

## Vypařování kapalin

Následující text stručně shrnuje experimentální kousky, které jsem prováděl v rámci soustředění na Hrašticí/Hluboké.

### Rychlost vypařování kapalin

Abychom se mohli bavit o rychlosti vypařování kapalin, pojďme ji nejdříve vhodně definovat. Je přirozené, aby byla rychlost vypařování nějak spojena s hmotností kapaliny, která se za daný čas odpaří. Přitom je ale evidentní, že z rozlehlejší hladiny se odpaří více kapaliny, než z hladiny o menší ploše – je tedy třeba vztáhnout rychlost vypařování také na jednotku plochy hladiny. Pro úbytek hmotnosti odpařováním  $\Delta m$ , čas  $\Delta t$  a plochu hladiny  $S$  tedy definujeme rychlost odpařování  $E$  jako:

$$E = \frac{\Delta m}{S \Delta t}, [E] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}, \text{ resp. } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}}.$$

Rychlost odpařování kapalin závisí na mnoha parametrech – mezi ty nejvýznamnější patří vlhkost vzduchu, teplota kapaliny i okolí, rychlost proudění vzduchu nad hladinou a samozřejmě druh kapaliny. Existují různé semiempirické formule, které se pokoušejí rychlost vypařování právě na základě znalosti těchto parametrů předpovědět – obvykle jde o vypařování vody, které je v průmyslovém měřítku důležité například při konstrukcích velkých veřejných bazénů [1-4].

### Cíl a postup měření

Na Hluboké jsem se nepokoušel tyto formule ověřovat, to dalece přesahuje možnosti vybavení, které jsme na místě měli. Zaměřil jsem se ale na jeden výše jmenovaný aspekt – pohyb vzduchu nad hladinou kapalin. Po celý den měření (sobota 25. září 2021) měl vát slabý proměnlivý vítr do 4 m/s, a realita byla této předpovědi blízká. Tím se jasně nabízelo uspořádat měření následovně: Zkoumanou kapalinu jsem ve stejném množství nalil do dvou identických nádobek. Jednu nádobku jsem pak umístil do prázdného pokoje jedné z chatek se zavřenými okny, druhou na „volné povětrí“ ven. Měření jsem prováděl pro olej, vodu a líh. V daných časech jsem vždy odečetl hmotnost nádoby s vodou a sestrojil tak postupně závislost úbytku hmotnosti na čase, jejíž směrnice byla  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Po jednoduchém dopočítání plochy hladiny tak bylo snadné určit v každé situaci rychlost vypařování  $E$ .

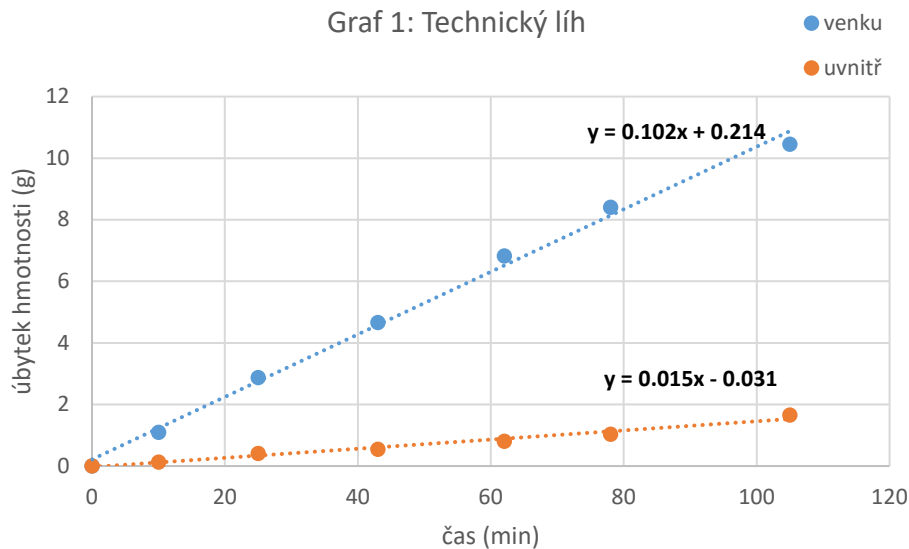
### Olej

S olejem je to velmi jednoduché. S použitím vah o citlivosti 0,01 g jsem za dobu 8 hodin nezaznamenal žádný úbytek hmotnosti ani u nádoby v budově, ani u nádoby umístěné venku. Vypařování oleje je vzhledem k jeho viskozitě velmi pomalé a v řádu běžné vyučovací hodiny prakticky neměřitelné; pohyb vzduchu nad hladinou na tom prakticky nic nemění. Experimentálně jsem také ověřil, že tenká olejová vrstva (2-3 mm) snadno zabrání i vypařování z vodní hladiny.

