

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**Experimentální stanovení toku tepla
půdou nebo umělým substrátem pomocí
čidla HFP01-SC**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jiří Dušek, Ph.D.

Fakultní garant: doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.

České Budějovice 2013

Jan Váňa

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Přírodovědeckou fakultou - elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum: 25. 4. 2013

Podpis:

Váňa, J., 2013: Experimentální stanovení toku tepla půdou nebo umčlým substrátem pomocí čidla HFP01-SC. [Experimental heat flux declaration through soil or artifical substrate using HFP 01-SC sensor. Bc. Thesis, in Czech.] – 57 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Tato práce si klade za cíl popsat metodu měření toku tepla substrátem nebo půdou pomocí samokalibrovatelného čidla tepelného toku HFP-01SC (Hukseflux, Holandsko) a potvrdit vhodnost jeho použití. V neposlední řadě by měla být návodem k aplikacím s použitím tohoto čidla. Tato práce by měla být přínosem oborům zabývajícím se z různých důvodů měřením toku tepla v substrátu nebo půdě.

Klíčová slova

tepelný tok, písek, rašelina, Hukseflux

Abstract

The aim of this thesis is to describe a method of measuring the heat flow through the substratum or soil with self-calibrating heat flux sensor HFP-01SC (Hukseflux, The Netherlands) and to confirm the appropriateness of its use. In addition, this paper should be a manual for applications using this sensor. Submitted work should be a contribution to disciplines dealing with measurement of heat flow through the substratum or soil.

Keywords

heat flow, sand, peat, Hukseflux

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Mgr. Jiřímu Duškovi Ph.D. za poskytnutí měřicí techniky, konzultace a odborné rady.

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Teplota	7
1.2	Teplotní stupnice	7
1.3	Mezinárodní teplotní stupnice	8
1.4	Množství tepla	9
1.5	měrná tepelná kapacita	10
1.6	Šíření tepla	10
1.7	Vedení tepla	11
1.8	Tepelná vodivost	11
1.9	Tepelný tok	13
2	Výpočet vlhkosti dle ČSN 17892-1	13
2.1	Termíny a definice	14
2.2	Přístroje	14
2.2.1	Sušárna	14
2.2.2	Váhy	14
2.2.3	Vysoušecí nádoby	14
2.2.4	Exsikátor	14
2.3	Průběh zkoušky	15
2.3.1	Příprava zkušebního vzorku	15
2.3.2	Postup zkoušky	15
2.3.3	Výsledky zkoušek	16
2.3.4	Doplňující informace	17
3	Samokalibrovatelné čidlo toku tepla HFP 01-SC	17
4	Realizace pokusu, popis praktické části	18
4.1	Aplikace měřicích čidel do substrátu (písek)	19
4.2	Aplikace měřicích čidel do substrátu (rašelina)	19
4.3	Elektronická část	19
5	Popis programu Most 2.3 a jeho funkcí	23
5.1	Vyhodnocení naměřených hodnot	28
6	Diskuze	35
7	Závěr	36
8	Použitá literatura	37

9	Příloha 1.....	38
10	Příloha 2.....	39
11	Příloha 3.....	40
12	Příloha 4.....	41
13	Příloha 5.....	42
14	Příloha 6.....	43

1 Úvod

Cílem této práce je srozumitelný popis měření tepelného toku v substrátu nebo půdě pomocí čidla tepelného toku HFP-01SC (Hukseflux, Holandsko), návod k realizaci měření a práce s programem Most2.3 verze 230.54 určeným k práci s daty poskytnutými dataloggerem M4216 v tomto případě ukládajícím elektrické veličiny z čidla tepelného toku HFP-01SC a dalších odporových teplotních čidel Pt100, použitých k měření teplot substrátu. Součástí práce je všeobecný úvod do problematiky tepla, vedení tepla a vlivů na vedení tepla. V práci je také uveden výňatek z normy ČSN CEN ISO/TS 17892-1 pro výpočet vlhkosti substrátu nebo půdy. V závěru práce je vyhodnocení a porovnání měření tepelného toku v substrátu nebo půdě pomocí čidla tepelného toku Hukseflux HFP-01SC s tabulkovými hodnotami a s hodnotami získanými výpočtem dosažením teplot získaných čidly Pt100 a toku tepla získaného čidlem HFP-01SC.

