovnání s dlouhodobým průměrem 1981 – 2010 [20]

Z grafů 12 a 13 je čitelný rozdíl celkového počtu denostupňů v otopné sezoně. A jak už bylo zmíněno u Brna, je znatelný celkový úbytek denostupňů přibližně o polovinu oproti otopné sezoně 2011/2012 a skoro o třetinu oproti dlouhodobému průměrnému počtu denostupňů za období 1981 až 2010. U grafu pro stanici na Lysé hoře se celkový počet denostupňů pro poslední dvě otopné sezóny mírně snížil, ale pořád zůstává blízko dlouhodobému průměru počtu denostupňů za období 1981 až 2010.

Výskyt zimy

Nejdůležitější informací z hlediska fázové přeměny vody v zemině a vliv na teplotní kmit, je ten zda venkovní teplota přejde přes 0 °C. V těchto dnech minimum denní teploty klesá pod 0 °C a maximum stoupá nad 0 °, pro dané stanice to znamená:

Brno	– rozmezí 60– 80 dnů.
Lysá hora	– rozmezí 80–100 dnů.

Dny s přízemním mrazem jsou definovány jako dny, kdy teplota ve výšce 5 cm nad zemí klesne během noci pod 0 °C. Z map je patrné všeobecné pravidlo, že počet mrazových dní roste společně s nadmořskou výškou. U těchto dní se výrazně projevuje i vliv terénu. Např. hlavní město Praha je tzv. tepelný ostrov, to samé by se dalo v menším měřítku říci o druhém největším městě v ČR, o Brnu. Z hlediska konkrétních hodnot tedy:

Brno	– centrum v rozmezí 80–100 dní a okolí od 100– 120 dní
Lysá hora	– v rozmezí od 160–180 dní

Důležitou informací je i průměrné datum prvního a posledního mrazového dne:

Brno	– první mrazový den 20. 10. až 30. 10. – poslední mrazový den 20. 4. až 30. 4.
Lysá hora	– první mrazový den 20. 9. až 30. 9. – poslední mrazový den 10. 5. až 20. 5.

Z předchozích informací se dá odvodit přibližné trvání zimy, a pro mou diplomovou práci kritické období. To je průměrně o 2 měsíce delší na Lysé hoře, nástup zimy je přibližně o měsíc dříve a končí o necelý měsíc později oproti Brnu.

Další zajímavou informací z hlediska zmrzlé vody v zemině je počet ledových a arktických dní. Ledové dny jsou dny s celodenním mrazem, kdy denní maximum teploty naměřené v meteorologické budce je nižší než 0 °C. V arktických dnech maximální denní teplota nevystoupí nad –10 °C. Průměrný roční počet ledových dní v ČR kolísá od 10–113, počet arktických dní od 0,3–7,8. [20]

Brno	– počet ledových dní 10–30 za rok – počet arktických dní přibližně 1 za rok
Lysá hora	– počet ledových dní 70–80 za rok – počet arktických dní 2–4 za rok

Sněhová pokrývka

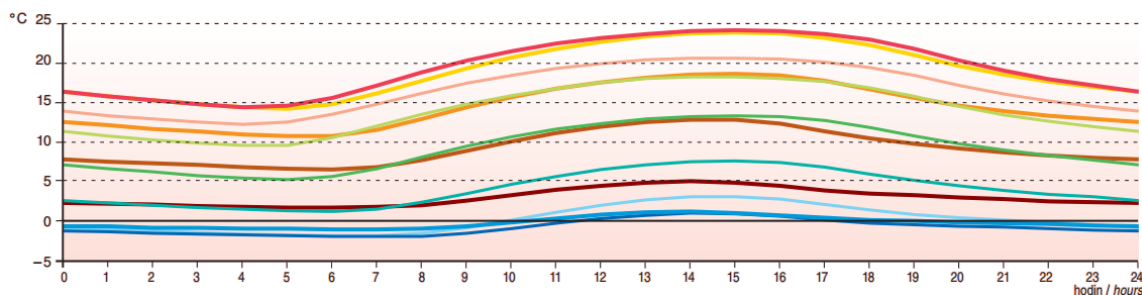
Dalším významným faktorem ovlivňující teplotní kmit v zemině je sněhová pokrývka, mezi její fyzikální vlastnosti patří i tepelně izolační, kdy platí, že sněhová pokrývka je dobrý tepelný izolant. Čerstvě napadený sníh má součinitel tepelné vodivosti asi $0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, mokrá uleželý má asi dvacetinásobně vyšší. Uvedená vlastnost je zásadní z hlediska promrznutí zeminy do hloubky. Další pak pro přežití některých rostlinných a živočišných druhů. Nebezpečná situace, kdy mrzne bez sněhové pokrývky, se označuje jako holomráz. [20]

- Brno – počet dní se sněhovou pokrývkou v rozmezí 30–40 dnů
- Lysá hora – počet dní se sněhovou pokrývkou přes 100 dní za sezonu

Toto je významný faktor ovlivňující dimenzi a návrh skladby zelené střechy.

Denní chod teploty vzduchu v Brně

Změny teploty během dne jsou způsobeny jednak rotací Země, jednak přesunem vzduchových hmot z místa na místo. V dlouhodobém průměru u nás převládá denní chod teploty s jedním minimem v ranních hodinách okolo východu slunce a jedním maximem v odpoledních hodinách. V jednotlivých případech může být tento denní chod zcela potlačen nebo zcela změněn v důsledku přílivu teplejšího či studenějšího vzduchu. [20]



Graf 14 Průměrný denní chod teploty vzduchu na stanici Brno, středoevropský čas, období 1986 – 1996 [20]

LEGENDA

měsíc / month

- leden / January
- únor / February
- březen / March
- duben / April
- květen / May
- červen / June
- červenec / July
- srpen / August
- září / September
- říjen / October
- listopad / November
- prosinec / December

Z grafu 14 je patrné, že zimní měsíce z hlediska denního chodu jsou nejnepríznivější a to neustálým kolísáním teploty kolem bodu mrazu. Konkrétně v Brně se jedná o měsíce leden, únor a prosinec.

6.2 Experimentální ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy

Původ vzorků

Zkušební vzorky, které byly použity na praktickou část mé diplomové práce, pochází z centra AdMas na adrese Purkyňova 139, 612 00 Brno, zde se nachází experimentální stavby a vzorky pro různé výzkumy. Na zkušební buňce (viz *obr. 26*) zde v roce 2015 byly vybudovány tři druhy zelených střech, z lehčeného substrátu na bázi stavebního recyklátu (převážně cihelná drť, liapor), dále vzorek s běžnou zeminou použitou z nedalekého dolu při skrývce svrchní části drnu a poslední vzorek s překládaným drnem taktéž z nedalekého dolu.



*Obr. 26 Zkušební buňka v centru AdMas, Fakulta stavební
(archív autora, 2016)*

Na těchto vzorcích se zkoumalo, za nejnepříznivějších podmínek sklon 30° vůči slunci a orientace na jižní stranu, zda se zde bude dařit vegetaci a přežije bez nuceného zavlažování. Před touto výzkumnou buňkou se nachází 3 samostatné boxy se vzorky jednotlivých druhů vegetační vrstvy zelené střechy. Mé zkušební vzorky pochází z boxu c) na *obr. 27*.



Obr. 27 Samostatné vzorky v boxech, zleva: a) lehčený substrát, b) běžná zemina, c) překládaný drn (archiv autora, 2016)

Pořízení vzorků proběhlo 1. 12. 2016. V předchozích dnech již byla skladba vystavena minusovým teplotám a zemina tak byla z velké části zmrzlá. Vyřezat z ní zkušební tělesa bylo značně komplikované, proto byla použita kotoučová bruska (viz obr. 28).

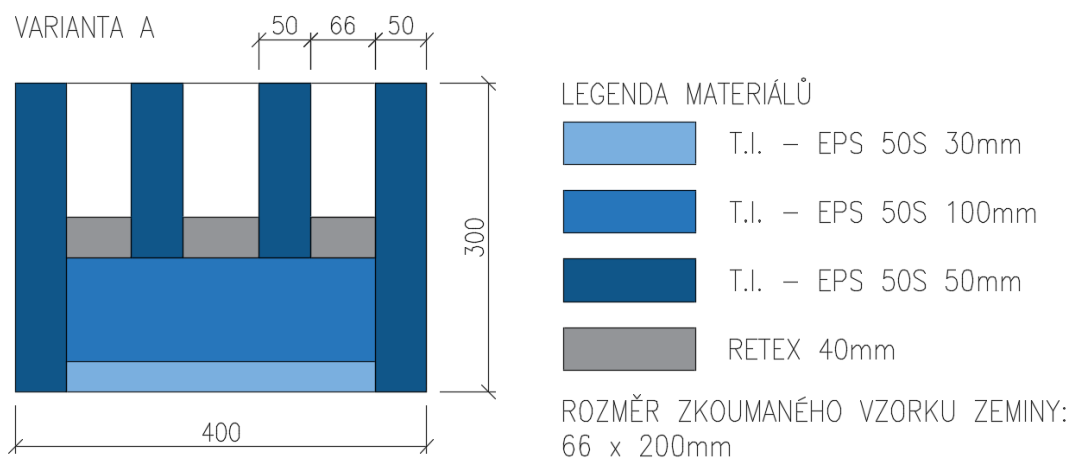


Obr. 28 Odebírání vzorků za nepříznivých teplotních podmínek (archiv autora, 2016)

Po úspěšné extrakci, byl vzorek převezen na fakultu stavební do laboratoře D111, kde proběhlo experimentální ověření.

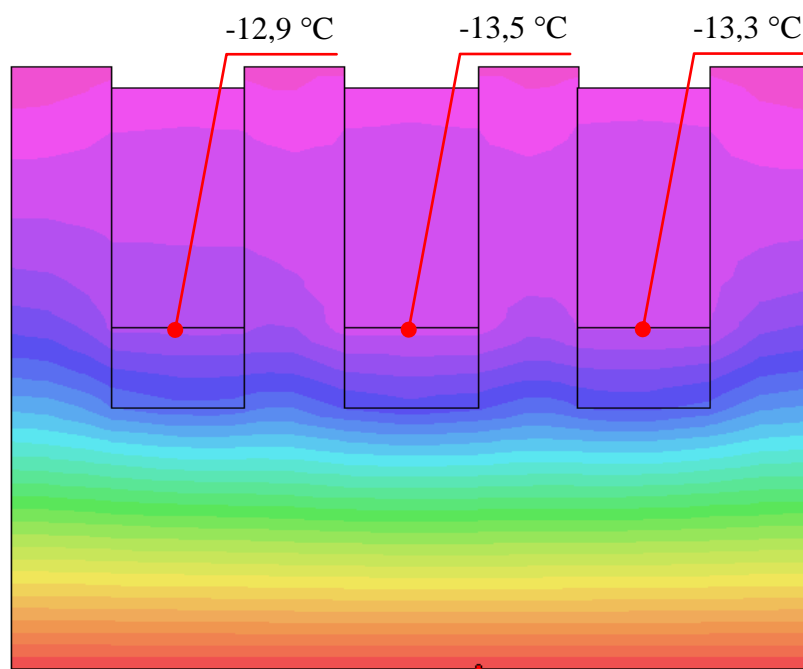
Návrh zkušební boxu

V laboratoři D11 na fakultě stavební, byl vzorek ponechán, aby rozmrznul a ustálil se na pokojové teplotě. V dalším kroku bylo nutné navrhnout zkušební box, tak aby byl experiment co nejméně ovlivněn deformací teplotního pole, jak od jednotlivých vzorků mezi sebou, tak od okolní teploty, která v klimakomoře působí na zkušební element ze všech stran. Zkušební box byl limitován maximálním rozměrem 40 x 30 x 30 cm z důvodu velikosti klimakomory, ve které bylo měřeno. A dále musel být zkušební box rozčleněn na tři samostatné části, tak aby mohli být současně měřeny různě nasycené vzorky souvrství zelené střechy. Dle tohoto zadání a materiálů, které byly k dispozici v laboratořích, byl vytvořen první návrh zkušební boxu (viz obr. 29).



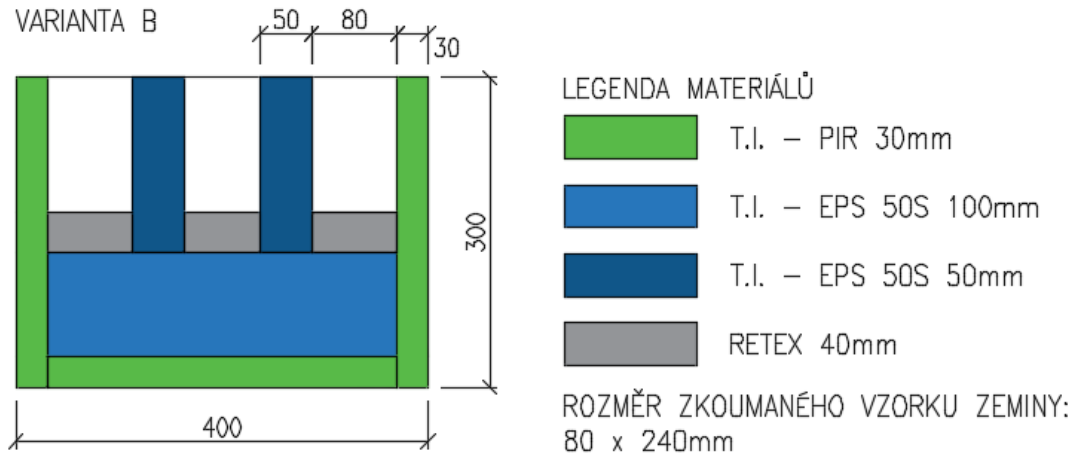
Obr. 29 Schéma zkušební boxu varianta A (archiv autora, 2016)

V programu AREA 2014 EDU od doc. Dr. Ing. Z. Svobody, z FSv ČVUT v Praze, byla vymodelována tato varianta a vykreslen průběh 2D teplotního pole (viz obr. 30).

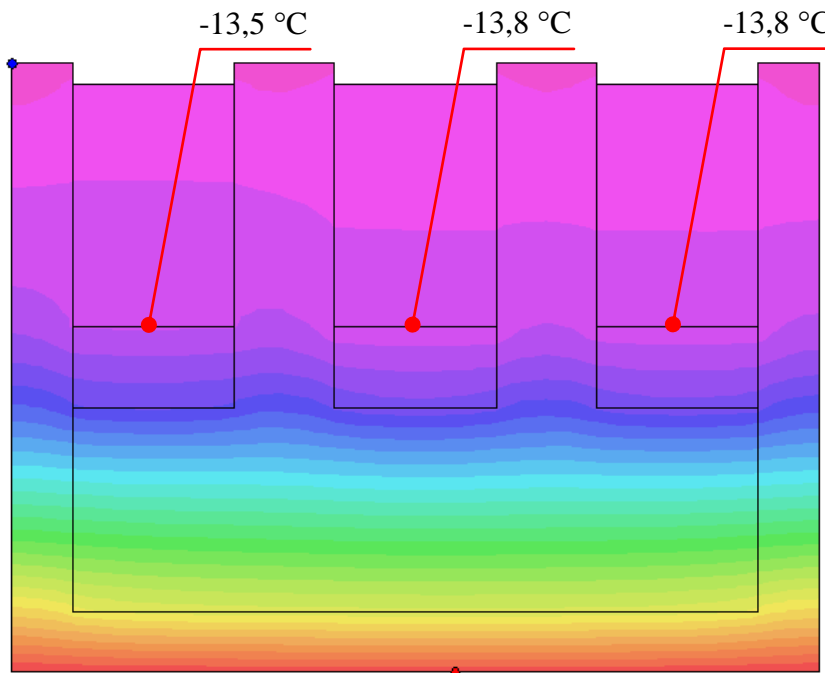


Obr. 30 Pole teplot 2D varianta A, z programu AREA 2014 (archiv autora, 2016)

U této varianty A vznikl poměrně malý zkoumaný vzorek zeminy a to pouze 66×200 mm, v této variantě bylo velmi komplikované sestavit daný zkušební box, proto byla navržena varianta B (viz obr. 31), kde byla použita tepelná izolace PIR 30 mm, čímž se zvětšil zkoumaný vzorek a zjednodušila se příprava zkušebního boxu.

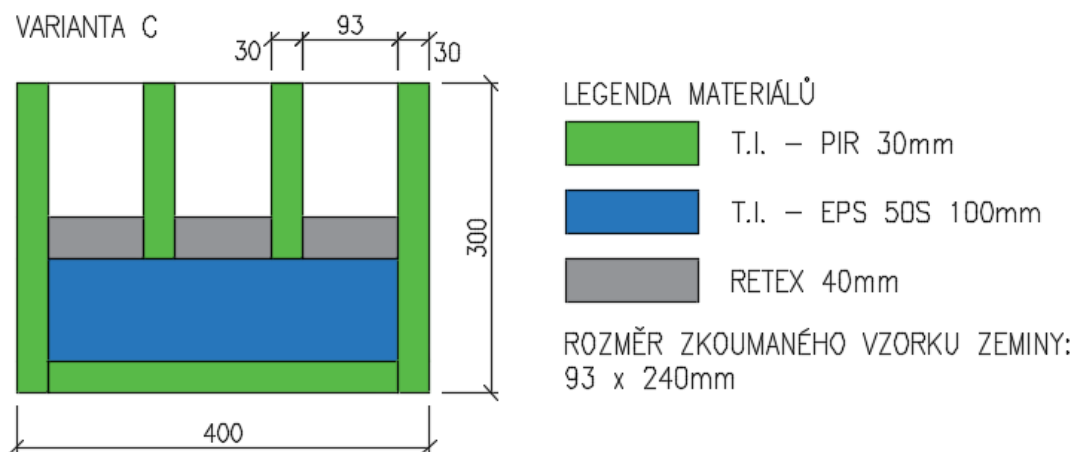


Obr. 31 Schéma zkušebního boxu varianta B (archiv autora, 2016)

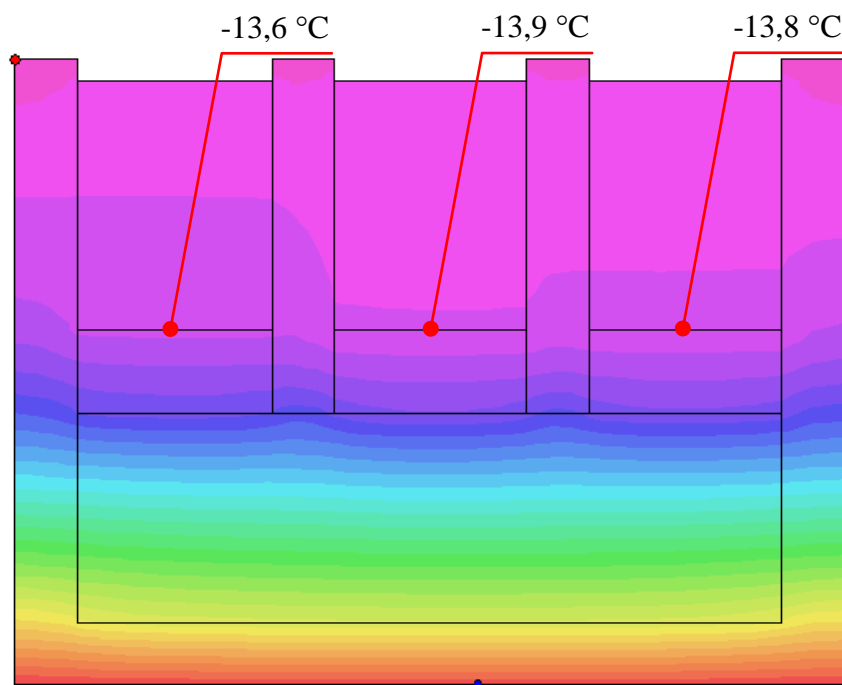


Obr. 32 Pole teplot 2D varianta B, z programu AREA 2014 (archiv autora, 2016)

U varianty B byly větší zkoumané vzorky, byl plynulejší průběh teplotní deformace a rozdíl teplot oproti první variantě byl po zaokrouhlení v rozmezí $0,3\text{--}0,6$ °C. V poslední variantě C (viz obr. 33) bylo využito výhod materiálů tepelné izolace PIR, malá tloušťka, lepší tepelně izolační vlastnosti, menší pracnost a vyšší přenosnost při řezání.



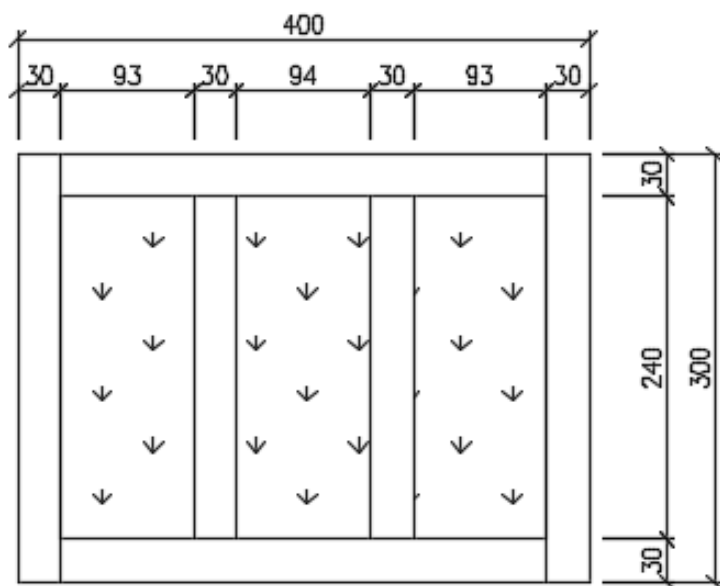
Obr. 33 Schéma zkušební boxu varianta C (archiv autora, 2016)



Obr. 34 Pole teplot 2D varianta C, z programu AREA 2014.
(archiv autora, 2016)

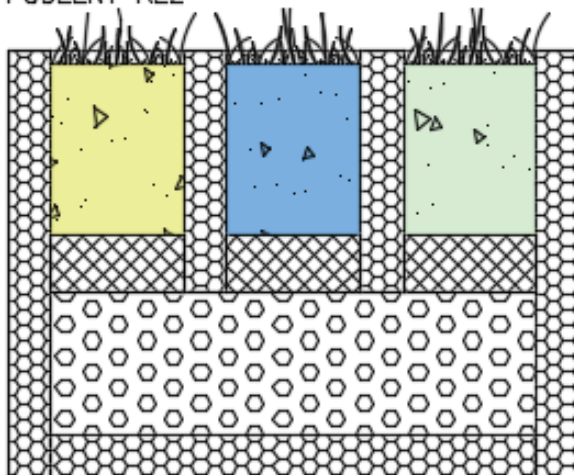
U varianty C byla nejmenší teplotní deformace a teploty oproti předchozímu vzorku se lišili pouze o 0,1 °C po zaokrouhlení.

Byla zvolena varianta C, hlavní důvod byl největšímu rozměr zkoumaného vzorku souvrství zelené střechy (93 × 240 mm), dále nejplynulejšímu průběhu teplotního pole a v neposlední řadě kvůli nízké pracnosti a vysoké přesnosti práce s materiálem polyisokianurátové tepelné izolace oproti standardní EPS.