### Lih

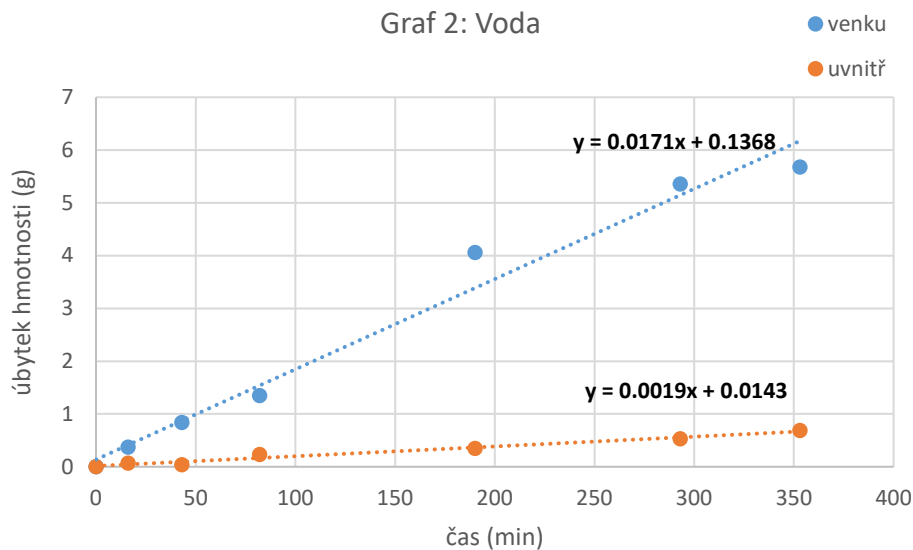
Od těkavého technického lihu bychom očekávali rychlé odpařování, což experiment potvrzuje. Graf 1 ukazuje závislost hmotnostního úbytku lihu na čase pro obě nádoby – tu umístěnou uvnitř v budově i tu umístěnou venku. Za předpokladu lineárního úbytku hmotnosti jsou naměřenými body proloženy lineární funkce, jejichž směrnice určuje rychlost odpařování v gramech za minutu. Po převedení na gramy za hodinu a vydělení plochou hladiny (která měla tvar kruhu o poloměru 3,8 cm) dostáváme pro

nádobku umístěnou uvnitř hodnotu  $E_{\text{uvnitř}} = 198 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$  a pro nádobku umístěnou venku hodnotu  $E_{\text{venku}} = 1349 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$ ; za daných podmínek se tedy líh z venku umístěné nádobky vypařoval přibližně 7× rychleji. Vnější podmínky, ve kterých byly nádobky umístěny, byly poměrně srovnatelné: Vnitřní teplota v budově byla trvale  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , zatímco venkovní teplota během měření (v čase cca 9:00-10:45 SELČ) stoupla ze  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  při zatažené obloze; také počáteční teplota lihu byla přibližně  $15^\circ\text{C}$ , neboť byl přes noc umístěn v budově. Relativní vzdušná vlhkost v budově byla blízká vlhkosti venku (obojí okolo 70 %), nicméně na rychlost vypařování lihu by stejně neměla mít zásadní (možná žádný?) vliv.



### Voda

Stejně měření jako s lihem bylo provedeno také s vodou a data byla zpracována stejným způsobem. Výsledný graf 2 je přiložen níže a plynou z něj hodnoty  $E_{\text{uvnitř}} = 25 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$  a  $E_{\text{venku}} = 226 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$ , naznačující téměř devítinásobnou rychlost odpařování ve venkovní nádobce.



Interpretovat měření s vodou je ovšem z více důvodů problematické. Vzhledem k malé rychlosti odpařování bylo toto měření časově náročné, graf ukazuje, že trvalo zhruba šest hodin (přibližně v čase 9:30-15:30 SELČ). Během tak dlouhé doby ovšem docházelo k průběžným změnám vnějších podmínek.

