



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

**PREDIKCE VÝVOJE STAVEBNĚ FYZIKÁLNÍCH
VLASTNOSTÍ STŘEŠNÍCH PLÁŠŤŮ PLOCHÝCH STŘECH**

PREDICTION OF FLAT ROOFS
PHYSICAL PROPERTIES DEVELOPMENT

**HABILITAČNÍ PRÁCE
VE VĚDNÍM OBORU SOUDNÍ INŽENÝRSTVÍ**
HABILITATION THESIS IN FORENSIC ENGINEERING
SCIENTIFIC FIELD

Ing. Vladimír TICHOMIROV, CSc.

Brno 2018

Bibliografická citace práce:

TICHOMIROV, Vladimír. *Predikce vývoje stavebně fyzikálních vlastností střešních pláštů plochých střech*. Brno, 2018. 112 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství.

*„Expertní inženýrství je velmi dynamický a perspektivní obor,
který nabízí uplatnění jak v praxi tak i ve výzkumné činnosti“*

*doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně*

PODĚKOVÁNÍ:

Za všechna léta praxe i teoretické činnosti je velmi obtížné směřovat poděkování konkrétně. Mé poděkování tedy patří všem, se kterými jsem měl možnost se poznat a spolupracovat odborně i obchodně v pozitivním duchu – za příjemná osobní setkání, obchodní jednání i odbornou spolupráci, což jsou věci vždy povzbuzující, motivující, inspirující.

Ale abych přece jen něco upřesnil, můj dík a úcta patří celému VUT v Brně, která byla mou „almou mater“ a se kterou jsem nikdy neztratil kontakt a spolupráce vždy byla skvělá. Týká se to především všech osob a osobností stavební fakulty, jejího vedení v průběhu všech let a ústavů pozemního stavitelství a technologie stavebních hmot a dílců.

Mé motivační poděkování směřuji Ústavu soudního inženýrství VUT, který mne skvěle připravil na působení v roli soudního znalce a svůj dík a úctu nejlépe prokáži svou možnou další spoluprací nebo přímým působením na tomto ústavu.

Aktuálně pak děkuji Ústavu práva a právní vědy v Praze, který koncipoval skvělé studijní programy v oboru magistr práv LL.M. a kde mám možnost si v současné době výrazně rozšiřovat právní povědomí zejména v oblasti mimosoudního řešení sporů jako zcela aktuální cesty k odciążení soudů a kdy v této oblasti může právě technická expertní činnost hrát obrovskou roli.

Poděkování svým blízkým činím raději průběžně osobně a doufám, že to prokazují i svým vztahem a přístupem k nim.

Obsah

1. ÚVOD.....	8
2 . VADY A PORUCHY STŘEŠNÍCH PLÁŠŤŮ.....	11
3. STAVEBNĚ FYZIKÁLNÍ TEORIE VLHKOSTNÍCH PROCESŮ.....	19
4. TEORIE DIFÚZE VODNÍCH PAR PERFOROVANOU PLOCHOU.....	24
4.1. Teoretická analýza.....	24
4.2 Navrhování stavebních konstrukcí z hlediska difúze vodní páry.....	30
4.3 Výpočet a návrh způsobu perforace.....	38
4.4. Hodnocení množství zkondenzovatelných vodních par	41
4.4 Vliv způsobu perforace na hodnotu faktoru difúzního odporu.....	49
4.5. Zvolené výpočetní metody a software.....	57
5. PREDIKČNÍ VÝPOČTY CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM POUZE NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY.....	62
6. PREDIKČNÍ VÝPOČTY CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM NOVÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ VRSTVY A NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY...	69
7. ANALÝZA CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM NOVÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ VRSTVY A NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY.....	74
8. PRAKTICKÁ APLIKACE V PRAXI.....	83
9 . NÁVRH OBECNÉ METODIKY.....	88
10. EKONOMICKÁ ANALÝZA.....	96
10.1. Stanovení nákladů.....	96
11. APLIKACE – PŘÍNOS TEORETICKÝCH POZNATKŮ V SOUDNĚ INŽENÝRSKÉ PRAXI.....	98
12 . ZÁVĚR.....	99
Použitá literatura.....	102
Seznam obrázků.....	106
Seznam tabulek.....	107
Seznam grafů.....	108

ABSTRAKT:

Vady a poruchy ve stavebnictví bývají v mnoha případech vyvolané synergií řady dílčích negativních vlivů v investorské přípravě stavby, v procesu projektování, v etapě výstavby a konečně i v etapě užívání.

Cílem této práce je formulovat nové přístupy k řešení vad a poruch střešních pláštěů a na konkrétním technickém případě ukázat nejen možné vědecko-technické řešení, ale i jeho ekonomický přínos a celkový přínos k řešení problémů v této oblasti.

Sofistikované stavebně fyzikální a tepelně technické výpočetní postupy a to jak stacionární tak dynamické byly použity pro srovnání jejich výsledků tak i u dynamických metod pro srovnání výsledků, které přinese jejich použití pro sledování vlastností pouze střešního pláště nebo naopak celé střešní konstrukce včetně materiálu nosných vrstev. Výsledky výpočetních metod jsou diskutovány v jejich přednostech nebo omezeních a následně k jejich srovnání s výsledky měření získaných prostřednictvím zabudovaných měřících ústředen na konkrétních střeších.

V práci nejsou obsaženy jednotlivé výpočty, kterých bylo zpracováno velké množství variant a které představují použití dostupných výpočetních softwarů, ale jsou použity pouze vybrané varianty doložené pouze výslednými grafy shrnujícími výsledky jednotlivých dílčích výpočtů.

Vyústěním celé práce je navržení metodiky pro konkrétní technologii opravy hydroizolační vrstvy s technickými opatřeními provedenými na stávajícím souvrství.

Předkládaná habilitační práce a její výstupy pak v teoretické rovině mohou představovat významný nástroj pro rozvoj oboru soudního inženýrství z hlediska znalecké činnosti, ale z praktického pohledu pak mohou sloužit jako nástroj k zpřesnění metod pro zpracování znaleckých posudků jakož i následně rozvíjet odborné a expertní činnosti Ústavu soudního inženýrství a dále pro možnost přenést uplatnění výsledků do široké stavební praxe.

ABSTRACT (EN):

Defects and failures in the building industry are often caused by the synergy of multiple negative factors, the source of which lies either in the preparation, design, construction or utilisation phases.

The task of forensic engineering is to answer the questions defined by the court using common phrases, as simply as possible. To solve the issues and find the cause of defects and failures, more often than not, it is also necessary to apply the latest scientific and technical procedures.

In co-operation with various institutes of Brno University of Technology it is possible to determine the causes of defects and failures through long-term scientific activities in a way, which is most appropriate from the viewpoint of forensic engineering activities. Nonetheless, such research activities also allow the professionals to search for cost effective theoretical solutions which might negate the effects of failures and allow the structures to retain their original functionality and service life.

The aim of the presented work is to formulate new approaches through which defects and failures of roof claddings might be corrected. On a case scenario it also demonstrates the possible scientific and technical solutions alongside the economic and overall contributions to the professional public.

With the use of sophisticated computational procedures and proposed methodologies it is possible to predict the development of characteristics of roof shells after repairs have been done. In particular the development moisture based parameters until an equilibrium condition are met, which allow repairs to the existing damp proof course without the need to remove the existing roofing layers. The benefit of this approach lies in the possibility of defects removal at a minimal cost, hence it significantly contributes to the solution of disputes outside the court.

The presented habilitation thesis and its outputs at the theoretical level can represent both an important tool for the development of the field of forensic engineering from the viewpoint of expert activities, and a proposal which might be used in the wide sphere of construction practice.

Klíčová slova:

Difúzní odpor, hydroizolace, plochá střecha, střešní konstrukce, střešní plášť, vodní pára, vady plochých střech, poruchy plochých střech, stacionární a dynamické metody

Keywords:

Diffusion resistance, waterproof layer, flat roof, roof cladding, water vapor, temperature, thermal insulation, moisture.

1. ÚVOD

Stavební praxe hnána kupředu ekonomickými i věcnými zájmy současné doby bohužel upřednostňuje hledisko minimální ceny s mnohdy negativním dopadem na kvalitu provedené práce a budovaného díla. Tato skutečnost současně s podceněním role autorského dozoru projektanta a technického dozoru investora následně přináší vznik a výskyt celé řady vad a poruch, které se mnohdy vyhrocují až do soudních sporů obvykle dlouho trvajících, nákladných a bohužel nepřinášejících potřebnou okamžitou opravu.

Soudní znalectví se zabývá úlohou zodpovědět otázky stanovené soudem sice běžně srozumitelnými výrazy, ale pro určení příčiny vzniku vad a poruch je nutno využít v maximální možné míře nejnovějších vědeckotechnických postupů, aby závěry znalce byly plně podloženy použitím spolehlivých metod a jednoznačných výsledků. A to se jeví jako předmět soudního inženýrství, které představuje vědeckotechnickou základnu pro rozvoj všech teoretických poznatků potřebných i nutných pro kvalitní a technicky podložené soudní znalectví. Současně však představuje možnost v expertní a odborné činnosti rozvíjet vědeckotechnickou základnu poznatků pro zkoumání a řešení mnoha nových v oboru se otevírajících problémů.

V případech sporů se cesta stavební praxe štěpí do dvou extrémů: nejčastěji se pro odstranění vad a poruch požaduje řešení spočívající v odstranění a novém provedení celých konstrukčních celků za cenu výrazných nákladů a provozních problémů, nebo se zcela vybočuje k živelnému provizornímu řešení důsledků vad a poruch před jejich konečným odstraněním po ukončení sporu.

Předkládaná habilitační práce je zaměřena na rozpracování teorie difuze vodních par dodatečně perforovanými paronepropustnými materiály do stavebně fyzikálních výpočtů umožňujících predikci vývoje stavebně fyzikálních vlastností střešních pláštů plochých střech při výskytu vad nebo poruch. Cílem práce je dosáhnout možnosti predikce vývoje stavebně fyzikálních vlastností střešních pláštů plochých střech v případě jejich vad či poruch, způsobujících omezení nebo ztrátu jejich funkčnosti, aby bylo možno případné otázky soudu k tomuto problému podložit jednoznačnými vědeckými závěry.

S pomocí sofistikovaných výpočetních postupů je hledáno řešení v možnosti konstrukčního návrhu oprav či rekonstrukcí, které by umožnilo expanzně otevřenými rozhraními v souvrství odvod vodních par až do míst expanzně otevřeného napojení nové hydroizolační vrstvy na okolní volné ovzduší.

V průběžné vědecko-výzkumné činnosti ve spolupráci s odbornými ústavami VUT v Brně je možné zabývat se nejen určením příčin vzniku vad a poruch, jak je nutné pro soudně znaleckou činnost, ale v rámci odborné a expertní činnosti je možné soustředit se i na hledání teoretických řešení k odstranění vad či poruch, které by minimalizovaly náklady při plném dosažení původní funkčnosti a životnosti.

Cílem této práce je formulovat nové přístupy k řešení vad a poruch střešních pláštů a na konkrétním technickém případě ukázat nejen možné vědecko-technické řešení, ale i jeho ekonomický přínos a celkový přínos k řešení problémů v této oblasti. Celá práce vychází z více než dvacetileté činnosti autora v realizační praxi a nutnosti hledat cesty k technicko-cenové optimalizaci technologií oprav a rekonstrukcí a následně z více než desetileté práce na rozpracování této problematiky a její verifikování teoreticko-výpočetními postupy.

Sofistikované stavebně fyzikální a tepelně technické výpočetní postupy, a to jak stacionární tak dynamické byly použity pro srovnání jejich výsledků, u dynamických metod pak pro srovnání výsledků, které přinese jejich použití pro sledování vlastností pouze střešního pláště nebo naopak celé střešní konstrukce včetně materiálu nosných vrstev. Výsledky výpočetních metod jsou diskutovány v jejich přednostech nebo omezeních a následně k jejich srovnání s výsledky konkrétních měření získaných prostřednictvím zabudovaných měřících ústředí na konkrétních střeších.

V práci nejsou obsaženy jednotlivé výpočty, kterých bylo zpracováno velké množství variant a které představují použití dostupných výpočetních softwarů, ale jsou použity pouze vybrané varianty doložené pouze výslednými grafy shrnujícími výsledky jednotlivých dílčích výpočtů.

Výsledkem celé práce je navržení metodiky pro konkrétní technologii opravy hydroizolační vrstvy s technickými opatřeními provedenými na stávajícím souvrství. S využitím metodiky je rovněž možno predikovat vývoj vlastností skladby střešního pláště po opravě, zejména vývoj vlhkostních parametrů, až do dosažení rovnovážné vlhkosti a umožnit tak opravu bez demontáže stávajícího souvrství. Praktický přínos této metodiky spočívá nejen ve výstupech prohlubujících soudně znaleckou praxi, ale i v možnosti v případě expertní činnosti navrhnout odstranění vad a poruch střešních plášťů s minimálními náklady a výrazně tak tímto teoretickým nástrojem přispět k hledání cesty, jak řešit případně vzniklé spory i mimosoudní cestou, která vzhledem k přetížení soudů začíná být v celoevropské praxi řešení sporů preferovaná.

2 . VADY A PORUCHY STŘEŠNÍCH PLÁŠŤŮ

Úvodem této kapitoly považuji za vhodné se zmínit o terminologických významech pojmu “vada” a “porucha”. Lze říci, že v terminologii právnické je zcela jasně vymezena “vada” jako faktický nebo právní stav, který brání řádnému a/nebo smluvenému užívání věci, zatímco pojem “porucha” není specifikován.

Pojem “porucha” naopak je velice frekventovaným pojmem ve zdravotnictví a pedagogice, přičemž s mícháním pojmu vada a porucha se setkáváme u popsání problémů spojených s řečí.

Ve stavebnictví bývá pojem “vada” a “porucha” pojímám ne zcela jednotně a názory se liší, byť ne protikladně.

V dnes již historickém pojetí z doby před rokem 1989, jak je přehledně popsáno v [28] byla “vada” výrobků (objektu) definována tehdejší ČSN 01 0113 jako jakýkoli nesoulad s předepsanými nebo obvyklými požadavky. Z toho vyplývalo, že všechny parametry nemusely být výslovně předepsány, pokud se jednalo o běžnou vlastnost obecně známých výrobků, materiálů i objektů. A pro hodnocení jakosti byly vady rozlišovány do vad nepodstatných, podstatných a kritických.

Pojem “porucha” byl vymezen v ČSN 01 0102 Spolehlivost v technice. Poruchou zde byla označena ztráta schopnosti objektů plnit požadovanou funkci při zachování jeho technických, provozních a ekonomických parametrů. Přitom se norma členěním poruch zabývala velmi podrobně, pro charakterizování poruch ve stavební praxi mělo význam členění podle provozuschopnosti na poruchy kritické, úplné, částečné, havarijní a degradační

Tradiční pojetí výkladu výše uvedených pojmů dílčím způsobem přežívá i dnešní praxi. V současnosti poměrně obsáhle se věcnou specifikací obsahu jednotlivých pojmů zabývá Ministerstvo pro místní rozvoj, jehož Ústav územního rozvoje v problematice územního plánování a stavebního řádu vymezuje poměrně podrobně pojmy “vada” i “porucha” a navíc doplňuje pojem “havárie” a to takto:

Vada, závada - nedostatek konstrukce, předmětu (např. určitého prvku) způsobený chybným návrhem, nevhodným či nedokonalým provedením, který může ovlivnit funkční způsobilost konstrukce, předmětu. Jedná se o stav, který není změnou proti původnímu stavu. Může vyplynout z přehodnocení stavby, konstrukce nebo prvku podle v současnosti platných předpisů a norem. Konstrukce, předmět s vadou pak nemá vlastnosti vymíněné nebo obvyklé.

Porucha - trvalé nebo dočasné vyčerpání schopnosti konstrukce plnit požadavky na ni kladené, které zhoršuje její spolehlivost, případně snižuje její bezpečnost, předpokládanou ekonomickou životnost, užitnou jakost apod. Je to změna konstrukce proti původnímu stavu. Může vzniknout jako důsledek vady, nebo z jiných příčin. Porucha stavební konstrukce má technické důsledky.

Havárie - takové poškození konstrukce, které vyžaduje výměnu nebo generální opravu jedné nebo několika částí konstrukce, případně zrušení konstrukce.

Pojem “vada” i “porucha” je pak popsán více kategoriemi, u jejichž specifikací však vidíme, že pojem “vada” i “porucha” je spojen do jednoho bloku:

Závažná vada - vada vedoucí k vážnému ohrožení nebo k dopadu na životy a zdraví lidí, zvířat a ke značným škodám (např. na životním prostředí nebo na majetku). Závažná vada ohrožuje také bezpečnost užívání, stabilitu stavby nebo její části. Hrozí poškození zdraví, úraz či škoda při dalším užívání stavby, případně nebezpečí zřícení některé části stavby nebo nefunkčnost stavby či její části.

Opakující se vada - třetí výskyt totožné nebo obdobné vady nebo vady stejného původu.

Poznámka: Vysvětlení pojmu opakující se anebo často se opakující vady, poruchy a havárie. Opakující se anebo často se opakující vady, poruchy a havárie se projeví až v přehledech získaných ze SSTP – opakování vyplyne z

údajů systému (např. stejná vada se objeví u různých staveb, v jiném místě, na jiném funkčním dílu apod.).

Pojem často znamená zhusta, opětovaně, nejednou, častokrát, mnohdy, mnohokrát, mockrát.

Zjevná vada, porucha – vada a porucha, které je možné zjistit při běžné vizuální kontrole a prohlídce odborníka.

Skrytá vada, porucha – jde o vadu a poruchu, které není možné zjistit při běžné vizuální kontrole a prohlídce odborníka.

Odstranitelná vada – lze ji opravou odstranit a způsobilost konstrukce se stává bezvadnou.

Neodstranitelná vada – vada, pro kterou nemůže věc být užívána jako věc bez vady, zejména vada, kdy věc nelze opravit (vadu odstranit) z technického hlediska.

Porucha vratná – porucha, která zanikne, jestliže zaniknou jevy, které ji vyvolaly.

Porucha nevratná – porucha, která se vyskytuje na konstrukci, popř. objektu, i když zaniknou jevy, které ji vyvolaly.

Autoři v [30] uvádějí, že oba tyto pojmy se využívají jako synonyma a snaží se odlišit tyto pojmy kauzální souvislostí, kdy za poruchu považují projev či následek vady nebo nadměrného opotřebení (vyčerpané životnosti). Přitom uvádí, že toto pojetí není zcela precizní, neboť často může docházet k řetězení vztahů, kdy porucha je způsobena určitou vadou, která je však způsobena jinou dřívější vadou. A proto se v určité analytické části svého díla – analýze FMEA – drží pouze jediného pojmu a to vada.

Popisuje se zde i pojem váha vady ve vztahu k závažnosti následků vady, náročnosti opravy, vlivu vady na provoz objektu a na plnění hlavních požadavků na stavby. Je zde uvedena přibližná charakteristika rozdělená do 10 stupňů váhy jednotlivých stupňů vady.

Ve vztahu k hydroizolacím velmi zajímavě, precizně a strukturně logicky pojednává problematiku vad a poruch autor v [28] . Příčiny jejich možného vzniku rozděluje do několika etap a to:

záměr stavebníka – kdy může být vznik vad a poruch dán vysokými nároky na stavbu v rozporu s představami o umístění stavby, jejími náklady a termínovými požadavky, z čehož vznikají rozpory často ústící ve vznik vad obvykle obtížně odstranitelných

projektová dokumentace – zde nejde jen o problémy při konkrétním návrhu materiálu a druhu hydroizolace, návrh odvodnění a umístění vtoků, provádění ve vztahu k dalším technologiím a řemeslům – technologie a konstrukce umístěvané na střeše atd., ale i o širší souvislosti a vztahy např. ke statice celé stavby, jejímu členění na jednotlivé díly i dalším možným souvislostem

kvalita použitých materiálů – u standartně používaných a tržně obvyklých materiálů renomovaných výrobců je výskyt vady materiálu zcela výjimečnou záležitostí. Ale existuje pár možností získat cenově výhodný materiál ať již od nerenomovaného či exotického výrobce nebo v extrémním případě které se bohužel pro velké stavby také mohou vyskytnout, dokonce záměrně vyrobeného materiálu s omezenou kvalitou pro prokázání deklarovaných vlastností při vstupní kontrole. Bohužel v uplynulých letech i v současnosti lze několik takových extrémů vysledovat.

provedení hydroizolací - kdy dochází ke vzniku vad zejména provedením nekvalifikovanými osobami v současné době minimalizace nákladů bez ohledů na kvalitu velice častá příčina, dále nekvalifikovanými záměnami materiálů i skladeb s cílem minimalizace nákladů nebo i prostě laickými představami o možných záměnách materiálů i technologií a to bohužel někdy i na straně stavebníka, nedodržením technologických postupů zejména ve vztahu k povětrnostním podmínkám, teplotám atd. Odpovídající nastavení a vyzkoušení vhodné teploty v horkovzdušných svařovacích přístrojích je ve většině případů zcela neznámá věc a homogenní spoj foliových hydroizolací pak nemůže být proveden spolehlivě v dostatečné kvalitě.

Samostatným problémem je potom organizace prací při výstavbě a souběh, respektive následnost činností při práci na střeše, kdy pracovníci jiných řemesel poškodí hydroizolační vrstvu svou montážní činností – zavrtávání dodatečného kotvení do střechy, osazování následných konstrukcí apod. nebo poškození mechanické ať již jinou činností nebo neúmyslně.

užívání stavby – to je co do příčin vzniku vad druhá nejčastější etapa jejich vzniku. Je dána změnou užívání plochy – užívání střechy provedené jako nepochůzná pro nejrůznější užitelské účely, zřizováním dodatečných konstrukcí na střeše, mechanickým poškozením při řemeslných, kontrolních či revizních činnostech na střeše, neprovádění dostatečné údržby a průběžné kontroly střechy apod.

Autor [28] uvádí i zajímavou statistiku, která je i graficky uvedena v původním článku a zde je uvedena pouze popisně :

- 1 % nevhodný záměr, nerealizovatelné požadavky, neproveditelné řešení
- 12 % projektová dokumentace - nevhodná koncepce, nevhodné materiály a technologie, neřešení návaznosti prací a detailů, neřešení vlivu celkové koncepce stavby na hydroizolace
- 4 % výběr materiálů, výrobků a zhotovitelů a nastavení dodav. odběr. vztahů
- 25% chyby při provádění , nekvalifikovaný personál, nedodržení technologií, nerespektování povětrnostních podmínek
- 2 % vady dodaných materiálů a výrobků, případně jejich poškození při dopravě nebo manipulaci na stavbě
- 53 % poškození hydroizolace následnými pracemi a osazováním konstrukcí / ocelové konstrukce, vzduchotechnické konstrukce, slaboproudé rozvody a konstrukce, hromosvody, jistící systémy/ nebo poškození vadami objektu
- 3% změna užívání nebo nebo nevhodné užívání / nepochozí x pochozí x pojízdné x ozeleněné /

Stejný autor v [29] uvádí další velmi zajímavé srovnání hydroizolačních technologií ve vztahu k jejich rizikovým faktorům, spolehlivosti, složitosti provedení, citlivosti na realizační podmínky, nároky na ochranu i nároky na

opravy. Statistické šetření bylo provedeno průzkumem mezi techniky realizačních firem.

Z rizikových faktorů hraje nejvyšší roli realizace s 35% váhy, následuje projekt 31%, příprava 16% , užívání 10% a předání 8%.

Ve vztahu ke spolehlivosti vykazují nejvyšší spolehlivost technologie bílých van s 46%, následují asfaltové pásy s 35%, hydroizolační folie s 19%. Ostatní technologie jako stěrky, nástřiky a expandující materiály jsou hodnoceny nulou.

Z hlediska složitosti provedení jsou nejnáročnější hydroizolační folie 44 %, asfaltové pásy 17 %, bílé vany 12 %, stěrky 14 %, nástřiky 10 % a exp. rohože 3 %.

Citlivost na realizační podmínky mají dle šetření nejvyšší hydroizolační folie 26 % poté stěrky 23 %, asfaltové pásy 22 %, bílé vany 13 %, nástřiky 10 % a exp. rohože 6 %.

Nároky na ochranu jsou dle šetření nejvyšší u hydroizolačních folií 76 %, u asfaltových pásů pak pouze 14 %, ostatní technologie se procentuálně pohybují na hranici statisticky nevýznamné.

Náročnost případných oprav je nejvyšší u hydroizolačních folií 46 %, u asfaltových pásů 19 %, u bílých van 12 %, u stěrek 11 %, exp. rohoží 7 % a nástřiků 5 %.

Vezmeme-li v úvahu, že pro hydroizolace plochých střech se používají v převážné většině případů hydroizolační folie a asfaltové pásy, pak lze z výše uvedených výsledků statistického šetření vyvodit závěry pro vzájemné porovnání těchto dvou technologií. Jednoznačně ze závěrů tedy vyplývá jako jednodušší, spolehlivější, odolnější i jednodušeji opravitelná technologie asfaltových pásů, přičemž tyto závěry nejsou pro předkládanou práci nijak předurčující, při zvažování návrhu nebo posuzování realizace je vhodné brát je na zřetel.

Zajímavý přehled období s typickými znaky pro vznik poruch plochých střech shrnuje Marek Novotný, při pohledu na vývoj hydroizolačních materiálů je možné vyhledat určité typické signály patřící k dané době:

- 70. léta - definitivní odklon od dehtu a vývoj oxidovaných hydroizolačních materiálů většinou s výztužnými vložkami na bázi lepenek (typický příklad IPA SH - Izolační Pás Asfaltový - Strojně Hadrová výztužná vložka).
- 80.léta - vývoj oxidovaných materiálů s výztužnou vložkou na bázi skla (netkané a tkané skleněné textilie, výroba prvních fólií, problematicky stabilizovaných, které byly zatíženy UV degradací a výrazným smršťováním).
- 90. léta - rozvoj modifikovaných asfaltových materiálů a fólií již dostatečně stabilizovaných. Paralelně s tímto jsou realizovány naprosto bizarní technologie, které patří do slepých uliček hydroizolačních dějin. Byly to různé druhy nevyztužených i vyztužených akrylátů, stěrkované asfalty nebo stříkané polyuretany bez korektní hydroizolace na povrchu.
- 00. léta - pokračování vývoje, hledání nových a lepších technologických možností. Výroba robustních materiálů s polyesterovými vložkami, které byly nestabilizované a ve výrobcích se objevily výrazné objemové změny, respektive puchýře. Vše spojené s přehnanou hmotností výztužných vložek.
- 10. léta - výrazný tlak na cenu - nenápadné snižování kvality hydroizolačních materiálů pod zástěrkou optimalizace výroby. U všech typů hydroizolačních materiálů se vyskytují různé poruchy, zejména "skryté" - nedostatečná odolnost proti UV záření, problematická svařitelnost (příliš velký podíl plniva ve hmotě) u syntetických fólií, stékavost, "krokodýling" a puchýře u asfaltových hydroizolačních materiálů.

Konkrétním rozbořem věcných příčin a následků se zabývá celá řada publikací, z nich jako velmi dobře obsahově i strukturně uspořádané lze označit zdroje zpracované renomovanými autory jako jsou Zdeněk Kutnar,

Jozef Oláh, Antonín Fajkoš, Marek Novotný, Miloslav Novotný, Jaroslav Solař, a proto nepovažuji za nutné tuto problematiku zde podrobněji uvádět.

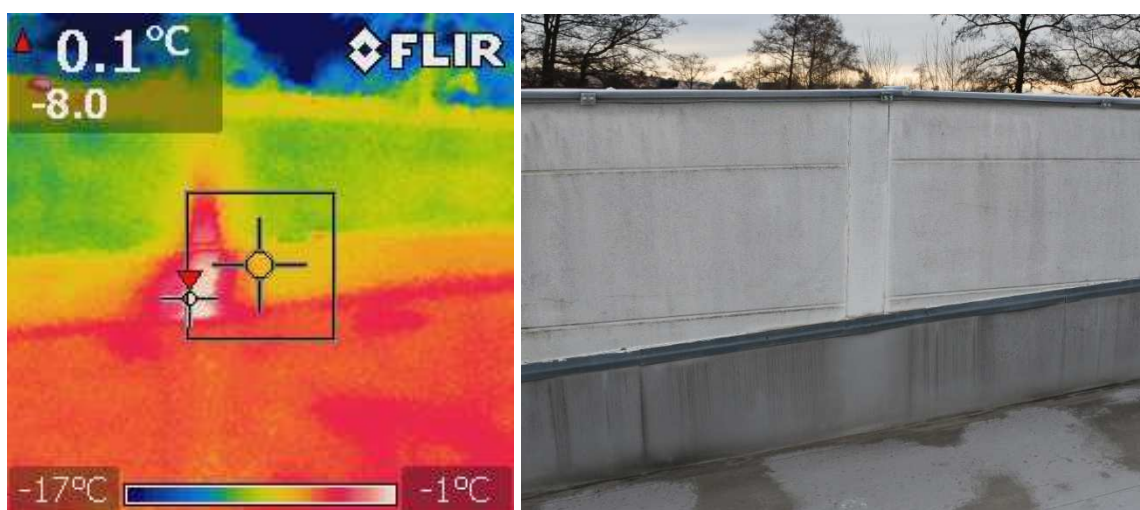
V uvedených zdrojích je však obvyklé méně konkrétních závěrů k optimálním způsobům odstranění zjištěných vad jak po praktické tak po teoretické stránce.

A právě tuto problematiku rozpracovávám podrobně v předkládané práci pro oblast střešních pláštů plochých střech, přičemž jako rozhodující je dle mého názoru zabývat se zkoumáním predikce chování materiálů nebo konstrukcí při výskytu vad nebo poruch pro možnou optimalizaci návrhu jejich odstranění.

