

Univerzální sušicí komora zachraňuje vzácné knihy

Jiří Neuvirt

neuvirt.j@volny.cz

Po povodních v roce 2002 se ukázalo, že v České republice neexistuje zařízení, ve kterém by bylo možné sušit větší množství historicky či umělecky cenných předmětů, dokumentů, knih apod. Dokladem toho je příklad Městské knihovny v Praze, kde ještě po čtyřech letech od řádění přírodního živlu zbývá kolem 1300 zamrazených knih v kožených či pergamenových vazbách, které nebylo možné usušit tak jako běžný knihovní fond tepelnou metodou zorganizovanou Národní knihovnou s využitím sušáren dřeva.

Každý materiál vyžaduje při sušení specifické podmínky, jež zaručí jeho minimální poškození. Proto při úvahách o vybudování vhodného sušicího zařízení bylo zřejmé, že by bylo nanejvýš žádoucí, aby šlo o zařízení univerzální, které umožní usušení daného materiálu ve shodě se současnými poznatky. Pod vedením Národní knihovny vzniknul neformální tým odborníků a výsledkem jeho práce je prototyp univerzální sušicí komory, který byl srpnu 2006 uveden po kolaudaci do provozu. Pokusím se v následujících řádcích toto zařízení představit.

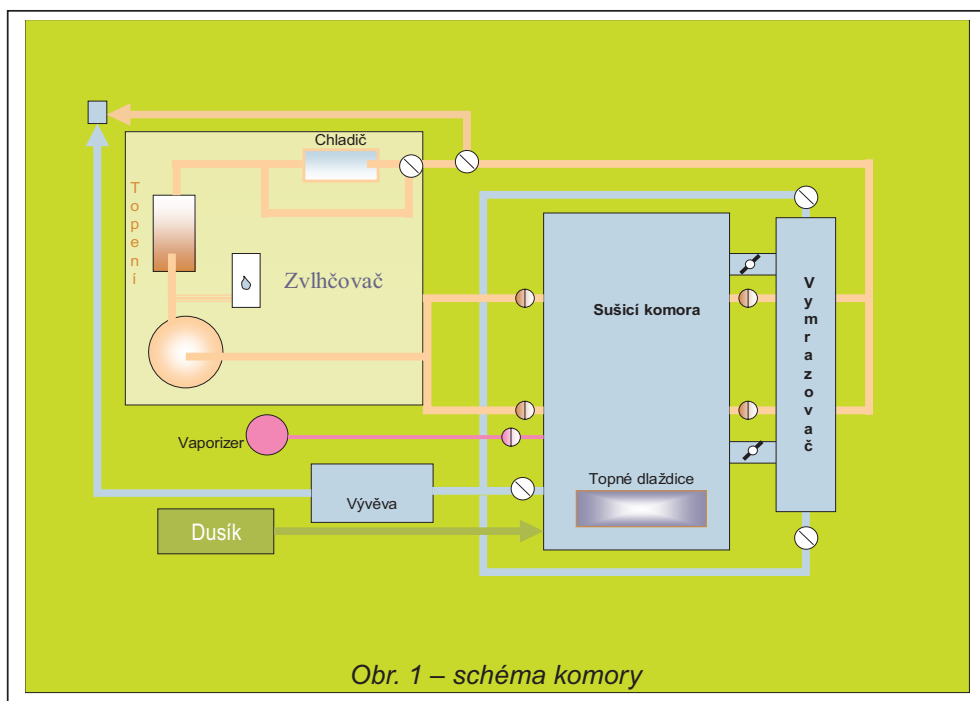
Možnosti použití sušicí komory

Komora je navržena tak, aby umožnila následující pracovní režimy:

- vakuové sušení při teplotě nad bodem mrazu,
- sušení vakuovým vymrazováním (lyofilizace)
- sušení v řízené atmosféře (teplota a relativní vlhkost)
- klimatizaci knih
- dezinfekci knih

Konstrukce komory

Sušicí komora (viz. schéma na obr. 1) je sestavena z vlastní komory, systému vytápěných dlaždic, olejové vývěvy, vymrazovací jednotky, klimatizačního okruhu, odpařovací nádoby na dezinfekční látku a zásobníku dusíku. Z vyjmenovaných jednotek v každém pracovním režimu běží jen některé. V systému komory jsou rozmístěna teplotní, vlhkostní, tlaková a stavová čidla, která poskytují vstupní údaje pro řídicí počítač. Pro kontrolu sušicího procesu používáme nezávislá čidla teploty a vlhkosti přímo v knihách a dále tenzometrickou váhu s rozsahem do 5 000 g. Čidla i tenzometrická váha byly vyvinuty speciálně pro tuto aplikaci.



Vlastní komora je horizontálně položený válec z nerezové oceli, opatřený dvěma víky. Jeho objem je 2,3 m³, průměr 1,4 m a vnitřek je opatřen speciální vestavbou, která umožňuje individuální fixaci a ohřev knih pomocí vytápěných dlaždic tak, aby se minimalizovala jejich deformace a přesušení (viz. obr. A až E).

Vytápěné dlaždice jsou tvořeny dvojicí neglazovaných keramických obkladaček vzájemně slepených pomocí distančních kostek, čímž mezi nimi vzniká větrací šterbina. Každá z dvojice slepených dlaždic je opatřena na straně šterbiny topným drátem, teplotním čidlem a řídicím obvodem, který udržuje teplotu dlaždice na požadované hodnotě v rozmezí -6°C až $+60^{\circ}\text{C}$. K dispozici jsou dlaždice ve třech velikostech 20 × 25, 25 × 33 a 25 × 40 cm. Uvnitř komory má každá dvojice dlaždic k dispozici konektor s řídicím a topným obvodem.

Olejová vývěva umožňuje dosažení tlaku uvnitř komory pod 1 mbar a je uzpůsobena k odsávání prostorů s vysokým obsahem vodních par.

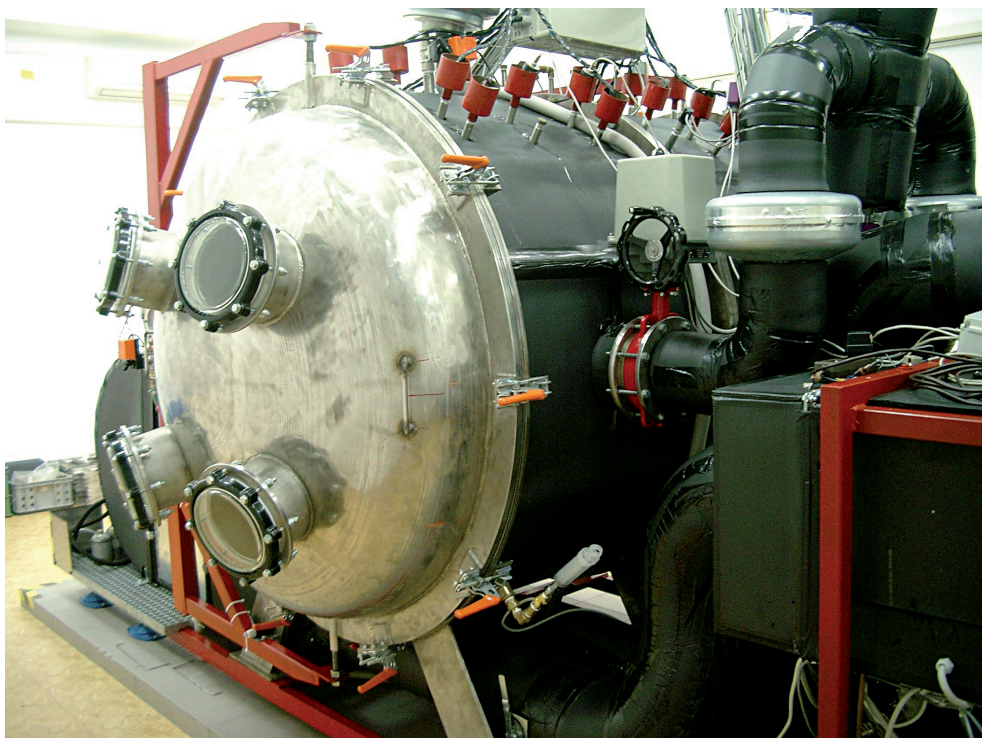
Vymrazovací jednotka (obr. F) je ocelový válec, jehož vnitřní prostor opatřený chladicím potrubím je propojen s vlastní komorou dvěma uzavíratelnými otvory a přes ventily umístěnými na čelech je připojen k vývěvě. Povrchová teplota chladicího potrubí je nižší než -60°C . Součástí je samozřejmě kompresor na chladicí médium a venkovní chladicí výměník. Na povrchu chladicího potrubí je navinut topný drát, který v periodě odmrazování urychluje rozpuštění nahromaděného ledu.