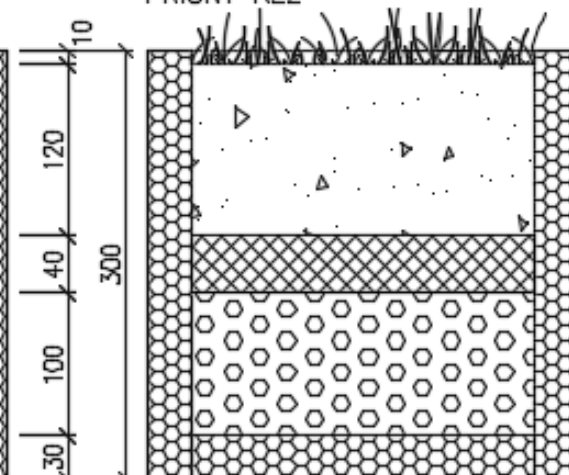


PŮDORYS

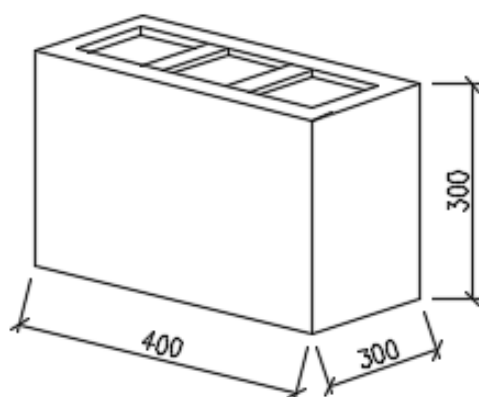
PODÉLNÝ ŘEZ






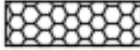


PŘÍČNÝ ŘEZ



AXONOMETRIE



LEGENDA MATERIÁLŮ

-  SUCHÝ SUBSTRÁT
-  VLHKÝ SUBSTRÁT
-  STŘEDNĚ VLHKÝ SUBSTRÁT
-  T.I. – PIR 30mm
-  T.I. – EPS 50S 100mm
-  recyklovaná textilní rohož – RETEX 40mm

Obr. 35 Schéma zkušební boxu (archiv autora, 2016)

Dle nákresu na obr. 35 byly sestrojeny dva zkušební boxy, které se lišili pouze v počtu osazených čidel (viz obr. 43).

Zkušební boxy byly sestrojeny v dílně a laboratoři D11, byly využity materiálové a strojní prostředky Ústavu pozemního stavitelství.

Postup sestrojení zkušebního boxu:

1. *Nařezání jednotlivých dílů z tepelné izolace PIR a EPS 50S,*
2. *Slepení jednotlivých dílů pomocí nízko-expanzního polyuretanového lepidla značky DEN BRAVEN (viz obr. 36),*



Obr. 36 Vzorčky spojeny pomocí lepidla a zafixovány pomocí streč-fólie (archiv autora, 2016)

3. *Po zatuhnutí lepidla, přelepení jednotlivých hran pomocí hliníkové pásky (viz obr. 37),*



Obr. 37 Přelepování spojů pomocí hliníkové pásky (archiv autora, 2016)

4. Uchycení spodních měřících čidel vždy uprostřed zkušebnímu elementu, v místě nejmenší teplotní deformace (viz obr. 38),



Obr. 38 Zkušební boxy se spodní řadou měřících čidel
(archiv autora, 2016)

5. Přilepení parotěsné fólie ke zkušebnímu elementu, která zabraňuje odtoku vody (viz obr. 39),
6. Vložení recyklované textilní rohože RETEX s funkcí drenážní a retenční (viz obr. 39 - pravý zkušební element),



Obr. 39 Zkušební vzorek, levý element hotový, v pravém přilepena parotěsná fólie a vložen RETEX
(archiv autora, 2016)

7. Nad RETEX nasypána 4 cm vrstva zeminy (viz obr. 40)
Zatravněný drn měřil 120 mm z toho zpevněných, prorostlých kořínky bylo přibližně 80 mm, zbytek zeminy bylo tedy nutno dosypat, aby byla dodržena požadovaná tloušťka vzorku zelené střechy.



*Obr. 40 Nasypání nezpevněné spodní vrstvy zeminy
(archiv autora, 2016)*

8. *Vložení prorostlého drnu a stlačení na požadovanou výšku 120 mm (viz obr. 41),*



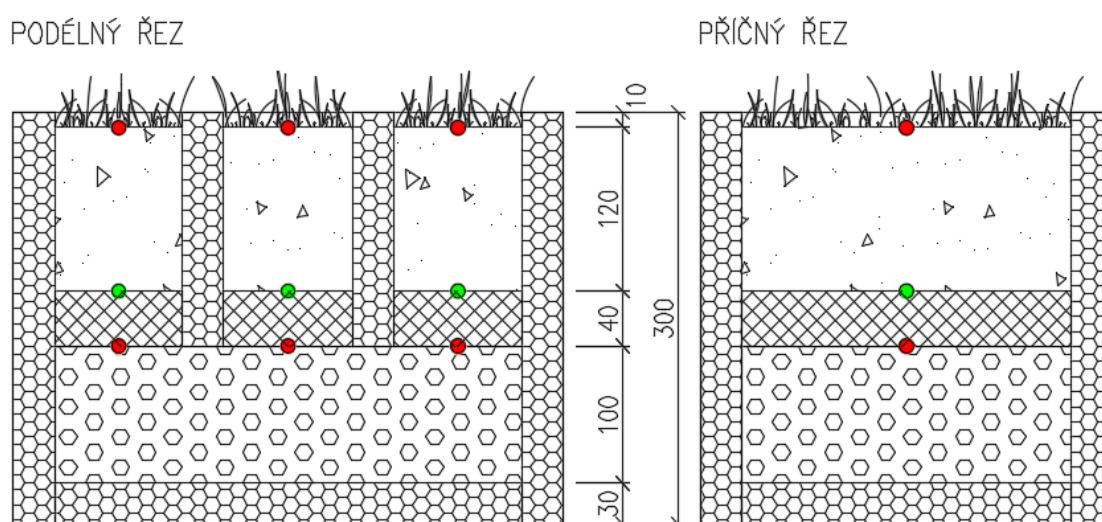
Obr. 41 Vložení a stlačení prokořeněného drnu (archiv autora, 2016)

9. *Vložení horní řady čidel, zasunutím těsně nad povrch zeminy,*

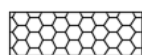
10. *Hotové boxy byly označeny č. 1–6 (viz obr. 42). Zkušební box A se vzorky č. 1, 2, 3 má rozmístěných 9 teplotních čidel, zkušební box B se vzorky č. 4, 5, 6 má pouze 6 čidel jak je vidět na obr. 43.*



Obr. 42 Nachystané zkušební boxy A a B (archiv autora, 2016)



LEGENDA MATERIÁLŮ



T.I. – PIR 30mm



T.I. – EPS 50S 100mm



recyklovaná textilní rohož
– RETEX 40mm

● TEPLTNÍ ČIDLA – TYP Pt1000/3850

● TEPLTNÍ ČIDLA – TYP Pt1000/3850
(POUZE U VZORKŮ 1, 2, 3)

Obr. 43 Schéma rozmístění teplotních čidel ve zkušebních boxech. (archiv autora, 2016)

11. Takto připravené vzorky byly navlhčeny. Prostřední element (vzorek č. 5) byl navlhčen 150 g vody a pravý krajní element (vzorek č. 6) byl navlhčen 75 g vody. Celková váha vzorku B po navlhčení byla 7990 g.

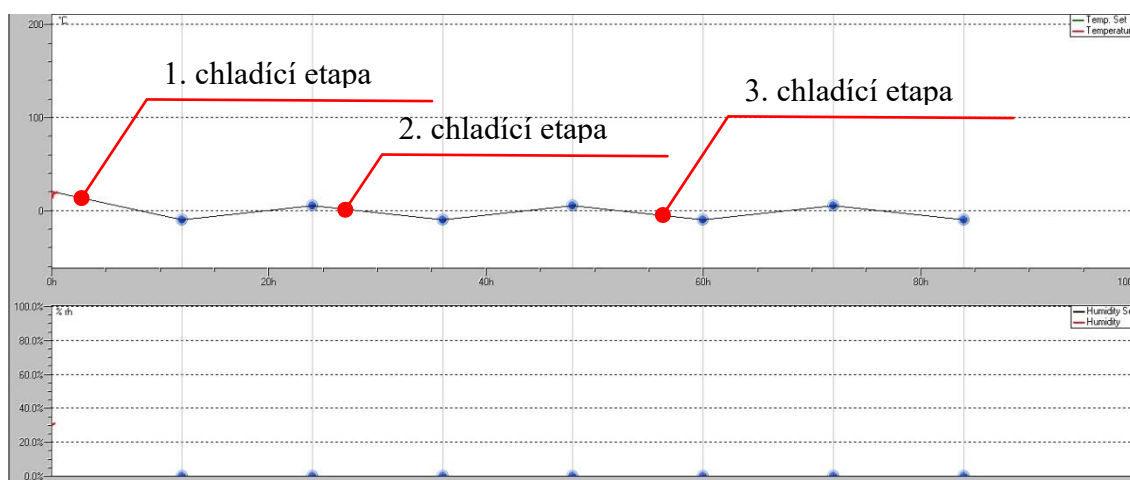
12. Takto nachystaný box B byl vložen do klimakomory, připojena čidla k měřicímu zařízení a nastaveno první experimentální měření. Do klimakomory byla přidána 2 teplotní čidla, jedno v prostoru nad zkušební boxem a druhé těsně nad travním porostem (viz obr. 44).



Obr. 44 Zkušební box B v klimakomoře po připojení teplotních čidel a utěsnění jejich prostupu (archiv autora, 2016)

Charakter teplotní rampy

První experimentální měření (cyklické) – tento cyklus představuje zjednodušený typický zimní den, kdy přes půl dne jsou plusové teploty díky slunečnímu záření a druhou půlku dne, za jasné noci nastanou minusové teploty. V klimakomoře lze dále nastavit ventilátor, který simuluje foukání větru, ten byl v tomto cyklu nastaven na hodnotu 40 %, což představuje mírný až středně silný vítr. Cyklus měl 4 opakování z důvodu vysledování podstatných opakujících se vlastností, na kterých jsou postaveny výsledky a závěry této diplomové práce (viz obr. 45, 46).



Obr. 45 Grafické zobrazení prvního experimentálního měření (archiv autora, 2016)

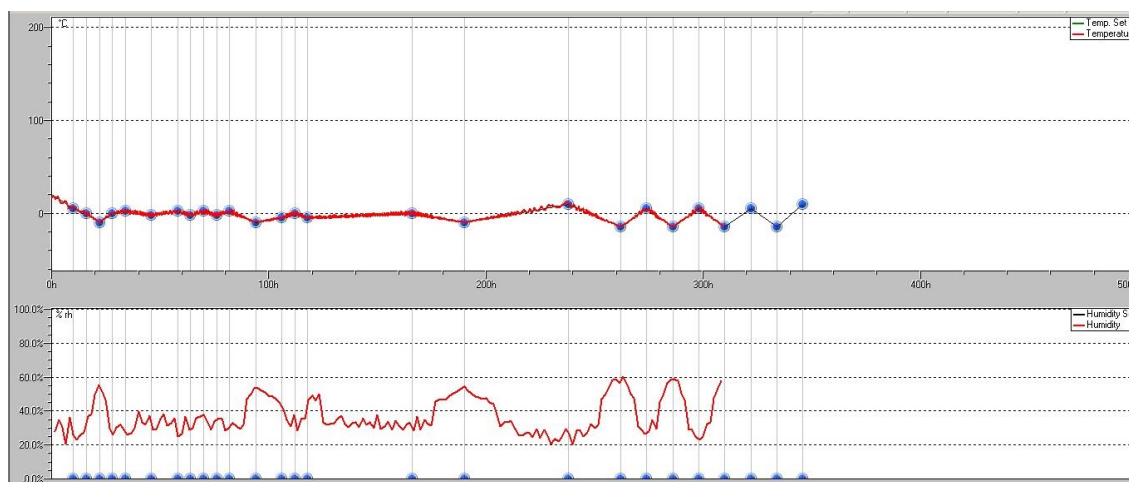
	Time hh:mm	Period hh:mm	Temp °C	Humidity	Type	Fan
1	12:00	12:00	-10.0	0	next	40%
2	24:00	12:00	5.0	0	next	40%
3	36:00	12:00	-10.0	0	next	40%
4	48:00	12:00	5.0	0	next	40%
5	60:00	12:00	-10.0	0	next	40%
6	72:00	12:00	5.0	0	next	40%
7	84:00	12:00	-10.0	0	end	40%
8						

Obr. 46 Tabulkové zobrazení prvního experimentálního měření (archiv autora, 2016)

Druhé experimentální měření – toto experimentální měření představuje reálnější průběh v zimním období, kdy se nepravidelně střídají mrazy s plusovými teplotami a dále charakterizuje klimatologické podmínky typické zimy ve zvolených oblastech z kapitoly 6.1 (viz obr. 47, 48).

Průběh teplotní rampy:

1. část etapy – strmé ochlazení na -10 °C během 6 hodin,
2. část etapy – střídání -2 °C , $+2\text{ °C}$ v 6 a 12 hodinovém režimu, charakteristické pro zimní měsíce v oblasti Brna,
3. část etapy – mírné dlouhotrvající cykly střídání -10 °C , 0 °C během 24 a 48 hodin, charakteristické pro zataženou oblohu, kde není výrazné rychlé oteplení povrchu díky slunečnímu záření,
4. část etapy – střídání -15 °C , $+5\text{ °C}$ v 12 hodinovém režimu, charakteristické pro zimní měsíce v oblasti Lysé hory.



Obr. 47 Grafické zobrazení druhého experimentálního měření (archiv autora, 2016)

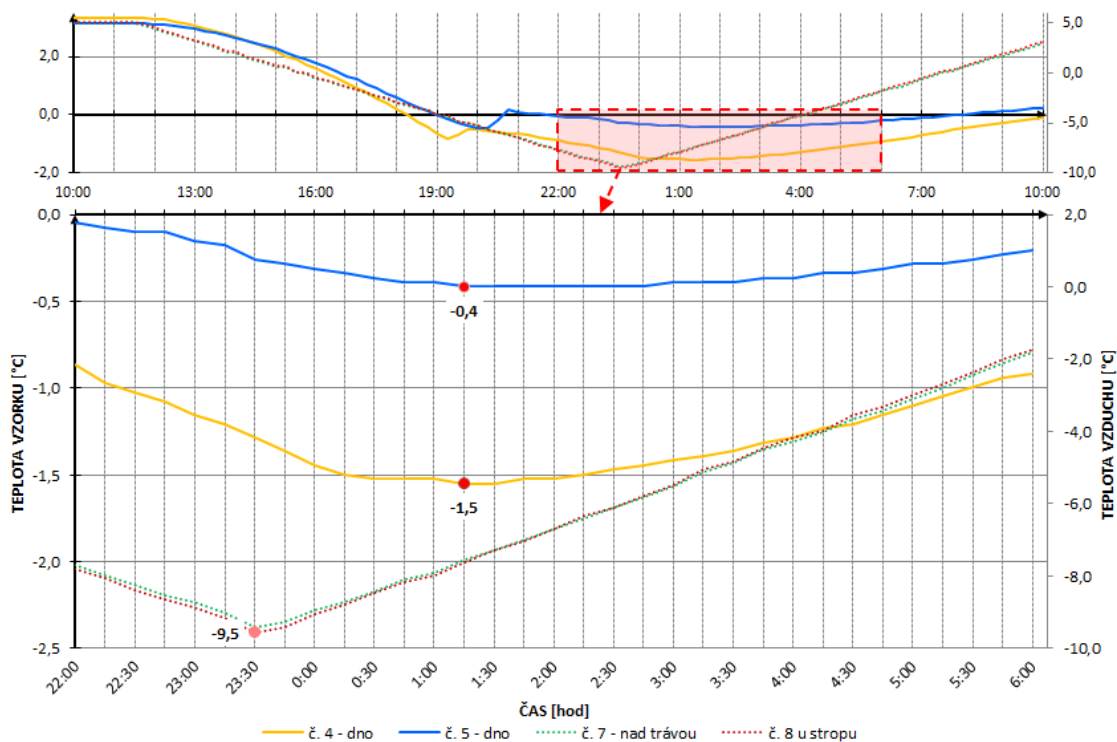
	Time hh:mm	Period hh:mm	Temp °C	Humidity	Type	Fan							
							14	112:00	6:00	0.0	0	next	20%
2	16:00	6:00	0.0	0	next	20%	15	118:00	6:00	-5.0	0	next	20%
3	22:00	6:00	-10.0	0	next	20%	16	166:00	48:00	0.0	0	next	20%
4	28:00	6:00	0.0	0	next	20%	17	190:00	24:00	-10.0	0	next	20%
5	34:00	6:00	2.0	0	next	20%	18	238:00	48:00	10.0	0	next	20%
6	46:00	12:00	-2.0	0	next	20%	19	262:00	24:00	-15.0	0	next	20%
7	58:00	12:00	2.0	0	next	20%	20	274:00	12:00	5.0	0	next	20%
8	64:00	6:00	-2.0	0	next	20%	21	286:00	12:00	-15.0	0	next	20%
9	70:00	6:00	2.0	0	next	20%	22	298:00	12:00	5.0	0	next	20%
10	76:00	6:00	-2.0	0	next	20%	23	310:00	12:00	-15.0	0	next	20%
11	82:00	6:00	2.0	0	next	20%	24	322:00	12:00	5.0	0	next	20%
12	94:00	12:00	-10.0	0	next	20%	25	334:00	12:00	-15.0	0	next	20%
13	106:00	12:00	-5.0	0	next	20%	26	346:00	12:00	10.0	0	end	20%
							27						

Obr. 48 Tabulkové zobrazení druhého experimentálního měření (archiv autora, 2016)

Ověření vlivu charakteru teplotní rampy

Data z prvního experimentálního měření

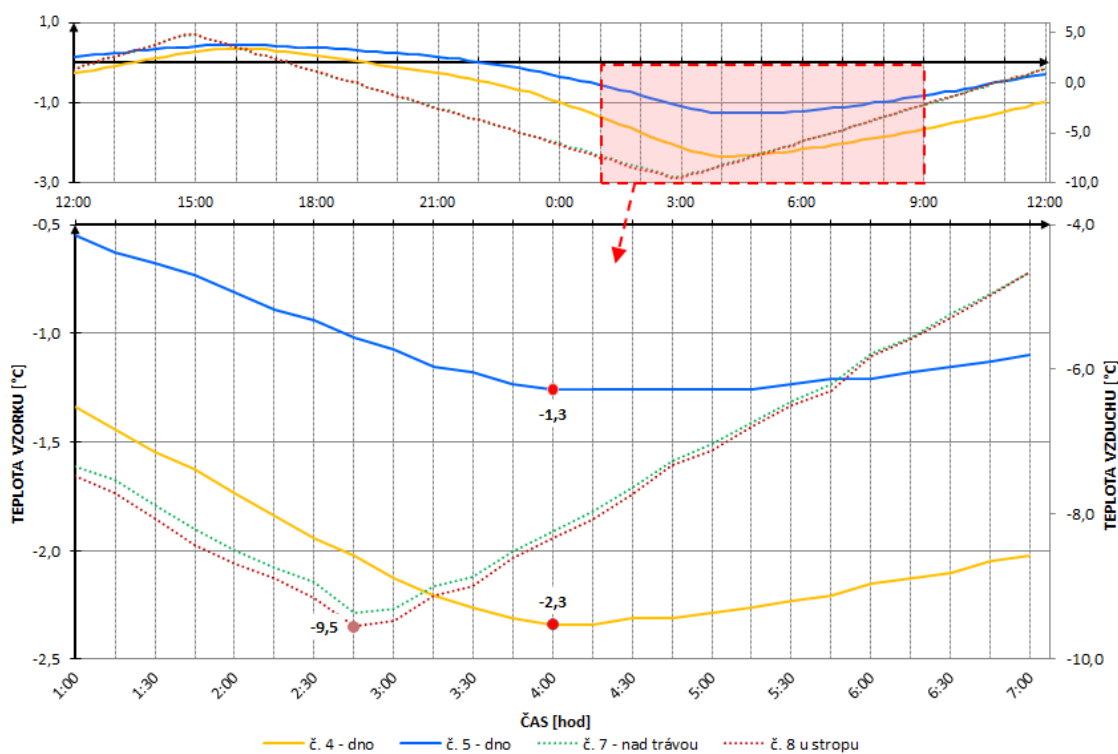
Na následujících grafech budou prezentovány různé charaktery teplotní rampy a porovnání jejich vlivu na fázový posun u vybraných vzorků. Pro přehlednost byly u grafů zobrazeny pouze čidla vzorků č. 4 – suchý substrát (žlutá plná čára), č. 5 – mokrá substrát (modrá plná čára), čidlo u těchto vzorků bylo umístěno pod Retexem (viz obr. 43) dále čidla č. 7 – nad trávou (zelená tečkovaná čára) a č. 8 – u stropu (červená tečkovaná čára) jejich umístění je vyznačeno na obr. 44.



Graf 15 První chladící etapa, +5 °C; -10 °C za 12 hodin (archiv autora, 2016)

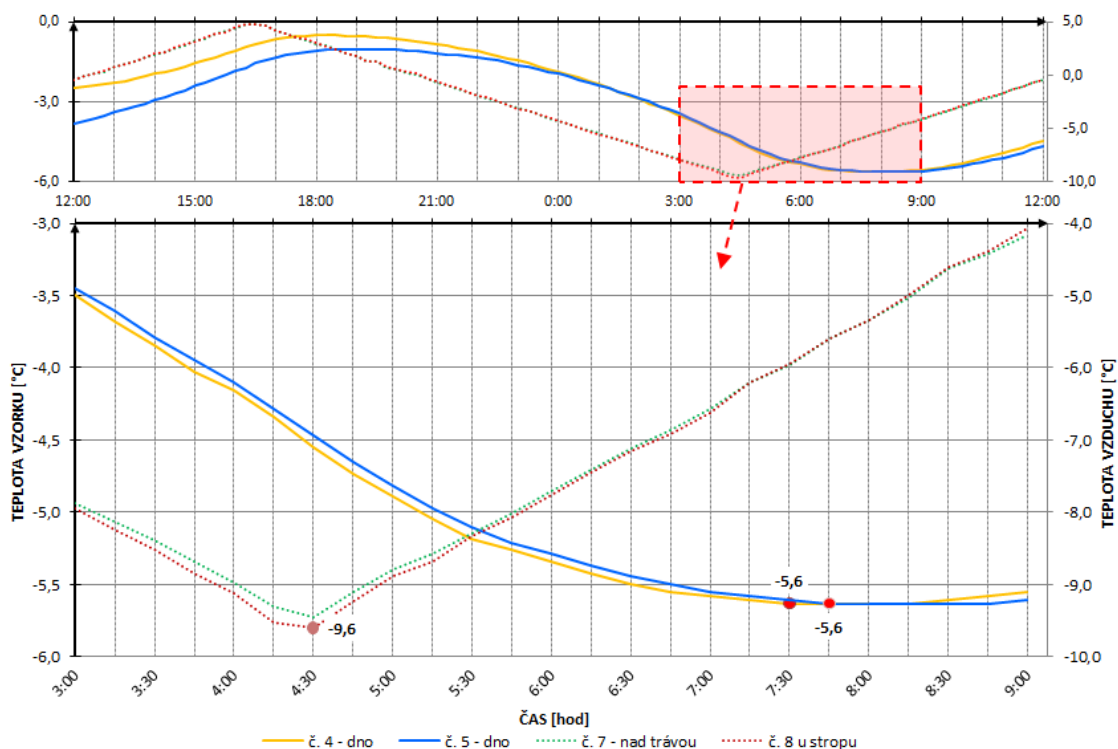
Graf 15, který byl naměřen v první chladící etapě. Před touto etapou byla zemina z ustálené pokojové teploty laboratoře D111 ochlazena během 12 hodin na 5 °C a po dobu 24 hodin ustálena na konstantní teplotě, vzorek č. 4 se ustálil na +3,3 °C a vzorek č. 5 na +3,1 °C. Poté začala první chladící etapa z +5 °C na –10 °C během 12 hodin. Fázový posun v tomto případě u obou vzorků činil 1 hodinu a 45 minut.