3. STAVEBNĚ FYZIKÁLNÍ TEORIE VLHKOSTNÍCH PROCESŮ

V předchozí kapitole byla obecně pojednána problematika příčin vad a poruch střešních pláštů plochých střech. Následným problémem je přístup k jejich řešení a odstraňování. Pokud investor-uživatel objektu podceňuje význam projektové činnosti při přípravě výstavby, pak bohužel v procesu užívání stavby při výskytu vad a poruch střešních pláštů jen zřídka je přizván expert nebo projektant k podrobnému průzkumu stavu a odbornému návrhu jejich odstranění.

Obvykle je hledán řemeslník, který by odstranil jen příčiny zatékání. Zcela zanedbán je možný vliv vlhkosti vniklé do konstrukce a na odborném technickém řešení pak navržena vhodná technologie odstranění vad.



Obrázek 1: Atika ploché střechy haly včetně termovizního snímku s patrnými tepelnými mosty (zdroj: archív autora)

Jedná se o podobnou situaci, která se vyskytovala po druhé světové válce při výstavbě provizorních nebo velmi rychle budovaných staveb, kdy byly zanedbávány obecné stavebně fyzikální poznatky a následně se vyskytla celá řada problémů stavebně fyzikálního původu. Tento stav vyvolal v Německu vznik specializované disciplíny Stavební fyzika, která byla vyčleněna z obecné vědecké disciplíny "Tepelné techniky" a následně hlouběji rozpracovávána ve specializovaných institutech jako Fraunhofer-

Institut pro stavební fyziku, Státní zkušební ústav materiálu Nordrhein-Westfalen a odborných pracovištích vysokých škol [39].

Z oblasti stavební fyziky hraje významnou roli v souvislosti s předkládanou prací stavebně fyzikální teorie vlhkostních procesů, která je následně v přehledu uvedena. Zanedbání vlivu vlhkosti, která se vzniklými vadami dostala do vrstev střešního pláště pod hydroizolací, může i po odstranění vady způsobující přímé zatékání mít řadu negativních vlivů na funkčnost i životnost střešního pláště a může vést i ke vzniku vad následných.

Jako nejvýraznější negativní vlivy na funkčnost je možno označit snížení tepelného odporu v místech se zvýšenou vlhkostí, koroze konstrukčních prvků a vliv na tvarovou stabilitu materiálů ve střešním plášti. Možné následné vady vlivem vlhkosti ve střešním plášti je vznik výdutí v hydroizolační vrstvě, projevující se zejména u hydroizolace z asfaltových pásů, který může mít za následek až opětovné poškození hydroizolace se ztrátou její funkce.



Obrázek 2: Ukázka narušené povlakové krytiny z fólie (zdroj: archív autora)

Vlhkost stávajících střešních plášťů představuje zásadní aspekt pro návrh jejich oprav či rekonstrukcí. Technicky jednoznačným řešením je odstranění stávajícího střešního pláště a provedení kompletní nové a

poznatkům i požadavkům doby odpovídající skladby s tepelně technickými vlastnostmi dle ČSN 73 0540 v jejich průběžných dobových požadavcích.

Tento přístup, jak již popsáno v úvodu, má však své nároky jak finanční tak věcné, které většina investorů při opravách a rekonstrukcích obvodových pláštů nechce a ve většině případů ani z finančních důvodů nemůže akceptovat.

Vlhkost ve střešních pláštích je důsledkem :

- zabudované vlhkosti při provádění střešních nosných konstrukcí nebo spádových vrstev mokrým způsobem,
- absence parotěsné zábrany ve skladbě střešního pláště, která v dřívějších dobách nebyla standardně navrhována,
- vad a poruch hydroizolační vrstvy střešního pláště s důsledkem z přímého zatékání,

Výskyt vlhkosti (vodních par) v konstrukci střešního pláště způsobuje dva základní problémy:

- snížení tepelně izolačních vlastností střechy a tím zvýšení nároků na vytápění a spotřebu energie,
- vznik vydutí, tzv. boulí, mezi hydroizolací a jejím podkladem, které se pak stávají místem s vyšší expozicí vůči povětrnostním vlivům i možností mechanického poškození.

V 2. polovině 20. století byla tato problematika řešena pomocí odvětrávacích kanálků. Při jejich návrhu se řídili projektanti těmito zásadami:

- větrací kanálky se umísťují poblíž vnějšího povrchu střechy ve vrstvě propustné pro vodní páru,
- vzdálenost kanálků se navrhuje 0,5 až 1,5 m, zpravidla v závislosti na velikosti desek mezi nimiž jsou umísťovány,
- průřezová plocha kanálků se navrhuje větší 0,0015 m²,
- střešní plášť je navržen tak, aby pod kanálky v interiéru neklesala vnitřní povrchová teplota pod rosný bod,
- u plošně rozsáhlých střech se kanálky napojují na větrací hlavice. Na jednu hlavici připadá 40 až 80 m² plochy střechy.

Při užívání těchto střešních konstrukcí se uživatelé a projektanti setkali s několika nevýhodami tohoto systému: Mezi hlavní nevýhody patřilo používání větracích hlavic, u kterých docházelo k mechanickému poškození a následně k zatékání do střešního pláště [19, 34].

- teoretické výpočty neodpovídaly praktickým efektům proudění vzduchu
- ucpávání krycích mřížek ve vyústění kanálků
- snížení tepelného odporu v místě kanálku, uvnitř kanálků docházelo ke kondenzaci, vlhkost tepelné izolace se opět zvyšovala
- používání větracích hlavic, u kterých docházelo k mechanickému poškození
a následně k zatékání do střešního pláště

Neřešení problematiky uzavřené vlhkosti a opravy způsobem vrstvení dalších hydroizolačních vrstev je bohužel obvyklým jevem ve stavební praxi. A to v obvyklých případech plnoplošným natavením další vrstvy asfaltových izolačních pásů, které jen zvýší celkový odpor proti prostupu vodních par a situaci vyhrotí do ještě výraznějšího projevu již vyskytlých poruch.



Obrázek 3: Oprava hydroizolační vrstvy ploché střechy plnoplošným provedením nové hydroizolační vrstvy (zdroj : archív autora)

Přítom znalost stavebně fyzikální problematiky na úrovni současné doby, technické i technologické možnosti a synergické využití těchto možnosti přináší možnost vhodného řešení oprav a rekonstrukcí s ponecháním stávajícího souvrství.

Při opravách a rekonstrukcích střešních pláštů je možné pro vlhkost a z ní vznikající vodní páru nahromaděnou pod hydroizolací vhodným návrhem zajistit expanzi v souvrství a následné uvolnění do exteriéru s důsledkem snížení tenze par pod hydroizolační vrstvou a zamezení tvorby výdutí a dále postupného snižování obsahu vlhkosti ve střešním plášti s postupným dosažením původních tepelně technických parametrů střešního pláště [34].

4. TEORIE DIFÚZE VODNÍCH PAR PERFOROVANOU PLOCHOU

Při navrhování realizace oprav jednoplášťových plochých střech s klasickým pořadím vrstev nad prostory s tepelnými požadavky se navrhuje střešní plášť tak, aby nedošlo k nadměrnému transportu vlhkosti z interiéru do střešního souvrství, kde by v důsledku snížení teploty došlo až ke kondenzaci vodních par uvnitř konstrukce.

4.1. Teoretická analýza

Přenos tepla vedením se uskutečňuje mezi bezprostředně sousedícími částicemi tělesa, jestliže dochází k rozdílu teplot. Pro homogenní izotropní těleso, jestliže jeho součinitel tepelné vodivosti nezávisí na teplotě a směru šíření tepla, platí Fourierova parciální diferenciální rovnice, kdy je hustota tepelného toku přímo úměrná teplotnímu gradientu [22]:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\lambda \text{grad } \theta \quad (1)$$

kde q je hustota tepelného toku ($W \cdot m^{-2}$)
 λ součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
 θ teplota ($^{\circ}C$)
 x souřadnice vyjadřující polohu bodu v konstrukci (m)
 $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ teplotní gradient ($K \cdot m^{-1}$)

Pro homogenní a izotropní těleso bez vnitřního zdroje tepla a předpokladu že součinitel tepelné vodivosti se nemění se směrem šíření tepla, má Fourierova parciální diferenciální rovnice pro jednorozměrné vedení tepla tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2)$$

kde θ je teplota ($^{\circ}C$)
 t čas (s)
 a souřadnice tepelné vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$)
 x souřadnice (m)

V případě, že změna teploty v čase je nulová platí:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

pro ustálené vedení tepla platí diferenciální rovnice:

pro jednorozměrné vedení tepla

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

pro trojrozměrné vedení tepla

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (5)$$

kde θ je teplota ($^{\circ}\text{C}$)
 x, y, z souřadnice (m)

V homogenním, izotropním tělese při ustáleném teplotním stavu je změna teploty přímková a pro konečnou tloušťku d a teploty na povrchu konstrukce θ_1, θ_2 , bude teplotní gradient:

$$\text{grad } \theta = \frac{d\theta}{dx} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{d} \quad (6)$$

Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje rychlost vyrovnání teploty v tělese. Je definován podílem součinitele tepelné vodivosti λ a součinu měrné tepelné kapacity c a objemové hmotnosti látky ρ .

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (7)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 ρ objemová hmotnost při definované vlhkosti materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Součinitel tepelné vodivosti vyjadřuje schopnost přenášet v homogenním materiálu teplo vedením, je definován podílem hustoty tepelného toku q a gradientu teploty v soustavě.

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\theta} \quad (8)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

$\text{grad}\theta$ gradient teploty ($K \cdot m$)

q vektor hustoty ustáleného tepelného toku, který je přenášen vedením ($W \cdot m^{-2}$)

Jestliže je teplota funkcí času $\theta = f(t)$, potom $d\theta/dt \neq 0$ a teplotní pole je neustálené.

Pro neustálené – nestacionární teplotní pole platí, že teploty v jednotlivých bodech tělesa dané svojí polohou se mění v závislosti na čase. Jestliže do systému ustáleného teplotního pole umístíme těleso s odlišnou teplotou, nastává děj vzájemného vyrovnání teplot. Po určitém čase se teploty těles vyrovnají teplotou prostředí a nastane tepelná rovnováha. Pro homogenní izotropní těleso má Fourierova diferenciální parciální rovnice tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (9)$$

pro trojrozměrné šíření tepla platí

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

kde θ je teplota ($^{\circ}C$)

t čas (s)

a součinitel tepelné vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$)

x, y, z souřadnice (m)

V případě, že změna teploty v čase není nulová platí:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \neq 0 \quad (11)$$

pro neustálené vedení tepla platí diferenciální rovnice:

pro jednorozměrné vedení tepla

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \neq 0 \quad (12)$$

pro trojrozměrné vedení tepla

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \neq 0 \quad (13)$$

V interiéru je v zimním období oproti exteriéru vysoká absolutní vlhkost vzduchu. Absolutní vlhkost vzduchu vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. Vyjadřuje se v gramech vodní páry na metr krychlový vzduchu.

Mezi absolutní vlhkostí, teplotou a relativní vlhkostí platí fyzikální vztah. Čím teplejší je vzduch, tím více páry je schopen pojmout. Jinými slovy – daná absolutní vlhkost znamená nižší relativní vlhkost při vyšší teplotě než při teplotě nižší.

Vlivem rozdílu tlaků vodní páry mezi interiérem a exteriérem dochází k vnikání vlhkosti z interiéru do vrstev střešního pláště. Protože teplota ve střešním souvrství v zimním období klesá směrem od interiéru k exteriéru, dochází k růstu relativní vlhkosti, až ke kondenzaci vodní páry v konstrukci.

Ke kondenzaci dochází nejčastěji před vrstvou s vysokým difúzním odporem (tedy hydroizolací), zde následně dochází k narušení soudržnosti mezi konstrukcí pod hydroizolací a samotnou hydroizolací a vlivem přetlaku vodních par pod hydroizolací dochází k tvorbě tzv. boulí.

Podle ČSN 73 0540–2: 2011 mají být stavební konstrukce navrženy tak, aby v nich nedocházelo ke kondenzaci vodní páry. Tento požadavek je splněn tehdy, když je v každém místě stavební konstrukce částečný tlak nasycené vodní páry $p_{sat,x}$ (Pa) vyšší než částečný tlak vodní páry p_x (Pa).

$$p_{sat,x} > p_x \quad (14)$$

V jistých případech však lze kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukce připustit. Musí však být splněny tři podmínky:

1. kondenzace vodní páry nesmí ohrozit funkci konstrukce (např. zmenšení trvanlivosti, zhoršení vlastností u tepelných izolací, vznik plísní, apod.);
2. zkondenzované množství vodní páry M_c ($kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) během roku musí být nižší než množství vypařitelné vodní páry M_{ev} ($kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$), tzv. roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry.

$$M_c < M_{ev} \quad (15)$$

3. množství zkondenzované páry uvnitř konstrukce M_c ($kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) musí splňovat podmínku

$$M_c < M_{c,N} \quad (16)$$

Pro jednoplášťové střechy, resp. konstrukce s difúzně málo propustnými vnějšími vrstvami je nižší z hodnot:

$$M_{c,N} = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1},$$

nebo 3 % plošné hmotnosti materiálu ($\rho > 100 \text{ kg} / \text{m}^3$),
nebo 6 % plošné hmotnosti materiálu ($\rho \leq 100 \text{ kg} / \text{m}^3$)

Pro ostatní konstrukce nižší z hodnot:

$$M_{c,N} = 0,50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$$

nebo 5 % plošné hmotnosti materiálu ($\rho > 100 \text{ kg} / \text{m}^3$),
nebo 10 % plošné hmotnosti materiálu ($\rho \leq 100 \text{ kg} / \text{m}^3$).

Šíření vlhkosti probíhající pouze difúzí vodní páry lze popsat následujícím vztahem pro hustotu difúzního toku g :

$$g = \frac{\delta_0}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d} \quad (17)$$

$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\Delta p}{Z_p} \quad (18)$$

kde: Δp je nárůst vnitřního částečného tlaku vodní páry (Pa)
 δ_0 součinitel difúzní vodivosti vzduchu ($m^2 \cdot s^{-1}$)
 x souřadnice (m)
 Z_p difúzní odpor vztahovaný k částečnému tlaku vodní páry (m)
 s_d difúzní tloušťka materiálu ($m \cdot s^{-1}$)
 μ faktor difúzního odporu (-)

V současné době je možné množství zkondenzovaných par v konstrukci počítat podle dvou norem: ČSN EN ISO 13788 nebo ČSN 730540-4. Obě tyto normy vycházejí z velmi jednoduchých výpočetních postupů, které se nazývají Glaserovy metody a byly vyvinuty v 60. letech 20. tého století.

Aktuálně platné technické předpisy uvádí, že pokud nemá-li docházet ke kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukcí, nebo má-li se zmenšit zkondenzované množství vodní páry uvnitř konstrukcí na minimum, je zapotřebí:

1. umísťovat na vnitřní stranu konstrukce vrstvy s vysokým difúzním odporem a pokud je to možné řadit vrstvy v konstrukci tak, aby jejich difúzní odpor postupně směrem k vnější straně klesal. Tímto se zabrání průniku vodní páry z interiéru do konstrukce rozhodně se tak minimalizuje její shromažďování v konstrukci.
2. bezpodmínečně umístit parotěsnou vrstvu na vnitřní stranu konstrukce a opět zabránit průniku vodní pár do konstrukce, je-li na vnější straně konstrukce vrstva s velkým difúzním odporem

3. provést před vnější vrstvou s velkým difúzním odporem expanzně otevřenou vzduchovou vrstvu nebo síť odvětrávacích kanálků, pokud v konstrukci není parotěsná vrstva nebo ji není možno dodatečně zřídit.

4.2 Navrhování stavebních konstrukcí z hlediska difúze vodní páry

V oblasti stavebně fyzikální teorie vlhkostních procesů a sofistikovanějších přístupů k výpočtům skladby střešního pláště se jako nezbytná objevila role parotěsné zábrany, která zamezuje vnikání vlhkosti do souvrství střešního pláště a její případné kondenzaci. Funkce parotěsné zábrany byla řešena asfaltovými pásy nebo kovovými plechy, následně i umělohmotnými foliemi [19].

V souvislosti s problematikou parotěsných zábran se postupně vyhraňovala jako samostatná problematika otázka vlivu jejich nedokonalého spojení při realizaci, neutěsnění v místech pronikajících konstrukcí a zejména poškození při provádění neb při kotvení následných vrstev. Pro odhad nebo hodnocení vlivu těchto jevů se ukázalo jako nutné zabývat se problematikou difúze vodních par otvory v parotěsné zábraně.



Obrázek 4: Bodová perforace – upraven jas a kontrast fotografie pro lepší zřetelnost perforace (zdroj: archiv autora)

Za jeden z prvních výzkumů v této oblasti je považována práce Schule - Reichard [24], kterou zadalo Spolkové ministerstvo pro územní plánování, stavebnictví a výstavbu měst Fraunhoferovu institutu pro stavební fyziku ve Stuttgartu. Tato práce se v roce 1979 zabývala stanovením vlivu tvaru, velikosti a provedení otvorů laboratorními měřicími metodami. Měření byla prováděna na hliníkovém plechu a PVC folii, přičemž u plechů byl zkoumán vliv jako otvorů tak volných přesahů, u folie pak jen vliv volných neslepených přesahů a stala se východiskem pro další experimentální i výpočtová řešení této problematiky.

V konstrukci skladby obalových konstrukcí může docházet ke vzniku spar v místě vzájemných styků stavebních materiálů. Tyto styky mohou být důležitým prostředníkem transportu vlhkosti. V takovém případě tento druh transportu popisujeme jako spárovou difúzi vodní páry. Jestliže připouštíme tento způsob transportu vlhkosti, provedeme hodnocení konstrukce dle ČSN 73 0540–4: 2005.

Pro konstrukci, ve které dochází ke spárové difúzi vodních par, se difúzní odpor konstrukce Z_p ($m \cdot s^{-1}$) stanoví ze vztahu:

$$Z_p = \frac{\sum A_j}{\sum \frac{A_j}{Z_{p,j}}} \quad (19)$$

Kde pro plochu beze spár je difúzní odpor $Z_{p,j}$ ($m \cdot s^{-1}$) difúzní odpor j-tého výseku konstrukce o ploše A_j (m^2) stanovený pro jednorozměrné šíření vlhkosti:

$$Z_{p,j} = \frac{d_j}{\delta_j} \quad (20)$$

kde d_j je tloušťka j=té vrstvy konstrukce (m)
 δ_j je součinitel difúzní vodivosti materiálu j-té vrstvy ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), příp. (s)

Hustota toku vodní páry g (hustota difúzního toku) kolmého k povrchu se určí vzhledem k objemové vlhkosti:

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v} \quad (21)$$

kde Z_v je difúzní odpor vztažený k absolutní vlhkosti vzduchu ($m \cdot s^{-1}$)
 v_1, v_2 objemová vlhkost vzduchu

případně vzhledem k částečnému tlaku vodní páry:

$$g = \frac{P_{v1} - P_{v2}}{Z_p} \quad (22)$$

kde Z_p je difúzní odpor vztažený k částečnému tlaku vodní páry ($m \cdot s^{-1}$)
 P_v částečný tlak vodní páry (Pa)

Pro spáry se stanoví poměr plochy spáry A_j (m^2) a jejího ekvivalentního spárového difúzního odporu $Z_{p,dl,j}$ ze vztahu

$$\frac{A_j}{Z_{p,dl,j}} = \frac{\lambda_j}{\delta_{p,dl,j}} \quad (23)$$

kde $\delta_{p,dl,j}$ je spárová difúzní propustnost vodní páry příp. ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$)
 ℓ_j je délka spáry v m

Např. pro hydroizolaci z mPVC folie tl. 0,16 mm a hliníkový plech tl. 1,0 mm je ekvivalentní difúzní tloušťka s_d (m) materiálu bez perforace a s perforací otvory různého průměru:

Tabulka 1: Závislost podílu plochy otvorů na difúzní tloušťce vybraných materiálů [19, 21 a 23]

podíl plochy otvorů k celkové ploše [%]	folie mPVC tloušťka 0,16 mm s_d (m)	hliníkový plech tloušťka 1,0 mm s_d (m)
0	14,2	54,0
0,03	3,0	5,0
0,3	0,4	0,6
0,5	0,33	0,47
1	0,27	0,27
2	0,22	0,22
3	0,19	0,19
5	0,15	0,15
10	0,08	0,08

Je tedy zřejmé, že při ploše otvorů větších jak 1,0 % z celkové plochy již hodnoty s_d nezávisí na druhu materiálu a že největší změny přináší perforace v do hodnoty 1% z celkové plochy.

Vodní páry obsažené ve vzduchu mají schopnost transportu skrze stavební materiály podobnou jako tepelný tok. Při objasňování dějů spojených s tepelným tokem využíváme gradient teploty, k objasnění toku vodních par používáme gradient částečných tlaků vodních par. Jev, při kterém dochází mezi dvěma prostředními s různými parciálními tlaky vodních par oddělenými stavební konstrukcí k transportu vlhkosti nazýváme difúzí. Vodní páry difundují z prostředí s vyšším tlakem do prostředí, kde tlak vodních par je menší.

Za určitých teplotních podmínek pak může docházet k nežádoucímu jevu kondenzace (obr. 5).



Obrázek 5: Zjevná kondenzace v hydroizolačním souvrství pod hlavní hydroizolací z asfaltových pásů (zdroj : archiv autora)

V České republice se pro hodnocení vlhkostního režimu ve stavebních konstrukcích pracuje s následujícími parametry difúzních konstant.

Faktor difúzního odporu μ vyjadřuje relativní schopnost materiálu propouštět vodní páry. Součinitel difúze vodní páry δ_p vyjadřuje schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí. Jejich vzájemný vztah popsat následovně:

$$\mu = \frac{1}{N \cdot \delta_p} \quad (24)$$

kde μ je faktor difúzního odporu (-)
 N teplotní difúzní funkce (s^{-1})
 δ_p součinitel difúzní vodivosti (s)

Velmi často se u materiálových vlastností stavebních výrobků používá parametr difúzní tloušťka materiálu označována s_d , nebo lze také najít hodnoty udávané jako difúzní odpor materiálu Z_p .

$$s_d = \mu \cdot d \quad (25)$$

$$Z_p = \mu \cdot d \cdot N \quad (26)$$

kde s_d je difúzní tloušťka materiálu (m)

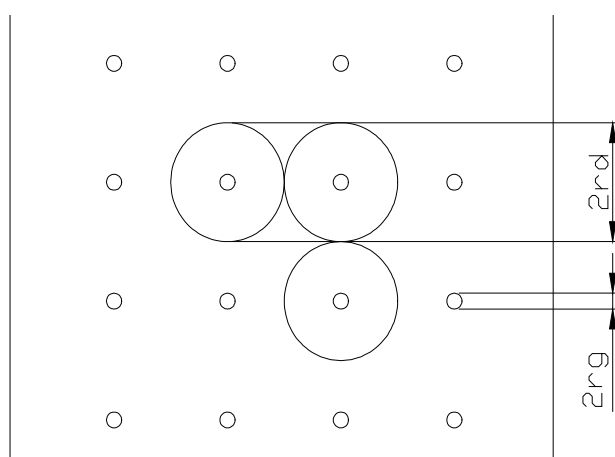
μ faktor difúzního odporu (-)

d tloušťka materiálu (m)

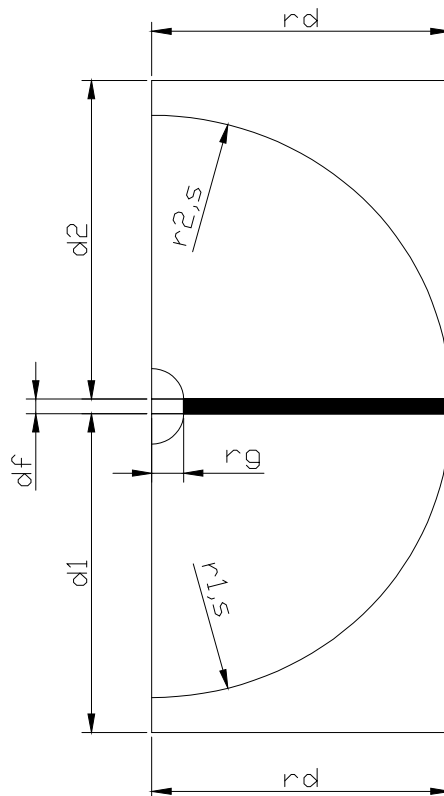
N teplotní difúzní funkce (s^{-1})

Způsobů, jakými je možno redukovat difúzní odpor stávajících střešních konstrukcí je několik, avšak pro sanace střech jsou nejobvyklejší způsoby bodové perforování stávající hydroizolace a nebo liniové prořezání hydroizolace.

Hodnoty faktoru difúzního odporu po zabudování se odvíjejí od způsobu perforace stávajících vrstev a kotvení nově prováděné hydroizolace. Hodnotu faktoru difúzního odporu perforované izolace lze určit následovně [23].



Obrázek 6: Schéma perforace - vzdálenost děr perforace je $2r_d$, poloměr perforace je r_g [23]



Obrázek 7: Příčný řez otvorem perforace, sférický model [23]

Popis distribuce vlhkosti lze popsat Fickovým zákonem:

$$\vec{j}_v = \frac{\delta}{\mu} \nabla p_v \quad (27)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla p_v \right) = 0 \quad (28)$$

kde j_v je hustota toku vodní páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
 μ faktor difúzního odporu (-)
 δ součinitel difúzní vodivosti (s)

Při uvažovaném spolupůsobení dvou materiálů pak platí následující:

$$\vec{n} \cdot \vec{j}_{v,1} = \vec{n} \cdot \vec{j}_{v,2} \quad (29)$$

kde j_v je hustota toku vodní páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Při distribuci vlhkosti se standardně počítá pouze s jednodimenzionálním transportem, jestliže však budeme uvažovat vícerozměrný transport vlhkosti, lze pak uvažovat se symetrií ve tvaru polokoule nad perforovaným otvorem. V tomto případě je odpor vyjádřen pro část vně fólie:

$$Z_{1,s} = \frac{\mu_1}{2\pi\delta} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_{1,s}} \right) \quad (30)$$

$$Z_{1,s} = \frac{\mu_1}{3\pi\delta r_s} \quad (31)$$

kde μ_1 je faktor difúzního odporu (-)

δ součinitel difúzní vodivosti (s)

r_s poloměr polokoule pod/nad perforovaným otvorem (m)

A pro otvor perforace ve fólii platí následující vztah:

$$Z_g = \frac{\mu_g d_1}{\pi\delta r_s^2} \quad (32)$$

kde Z_g je difúzní odpor v místě perforace ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

μ_g faktor difúzního odporu (-)

δ součinitel difúzní vodivosti (s)

d_1 tloušťka vrstvy pod hydroizolací (m)

r_s poloměr polokoule pod perforovaným otvorem (m)

Celkový odpor pak lze získat součtem dílčích odporů jednotlivých vrstev

$$Z_t = \frac{1}{\pi\delta} \left[\mu_1 \left(\frac{5}{6r_s} - \frac{1}{2r_{1,s}} \right) + \mu_2 \left(\frac{5}{6r_s} - \frac{1}{2r_{2,s}} \right) + \frac{\mu_g d_f}{r_s^2} \right] \quad (33)$$

- kde μ_1 je faktor difúzního odporu materiálů pod hydroizolací (-)
 μ_g faktor difúzního v místě perforace (-)
 μ_2 faktor difúzního odporu materiálů nad hydroizolací (-)
 δ součinitel difúzní vodivosti (s)
 d_f tloušťka vrstvy hydroizolace (m)
 d_1 tloušťka vrstvy nad/pod hydroizolací (m)
 r_s poloměr polokoule nad/pod perforovaným otvorem (m)

Efektivní faktor difúzního odporu perforované fólie

$$Z_{tot,eff} = \frac{\mu_1 r_d + \mu_{per} d_f + \mu_2 r_d}{\pi\delta r_d^2} \quad (34)$$

- kde μ_1 je faktor difúzního odporu materiálů pod hydroizolací (-)
 μ_{per} faktor difúzního odporu hydroizolace (-)
 μ_2 faktor difúzního odporu materiálů nad hydroizolací (-)
 d_f tloušťka vrstvy hydroizolace (m)
 r_d polovina vzdálenosti mezi otvory perforace (m)
 δ součinitel difúzní vodivosti (s)

4.3 Výpočet a návrh způsobu perforace

Teorie výpočtu je rozvedena v kapitole 4.2. Hodnoty faktoru difúzního odporu hydroizolace po zabudování se odvíjejí od způsobu perforace stávajících vrstev a kotvení nově prováděné hydroizolace. Hodnotu faktoru difúzního odporu perforované izolace lze určit následovně.

$$\mu_{per} d_f = r_d^2 \left[\mu_1 \left(\frac{5}{6r_g} - \frac{1}{2r_{1,s}} - \frac{r_{1,s}}{r_d^2} \right) + \mu_2 \left(\frac{5}{6r_g} - \frac{1}{2r_{2,s}} - \frac{r_{2,s}}{r_d^2} \right) + \frac{\mu_g d_f}{r_g^2} \right] \quad (35)$$

- kde μ_{per} je faktor difúzního odporu hydroizolace (-)
 d_f tloušťka vrstvy hydroizolace (m)
 r_d polovina vzdálenosti mezi otvory perforace (m)
 r_g polovina vzdálenosti mezi otvory (m)
 μ_1 faktor difúzního odporu materiálů pod hydroizolací (-)
 μ_2 faktor difúzního odporu materiálů nad hydroizolací (-)
 μ_g faktor difúzního odporu v místě perforace (-)

Výpočet podle Van der Spoela lze aplikovat v případě, že plocha perforace nepřesahuje hodnotu 5% velikosti neporušené plochy. V takovém případě je odchylka numerického výpočtu do 15 % od experimentálních měření. V případě návrhu perforace kdy vzdálenost mezi otvory je několikanásobně větší než velikost samotného otvoru $r_d \gg r_g$ pak lze použít aproximaci

$$\mu_{per} d_f = \frac{r_d^2}{r_g} \left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6} + \frac{\mu_g d_f}{r_g} \right) \quad (36)$$

Pro vyjádření hodnoty velikosti perforace, byla provedena substituce a upraven vztah do následujícího tvaru:

$$r_{g1,2} = \frac{2\mu_g d_f}{-\left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6}\right)^2 - \frac{4\mu_g \mu_{per} d_f^2}{r_d^2}}} \quad (37)$$

Jestliže je splněna podmínka:

$$\left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6}\right)^2 - \frac{4\mu_g \mu_{per} d_f^2}{r_d^2} > 0 \quad (38)$$

pak výsledný vztah pro výpočet velikosti perforace má tvar:

$$r_{g1,2} = \frac{2\mu_g d_f}{\sqrt{\left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6}\right)^2 - \frac{4\mu_g \mu_{per} d_f^2}{r_d^2} - \left(\frac{5\mu_1}{6} + \frac{5\mu_2}{6}\right)}} \quad (39)$$

Při návrhu nového střešního pláště je potřeba zohlednit několik faktorů zásadní způsobem ovlivňující jeho návrh. V rámci stavebně technického průzkumu je potřeba dostatečným způsobem zdokumentovat všechny konstrukce, které budou dotčeny navýšením tloušťky střešního pláště aplikací doplňkové tepelné izolace a hydroizolačního souvrství. V rámci výpočtů tepelně technických parametrů jsou tyto informace zohledněny v tloušťce a materiálu doplňkové tepelné izolace.