Klimatizační okruh je vzduchotechnické zařízení, které je ke komoře připojeno dvěma uzavíratelnými vstupy a výstupy. Zařízení se skládá z jednotek ohřevu, chlazení/odvlhčení, zvlhčování, filtrace, tangenciálního směšovače a dmychadel a zajišťuje intenzivní cirkulaci vzduchu definovaných parametrů (teploty a relativní vlhkosti) v komoře.

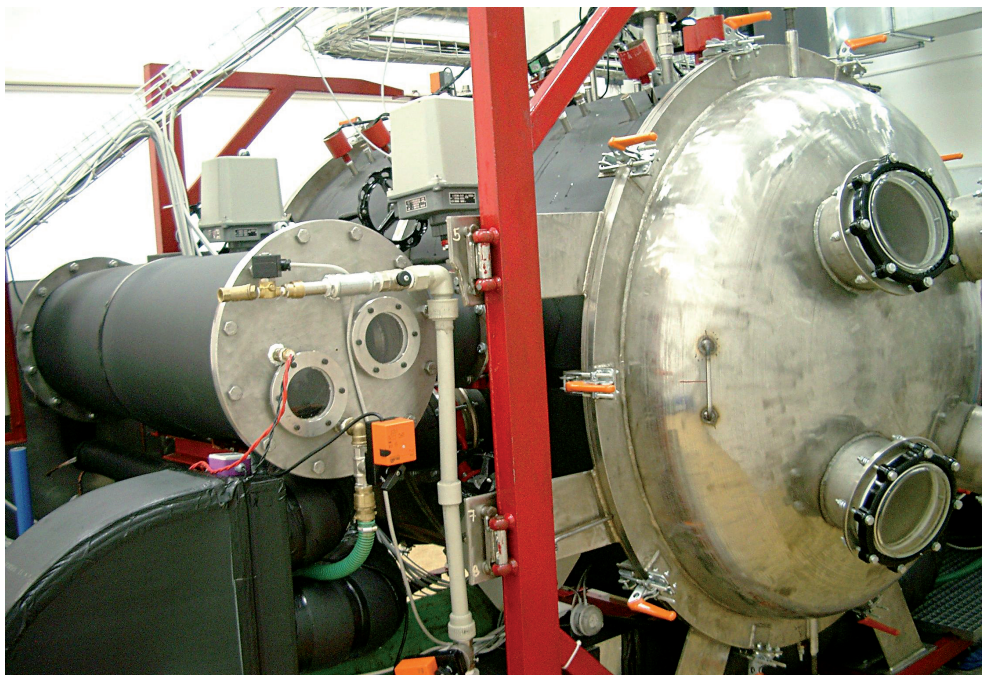
Dávkování dezinfekční látky je možné jednak z *odpařovací nádoby*, což je uzavíratelná skleněná válcová nádoba o objemu cca 3 litry opatřená vnějším ohřevem a spojená přes ventil s vnitřkem vlastní komory, nebo pístového dávkovače (velká injekční stříkačka), který přes ventil aplikuje dezinfekční látku v kapalném stavu na dno komory.

Zásobník dusíku obsahuje tlakové lahve s dusíkem připojené přes ventil k vlastní komoře a umožňují naplnění komory dusíkem na definovaný tlak.

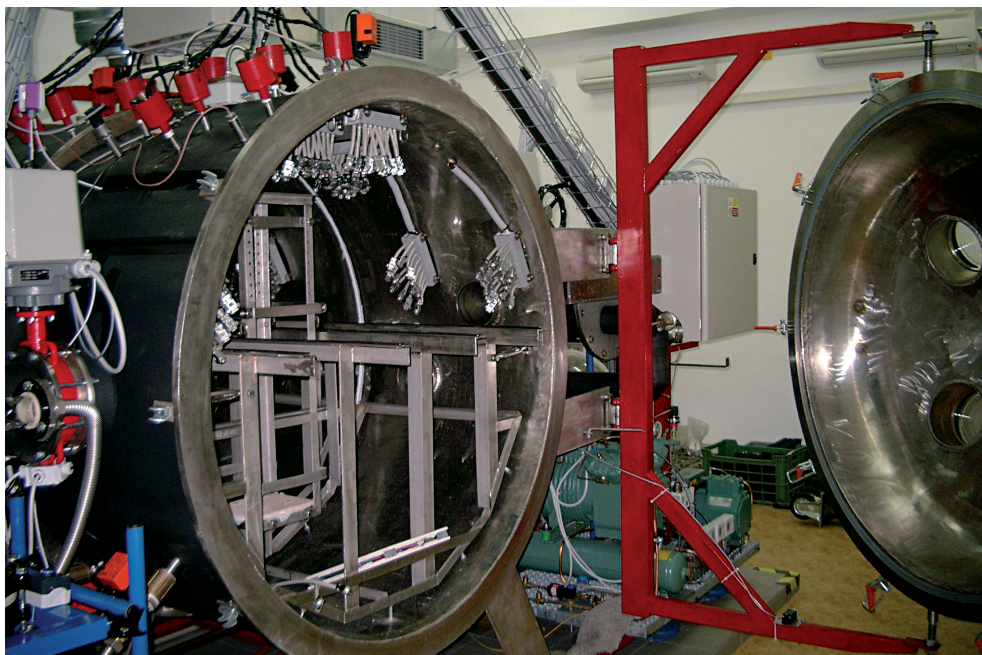
Nezávislá čidla jsou speciálně vyvinutá tenká teplotní a vlhkostní čidla, která lze vložit na různá místa v knize nebo v jejím okolí, a dále tenzometrická váha, kterou lze sledovat úbytek hmotnosti vybrané knihy. Jejich údaje jsou přenášeny po internetu a umožňují nepřetržitý dohled na proces sušení.