Na *grafu 16* je zobrazen čtvrtá chladící etapa, která měla stejný charakter teplotní rampy jako předchozí *graf 15*. Fázový posun u obou vzorků dosáhl 1 hodiny a 15 minut, kde oproti první etapě je doba fázového posunu kratší o půl hodiny. Časový rozdíl ve fázovém posunu je daný rozdílem počáteční teploty vzorku souvrství zelené střechy. Před první etapou byla teplota ve vzorcích ustálena na +3 °C, naproti tomu před započítáním čtvrté etapy zemina průběžně přecházela z jedné chladící etapy do následující a maximum teploty čidla v zemině dosáhlo +0,5 °C, než se začala znovu ochlazovat vlivem okolního prostředí klimakomory.



Graf 16 Čtvrtý chladící cyklus, +5 °C; –10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Graf 17 zobrazuje poslední etapu v prvním experimentálním měření, při stejné teplotní rampě jako v předchozích dvou grafech (viz *graf 15, 16*). Jedná se o osmou chladící etapu v řadě za sebou. Zemina už mezi jednotlivými teplotními rampami nestihla rozmrznout v celém svém objemu, tudíž oba vzorky, na čidle u dna, vykazovaly záporné hodnoty teploty i při kladné teplotě v klimakomore (konkrétně pro tuto chladící etapu: klimakomora +4,8 °C, vzorek č. 4 = –0,5 °C, vzorek č. 5 = –1,0 °C). Fázový posun v tomto případě u vzorku č. 4 byl 3 hodiny, u vzorku č. 5 byl 3 hodiny a 15 minut. Rozdíl v délce fázového posunu teplotního kmitu oproti počátečním etapám je tedy v rámci 2 hodin.



Graf 17 Osmý chladicí cyklus, +5 °C; –10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Charakter teplotní rampy +5 °C, –10 °C během 12 hodin shrnuje následující tabulka (viz tab. 6).

Tab. 6: Fázové posuny pro teplotní rampu +5 °C, –10 °C během 12 hodin.

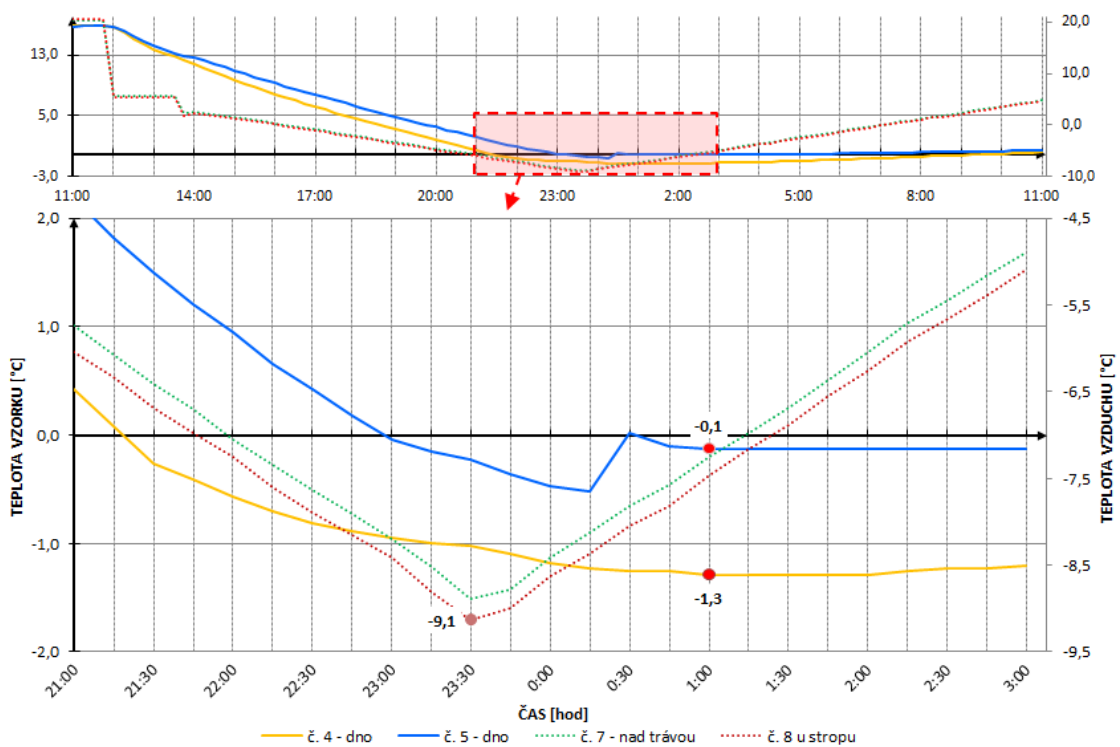
chladicí etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
1.	vzorek č. 4	+5	-10	12	3,3	-1,5	4,9	1:45
4.	vzorek č. 4				0,3	-2,3	2,6	1:15
5.	vzorek č. 4				-0,2	-4,5	4,3	3:45
7.	vzorek č. 4				0,3	-2,7	3,0	3:30
8.	vzorek č. 4				-0,5	-5,6	5,1	3:00
1.	vzorek č. 5				3,1	-0,4	3,6	1:45
4.	vzorek č. 5				0,4	-1,3	1,7	1:15
5.	vzorek č. 5				0,3	-2,3	2,5	2:00
7.	vzorek č. 5				-0,2	-4,4	4,2	4:15
8.	vzorek č. 5				-1,0	-5,6	4,6	3:15

Z naměřených dat se dá usuzovat, že přibližná délka fázového posunu pro teplotní rampu +5 °C, –12 °C během 12 hodin činí:

1 až 2 hodiny – v případě, že zemina přechází z kladné teploty do záporné (např. první mrazový den)

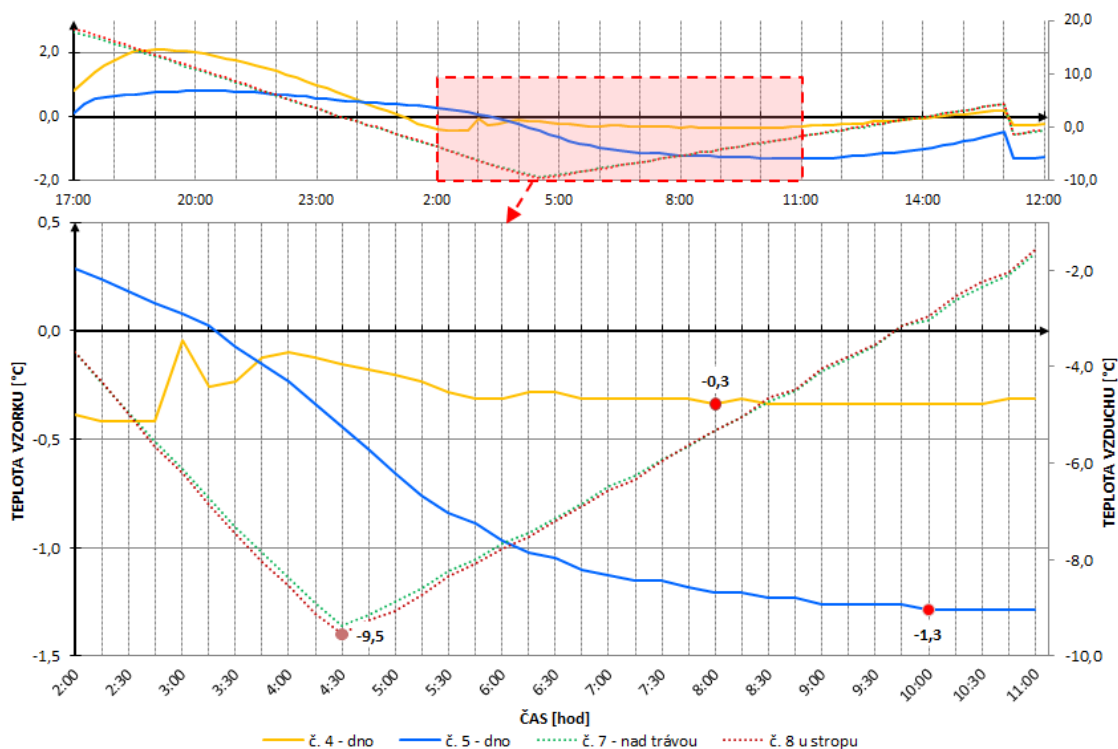
3 až 4 hodiny – v případě, že teplota zeminy je záporná, kdy už jsou vytvořeny iniciační jádra, zemina během nástupu kladných hodnot vzduchu, nestíhá v celém svém objemu rozmraznout (např. v průběhu trvání zimy)

Následující *graf 18* vznikl náhodně při prvním experimentálním měření po výpadku elektrického proudu, kdy se klimakomora i zkušební vzorek ustálily na určité teplotě (vzduch v klimakomoře +21 °C, vzorek čidlo pod Retexem +17 °C), při opětovném spuštění vznikl charakter teplotní rampy z +20 °C na -10 °C během 12 hodin, který není zcela typický pro zimní období v klimatických podmínkách ČR. Tento charakter velkého ochlazení teplotní rampy odpovídá fázovému posunu u obou vzorků 1 hodiny a 30 minut.



*Graf 18 Druhý chladicí cyklus, +20 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)*

Opakování této extrémní teplotní rampy v šesté chladicí etapě je na následujícím *grafu 19*. Fázový posun v tomto případě u vzorku č. 4 byl 3 hodiny a 30 minut, u vzorku č. 5 byl 5 hodin a 30 minut. Velký časový rozdíl oproti prvnímu průběhu této teplotní rampy je způsoben odlišnou počáteční teplotou zeminy.



Graf 19 Šestá chladicí etapa, +20 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Charakter extrémní teplotní rampy +20 °C, -10 °C během 12 hodin shrnuje následující tabulka (viz tab. 7).

Tab. 7: Fázové posuny pro teplotní rampu +20 °C, -10 °C během 12 hodin.

chladicí etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
2.	vzorek č. 4	+20	-10	12	16,8	-1,3	18,1	1:30
3.	vzorek č. 4				3,1	-1,3	4,4	1:30
6.	vzorek č. 4				2,1	-0,3	2,4	3:30
2.	vzorek č. 5				16,8	-0,1	16,9	1:30
3.	vzorek č. 5				2,3	-0,3	2,7	2:15
6.	vzorek č. 5				0,8	-1,3	2,1	5:30

Z naměřených dat se dá usuzovat, že přibližná délka fázového posunu pro teplotní rampu +20 °C, -12 °C během 12 hodin činí:

1 až 2 hodiny – v případě, že zemina přechází z kladné teploty do záporné (např. první mrazový den)

3 až 6 hodin – v případě, že teplota zeminy se blíží nule, v zemině už jsou vytvořeny iniciační jádra, zemina během nástupu kladných hodnot vzduchu, nestíhá v celém svém objemu rozmraznout (např. v průběhu trvání zimy)

Celkový přehled prvního experimentálního měření shrnuje následující dvojice tabulek (viz. tab 8,9)

Tab. 8: Vliv charakteru teplotní rampy na fázový posun, vzorek č. 4 (archiv autora, 2016)

chladící etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
1.	vzorek č. 4	+5	-10	12	3,3	-1,5	4,9	1:45
2.	vzorek č. 4	+20	-10	12	16,8	-1,3	18,1	1:30
3.	vzorek č. 4	+20	-10	12	3,1	-1,3	4,4	1:30
4.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,6	1:15
5.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,2	-4,5	4,3	3:45
6.	vzorek č. 4	+20	-10	12	2,1	-0,3	2,4	3:30
7.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,7	3,0	3:30
8.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,5	-5,6	5,1	3:00

Tab. 9: Vliv charakteru teplotní rampy na fázový posun, vzorek č. 5 (archiv autora, 2016)

chladící etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
1.	vzorek č. 5	+5	-10	12	3,1	-0,4	3,6	1:45
2.	vzorek č. 5	+20	-10	12	16,8	-0,1	16,9	1:30
3.	vzorek č. 5	+20	-10	12	2,3	-0,3	2,7	2:15
4.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,4	-1,3	1,7	1:15
5.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,5	2:00
6.	vzorek č. 5	+20	-10	12	0,8	-1,3	2,1	5:30
7.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-0,2	-4,4	4,2	4:15
8.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-1,0	-5,6	4,6	3:15

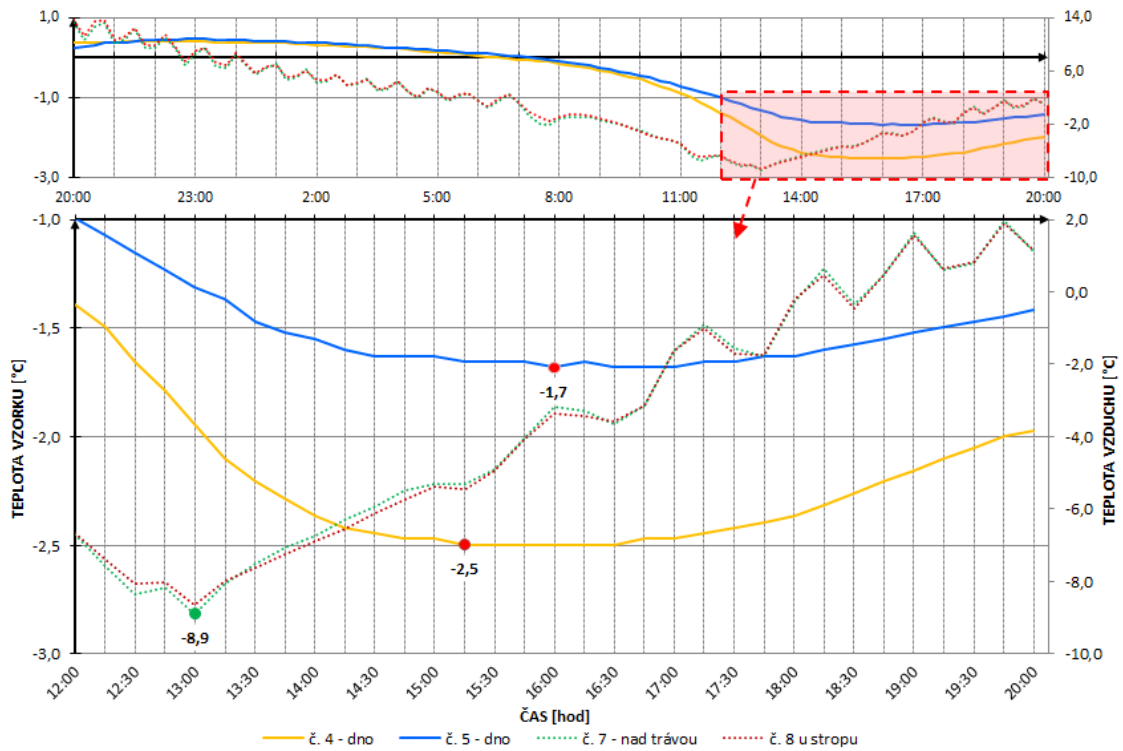
Z této dvojice tabulek je patrné, že při vícenásobném opakování chladících cyklů se doba fázového posunu prodlužuje v závislosti na počáteční teplotě zeminy, vlhkosti zeminy a na tom zda jsou v zemině již vytvořeny krystalizační jádra.

Pozn.: Grafy dalších chladících etap jsou přílohou diplomové práce.

Data z druhého experimentálního měření

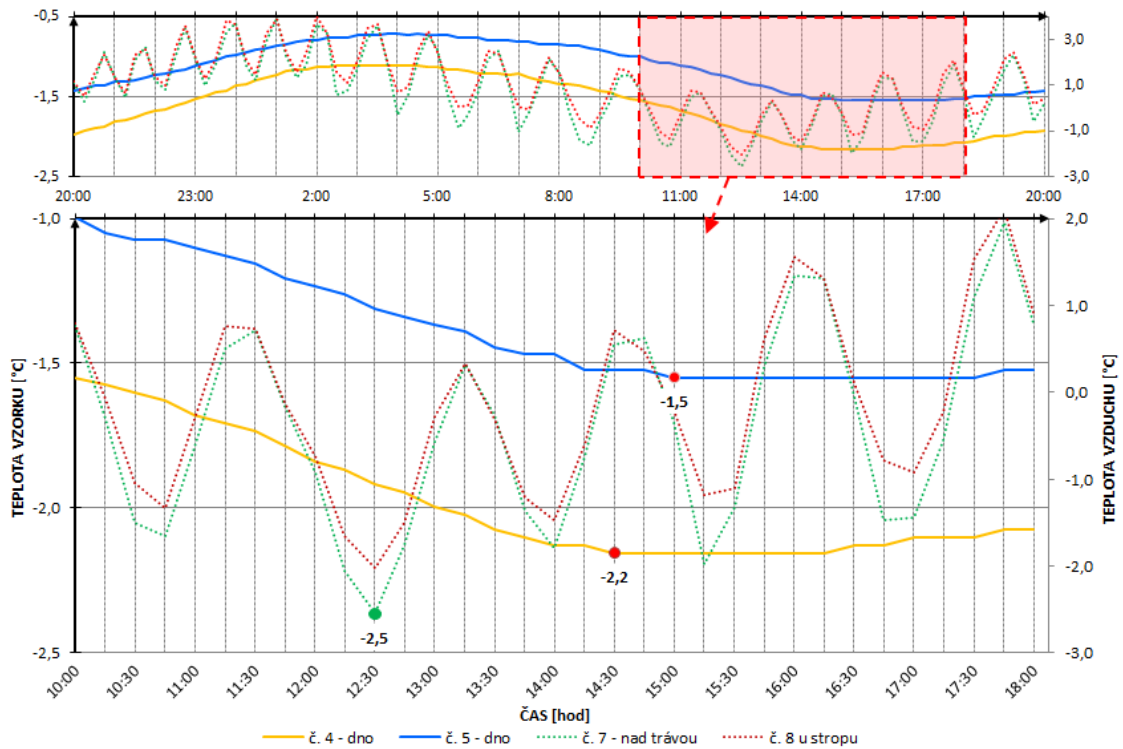
V tomto druhém experimentálním měření bylo nastaveno více charakterů teplotních ramp, jak bylo uvedeno na obr. 47, 48. Budou zde zobrazeny pouze některé grafy, ostatní grafy budou v přílohách diplomové práce.

Následující graf 20 zobrazuje první chladící etapu v druhém experimentálním měření. Charakter teplotní rampy +15 °C na -10 °C za 18 hodin. Fázový posun u vzorku č. 4 byl 2 hodiny a 15 minut, vzorek č. 5 byl 3 hodiny.

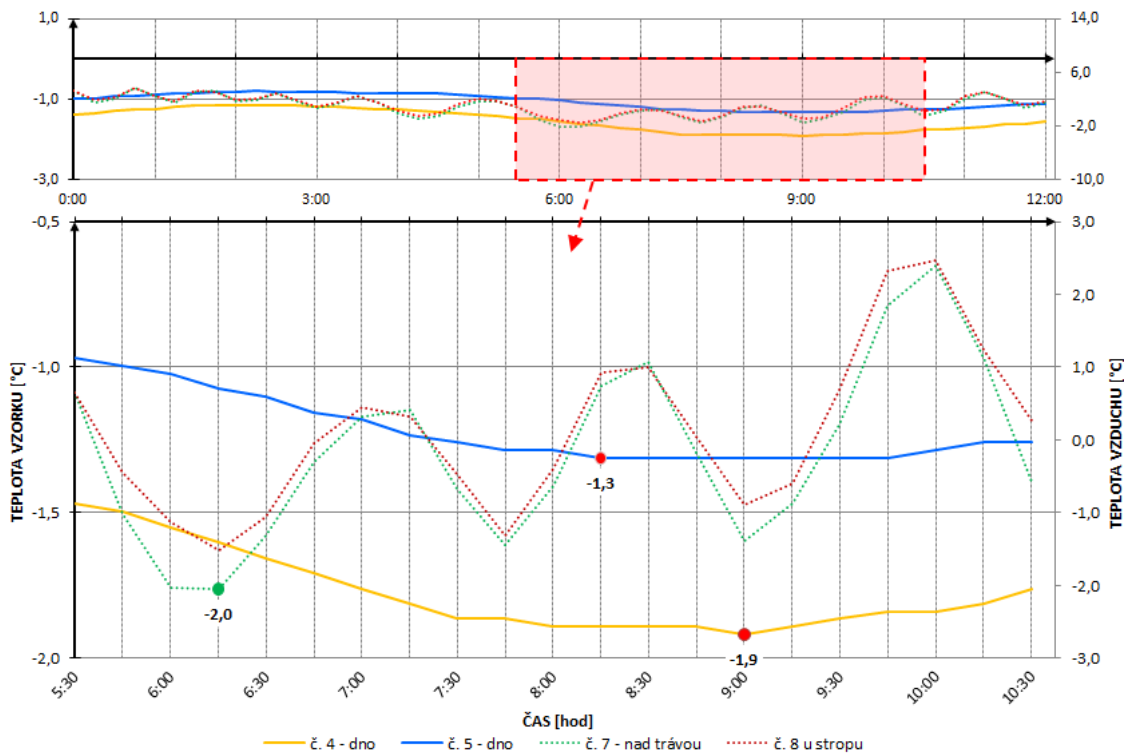


Graf 20 První chladicí cyklus, +15 °C; -10 °C za 18 hodin
(archiv autora, 2016)

Následující grafy 21, 22, 23 zobrazují charakter teplotní rampy +2 °C, -2 °C nejprve za 12 hodin a potom v polovičním intervalu během 6 hodin.

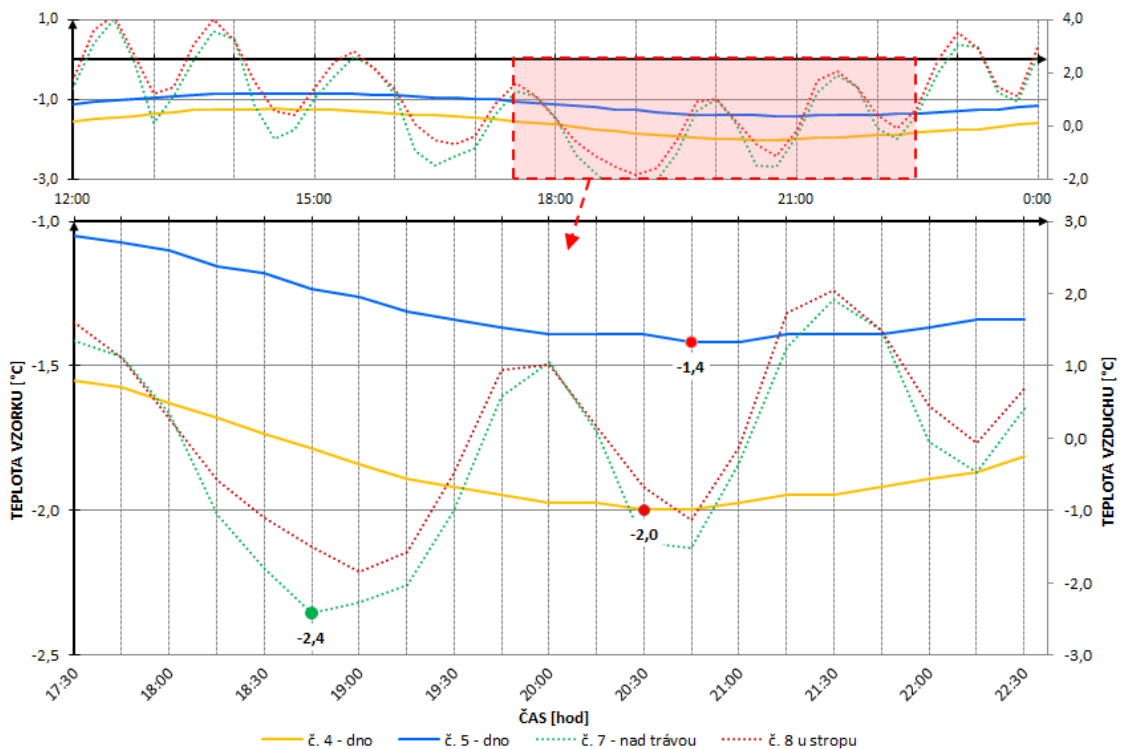


Graf 21 Druhá chladicí etapa, +2 °C; -2 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)



Graf 22 Třetí chladicí etapa, +2 °C; -2 °C za 6 hodin
(archiv autora, 2016)

Tato teplotní rampa byla zvolena na základě analýzy teplotních podmínek pro souvrství zelené střechy umístěné v Brně. Fázový posun u vzorků se pohyboval v rozmezí 2 až 3 hodin.