Na základě tepelně technických požadavků na součinitel prostupu tepla je stanovena skladba konstrukce. Dalším z kroků je kontrola vlhkostní bilance u nové skladby střešního pláště. Jestliže je bilance negativní je potřeba úpravy faktoru difúzního odporu stávající hydroizolace perforací. Zpětně je pak zohledněna nová hodnota difúzního odporu hydroizolace ve výpočtu a následně prokázána kladná vlhkostní bilance ve vztahu k navrženému způsobu perforace.

4.4. Hodnocení množství zkondenzovatelných vodních par

V současné době se běžně při navrhování realizace oprav určuje návrhové množství zkondenzovatelných par v konstrukci podle dvou norem: ČSN EN ISO 13788 nebo ČSN 730540-4. Normové metody používají následující vztahy pro transport vzdušné vlhkosti:

$$g = \delta_p \cdot \frac{\Delta p}{d} = \frac{\delta_o}{\mu} \frac{\Delta p}{d} = \delta_o \cdot \frac{\Delta p}{s_d} \quad (40)$$

kde g je hustota difúzního toku,
 δ je součinitel difúzní propustnosti (vodivosti) materiálu,
 Δp je rozdíl částečných tlaků vodní páry,
 d je tloušťka materiálu,
 μ je faktor difúzního odporu,

Tyto vztahy vycházejí ze základního vztahu nevratné termodynamiky pro popis transportu vzdušné vlhkosti z 1.Fickova zákona:

$$\bar{g} = \delta \text{ grad } p \quad (41)$$

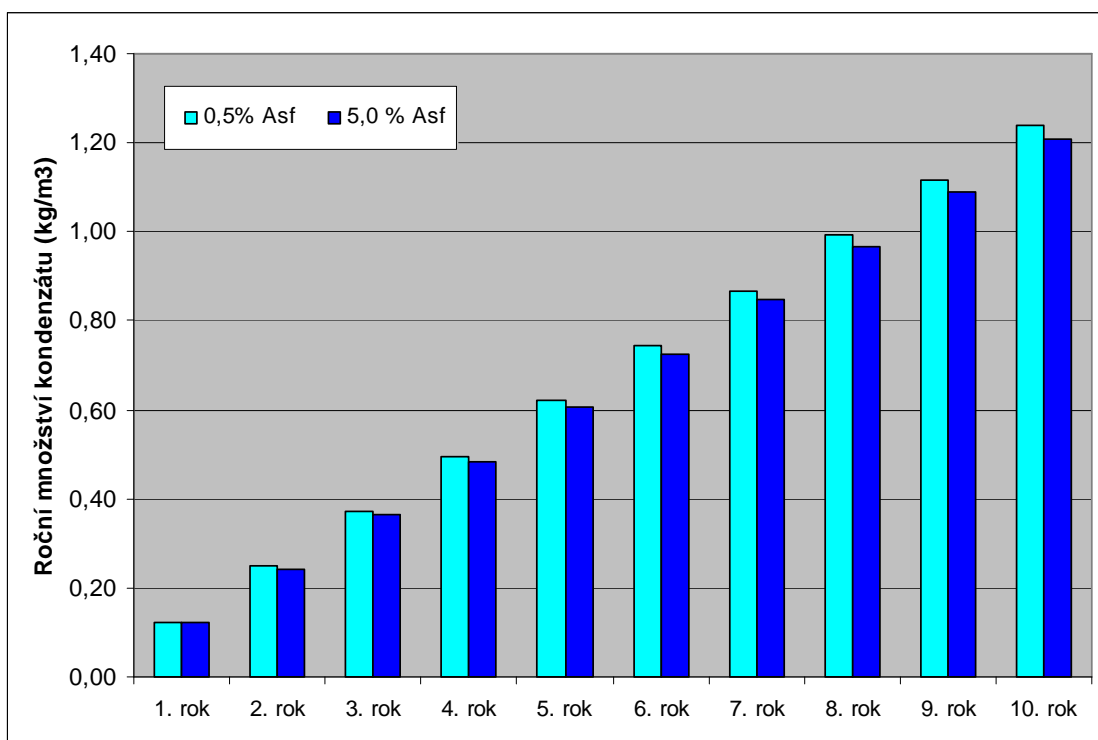
kde δ je součinitel difúzní propustnosti materiálu,
 p je částečný tlak vodní páry
 g je hustota hmotnostního toku

Hnací silou celého procesu je zde gradient částečného tlaku vodní páry a vlastnosti materiálu vyjadřuje součinitel difúzní propustnosti δ . Za zmínku stojí, že 1.Fickův zákon je čistý jev difúze, který je ovšem ve skutečnosti ovlivněn dalšími faktory: teplotou, tlakem, koncentrací solí, gravitací, elektrickým polem i fázovými změnami.

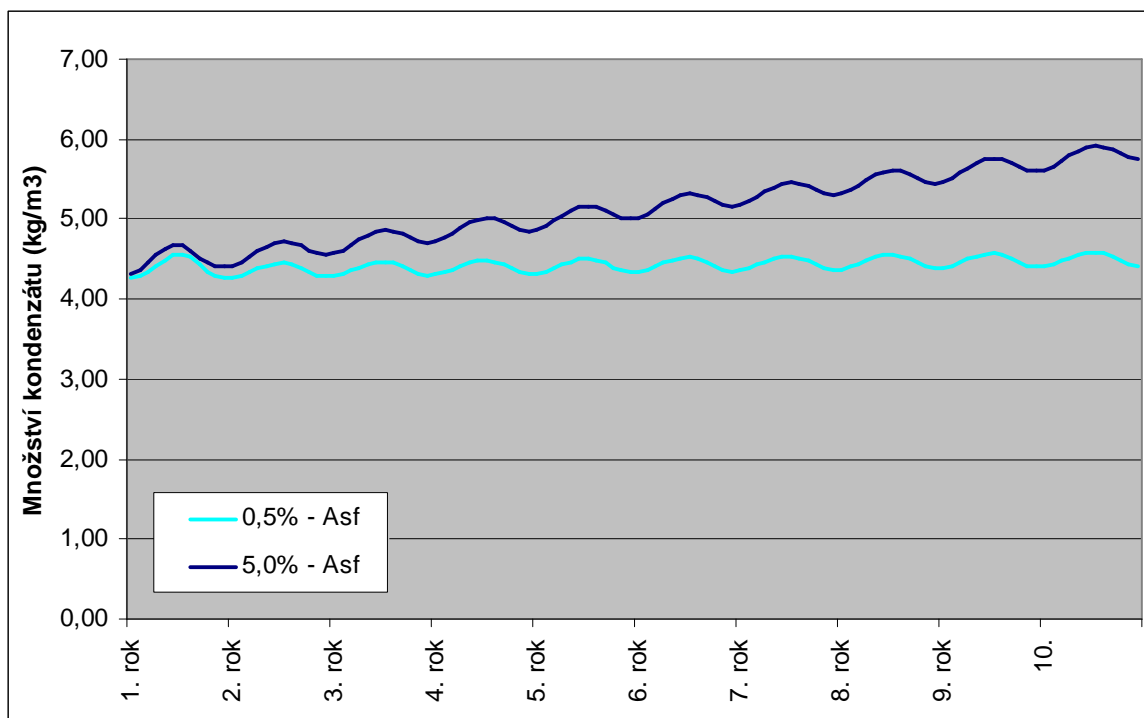
Vztahy (40) a (41) uvažují s konstantními vlastnostmi materiálů, tj. s konstantní hodnotou součinitele difúzní propustnosti materiálu δ . Podle provedených měření ve světě [23,25,39], se ukazuje, že tomu tak ve

skutečnosti není a součinitel difúzní propustnosti je závislý na relativní vlhkosti prostředí, ve které se daný materiál nachází. Obecně lze vyjádřit, že u materiálů s velkým difúzním odporem (velkou hodnotou ekvivalentní difúzní tloušťky) respektive s malou propustností pro vodní páry je hodnota součinitele difúzní propustnosti materiálu konstantní tedy nezávislá na relativní vlhkosti prostředí. U materiálů, které jsou propustné pro vodní páry, není tato závislost konstantní, ale závisí na relativní vlhkosti prostředí.

Velmi zajímavé je grafické srovnání ukazující, jakým způsobem se mění vlhkostní bilance ve skladbě při použití různých způsobů bodové perforace. Při výpočtu dle metodiky ČSN 730540 bez započtení akumulované vlhkosti a vlivu radiace slunečního záření je z grafu patrné pouze množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$). Výpočet dle metodiky ČSN EN ISO 13788 s vlivem sluneční radiace a započtení akumulované vlhkosti umožňuje sledovat množství kondenzátu v průběhu klimatického roku. Pro názornost byl proveden výpočet bilance vlhkosti pro 5 let.



Graf 1: Množství kondenzátu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) dle metodiky výpočtu bilance vlhkosti dle ČSN 730540, bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace (zdroj: archiv autora)



Graf 2: Množství kondenzátu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dle metodiky výpočtu bilance zkondenzované a vypařené vlhkosti dle ČSN EN ISO 13788 (zdroj: archiv autora)

Při výpočtu zkondenzované vlhkosti podle norem ČSN EN ISO 13788 nebo ČSN 730540-4 jsou zanedbány další vlivy, které avšak mají výrazný podíl na šíření vlhkosti uvnitř střešního pláště.

- **zanedbání pohybu kapalně vlhkosti** při výpočtu množství zkondenzované vlhkosti uvnitř střešního pláště je podle výše zmíněných norem zanedbán vliv šíření kapalně vlhkosti. Vlivem gravitaci se bude množství zkondenzované vlhkosti pohybovat směrem zemské tíhy a negativně tak ovlivní vlastnosti materiálů, které jsou prostupné pro kapalnou vlhkost. To má negativní vliv na součinitel prostupu tepla i na součinitel difúzní propustnosti materiálů a změní se tak rozložení vlhkosti a teploty ve střešním plášti.

- **zanedbání pohybu vzduchu** má velmi negativní vliv na transport tepla a vlhkosti především u lehkých obalových konstrukcích. U těžkých konstrukcích je většinou provedena masivní vrstva, která je pro proudění vzduchu téměř nepropustná.

- **normové okrajové podmínky** – Je zřejmé že v průběhu měsíce či dne nebudou vnější i vnitřní okrajové podmínky konstantní jak to předpokládají tepelně technické normy. Vnitřní okrajové podmínky, které jsou v normách deklarovány s dostatečnou bezpečnostní přírážkou, budou v převážných případech působit na straně bezpečnosti. Vnější okrajové podmínky, které jsou stanoveny statistiky z dlouhodobého měření, mohou například ve výpočtu zkondenzovaného množství vlhkosti uvnitř střešního pláště vést k podcenění návrhu střešní skladby, ve které bude docházet ke kondenzaci vodních par, přestože podle normového výpočtu střešní skladba vyhoví na nulové množství zkondenzované vlhkosti

- **jednorozměrné šíření vlhkosti** – při hodnocení šíření vlhkosti v konstrukcích podle vztahu (1), který využívají české tepelně technické normy a který je uveden na začátku příspěvku, je uvažováno (narozdíl od vztahu (2)) pouze s jednorozměrným šířením vzdušné vlhkosti. Toto zjednodušení je opodstatněné pouze pokud materiály zabudované ve střešní konstrukci budou homogenní a konstrukce bude mít rovinný charakter. V případě, že materiály zabudované do konstrukce budou sčecnými nehomogenitami (spáry mezi jednotlivými dílci, otvory apod.), nebo střešní plášť nebude mít rovinný charakter (stavební detaily), dojde k vícerozměrnému šíření vlhkosti a do střešního pláště se dostane výrazně vyšší množství vlhkosti než předpokládají jednoduché výpočetní postupy podle tepelně technických norem. Podrobněji viz[7].

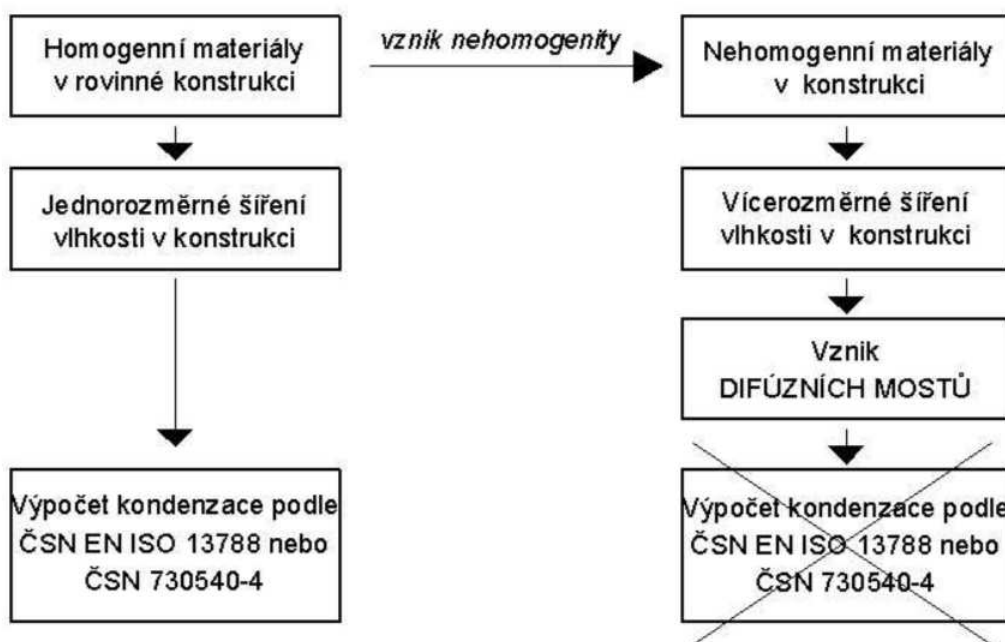
- **působení solárního a dlouhovělného záření solární záření** - Solární záření je zcela opomenuto ve výpočtu zkondenzované vlhkosti uvnitř konstrukce podle ČSN EN ISO 13788. Ve výpočtu podle normy ČSN 730540-4 je zahrnut vliv solárního záření v podobě četnosti zatažených a jasných dnů tj. v podobě četnosti ekvivalentní teploty venkovního vzduchu při jasné obloze a při zatažené obloze. Podle normy je možno použít vliv solárního záření pouze v případě, kdy na střešní konstrukci bude po celou dobu životnosti nerušeně dopadat sluneční záření.

V případě nezapočítání slunečního záření do tepelně technického výpočtu podle normy ČSN 730540-4 a při výpočtu podle normy ČSN EN ISO 13788 budou výpočty na straně bezpečnosti z dlouhodobého horizontu.

Sluneční záření však může působit i negativně, a to v případech kdy po dlouhotrvajících mrazech se nahromadí zkondenzované množství vlhkosti pod hydroizolačním souvrstvím. Díky slunečním paprskům dojde k rychlému zahřátí teploty a ke změně skupenství vlhkosti a tedy k rychlému zvětšení objemu. Může tak dojít k porušení hydroizolačního souvrství.

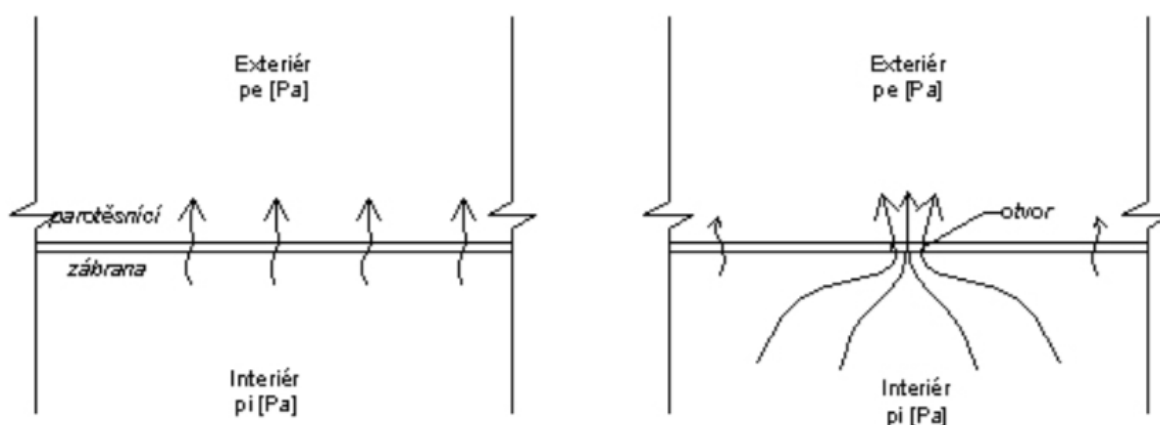
Dlouhovlnné záření působí tak, že dochází k výměně energie zvýšeným tepelným tokem mezi střešním pláštěm a oblohou. Výsledkem je výrazně nižší vnější povrchová teplota, což zapříčiní zvýšení zkondenzované vlhkosti uvnitř střešního pláště. Tento negativní vliv není zahrnut ani v české normě ČSN 730540-4 ani v evropské normě ČSN EN ISO 13788. [8]

České normy tak uvažují pouze jednorozměrný hmotnostní tok vlhkosti a to nejčastěji pouze ve směru kolmém na souvrství stavební konstrukce. Takové zjednodušení je možné pouze v případě homogenních vlastností použitých materiálů a rovinného uspořádání celé konstrukce. Ve skutečnosti však materiály zabudované do stavební konstrukce jsou často nehomogenní ať už v důsledku poškození, napojování nebo konstrukčního uspořádání. Současně se objevují i konstrukční detaily, který nemají rovinný ráz, a tudíž je nelze počítat podle normových metod.



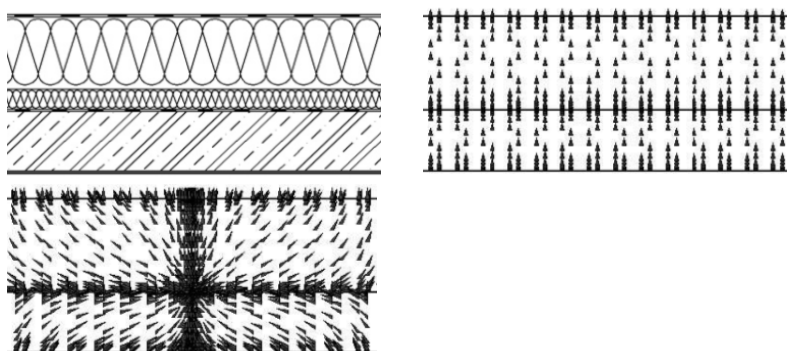
Obrázek 8: Schéma aplikovatelnosti metodik výpočtu pro konstrukce s a bez difúzních mostů [26]

Na následujících obrázcích jsou znázorněny schémata střešních konstrukcí. Na prvním obrázku je parotěsnicí vrstva s homogenními vlastnostmi. Na druhém obrázku je znázorněno porušení parotěsnicí vrstvy, což způsobí vícerozměrný transport vlhkosti do konstrukce střešních vrstev, a tak dojde k vytvoření difúzního mostu v místě porušení parotěsnicí vrstvy. Výrazně se zvýší transport vlhkosti do dalších vrstev střešního souvrství konstrukce [26].



Obrázek 9: Vlevo schéma střešního pláště s homogenními materiály, vpravo schéma střešního pláště s nehomogenními materiály [26]

Při perforaci původního asfaltového pásu dojde k narušení homogenního pole. Dochází tak k změně difúzního tlaku jednosměrného šíření na šíření dvou- a třírozměrné, resp. třírozměrné.



Obrázek 10: Schéma zobrazení difúzních tlaků uvnitř homogenní konstrukce a následně po perforaci vrstvy původní hydroizolace [26].

Z výše uvedených informací je zřejmé, že postupy podle zmíněných českých technických norem pro tepelně vlhkostní hodnocení stavebních konstrukcí i pro hodnocení energetické náročnosti budov jsou velmi zjednodušené, neodpovídají nejnovějším poznatkům ze světa tepelné techniky, a mohou tak vést ke zkreslujícím závěrům.

Cílem následujícího textu je popsat a na názorných příkladech ukázat přesnější metodu pro hodnocení šíření tepla a vlhkosti stavebními konstrukcemi a porovnat tuto metodu s normovými postupy.

V tuzemském prostředí se stavebně fyzikálními výpočty a tvorbou softwaru pro tyto účely zabývá dlouhodobě doc. dr. Ing. Zbyněk Svoboda z Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze a jeho firma K-CAD Svoboda Software. Vytvořil celý komplex softwaru pro jednotlivé účely shrnutý v souboru Stavební fyzika. Z něho pak pro účely této práce byl využíván software TEPLO, který představuje široce užívanou a normativně institucionalizovanou pomůcku. Nicméně je nutno konstatovat, že se jedná o postupy časově statické pracující pouze s několika vybranými vstupními proměnnými a pouze se stacionárním jednorozměrným šířením tepla kolmo na konstrukci.

Program TEPLO 2017 je určen pro základní tepelně technické posouzení skladby stavební konstrukce z hlediska prostupu tepla a vodní páry. Umožňuje detailní výpočet tepelného odporu a součinitele prostupu tepla, vnitřní povrchové teploty, poklesu dotykové teploty podlahové konstrukce, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci a oblasti kondenzace a roční bilance zkondenzované vodní páry. Zohledňuje požadavky ČSN 730540-2 a STN 730540-2 a postupy ČSN 730540-4, EN ISO 6946 a EN ISO 13788.

Pro co nejpřesnější modelování stavů ve skladbách plochých střeš je nutné využívat sofistikované softwary, které umožní zohlednění prostorového řešení konstrukce. Mezi tyto softwary vhodné pro stavební praxi patří například software WUFI či Delphin.

Využití programu WUFI české technické normy akceptují. Což zmiňuje článek 6.3 normy ČSN 730540-2, který umožňuje pokročilejší

výpočtové metody podle ČSN EN 15026. A software WUFI požadavky normy ČSN EN 15026 na simulační software umožňující dynamické simulace šíření vlhkosti a tepla stavebních konstrukcí splňuje.

Ve světě se objevily první fyzikální modely vzájemného šíření tepla a vlhkosti v porézních materiálech již v 50. letech 20. století (de Vries). Rozvoj těchto modelů nastal v 70. letech (Krischer, Lykov) a v 90. letech se objevily první výpočetní modely vzájemného šíření tepla a vlhkosti v porézních materiálech (Pedersen, Künzeli, Grunewald) [16]. V roce 2003 bylo porovnáno D. Hillem 45 různých výpočetních programů predikujících šíření tepla a vlhkosti stavebními konstrukcemi s cílem vybrat v hodné výpočetní programy, které lze použít při návrzích rekonstrukcí stávajících budov. Pro hodnocení šíření tepla a vlhkosti obalovými konstrukcemi byly nakonec doporučeny dva numerické modely MATCH a WUFI [26].

Výpočetní numerický model WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär – Teplo a vlhkost nestacionárně) vznikl na základě dizertační práce H. M.Künzela [16] a tento model vychází z následující soustavy diferenciálních rovnic:

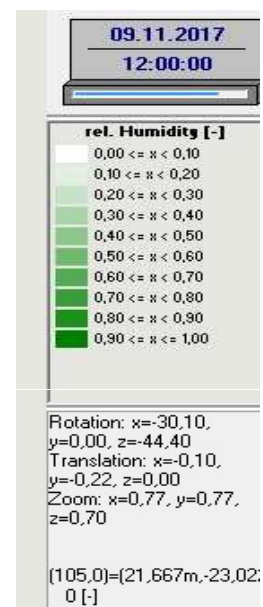
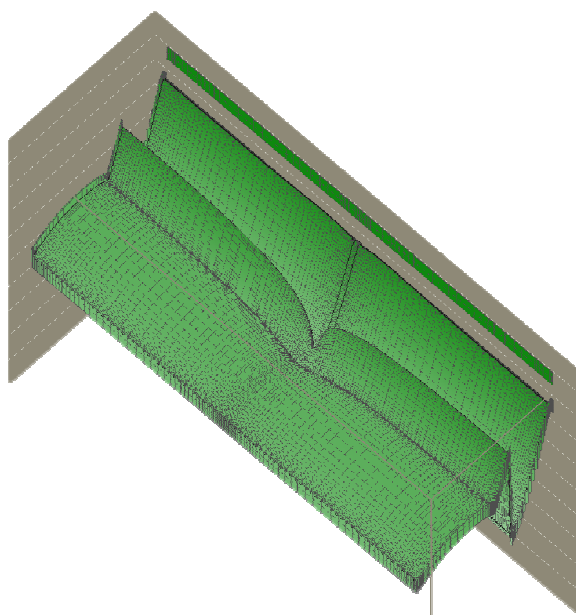
$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (42)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (43)$$

Künzelova soustava diferenciálních rovnic je unikátní tím, že jedinou neznámou v jednotlivých rovnicích je pouze teplota, respektive relativní vlhkost. Výhodou této soustavy rovnic je i to, že jednotlivé rovnice (42) a (43) jsou vzájemně svázány, tj. částečný tlak vodních par závisí na okamžité teplotě napříč konstrukcí, součinitel tepelné vodivosti závisí na aktuální vlhkosti v materiálu a skupenské teplo závisí na množství vlhkosti vyskytující se napříč konstrukcí.

Künzelův numerický model na rozdíl od stacionárních normových postupů uvedených v souboru tepelně-technických norem ČSN 73 05 40 umožňuje:

- dynamicky simulovat šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích s libovolným časovým krokem
- natočit konstrukci vůči světovým stranám i vůči horizontální rovině,
- zahrnout vliv slunečního a dlouhovlnného záření na šíření tepla a vlhkosti,
- uvažovat s akumulací tepla a vlhkosti v jednotlivých vrstvách konstrukce,
- vzít v úvahu závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na množství vlhkosti v materiálu,
- vzít v úvahu závislost faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti v materiálu,
- uvažovat se šířením kapalné vlhkosti v porézních materiálech,
- zahrnout absorpci hnaného deště na vnější povrch stavební konstrukce.



Obrázek 11: Schéma pole difúzních tlaků v dvourozměrném teplotním poli u skladby s perforovanou hydroizolací v softwaru WUFI Pro (zdroj: archív autora)

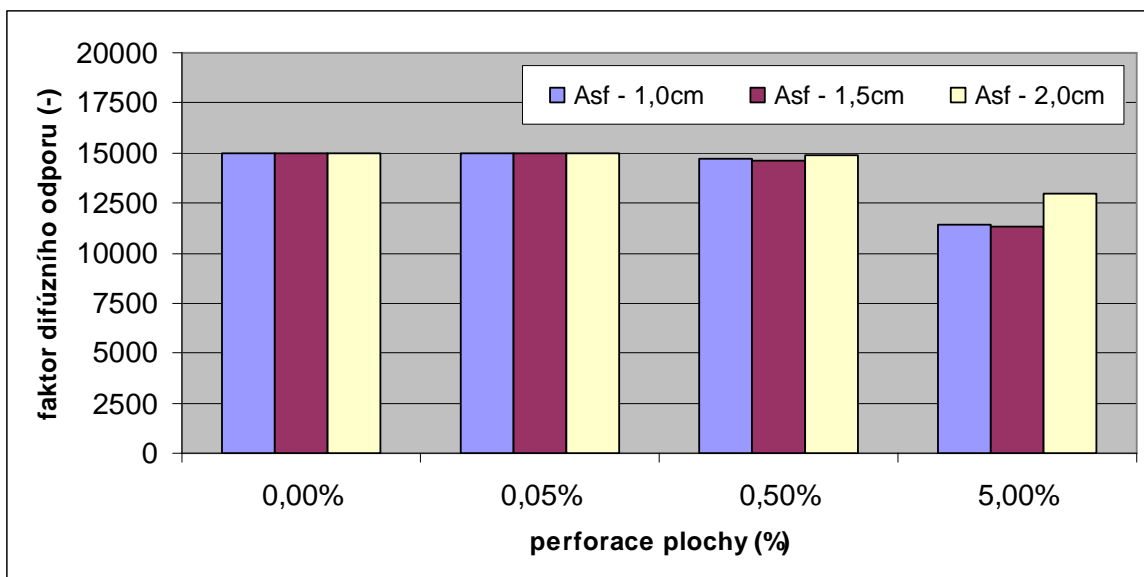
4.4 Vliv způsobu perforace na hodnotu faktoru difúzního odporu

Jakým způsobem v závislosti na velikosti otvorů perforace a jejich vzájemné vzdálenosti se mění faktor difúzního odporu je uvedeno v následujících tabulkách s přehled hodnot faktoru difúzního odporu asfaltového pásu IPA 400 a jeho redukce při úpravě hydroizolace perforací při rekonstrukcích.