Těleso komory s potrubím klimatizace



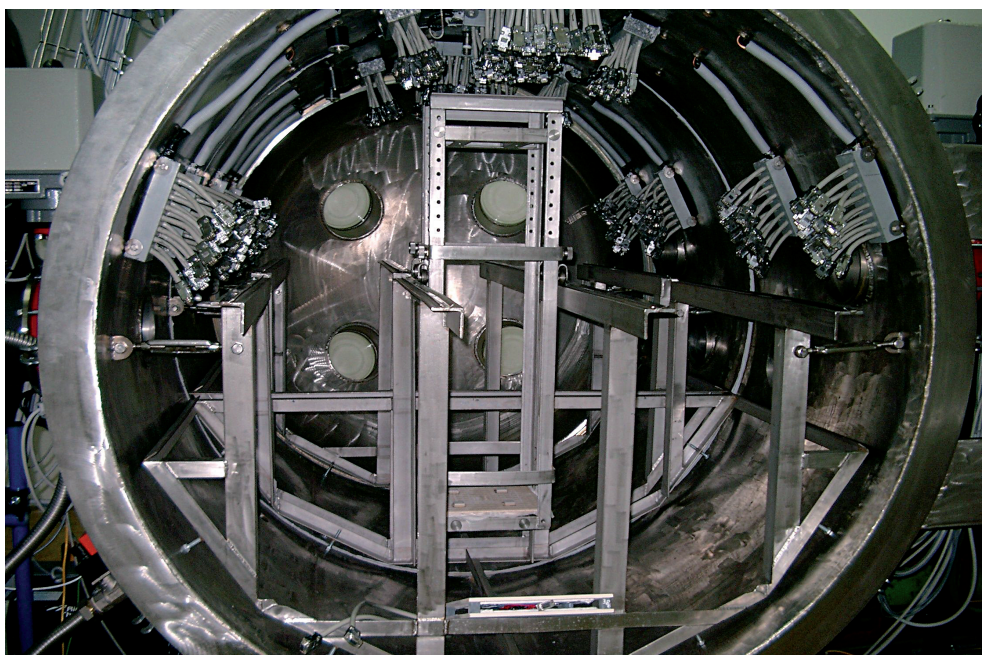
Celkový pohled na komoru s vymrazovačem



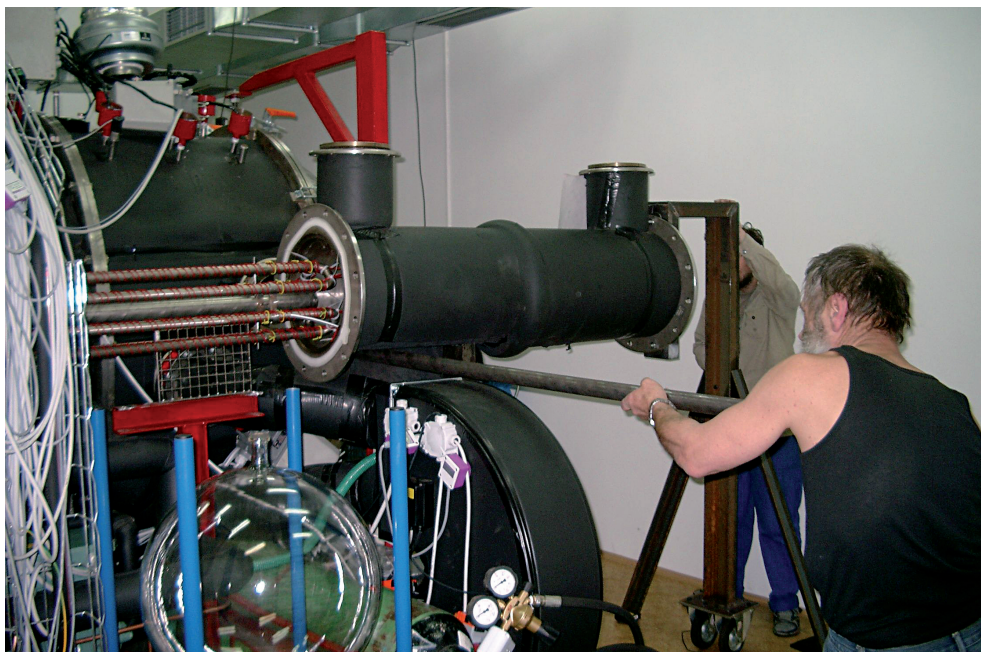
Vnitřek komory s vestavbou na kontejnery



Komora s náloží knih



Pohled do komory s vestavbou a jedním prázdným kontejnerem na knihy



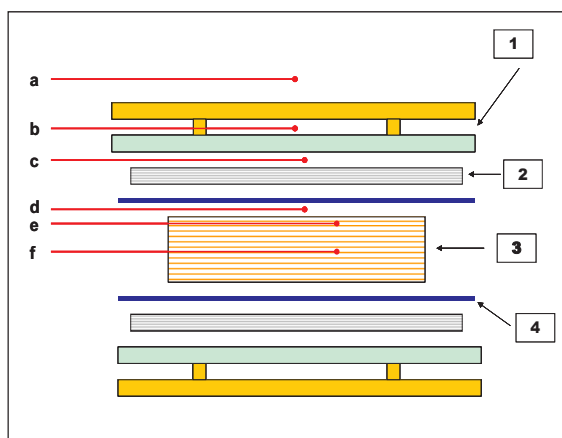
Montáž vymrazovače

Princip fixace knih

Na základě pozitivních zkušeností získaných během sušení knih po povodních v roce 2002 jsou knihy při sušení uspořádány do sloupců složených z jednotkových sendvičů (obr. 2).

Každý sendvič se skládá (bráno shora) z:

- dvojice topných dlaždic (pos. 1)
- absorpční papír, tj. filtrační papír, staré noviny apod. (pos. 2)
- netkaná textilie (na bázi polypropylenu nebo PE)
- KNIHA (pos. 3)
- netkaná textilie (pos. 4)
- absorpční papír



Obr. 2 – skladba sendviče a schéma umístění čidel

Na spodní části sloupce pod posledním sendvičem je položena dvojice topných dlaždic. Na vrcholu sloupce je umístěna zátěž, která zabraňuje deformaci knih během sušení. Každý sloupec je umístěn ve vyjímatelném kontejneru, který se v komoře pohybuje na kolejnicích. Velikost kontejneru odpovídá velikosti dlaždic a jeho hlavní funkcí je fixace sloupce ve svislé poloze a ochrana před zvrhnutím. Výhodou vertikálního uspořádání s gravitační zátěží je, že sesychání knih nemá vliv na působení zátěže. Seschnutí sloupce knih činí až 20%.

Nezávislé měření

Již zmíněná tenká čidla teploty a vlhkosti je možno umístit na různá místa ve sloupci sušených knih, sledovat tak postup vysychání a podle toho nastavit parametry sušení, případně sledovat vliv podmínek sušení na rychlost a kvalitu vysušení a zabránit zbytečnému přesušení knihy. (Na obr. 2 jsou schematicky znázorněna i místa umístění čidel.)

Pozice čidel:

- a. volně v prostoru
- b. mezi dlaždicemi
- c. na povrchu dlaždice
- d. na desce knihy
- e. pod deskou knihy
- f. v knize v různé vzdálenosti od okraje

Samozřejmě není reálné mít v každé sušené knize kontrolní čidla teploty a vlhkosti. Proto používáme tzv. signální knihy, které jsou opatřeny potřebnými čidly. Signální knihy by měly charakterizovat typy sušených knih, jsou namočené a suší se současně s nimi. Po nabytí určitých zkušeností lze z údajů ze signální knihy usuzovat na stav sušeného fondu.