Graf 23 Čtvrtá chladicí etapa, +2 °C; -2 °C za 6 hodin
(archiv autora, 2016)

Charakter teplotní rampy z předchozí trojice grafů shrnuje tabulka: (viz tab. 10)

Tab. 10 Fázové posuny pro teplotní rampu +2 °C, -2 °C.

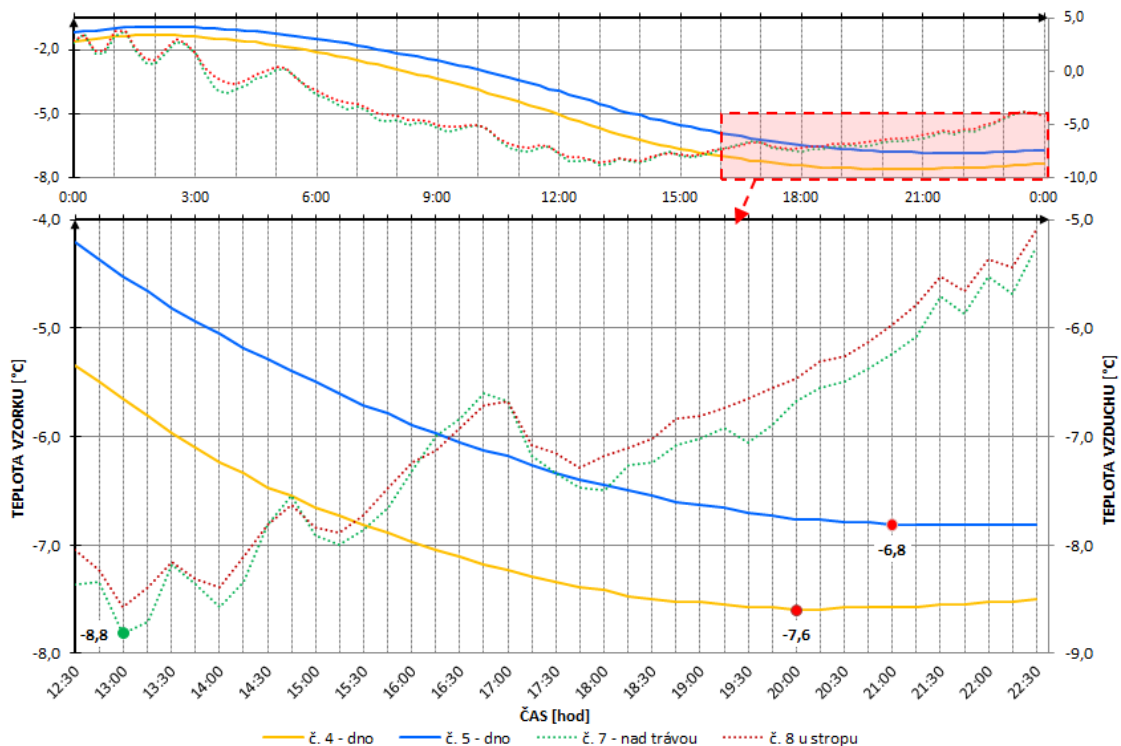
chladící etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
2.	vzorek č. 4	+2	-2	12	-1,1	-2,2	1,1	2:00
3.	vzorek č. 4			6	-1,2	-1,9	0,7	2:45
4.	vzorek č. 4			6	-1,2	-2,0	0,8	1:45
2.	vzorek č. 5			12	-0,7	-1,5	0,8	2:30
3.	vzorek č. 5			6	-0,8	-1,3	0,5	2:00
4.	vzorek č. 5			6	-0,8	-1,4	0,6	2:00

Z naměřených dat vyplývá délka fázového posunu pro tuto teplotní rampu:

1,5 až 2,5 hodin – v případě, že počáteční teplota zeminy je záporná.

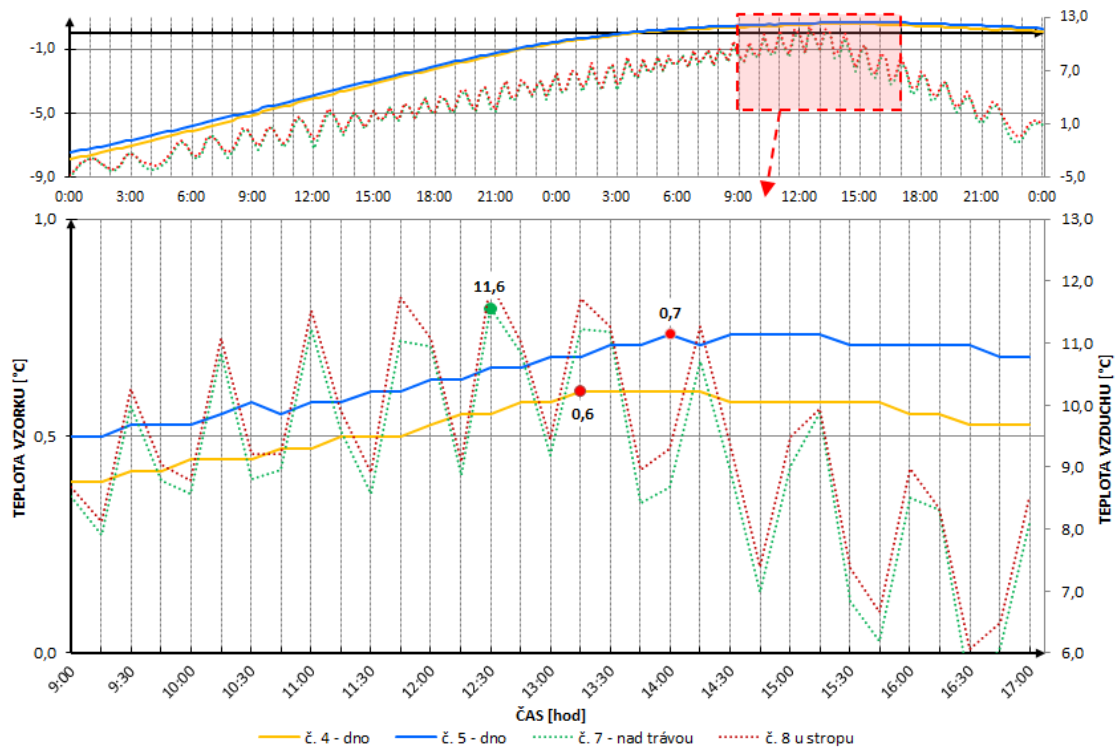
Při takto rychlém střídání teplot blízkých 0 °C si zemina po celou dobu trvání udržuje záporné hodnoty, tudíž nerozmrzá (jsou v ní vytvořeny ledové čočky, které se v závislosti na teplotě vzduchu buď rozrůstají, nebo zmenšují).

Na grafu 24 je dokumentován nejdelší fázový posun a to při charakteru teplotní rampy +2 °C, -10 °C během 12 hodin. U vzorku č. 4 činil 7 hodin, u vzorku č. 5 činil 8 hodin.



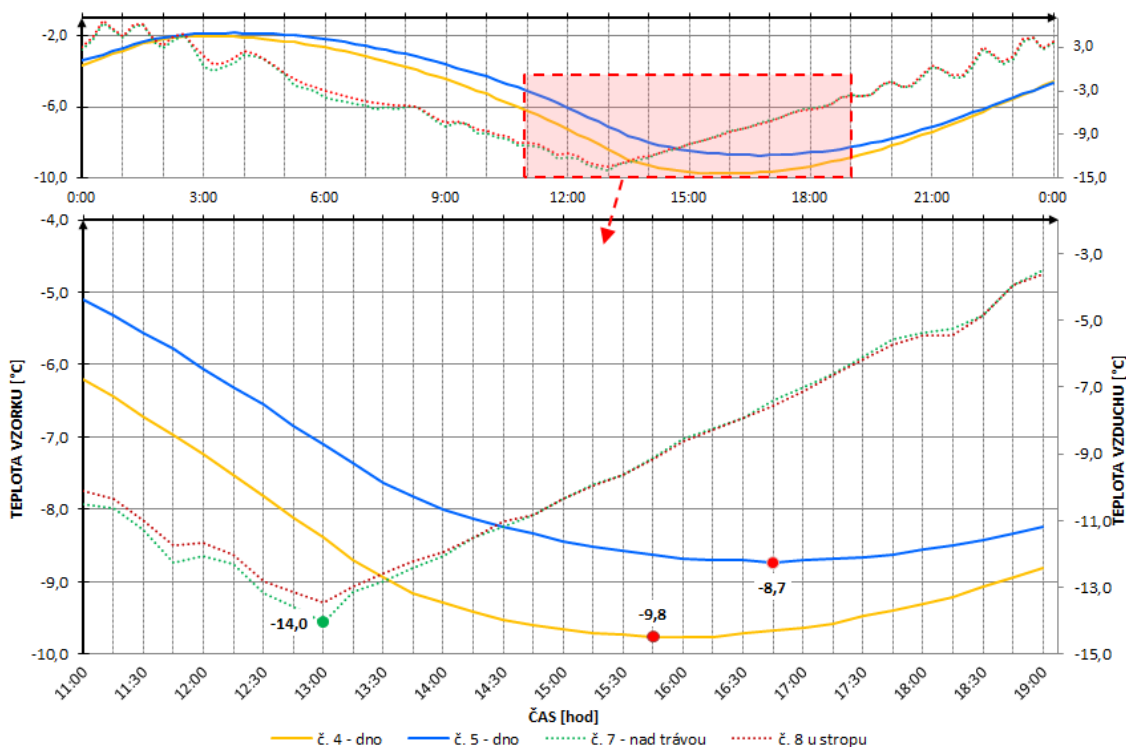
Graf 24 Pátá chladící etapa, +2 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Na grafu 25 je charakter teplotní rampy opačný, kde je zemina vystavena oteplování z -10 °C na $+10\text{ °C}$ během 48 hodin, což by v praxi mohlo simulovat poslední mrazový den konce zimy. Zemina na začátku této etapy měla nejnižší teplotu za celý průběh experimentu a to $-8,9\text{ °C}$. V tomto případě zemina reaguje velmi rychle a délka fázového posunu byla jedna z nejkratších, u vzorku č. 4 – 45 minut, u vzorku č. 5 – 1 hodinu a 30 minut.



Graf 25 Devátá chladicí etapa, -10 °C ; $+10\text{ °C}$ za 48 hodin
(archiv autora, 2016)

Poslední graf 26 je z jedenácté chladicí etapy, který představuje charakter teplotní rampy pro oblast Lysé hory, tedy $+5\text{ °C}$, -15 °C za 12 hodin. Fázový posun u vzorku č. 4 byl 2 hodiny a 45 minut, u vzorku č. 5 byl 3 hodiny a 45 minut.



Graf 26 Jedenáctá chladící etapa, +5 °C; -15 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Celkový přehled druhého experimentálního měření shrnuje následující dvojice tabulek (viz. tab. 11,12)

Tab. 11 Vliv charakteru teplotní rampy na fázový posun, vzorek č. 4 (archiv autora, 2016)

chladící etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
1.	vzorek č. 4	+15	-10	18	0,4	-2,5	2,9	2:15
2.	vzorek č. 4	+2	-2	12	-1,1	-2,2	1,1	2:00
3.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-1,9	0,7	2:45
4.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-2,0	0,8	1:45
5.	vzorek č. 4	+2	-10	12	-1,3	-7,6	6,3	7:00
6.	vzorek č. 4	0	-5	6	-4,1	-5,4	1,3	3:00
7.	vzorek č. 4	-5	0	48	-5,3	-2,3	-3,1	2:15
8.	vzorek č. 4	0	-10	24	-2,3	-8,9	6,6	3:00
9.	vzorek č. 4	-10	+10	48	-7,8	0,6	-8,4	0:45
10.	vzorek č. 4	+10	-15	24	0,6	-6,9	7,5	4:15
11.	vzorek č. 4	+5	-15	12	-2,0	-9,8	7,8	2:45

Tab. 12 Vliv charakteru teplotní rampy na fázový posun, vzorek č. 5 (archiv autora, 2016)

chladící etapa	vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
1.	vzorek č. 5	+15	-10	18	0,5	-1,7	2,2	3:00
2.	vzorek č. 5	+2	-2	12	-0,7	-1,5	0,8	2:30
3.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,3	0,5	2:00
4.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,4	0,6	2:00
5.	vzorek č. 5	+2	-10	12	-0,9	-6,8	5,9	8:00
6.	vzorek č. 5	0	-5	6	-3,8	-4,9	1,1	5:00
7.	vzorek č. 5	-5	0	48	-4,8	-1,9	-2,9	2:15
8.	vzorek č. 5	0	-10	24	-1,9	-8,2	6,3	4:30
9.	vzorek č. 5	-10	+10	48	-7,4	0,7	-8,2	1:30
10.	vzorek č. 5	+10	-15	24	0,7	-5,5	6,3	5:45
11.	vzorek č. 5	+5	-15	12	-1,8	-8,7	6,9	3:45

Závěr z ověření vlivu charakteru teplotní rampy

Z analýzy předchozích dat vyplívají tyto skutečnosti:

- Délka trvání teplotní rampy, charakter teplotní rampy a počáteční teplota souvrství zelené střechy, přímo ovlivňují délku fázového posunu teplotního kmitu,
- Mírné kolísání teplot blízkých nule (typických pro oblast Brna) odpovídá délce fázového posunu v rámci 2 až 3 hodiny,
- Větší kolísání teplot (typických pro Lysou horu) odpovídá délce fázového posunu v rámci 3 až 4 hodiny,
- Nejdelsí fázový posun nastává po často opakujících se chladících etapách uprostřed zimy, kdy v zemině již jsou vytvořena iniciační jádra a ledové čočky,
- Při dlouhotrvajícím pozvolném rozmrzání zeminy je fázový posun v rámci 1 až 2 hodin, tento typ rozmrzání zeminy na konci zimy je žádoucí z hlediska eliminace jarních záplav.

6.3 Experimentální ověření míry nasycení zeminy v souvrství zelené střechy vodou na fázovou přeměnu vody

Příprava vzorků pro experimentální ověření

Pro sledování vlhkostních charakteristik byla použita zemina ze souvrství zelené střechy z výzkumného areálu centra AdMas. Souvrství zelené střechy je složeno: 40 mm recyklované textilní rohože, která tvoří drenážní a retenční vrstvu, 120 mm běžné zeminy s překládaným drnem, použité z nedalekého dolu při skrývce svrchní části drnu (viz obr. 49).



Obr. 49 Struktura travního drnu (archiv autora, 2016)

Takto vyřezaný element souvrství zelené střechy (viz obr. 50) byl převezen na ústav pozemního stavitelství do laboratoře D111. Kde byl během 72 hodin ustálen na pokojové teplotě +20 °C a přirozené vnitřní vlhkosti.



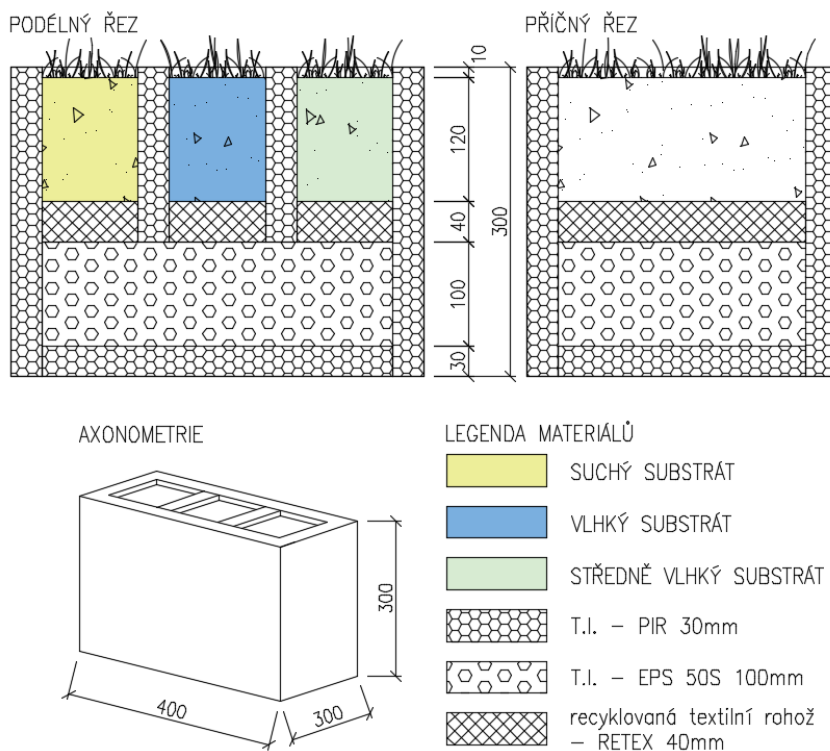
Obr. 50 Souvrství zelené střechy (archiv autora, 2016)

Měřicí zařízení na ústavu pozemního stavitelství, zkušební komora značky Memmert CTC256 – environmentální testovací komora (viz obr. 51).



Obr. 51 Klimakomora Memmert
(archiv autora, 2016)

Tento typ měřicího zařízení neumožňuje měnit vnitřní vlhkost při záporných teplotních hodnotách vzduchu, z toho důvodu bylo nutné navrhnout zkušební box, který by umožňoval měření tří na sobě nezávislých elementů souvrství zelené střechy, které by měly různé počáteční nasycení a zároveň stejné okrajové podmínky jaké vytváří klimakomora. Na základě tohoto požadavku byl navržen a sestrojen zkušební box dle následujícího schéma (viz obr. 52).



Obr. 52 Schéma zkušebního boxu a jeho členění dle různě navlhčených vzorků (archiv autora, 2016)

Po sestavení zkušebního boxu, vložení měřících čidel, vytvoření elementů souvrství zelené střechy v boxu, byli tyto vzorky mírně zavlaženy (viz obr. 53), z důvodu neuhynutí kořenového systému travního drnu.



Obr. 53 Zavlažení travního drnu (archiv autora, 2016)

V rozsahu diplomové práce, a kvůli určitému zjednodušení, bylo v rámci tohoto experimentu uvažováno zjednodušení, že celé souvrství zelené střechy má stejnou počáteční vlhkost. Těsně před vložením zkušebního boxu do klimakomory byly jednotlivé vzorky souvrství zelené střechy navlhčeny, dle následujících informací:

Vzorek č. 4 „suchý“

bez přidaného množství vody
(v grafech značen žlutou barvou)

Vzorek č. 5 „vlhký“

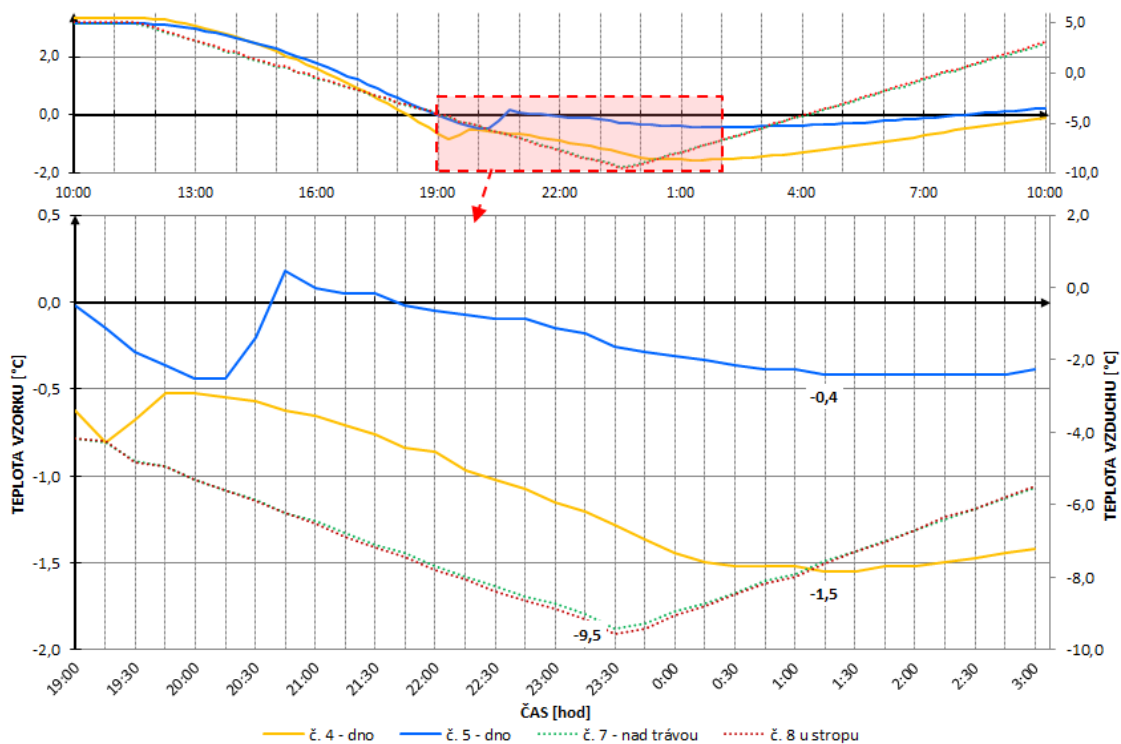
nalití 150 ml přidaného množství vody, což odpovídá 5% z celkové hmotnosti vzorku
(v grafech značen modrou barvou)

Vzorek č. 6 „středně vlhký“

nalití 75 ml přidaného množství vody, což odpovídá 2,5% z celkové hmotnosti vzorku

Pro experimentální ověření míry nasycení zeminy v souvrství zelené střechy vodou na fázovou přeměnu vody byl použit stejný experimentální cyklus, jako na experiment v kapitole 6.2 *Experimentální ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy*, v podkapitole *Charakter teplotní rampy*.

Na následujících grafech budou zobrazeny zjištěné informace. Pro přehlednost grafů budou zobrazeny pouze vzorky č. 4 a č. 5, jako zástupce suché vs. vlhké zeminy. Na grafech je dokumentován průkazný rozdíl v chování zeminy dle počátečního nasycení vodou.