Hodnoty byly získány výpočtem dle Spoela [23], s okrajovými podmínkami výpočtu:

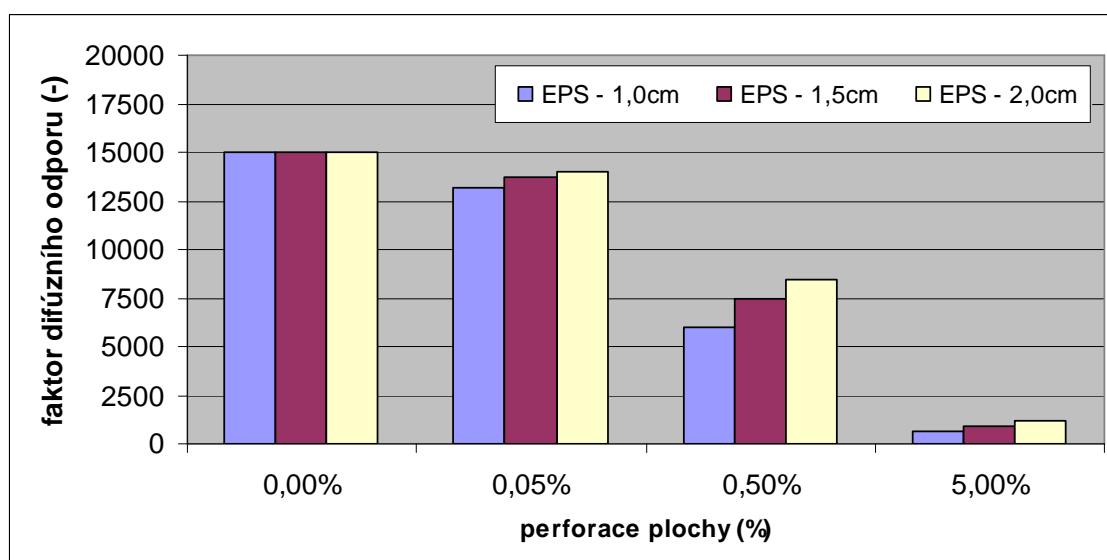
- odchylka výpočtu a reálného modelu do 15 % je zaručena dodržáním plochy perforace do hodnoty 5 % z celku.
- poměr vzdálenosti otvorů perforace a jejich velikosti. Velikost perforace r_g musí být řádově menší než vzdálenost perforace $r_d \gg r_g$.

Výše uvedená metodika výpočtu perforace dle [23] je aplikovatelná za předpokladu, kdy perforovaný pás je umístěn mezi vrstvami s nižším difúzním odporem. Jak je uvedeno v grafu 3, při umístění perforovaného pásu přímo pod hydroizolační souvrství dochází při výpočtu různých způsobu perforace plochy 5% k odchylkám v hodnotě faktoru difúzního odporu.



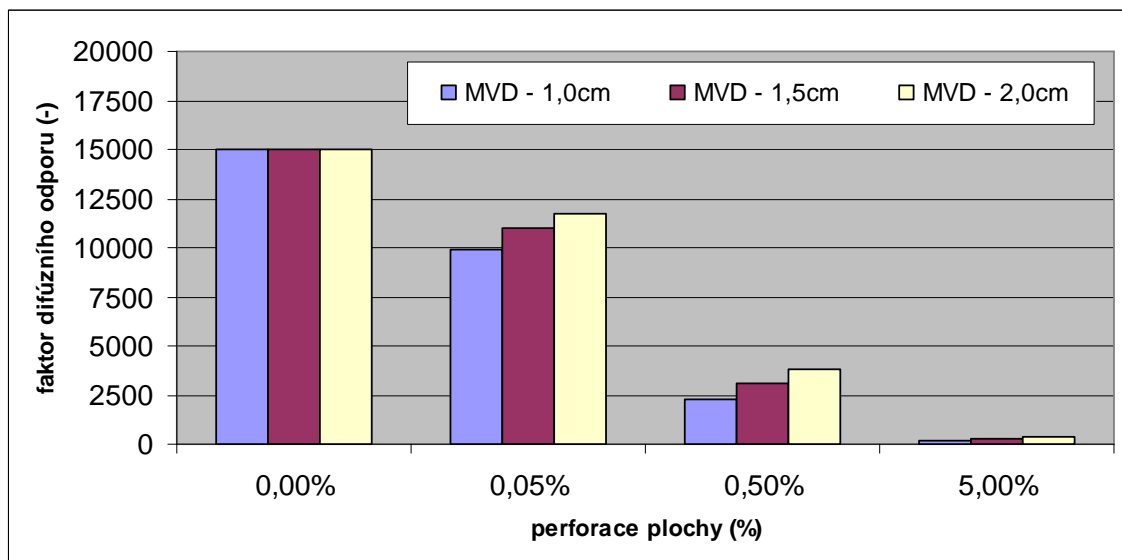
Graf 3: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěno nové hydroizolační souvrství (zdroj: archív autora).

Při umístění perforovaného pásu mezi vrstvy EPS případně mezi vrstvu EPS a MVD je přímá závislost mezi velikostí otvorů perforace a výsledným faktorem difúzního odporu perforovaného pásu.



Graf 4: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěna nová skladba s tepelnou izolací EPS a hydroizolačním souvrstvím (zdroj: archív autora).

Čím větší je velikost perforačních otvorů a jejich vzdálenost tím větší je vypočtený součinitel difúzního odporu při zachování stejného procenta perforace plochy.



Graf 5: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěna nová skladba s tepelnou izolací MVD a hydroizolačním souvrstvím (zdroj: archív autora).

Tabulka 2: Počet otvorů perforace hydroizolačního asfaltového pásu (zdroj: archív autora)

Perforace v závislosti na vzdálenosti				
osová vzdálenost perforace	50 cm	25 cm	20 cm	10 cm
počet otvorů	4 ks	16 ks	25 ks	100 ks
průměr perforace při 0,05%	0,013 m	0,006 m	0,005 m	0,003 m
průměr perforace při 0,50%	0,040 m	0,020 m	0,016 m	0,008 m
průměr perforace při 5,00%	0,126 m	0,063 m	0,050 m	0,025 m

Z výsledků v tabulce uvedených je zřejmé, že je podstatně výhodnější z hlediska pracnosti i cenové nákladovosti používat bodové perforace s průměrem menším jak 20 mm a jejich vzdálenost volit dle hodnoty

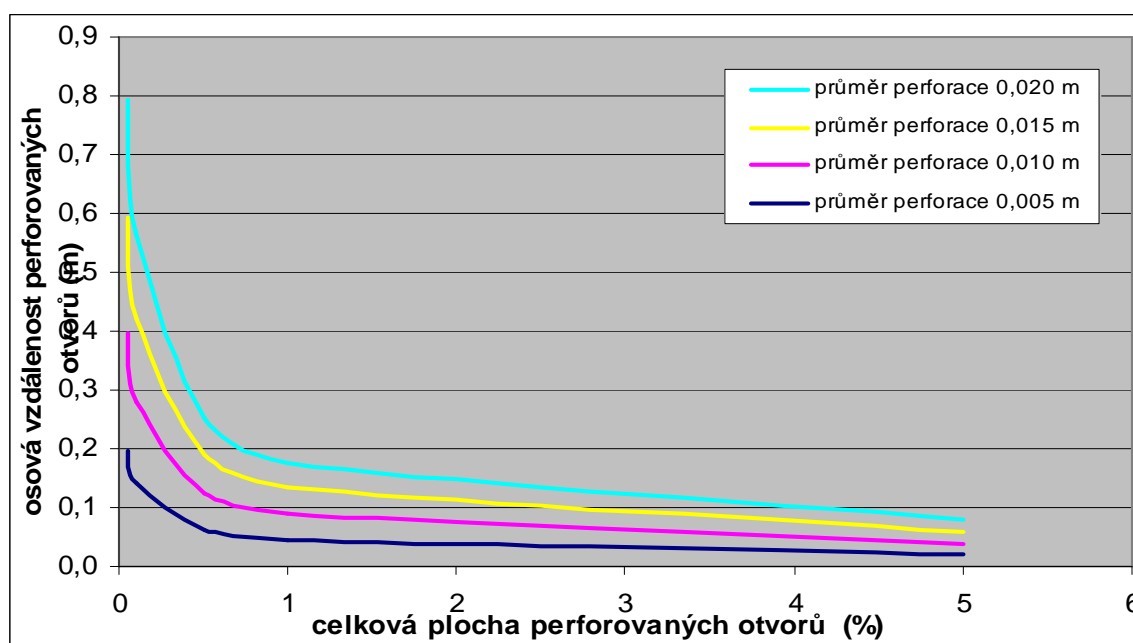
μ potřebné pro dosažení optimálních parametrů skladby z hlediska celkové roční zkondenzované a odpařené vlhkosti.

Tabulka 3: Vzdálenost otvorů perforace asfaltového pásu v závislosti na jejich počtu a procentu perforované plochy (zdroj: archív autora)

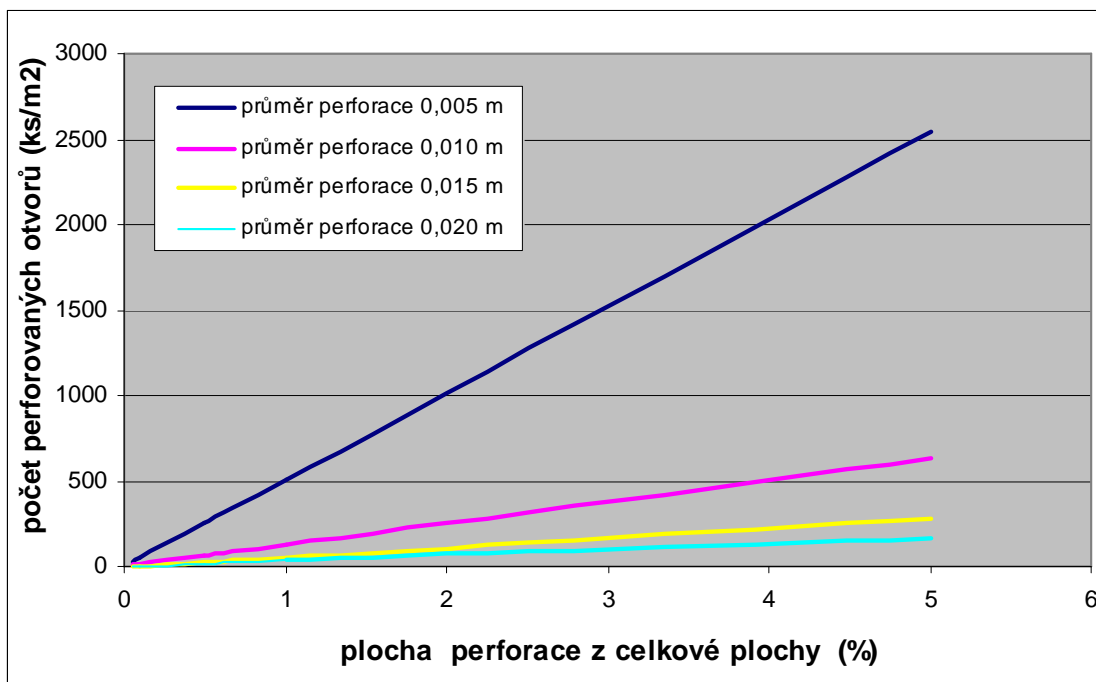
Perforace v závislosti na velikosti otvorů				
průměr perforace	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
procento perforace	0,05 %	0,05 %	0,05 %	0,05 %
počet otvorů / m ²	25,5 ks	6,4 ks	2,8 ks	1,6 ks
osová vzdálenost perforace	0,1982 m	0,3963 m	0,5945 m	0,7927 m
procento perforace	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %
počet otvorů	50,9 ks	12,7 ks	5,7 ks	3,2 ks
osová vzdálenost perforace	0,1401 m	0,2802 m	0,4204 m	0,5605 m
Perforace v závislosti na velikosti otvorů				
průměr perforace	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
procento perforace	0,50 %	0,50 %	0,50 %	0,50 %
počet otvorů	254,6 ks	63,7 ks	28,3 ks	15,9 ks
osová vzdálenost perforace	0,0627 m	0,1253 m	0,1880 m	0,2507 m
procento perforace	1,00 %	1,00 %	1,00 %	1,00 %
počet otvorů	509,3 ks	127,3 ks	56,6 ks	31,8 ks
osová vzdálenost perforace	0,0443 m	0,0886 m	0,1329 m	0,1772 m
procento perforace	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %

počet otvorů	2546,5 ks	636,6 ks	282,9 ks	159,2 ks
osová vzdálenost perforace	0,0198 m	0,0396 m	0,0594 m	0,0793 m

Bodová perforace je samozřejmě jednodušší a cenově méně nákladná, současně v průběhu prací podstatně menší měrou ovlivňuje vodotěsnost střechy v průběhu prací, neboť perforace je možno provádět souběžně s prováděním nových vrstev, takže obnova hydroizolační funkce je bezprostřední.



Graf 6: Závislost celkové plochy perforace na osové vzdálenosti perforovaných otvorů, zobrazeno pro jednotlivé průměry otvorů (zdroj: archív autora)



Graf 7: Závislost celkové plochy perforace na počtu perforovaných otvorů pro jednotlivé průměry otvorů (zdroj: archív autora)

Bodová perforace je mimo to také velmi účinná pro eliminaci boulení a vrásnění hydroizolací jenž je projevem uzavřené vlhkosti ve střešním plášti.



Obrázek 12: Provádění bodové perforace stávajícího střešního souvrství (zdroj: archív autora)

Tyto jevy jsou vyvolány tlakem vodních par pod hydroizolační vrstvou, které vznikají v důsledku prudkého ohřevu materiálu střešního pláště, zejména tepelně izolační vrstvy nebo vrstev betonových potěrů, s uzavřenou vlhkostí vlivem slunečního záření a jak v letních tak i v zimních měsících.



Obrázek 13: Pohled na střešní plášť s vrásněním (zdroj : archiv autora)

Jak velké tlaky působí ve skladbě střechy s uzavřenou vlhkostí mohou vznikat, lze ukázat na modelovém příkladu, kdy střešní plášť je zahříván sluncem na teplotu 60 °C (v letním období se max. teploty pohybují nad hodnotou 80 °C), teplota na začátku dne se pohybuje okolo 20 °C.

Při výpočtu uvažujeme Charlesův zákon, tlak daného látkového množství plynu je přímo úměrný absolutní teplotě.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = konst. \quad (38)$$

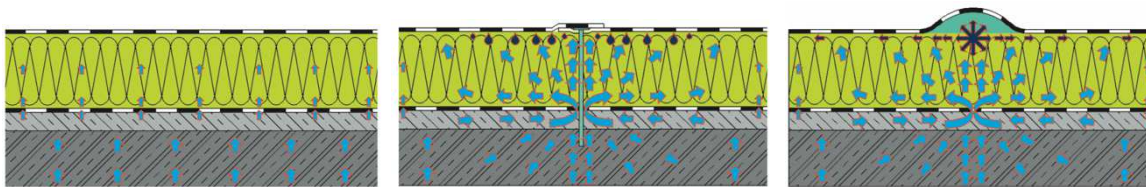
kde p_1 je tlak na začátku procesu ohřevu (Pa)

P_2 tlak na konci procesu ohřevu (Pa)

T_1 teplota na začátku ohřevu (K)

T_2 teplota na konci ohřevu (K)

V případě, že tedy dojde k nárůstu teploty na trojnásobnou hodnotu dojde také k zvýšení tlaku v rozhraní vrstev na hodnotu třikrát vyšší. Tato reakce má za následek vytvoření tzv. boulí.



Obrázek 14: Schéma vzniku tzv. boulí vlivem deformace difúzních polí [26]

V případě běžného natavení asfaltových pásů na podklad však jsou hodnoty soudržnosti s podkladem rozdílné a partiální tlak uzavřených vodních par se koncentruje do míst s nejnižší soudržností.



Obrázek 15: Pohled na hydroizolační souvrství s boulemi, největší boule již odstraněny a záplatovány (archív autora)

Perforace prořezáním je v případě určitých geometrických parametrů střechy nezbytná z důvodů zamezení pohybu stávajících vrstev tepelnou roztažností se vznikem následného mechanického napětí a možností boulení nového souvrství.

Tento problém se týká zejména velkých střech s hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů přímo na betonové vrstvě nebo na trapézovém plechu, případně geometricky výrazně asymetrických ploch s převažujícím jedním délkovým směrem apod. Samozřejmě je perforace prořezáním cenově nákladnější a představuje podstatně vyšší pracnost nebo vyšší riziko zatečené v případě deště v průběhu prací.

4.5. Zvolené výpočetní metody a software

Pro praktické výpočty uvedené v této práci pouze souhrnným tabelárním a grafickým způsobem jsem se rozhodl využít stacionární metody, která je podstatou softwaru TEPLO 2017 a sofistikovaného dynamického softwaru WUFI jako metody vycházející z dynamického pojetí.

Software TEPLO 2017 byl použit pro řešení konkrétního konstrukčního souvrství skladby celé střechy, tedy včetně nosné konstrukce. Výsledky výpočtu však poskytují pouze souhrnný výsledek, ale nepřinášejí jednotlivé hodnoty v jednotlivých vrstvách souvrství. Je možné tedy ten software použít pro účely této práce, ale s vědomím omezení, že přináší pouze přehled o celkovém chování střešní konstrukce a nelze z něj odvodit závěry pouze pro vrstvu tepelně izolačního materiálu.

Dynamický software WUFI byl použit pro konkrétní výpočty a zkoumání tepelně technických vlastností kompletní konstrukce střechy včetně materiálu nosné vrstvy střešního pláště jako u softwaru TEPLO 2017. Výsledky získané výpočty tohoto softwaru poskytují na rozdíl od softwaru TEPLO 2017 jak souhrnný přehled o celkových vlastnostech celého souvrství tak umožňují hodnotit i vlastnosti v jednotlivých vrstvách konstrukce a tím přináší možnost sledovat vlhkostní děje pouze ve vrstvě tepelné izolace a jsou tedy pro účely této práce přínosnější. Je zde totiž možno rozdělit vlhkostní vliv nosné konstrukce střechy na její celkové vlhkostní děje a porovnat jejich vliv s vlivem dějů v tepelněizolační vrstvě. Výsledky rozhodně jsou zajímavé a ukazují na nutnost v této práci pokračovat a zabývat se touto problematikou v budoucnu podrobněji.

Software Teplo 2017 – stacionární hodnocení konstrukcí

Tradiční metodou pro posouzení bilance vlhkosti byla po dlouhé období Glaserova metoda [31], která analyzuje transport difúze par ve stavebních materiálech. Tato metoda však nezohledňuje kapilární transport vlhkosti a sorpční schopnosti materiálu, přičemž oba z nich snižují riziko poškození v případě kondenzace. Navíc Glaserova metoda uvažuje pouze s ustáleným teplotním stav za velmi zjednodušených okrajových podmínek. Cílem bylo poskytnout obecné teplotně vlhkostní hodnocení, nikoli vytvořit simulaci realistických podmínek pro teplo a vlhkost ve stavebním materiálu vystavenému povětrnostním podmínkám.

Program TEPLO 2017 je určen pro základní tepelně technické posouzení skladby stavební konstrukce z hlediska prostupu tepla a vodní páry. Umožňuje detailní výpočet tepelného odporu a součinitele prostupu tepla, vnitřní povrchové teploty, poklesu dotykové teploty podlahové konstrukce, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci a oblasti kondenzace a roční bilance zkondenzované vodní páry. Zohledňuje požadavky ČSN 730540-2 [2] a STN 730540-2 a postupy ČSN 730540-4, EN ISO 6946 a EN ISO 13788.

Program umožňuje pro potřeby rekonstrukce plochých střech:

- výpočet tepelného odporu a součinitele prostupu tepla podle EN ISO 6946 se zohledněním mnoha typů systematických tepelných mostů (např. dřevěné prvky v tepelných izolacích, kovové rošty pro SDK konstrukce, bodové spojovací prostředky pro kotvení hydroizolací...)
- výpočet roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry podle ČSN 730540-4 i podle EN ISO 13788
- výpočet vnitřní povrchové teploty a teplotního faktoru podle EN ISO 13788
- možnosti zohlednění počáteční zabudované vlhkosti, volba počtu ročních cyklů výpočtu, zohlednění redistribuce vlhkosti ve skladbě
- požadavky a vyhodnocení výsledků podle ČSN 73540 a STN 730540

- pomocné výpočty pro řadu zadávaných parametrů (např. pro tepelnou vodivost, faktor difuzního odporu, vliv tepelných mostů, spárovou difúzi, efektivní tloušťku spádových vrstev...)
- grafické výstupy průběh teplot a průběh částečných tlaků vodní páry s oblastí kondenzace pro jednotlivé měsíce v roce, akumulované množství kondenzátu a aktuální míra kondenzace či odparu v průběhu roku, průběh povrchových teplot a teplotního faktoru, průběh okrajových podmínek

Jednoznačnou předností tohoto softwaru je jeho poměrně jednoduchá a dobře intuitivní obsluha i rychlost výpočtu. Výhodou je rovněž jeho výrazné rozšíření v českém technickém prostředí a tedy dobrá možnost vzájemné kooperace a srovnání výsledků mezi jednotlivými uživateli i výstupy jejich prací.

Jako dílčí nevýhodu lze považovat, že se jedná o postupy statické pracující pouze s několika vybranými vstupními proměnnými a pouze jednorozměrným šířením tepla kolmo na konstrukci.

Obecně pro praktické používání v běžné technické praxi je nutno konstatovat jeho jednoznačnou výhodnost a dostupnost diskuse s autory v případě dotazů a problémů prostřednictvím elektronického fóra na jejich webových stránkách.

Software WUFI Pro – dynamická simulace

Jedná se o software pro dynamické modelování šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech umožňující dynamické hodnocení energetické náročnosti budov i dynamické hodnocení komfortu vnitřního prostředí budov nebo části budovy.

V českém prostředí je prezentován dalším významným odborníkem Ing. Petrem Slaninou, Ph.D., odborníkem na tepelnou techniku SKANSKA a.s. a WUFI partnerem pro Českou a Slovenskou republiku.

Kromě zohlednění tepelné odezvy budov a stavebních prvků je třeba také porozumět vlhkostním podmínkám a vlivům vlhkosti. Dlouhodobé vystavení vysokým vlhkostním podmínkám může způsobit poškození stavebních prvků a závažné zdravotní problémy vyplývající z růstu plísní na

povrchu při vystavení vysoké vlhkosti. Je dobře známo, že vysoká vlhkost způsobuje vyšší tepelné ztráty a také teplotní pole stavebních prvků ovlivňují transport vlhkosti, přesněji vlhkostní pole. Analýza procesů přenosu tepla a vlhkosti je známá jako "hygrotermie".

WUFI® provádí dynamické simulace přenosu tepla a vlhkosti. Metody byly validovány po celém světě a poskytují realistickou simulaci vlhkostních podmínek ve stavebních dílech a budovách za aktuálních povětrnostních podmínek.

WUFI Pro je založen na nejnovějších poznatcích v oblasti difúze par a přepravy tekutin ve stavebních materiálech. Nicméně software vyžaduje pouze standardní vlastnosti materiálu. Okrajovými podmínky jsou parametry: naměřené venkovní klima - včetně hnaného deště a slunečního záření. Je umožněna analýza vícevrstvých materiálů při reálném vystavení přírodním povětrnostním podmínkám [16].

Detailní popis jednotlivých segmentů celkového souboru softwaru je zřejmý z: <https://wufi.de/en/software/product-overview/detailed-product-overview/>

Významnou skutečností je to, že je tento software garantován jednou z nejvýznamnějších evropských vědeckých institucí a to Fraunhoferovým institutem. Rozhodující skutečností pro používání v Českém prostředí je jeho garantování již zmíněným odborníkem Ing. Petrem Slaninou, Ph.D., existence webových stránek v češtině a existence rovněž internetového fóra na webu, navíc častých seminářů a školení v tuzemsku. Pro mezinárodní odbornou praxi je pak významné jeho rozšíření v celém světě a tedy možnost srovnávání výsledků a vzájemné diskuse odborníků z celého světa. Nutnou podmínkou tohoto srovnávání je ale zcela jednoznačná specifikace složení konstrukce, která je tímto softwarem zkoumána a určení srovnatelných vstupních parametrů, když při nerespektování těchto výchozích podmínek lze velmi lehce dospět k podstatně odlišným výsledkům!

Za dílčí nevýhodu lze považovat jeho podstatně vyšší složitost a obsluhu, rovněž i dobu trvání výpočtů a rozhodně jeho rozšíření v České republice v menší míře.

Lze tedy shrnout, že na rozdíl od softwaru TEPLO 2017 je software WUFI Pro vhodnější pro vysoce odborné a vědecké účely a činnost na mezinárodní úrovni. To je velice výhodné zejména pro expertní činnost v mezinárodní rozhodčí a mediační oblasti.

5. PREDIKČNÍ VÝPOČTY CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM POUZE NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY

Při vadách hydroizolace ve většině případů investor požaduje pouze obnovu hydroizolační funkce bez ohledu na stávající skladbu střešního pláště a jeho tepelně technické parametry ve vztahu k současným uživatelským nebo technickým parametrům.

V této kapitole jsou analyzovány dva základní stavy a to střešní plášť s nově realizovanou hydroizolační vrstvou z asfaltových izolačních pásů a střešní plášť s nově realizovanou hydroizolační vrstvou foliového typu.

Významným faktem je totiž teoretické východisko teorie Van Spoela [23], která uvádí platnost výpočtu pouze v případě, že stávající vrstva vykazuje zhruba stejný difuzní odpor jako nová dodatečně pokládaná vrstva.

Hydroizolace z asfaltových izolačních pásů je obvyklá pro skladby starší než 15 let a neobvyklé není ani stáří kolem 50 let. Charakteristické pro tuto vrstvu je její složení z asfaltových pásů oxidovaného typu, které obvykle vykazují faktor difuzního odporu v rozmezí 10 000 až 50 000, vrstva ale obsahuje obvykle 3–5 vrstev asfaltových pásů vzhledem k postupně prováděným opravám. I přes zvětralý stav pásů, který přináší možné snížení difuzního odporu, je pak možno předpokládat, že celkový difuzní odpor bude na úrovni pro opravu uvažovanou novou vrstvou asfaltového pásu modifikovaného typu. V případě, že by se u původního střešního pláště jednalo o hydroizolaci skutečně pouze s jednou až dvěma vrstvami oxidovaného pásu, pak by bylo nutno uvažovat pro opravu s novou hydroizolací foliového typu, která by vykazovala difuzní odpor v úrovni stávající hydroizolační vrstvy.

Tyto premisy jsou v této kapitole podloženy konkrétními výpočty, které tyto premisy dokládají výsledky prokazujícími, že pokud je dodatečně provedená hydroizolační vrstva podstatně vyššího difuzního odporu, pak v původním souvrství dochází k výrazné kondenzaci a podstatnému postupnému zvyšování vlhkosti a další ztrátě tepelně izolační funkce.

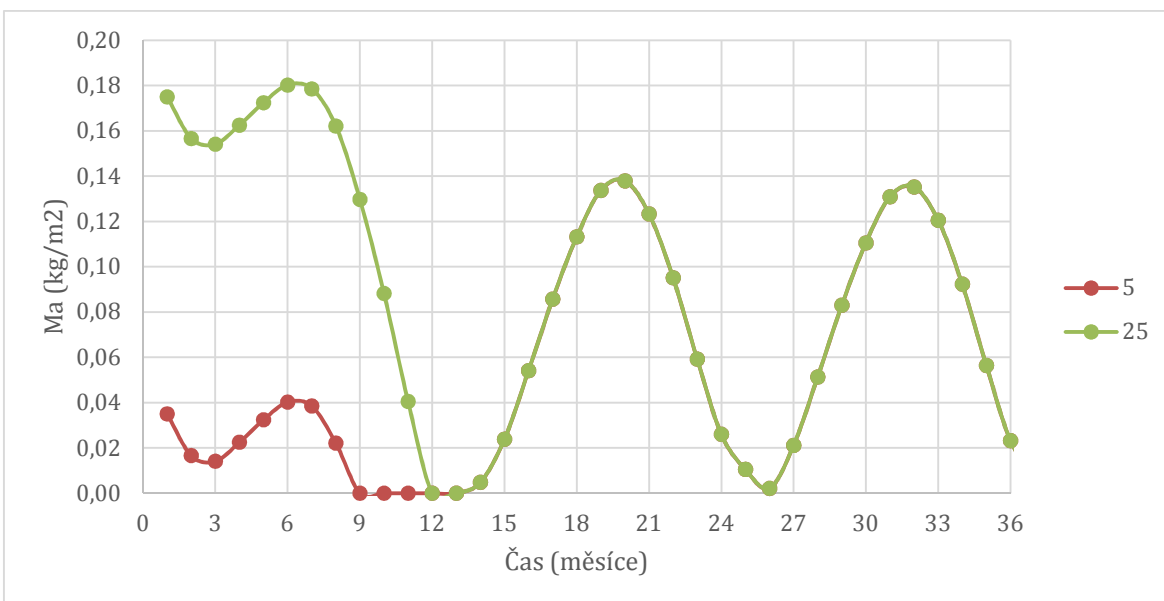
Pro názornost byla vybrána skladba konstrukce S01 a byla provedena víceletá teplotně vlhkostní analýza v softwaru Wufi. Tato skladba byla vybrána z celkového souboru všech výpočetně analyzovaných skladeb, nejčastěji rekonstruovaných střešních souvrství, kterých bylo zvoleno 32 celkem a jejichž kompletní uvedení by výrazně přesahovalo rozsah této práce. Jde o skladbu, kterou lze označit za charakteristickou pro období sedmdesátých a osmdesátých let 20. století, kdy aplikace dílce Polsid znamenala výrazný úspěch v industrializaci stavebnictví a byla realizována v obrovských množstvích, bohužel bez podrobnějšího přístupu k tepelně technickému řešení střešního pláště, tedy zejména bez parozábrany. K charakteristickým problémům této konstrukce patří jednak smršťování polystyrenu, neboť nebyly známy jeho objemové změny po výrobě, a problémy hydroizolační vrstvy dané materiálovými vlastnostmi oxidovaných asfaltových pásů. Nutné opravy v průběhu osmdesátých a devadesátých let pak byly prováděny obvykle bez jakékoli analýzy příčin vzniku plnoplošným natavením další vrstvy obvykle ještě oxidovaného asfaltového pásu se všemi negativními důsledky a tak se postupně vrstvily opravné vrstvy na sebe v nezřídkých případech až do pěti dalších vrstev. Provedení oprav novou hydroizolační vrstvou z folie m-PVC nastoupilo zhruba od přelomu 20. a 21. století.