V mokré knize existuje několik forem vody:

- voda adsorbovaná na vnitřním povrchu vláken, která je v rovnováze (způsobuje bobtnání papíru)
- volná voda v mezivlákněném prostoru papíru (oslabuje mezivlákněné vazby)
- volná voda mezi listy knižního bloku

Účelem kontroly stavu knih je zjistit co nejpřesněji okamžik správného vysušení a tím předejít přesušení. Při všech metodách sušení platí, že odpařující se voda odnímá knize teplo a hmota knihy má nižší teplotu než její okolí. Teplotní diference je tím větší, čím intenzivnější je za daných podmínek odpařování. To závisí na množství vody v dané knize, respektive na velikosti povrchu, na kterém je přítomna voda a ze kterého se odpařuje. Dále závisí na gradientu koncentrace vodních par u tohoto

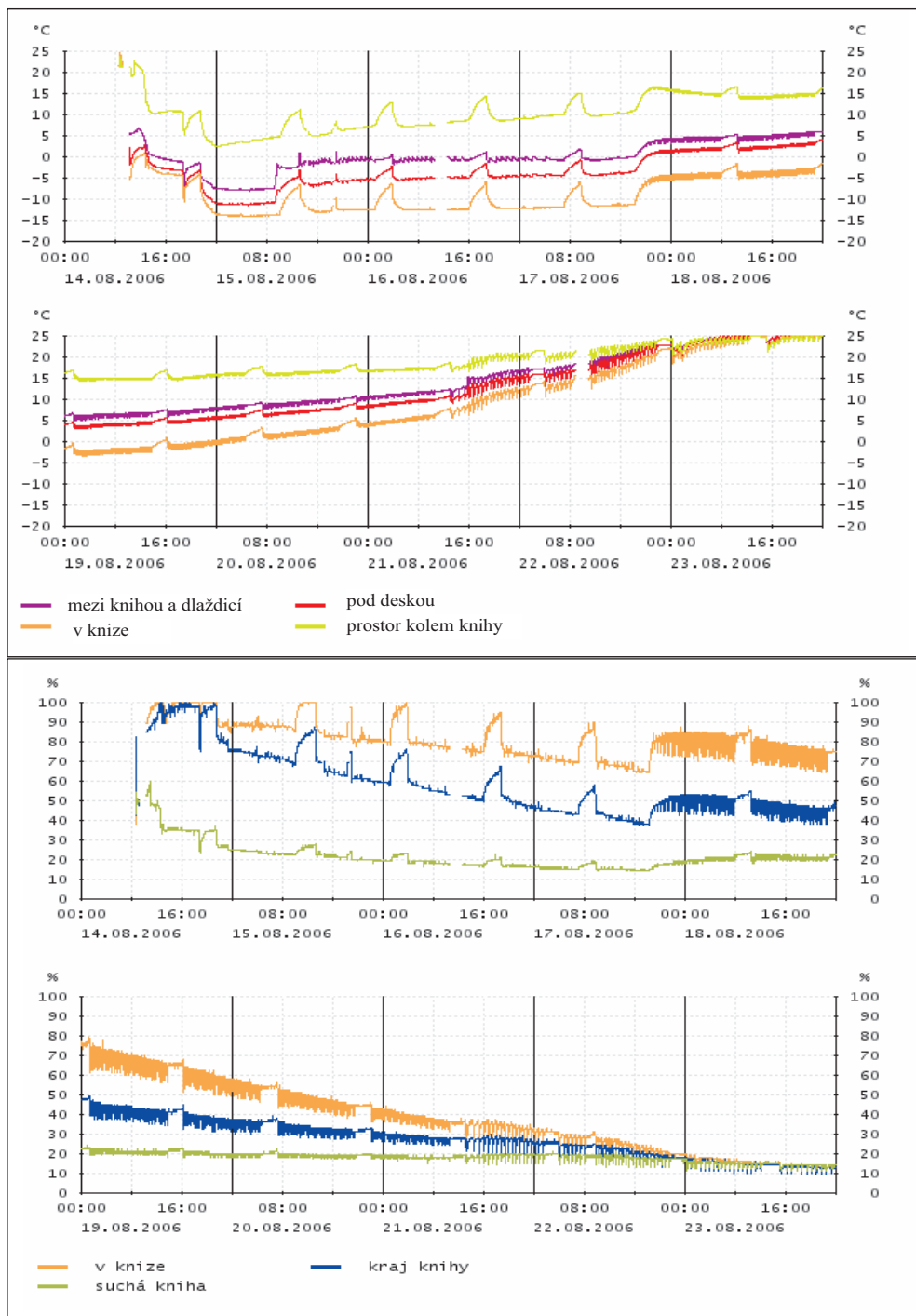
povrchu (strmost poklesu koncentrace vodních par směrem od knihy). Jednotlivé sušící metody se liší způsobem vytváření koncentračního gradientu – odvod par. S koncentrací vodních par souvisí měření relativní vlhkosti. Pokud je prostor vodními parami nasycen, je relativní vlhkost 100 %. To je stav na povrchu nebo uvnitř mokré knihy. Pokud existuje výše zmíněný gradient, směrem od povrchu relativní vlhkost klesá. S postupujícím vysoušením knihy voda z povrchu knihy mizí, klesá zde relativní vlhkost a tento pokles postupuje do nitra knihy. Současně se na suchém povrchu vyrovnává teplota s okolím.

Tento proces je možné dokumentovat ze záznamů teplotních a vlhkostních čidel umístěných na různých místech knihy a v jejím okolí. Záznam je pořízen v průběhu desetidenního sušení lyofilizační metodou. Při vakuovém sušení nebo sušení v řízené atmosféře jsou záznamy kvalitativně podobné a liší se jen v absolutních hodnotách; zejména teploty.

Na obr. 3 je průběh teploty v prostoru kolem knihy, mezi knihou a dlaždicí, pod deskou knihy a uvnitř knihy. Na začátku sušení vidíme mezi měřenými místy velké teplotní diference, které na konci sušení vymizí. První čtyři dny je teplota uvnitř knihy konstantní, i když se teplota okolí zvyšuje jako důsledek topení dlaždic. To indikuje skutečnost, že v místě čidla je stále volná voda – v případě lyofilizace led. Jakmile tato forma ledu mizí, začne se teplota v daném místě zvyšovat a přibližovat teplotě okolí. Výkyvy hodnot, které se objevují současně na všech křivkách, souvisí s tlakovým režimem v komoře, závislým na odmrazovacích cyklech a na nastavení tlakového režimu vývěvy. Na obr. 4 je záznam průběhu relativní vlhkosti v mokré (zmrazené) signální knize a na jejím kraji (stejná kniha jako na obr. 3), dále pak pro porovnání v suché knize. Na začátku sušení je na kraji i uvnitř knihy relativní vlhkost 100 %. Z bezprostředního okolí čidel se poměrně brzo ztrácí volná voda, protože čidla jsou v otvoru vyvrtaném ve zmrzlé knize rovnoběžně s plochou listů a otvor nebyl uzavřen, čímž je umožněn rychlejší odpar vody ze stěn otvoru. Proto v tomto případě čidla ukazují hodnotu relativní vlhkosti nižší, než odpovídá stavu mezi listy uvnitř knihy. (Dokud je v okolí čidla volná voda, je hodnota relativní vlhkosti rovna 100 %). Konec sušení, podobně jako u teploty, nastane, když se vlhkosti kraje a vnitřku knihy přiblíží a dosáhnou hodnot blízkých hodnotám v suché knize nebo v prostoru komory. Náhlé výkyvy na křivkách záznamu opět souvisí s tlakovým režimem v komoře; stoupající tlak snižuje koncentrační gradient vodních par – stoupá relativní vlhkost.