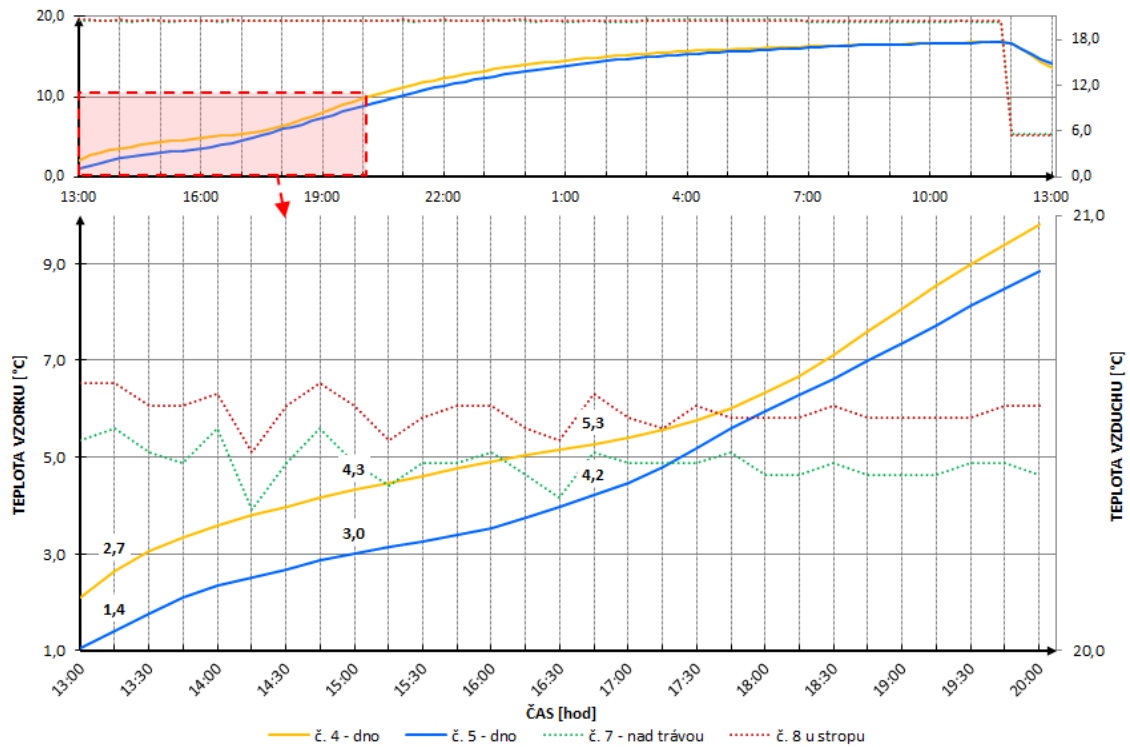
Graf 27 První chladící etapa, +5 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Z grafu 27 je patrné, že zatímco suchá zemina po přechodu do záporné hodnoty rovnoměrně promrzá až do minimální teploty $-1,5\text{ °C}$, tak vlhká zemina se po přechodu do záporných hodnot určitou dobu drží kolem 0 °C , do té doby než se vytvoří první iniciační jádra a začnou růst ledové čočky (viz obr. 54), až po tomto ději se začne teplota v zemině plynule snižovat do minimální teploty $-0,4\text{ °C}$. V tomto případě je tedy rozdíl v minimální dosažené teplotě suchého a vlhkého vzorku necelý 1 °C .



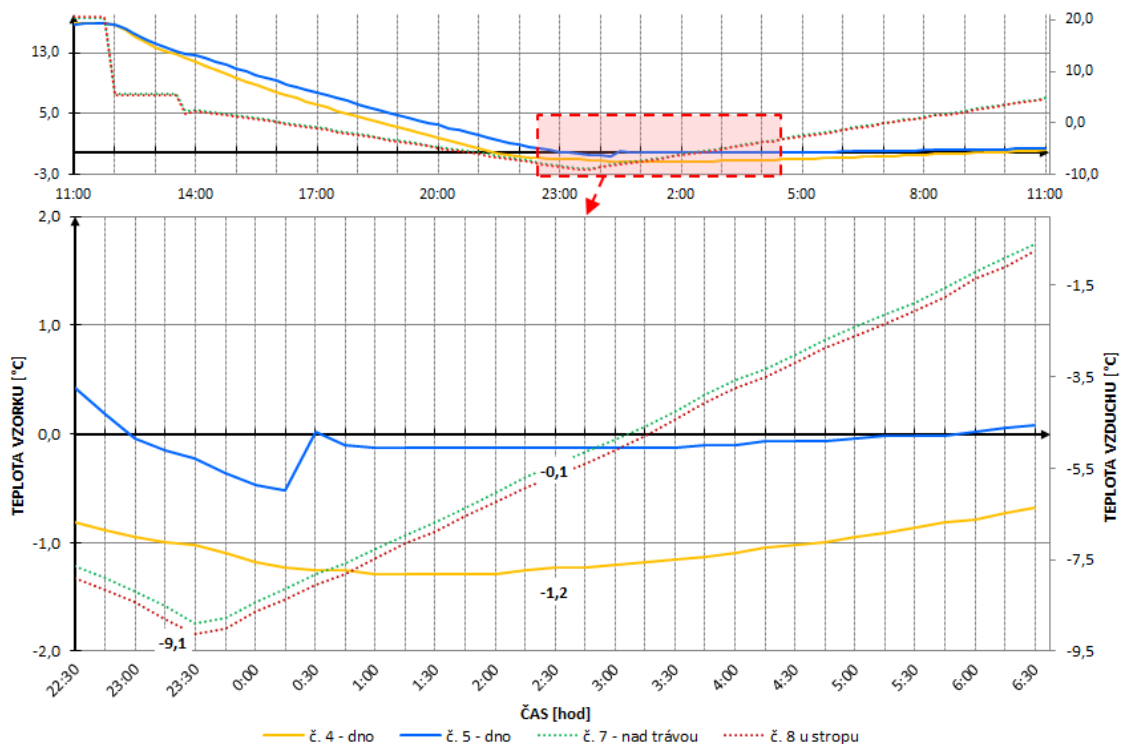
Obr. 54 Ledové čočky ve zkušebním vzorku
[22]

Graf 28 zobrazuje opačnou teplotní rampu, tedy vzestup teploty. Zde vidíme, že vlhká zemina přibližně do teploty + 5 °C má větší tepelnou stabilitu oproti suché zemině, je to způsobeno přeměnou ledových čóček zpět na vodu, ta odebírá větší množství energie než oteplování suchého substrátu. Od +5 °C do +18 °C mají vzorky přibližně podobný teplotní průběh.



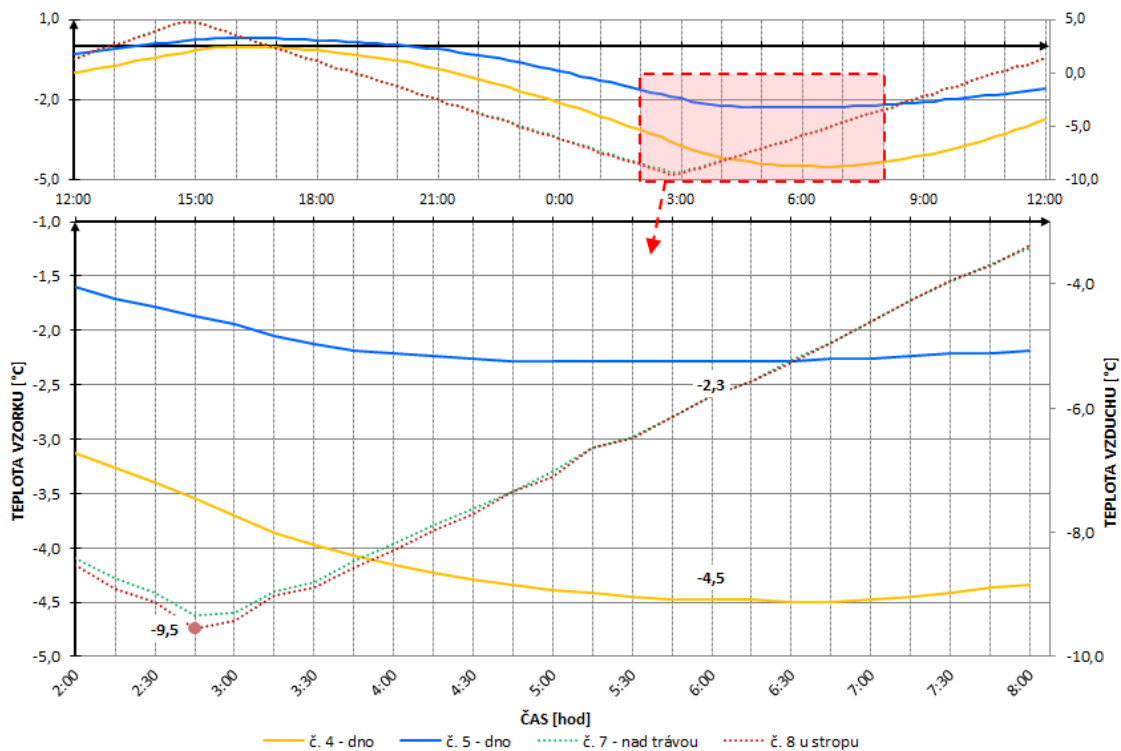
Graf 28 Výpadek elektrického proudu, -5 °C; +20 °C během 24 hodin
(archiv autora, 2016)

Z grafu 29 je patrný přesun vody ke spodnímu čidlu, v reálném prostředí mimo klimakomoru by se vlhkost v zemině během kladných teplot přesouvala vlivem vypařování směrem k povrchu, zatímco v podmínkách klimakomory s každou následující etapou se voda přesouvala vlivem gravitace směrem ke dnu zkušebního vzorku. Zde lze lépe vidět vliv fázové přeměny vody ve vlhké zemině na průběh teploty, tedy tvorba ledových čóček kolem iniciačních jader odebírá většinu energie a až po tomto fyzikální ději začne záporná teplota v zemině dále narůstat, což v tomto případě nenastalo vlivem délky chladicí etapy. Rozdíl minimální teploty u vzorků činil přibližně 1 °C.



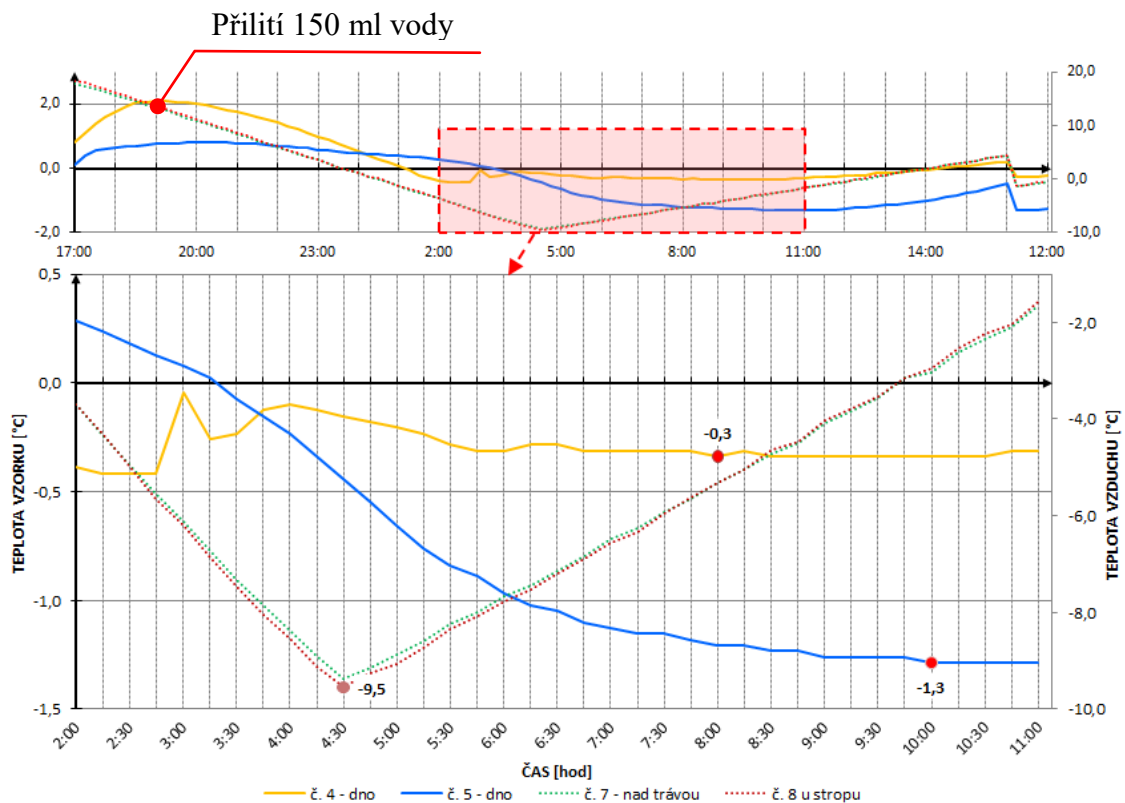
Graf 29 Druhá chladící etapa, +20 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Z grafu 30 vyplívá informace, že pokud zemina nemá dostatečný čas při kladných teplotách vzduchu rozmraznout a následuje další chladící etapa, tak se více ochlazuje. Rozdíl v teplotách v tomto případě mezi suchou a vlhkou zeminou je větší, zde přes 2 °C.



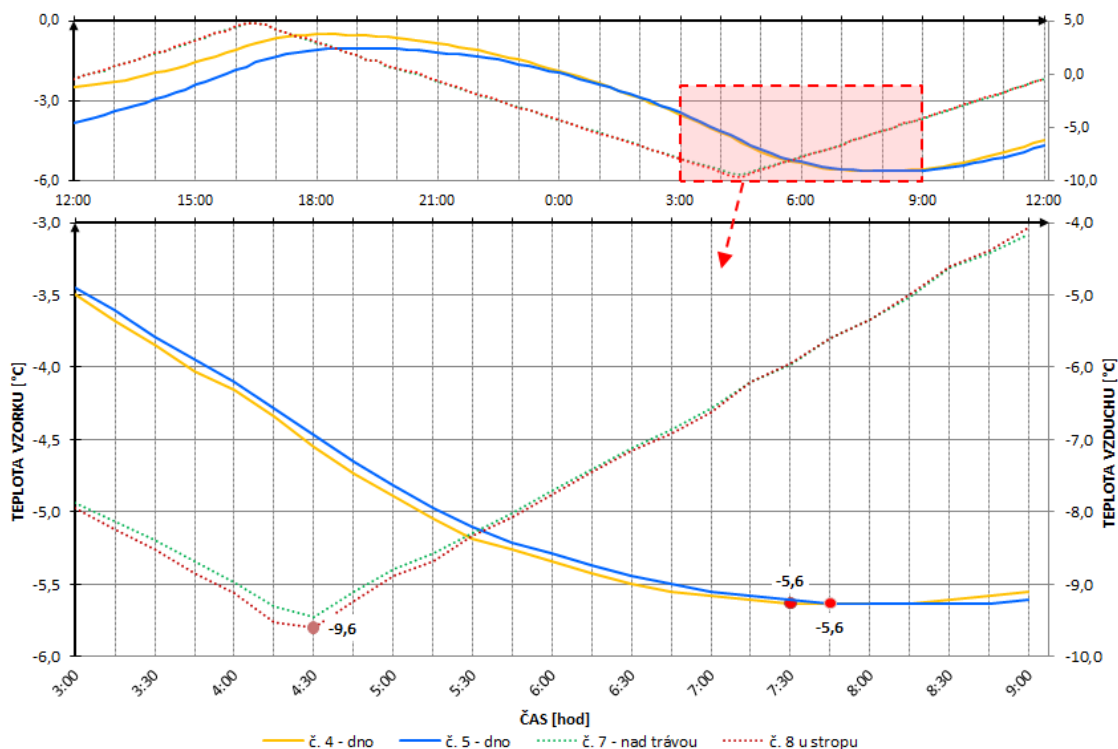
Graf 30 Pátá chladící etapa, +5 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Pro jasné prokázání důležitosti míry nasycení vodou bylo do suchého vzorku č. 4, nalito v průběhu další chladicí etapy stejné množství vody, které bylo obsaženo ve vzorku č. 5. Vzorek č. 4 se najednou chová stejně jako vlhký vzorek při prvních chladicích etapách a poprvé za průběh celého experimentu je v záporných hodnotách nad čarou vzorku č. 5. Ve vzorku č. 4 teprve vznikají první iniciační jádra a začíná růst ledových čoček, zatímco ve vzorku č. 5 už jsou první ledové čočky přítomné a proto zde nastal rozdíl v minimálních teplotách 1 °C (viz graf 31).



*Graf 31 Šestá chladicí etapa, +20 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)*

V posledním chladicím etapě (viz graf 32) kdy vzorek č. 4 i č. 5 mají přibližně stejný obsah vody, mají vytvořené ledové čočky, jejich počáteční teplota je záporná, tak pouze dochází k růstu ledových čoček a celkovému ochlazení zeminy. Průběh jejich teplot se srovnává a dosahují stejné minimální teploty -5,6 °C.



Graf 32 Osmá chladicí etapa, +5 °C; -10 °C za 12 hodin
(archiv autora, 2016)

Z přechozích grafů je tímto experimentálním ověřením prokázáno, jaký vliv má, na průběh teplot, nasycení zeminy vodou.

Obsah vody v zemině zajišťuje stabilnější průběh při střídajících se kladných a záporných teplotách vzduchu, v zemině vznikají na iniciačních jádrech ledové krystaly a ty odebírají větší množství energie, než suchá zemina, která promrzá rychleji a více.

Porovnání fázového posunu z programu TEPLLO 2014

Pro srovnání byl použit nejčastěji používaný výpočetní program na posouzení tepelných vlastností konstrukcí v ČR. V programu byly vytvořeny tři konstrukce souvrství zelených střech, které se lišili pouze ve vlastnostech substrátu (suchý, středně vlhký, vlhký) a klasická střecha, která se lišila v druhu použité tepelné izolace (EPS namísto perimetru, který je pro zelené střechy vhodnější). Dále jsou uvedeny pouze závěrečné výsledky z protokolu. *Celé protokoly jsou k dispozici v přílohách diplomové práce.* Veškeré hodnoty byly použity z katalogu materiálů programu TEPLLO 2014.

Tento program posuzuje konstrukci stacionárně, to znamená, že okrajové podmínky se v závislosti na čase nemění a tepelně technické vlastnosti daných materiálu se v závislosti na čase a okrajových podmínkách také nemění, taková situace ovšem v praxi na souvrství střechy málokdy nastane.

1. Substrát vlhký

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát vlhký	0,1800	2,3000	920,0	2000,0	2,0	0.0000

Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 : 816.2

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 17.3 h

2. Substrát středně vlhký

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát střed	0,1800	1,5000	835,0	1800,0	1,8	0.0000

Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 : 831.1

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 17.5 h

3. Substrát suchý

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát suchý	0,1800	0,7000	750,0	1600,0	1,5	0.0000

Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 : 1063.6

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 18.6 h

4. Klasická střecha

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS 100	0,0800	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000

Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 : 393.8

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 12.2 h

Z výsledků programu TEPLLO 2014 vyplívá, že nejlepší z hlediska fázového posunu teplotního kmitu je substrát suchý, způsobeno lepší λ suché zeminy. Porovnání mezi zelenou a klasickou střechou znamená rozdíl délky fázového posunu teplotního kmitu přibližně 5 hodin.

Metodika výpočtu programu se nevztahuje k návrhovým teplotám a neuvažuje s fázovou přeměnou, takže při -5°C je délka fázového posunu teplotního kmitu stejná jako při -15°C . Zatímco na grafech z kapitoly 6.2 je patrné, jak důležité jsou okrajové podmínky na délku fázového posunu, který se v rámci malého počtu vzorků a malého počtu opakování lišil v rámci až 7 hodin.

Závěr z experimentálního ověření míry nasycení zeminy

Z analýzy předchozích dat vyplívají tyto skutečnosti:

- Vliv stupně nasycení zeminy má zásadní význam z hlediska promrzání,
- Teplotní rozdíl mezi suchým a vlhkým vzorkem v prvních chladících etapách (počátek zimy) činil přibližně 1°C ,
- Teplotní rozdíl mezi suchým a vlhkým vzorkem při opakujících se chladících etapách (průběh zimy) činil 2 a více $^{\circ}\text{C}$,
- Při stejném množství vody v zemině se po určitém čase vzorky ustálí a mají přibližně stejný teplotní průběh. Důkaz významného vlivu fázové přeměny vody.

7 Závěr

Z experimentálního ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy vyplývá první významný faktor, o jakou etapu průběhu zimy se bude jednat.

Pokud se bavíme o přechodném období (počátek zimy nebo konec zimy) a tedy častém střídání kladných a záporných teplot vzduchu, bude délka fázového posunu teplotního kmitu výrazně kratší v porovnání, se střední etapou průběhu zimy, kdy nebude střídání kladných hodnot tak časté a zemina už bude vykazovat pouze záporné hodnoty a fázový posun teplotního kmitu bude časově delší.

Další důležité zjištění je spojené s koncem zimy a nástupem kladných hodnot, tedy pokud bude charakter teplotní rampy mírný a déletrvajícím přechodem ze záporných do kladných teplot vzduchu, dojde k postupnému rozmrzání zeminy a nevznikne nežádoucí efekt „jarních záplav“ způsobeným náhlým rozmrzáním zeminy z horní části a znemožněním odtoku vody do stále zmrzlé zeminy v hloubce.

Na délku fázového posunu teplotního kmitu v souvrství zelené střechy má významný vliv počáteční teplota zeminy, která určuje, zda už budou v zemině přítomny iniciační jádra a ledové čočky. Dále charakter teplotní rampy, tedy maximální a minimální teplota okolního vzduchu a během jakého časového období se tato změna odehraje. Bylo prokázáno, že tyto faktory přímo ovlivňují délku fázového posunu teplotního kmitu v souvrství zelené střechy.

Další vlivy, jako například sálání jasné noční oblohy a tloušťka sněhové pokrývky, nemohli být v podmínkách zkušebního zařízení ověřeny.

Z experimentálního ověření míry nasycení zeminy v souvrství zelené střechy vodou na fázovou přeměnu vody byl prokázán význam fázové přeměny vlhkosti obsažené v zemině.

Čím vyšší míra nasycení zeminy, tím stabilněji se chová v přechodném období. Časté střídání kladných a záporných teplotních hodnot vede k odebrání velkému množství energie na přechod mezi jednotlivými skupenstvími obsažené vody, tvorba ledových čoček na iniciačních jádrech pojme větší množství energie a tak vlhká zemina promrzne méně než suchá zemina.

Vliv fázové přeměny vody v zemině na průběh teplotního kmitu je velmi složitý fyzikální děj, kde i na takto malém počtu vzorků a měření byla pozorována a prokázána zásadní odlišnost v délkách fázového posunu teplotního kmitu v souvrství zelené střechy.

Aplikace zjištěných zákonitostí v praxi

Pro případ dodatečného zateplení základů stavby:

Jaký bude mít dopad, odkop původní zeminy, dodatečné zateplení, zpětné zasypání nezhuťnou zeminou a jako finální povrch použít okapový chodník z betonové dlažby do šterkového lože?

V tomto případě schopnost travního drnu zadržet vodu ve formě vlhkosti a omezení hloubky promrznutí až k základové spáře bude nahrazeno nadměrnou akumulací vody právě v úrovni základové spáry, kde bude lépe promrzat díky přítomnosti mnoha nově vytvořených vzduchových pórů, a dále betonová dlažba ve šterkovém loži, tak dobře nezadrží pronikání chladu z okolního vzduchu jako prokořeněný travní drn.

Pro případ zelené střechy:

Už při minimální vrstvě substrátu 12 cm, která byla použita v předchozím experimentálním ověření, dochází k významnému fázovému posunu a změně teploty na spodní straně drenážní vrstvy oproti teplotě venkovního vzduchu. V případě běžných 20 cm substrátu je tento faktor významnější a lze s výhodou využít v případě pasivních a nízkoenergetických staveb, kde zelená střecha významně přispěje k tepelné stabilitě v objektu.

Čím vlhčí zemina, tím delší fázový posun má vliv zejména na menší tepelné zisky v zimě, ale naopak zemina chrání kritické detaily (např. prostup komína, antény atd.) před promrzáním, protože velkou část energie odebere vlhká zemina.