Pro práci byla tedy zvolena následující skladba S01–AP a S01-mPVC, kdy jde o provedení opravné vrstvy asfaltovým modifikovaným pásem ve dvou vrstvách variantně folií na bázi m-PVC v jedné vrstvě



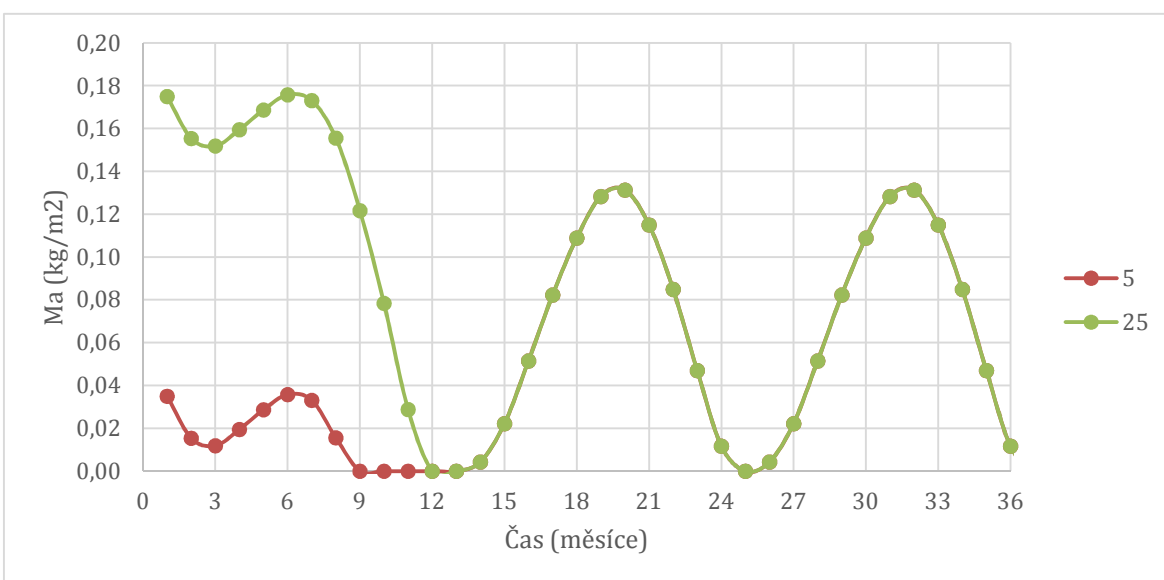
Obrázek 16: Schéma vybrané konstrukce S01 pro vlhkostní analýzu konstrukce ploché střechy s (zdroj: archiv autora)

Jak již bylo výše uvedeno, výstupy ze softwaru TEPLO 2017 byly zvoleny jako základní srovnávací metoda. Při výpočtu bylo přistoupeno k analýze celé konstrukce včetně nosné konstrukce střechy.



Graf 8: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archiv autora)

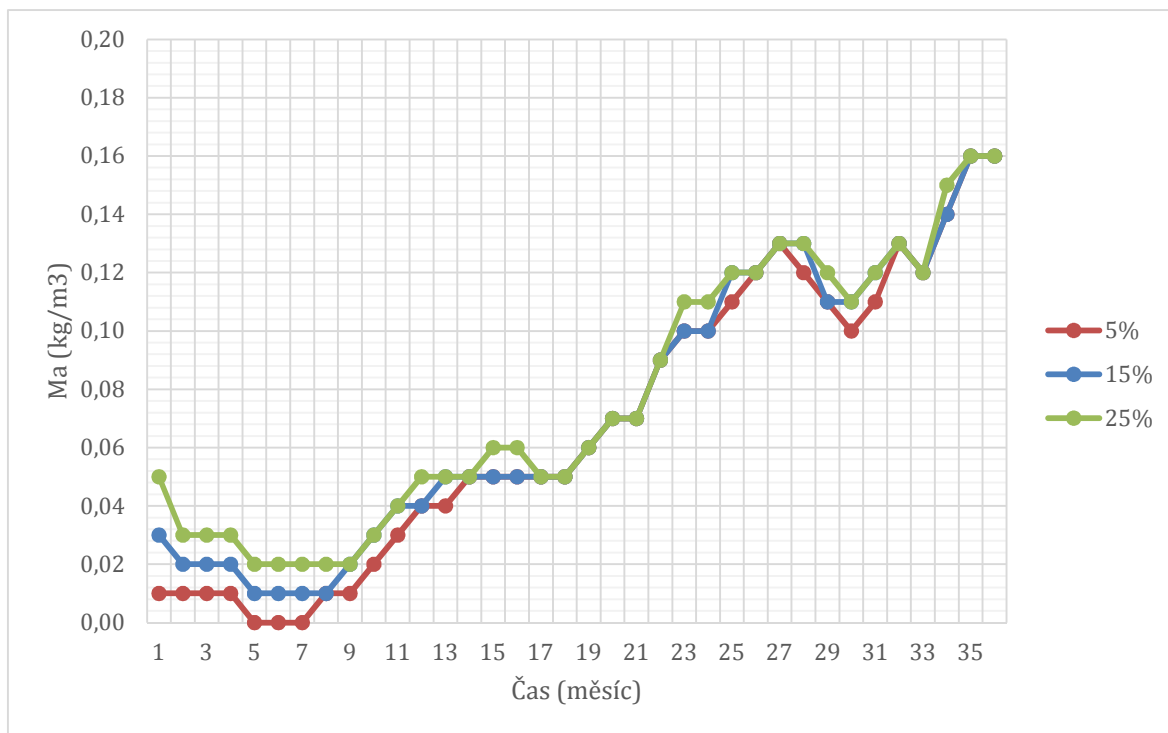
Z výsledků ve stacionárním teplotně vlhkostním poli, je patrné snížení množství kondenzátu u varianty s novou hydroizolací na bázi fólie mPVC oproti asfaltovým pásům. Avšak toto snížení je zcela zanedbatelné.



Graf 9: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC. (zdroj: archiv autora)

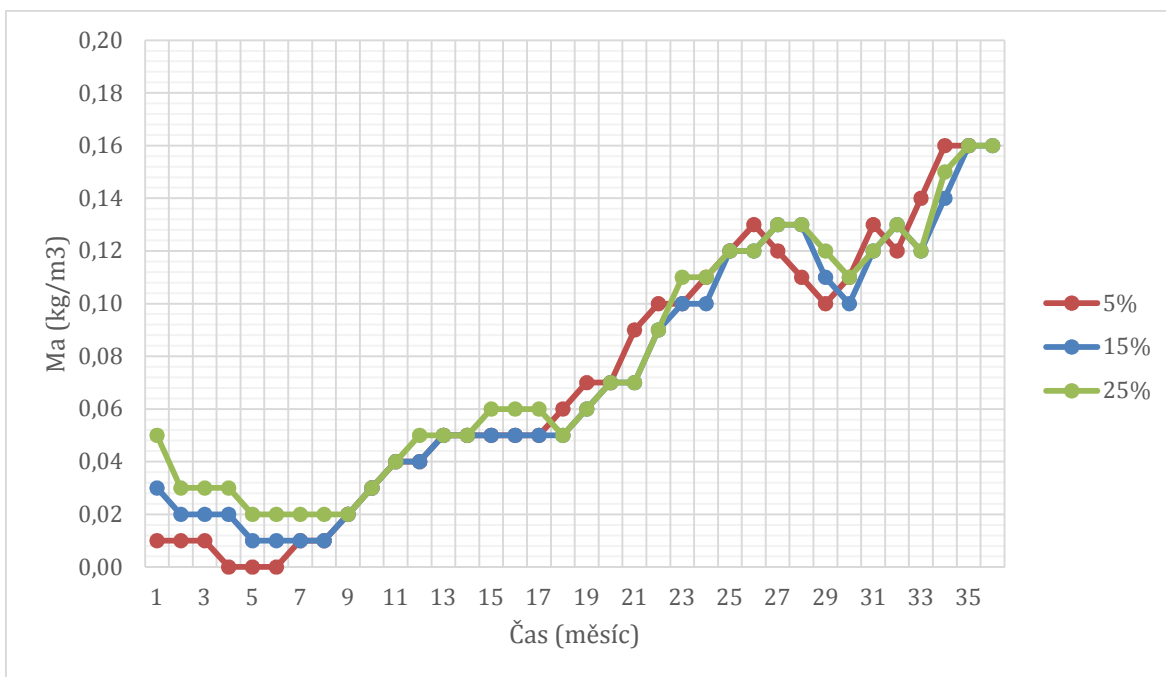
Při 5% hmotnostní vlhkosti původní tepelné izolace se již v druhém roce od realizace stavebních úprav kondenzát nevyskytuje.

Uvedená konstrukce S01-AP byla analyzována i v softwaru WUFI a to pro stejnou skladbu jako použitou v softwaru TEPLO, ale s tím, že byly z výsledků extrahovány hodnoty pro vlhkostní děje pouze v tepelněizolační vrstvě což software TEPLO neumožňuje.



Graf 10: Výstup dynamické simulace se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archiv autora)

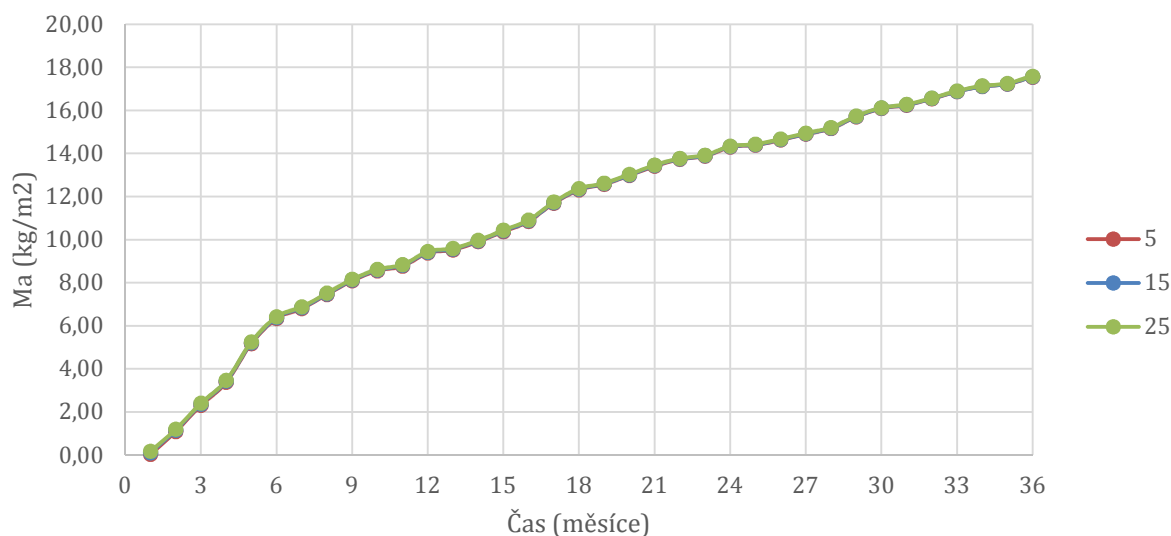
Z dynamických simulací je patrné, že rozdíl mezi aplikací nové hydroizolační vrstvy z asfaltových pásů nebo variantně z fólie na bázi mPVC nemá výrazný vliv na množství kondenzátu v původní tepelné izolaci. V obou případech je koncové množství kondenzátu okolo hodnoty $0,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Množství kondenzátu v průběhu let má vzestupný charakter a lze tedy konstatovat, že realizace tohoto způsobu opravy nové hydroizolační vrstvy nelze provádět bez ohledu na množství hmotnostní vlhkosti v původní tepelné izolaci.



Graf 11: Výstup dynamické simulace se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou na bázi mPVC. (zdroj: archív autora)

Pro objektivní zhodnocení dynamické simulace bylo přistoupeno také k komparaci výsledků tepelně vlhkostních procesů v celé skladbě ploché střechy.

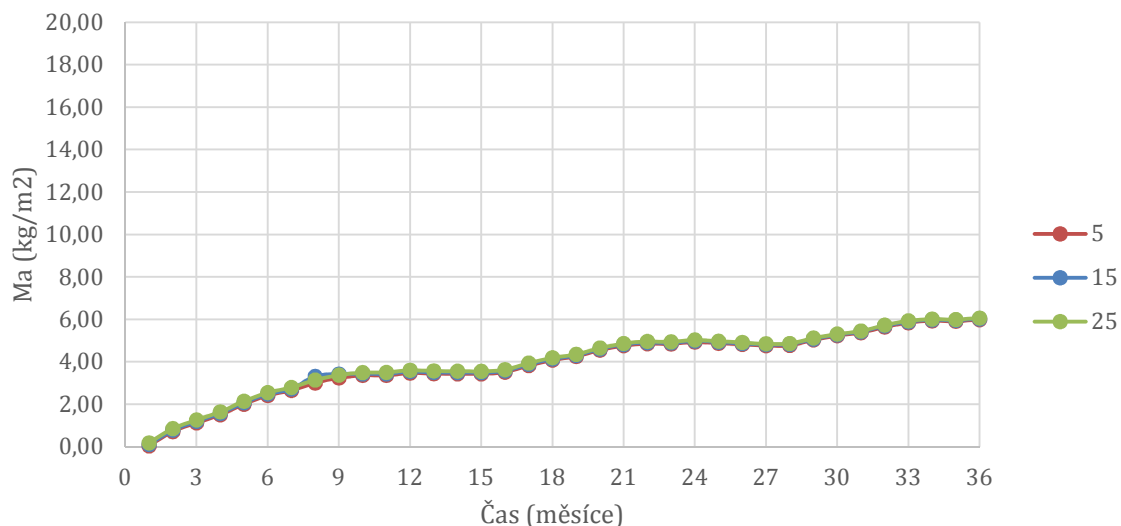
Z výsledků simulace v softwaru WUFI pro celou skladbu je patrný nárůst kondenzátu v průběhu 3 let až na hodnotu $18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (graf 12). Tato vybraná skladba byla realizována s finální hydroizolací z asfaltových modifikovaných pásů.



Graf 12: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archiv autora)

Pro variantu nové hydroizolace z fólie na bázi mPVC je patrný nárůst kondenzátu v průběhu 3 let na hodnotu 6 kg, jedná se tak o hodnotu třetinovou oproti předchozímu způsobu realizace rekonstrukce střešního pláště. Tato simulace poukazuje na nedostatečné tepelně fyzikální parametry původní konstrukce. Kdy takto realizovaná konstrukce je namáhána vznikem kondenzátu v nosné konstrukci střechy. Tyto děje mohou mít za následek vznik vlhkostních map v místě výrazných tepelných mostů, aniž by docházelo k zatékání do konstrukce střechy.

Vybraná skladba S01 byla realizována s finální hydroizolací na bázi hydroizolace z asfaltových pásů a variantně z fólie mPVC. V obou případech byla provedena perforace stávající hydroizolace v rastru 0,2 m a průměru otvoru $d = 20$ mm. Jak je patrné z provedených simulací je tento způsob rekonstrukce nevhodný z důvodu nárůstu množství kondenzátu v celé konstrukci, respektive především v nosné konstrukci střechy. Avšak je patrný vliv výrazně nižšího difúzního odporu na vlhkostní bilanci celé skladby.



Graf 13: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC. (zdroj: archiv autora)

Výrazné rozdíly výsledků celkových vlastností kompletní konstrukce střechy včetně nosné železobetonové konstrukce získaných softwarem TEPLO a WUFI pro konstrukci střechy s nosnou železobetonovou konstrukcí vedly k tomu, ověřit vliv materiálu nosné konstrukce střechy a kromě železobetonu byla zvolena také nosná konstrukce z trapézového plechu.

Při těchto simulacích byl prokázán výrazný vliv materiálu nosné konstrukce střechy. V případě konstrukcí na bázi železobetonu, dochází k výraznému nárůstu množství kondenzátu vzhledem k jednotce m^2 konstrukce. Avšak při přepočtu tohoto množství na procenta hmotnostní vlhkosti se již jedná o zanedbatelné množství vlhkosti vzhledem k objemové hmotnosti posuzované nosné konstrukce.

6. PREDIKČNÍ VÝPOČTY CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM NOVÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ VRSTVY A NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY

Požadavek obnovy hydroizolační funkce střešního pláště je v případě technicky a uživatelsky racionálně uvažujícího investora spojen s provedením dodatečného zateplení, neboť střešní plášť již ve většině případu ani bez vlivu vad hydroizolační vrstvy by nespĺňovala současné technické a uživatelské tepelně izolační parametry.

Současné tepelně technické požadavky na konstrukce vedou k nutnosti spojit obnovu hydroizolační funkce se zvýšením tepelně izolačních parametrů, pokud tedy investor netrvá na provedení pouze obnovy hydroizolace.

V tomto případě je platnost východisek teorie Van Spoela dána celkovým difuzním odporem dodatečné tepelně izolační vrstvy a dodatečného hydroizolační vrstvy. V tomto případě by bylo možné jako novou hydroizolační vrstvu bez problémů použít i dvouvrstvou hydroizolaci z modifikovaných pásů. Takové řešení je méně obvyklé a technologicky i realizačně neodpovídá současnému stavu techniky a na vrstvy tepelné izolace se provádí foliová hydroizolace.

Přesto výpočtová analýza bude v této kapitole provedena pro obě varianty nové hydroizolace na tepelně izolační vrstvě a to jak pro dvouvrstvou hydroizolaci z modifikovaných asfaltových pásů tak i pro hydroizolaci foliovou z m-PVC folie jako nejobvyklejšího materiálu.

Tento způsob opravy uvažuje jak obnovu hydroizolace, tak zlepšení tepelně technických parametrů střešního pláště.

Pozn.: V tomto případě by se však měla řešit únosnost střechy z hlediska přitížení nejen dalšími vrstvami, ale i zatížením sněhem, který ze střechy s minimální vrstvou tepelné izolace v zimních měsících rychle odtával a kdy i statické řešení konstrukcí bylo řešeno za jiných vstupních a normových parametrů.

Při realizaci oprav a rekonstrukcí střešních pláštů plochých střech, zejména průmyslových či skladových objektů nebo objektů občanské vybavenosti o velkých rozměrech (řádově v tisícovkách metrů čtverečních), se jedná vždy o problematiku poruch hydroizolační vrstvy střešního pláště, které vedou k pronikání srážkové vody do souvrství střešního pláště a následně pak i do interiérů objektů. Případně se jedná o to, že vzhledem k nesprávně navržené skladbě střešního pláště nebo změně účelu užívání objektu spojené s nárůstem relativní vlhkosti vnitřního prostředí dochází ke kondenzaci vodních par ve střešním plášti a následně významnému snížení tepelně technických vlastností střešního pláště.

Obvykle se tyto problémy řeší kompletním odstraněním stávajícího souvrství střešního pláště a jeho nahrazení souvrstvím novým tak, aby nové střešní souvrství odpovídalo aktuálním technickým a normovým požadavkům. Tento standardní postup je ale zatížen řadou problémů popsaných výše.

Snahou je zavedení do realizační praxe možnost realizovat opravy a rekonstrukce plochých střech bez nutnosti kompletní demontáže stávajícího souvrství střešního pláště. Kdy by se při realizaci toto souvrství ponechalo a byly by řešeny dodatečnými úpravami na stávajícím plášti s možností postupného snižování vlhkosti ve stávající tepelně izolační vrstvě.

Na modelovém příkladu je ukázána možnost technicky korektního řešení z hlediska tepelně technické teorie i z tohoto pohledu odpovědného návrhu opravy střešního pláště, případně jeho rekonstrukce, ve vztahu k stávajícímu stavu a možnosti probíhajícími teplotně vlhkostními pochody dosáhnout snížení vlhkosti ve střešním plášti na rovnovážnou hodnotu.

Před zahájením vlastních stavebních prací je nutné provést zaměření střešního pláště a z provedených sond určit jeho skladbu příp. rozměry a skladby z dostupné dokumentace ověřit a zkontrolovat.

Pro opravu a rekonstrukci je pak nutné vypracovat, byť zjednodušenou, ale technicky podloženou a pro realizaci jednoznačnou projektovou dokumentaci.

A ke zjednodušení tohoto zpracování, neboť stavební praxe potřebuje jednoduché a jednoznačné podklady, směřuje obsah i náplň této kapitoly.

Samozřejmostí pro realizaci pak musí být dodržení všech technických, technologických i organizačních kroků v projektové dokumentaci předepsaných, neboť i zde bývá kámen úrazu správného provedení.

Setkal jsem se již mnohokrát v praxi s tím, že právě ty drobné a jednoduché činnosti bývají pracovníky opomíjeny a vynechávány. V případě oprav a rekonstrukcí s postupem využití perforace hrozí zejména neprovedení perforačních otvorů a tím znehodnocení celého korektně navrženého postupu a jeho funkčnosti.

Nedílnou součástí správného provedení musí být tedy důsledná kontrola, jak vlastní ze strany vedení realizační firmy tak pečlivý výkon funkce technického dozoru investora a jeho průběžná kontrola

Při rozhodování o způsobu rekonstrukce skladby střešní konstrukce je nutno brát v úvahu také finanční náročnost rekonstrukce. To znamená konstatovat zda-li je vhodnější stávající střešní skladbu ponechat či nikoliv a provést tak na nosnou konstrukci skladbu zcela novou. Níže jsou uvedeny výhody a nevýhody obou způsobů rekonstrukce z pohledu financování:

Provedení dodatečného zateplení a ponechání stávající střešní skladby

Výhody: - Nejsou nutné demoliční práce a likvidace stavebního odpadu.
- Tloušťka nové tepelné izolace je menší, využíváme tepelné vlastnosti i stávající tepelné izolace.

Nevýhody: - V případě velmi vlhké stávající skladby se nedá počítat s jejími tepelnými vlastnostmi.
- V případě návrhu větších tloušťek nové tepelné izolace dochází k zvětšování mocnosti skladby střešního pláště.



Obrázek 17: Provádění doplňkové tepelné izolace, hydroizolačního souvrství a nové atiky (archív autora)

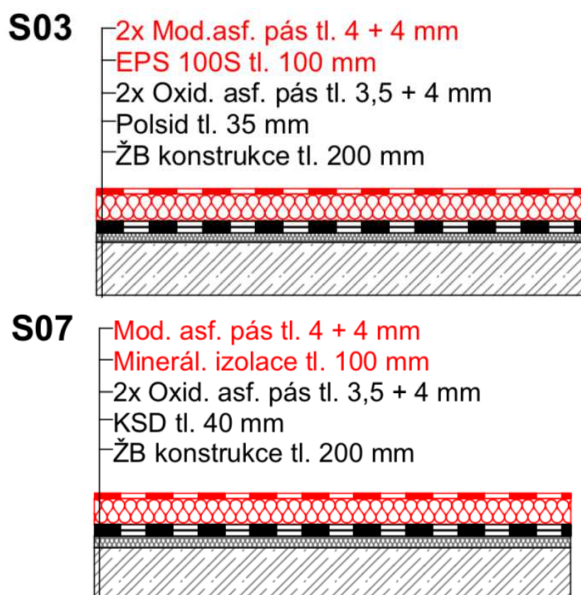
Na základě uvedených kladů a záporu jednotlivých způsobů rekonstrukce, lze konstatovat, že hlavním kritériem pro rozhodnutí o způsobu rekonstrukce je tloušťka nově navrhované tepelné izolace. Tato hodnota závisí na tepelně technických vlastnostech stávající tepelné izolace, resp. na její vlhkosti.

V případě kdy z ekonomického hlediska nemá význam navrhovat střešní konstrukci se součinitelem prostupu tepla nižším než $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$, lze konstatovat, že u střech s tepelnou izolací EPS má význam dodatečná tepelná izolace EPS v tloušťce minimálně 100 mm. U střech s původní izolací z MVD se tato hodnota pohybuje v závislosti na nasákavosti materiálu od 100 mm do 150 mm. Mimo skladby s MVD dosahující krajních hodnot, tedy v případech, kdy se bude jednat o průměrné hodnoty, má význam dodatečná tepelná izolace tloušťky 100 mm pouze do 30 % hmotnostní vlhkosti stávající tepelné izolace.

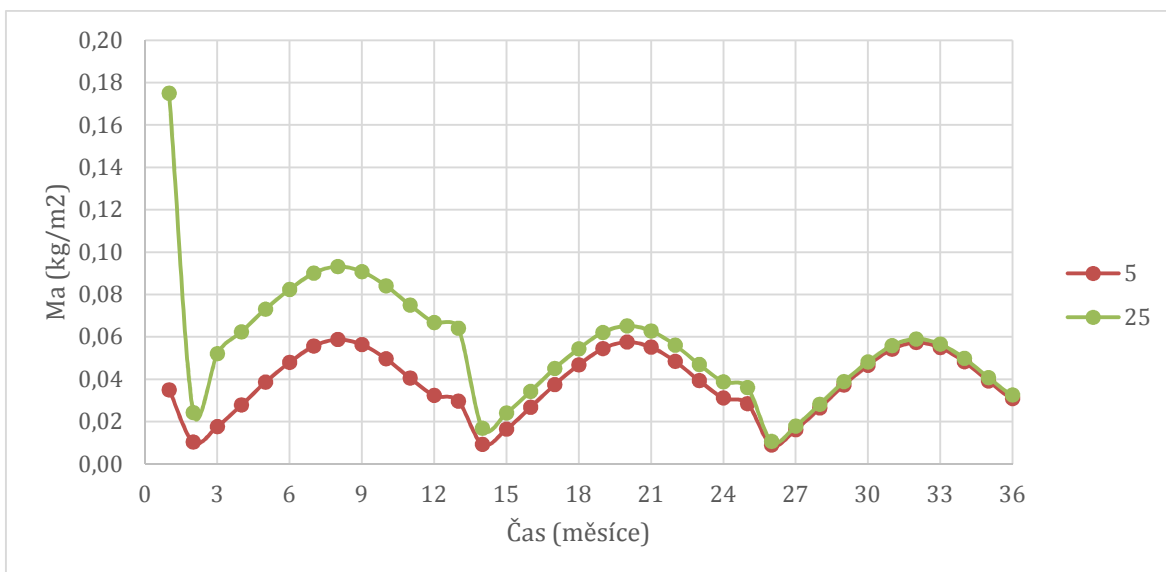
Při návrhu dodatečné tepelné izolace v tloušťce 150 mm a vyšší již dochází k výraznému nárůstu celkové výšky střešního souvrství a potřebě řešit kritické detaily atiky atd. Proto je vhodnější stávající tepelnou izolaci odstranit a provést kompletní pokládku nového střešního souvrství.

7. ANALÝZA CHOVÁNÍ STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ S PŘIDÁNÍM NOVÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ VRSTVY A NOVÉ HYDROIZOLAČNÍ VRSTVY

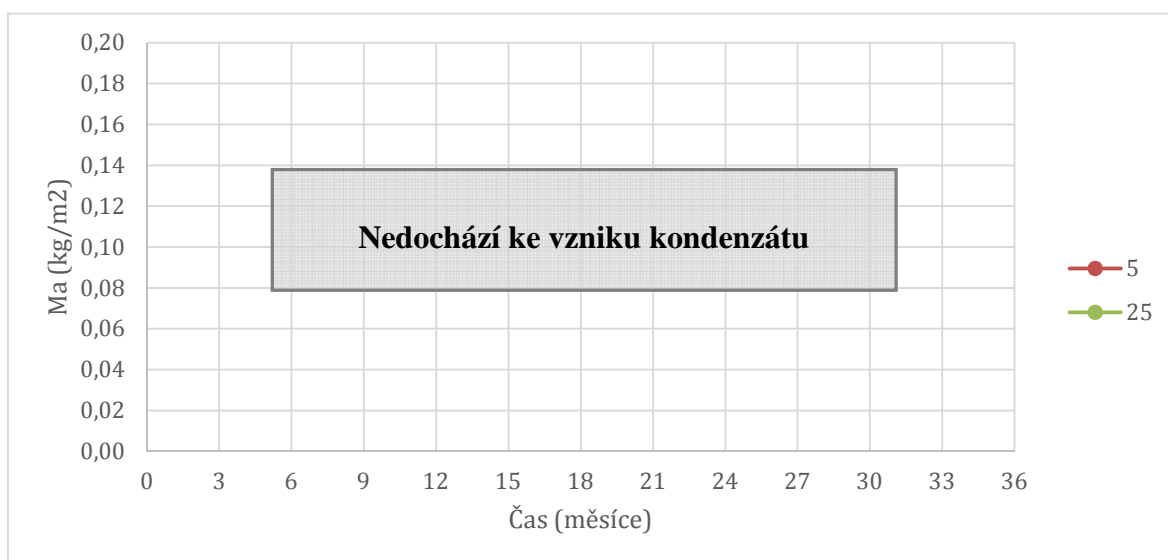
Pro názornost byly vybrány 3 skladby konstrukcí u kterých byla provedena víceletá teplotně vlhkostní analýza v softwaru Teplo 2017 i WUFI. Tyto skladby byly vybrány z původního souboru nejčastěji rekonstruovaných střešních souvrství mnoha zkoumaných variant. Na grafech 14 a 16 je patrný pokles kondenzátu v průběhu 3 let až na hodnotu $0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ bez ohledu na období realizace nové hydroizolace a zda-li se jedná o skladbu (S03 a S07) s původní tepelnou izolací typu Polsid nebo KSD.