Obr. 3 – záznam teplotních čidel signální knihy ↗

Obr. 4 – záznam vlhkostních čidel v signální a suché knize →



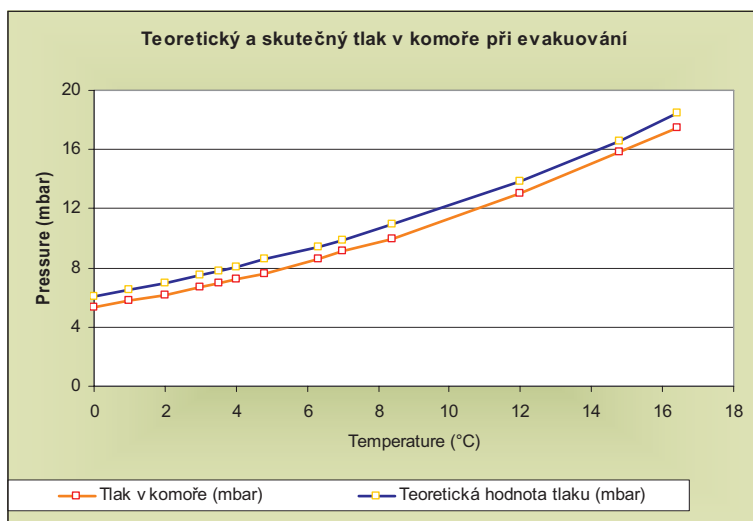
Jednotlivé sušící metody

Ze tří sušících metod, které lze v komoře použít, má každá své přednosti i úskalí. A právě tato komora by měla umožnit jejich detailní poznání při konkrétních aplikacích a případně i umožnit jejich účelnou kombinaci.

Sušení obecně spočívá v porušování rovnovážné tenze (nasycení) vodních par na povrchu sušené knihy a jednotlivé metody sušení se liší způsobem, jak to provádíme. Rovnovážná tenze par závisí na teplotě – čím je teplota vyšší, tím vyšší je i tenze. Jakmile rovnovážná tenze v důsledku vzrůstu teploty překročí vnější tlak, dochází ke spontánnímu odpařování v celém objemu sušené knihy. Za normálního tlaku (1013 mbar) k tomu dojde při dosažení teploty 100° C. Za tlaku 6,1 mbar při teplotě 0° C. Pokud je tlak nižší než 6,1 mbar, nastává spontánní odpařování přímo z ledu (sublimace).

Vakuové sušení

Jde o metodu sušení, která využívá výše popsaný fyzikální jev spontánního odpařování, jenž nastane v okamžiku, kdy vnější tlak poklesne pod rovnovážnou hodnotu tenze vodních par při dané teplotě. K intenzivnímu odpařování (varu) dochází při nízké teplotě, a proto nehrozí tepelné poškození sušeného materiálu. U velmi mokrého materiálu musíme ale dát pozor na to, aby intenzivní vývin par (var) nepoškodil vnitřní strukturu papíru. Na druhé straně přílišný pokles tlaku pod trojný bod (6,1 mbar) může způsobit nežádoucí opakované zmrznutí vody v knize. Na obr.5 vidíme rovnovážnou hodnotu tenze vodních par v závislosti na teplotě (modrá křivka) a skutečnou závislost tlaku v komoře na teplotě v knihách. Při dané teplotě je skutečný tlak nižší než teoretický, protože v komoře neměříme rovnovážný tlak, ale tlak snížený činností vývěvy.



Obr. 5 – souvislost teploty v mokřích knihách a tlaku v komoře

Výhodou metody je jednoduché zařízení – komora a vývěva a při nízkém tlaku (nedostatek kyslíku) nehrozí bujení plísní. Voda je přítomna v kapalném stavu a při jejím odchodu se obnovují porušené mezivlákněné vazby. Nevýhodou je nutnost mít speciální kvalitní vývěvu, která umožní odtažení prakticky čisté vodní páry z komory, což může být až 100 kg na jednu náplň. Dále existuje nebezpečí přesušení materiálu a nepříjemná skutečnost, že migrující voda vynáší na povrch knihy rozpustné látky použité při výrobě papíru a knihy. Jde o klíždla, lepidla a barviva, jež zejména na ořízce tvoří tmavě zbarvený tvrdý film, často mylně považovaný za známku přesušení, nebo vlivu vysoké teploty.

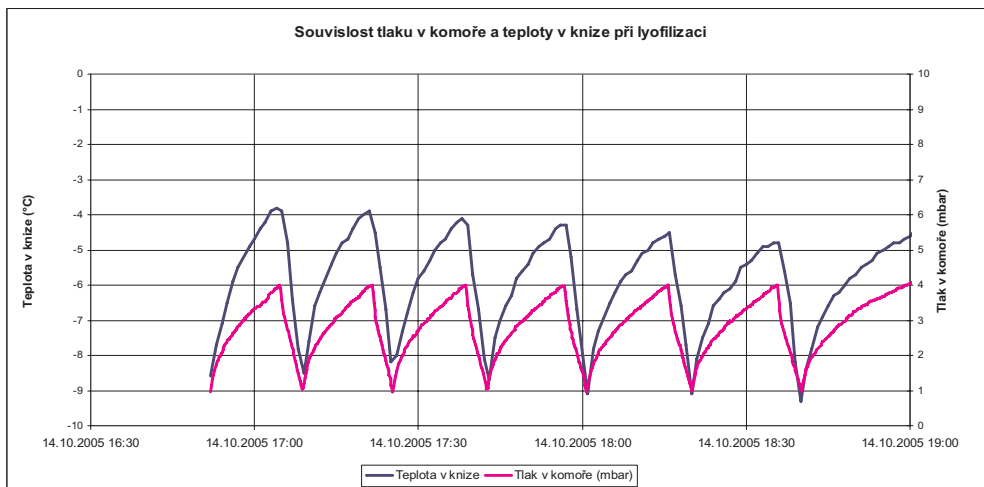
Komerční vakuové komory určené na sušení dokumentů jsou opatřeny vyhřívanými policemi. V naší komoře je každá kniha fixována mezi vyhřívanými dlaždicemi, kde má každý sloupec knih individuálně nastavitelnou teplotu. Je proto vhodné sušené knihy roztřídit tak, aby v každém sloupci byly umístěny podobné svazky; pokud jde o rozměry a případně i o stupeň namočení. Proces sušení je řízen počítačem tak, aby nedošlo na začátku sušení k příliš intenzivnímu vývinu par, který by mohl sušené materiály poškodit.