8 Seznam použité literatury

- [1] MYSLIVEC, A., EICHLAR, J., JESENÁK, J. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL, 1970. 370 s.
- [2] KEMP, J. Earth-crust-cutaway-english. *WIKIMEDIA COMMONS*. [online]. 1. 9. 2005 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth-crust-cutaway-english.png?uselang=cs>
- [3] KLABZUBA, J. *Bilance tepla na aktivním povrchu, teplota půdy, vzduchu a vody*, ČZU, Praha, ISBN 978-80-213-0778-0. 45 s.
- [4] TOLASZ, R., BRÁZDIL, R., a spol. *Atlas podnebí Česka*. 1. vydání. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Universita Palackého, 2007. 256 s. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [5] WITZANY, J; JIRÁNEK, M. *Konstrukce pozemních staveb*. Praha: ČVUT, 2006. 324 s.
- [6] ŠIMEK, P., 2005: *Typologie střešních zahrad jako východisko pro navrhování*. Sborník přednášek Čas v životě, zahradě, krajině. Luhačovice 2005, Společnost pro zahradní a krajinářskou tvorbu, občanské sdružení, s. 81–85
- [7] Proč se zelená střecha vyplatí. *GREENVILLE*. [online]. 2016 [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.greenville.cz/vyhody-zelene-strechy.html>
- [8] Systémové řešení. *Zelené střechy Optigreen*. [online]. 2016 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.optigreen.cz/SystemSolutions/SystemSolutions.html>
- [9] ŠIMEČKOVÁ, J. Zelené střechy – naděje pro budoucnost. *Časopis stavebnictví*. [online]. [2008] [cit. 2016-09-07]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/>
- [10] Vegetační střechy a střešní zahrady. *ATELIER DEK*. [online]. 2009 [cit. 2016-09-12]. Dostupné z: https://atelier-dek.cz/docs/atelier_dek_cz/publikace/PROJEKCI-PRIRUCKY/vegetacni-strechy-2009-02.pdf
- [11] Systémové skladby střech. *DEKPARTNER*. [online]. 2016 [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <https://www.dekpartner.cz/technicka-podpora/systemove-skladby/strechy>
- [12] Střešní zahrady ISOVER. *ISOVER SAINT-GOBAIN*. [online]. [2011] [cit. 2016-09-07]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/data/files/stresni-zahrady-lowres-607.pdf>
- [13] ŠVEC, P.. Střešní substrát – základ pro zelené střechy. *ACRE*. [online]. 2016 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://www.acre.cz/cs/menu/produkty/material-pro-zelene-strechy/stresni-substrat/>

- [14] FM 5-410, *Movement of Water Through Soils – Chapter 7* [online], [cit. 2016 -09- 9], dostupné z: http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410/FM5-410_Ch7.pdf
- [15] TULKA, J. *Termika*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002, 45 s. ISBN 80- 719-4429-7.
- [16] VODÁREK, V. *Fázové přeměny*. 1.vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3376-7
- [17] ČERMÁKOVÁ, B., MUŽÍKOVÁ, R. *Ozeleněné střechy*. První vydání. Praha, 2009, 248s. ISBN 978-80-247-1802-6
- [18] Chlazení sáláním proti noční obloze. *tzbinfo*. [online]. 2016 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/7033-chlazení-salanim-proti-nocni-obloze-teoreticke-zhodnoceni-v-podminkach-cr>
- [19] Radiative cooling. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2009 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_cooling
- [20] KOZACZKA, J. *Thermodynamic analysis of energy conversion processes*. Kraków: Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, 2002. ISBN 83-913-4000-7
- [21] HALLIDAY, D., WALKER, J., RESNICK, R., *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Praha: Prometheus, 2000, 5 sv. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-719-6213-9.
- [22] TOLASZ, R., BRÁZDIL, R., a spol. *Atlas podnebí Česka*. 1. vydání. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Universita Palackého, 2007. 256 s. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [23] Resort životního prostředí. *Český hydrometeorologický ústav*. [online]. 2016 [cit. 2016-09-12]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/otopna-sezona>
- [24] Frost Heave and Frost Line. Civil engineering forum. [online]. 2016 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://civilengineersforum.com/frost-heave-action/>

Seznam použitých norem a vyhlášek:

- ČSN 73 1001. *Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy*. Praha: Český normalizační institut, 1988.
- ČSN 83 9001 *Sadovnictví a krajinářství - Terminologie - Základní odborné termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- ČSN EN 13967 *Hydroizolační pásy a fólie - Plastové a pryžové pásy a fólie do izolace proti vlhkosti a plastové a pryžové pásy a fólie do izolace proti tlakové vodě - Definice a charakteristiky*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- ČSN 73 0600 *Ochrana staveb proti vodě. Hydroizolace. Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1994.

9 Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Veličina	Jednotka
d_{ef}	účinný průměr zrna	[mm]
n	pórovitost	[%]
V_p	objem pórů v zemině	[m ³]
V	objem zeminy	[m ³]
e	číslo pórovitosti	[-]
V_z	objem pevných částic v zemině	[m ³]
w	vlhkost v zeminách	[%]
G_v	hmotnost vody v zemině	[kg/m ³]
G_s	hmotnost pevných částic v zemině	[kg/m ³]
Δh	zvýšení povrchu	[m]
h	hloubka promrznutí	[m]
h_s	sací výška	[m]
h_k	kapilární výška	[m]
G	Gibbsova volá energie	[J]
L_t	latentní teplo	[J]
l	měrné latentní teplo	[J.kg ⁻¹]
m	hmotnost	[kg]
Q	teplo	[J]
t	teplota	[°C]
c	měrné skupenské teplo	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
H	entalpie	[J]
T	absolutní teplota	[K]
S	entropie	[J.K ⁻¹]

10 Přílohy

Příloha č. 1 – protokoly z programu TEPLO 2014

KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ SKLADBY STAVEBNÍ KONSTRUKCE Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ TEPLA A VODNÍ PÁRY

podle EN ISO 13788, EN ISO 6946, ČSN 730540 a STN 730540

Teplo 2014 EDU

Název úlohy : **Zelená střecha – substrát vlhký**
Zpracovatel : Ondřej Trlica
Zakázka : Diplomová práce
Datum : 10.12.2016

ZADANÁ SKLADBA A OKRAJOVÉ PODMÍNKY :

Typ hodnocené konstrukce : Střecha jednoplášťová
Korekce součinitele prostupu dU : 0.020 W/m²K

Skladba konstrukce (od interiéru) :

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m ³]	Mi [-]	Ma [kg/m ²]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát vlhký	0,1800	2,3000	920,0	2000,0	2,0	0.0000

Poznámka: D je tloušťka vrstvy, Lambda je návrhová hodnota tepelné vodivosti vrstvy, C je měrná tepelná kapacita vrstvy, Ro je objemová hmotnost vrstvy, Mi je faktor difúzního odporu vrstvy a Ma je počáteční zabudovaná vlhkost ve vrstvě.

[^] ekvival. faktor dif. odporu s vlivem netěsností, stanoven interním výpočtem

Číslo	Kompletní název vrstvy	Interní výpočet tep. vodivosti
1	Stropnice s vložkami PLM	---
2	Litá cementová pěna	---
3	Elastodek 40 Special Mineral	---
4	Isover EPS 100S	---
5	Isover EPS Perimetr	---
6	Alkorplan 35 177	---
7	Substrát vlhký	---

Okrajové podmínky výpočtu :

Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru Rsi : 0.10 m²K/W
dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rsi : 0.25 m²K/W
Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru Rse : 0.04 m²K/W
dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rse : 0.04 m²K/W

Návrhová venkovní teplota Te : -15.0 C
Návrhová teplota vnitřního vzduchu Tai : 20.0 C
Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu RHe : 84.0 %
Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu RHi : 55.0 %

Měsíc	Délka [dny]	Tai [C]	RHi [%]	Pi [Pa]	Te [C]	RHe [%]	Pe [Pa]
1	31	20.6	43.9	1064.6	-4.5	81.3	340.4
2	28	20.6	47.0	1139.8	-2.3	80.5	405.9

3	31	20.6	50.0	1212.6	1.8	79.2	550.6
4	30	20.6	55.4	1343.5	7.0	76.8	769.0
5	31	20.6	62.8	1523.0	11.9	73.6	1024.9
6	30	20.6	68.5	1661.2	15.0	70.9	1208.4
7	31	20.6	71.3	1729.1	16.5	69.3	1300.2
8	31	20.6	70.6	1712.2	16.1	69.8	1276.6
9	30	20.6	63.5	1540.0	12.3	73.3	1048.0
10	31	20.6	55.5	1346.0	7.1	76.7	773.3
11	30	20.6	49.7	1205.3	1.5	79.3	539.6
12	31	20.6	46.6	1130.1	-2.6	80.7	396.8

Poznámka: T_{ai} , R_{Hi} a P_i jsou prům. měsíční parametry vnitřního vzduchu (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry) a T_e , R_{He} a P_e jsou prům. měsíční parametry v prostředí na vnější straně konstrukce (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry).

Průměrná měsíční venkovní teplota T_e byla v souladu s EN ISO 13788 snížena o 2 C (orientační zohlednění výměny tepla sáláním mezi střešou a oblohou).

Pro vnitřní prostředí byla uplatněna přírážka k vnitřní relativní vlhkosti : 5.0 %

Výchozí měsíc výpočtu bilance se stanovuje výpočtem podle EN ISO 13788.

Počet hodnocených let : 1

VÝSLEDKY VÝPOČTU HODNOCENÉ KONSTRUKCE :

Teplotní odpor a součinitel prostupu tepla podle EN ISO 6946:

Teplotní odpor konstrukce R : 5.285 m²K/W

Součinitel prostupu tepla konstrukce U : **0.184 W/m²K**

Součinitel prostupu zabudované kce U_{kc} : 0.20 / 0.23 / 0.28 / 0.38 W/m²K

Uvedené orientační hodnoty platí pro různou kvalitu řešení tep. mostů vyjádřenou přírážkou podle poznámek k čl. B.9.2 v ČSN 730540-4.

Difúzní odpor a tepelně akumuláční vlastnosti:

Difúzní odpor konstrukce Z_{pT} : 1.0E+0011 m/s

Teplotní útlum konstrukce N_y* podle EN ISO 13786 : 816.2

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 17.3 h

Teplota vnitřního povrchu a teplotní faktor podle ČSN 730540 a EN ISO 13788:

Vnitřní povrchová teplota v návrhových podmínkách T_{si,p} : 18.43 C

Teplotní faktor v návrhových podmínkách f, R_{si,p} : **0.955**

Číslo měsíce Minimální požadované hodnoty při max. rel. vlhkosti na vnitřním povrchu:

Vypočtené hodnoty

	----- 80% -----		----- 100% -----		T _{si} [C]	f, R _{si}	RH _{si} [%]
	T _{si} ,m[C]	f, R _{si} ,m	T _{si} ,m[C]	f, R _{si} ,m			
1	11.2	0.626	7.9	0.494	19.5	0.955	47.1
2	12.2	0.635	8.9	0.489	19.6	0.955	50.1
3	13.2	0.606	9.8	0.427	19.8	0.955	52.7
4	14.8	0.571	11.4	0.320	20.0	0.955	57.5
5	16.7	0.555	13.3	0.157	20.2	0.955	64.3
6	18.1	0.555	14.6	-----	20.3	0.955	69.6
7	18.7	0.548	15.2	-----	20.4	0.955	72.1
8	18.6	0.553	15.1	-----	20.4	0.955	71.5
9	16.9	0.555	13.4	0.137	20.2	0.955	65.0
10	14.8	0.570	11.4	0.317	20.0	0.955	57.6
11	13.1	0.607	9.7	0.431	19.7	0.955	52.4
12	12.1	0.634	8.8	0.490	19.6	0.955	49.7

Poznámka: RH_{si} je relativní vlhkost na vnitřním povrchu, T_{si} je vnitřní povrchová teplota a f, R_{si} je teplotní faktor.

Difúze vodní páry v návrh. podmínkách a bilance vodní páry podle ČSN 730540: (bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace)

Průběh teplot a částečných tlaků vodní páry v návrhových okrajových podmínkách:

rozhraní:	i	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	e
theta [C]:	19.4	18.1	14.9	14.8	-0.7	-14.3	-14.3	-14.8
p [Pa]:	1285	960	906	793	510	193	159	138
p,sat [Pa]:	2255	2078	1696	1684	575	176	175	168

Poznámka: theta je teplota na rozhraní vrstev, p je předpokládaný částečný tlak vodní páry na rozhraní vrstev a p,sat je částečný tlak nasycené vodní páry na rozhraní vrstev.

Při venkovní návrhové teplotě dochází v konstrukci ke kondenzaci vodní páry.

Kond.zóna číslo	Hranice kondenzační zóny levá [m]	pravá [m]	Kondenzující množství vodní páry [kg/(m2s)]
1	0.4519	0.4839	3.806E-0009

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry:

Množství zkondenzované vodní páry za rok $M_{c,a}$: **0.0022 kg/(m2.rok)**

Množství vypařitelné vodní páry za rok $M_{ev,a}$: **1.1481 kg/(m2.rok)**

Ke kondenzaci dochází při venkovní teplotě nižší než -10.0 C.

Bilance zkondenzované a vypařené vodní páry podle EN ISO 13788:

Roční cyklus č. 1

V konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry.

Poznámka: Hodnocení difúze vodní páry bylo provedeno pro předpoklad 1D šíření vodní páry převažující skladbou konstrukce. Pro konstrukce s výraznými systematickými tepelnými mosty je výsledek výpočtu jen orientační. Přesnější výsledky lze získat s pomocí 2D analýzy.

STOP, Teplo 2014 EDU

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PODLE KRITÉRIÍ ČSN 730540-2 (2011)

Název konstrukce: Zelená střecha

Rekapitulace vstupních dat

Návrhová vnitřní teplota T_i :	20,0 C
Převažující návrhová vnitřní teplota T_{iM} :	20,0 C
Návrhová venkovní teplota T_{ae} :	-15,0 C
Teplota na vnější straně T_e :	-15,0 C
Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai} :	20,0 C
Relativní vlhkost v interiéru RH _i :	50,0 % (+5,0%)

Skladba konstrukce

Číslo	Název vrstvy	d [m]	Lambda [W/mK]	Mi [-]
1	Stropnice s vložkami PLM	0,250	1,100	23,0
2	Litá cementová pěna	0,050	0,090	19,0
3	Elastodek 40 Special Mineral	0,004	0,210	500,0
4	Isover EPS 100S	0,100	0,037	50,0
5	Isover EPS Perimetr	0,080	0,034	70,0
6	Alkorplan 35 177	0,0015	0,160	400,0
7	Substrát vlhký	0,180	2,300	2,0

I. Požadavek na teplotní faktor (čl. 5.1 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} = 0,744$

Vypočtená průměrná hodnota: $f_{Rsi,m} = 0,955$

Kritický teplotní faktor $f_{Rsi,cr}$ byl stanoven pro maximální přípustnou vlhkost na vnitřním povrchu 80% (kritérium vyloučení vzniku plísní).

Průměrná hodnota $f_{Rsi,m}$ (resp. maximální hodnota při hodnocení skladby mimo tepelné mosty a vazby) není nikdy minimální hodnotou ve všech místech konstrukce.

Nelze s ní proto prokazovat plnění požadavku na minimální povrchové teploty zabudované konstrukce včetně tepelných mostů a vazeb. Její převýšení nad požadavkem naznačuje pouze možnosti plnění požadavku v místě tepelného mostu či tepelné vazby.

II. Požadavek na součinitel prostupu tepla (čl. 5.2 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $U_{N} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vypočtená hodnota: $U = 0,184 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U < U_{N}$... POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Vypočtený součinitel prostupu tepla musí zahrnovat vliv systematických tepelných

mostů (např. krokví v zateplené šikmé střeše).

III. Požadavky na šíření vlhkosti konstrukcí (čl. 6.1 a 6.2 v ČSN 730540-2)

- Požadavky:
1. Kondenzace vodní páry nesmí ohrozit funkci konstrukce.
 2. Roční množství kondenzátu musí být nižší než roční kapacita odparu.
 3. Roční množství kondenzátu $M_{c,a}$ musí být nižší než $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rok}$, nebo 3-6% plošné hmotnosti materiálu (nižší z hodnot).

Limit pro max. množství kondenzátu odvozený z min. plošné hmotnosti materiálu v kondenzační zóně činí: $0,144 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rok}$
(materiál: Isover EPS Perimetr).

Dále bude použit limit pro max. množství kondenzátu: $0,100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rok}$

Vypočtené hodnoty: V kci dochází při venkovní návrhové teplotě ke kondenzaci.

Roční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a} = 0,0022 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rok}$

Roční množství odpařitelné vodní páry $M_{ev,a} = 1,1481 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{rok}$

1. POŽADAVEK NEOHROZÍ FUNKCI KONSTRUKCE.

$M_{c,a} < M_{ev,a}$... 2. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

$M_{c,a} < M_{c,N}$... 3. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Teplo 2014 EDU, (c) 2014 Svoboda Software

KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ SKLADBY STAVEBNÍ KONSTRUKCE Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ TEPLA A VODNÍ PÁRY

podle EN ISO 13788, EN ISO 6946, ČSN 730540 a STN 730540

Teplo 2014 EDU

Název úlohy : **Zelená střecha – substrát středně vlhký**

Zpracovatel : Ondřej Trlica

Zakázka : Diplomová práce

Datum : 10.12.2016

ZADANÁ SKLADBA A OKRAJOVÉ PODMÍNKY :

Typ hodnocené konstrukce : Střecha jednoplášťová

Korekce součinitele prostupu dU : $0.020 \text{ W/m}^2\text{K}$

Skladba konstrukce (od interiéru) :

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát střed	0,1800	1,5000	835,0	1800,0	1,8	0.0000

Poznámka: D je tloušťka vrstvy, Lambda je návrhová hodnota tepelné vodivosti vrstvy, C je měrná tepelná kapacita vrstvy, Ro je objemová hmotnost vrstvy, Mi je faktor difúzního odporu vrstvy a Ma je počáteční zabudovaná vlhkost ve vrstvě.

[^] ekvival. faktor dif. odporu s vlivem netěsností, stanoven interním výpočtem

Číslo	Kompletní název vrstvy	Interní výpočet tep. vodivosti
1	Stropnice s vložkami PLM	---
2	Litá cementová pěna	---
3	Elastodek 40 Special Mineral	---
4	Isover EPS 100S	---
5	Isover EPS Perimetr	---
6	Alkorplan 35 177	---

Okrajové podmínky výpočtu :

Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru R_{si} : 0.10 m²K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty R_{si} : 0.25 m²K/W
 Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru R_{se} : 0.04 m²K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty R_{se} : 0.04 m²K/W

Návrhová venkovní teplota T_e : -15.0 C
 Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai} : 20.0 C
 Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu RH_e : 84.0 %
 Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu RH_i : 55.0 %

Měsíc	Délka [dny]	T_{ai} [C]	RH_i [%]	P_i [Pa]	T_e [C]	RH_e [%]	P_e [Pa]
1	31	20.6	43.9	1064.6	-4.5	81.3	340.4
2	28	20.6	47.0	1139.8	-2.3	80.5	405.9
3	31	20.6	50.0	1212.6	1.8	79.2	550.6
4	30	20.6	55.4	1343.5	7.0	76.8	769.0
5	31	20.6	62.8	1523.0	11.9	73.6	1024.9
6	30	20.6	68.5	1661.2	15.0	70.9	1208.4
7	31	20.6	71.3	1729.1	16.5	69.3	1300.2
8	31	20.6	70.6	1712.2	16.1	69.8	1276.6
9	30	20.6	63.5	1540.0	12.3	73.3	1048.0
10	31	20.6	55.5	1346.0	7.1	76.7	773.3
11	30	20.6	49.7	1205.3	1.5	79.3	539.6
12	31	20.6	46.6	1130.1	-2.6	80.7	396.8

Poznámka: T_{ai} , RH_i a P_i jsou prům. měsíční parametry vnitřního vzduchu (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry) a T_e , RH_e a P_e jsou prům. měsíční parametry v prostředí na vnější straně konstrukce (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry).

Průměrná měsíční venkovní teplota T_e byla v souladu s EN ISO 13788 snížena o 2 C (orientační zohlednění výměny tepla sáláním mezi střešou a oblohou).

Pro vnitřní prostředí byla uplatněna přírážka k vnitřní relativní vlhkosti : 5.0 %

Výchozí měsíc výpočtu bilance se stanovuje výpočtem podle EN ISO 13788.

Počet hodnocených let : 1

VÝSLEDKY VÝPOČTU HODNOCENÉ KONSTRUKCE :**Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla podle EN ISO 6946:**

Tepelný odpor konstrukce R : 5.318 m²K/W
 Součinitel prostupu tepla konstrukce U : **0.183 W/m²K**

Součinitel prostupu zabudované kce U_{kc} : 0.20 / 0.23 / 0.28 / 0.38 W/m²K
 Uvedené orientační hodnoty platí pro různou kvalitu řešení tep. mostů vyjádřenou přibližnou přírážkou podle poznámek k čl. B.9.2 v ČSN 730540-4.

Difúzní odpor a tepelně akumulční vlastnosti:

Difúzní odpor konstrukce Z_{pT} : 1.0E+0011 m/s
 Teplotní útlum konstrukce N_{y^*} podle EN ISO 13786 : 831.1
Fázový posun teplotního kmitu Ψ_{si^*} podle EN ISO 13786 : 17.5 h

Teplota vnitřního povrchu a teplotní faktor podle ČSN 730540 a EN ISO 13788:

Vnitřní povrchová teplota v návrhových podmínkách $T_{si,p}$: 18.44 C
 Teplotní faktor v návrhových podmínkách $f_{Rsi,p}$: **0.955**

Číslo měsíce	Minimální požadované hodnoty při max. rel. vlhkosti na vnitřním povrchu:				Vypočtené hodnoty		
	----- 80% -----		----- 100% -----		T_{si} [C]	f_{Rsi}	RH_{si} [%]
	$T_{si,m}$ [C]	$f_{Rsi,m}$	$T_{si,m}$ [C]	$f_{Rsi,m}$			
1	11.2	0.626	7.9	0.494	19.5	0.955	47.0

2	12.2	0.635	8.9	0.489	19.6	0.955	50.1
3	13.2	0.606	9.8	0.427	19.8	0.955	52.7
4	14.8	0.571	11.4	0.320	20.0	0.955	57.5
5	16.7	0.555	13.3	0.157	20.2	0.955	64.3
6	18.1	0.555	14.6	-----	20.4	0.955	69.6
7	18.7	0.548	15.2	-----	20.4	0.955	72.1
8	18.6	0.553	15.1	-----	20.4	0.955	71.5
9	16.9	0.555	13.4	0.137	20.2	0.955	65.0
10	14.8	0.570	11.4	0.317	20.0	0.955	57.6
11	13.1	0.607	9.7	0.431	19.7	0.955	52.4
12	12.1	0.634	8.8	0.490	19.6	0.955	49.7

Poznámka: RHsi je relativní vlhkost na vnitřním povrchu, Tsi je vnitřní povrchová teplota a f,Rsi je teplotní faktor.

Difúze vodní páry v návrh. podmínkách a bilance vodní páry podle ČSN 730540: (bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace)

Průběh teplot a částečných tlaků vodní páry v návrhových okrajových podmínkách:

rozhraní:	i	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	e
theta [C]:	19.4	18.1	15.0	14.8	-0.6	-14.0	-14.1	-14.8
p [Pa]:	1285	959	905	792	508	190	156	138
p,sat [Pa]:	2256	2080	1700	1688	581	180	179	168

Poznámka: theta je teplota na rozhraní vrstev, p je předpokládaný částečný tlak vodní páry na rozhraní vrstev a p,sat je částečný tlak nasycené vodní páry na rozhraní vrstev.

Při venkovní návrhové teplotě dochází v konstrukci ke kondenzaci vodní páry.

Kond.zóna číslo	Hranice levá [m]	kondenzační zóny pravá [m]	Kondenzující množství vodní páry [kg/(m2s)]
1	0.4599	0.4759	2.796E-0009

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry:

Množství zkondenzované vodní páry za rok $M_{c,a}$: **0.0016 kg/(m2.rok)**

Množství vypařitelné vodní páry za rok $M_{ev,a}$: **1.0877 kg/(m2.rok)**

Ke kondenzaci dochází při venkovní teplotě nižší než -10.0 C.

Bilance zkondenzované a vypařené vodní páry podle EN ISO 13788:

Roční cyklus č. 1

V konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry.