Předně, po dvou hodinách měření se protrhla oblačnost a začalo se oteplovat – z ranních 13 °C vystoupala venkovní teplota až na odpoledních 24 °C, zatímco uvnitř budovy se teplota 15 °C prakticky nezměnila. Ačkoliv byla venkovní nádoba umístěna ve stínu stromů a tedy ušetřena přímých slunečních paprsků, je jisté, že vyšší teplota okolí vedla ke zvýšení teploty vody ve venkovní nádobce a tím i k urychlení jejího vypařování (silnou závislost rychlosti odpařování na teplotě jsem detailněji zkoumal v [5]), a to zejména v čase, kdy dosáhla denní teplota maxima (12:00-13:00 SELČ; další růst teploty zastavila přechodně oblačná obloha). Tento efekt je koneckonců patrný i na grafu 2, ve kterém je bod odpovídající času 190 minut (čas cca 12:40 SELČ) výrazně nad trendem daným lineárním fitem. Podobně, i když méně znatelně, to můžeme pozorovat v čase 290 minut (14:20 SELČ). Jinými slovy, lineární fit je v tomto případě velkým zjednodušením situace.

Dalším podobným vlivem týkajícím se venkovní nádoby je vítr; jak už jsem výše komentoval, dle předpovědi i mého dojmu byla síla větru celý den podobná, ale fyzika není o dojmech a naměřená data, která by to podkládala, nemám. Pro venkovní nádoby bude ale rychlost větru zásadním parametrem, a kdyby se v čase její střední hodnota výrazně měnila (byla by zde nějaká dlouhodobější rostoucí či klesající tendence), těžko lze data fitovat lineární funkcí.

Posledním vlivem je relativní vzdušná vlhkost, která se v průběhu dne vyvíjí ve vazbě na aktuální teplotu – v čase dosažení nejvyšší teploty lze odhadovat, že relativní vlhkost nejvíce poklesla. Tento efekt tedy působí synergicky s vlivem teploty a dále urychluje vypařování v teplejších hodinách dne.

## Závěry

- Potvrdili jsme očekávané závěry – olej se prakticky nevypařuje a rychlost vypařování lihu je vyšší než rychlost vypařování vody. Pro kvantitativní porovnání lihu a vody je vhodnější použít údaje z nádobek umístěných uvnitř, které nejsou zatíženy vlivem měnícího se počasí. Toto srovnání ukazuje, že rychlost vypařování lihu je při dané teplotě (cca 15 °C) přibližně 8× vyšší než rychlost vypařování vody.
- Pokud porovnáme vypařování uvnitř místnosti, kde je vzduch prakticky nehybný, s vypařováním na volném venkovním prostranství se slabým větrem, naměříme výrazný rozdíl. Líh se v našem měření vypařoval venku 7× rychleji, voda dokonce 9× rychleji (k čemuž patrně přispěly výše uvedené efekty související s teplotou a vlhkostí). Mohli bychom tedy zřejmě formulovat opatrný závěr, že při vnější teplotě 15-25 °C urychluje slabý vítr do 4 m/s odpařování kapalin pěti- až desetinásobně oproti nehybnému vzduchu v budově. Při silnějším větru lze očekávat ještě výraznější urychlení vypařování. V našich podmínkách je zajímavé pozorování, že líh uvnitř se vypařoval podobně rychle jako voda venku.
- Interpretace dlouhodobějších (několikahodinových) venkovních měření je náročnější s přihlédnutím k měnícím se vnějším podmínkám – zejm. teplotě, vlhkosti vzduchu a případné změně proudění.

## Literatura

- [1] M. M. Shah, "Improved model for calculation of evaporation from water pools," *Sci. Technol. Built. Environ.* 24, 1064–1074 (2018).
- [2] C. C. Smith, G. Löf, and R. Jones, "Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool," *Sol. Energy* 53, 3–7 (1994).

- [3] M. M. Shah, "New correlation for prediction of evaporation from occupied swimming pools," ASHRAE Trans. 119, 450–455 (2013).
- [4] M. M. Shah, "Methods for calculation of evaporation from swimming pools and other water surfaces," ASHRAE Trans. 120, 3–17 (2014).
- [5] P. Káčovský, "Studying the Rate of Evaporation Using Pocket and Computer-Supported Weighing Scales," Phys. Teach. 59, 493–496 (2021).