Vakuové vymrazování (lyofilizace)

Tento způsob sušení probíhá při tlacích pod 6,1 mbar, při kterých zmrzlá voda v knihách přechází přímo do plynné fáze (led sublimuje). Hlavní výhodou této metody je, že nepřítomnost kapalné fáze minimalizuje další rozpíjení inkoustů a barev a nedochází k výše zmíněnému vynášení rozpustných látek na povrch knižní desky a na ořízku, nízký tlak nedovolí bujení plísní. Její nevýhodou je:

- Nutnost mít vymrazovací jednotku, která je schopna dosáhnout teplot hluboko pod bodem mrazu (-60°C).
- Snadno dochází k přesušení.
- Protože voda není přítomna v kapalně fázi, neobnoví se přerušené mezivlákněné vazby v papíru, proto zejména silně nasáklivé papíry mají po vysušení narušenou strukturu. Obdobně to platí pro kůže a pergameny. Narušení struktury je dobře patrné i u některých pauzovacích papírů, které po vysušení lyofilizací ztrácejí průhlednost (viz níže).

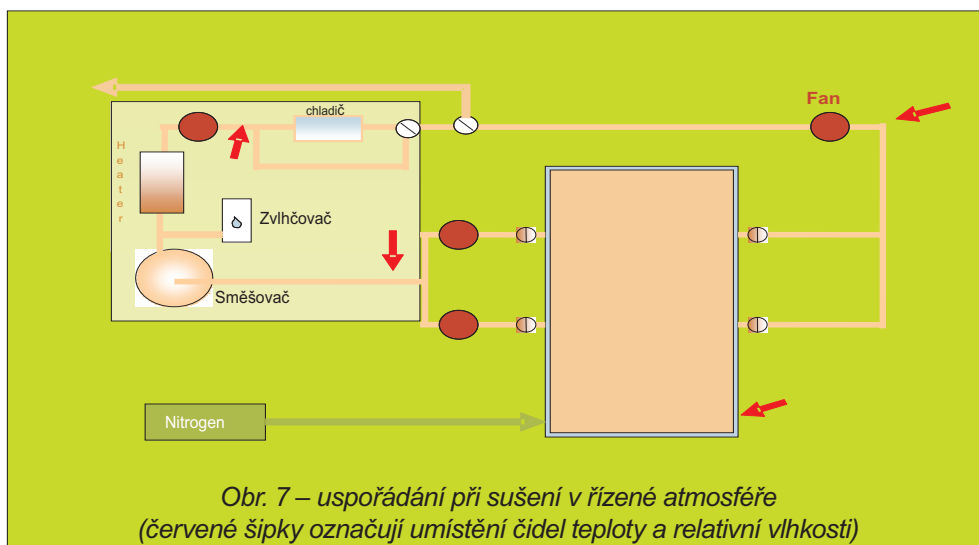
Metoda je též náročná na algoritmus řízení procesu, protože je nezbytné periodicky odmrazovat vymrazovací jednotku, tj. roztavit nahromaděný led. Během této fáze odchází vodní pára pouze do sání vývěvy, protože vymrazovač je odstaven. Vzhledem k reálnému přestupu sálavého tepla z pláště komory do knih je na počátku sušení vývin vodní páry značný a může se stát, že vývěva při zcela naplněné komoře a vysoké okolní teplotě nestačí udržet tlak pod hodnotou trojného bodu. Jakmile je jeho hodnota překročena, hrozí tání zmrzlé vody v knihách. Toto je akutní zejména na počátku sušení. Proto je místnost komory opatřena klimatizací, kterou lze teplotu v místnosti udržet pod kritickou hodnotou. Detail souvislosti tlaku v komoře a teploty v knize (topné dlaždice nejsou zapnuty) vidíme na obr. 6.



Obr. 6 – závislost teploty v knize na okamžitém tlaku v komoře

Sušení v řízené atmosféře a klimatizace knih

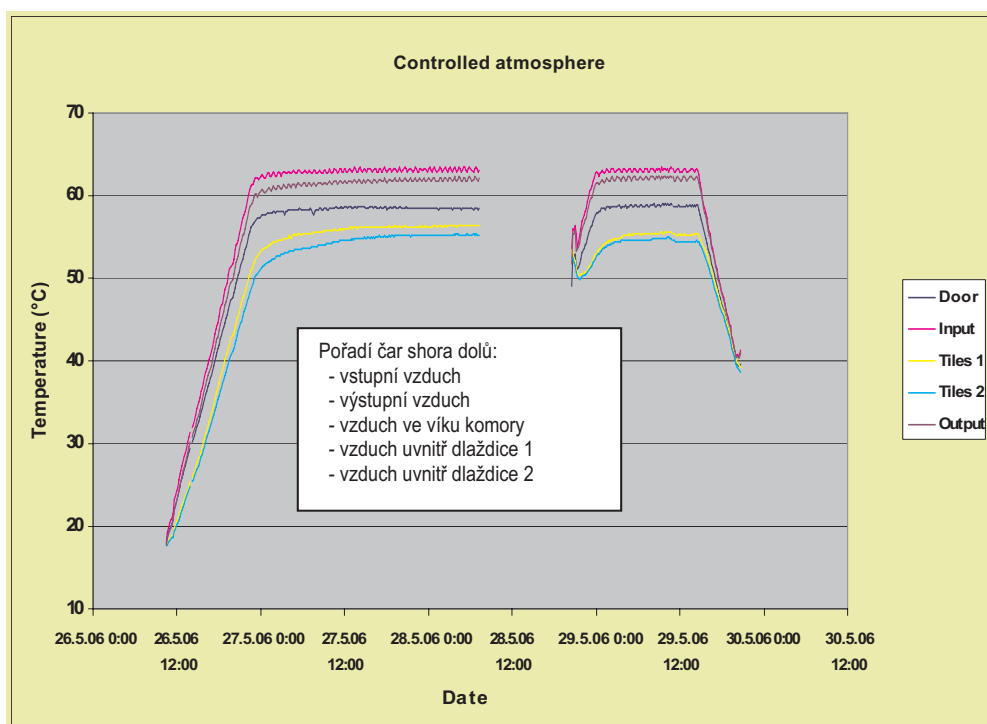
Tento způsob sušení je z hlediska automatického řízení nejsložitější. Schéma uspořádání komory (využité komponenty) je na obr. 7. Vzhledem k velké hmotě komory (daň za její univerzálnost, protože musí odolat vysokému vakuu) i sušených knih má systém velkou tepelnou setrvačnost. V průběhu ověřovacího provozu byla hledána optimální místa pro snímání hodnot teploty a relativní vlhkosti, které má regulační systém v komoře udržovat. Jako nejvhodnější místo bylo vybráno výstupní potrubí z komory. Cirkulující vzduch v tomto místě má vlastnosti, které se nejvíce blíží vlastnostem proudícího vzduchu v komoře.



Obr. 7 – uspořádání při sušení v řízené atmosféře (červené šipky označují umístění čidel teploty a relativní vlhkosti)

Při regulaci měníme vlastnosti vstupního vzduchu tak, aby výstupní vzduch měl parametry požadované pro sušení. Vzhledem ke zmíněné velké tepelné setrvačnosti systému bylo nutné nastavit maximální dovolenou rychlost změny teploty vstupního vzduchu a jeho hodnotu relativní vlhkosti vázat na teplotu nejchladnějšího místa komory, a to tak, že teplota rosného bodu vstupního vzduchu musí být nižší než teplota nejchladnějšího místa komory. Jinými slovy: relativní vlhkost vstupního vzduchu musí být taková, aby při jeho ochlazení na teplotu nejchladnějšího místa komory nedošlo ke kondenzaci vody.