Obrázek 18: Schéma vybrané konstrukce S03 s původní tepelnou izolací Polsid a S07 s původní tepelnou izolací KSD pro vlhkostní dynamickou analýzu rekonstrukce (zdroj: archív autora)

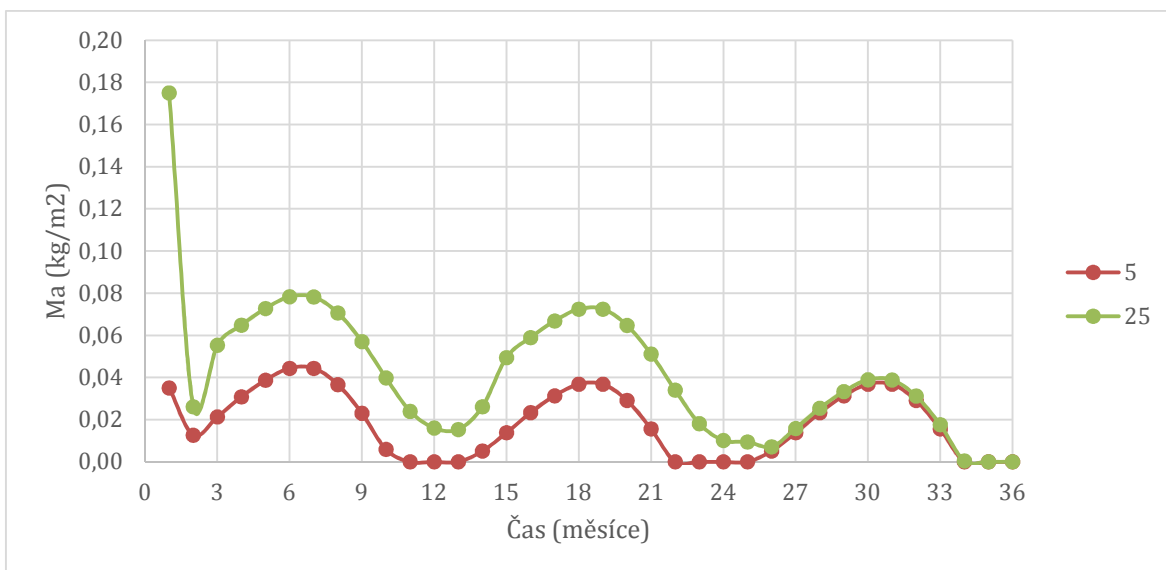


Graf 14: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S03 s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archív autora)

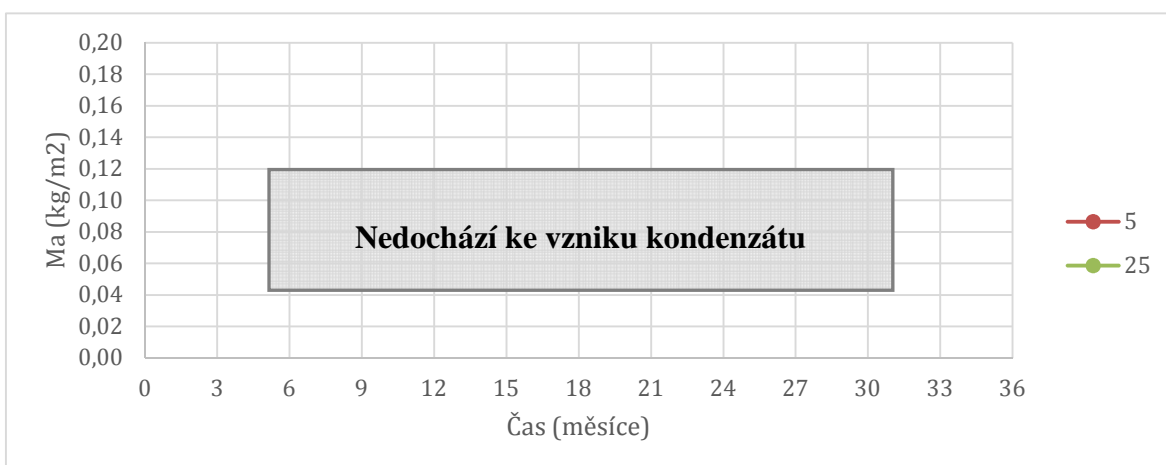


Graf 15: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S07 s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archív autora)

V případě konstrukce S07 při posuzování ve stacionárním teplotně vlhkostním poli nebyl zaznamenán žádný vznik kondenzátu v celé skladbě konstrukce. V případě konstrukce S03 s tepelnou izolací Polsid zde výskyt kondenzátu je, ale je nutné upozornit na absolutní hodnoty množství, které je v maxinech $0,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ a během následujících 3 měsíců klesá pod hodnoty $0,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

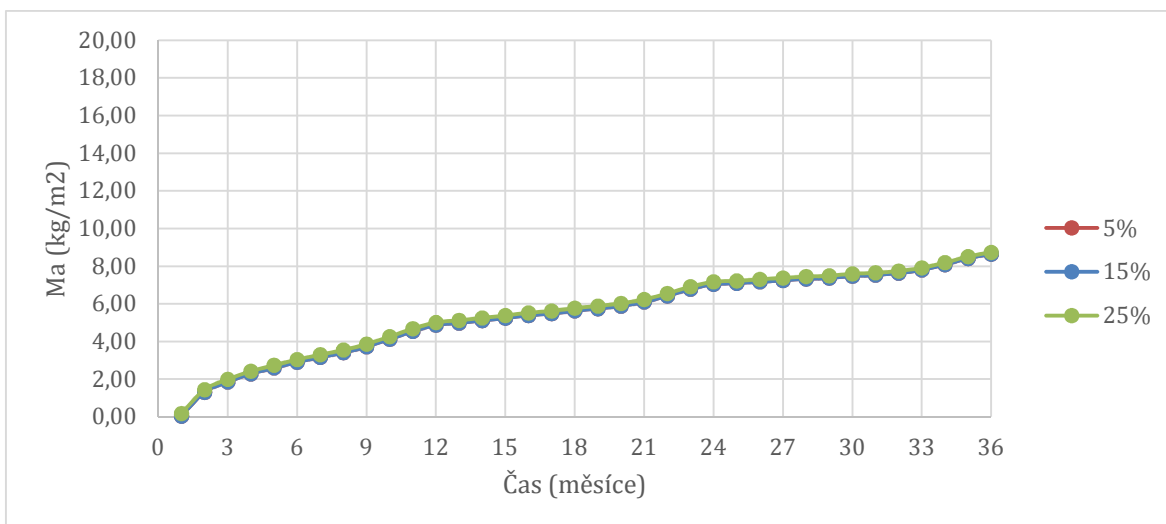


Graf 16: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S03 s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC. (zdroj: archív autora)

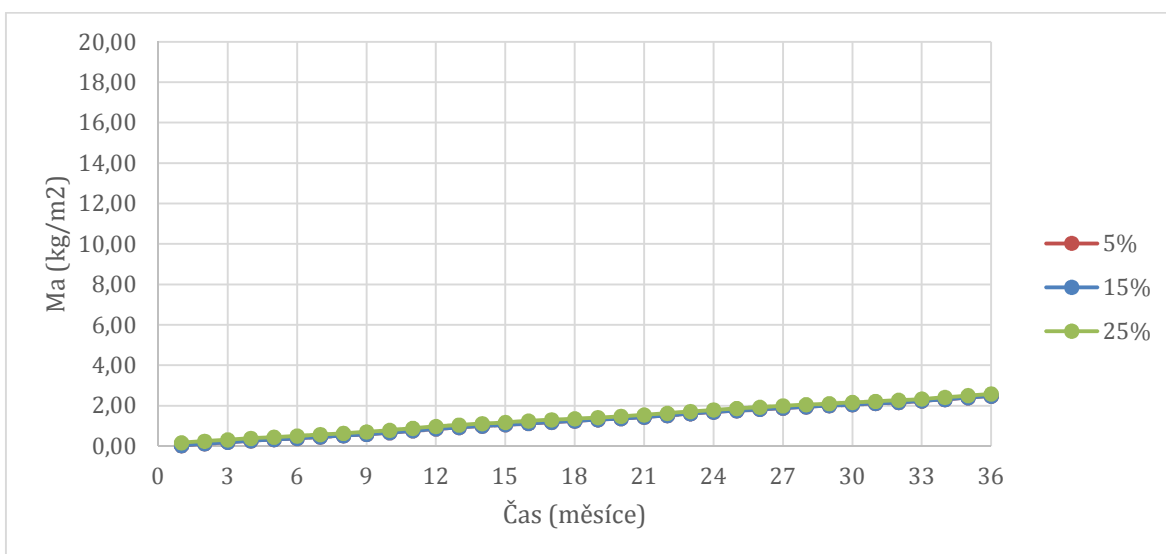


Graf 17: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S07 s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC (zdroj: archív autora)

Z výsledků ve stacionárním teplotně vlhkostním poli, je patrné snížení množství kondenzátu u varianty s novou hydroizolací na bázi fólie mPVC oproti asfaltovým pásům. Avšak toto snížení je zcela zanedbatelné. Množství kondenzátu v průběhu let klesá. U skladby konstrukce S07 s tepelnou izolací KSD k výskytu kondenzátu nedochází bez ohledu na použitý materiál nové hydroizolační vrstvy. Obdobně jako u skladby S01 bylo i u skladeb konstrukcí S03 a S07 přistoupeno k dynamickým simulacím. Výsledky jsou interpretovány jak u vrstvy tepelné izolace tak v celé skladbě.

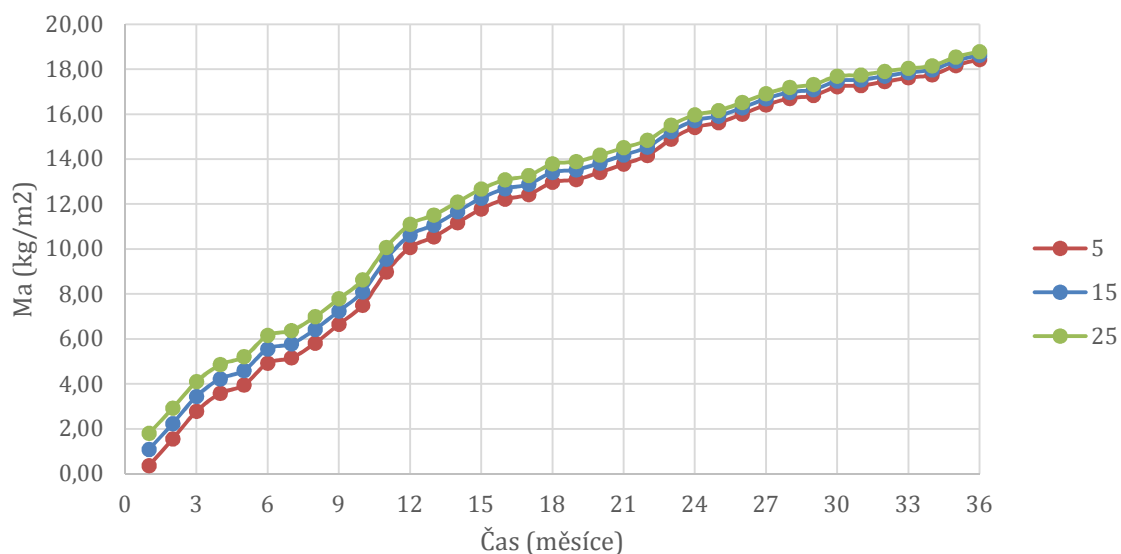


Graf 18: Výstup dynamické simulace celé skladby S03 střešního pláště s původní teplenou izolací Polsid se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archív autora)

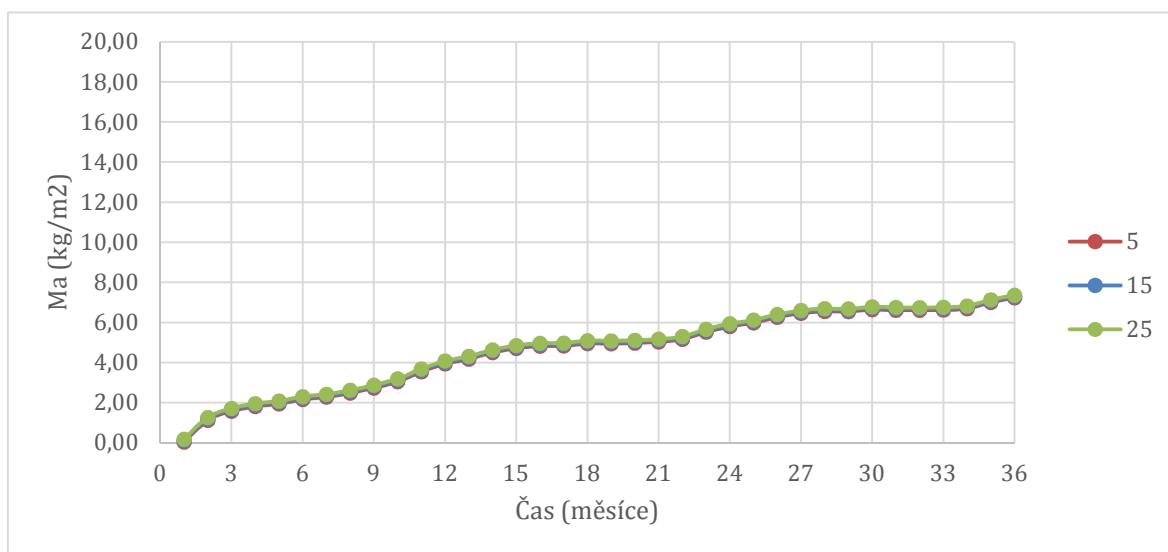


Graf 19: Výstup dynamické simulace celé skladby S03 střešního pláště s původní teplenou izolací Polsid se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC. (zdroj: archív autora)

Z grafů 18 a 19 je opět patrný vliv materiálu nové hydroizolační vrstvy, kdy asfaltový pás dosahuje výrazně vyšších hodnot množství kondenzátu oproti fóliové izolaci. Obdobně je tomu i skladby S07 (grafy 20 a 21).



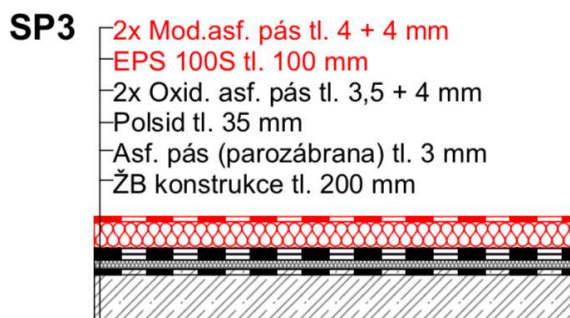
Graf 20: Výstup dynamické simulace celé skladby S07 střešního pláště s původní tepelnou izolací KSD se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů. (zdroj: archív autora)



Graf 21: Výstup dynamické simulace celé skladby S07 střešního pláště s původní tepelnou izolací KSD se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC. (zdroj: archív autora)

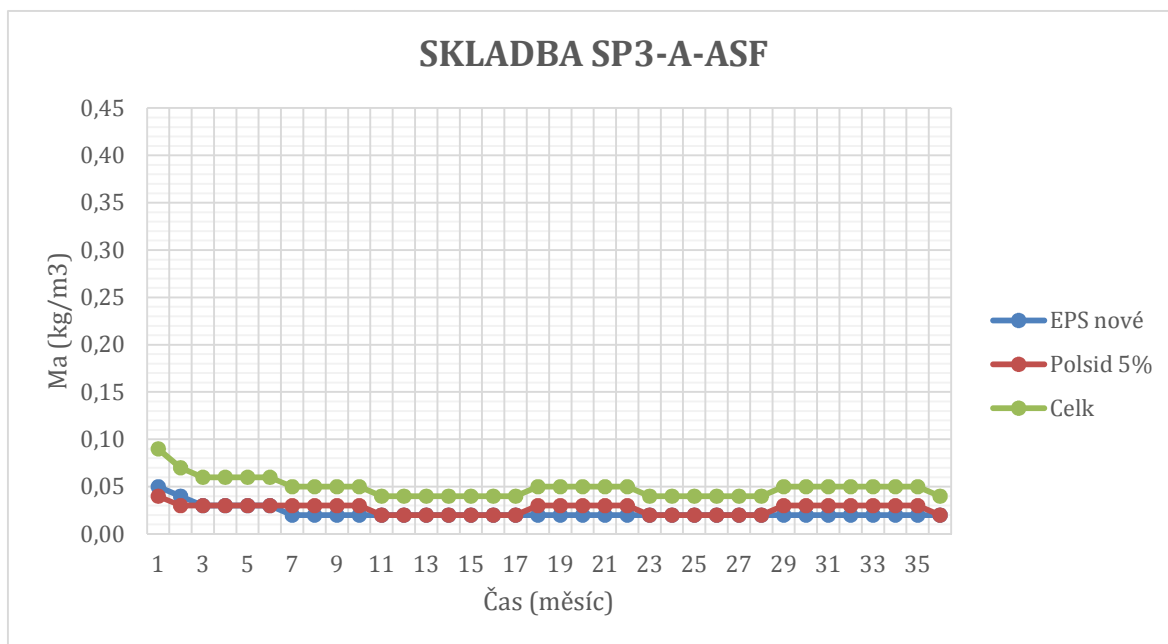
Jako poslední prezentovaná varianta byla zvolena skladba střešního pláště S07 s asfaltovou parozábranou. V případě stacionárního hodnocení

konstrukce získané výsledky vždy prokázali pozitivní vlhkostní bilanci, tudíž pouze pozitivní hodnoty výparu bez vzniku kondenzátu.



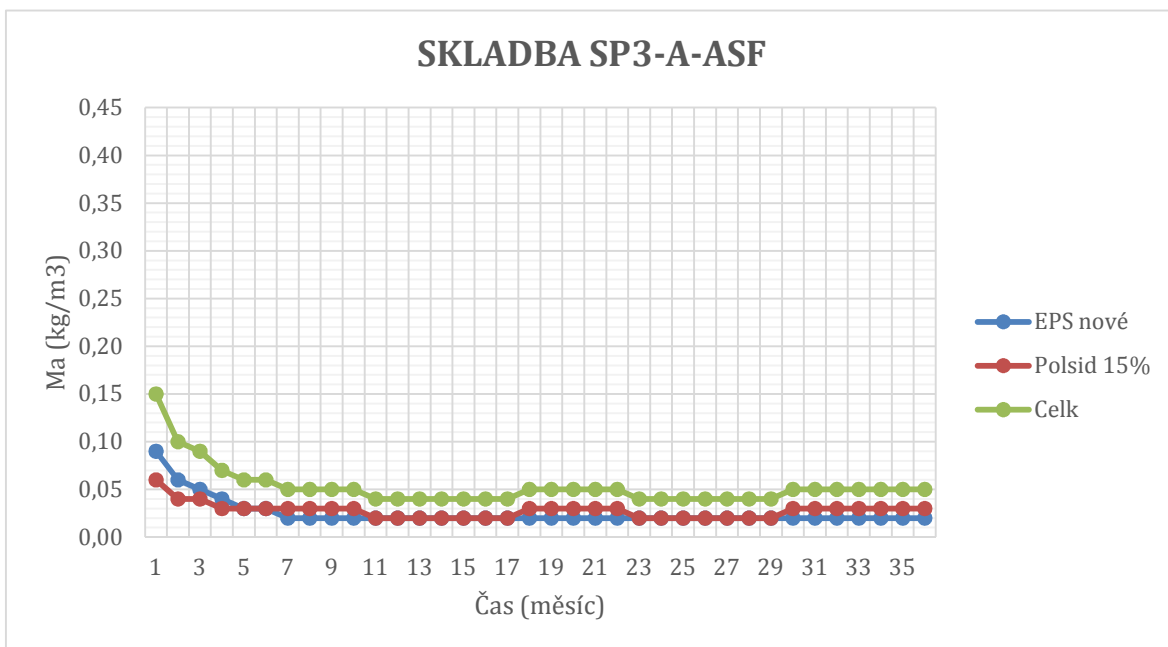
Obrázek 19: Schéma vybrané konstrukce SP3 s původní tepelnou izolací Polsid a původní parozábranou z asfaltového pásu pro vlhkostní dynamickou analýzu rekonstrukce (zdroj: archív autora)

V dynamické simulaci byly získány následující průběhy množství kondenzátu v časovém úseku 3 let s prezentací množství vlhkosti jak v původní tepelné izolaci Polsid, tak v nově instalované izolaci EPS.

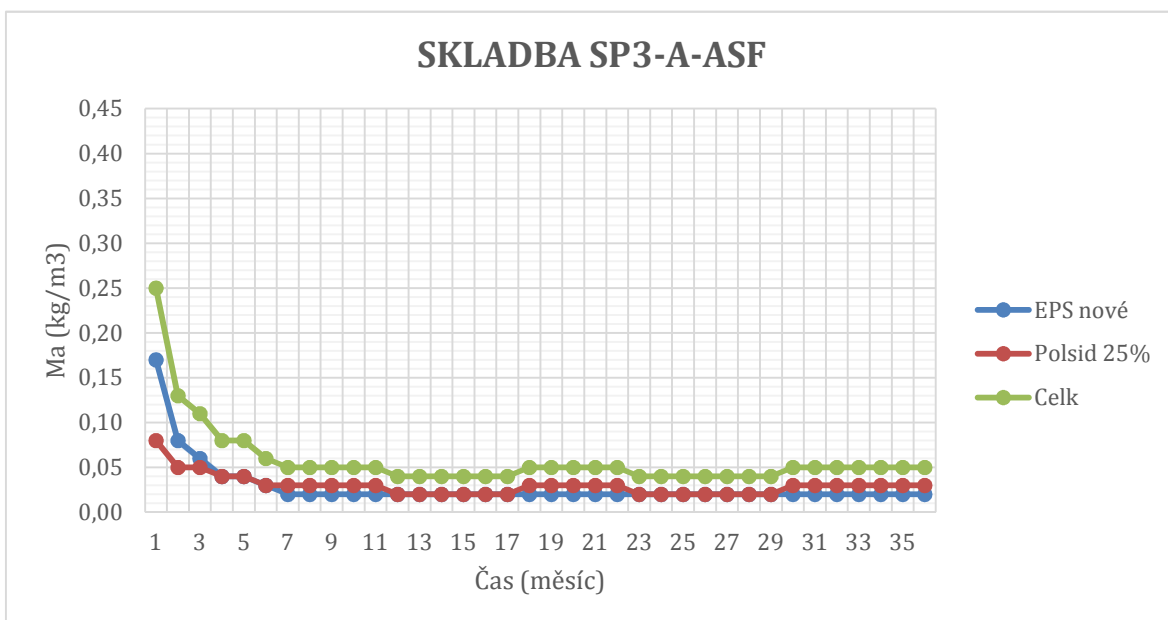


Graf 22: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 5% hmotnostní vlhkosti. (zdroj: archív autora)

Z grafů 22,23 a 24 je patrné, že bez ohledu na původní zabudovanou vlhkost v tepelné izolaci Polsid, dochází k postupnému vysychání při realizaci nové hydroizolační vrstvy z asfaltových pásů.

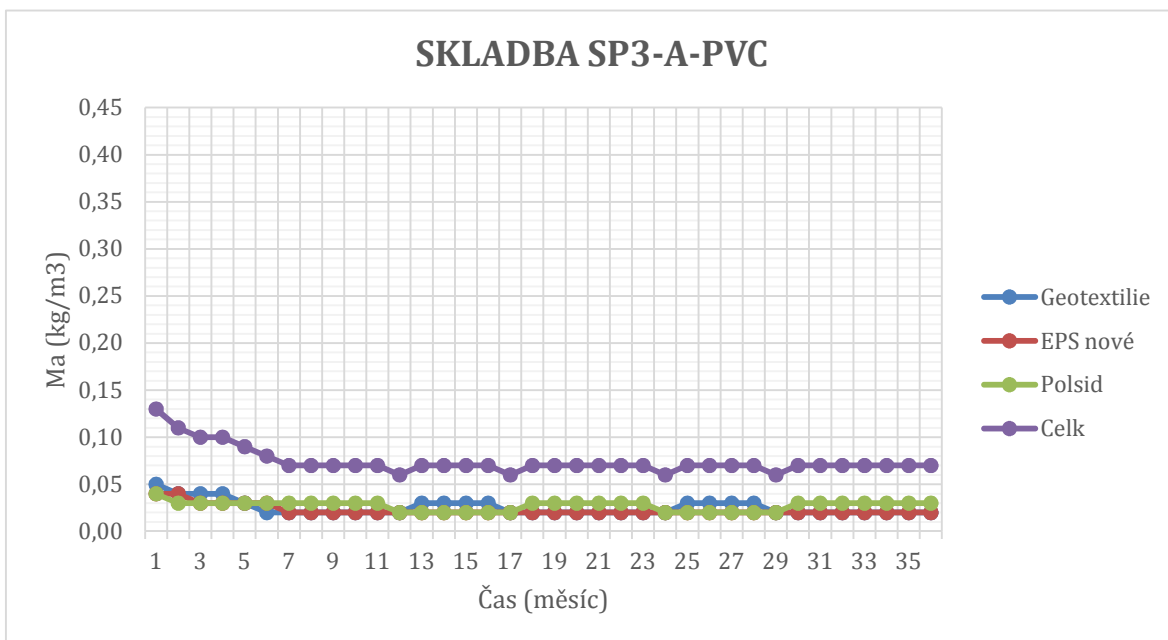


Graf 23: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 15% hmotnostní vlhkosti. (zdroj: archív autora)

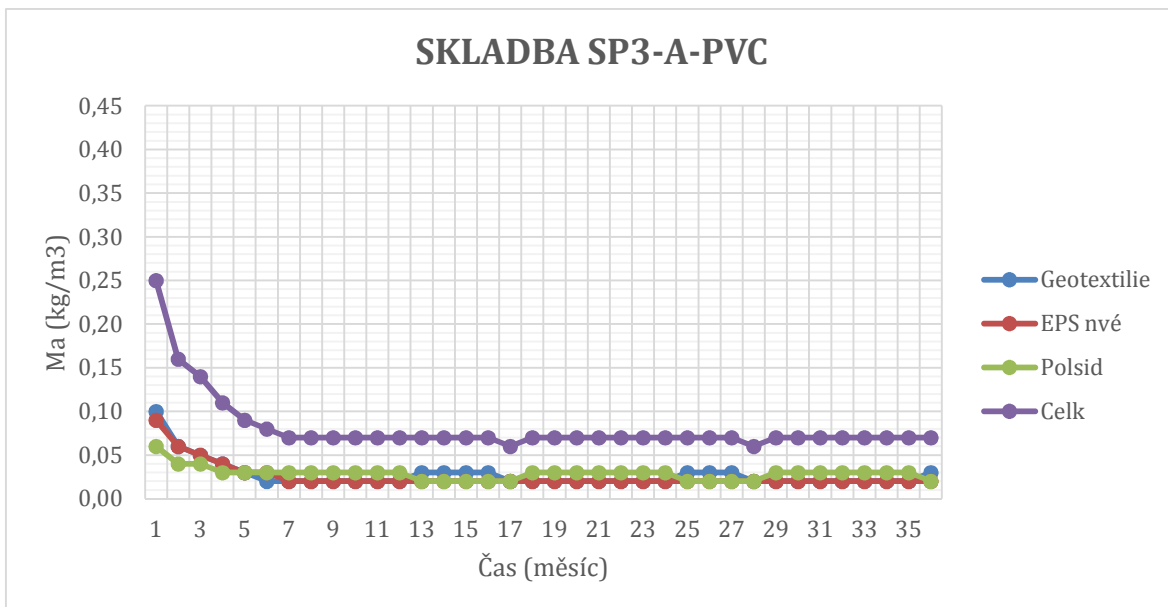


Graf 24: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 25% hmotnostní vlhkosti. (zdroj: archív autora)

Z grafů 25,26 a 27 je rovněž patrné, že bez ohledu na původní zabudovanou vlhkost v tepelné izolaci Polsid, dochází k postupnému vysychání .