Poznámka: Hodnocení difúze vodní páry bylo provedeno pro předpoklad 1D šíření vodní páry převažující skladbou konstrukce. Pro konstrukce s výraznými systematickými tepelnými mosty je výsledek výpočtu jen orientační. Přesnější výsledky lze získat s pomocí 2D analýzy.

STOP, Teplo 2014 EDU

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PODLE KRITÉRIÍ ČSN 730540-2 (2011)

Název konstrukce: Zelená střecha

Rekapitulace vstupních dat

Návrhová vnitřní teplota T_i :	20,0 C
Převažující návrhová vnitřní teplota T_{iM} :	20,0 C
Návrhová venkovní teplota T_{ae} :	-15,0 C
Teplota na vnější straně T_e :	-15,0 C
Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai} :	20,0 C
Relativní vlhkost v interiéru RH_i :	50,0 % (+5,0%)

Skladba konstrukce

Číslo	Název vrstvy	d [m]	Lambda [W/mK]	Mi [-]
1	Stropnice s vložkami PLM	0,250	1,100	23,0
2	Litá cementová pěna	0,050	0,090	19,0
3	Elastodek 40 Special Mineral	0,004	0,210	500,0
4	Isover EPS 100S	0,100	0,037	50,0
5	Isover EPS Perimetr	0,080	0,034	70,0
6	Alkorplan 35 177	0,0015	0,160	400,0

7 Substrát středně vlhký 0,180 1,500 1,75

I. Požadavek na teplotní faktor (čl. 5.1 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} = 0,744$

Vypočtená průměrná hodnota: $f_{Rsi,m} = 0,955$

Kritický teplotní faktor $f_{Rsi,cr}$ byl stanoven pro maximální přípustnou vlhkost na vnitřním povrchu 80% (kritérium vyloučení vzniku plísní).

Průměrná hodnota $f_{Rsi,m}$ (resp. maximální hodnota při hodnocení skladby mimo tepelné mosty a vazby) není nikdy minimální hodnotou ve všech místech konstrukce. Nelze s ní proto prokazovat plnění požadavku na minimální povrchové teploty zabudované konstrukce včetně tepelných mostů a vazeb. Její převýšení nad požadavkem naznačuje pouze možnost plnění požadavku v místě tepelného mostu či tepelné vazby.

II. Požadavek na součinitel prostupu tepla (čl. 5.2 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $U_{N} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vypočtená hodnota: $U = 0,183 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U < U_{N}$... POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Vypočtený součinitel prostupu tepla musí zahrnovat vliv systematických tepelných mostů (např. krokví v zateplené šikmé střeše).

III. Požadavky na šíření vlhkosti konstrukcí (čl. 6.1 a 6.2 v ČSN 730540-2)

- Požadavky:
1. Kondenzace vodní páry nesmí ohrozit funkci konstrukce.
 2. Roční množství kondenzátu musí být nižší než roční kapacita odparu.
 3. Roční množství kondenzátu $M_{c,a}$ musí být nižší než $0,1 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$, nebo 3-6% plošné hmotnosti materiálu (nižší z hodnot).

Limit pro max. množství kondenzátu odvozený z min. plošné hmotnosti materiálu v kondenzační zóně činí: $0,144 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$
(materiál: Isover EPS Perimetr).

Dále bude použit limit pro max. množství kondenzátu: $0,100 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$

- Vypočtené hodnoty:
- V kci dochází při venkovní návrhové teplotě ke kondenzaci.
 - Roční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a} = 0,0016 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$
 - Roční množství odpařitelné vodní páry $M_{ev,a} = 1,0877 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$

1. POŽADAVEK NEOHROZÍ FUNKCI KONSTRUKCE.

$M_{c,a} < M_{ev,a}$... 2. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

$M_{c,a} < M_{c,N}$... 3. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Teplo 2014 EDU, (c) 2014 Svoboda Software

KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ SKLADBY STAVEBNÍ KONSTRUKCE Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ TEPLA A VODNÍ PÁRY

podle EN ISO 13788, EN ISO 6946, ČSN 730540 a STN 730540

Teplo 2014 EDU

Název úlohy : **Zelená střecha – substrát suchý**

Zpracovatel : Ondřej Trlica

Zakázka : Diplomová práce

Datum : 10.12.2016

ZADANÁ SKLADBA A OKRAJOVÉ PODMÍNKY :

Typ hodnocené konstrukce : Střecha jednoplášťová

Korekce součinitele prostupu dU : $0.020 \text{ W/m}^2\text{K}$

Skladba konstrukce (od interiéru) :

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m3]	Mi [-]	Ma [kg/m2]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000

4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS Per	0,0800	0,0340	1270,0	30,0	70,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000
7	Substrát suchý	0,1800	0,7000	750,0	1600,0	1,5	0.0000

Poznámka: D je tloušťka vrstvy, Lambda je návrhová hodnota tepelné vodivosti vrstvy, C je měrná tepelná kapacita vrstvy, Ro je objemová hmotnost vrstvy, Mi je faktor difúzního odporu vrstvy a Ma je počáteční zabudovaná vlhkost ve vrstvě.

[^] ekvival. faktor dif. odporu s vlivem netěsností, stanoven interním výpočtem

Číslo	Kompletní název vrstvy	Interní výpočet tep. vodivosti
1	Stropnice s vložkami PLM	---
2	Litá cementová pěna	---
3	Elastodek 40 Special Mineral	---
4	Isover EPS 100S	---
5	Isover EPS Perimetr	---
6	Alkorplan 35 177	---
7	Substrát suchý	---

Okrajové podmínky výpočtu :

Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru Rsi : 0.10 m2K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rsi : 0.25 m2K/W
 Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru Rse : 0.04 m2K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rse : 0.04 m2K/W

Návrhová venkovní teplota Te : -15.0 C
 Návrhová teplota vnitřního vzduchu Tai : 20.0 C
 Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu RHe : 84.0 %
 Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu RHi : 55.0 %

Měsíc	Délka [dny]	Tai [C]	RHi [%]	Pi [Pa]	Te [C]	RHe [%]	Pe [Pa]
1	31	20.6	43.9	1064.6	-4.5	81.3	340.4
2	28	20.6	47.0	1139.8	-2.3	80.5	405.9
3	31	20.6	50.0	1212.6	1.8	79.2	550.6
4	30	20.6	55.4	1343.5	7.0	76.8	769.0
5	31	20.6	62.8	1523.0	11.9	73.6	1024.9
6	30	20.6	68.5	1661.2	15.0	70.9	1208.4
7	31	20.6	71.3	1729.1	16.5	69.3	1300.2
8	31	20.6	70.6	1712.2	16.1	69.8	1276.6
9	30	20.6	63.5	1540.0	12.3	73.3	1048.0
10	31	20.6	55.5	1346.0	7.1	76.7	773.3
11	30	20.6	49.7	1205.3	1.5	79.3	539.6
12	31	20.6	46.6	1130.1	-2.6	80.7	396.8

Poznámka: Tai, RHi a Pi jsou prům. měsíční parametry vnitřního vzduchu (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry) a Te, RHe a Pe jsou prům. měsíční parametry v prostředí na vnější straně konstrukce (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry).

Průměrná měsíční venkovní teplota Te byla v souladu s EN ISO 13788 snížena o 2 C (orientační zohlednění výměny tepla sáláním mezi střechem a oblohou).

Pro vnitřní prostředí byla uplatněna přírážka k vnitřní relativní vlhkosti : 5.0 %

Výchozí měsíc výpočtu bilance se stanovuje výpočtem podle EN ISO 13788.

Počet hodnocených let : 1

VÝSLEDKY VÝPOČTU HODNOCENÉ KONSTRUKCE :

Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla podle EN ISO 6946:

Tepelný odpor konstrukce R : 5.427 m2K/W
 Součinitel prostupu tepla konstrukce U : 0.180 W/m2K

Součinitel prostupu zabudované kce U_k : 0.20 / 0.23 / 0.28 / 0.38 W/m2K

Uvedené orientační hodnoty platí pro různou kvalitu řešení tep. mostů vyjádřenou přírážkou podle poznámek k čl. B.9.2 v ČSN 730540-4.

Difúzní odpor a tepelně akumulční vlastnosti:

Difúzní odpor konstrukce ZpT :	1.0E+0011 m/s
Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 :	1063.6
Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 :	18.6 h

Teplota vnitřního povrchu a teplotní faktor podle ČSN 730540 a EN ISO 13788:

Vnitřní povrchová teplota v návrhových podmínkách Tsi,p :	18.47 C
Teplotní faktor v návrhových podmínkách f,Rsi,p :	0.956

Číslo měsíce	Minimální požadované hodnoty při max. rel. vlhkosti na vnitřním povrchu:				Vypočtené hodnoty		
	----- 80% -----		----- 100% -----		Tsi[C]	f,Rsi	RHsi[%]
	Tsi,m[C]	f,Rsi,m	Tsi,m[C]	f,Rsi,m			
1	11.2	0.626	7.9	0.494	19.5	0.956	47.0
2	12.2	0.635	8.9	0.489	19.6	0.956	50.0
3	13.2	0.606	9.8	0.427	19.8	0.956	52.6
4	14.8	0.571	11.4	0.320	20.0	0.956	57.5
5	16.7	0.555	13.3	0.157	20.2	0.956	64.3
6	18.1	0.555	14.6	-----	20.4	0.956	69.5
7	18.7	0.548	15.2	-----	20.4	0.956	72.1
8	18.6	0.553	15.1	-----	20.4	0.956	71.5
9	16.9	0.555	13.4	0.137	20.2	0.956	64.9
10	14.8	0.570	11.4	0.317	20.0	0.956	57.6
11	13.1	0.607	9.7	0.431	19.8	0.956	52.3
12	12.1	0.634	8.8	0.490	19.6	0.956	49.6

Poznámka: RHsi je relativní vlhkost na vnitřním povrchu, Tsi je vnitřní povrchová teplota a f,Rsi je teplotní faktor.

Difúze vodní páry v návrh. podmínkách a bilance vodní páry podle ČSN 730540: (bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace)

Průběh teplot a částečných tlaků vodní páry v návrhových okrajových podmínkách:

rozhraní:	i	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	e
theta [C]:	19.4	18.2	15.1	15.0	-0.1	-13.3	-13.3	-14.8
p [Pa]:	1285	958	904	791	506	188	154	138
p,sat [Pa]:	2257	2085	1712	1700	603	193	192	168

Poznámka: theta je teplota na rozhraní vrstev, p je předpokládaný částečný tlak vodní páry na rozhraní vrstev a p,sat je částečný tlak nasycené vodní páry na rozhraní vrstev.

Při venkovní návrhové teplotě dochází v konstrukci ke kondenzaci vodní páry.

Kond.zóna číslo	Hranice kondenzační zóny [m]		Kondenzující množství vodní páry [kg/(m2s)]
	levá	pravá	
1	0.4599	0.4679	8.006E-0010

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry:

Množství zkondenzované vodní páry za rok Mc,a: **0.0005 kg/(m2.rok)**

Množství vypařitelné vodní páry za rok Mev,a: **1.0680 kg/(m2.rok)**

Ke kondenzaci dochází při venkovní teplotě nižší než -10.0 C.

Bilance zkondenzované a vypařené vodní páry podle EN ISO 13788:

Roční cyklus č. 1

V konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry.

Poznámka: Hodnocení difúze vodní páry bylo provedeno pro předpoklad 1D šíření vodní páry převažující skladbou konstrukce. Pro konstrukce s výraznými systematickými tepelnými mosty je výsledek výpočtu jen orientační. Přesnější výsledky lze získat s pomocí 2D analýzy.

STOP, Teplo 2014 EDU

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PODLE KRITÉRIÍ ČSN 730540-2 (2011)

Název konstrukce: Zelená střecha

Rekapitulace vstupních dat

Návrhová vnitřní teplota T_i : 20,0 C
Převažující návrhová vnitřní teplota T_{iM} : 20,0 C
Návrhová venkovní teplota T_{ae} : -15,0 C
Teplota na vnější straně T_e : -15,0 C
Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai} : 20,0 C
Relativní vlhkost v interiéru RH_i : 50,0 % (+5,0%)

Skladba konstrukce

Číslo	Název vrstvy	d [m]	Lambda [W/mK]	Mi [-]
1	Stropnice s vložkami PLM	0,250	1,100	23,0
2	Litá cementová pěna	0,050	0,090	19,0
3	Elastodek 40 Special Mineral	0,004	0,210	500,0
4	Isover EPS 100S	0,100	0,037	50,0
5	Isover EPS Perimetr	0,080	0,034	70,0
6	Alkorplan 35 177	0,0015	0,160	400,0
7	Substrát suchý	0,180	0,700	1,5

I. Požadavek na teplotní faktor (čl. 5.1 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} = 0,744$
Vypočtená průměrná hodnota: $f_{Rsi,m} = 0,956$

Kritický teplotní faktor $f_{Rsi,cr}$ byl stanoven pro maximální přípustnou vlhkost na vnitřním povrchu 80% (kritérium vyloučení vzniku plísní).

Průměrná hodnota $f_{Rsi,m}$ (resp. maximální hodnota při hodnocení skladby mimo tepelné mosty a vazby) není nikdy minimální hodnotou ve všech místech konstrukce.

Nelze s ní proto prokazovat plnění požadavku na minimální povrchové teploty zabudované konstrukce včetně tepelných mostů a vazeb. Její převýšení nad požadavkem naznačuje pouze možnosti plnění požadavku v místě tepelného mostu či tepelné vazby.

II. Požadavek na součinitel prostupu tepla (čl. 5.2 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $U_{,N} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$
Vypočtená hodnota: $U = 0,180 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U < U_{,N}$... POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Vypočtený součinitel prostupu tepla musí zahrnovat vliv systematických tepelných mostů (např. krokví v zateplené šikmé střeše).

III. Požadavky na šíření vlhkosti konstrukcí (čl. 6.1 a 6.2 v ČSN 730540-2)

Požadavky:

1. Kondenzace vodní páry nesmí ohrozit funkci konstrukce.
2. Roční množství kondenzátu musí být nižší než roční kapacita odparu.
3. Roční množství kondenzátu $M_{c,a}$ musí být nižší než 0,1 kg/m².rok, nebo 3-6% plošné hmotnosti materiálu (nižší z hodnot).

Limit pro max. množství kondenzátu odvozený z min. plošné hmotnosti materiálu v kondenzační zóně činí: 0,144 kg/m².rok
(materiál: Isover EPS Perimetr).

Dále bude použit limit pro max. množství kondenzátu: 0,100 kg/m².rok

Vypočtené hodnoty: V kci dochází při venkovní návrhové teplotě ke kondenzaci.
Roční množství z kondenzované vodní páry $M_{c,a} = 0,0005 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$
Roční množství odpařitelné vodní páry $M_{ev,a} = 1,0680 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$

1. POŽADAVEK NEOHROZÍ FUNKCI KONSTRUKCE.

$M_{c,a} < M_{ev,a}$... 2. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

$M_{c,a} < M_{c,N}$... 3. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Teplu 2014 EDU, (c) 2014 Svoboda Software

KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ SKLADBY STAVEBNÍ KONSTRUKCE Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ TEPLA A VODNÍ PÁRY

podle EN ISO 13788, EN ISO 6946, ČSN 730540 a STN 730540

Teplu 2014 EDU

Název úlohy : **Klasická střecha**
Zpracovatel : Ondřej Trlica

Zakázka : Diplomová práce
Datum : 10.12.2016

ZADANÁ SKLADBA A OKRAJOVÉ PODMÍNKY :

Typ hodnocené konstrukce : Střecha jednoplášťová
Korekce součinitele prostupu dU : 0.020 W/m²K

Skladba konstrukce (od interiéru) :

Číslo	Název	D [m]	Lambda [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	Ro [kg/m ³]	Mi [-]	Ma [kg/m ²]
1	Stropnice s vl	0,2500	1,1000	840,0	1200,0	23,0	0.0000
2	Litá cementová	0,0500	0,0900	840,0	1200,0	19,0	0.0000
3	Elastodek 40 S	0,0040	0,2100	1470,0	1200,0	500,0 [^]	0.0000
4	Isover EPS 100	0,1000	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
5	Isover EPS 100	0,0800	0,0370	1270,0	21,0	50,0	0.0000
6	Alkorplan 35 1	0,0015	0,1600	960,0	1300,0	400,0 [^]	0.0000

Poznámka: D je tloušťka vrstvy, Lambda je návrhová hodnota tepelné vodivosti vrstvy, C je měrná tepelná kapacita vrstvy, Ro je objemová hmotnost vrstvy, Mi je faktor difúzního odporu vrstvy a Ma je počáteční zabudovaná vlhkost ve vrstvě.

[^] ekvival. faktor dif. odporu s vlivem netěsností, stanoven interním výpočtem

Číslo	Kompletní název vrstvy	Interní výpočet tep. vodivosti
1	Stropnice s vložkami PLM	---
2	Litá cementová pěna	---
3	Elastodek 40 Special Mineral	---
4	Isover EPS 100S	---
5	Isover EPS 100S	---
6	Alkorplan 35 177	---

Okrajové podmínky výpočtu :

Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru Rsi : 0.10 m²K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rsi : 0.25 m²K/W
 Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru Rse : 0.04 m²K/W
 dtto pro výpočet vnitřní povrchové teploty Rse : 0.04 m²K/W

Návrhová venkovní teplota Te : -15.0 C
 Návrhová teplota vnitřního vzduchu Tai : 20.0 C
 Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu RHe : 84.0 %
 Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu RHi : 55.0 %

Měsíc	Délka [dny]	Tai [C]	RHi [%]	Pi [Pa]	Te [C]	RHe [%]	Pe [Pa]
1	31	20.6	43.9	1064.6	-4.5	81.3	340.4
2	28	20.6	47.0	1139.8	-2.3	80.5	405.9
3	31	20.6	50.0	1212.6	1.8	79.2	550.6
4	30	20.6	55.4	1343.5	7.0	76.8	769.0
5	31	20.6	62.8	1523.0	11.9	73.6	1024.9
6	30	20.6	68.5	1661.2	15.0	70.9	1208.4
7	31	20.6	71.3	1729.1	16.5	69.3	1300.2
8	31	20.6	70.6	1712.2	16.1	69.8	1276.6
9	30	20.6	63.5	1540.0	12.3	73.3	1048.0
10	31	20.6	55.5	1346.0	7.1	76.7	773.3
11	30	20.6	49.7	1205.3	1.5	79.3	539.6
12	31	20.6	46.6	1130.1	-2.6	80.7	396.8

Poznámka: Tai, RHi a Pi jsou prům. měsíční parametry vnitřního vzduchu (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry) a Te, RHe a Pe jsou prům. měsíční parametry v prostředí na vnější straně konstrukce (teplota, relativní vlhkost a částečný tlak vodní páry).

Průměrná měsíční venkovní teplota Te byla v souladu s EN ISO 13788 snížena o 2 C (orientační zohlednění výměny tepla sáláním mezi střechou a oblohou).

Pro vnitřní prostředí byla uplatněna přírážka k vnitřní relativní vlhkosti : 5.0 %

Výchozí měsíc výpočtu bilance se stanovuje výpočtem podle EN ISO 13788.

Počet hodnocených let : 1

VÝSLEDKY VÝPOČTU HODNOCENÉ KONSTRUKCE :

Teplný odpor a součinitel prostupu tepla podle EN ISO 6946:

Teplný odpor konstrukce R : 5.070 m²K/W
Součinitel prostupu tepla konstrukce U : 0.192 W/m²K

Součinitel prostupu zabudované kce U_{kc} : 0.21 / 0.24 / 0.29 / 0.39 W/m²K
Uvedené orientační hodnoty platí pro různou kvalitu řešení tep. mostů vyjádřenou přibližnou přírážkou podle poznámek k čl. B.9.2 v ČSN 730540-4.

Difúzní odpor a tepelně akumulční vlastnosti:

Difúzní odpor konstrukce Z_{pT} : 9.7E+0010 m/s

Teplotní útlum konstrukce Ny* podle EN ISO 13786 : 393.8

Fázový posun teplotního kmitu Psi* podle EN ISO 13786 : 12.2 h

Teplota vnitřního povrchu a teplotní faktor podle ČSN 730540 a EN ISO 13788:

Vnitřní povrchová teplota v návrhových podmínkách T_{si,p} : 18.37 C
Teplotní faktor v návrhových podmínkách f_{Rsi,p} : 0.953

Číslo měsíce	Minimální požadované hodnoty při max. rel. vlhkosti na vnitřním povrchu:				Vypočtené hodnoty		
	----- 80% -----		----- 100% -----		T _{si} [C]	f _{Rsi}	RH _{si} [%]
	T _{si} ,m[C]	f _{Rsi} ,m	T _{si} ,m[C]	f _{Rsi} ,m	T _{si} [C]	f _{Rsi}	RH _{si} [%]
1	11.2	0.626	7.9	0.494	19.4	0.953	47.2
2	12.2	0.635	8.9	0.489	19.5	0.953	50.2
3	13.2	0.606	9.8	0.427	19.7	0.953	52.8
4	14.8	0.571	11.4	0.320	20.0	0.953	57.6
5	16.7	0.555	13.3	0.157	20.2	0.953	64.4
6	18.1	0.555	14.6	-----	20.3	0.953	69.6
7	18.7	0.548	15.2	-----	20.4	0.953	72.1
8	18.6	0.553	15.1	-----	20.4	0.953	71.5
9	16.9	0.555	13.4	0.137	20.2	0.953	65.0
10	14.8	0.570	11.4	0.317	20.0	0.953	57.7
11	13.1	0.607	9.7	0.431	19.7	0.953	52.5
12	12.1	0.634	8.8	0.490	19.5	0.953	49.8

Poznámka: RH_{si} je relativní vlhkost na vnitřním povrchu, T_{si} je vnitřní povrchová teplota a f_{Rsi} je teplotní faktor.

Difúze vodní páry v návrh. podmínkách a bilance vodní páry podle ČSN 730540: (bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace)

Průběh teplot a částečných tlaků vodní páry v návrhových okrajových podmínkách:

rozhraní:	i	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	e
theta [C]:	19.4	18.0	14.7	14.6	-1.7	-14.7	-14.8
p [Pa]:	1285	925	865	740	427	176	138
p,sat [Pa]:	2251	2067	1670	1658	531	169	168

Poznámka: theta je teplota na rozhraní vrstev, p je předpokládaný částečný tlak vodní páry na rozhraní vrstev a p,sat je částečný tlak nasycené vodní páry na rozhraní vrstev.

Při venkovní návrhové teplotě dochází v konstrukci ke kondenzaci vodní páry.

Kond.zóna číslo	Hranice kondenzační zóny levá [m]	pravá [m]	Kondenzující množství vodní páry [kg/(m ² s)]
1	0.4681	0.4840	2.353E-0009

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry:

Množství zkondenzované vodní páry za rok M_{c,a}: 0.0013 kg/(m².rok)

Množství vypařitelné vodní páry za rok M_{ev,a}: 2.0506 kg/(m².rok)

Ke kondenzaci dochází při venkovní teplotě nižší než -10.0 C.

Bilance zkondenzované a vypařené vodní páry podle EN ISO 13788:

Roční cyklus č. 1

V konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry.

Poznámka: Hodnocení difúze vodní páry bylo provedeno pro předpoklad 1D šíření vodní páry převažující skladbou konstrukce. Pro konstrukce s výraznými systematickými tepelnými mosty je výsledek výpočtu jen orientační. Přesnější výsledky lze získat s pomocí 2D analýzy.