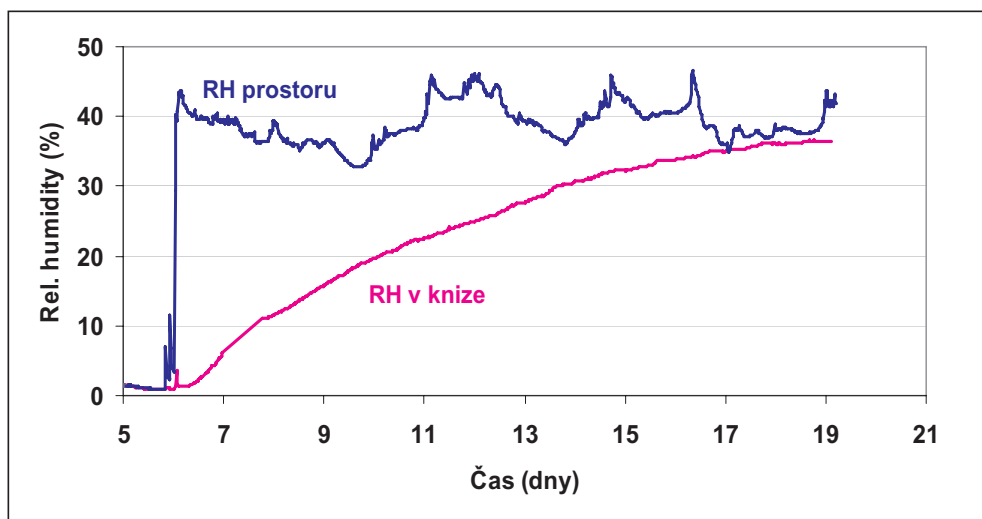
Nejchladnějším místem v komoře a s největší tepelnou kapacitou je její plášť a víka. V plášti je osazeno tepelné čidlo, které lze pro výše zmíněnou regulaci využít. Rozložení teploty v různých místech komory při nastavení sušící teploty 62°C a relativní vlhkosti 45% je patrné z obr. 8. Přerušení záznamu souvisí s otevřením komory a inspekcí jejího obsahu. Na jeho pokračování vidíme náběh komory do původního stavu před přerušením a v závěru průběh teplot při nastavení nižší teploty. Výše uvedená kritéria, která zamezují kondenzaci na chladných místech komory, způsobí, že doba ohřevu komory z teploty místnosti na nastavených 62°C trvá téměř 10 hodin.



Obr. 8 – teploty vzduchu v jednotlivých částech komory

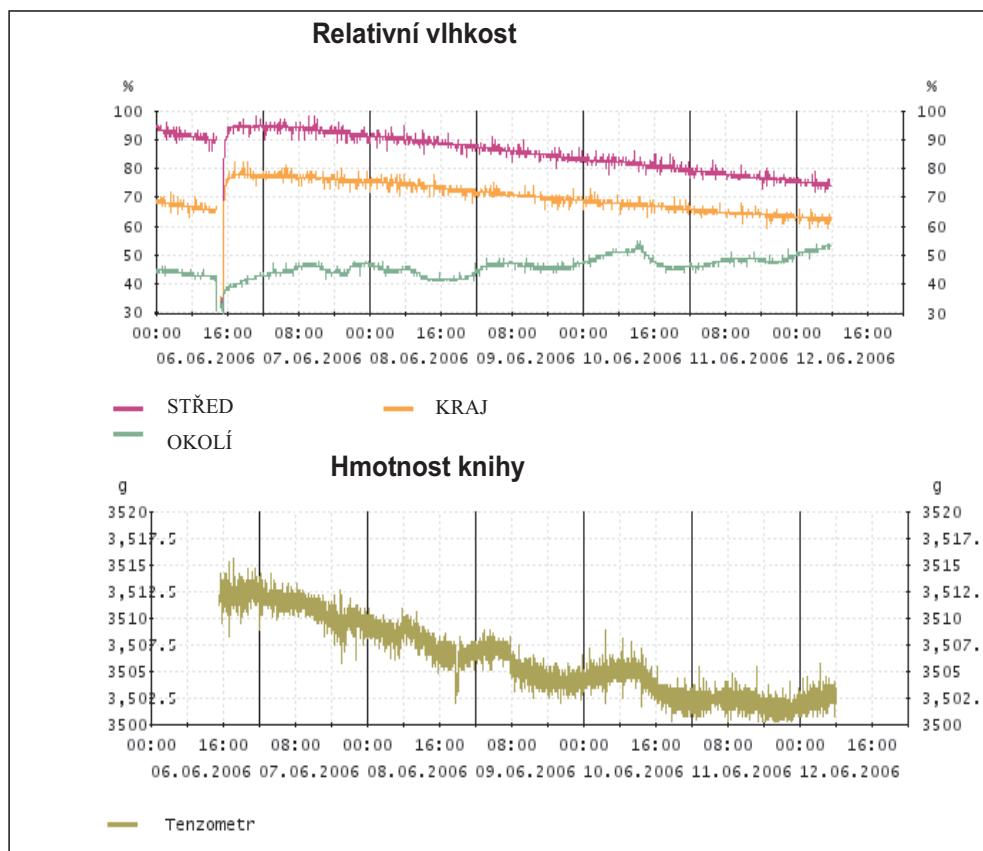
Při sušení v řízené atmosféře lze nastavit podmínky sušení v rozmezí od podmínek přirozeného sušení volně na vzduchu až po podmínky s teplotou 60°C a relativní vlhkostí do 60%. Poslední zmíněné parametry jsou vhodné k zamezení pokračujícího bujení plísní u kontaminovaných knih, které byly pozdě zmrazeny a běžné plísně jsou při těchto podmínkách usmrceny. Dvě předchozí metody růst plísní během sušení pouze zastaví¹. Vysoká teplota při sušení ovšem způsobuje urychlené stárnutí papíru a naše zkušenosti lze shrnout do tvrzení, že každý den sušení při výše uvedených podmínkách sníží mechanické vlastnosti papíru, vyjádřené jako pevnost v dvojohybech, asi o 1%. Na zamezení růstu plísní není nutné, aby knihy byly v těchto podmínkách celou dobu sušení, ale aby tyto podmínky působily jistou minimální dobu, kterou lze v komoře stanovit. Po jejím uplynutí bude možné teplotu snížit a sušení dokončit v mírnějších podmínkách. Tím bychom minimalizovali zhoršení mechanické pevnosti papíru. Nespornou výhodou sušení v řízené atmosféře je, že umožňuje zcela vyloučit přesušení.

Klimatizace knih je proces dosažení takových hodnot teploty a obsahu vlhkosti v celém objemu knihy, aby odpovídaly rovnováze s vlastnostmi prostředí, ve kterém jsou knihy umístěny. Technicky jde o zvláštní případ „sušení“ v řízené atmosféře. Ve statických podmínkách uložení v místnosti je to proces časově náročný, jak je patrné z obr. 9 a 10, které znázorňují přibližování relativní vlhkosti uvnitř přesušené, respektive nedosušené knihy hodnotě okolí. V podmínkách intenzivní cirkulace vzduchu v komoře bude možné tento proces urychlit. V době psaní této informace ještě nejsou k dispozici výsledky příslušných experimentů.



Obr. 9 – klimatizace přesušené knihy

1 Studie vlivu různých sušících metod na mechanické vlastnosti papíru a životaschopnost plísní. Kolektiv autorů NK ČR a NA ČR (Praha 2002). Výsledky jsou zveřejněny na internetových stránkách Národního archivu ČR a Národní knihovny ČR.