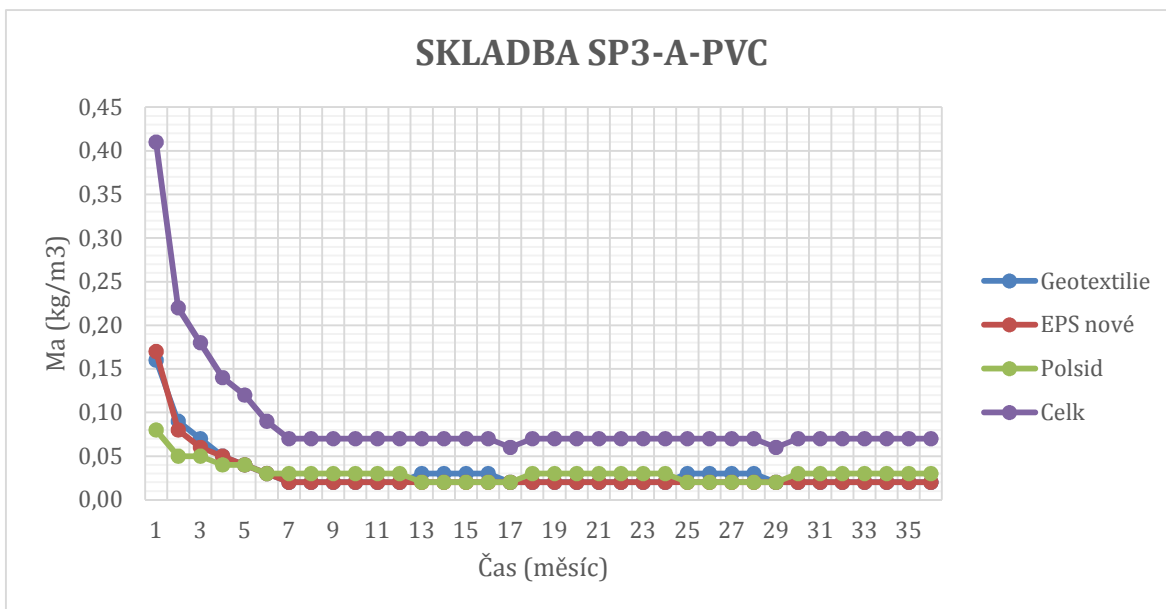


Graf 25: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 5% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace na bázi mPVC. (zdroj: archiv autora)



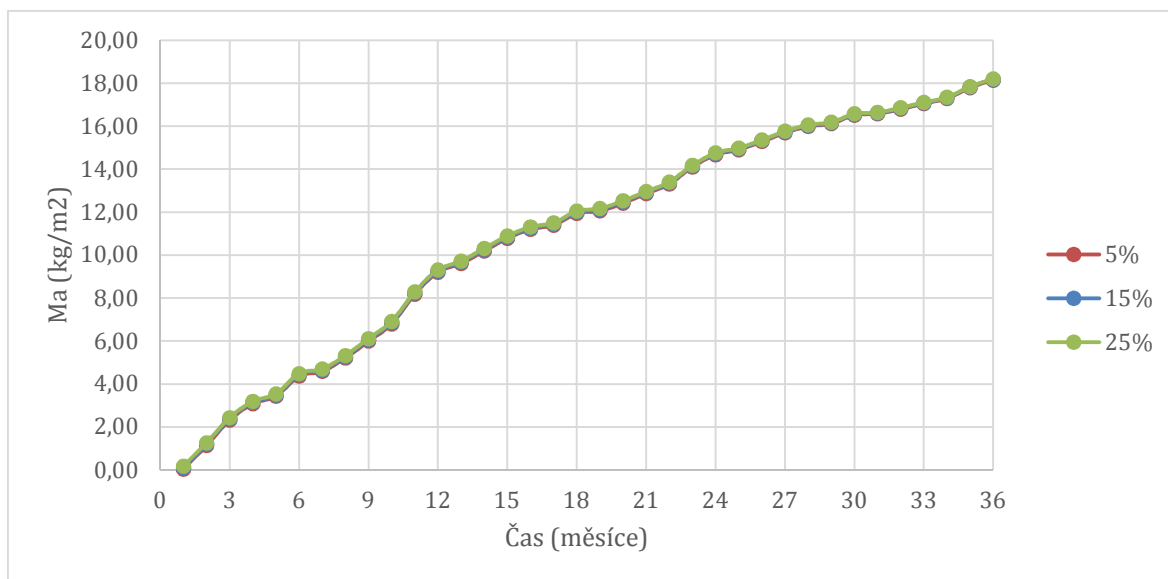
Graf 26: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 15% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace mPVC.

Lze tedy konstatovat, že při optimálním návrhu a ověření tepelně vlhkostních parametrů, lze realizovat opravu střešního pláště takovým způsobem, aby byl zajištěn pokles množství kondenzátu i v materiálech s již zabudovanou vlhkostí.



Graf 27: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Popsid 25% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace na bázi mPVC. (zdroj: archív autora)

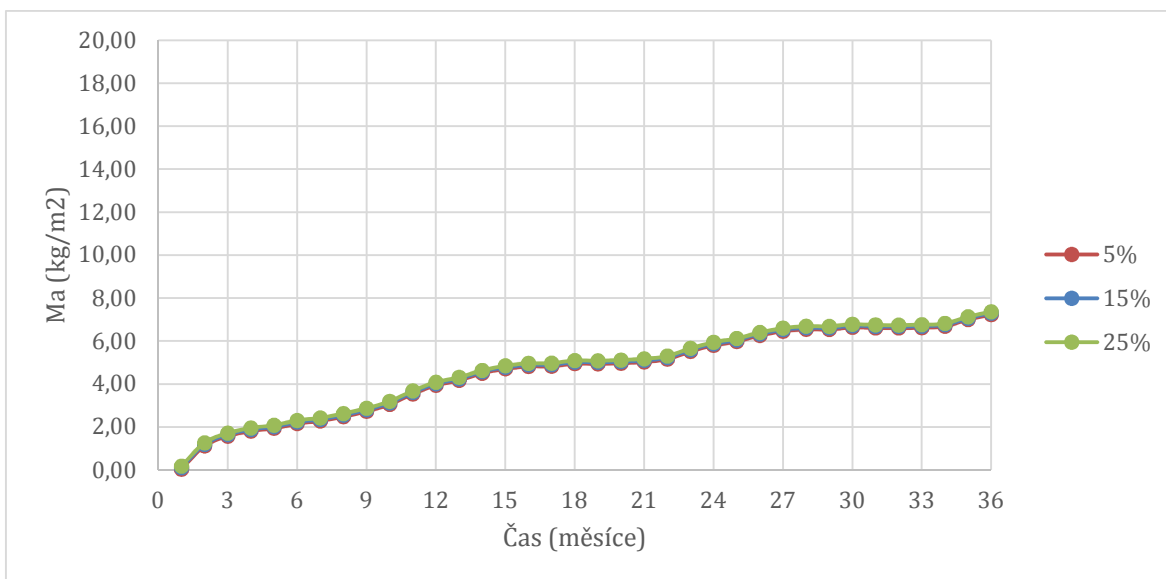
Obdobně jako u předchozích výpočtů i u skladby S07 byla provedena tepelně vlhkostní analýza celého střešního souvrství včetně nosné konstrukce. Jak je patrné z grafů 28 a 29 i při tomto výpočtu dochází nárůstu množství kondenzátu v celé skladbě, přesněji tedy z ověřovacích výpočtů, k nárůstu v nosné konstrukci střechy. Tyto simulace poukážou na nutnou erudovanost při volbě způsobu výpočtu tepelně vlhkostních parametrů a způsobu interpretace.



Graf 28: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště SP7 se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.

Při těchto výpočtech je nutné poukázat na vhodnost komparace tepelně vlhkostní bilance původní skladby před samotnou rekonstrukcí s nově navrhovanou skladbou. Jelikož výše uvedené výpočty poukázaly na komplikovanost hodnocení tepelně vlhkostních procesů při rekonstrukcích plochých střech, bylo přistoupeno nad rámec této práce k vytvoření systému kontinuálního monitoringu tepelně vlhkostních procesů u rekonstruovaných střech.

Aby byla maximalizována efektivita zisku nových poznatků ze sledování reálných procesů ve skladbách plochých střech byly zvoleny jak realizace na komerčních systémech tak vytvoření pilotní ověřovací jednotky s velmi vysokou zabudovanou vlhkostí.

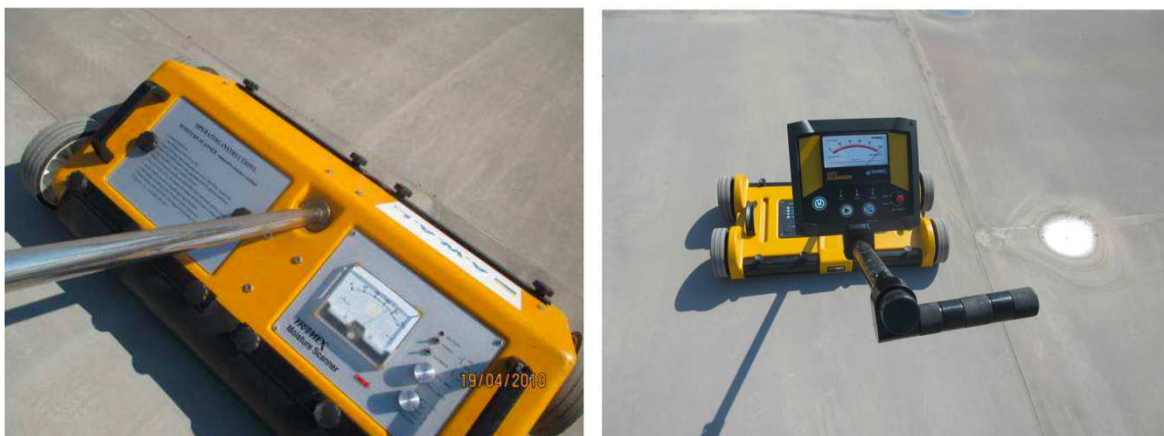


Graf 29: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště SP3 se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC. (zdroj: archív autora)

8. PRAKTICKÁ APLIKACE V PRAXI

Na základě získaných poznatků byla výše uvedená metodika aplikována na vybranou rekonstrukci střešního pláště s následným monitoringem vlhkosti ve střešním souvrství.

Při místním šetření bylo provedeno zjištění aktuálního stavu povlakové krytiny jako celku vizuální kontrolou včetně kontroly vodotěsného napojení na okolní konstrukce. Zvýšená pozornost byla věnována kontrole řešení detailů a návazností. Celková vlhkostní kontrola střešního pláště byla provedena metodou impedanční defektoskopie. Jde o metodu systematického nedestruktivního měření v celé ploše prověřované konstrukce). □



Obrázek 20: Nedestruktivní impedanční zařízení Tramex (zdroj: archiv autora, společnosti ROMEX s.r.o.)

Byl proveden podrobný záznam výsledků měření do půdorysu střešního pláště a následně vytvořena vlhkostní mapa a mapa poruch v naměřených komparativních hodnotách. Lokality s vysokou vlhkostí byly okamžitě během měření vyznačeny na vlastní povrch hydroizolace.

Kontrola in situ spočívala v provedení impedančního měření vlhkosti ve skladbě střešního pláště, ve vizuální kontrole stavu hydroizolačního povlaku, návaznosti prostupů a jehlové zkoušce těsnosti spojů. Impedanční měření bylo prováděno v základním rastru 1x1m. V místech s naměřenou zvýšenou vlhkostí byla provedena jehlová zkouška těsnosti spojů povlakové krytiny.

Místa s naměřenou zvýšenou vlhkostí pod hydroizolačním povlakem byla číselně zanesena do půdorysu dodaného objednavatelem – vlhkostní mapa, mapa poruch. Stav zvýšené vlhkosti pod stávající hydroizolací je v obrázku 22 značen v modrém polem s nejvyšší naměřenou hodnotou komparativní stupnice detektoru do 100 bodů.



Obrázek 21: Lokalizované netěsnosti ve stávající hydroizolaci (archív autora, společnosti ROMEX s.r.o.)

Netěsnosti krytiny ve spojích a jiná poškození byly zaznamenány na výkrese barevným označením. Během kontroly byly poruchy těsnosti zaznamenány černým a červeným popisovačem na samotný povrch hydroizolace.

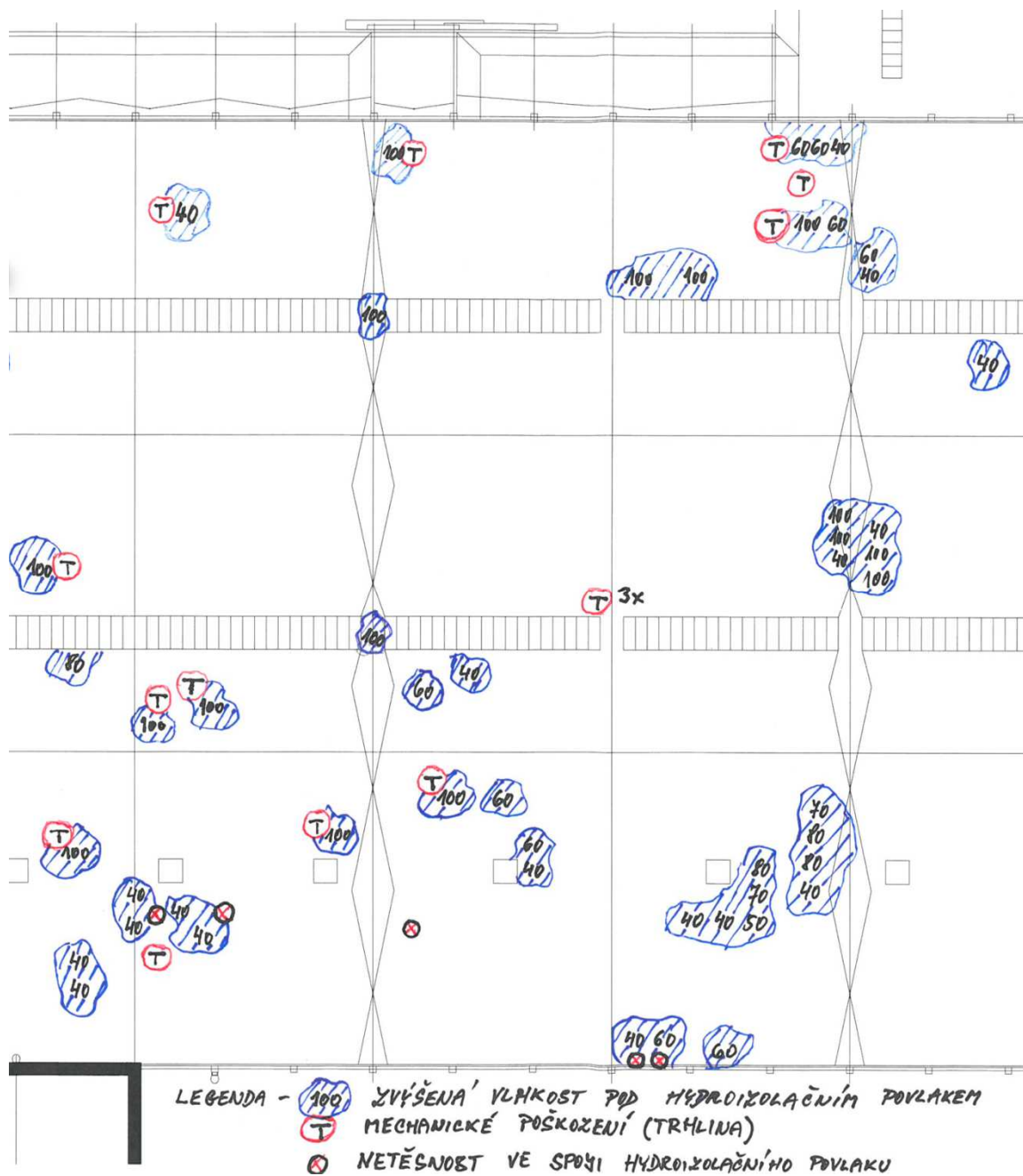
Zjištěné skutečnosti:

– Impedančním měřením byla zastižena lokálně zvýšená vlhkost pod hydroizolační krytinou.

- Mechanické poškození a trhliny v hydroizolační PVC-P folii.
- Lokální destrukce vrchní vrstvy hydroizolační PVC-P folie.
- Lokální netěsnosti ve spojích hydroizolační PVC-P folie.
- Lokálně provedeny opravy formou záplat.
- Trhliny v systémových rohových tvarovkách, zejména u světlíků.
- Lokálně dožilé tmely.
- Nevhodné rezavějící svěrné pásky (Motex) na kruhových prostupech.
- Lokálně chybí nerezové svěrné pásky na kruhových prostupech.
- Otvory v dutých ocelových profilech nosných konstrukcí.
- Dožilý nátěr oplechování zhlaví atiky.
- Cizí předměty na hydroizolačním povlaku - šrouby, sešívací spony.
- Lokální nedostatečné vytažení PVC-P folie na prostupující konstrukce.
- Lokální absence ochranných košů střešních vpustí.

V kontrolované části střešního pláště byla lokálně naměřena zvýšená vlhkost pod hydroizolačním povlakem a následně dohledány netěsnosti ve spojích, mechanické poškození a trhliny v PVC – P folii.

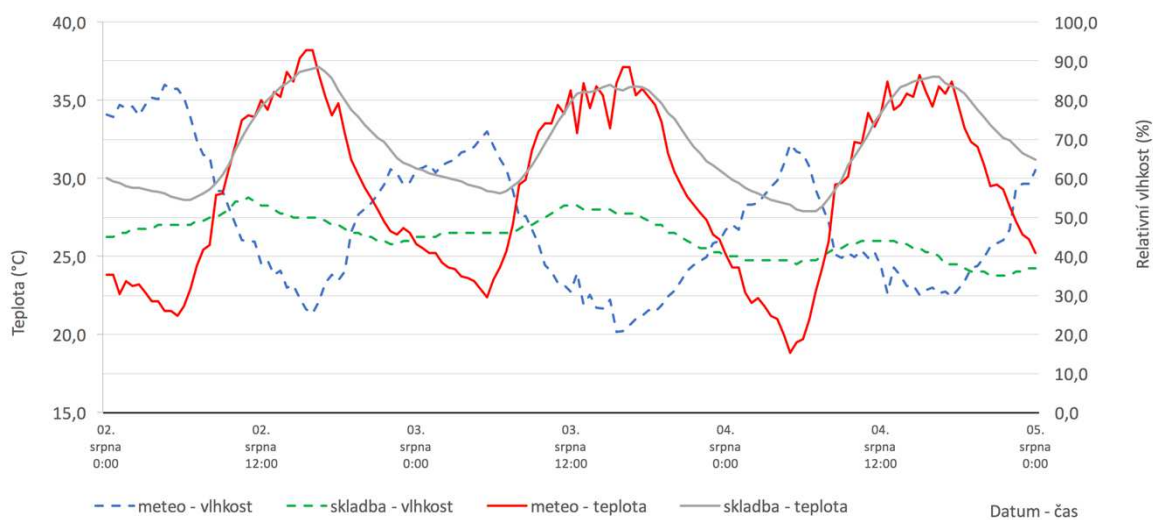




Obrázek 22: Vlhkostní mapa, místa s naměřenou zvýšenou vlhkostí pod hydroizolací (zdroj: archív autora, společnosti ROMEX s.r.o.)

V místech s největším výskytem vlhkosti byly provedeny perforace pro odvod vlhkosti. Nová hydroizolace byla provedena přes separační vrstvu netkané textilie, pro zajištění nízkého difúzního odporu kompletního souvrství hydroizolací.

Následně byl osazen monitorovací systém s možností alarmů při zvýšené vlhkosti nebo vzniku kondenzace.



Graf 30: Ukázka pořizovaných dat v rámci kontinuálního monitoringu rekonstruované střechy (zdroj: archiv autora)

9. NÁVRH OBECNÉ METODIKY

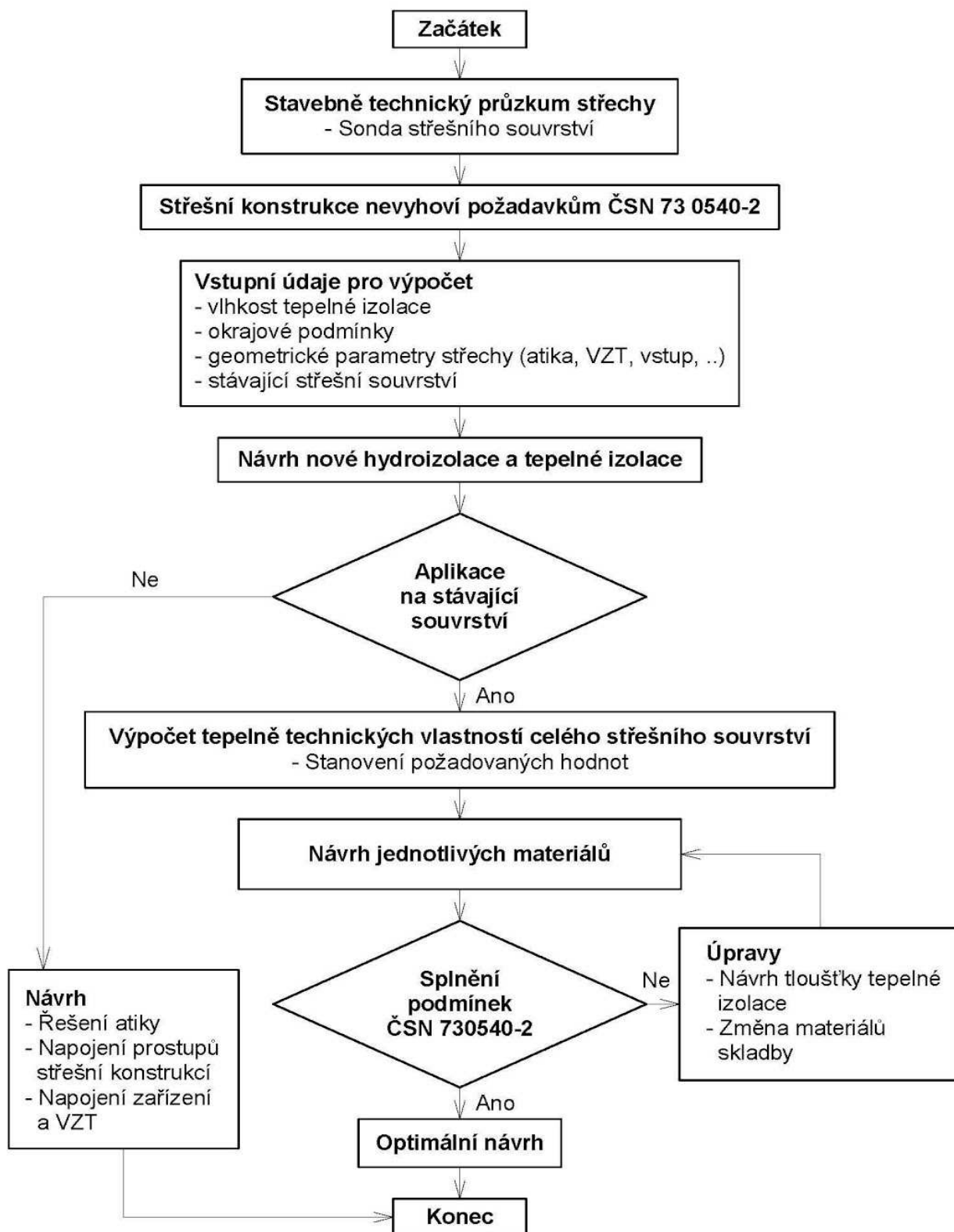
Pro stavební praxi nutno předpokládat, že rozsáhlá teoretická pojednání nenajdou v každodenním shonu patřičnou pozornost.

Proto považuji za nutné jak pro vlastní potřebu ve společnosti ROMEX tak i pro použití v širší profesní stavební veřejnosti předložit jednoduchou, jednoznačnou a tím prakticky použitelnou metodiku, která odstraní zásadní rozpor mezi odmítáním teoretických poznatků v praxi s pouze empirickým přístupem a provedením díla v oblasti oprav a rekonstrukcí střešních pláštů s ponecháním stávajícího souvrství z hlediska dosažení funkčního a spolehlivého výsledku na základě sofistikovaného přístupu.

Následující metodika je uvažována pro návrh oprav – obnovy funkce hydroizolační vrstvy při ponechání stávajícího souvrství, tedy bez kompletní demontáže a sestává z následujících kroků:

- zavedení protokolu o průzkumu, výpočtu a návrhu opravy či rekonstrukce,
- zaměření, resp. kontrola rozměrů střechy,
- provedení sond a odběr vzorků ze stávajícího souvrství střešního pláště,
- provedení zkoušek materiálových vlastností za účelem zjištění jejich stávajícího stavu,
- vyhodnocení zjištěných vlastností,
- provedení potřebných výpočtů pro návrh,
- zpracování zjednodušené prováděcí projektové dokumentace,
- zajištění praktické realizace,
- kontrola provádění prací,
- uzavření protokolu jako součást předání a převzetí díla.

Pro funkční opravu je zapotřebí dodržovat metodický postup po jednotlivých navržených částech.



Obrázek 23: Schéma tepelně-technického posouzení ploché střechy (zdroj: archiv autora)

Zavedení protokolu o průzkumu, výpočtu a návrhu opravy či rekonstrukce

Tento komplexní protokol by měl být vlastně zápisem na jedné straně o požadavcích investora na věcný obsah opravy a její funkčnosti, na druhé straně by měl představovat jednoduchou systematické pomůcku určující další postup a jeho dílčí kroky. Neboť s takovou pomůckou pak mohou pracovat i méně kvalifikovaní pracovníci, aniž by se dopouštěli chyb či omylů.

Zaměření, resp. kontrola rozměrů střechy

Je to krok vylučující oboustranné pochybnosti o rozsahu požadovaných nebo vykonaných prací. Zhotoviteli pak slouží pro bezproblémové objednání a dodání potřebných materiálů.

Provedení sond a odběr vzorků ze stávajícího souvrství střešního pláště

Provedení sond je nutné pro zjištění nebo v případě dostupné dokumentace ověření skutečné skladby střešního pláště a materiálů v něm použitých. Odběr vzorků pak slouží k laboratornímu určení jejich skutečných vlastností (zejména vlhkosti) nutných pro další výpočty a návrh opravy.

Provedení zkoušek materiálových vlastností za účelem zjištění jejich stávajícího stavu

Tento krok pak představuje konkrétní laboratorní zkoušky, jejichž výsledky se zaznamenají do průběžně vedeného protokolu a nemusí být dohledávány v případě potřeby samostatně v archivech.

Provedení potřebných výpočtů pro návrh

Je nutné provést potřebné výpočty. Obvykle budou předmětem samostatných výpočtů s využitím běžných metod např. pomocí Svoboda Software nebo DEKSOFT. Do průběžně vedeného protokolu se opět zaznamenají pouze výsledky. Neméně důležité, ale často bývá opomíjené určení součinitele difuzního odporu nově opravované hydroizolační vrstvy, jelikož se nejedná o standardní součást výpočtů posouzení.

Zpracování zjednodušené projektové dokumentace prováděcí

Ve zjednodušené dokumentaci je pak potřeba jednoznačně uvést návrh a způsob provedení perforace stávající hydroizolační vrstvy i techniky a technologie provedení opravy. Takovýto jasný „manuál“ by měl být jednoznačnou pomůckou pro prováděcí firmu ke kvalitní realizaci i pro investora ke kontrole.

Zajištění praktické realizace

Je samozřejmým krokem, ve kterém bývá bohužel opomíjen zájem ze strany vedení realizační firmy, tedy chybí dobrá příprava a průběžná kontrola a provedení je ponecháno pouze na profesních dělnících a jejich osobní odpovědnost a kvalitu. V mnohých případech chybí průběžná i konečná kontrola ze strany investora.

Kontrola provádění prací

Chybějící kontrola, pro kterou by měl být zpracován kontrolní a zkušební plán a který by měl sloužit jak realizační firmě, tak investorovi, bývá závažným jevem, který se bohužel na stavbách menšího rozsahu a se zaměřením na dílčí práce a technologie vyskytuje velmi často. Důsledky pak bývají bohužel výrazné, vynaložené prostředky bývají často zmařeny nefunkčností oprav z důvodů někdy banálních a třeba i nezáměrně vzniklých chyb. V našem případě by tou zcela fatální chybou bylo neprovedení perforace stávající hydroizolační vrstvy. K tomu by však mohlo velmi lehce dojít, neboť v izolačnické praxi je to zcela neobvyklý krok a nebylo by nic divného, kdyby profesní dělníci tento krok považovali za nesmyslný a ze své „dobré“ vůle ho vynechali.

Uzavření protokolu jako součást předání a převzetí díla

Uzavření průběžně vedeného protokolu jako součásti protokolu o předání a převzetí díla je jednoznačným dokumentem o provedení a kontrole všech nutných kroků ke zdařilé investorem zamýšlené opravě a měl by být jednoznačným podkladem pro řešení problémů případných vad a poruch díla nebo jakýchkoli jiných rozporů mezi objednatelem a zhotovitelem v budoucnu.

Provedení jednotlivých kroků

Zavedení protokolu o průzkumu, výpočtu a návrhu opravy či rekonstrukce

Odpovědné vyplnění jednotlivých rubrik.

Zaměření, resp. kontrola rozměrů střechy

Provedeno běžnými měřičskými způsoby (záznam do protokolu).

Provedení sond a odběr vzorků ze stávajícího souvrství střešního pláště

Provedení sond a odběru vzorků dle velikosti a členitosti střechy, je nutno tento krok plánovat ve vztahu ke konkrétní střeše.



Obrázek 24: Sonda střešního souvrství (zdroj: archív autora)

Provedení zkoušek materiálových vlastností za účelem zjištění jejich stávajícího stavu

Provedení zkoušek autorizovanou laboratoří nebo ve vlastních laboratořích zhotovitele s jeho veškerou odpovědností. Jedná se zejména o poměrně jednoduchou zkoušku stanovení vlhkosti dle ČSN EN ISO 12570

(73 0573) - Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě a zkoušky pro zjištění difuzních vlastností dle ČSN EN 1931 (72 7644) - Hydroizolační pásy a fólie - Asfaltové, plastové a pryžové pásy a fólie pro hydroizolaci střech - Stanovení propustnosti vodní páry, ČSN EN ISO 12572 (73 0547) - Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení prostupu vodní páry

Uvedený postup je použitelný pro všechny hygroskopické a nehygroskopické stavební materiály a výrobky včetně opláštěných. V přílohách jsou uvedeny podrobnosti zkušebních metod pro odlišné typy materiálů. Z důvodu zvýšené nejistoty výsledků zkoušek nelze tuto normu použít v případě zkušebních vzorků s hodnotou ekvivalentní difúzní tloušťky (tloušťka v metrech vzduchové vrstvy s identickým vzduchovým odporem) menší než 0,1 m. Pokud je ekvivalentní difúzní tloušťka větší než 1500 m, může být materiál považován za nepropustný.