STOP, Teplo 2014 EDU

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PODLE KRITÉRIÍ ČSN 730540-2 (2011)

Název konstrukce: Klasická střecha

Rekapitulace vstupních dat

Návrhová vnitřní teplota T_i : 20,0 C
Převažující návrhová vnitřní teplota T_{iM} : 20,0 C
Návrhová venkovní teplota T_{ae} : -15,0 C
Teplota na vnější straně T_e : -15,0 C
Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai} : 20,0 C
Relativní vlhkost v interiéru RH_i : 50,0 % (+5,0%)

Skladba konstrukce

Číslo	Název vrstvy	d [m]	Lambda [W/mK]	Mi [-]
1	Stropnice s vložkami PLM	0,250	1,100	23,0
2	Litá cementová pěna	0,050	0,090	19,0
3	Elastodek 40 Special Mineral	0,004	0,210	500,0
4	Isover EPS 100S	0,100	0,037	50,0
5	Isover EPS 100S	0,080	0,037	50,0
6	Alkorplan 35 177	0,0015	0,160	400,0

I. Požadavek na teplotní faktor (čl. 5.1 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} = 0,744$

Vypočtená průměrná hodnota: $f_{Rsi,m} = 0,953$

Kritický teplotní faktor $f_{Rsi,cr}$ byl stanoven pro maximální přípustnou vlhkost na vnitřním povrchu 80% (kritérium vyloučení vzniku plísní).

Průměrná hodnota $f_{Rsi,m}$ (resp. maximální hodnota při hodnocení skladby mimo tepelné mosty a vazby) není nikdy minimální hodnotou ve všech místech konstrukce.

Nelze s ní proto prokazovat plnění požadavku na minimální povrchové teploty zabudované konstrukce včetně tepelných mostů a vazeb. Její převýšení nad požadavkem naznačuje pouze možnosti plnění požadavku v místě tepelného mostu či tepelné vazby.

II. Požadavek na součinitel prostupu tepla (čl. 5.2 v ČSN 730540-2)

Požadavek: $U_{,N} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vypočtená hodnota: $U = 0,192 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U < U_{,N}$... POŽADAVEK JE SPLNĚN.

Vypočtený součinitel prostupu tepla musí zahrnovat vliv systematických tepelných mostů (např. krokví v zateplené šikmé střeše).

III. Požadavky na šíření vlhkosti konstrukcí (čl. 6.1 a 6.2 v ČSN 730540-2)

Požadavky:

1. Kondenzace vodní páry nesmí ohrozit funkci konstrukce.
2. Roční množství kondenzátu musí být nižší než roční kapacita odparu.
3. Roční množství kondenzátu $M_{c,a}$ musí být nižší než 0,1 kg/m².rok, nebo 3-6% plošné hmotnosti materiálu (nižší z hodnot).

Limit pro max. množství kondenzátu odvozený z min. plošné hmotnosti materiálu v kondenzační zóně činí: 0,101 kg/m².rok (materiál: Isover EPS 100S).

Dále bude použit limit pro max. množství kondenzátu: 0,100 kg/m².rok

Vypočtené hodnoty: V kci dochází při venkovní návrhové teplotě ke kondenzaci.

Roční množství z kondenzované vodní páry $M_{c,a} = 0,0013 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$

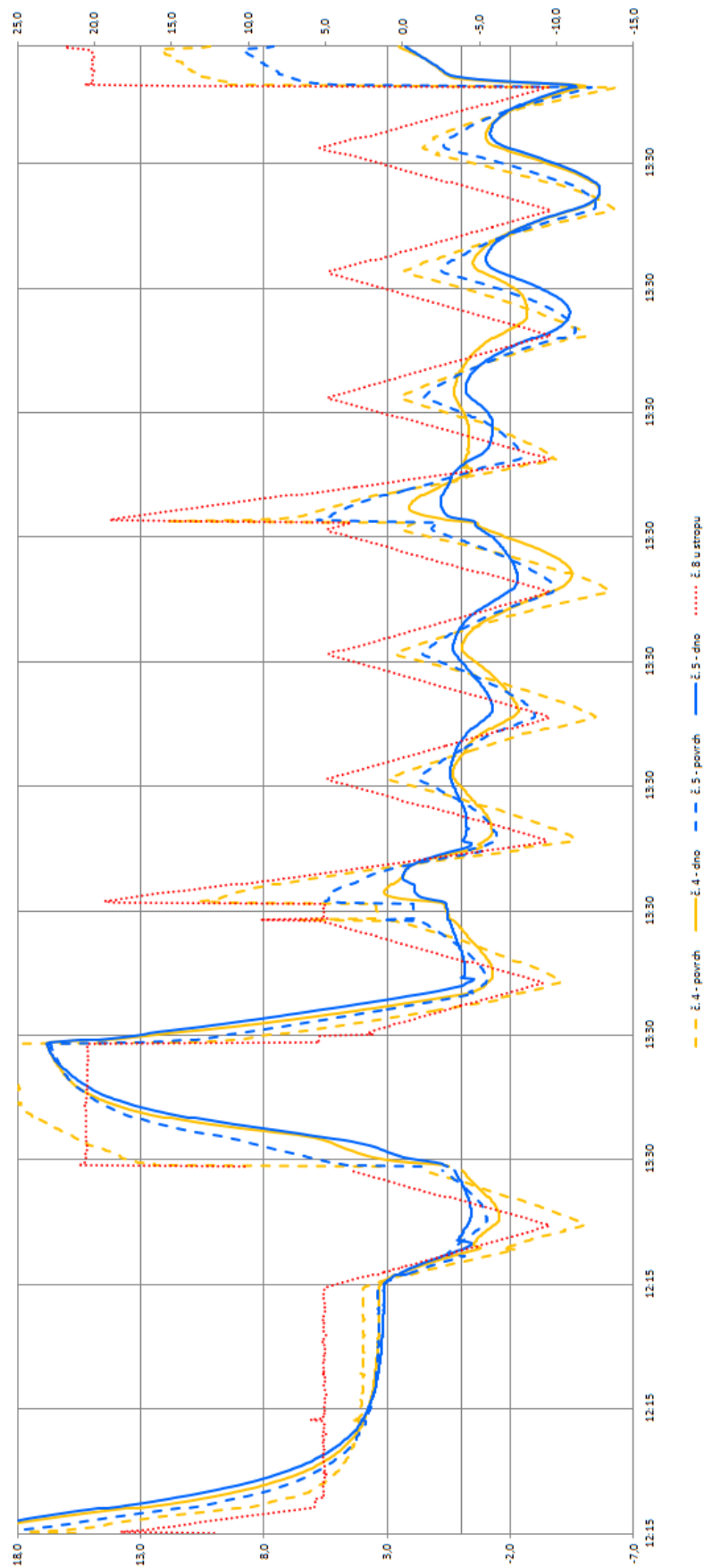
Roční množství odpařitelné vodní páry $M_{ev,a} = 2,0506 \text{ kg/m}^2\text{,rok}$

1. POŽADAVEK NEOHROZÍ FUNKCI KONSTRUKCE.

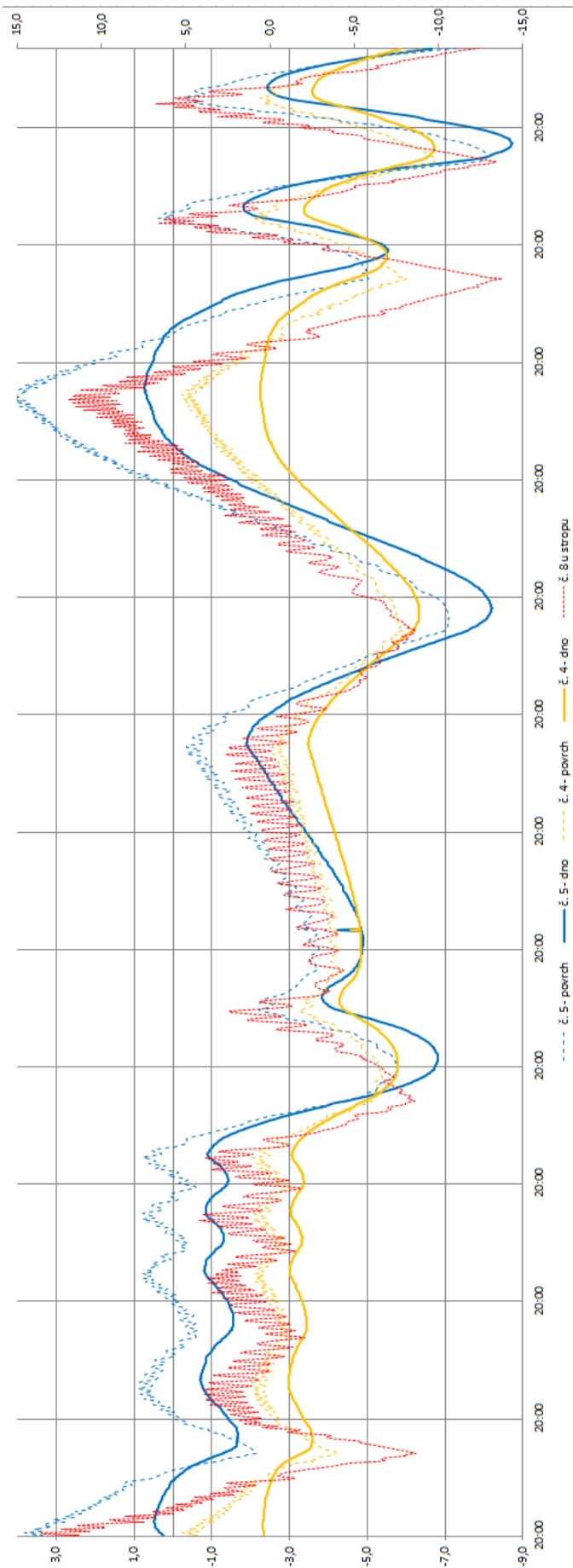
$M_{c,a} < M_{ev,a}$... 2. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

$M_{c,a} < M_{c,N}$... 3. POŽADAVEK JE SPLNĚN.

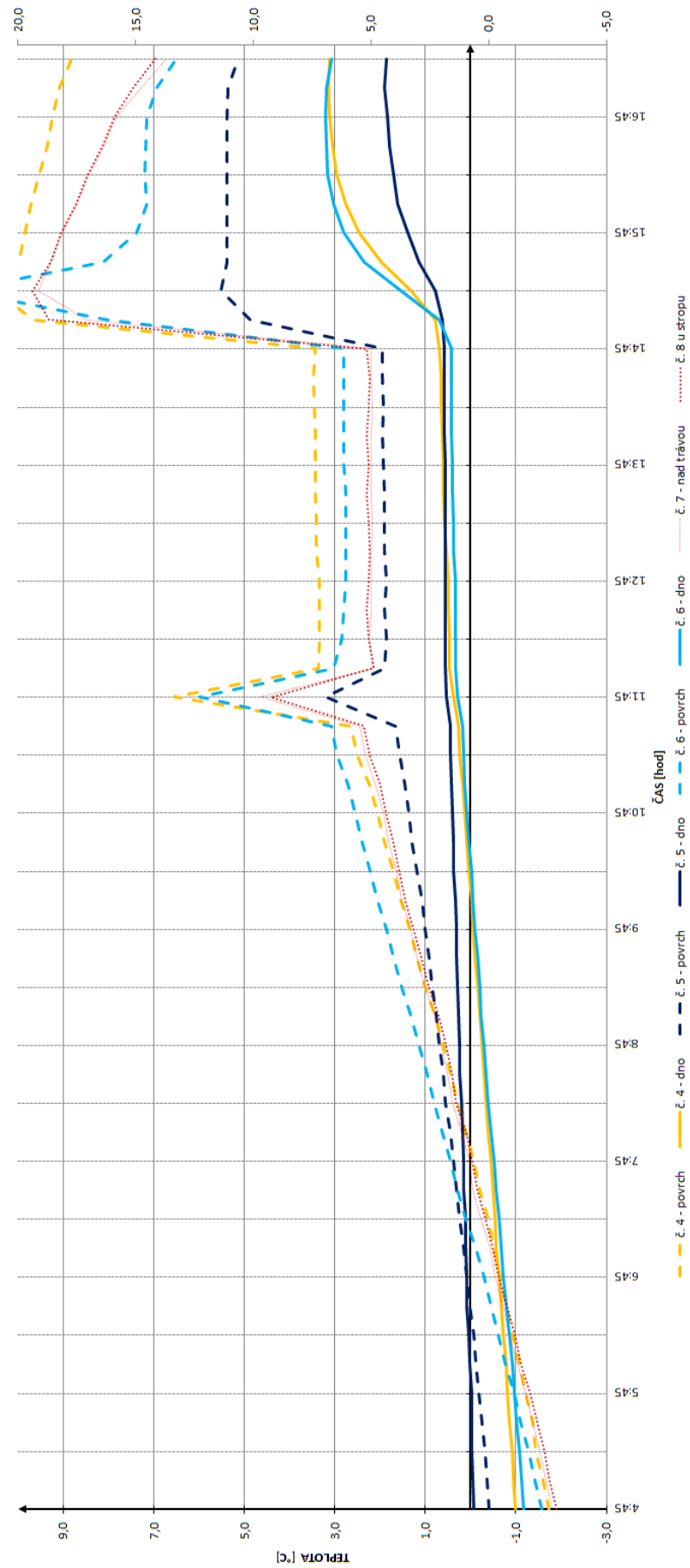
Příloha č. 2 – vybrané grafy z experimentálního měření



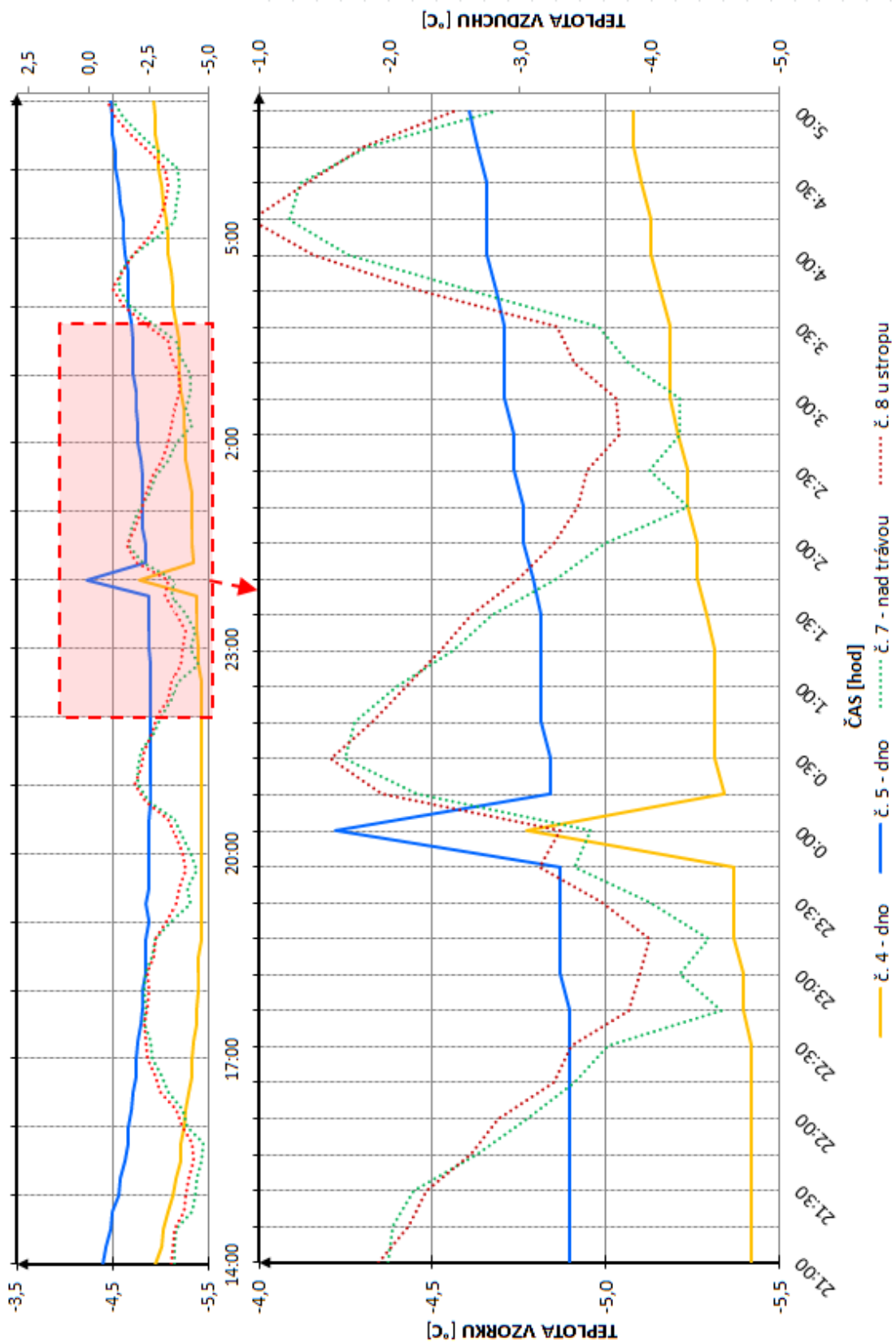
*Graf 33 Celkový průběh prvního experimentální měření
(archiv autora, 2016)*



Graf 34 Celkový průběh druhého experimentálního měření (archiv autora, 2016)



Graf 35 Zobrazení teplotního vychýlení v případě otevření klimakomory (archiv autora, 2016)



Graf 36 Výrazné oteplení čidla u dna vlivem stečení nalité vody o kladné teplotě.

Příloha č. 3 – výsledky experimentální měření

Tab. 13: Výsledky experimentálního ověření, seřazeny dle délky fázového posunu.

experiment/ chladící etapa		vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
II	9.	vzorek č. 4	-10	+10	48	-7,8	0,6	-8,4	0:45
I	4.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,6	1:15
I	4.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,4	-1,3	1,7	1:15
I	2.	vzorek č. 4	+20	-10	12	16,8	-1,3	18,1	1:30
I	3.	vzorek č. 4	+20	-10	12	3,1	-1,3	4,4	1:30
I	2.	vzorek č. 5	+20	-10	12	16,8	-0,1	16,9	1:30
II	9.	vzorek č. 5	-10	+10	48	-7,4	0,7	-8,2	1:30
I	1.	vzorek č. 4	+5	-10	12	3,3	-1,5	4,9	1:45
II	4.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-2,0	0,8	1:45
I	1.	vzorek č. 5	+5	-10	12	3,1	-0,4	3,6	1:45
II	2.	vzorek č. 4	+2	-2	12	-1,1	-2,2	1,1	2:00
I	5.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,5	2:00
II	3.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,3	0,5	2:00
II	4.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,4	0,6	2:00
II	1.	vzorek č. 4	+15	-10	18	0,4	-2,5	2,9	2:15
II	7.	vzorek č. 4	-5	0	48	-5,3	-2,3	-3,1	2:15
I	3.	vzorek č. 5	+20	-10	12	2,3	-0,3	2,7	2:15
II	7.	vzorek č. 5	-5	0	48	-4,8	-1,9	-2,9	2:15
II	2.	vzorek č. 5	+2	-2	12	-0,7	-1,5	0,8	2:30
II	3.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-1,9	0,7	2:45
II	11.	vzorek č. 4	+5	-15	12	-2,0	-9,8	7,8	2:45
I	8.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,5	-5,6	5,1	3:00
II	6.	vzorek č. 4	0	-5	6	-4,1	-5,4	1,3	3:00
II	8.	vzorek č. 4	0	-10	24	-2,3	-8,9	6,6	3:00
II	1.	vzorek č. 5	+15	-10	18	0,5	-1,7	2,2	3:00
I	8.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-1,0	-5,6	4,6	3:15
I	6.	vzorek č. 4	+20	-10	12	2,1	-0,3	2,4	3:30
I	7.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,7	3,0	3:30
I	5.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,2	-4,5	4,3	3:45
II	11.	vzorek č. 5	+5	-15	12	-1,8	-8,7	6,9	3:45
II	10.	vzorek č. 4	+10	-15	24	0,6	-6,9	7,5	4:15
I	7.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-0,2	-4,4	4,2	4:15
II	8.	vzorek č. 5	0	-10	24	-1,9	-8,2	6,3	4:30
II	6.	vzorek č. 5	0	-5	6	-3,8	-4,9	1,1	5:00
I	6.	vzorek č. 5	+20	-10	12	0,8	-1,3	2,1	5:30
II	10.	vzorek č. 5	+10	-15	24	0,7	-5,5	6,3	5:45
II	5.	vzorek č. 4	+2	-10	12	-1,3	-7,6	6,3	7:00
II	5.	vzorek č. 5	+2	-10	12	-0,9	-6,8	5,9	8:00

Tab. 14: Výsledky experimentálního ověření, seřazeny dle rozdílu teplot ve vzorku.

experiment/ chladicí etapa		vzorek	charakter teplotní rampy [°C]		délka etapy [hod]	počáteční teplota [°C]	koncová teplota [°C]	ΔT [°C]	fázový posun [h:min]
II	9.	vzorek č. 4	-10	+10	48	-7,8	0,6	-8,4	0:45
II	9.	vzorek č. 5	-10	+10	48	-7,4	0,7	-8,2	1:30
II	7.	vzorek č. 4	-5	0	48	-5,3	-2,3	-3,1	2:15
II	7.	vzorek č. 5	-5	0	48	-4,8	-1,9	-2,9	2:15
II	3.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,3	0,5	2:00
II	4.	vzorek č. 5	+2	-2	6	-0,8	-1,4	0,6	2:00
II	3.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-1,9	0,7	2:45
II	4.	vzorek č. 4	+2	-2	6	-1,2	-2,0	0,8	1:45
II	2.	vzorek č. 5	+2	-2	12	-0,7	-1,5	0,8	2:30
II	6.	vzorek č. 5	0	-5	6	-3,8	-4,9	1,1	5:00
II	2.	vzorek č. 4	+2	-2	12	-1,1	-2,2	1,1	2:00
II	6.	vzorek č. 4	0	-5	6	-4,1	-5,4	1,3	3:00
I	4.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,4	-1,3	1,7	1:15
I	6.	vzorek č. 5	+20	-10	12	0,8	-1,3	2,1	5:30
II	1.	vzorek č. 5	+15	-10	18	0,5	-1,7	2,2	3:00
I	6.	vzorek č. 4	+20	-10	12	2,1	-0,3	2,4	3:30
I	5.	vzorek č. 5	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,5	2:00
I	4.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,3	2,6	1:15
I	3.	vzorek č. 5	+20	-10	12	2,3	-0,3	2,7	2:15
II	1.	vzorek č. 4	+15	-10	18	0,4	-2,5	2,9	2:15
I	7.	vzorek č. 4	+5	-10	12	0,3	-2,7	3,0	3:30
I	1.	vzorek č. 5	+5	-10	12	3,1	-0,4	3,6	1:45
I	7.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-0,2	-4,4	4,2	4:15
I	5.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,2	-4,5	4,3	3:45
I	3.	vzorek č. 4	+20	-10	12	3,1	-1,3	4,4	1:30
I	8.	vzorek č. 5	+5	-10	12	-1,0	-5,6	4,6	3:15
I	1.	vzorek č. 4	+5	-10	12	3,3	-1,5	4,9	1:45
I	8.	vzorek č. 4	+5	-10	12	-0,5	-5,6	5,1	3:00
II	5.	vzorek č. 5	+2	-10	12	-0,9	-6,8	5,9	8:00
II	10.	vzorek č. 5	+10	-15	24	0,7	-5,5	6,3	5:45
II	8.	vzorek č. 5	0	-10	24	-1,9	-8,2	6,3	4:30
II	5.	vzorek č. 4	+2	-10	12	-1,3	-7,6	6,3	7:00
II	8.	vzorek č. 4	0	-10	24	-2,3	-8,9	6,6	3:00
II	11.	vzorek č. 5	+5	-15	12	-1,8	-8,7	6,9	3:45
II	10.	vzorek č. 4	+10	-15	24	0,6	-6,9	7,5	4:15
II	11.	vzorek č. 4	+5	-15	12	-2,0	-9,8	7,8	2:45
I	2.	vzorek č. 5	+20	-10	12	16,8	-0,1	16,9	1:30
I	2.	vzorek č. 4	+20	-10	12	16,8	-1,3	18,1	1:30