Obr. 10 – relativní vlhkost v knize a její hmotnost při klimatizaci vlhké knihy, ukázka internetového přenosu dat

Vliv sušících metod na strukturu papíru a knih

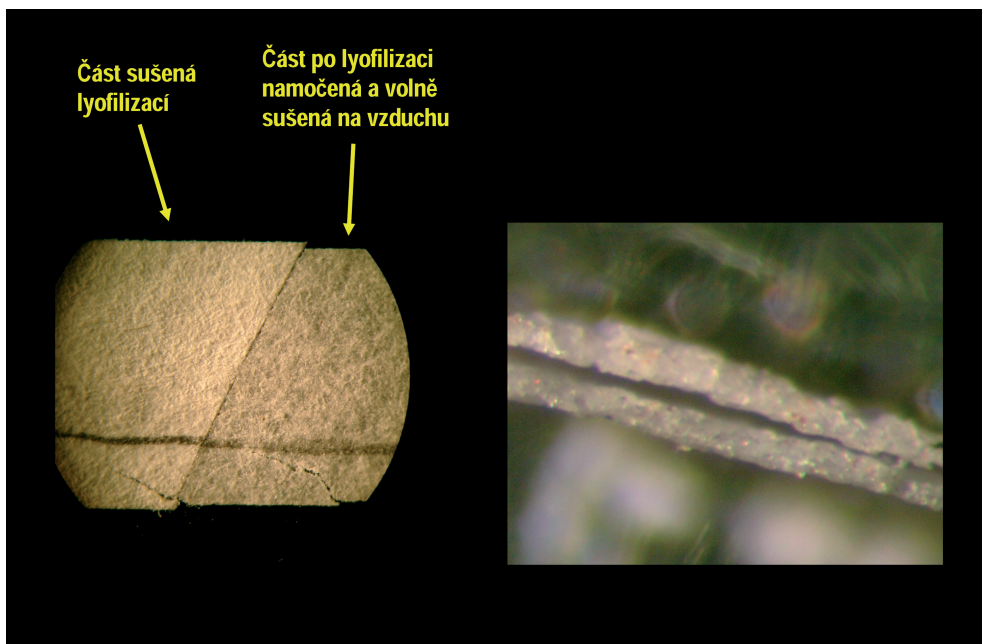
Jak bylo řečeno v úvodu, voda přítomná v mokrých knihách způsobuje zbotnění papíru a uvolnění mezivláčenných vazeb. Následující zmrazení tyto změny fixuje, respektive je ještě prohloubí v důsledku expanze ledu. V tabulce 1 je tato skutečnost dobře patrná.

Tabulka 1: Vliv metody sušení na tloušťku knihy v %

	Původní	Namočená	Zmrazená	Usušená	
				V říz. atmosféře	Lyofilizací
Kniha	100 %	121 %	133 %	114,5 %	125 %
Knižní blok	100 %	118 %	—	111 %	122,5 %

Při sušení při teplotách nad bodem mrazu odcházející kapalná voda působením mezivrchového napětí obnovuje mezivláknenné vazby, ale neobnoví se účinek lisování a kalandrování při výrobě papíru, který byl namočením eliminován. Při sušení lyofilizací nejsou obnoveny přerušené mezivláknenné vazby, protože chybí působení povrchových sil mezi kapalnou vodou a vlákny a v papíru zůstane zachována rozvolněná struktura. To je hlavní důvod, proč je zvětšení tloušťky po usušení lyofilizací dvojnásobné ve srovnání se sušením v řízené atmosféře. V tab. 1 jsou porovnány dvě stejné knihy sušené různými metodami po předchozím namočení (ponořením) 24 hodin.

Výše zmíněná skutečnost se výrazně projevuje u sušení pauzovacího papíru. Pokud je usušen lyofilizací, vysublimovaná voda z mezivláknenného prostoru je nahrazena vzduchem, čímž papír přestane být průhledný. V levé části obr. 11 jsou dvě poloviny přestříženého proužku pauzovacího papíru, který byl sušen lyofilizací, přiloženy zpět k sobě. Pravá polovina byla před tím znovu namočena a usušena volně na vzduchu. Porovnáním polovin vidíme, o co jsou rozměry lyofilizovaného vzorku (vlevo) větší než vzorku, který byl znovu namočen a usušen volně na vzduchu; voda byla při sušení v kapalném stavu. Smrštění je důsledkem obnovy mezivláknenných vazeb, čímž dochází k eliminaci vzduchových mezer mezi vlákny. To vedlo i k obnově transparency, což je částečně patrné i na obrázku, kde levá polovina je bělejší (odráží více světla). V pravé části obr. 11 jsou obě poloviny porovnány v řezu – horní vzorek je pouze lyofilizovaný. I když snímek není příliš kvalitní, lze říci, že horní vzorek je objemnější.



Obr. 11 – expanze pauzovacího papíru lyofilizací

Energetická náročnost sušení

Jednotlivé sušicí postupy používají různé agregáty, které tvoří příslušenství komory. Energeticky náročné procesy u jednotlivých metod sušení jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2

Metoda sušení	Běžící energeticky náročné procesy
Lyofilizace	Vývěva, kompresor vymrazovače, topení dlaždic
Vakuové sušení	Vývěva, topení dlaždic
Řízená atmosféra	Ohřev vzduchu, ventilátory, zvlhčovač

Vzhledem ke specifickému poslání komory by uplatnění rekuperace tepla bylo technicky velmi komplikované a není využito. Proto vychází jako energeticky nejnáročnější lyofilizační metoda. V tabulce 3 jsou porovnány jednotlivé metody při objemově srovnatelné náplni sušených knih a novin. Z dosavadních pokusů vyplývá, že energeticky nejúčinnější je sušení v řízené atmosféře. Významnou roli bude hrát i skladba knih – kvalita papíru, typ desek apod., které ovlivňují difúzi vodních par hmotou knihy. To je patrné z rozdílu hodnot měrné energie při sušení novin a knih, tj. energie v kWh potřebná na vysušení 1 kg vody z daného materiálu.

Tabulka 3: Měrná spotřeba energie na vysušení 1 kg vody

Metoda sušení	Lyofilizace <i>noviny</i>	Lyofilizace <i>knihy</i>	Vakuové sušení <i>knihy</i>	Sušení v říz. atm. <i>knihy</i>
Měrná energie na vysušení (kWh/kg vody)	13,0	16,8	11,8	9,5

Pro představu vezměme hmotnost středně velké knihy kolem 0,5 kg, která při úplném namočení pojme stejné množství vody. Pak se cena jen za energii potřebnou na vysušení této knihy, při sazbě 2 Kč/kWh, pohybuje podle zvolené metody od 9,50 do 17 Kč.

Závěr

Po zhruba 10 měsících zkušebního provozu nutného k odstranění některých problémů, jež provázejí každý prototyp, a k odladění a optimalizaci softwaru v reálných podmínkách naplněné komory mokřými knihami, proběhlo kolaudační řízení a komora byla uvolněna do běžného provozu. Ve světovém měřítku jde o skutečně unikátní zařízení. Jako první se v něm suší knihy Městské knihovny Praha, zmíněné v úvodu. V budoucnu, vzhledem k možnosti snadné adaptace vestavby, se předpokládá i možnost sušení velkoformátových dokumentů (180 x 120 cm) a objemných předmětů.