Obvykle nebude laboratorní ověření prakticky používáno a bude předmětem převzetí empirických hodnot z dostupných spolehlivých zdrojů.

Vyhodnocení zjištěných vlastností a provedení potřebných výpočtů pro návrh

- součinitel prostupu tepla U ($W/m^2 \cdot K$)
- množství zkondenzované vodní páry M_{ca} (kg/m^2 , rok)
- celková roční bilance vodní páry M_{ca} a M_{ev} (kg/m^2 , rok)
- požadovaný faktor difúzního odporu stávající hydroizolace μ (-)

Zpracování zjednodušené prováděcí projektové dokumentace

Zpracování této dokumentace musí být předmětem činnosti autorizované osoby a nemůže být ponecháno jen na zhotoviteli a jeho profesních pracovnících, což neplatí pro případ, že profesní pracovníci zhotovitele autorizovanou osobou jsou.

Součástí zjednodušené prováděcí projektové dokumentace musí být:

- tepelně technické výpočty (zpětně revidovatelné),
- z nich vycházející návrh opravy se specifikací všech hlavních i pomocných materiálů a dílčích prvků,
- plán a popis perforace,

- kladečský plán hydroizolace,
- kotevní plán s doložením výtahových zkoušek pro případy nejednoznačné únosnosti podkladu,
- řešení opracování detailů a napojení hydroizolace,
- řešení difúzně otevřeného napojení hydroizolace na atiku a sousedící konstrukce,
- kontrolní a zkušební plán.

Zajištění praktické realizace

Je předmětem uzavření oboustranně odsouhlasené smlouvy o dílo v rozsahu dle obchodního zákoníku a obsahu daného konkrétním projektem a požadavky obou smluvních stran. Ze strany investora by měl být vždy určen jeho technický dozor a měl by důsledně provádět průběžnou kontrolu prací.



Obrázek 25: Pokládka doplňkové tepelné izolace a hydroizolačního souvrství na stávající skladbu (zdroj: archív autora)

Kontrola provádění prací

Měla by být jednoznačně a přehledně určena výše uvedeným kontrolním a zkušebním plánem s podrobným popisem tak, aby ji mohl provádět i méně zkušený technický dozor.

Uzavření protokolu jako součást předání a převzetí díla

Provede objednatel spolu se zhotovitelem společným závěrečným podpisem protokolu obsahujícího řádné vyplnění a podpisy odpovědných osob ve všech bodech protokolu. Následně bude přiložen k protokolu o předání a převzetí díla.

10. EKONOMICKÁ ANALÝZA

Současný fenomén zateplování a renovace obálky staveb občanské vybavenosti pohltit Českou republiku. Již řadu let můžeme pozorovat změnu šedého, betonového moře panelových domů na různorodé, a mnohdy až bizarně barevné, úpravy nově zateplených fasád. Celá řada stavebních firem se soustředila pouze na zateplování budov a díky dotačním titulům, je klientů z řad jednotlivců, přes bytová družstva až po veřejné instituce, stále dost. A právě v takovémto objemu stavební výroby nelze vždy zachovat nejlepší kvalitu a technologické postupy.

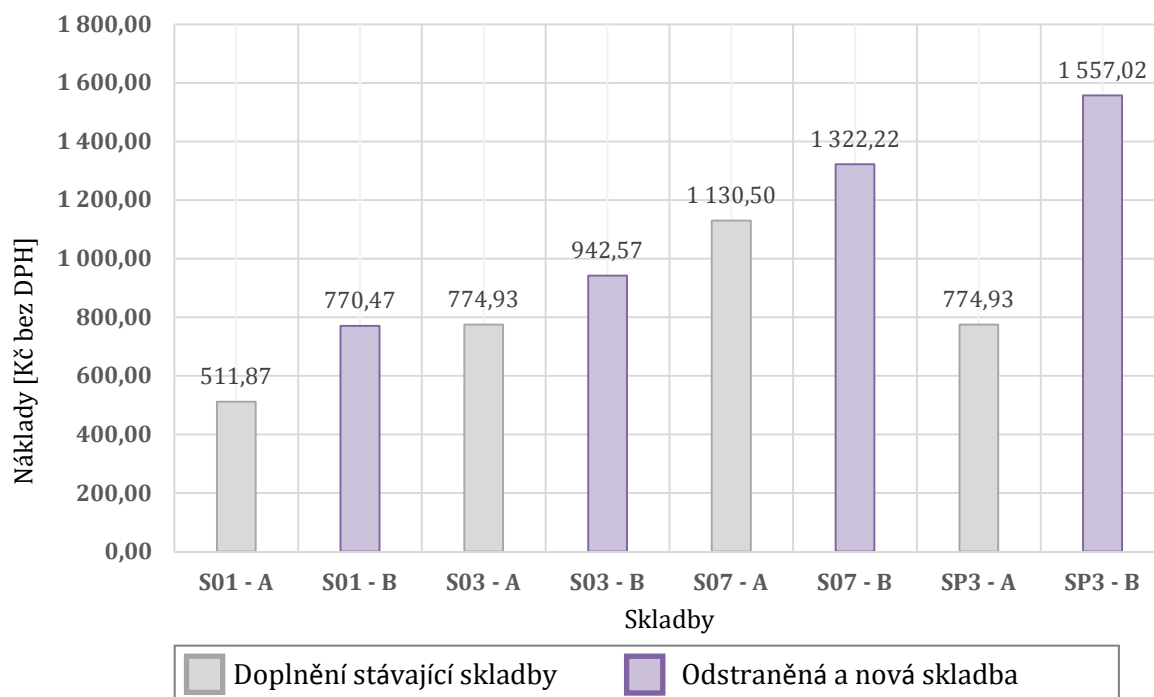
Nedílnou součástí a zároveň podmínkou pro získání dotace na zateplení fasády je i zateplení střešní konstrukce. A právě tato část konstrukce bývá mnohdy v pozadí celého řešení zateplení obálky budovy. Chybné navržení a provedení nového souvrství střešní konstrukce může mít neblahý vliv nejen na konstrukci jako takovou, ale i na život v řešených objektech.

10.1. Stanovení nákladů

Pro stanovení nákladů na jednotlivé skladby byl použit rozpočtovací software KROS od firmy KROS ÚRS Praha a.s. s cenovou úrovní 2018/2. Řešená souvrství jsou rozdělena do dvou skupin – A) doplnění stávající skladby; B) odstranění stávající skladby a její opětovné vybudování a doplnění.

Položkové rozpočty pro jednotlivé skladby byly plošně kalkulovány pro plochu 1,0 m². Ve variantě A) se jednalo pouze o doplnění tepelné a hydroizolační vrstvy. Zatím co u varianty B) se odstraňovalo kompletní souvrství, tvořené hydroizolací a tepelnou izolací. Následně bylo pro tuto variantu doplněno nové souvrství v obdobném, původním složení ze současných materiálů. Každý rozpočet obsahuje nejen montážní a materiálové položky, ale i přesun hmot a případně přesun a vybouraných hmot a jeho likvidace.

Stanovení nákladů bylo zpracováno pro skladby S01-A; S01-B; S03-A; S03-B; S07-A; S07-B; SP3-A; SP3-B. Jednotlivé konstrukční prvky souvrství jsou patrný na grafice níže.



Graf 31: Ekonomické zhodnocení nákladů na realizaci 1,0 m² střechy (zdroj: archív autora)

Pomocí rozpočtovacího softwaru byly stanoveny náklady jenž jsou pro přehlednost uvedeny tabulce 4 a grafu 31.

Tabulka 4 : Náklady na realizaci 1,0 m² střechy (zdroj: archív autora)

Skladba	Jednotková cena [Kč bez DPH]	Navýšení
S01 - A	511,87	100%
S01 - B	770,47	151%
S03 - A	774,93	100%
S03 - B	942,57	122%
S07 - A	1 130,50	100%
S07 - B	1 322,22	117%
SP3 - A	774,93	100%
SP3 - B	1 557,02	201%

11. APLIKACE – PŘÍNOS TEORETICKÝCH POZNATKŮ V SOUDNĚ INŽENÝRSKÉ PRAXI

Přínos této práce pro soudně inženýrskou praxi je možno rozdělit do dvou oblastí.

Pro účely znalecké praxe považuji za podstatné zjištění, že tepelně technické výpočty statickou metodou TEPLO 2017, které jsou v technické praxi používány nejčastěji, přinášejí pozitivnější výsledky než jak tomu potom může odpovídat skutečný stav konstrukce. Tento poznatek přineslo srovnání těchto výpočtů pro různé konstrukční skladby střešních pláštů s výsledky výpočtů provedených dynamickou metodou WUFI. Metoda WUFI navíc ještě umožňuje sledovat vlastnosti jednotlivých vrstev v konstrukci, což metoda TEPLO 2017 neumožňuje, neboť zahrnuje celou konstrukci včetně nosných vrstev.

Dalším poznatkem je to, že vlhkostní výsledky výpočtu jsou výrazně ovlivněny vrstvou nosné konstrukce, pokud je z materiálu beton ať již monolitický nebo prefabrikovaný.

I když je metoda TEPLO 2017 uznávána jako metoda pro normové výpočty, pro detailní zkoumání konstrukce ve znalecké činnosti je tedy dle mého názoru podstatně vhodnější používat dynamickou metodu WUFI.

V případě, že se soudně inženýrská činnost zabývá nikoli znaleckým, ale expertním zkoumáním, je pak velkým přínosem této práce metodika umožňující predikovat chování konstrukce střešního pláště v případě jeho ovlivnění vlhkostí pronikající vadami hydroizolace. Tak lze hledat cestu k tomu, aby se opravy vad a poruch mohly provádět bez nutnosti demontáže celého souvrství, což výrazně snižuje náklady i zkracuje dobu realizace a vysoce potlačuje možnost zatečení do interiéru v průběhu oprav. Tyto skutečnosti pak v případě, že vady a poruchy jsou předmětem sporu, mohou přispět ke hledání cesty ke smírnému řešení sporu mimosoudní cestou, což je v současné době aktuální problém snížení zátěže soudů

12. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo formulovat nové přístupy k řešení vad a poruch střešních pláštů a na konkrétním technickém případě ukázat nejen možné vědecko-technické řešení, ale i jeho ekonomický přínos a celkový přínos k řešení problémů v této oblasti.

Pro její zpracování ve výpočetně analytické části byly použit software TEPLO 2017 jako statická metoda, která je však v České republice velmi rozšířena, je institucionalizována normativně a je uživatelsky výrazně jednodušší. Proto je v běžné technické praxi používán zatím v převážné míře.

Pro využití možných dynamických metod byl zvolen software WUFI garantovaný renomovaným Fraunhoferovým institutem, je rozšířený po celém světě, ale má přímého partnera také v České republice a je tak pro uživatele v tuzemsku dobře použitelný, navíc je dle současných norem přípustný pro používání v tuzemsku, přičemž jeho použití vidím zatím v oblasti vědeckotechnické nebo pro řešení úloh s mezinárodním charakterem.

V práci nejsou obsaženy jednotlivé výpočty, kterých bylo zpracováno velké množství pro 32 konstrukčních variant střešních pláštů a které představují pouze použití dostupných výpočetních softwarů, ale jsou uvedeny pouze vybrané varianty doložené výslednými grafy a hodnotícími komentáři shrnujícími výsledky jednotlivých dílčích výpočtů.

Výsledky výpočetní analýzy přinesly zajímavé poznatky, které znamenají řadu nových skutečností pro tepelně technické analýzy kompletních střešních konstrukcí i dílčí konstrukce střešních pláštů a pravděpodobně mohou být zvažovány i u jiných konstrukčních prvků.

Metoda využitá v softwaru TEPLO 2017 jako statická výpočetní metoda, která pracuje s méně vstupními parametry, poskytuje ustálenější a podstatně pozitivnější výsledky z hlediska celé řešené problematiky. Její výsledky pak mohou být pojímány jako jednoznačné teoretické potvrzení navrhované metodiky oprav střešních pláštů bez nutnosti demontáže stávajícího souvrství s tím, že stávající hydroizolační vrstva musí být bodově nebo liniově perforována. Přitom tento způsob výpočtu vzhledem k jednorozměrnému modelu šíření tepla a vlhkosti neuvažuje nutnost difuzně otevřeného napojení následných vrstev střešního pláště na okolní prostředí.

A právě tato skutečnost se mi jeví negativně, neboť právě difuzně otevřené napojení následné vrstvy na okolné prostředí je dle mého názoru tou nejpodstatnější částí tohoto řešení a při jeho zanedbání, i když výpočet dokládá postupné snižování zabudované vlhkosti, může dle mého názoru docházet k následným problémům.

Dynamická metoda WUFI pracující s podstatně více vstupními parametry a širším výpočetním aparátem umožňujícím z celkového výsledku navíc detailně extrahovat děje v jednotlivých vrstvách celkového souvrství. Tím přináší i možnost analyzovat děje ve vrstvě tepelné izolace a doložit jimi závěry o možnosti opravy či rekonstrukce střešního pláště bez nutnosti jeho kompletní demontáže.

Vyústěním celé práce je navržení metodiky pro konkrétní technologii opravy hydroizolační vrstvy s technickými opatřeními provedenými na stávajícím souvrství, S využitím metodiky je rovněž možno predikovat vývoj vlastností skladby střešního pláště po opravě, zejména vývoj vlhkostních parametrů, až do dosažení rovnovážné vlhkosti a umožnit tak opravu bez demontáže stávajícího souvrství.

Praktický přínos předkládané habilitační práce spočívá nejen ve výstupech prohlubujících soudně znaleckou praxi, kdy jednoznačně prokazuje, že pro sofistikované zkoumání a určení vzniklých vad a poruch je vhodné používat pouze výpočetní postupy nestacionární a z možných softwarových pomůcek využívat software WUFI, ale i v možnosti v případě expertní činnosti navrhnout odstranění vad a poruch střešních pláštů s minimálními náklady a výrazně tak tímto teoretickým nástrojem přispět k hledání cesty jak řešit případně vzniklé spory i mimosoudní cestou, která vzhledem k přetížení soudů začíná být v celoevropské praxi řešení sporů preferovaná.

Tato habilitační práce a její výstupy pak v teoretické rovině mohou představovat významný nástroj pro rozvoj oboru soudního inženýrství z hlediska znalecké činnosti, ale z praktického pohledu pak mohou sloužit jako nástroj k zpřesnění metod pro zpracování znaleckých posudků jakož i následně rozvíjet odborné a expertní činnosti Ústavu soudního inženýrství a dále pro možnost přenést uplatnění výsledků do široké stavební praxe.

Použitá zdroje a literatura:

- [1] ČSN 73 0540-1 Tepelná ochrana budov. Část 1: Terminologie. PRAHA: ČNI, 2005
- [2] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky. PRAHA: ČNI, 2011
- [3] ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov. Část 3: Návrhové hodnoty veličin. PRAHA: ČNI, 2005
- [4] ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov. Část 4: Výpočtové metody. PRAHA: ČNI, 2005
- [5] ČSN 73 0610 Hydroizolace staveb Sanace vlhkého zdiva Základní ustanovení. PRAHA: ČNI, 2000
- [6] ČSN EN/TR 15615 Energetická náročnost budov – Výklad obecných souvislostí mezi různými evropskými normami a EPBD – Zastřešující dokument. PRAHA: ČNI, 2003
- [7] ČSN EN 15603 Energetická náročnost budov – Celková potřeba energie a definice energetických hodnocení (v překladu).
- [8] ČSN EN 15617 (73 0324) Energetická náročnost budov – Metody pro vyjádření energetické náročnosti budov a pro energetickou certifikaci budov. PRAHA: ČNI, 2008
- [9] ČSN EN ISO 13788 (73 0544) Tepelně vlhkostní chování stavebních konstrukcí a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota po vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody. PRAHA: ČNI, 2002
- [10] ČSN EN ISO 13789 (73 0565) Tepelné chování budov – Měrná ztráta prostupem tepla – Výpočtová metoda. PRAHA: ČNI, 2000
- [11] ČSN EN ISO 13790 (73 0317) Energetická náročnost budov – Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení. PRAHA: ČNI, 2009

- [12] ČSN EN 15026:2007. Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [13] EN 12831, Heating systems in buildings – Method for calculation of the design heat load
- [14] EN 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
- [15] EN ISO 12572: 2001 Hygrothermal performance of building materials and products – determination of water vapour transmission properties. CEN; 2001.
- [16] Künzeli, H.M. More Moisture Load Tolerance of Construction Assemblies through the Application of a Smart Vapor Retarder. In Proceedings Thermal Envelopes VII (pp.129-132). Clearwater Beach: ASHRAE, 1998.
- [17] ASTM E 96/E 96M. (2005). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. West Conshohocken: ASTM International.
- [18] CHEN V.F., LIEW, R.J.Y.: The Civil Engineering Handbook . New York: CRC Press Inc., 1995. ISBN: 0849309581
- [19] MRLÍK, F.: Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1985.
- [20] ŠÁLA, J, KEIM, L., SVOBODA, Z., TYWONIAK, J., NOVÁK, J.: Komentář k ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2008. 292 s. ISBN: 987-80-87093-30-6.
- [21] VAVERKA, J, CHYBÍK, J., MRLÍK, F.: Stavební fyzika 2, Brno: VUTIUM, 2000. 419 s. ISBN: 80-214-1649-1.
- [22] VAVERKA J., Stavební tepelná technika a energetika budov. Brno: VUTIUM, 2006. 684 s. ISBN 80-214-2910-0.
- [23] VAN DER SPOEL, W., Water vapour transport through perforated foils, Research in Building Physics. Wim, TU Delft, Faculty of Civil Engineering

and Geosciences, Section Building Engineering, Delft, Lisse: Swets & Zeitlinger.

[24] SCHÜLE, W., REICHARDT, I. Wasserdampfdurchgang durch Öffnungen. Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Brandschutz. WKSB-Sonderausgabe August 1980: 12-16.

[25] BIRD, R.B., STEWART, W.E. & LIGHTFOOT, J. Transport Phenomena. John Wiley & Sons: New York. E.N. 1960

[26] SLANINA P, SILAROVA S., Difuzni mosty. Strechy, fasady, izolace 2006;13(4):66-7

[27] GERTIS, K., ERHORN, H. Wohnfeuchte and Wärmebrücken. HLH. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik 3/36,s.130-135, ISSN: 1436-5103

[28] SYNEK, J., Vady a poruchy střešních plášťů - nejčastější příčiny: Střechy, fasády, izolace. Ostrava , Nakladatelství MISE 2012(4). ISSN 1212-0111.

[29] SYNEK,J.,Hodnocení odolnosti a náročnosti hydroizolací v realizační praxi: Střechy,fasády,izolace. Ostrava , Nakladatelství MISE 2012(5). ISSN 1212-0111.

[30] MIKŠ, L. a kol., Údržba a rekonstrukce starších městských budov. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1137-5.

[31] GLASER, H., Grapisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen (Graphical Procedure for investigating Diffusion). Kaltetechnik, 11, 345-355,1959.

[32] SOLAŘ, J., JORDANOVÁ, V. Vybrané tepelně technické problémy u historických budov. Tepelná ochrana budov č. 2/2007. ISSN 1213-0907

[33] TICHOMIROV, V., Aspekty návrhu striech pre priemyselné objekty, Eurostav, 10/2008, roč. 14,str. 30 -32, ISSN 1335

[34] TICHOMIROV, V., Návrh hydroizolace jako možná příčina vad a poruch plochých střecha a teras, 5. mezinárodní konference Techsta 2007, ISBN 978-80-01-03880-2

- [35] TICHOMIROV, V., Ochrana staveb proti radonu, Střechy, fasády, izolace, 2005, ročník 12, č. 1, str. 64, ISSN 1212-0111.
- [36] TICHOMIROV, V., Vegetační souvrství jako faktor zvýšení životnosti a spolehlivosti plochých střech a teras, 5. mezinárodní konference Techsta 2007, str. 57 – 58, ISBN 978-80-01-03880-2
- [37] TICHOMIROV, V., PEŘINA Z., Životnost a spolehlivost plochých střech, XII. Mezinárodní vědecká konference Pozemní stavby a architektura FAST VUT Brno, duben 2009, ISBN 978-80-7204-629-4
- [38] DRYER, J a kol.: Simulace tepelně a vlhkostně technických dějů. Mnichov. Směrnice WTA 6-2-01/D, WTA, 2002
- [39] CAMMERER, J., ACHTZIGER, J. Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen (Effect of the moisture content on the thermal conductivity of building materials and insulation products). Kurzberichte aus der Bauforschung (115), 401-406 ,1985.
- [40] DRYER, J a kol.:Návod pro hydrotermické simulační výpočty. Mnichov. Směrnice WTA 6-2-01/D, WTA, 2002
- [41] CHMÚRNÝ, I.: Tepelné ochrana budov. BRATISLAVA: JAGA , 2003
- [42] ŘEHÁNEK, J., JANOUŠ, A., KUČERA, P., ŠAFRÁNEK, J.: Tepelně technické a energetické vlastnosti budov. PRAHA: GRADA PUBLISHING, 2002.
- [43] TICHOMIROV, V., Folie nebo asfaltové izolační pásy? Návrh a optimalizace řešení sanace střešních pláštů průmyslových objektů, Firemní technické podklady Büsscher Hoffmann, 2004
- [44] TICHOMIROV, V., Příručka montážních a technologických pokynů a technických detailů pro materiály Büsscher Hoffmann, Firemní technické podklady Büsscher Hoffmann, 2006
- [45] TICHOMIROV, V., Romex – Flachdachabdichtungen, Příručka montážních a technologických pokynů, Firemní materiál Romex AG, Německo, 2002

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Atika ploché střechy haly včetně termovizního snímku s patrnými tepelnými mosty</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2: Ukázka narušené povlakové krytiny z fólie.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3: Oprava hydroizolační vrstvy ploché střechy plnoplošným provedením nové hydroizolační vrstvy</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4: Bodová perforace – upraven jas a kontrast fotografie pro lepší zřetelnost perforace</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 5: Zjevná kondenzace v hydroizolačním souvrství pod hlavní hydroizolací z asfaltových pásů</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6: Schéma perforace - vzdálenost děr perforace je $2r_d$, poloměr perforace je r_g.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7: Příčný řez otvorem perforace, sférický model.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8: Schéma aplikovatelnosti metodik výpočtu pro konstrukce s a bez difúzních mostů.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 9: Vlevo schéma střešního pláště s homogenními materiály, vpravo schéma střešního pláště s nehomogenními materiály.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 10: Schéma zobrazení difúzních tlaků uvnitř homogenní konstrukce a následně po perforaci vrstvy původní hydroizolace.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 11: Schéma pole difúzních tlaků v dvourozměrném teplotním poli u skladby s perforovanou hydroizolací v softwaru WUFI Pro.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 12: Provádění bodové perforace stávajícího střešního souvrství....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 13: Pohled na střešní plášť s vrásněním</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 14: Schéma vzniku tzv. boulí vlivem deformace difúzních polí.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 15: Pohled na hydroizolační souvrství s boulemi, největší boule již odstraněny a záplatovány.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 16: Schéma vybrané konstrukce S01 pro vlhkostní analýzu konstrukce ploché střechy</i>	<i>63</i>

<i>Obrázek 17: Provádění doplňkové tepelné izolace, hydroizolačního souvrství a nové atiky.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 18: Schéma vybrané konstrukce S03 s původní tepelnou izolací Polsid a S07 s původní tepelnou izolací KSD pro vlhkostní dynamickou analýzu rekonstrukce.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 19: Schéma vybrané konstrukce SP3 s původní tepelnou izolací Polsid a původní parozábranou z asfaltového pásu pro vlhkostní dynamickou analýzu rekonstrukce.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 20: Nedestruktivní impedanční zařízení Tramex.....</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 21: Lokalizované netěsnosti ve stávající hydroizolaci.....</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 22: Vlhkostní mapa, místa s naměřenou zvýšenou vlhkostí pod hydroizolací.....</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 23: Schéma tepelně-technického posouzení ploché střechy.....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 24: Sonda střešního souvrství.....</i>	<i>92</i>
<i>Obrázek 25: Pokládka doplňkové tepelné izolace a hydroizolačního souvrství na stávající skladbu.....</i>	<i>94</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Závislost podílu plochy otvorů na difúzní tloušťce vybraných materiálů</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 2: Počet otvorů perforace hydroizolačního asfaltového pásu.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 3: Vzdálenost otvorů perforace asfaltového pásu v závislosti na jejich počtu a procentu perforované plochy.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4 : Náklady na realizaci 1,0 m² střechy</i>	<i>97</i>

Seznam grafů

<i>Graf 1: Množství kondenzátu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) dle metodiky výpočtu bilance vlhkosti dle ČSN 730540, bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace.....</i>	<i>42</i>
<i>Graf 2: Množství kondenzátu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dle metodiky výpočtu bilance zkondenzované a vypařené vlhkosti dle ČSN EN ISO 13788</i>	<i>43</i>
<i>Graf 3: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěno nové hydroizolační souvrství.....</i>	<i>50</i>
<i>Graf 4: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěna nová skladba s tepelnou izolací EPS a hydroizolačním souvrstvím</i>	<i>51</i>
<i>Graf 5: Vypočtené hodnoty faktoru difúzního odporu při různém průměru perforace. Perforovaný pás je umístěn na původním EPS a na něj je umístěna nová skladba s tepelnou izolací MVD a hydroizolačním souvrstvím</i>	<i>51</i>
<i>Graf 6: Závislost celkové plochy perforace na osové vzdálenosti perforovaných otvorů, zobrazeno pro jednotlivé průměry otvorů</i>	<i>54</i>
<i>Graf 7: Závislost celkové plochy perforace na počtu perforovaných otvorů pro jednotlivé průměry otvorů</i>	<i>54</i>
<i>Graf 8: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>64</i>
<i>Graf 9: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC.</i>	<i>64</i>
<i>Graf 10: Výstup dynamické simulace se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>65</i>

<i>Graf 11: Výstup dynamické simulace se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou na bázi mPVC.....</i>	<i>66</i>
<i>Graf 12: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>67</i>
<i>Graf 13: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 14: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S03 s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>73</i>
<i>Graf 15: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S07 s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>74</i>
<i>Graf 16: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S03 s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC.....</i>	<i>74</i>
<i>Graf 17: Množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy S07 s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC.....</i>	<i>75</i>
<i>Graf 18: Výstup dynamické simulace celé skladby S03 střešního pláště s původní teplenou izolací Polsid se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>75</i>
<i>Graf 19: Výstup dynamické simulace celé skladby S03 střešního pláště s původní teplenou izolací Polsid se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie na bázi mPVC.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 20: Výstup dynamické simulace celé skladby S07 střešního pláště s původní tepelnou izolací KSD se zohledněním slunečního záření a dešťových</i>	

<i>srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 21: Výstup dynamické simulace celé skladby S07 střešního pláště s původní tepelnou izolací KSD se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 22: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 5% hmotnostní vlhkosti.....</i>	<i>78</i>
<i>Graf 23: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 15% hmotnostní vlhkosti.</i>	<i>78</i>
<i>Graf 24: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 25% hmotnostní vlhkosti.</i>	<i>79</i>
<i>Graf 25: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 5% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace na bázi mPVC.</i>	<i>79</i>
<i>Graf 26: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 15% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace mPVC.</i>	<i>80</i>
<i>Graf 27: Výstup dynamické simulace pro zabudovanou vlhkost v původní tepelné izolaci Polsid 25% hmotnostní vlhkosti a nové hydroizolace na bázi mPVC.</i>	<i>80</i>
<i>Graf 28: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště SP7 se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů.</i>	<i>81</i>
<i>Graf 29: Výstup dynamické simulace celé skladby střešního pláště SP3 se zohledněním slunečního záření a dešťových srážek, množství kondenzátu v konstrukci ploché střechy s novou hydroizolační vrstvou z fólie mPVC.</i>	<i>82</i>

<i>Graf 30: Ukázka pořizovaných dat v rámci kontinuálního monitoringu rekonstruované střechy</i>	<i>87</i>
<i>Graf 31: Ekonomické zhodnocení nákladů na realizaci 1,0 m² střechy.....</i>	<i>97</i>

Seznam vybraných zkratk a symbolů:

a	souřadnice tepelné vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$) vedením ($W \cdot m^{-2}$)
Δp	je nárůst vnitřního částečného tlaku vodní páry (Pa)
d_j	je tloušťka j=té vrstvy konstrukce (m) vrstvy ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), příp. (s)
M_c	zkondenzované množství vodní páry ($kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
M_{ev}	množství vypařitelné vodní páry ($kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
q	vektor hustoty ustáleného tepelného toku, který je přenášen
s_d	difúzní tloušťka materiálu ($m \cdot s^{-1}$)
Z_p	difúzní odpor vztažený k částečnému tlaku vodní páry (m)
x	souřadnice vyjadřující polohu bodu v konstrukci (m)
λ	součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
$\frac{\partial \theta}{\partial x}$	teplotní gradient ($K \cdot m^{-1}$)
δ_j	je součinitel difúzní vodivosti materiálu j-té
δ_0	součinitel difúzní vodivosti vzduchu ($m^2 \cdot s^{-1}$)
μ	faktor difúzního odporu (-)
$grad\theta$	gradient teploty ($K \cdot m$)
θ	teplota ($^{\circ}C$)