1.1 Teplota

Teplota (podle Brož a kol. 1983) patří mezi základní pojmy termodynamiky. Máme-li termodynamickou soustavu v termodynamické rovnováze, tj. ve stavu, který se nemění, pokud nezměníme vnější podmínky, nedochází mezi částmi soustavy k výměně tepla. O takové soustavě říkáme, že má stejnou teplotu. Teplota je stavová veličina, která charakterizuje stav termodynamické rovnováhy. V širším smyslu užíváme pojmu teplota i u soustav, které nejsou ve stavu termodynamické rovnováhy (např. studujeme-li tepelnou vodivost těles).

[1]

1.2 Teplotní stupnice

Abychom mohli porovnávat teplotu tělesa (podle Brož, J. a kol. 1983), musíme ho uvést do stavu termodynamické rovnováhy s jiným tělesem, které se nazývá teploměr. Každému stavu teploměru je třeba přiřadit určitou teplotu. Toto přiřazení, které je v zásadě libovolné, definuje teplotní stupnici. Při stanovení teplotní stupnice využíváme toho, že změny stavu libovolné soustavy jsou spojeny se změnami různých parametrů, jako je objem, tlak, elektrický odpor, magnetická polarizace a další, jež danou soustavu charakterizují. Přitom se předpokládá určitá funkční závislost příslušného parametru na teplotě, např. lineární závislost objemu nebo tlaku plynu na teplotě, exponenciální teplotní závislost elektrického odporu některých polovodičů a podobně. Charakter takové závislosti je různý podle druhu použitého tělesa (teploměrné látky) a zvoleného parametru. S jednou látkou nelze vystačit pro široký rozsah teplot, s kterými se setkáváme v okolním světě. Pro rozsah běžných teplot se jako teploměrná látka velmi často používá rtuť a parametrem se volí objem určený z délky sloupce rtuti v teploměrné trubici o stejném průřezu. Teploty přiřadíme tomuto teploměru tak, že zvolíme dva základní stavy, které se nazývají bod mrazu ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) a bod varu ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) a při kterých vycházíme z rovnováhy dvou fází vody za určitých vnějších podmínek. Bodem mrazu rozumíme rovnovážný stav mezi ledem a vodou za normálního tlaku, bodem varu rovnovážný stav vody a její nasycené páry za normálního tlaku.

Bod mrazu, jehož teplotu označíme číslem 0, a bod varu s teplotou označenou číslem 100 tvoří základ teplotní Celsiovy stupnice. Teplota v Celsiově stupnici se obvykle značí symbolem t a její jednotkou (i jednotkou teplotního rozdílu) je v této stupnici teplotní stupeň Celsiův ($^{\circ}\text{C}$). Teploty mezi bodem mrazu (0°C) a bodem varu (100°C) určíme na základě předpokladu o lineární závislosti objemu rtuti na teplotě. V mezinárodní soustavě jednotek SI je základní jednotkou teplotního rozdílu kelvin [K], který vyjadřuje $1/273,16$ – tou část termodynamické teploty trojného bodu vody. Teplotní stupnice definovaná na základě vztahu č. 1:

$$T = T_0 + t \quad (1)$$

kde $T_0 = 273,15 \text{ K}$, se nazývá stupnice termodynamická (Kelvinova) a K je značka jednotky pro teplotu i pro teplotní rozdíl v této stupnici, nazývaní se kelvin. Teplotní stupnici založenou na rovnováze dvou fází vody v bodu mrazu a v bodu varu ovlivňuje vnější tlak. Proto byla v soustavě SI pro termodynamickou stupnici použita s výhodou definice pomocí rovnováhy mezi třemi fázemi vody v takzvaném trojném bodu, k které dochází při jediné teplotě a jediném tlaku. Za termodynamickou teplotu trojného bodu vody byla přijata hodnota $273,16 \text{ K}$, která tím získala charakter univerzální konstanty, kdežto pro bod mrazu vychází v termodynamické stupnici teplota $273,15 \text{ K}$; bod varu není v této stupnici stanoven dohodou, ale jako hodnota, kterou lze získat měřením. Pomocí teploty trojného bodu vody ($273,16 \text{ K}$) je určena jednotka teplotního rozdílu kelvin K. Svou velikostí se kelvin shoduje s teplotním stupněm Celsiovým. Většina fyzikálních zákonů má při použití termodynamické stupnice jednodušší tvar než při vyjadřování teploty ve stupnici Celsiově. Přesné určení termodynamické teploty je však velmi pracné a náročné. Proto byla k usnadnění praktické termometrie zavedena mezinárodní teplotní stupnice, která je v laboratoři snadněji realizovatelná.

[1]

1.3 Mezinárodní teplotní stupnice

Mezinárodní teplotní stupnice (podle Brož a kol. 1983) se zkratkou ITS-90 (zkratka anglického názvu The International Temperature Scale of 1990), byla přijata Mezinárodním výborem pro váhy a míry v r. 1990 a nahrazuje Mezinárodní teplotní stupnice staršího data. ITS-90 slouží k usnadnění přesného měření teplot dostupnějšími prostředky, než je tomu u termodynamické stupnice. ITS-90 byla zvolena tak, aby teplota podle ní měřená co nejpřesněji aproximovala, tj. přiblížila termodynamickou teplotu; rozdíly leží v mezích chyb současných měřících metod. Mezinárodní teplotní stupnice 1990 rozlišuje mezinárodní termodynamickou teplotu T_{90} a mezinárodní Celsiovu teplotu t_{90} . Celsiova teplota t_{90} je definována vztahem č. 2:

$$t_{90} = T_{90} - T_0 \quad (2)$$

v kterém $T_0 = 273,15 \text{ K}$. Jednotkou mezinárodní Celsiovy teploty t_{90} je Celsiův stupeň $^{\circ}\text{C}$, který je roven kelvinu K, právě tak jako v případě termodynamické teploty T a Celsiovy teploty t .

[1]

1.4 Množství tepla

Při kontaktu dvou různě teplých těles (podle Horák, Krupka, 1981) nastává vyrovnání teplot; teplejší těleso ztrácí teplo a chladnější přijímá teplo tak, aby měla obě stejnou teplotu. Je tu podobnost se dvěma nádobami naplněnými kapalinou do různé výšky. Spojí-li se obě nádoby pod úrovní nižší hladiny, vyrovnají se hladiny, a to tak, že z nádoby s vyšší hladinou přeteče část kapaliny do nádoby s hladinou nižší. Přitom množství kapaliny, které odteče z jedné nádoby, rovná se množství, které do druhé nádoby přiteče, takže se celkové množství kapaliny v obou nádobách nezmění. Podobně si při vyrovnání teplot t_1 a t_2 dvou těles, které odpovídají výškám hladin, lze představit, že jistá veličina, která se nazývá teplem, přechází z teplejšího tělesa na chladnější, přičemž teplo Q' vydané teplejším tělesem se právě rovná teplu Q , které přijme chladnější těleso (nepůsobí-li ovšem obě tělesa na sebe chemicky a jsou-li dokonale izolována). Celkové teplo soustavy obou těles zůstává stálé, takže pro vyrovnávání teplot platí zákon zachování tepla. Takzvaná „Fluidová“ teorie tepla, podle níž je teplo jakási nevažitelná substance (tepelné fluidum, kalorikum), které ani nevzniká, ani nezaniká, ale přechází jen z těles teplejších na chladnější, se udržela téměř až do poloviny 19. stol. Přestože nedovedla vysvětlit některé jevy, například zahřívání těles při práci sil přemáhajících tření, má ten význam, že zavedla jednotku pro množství tepla, které se dočasně užívá dodnes. Za jednotku tepla byla původně zvolena kalorie, označovaná cal, což je takové množství tepla, kterým se při normálním atmosférickém tlaku ohřeje 1 g odzdušněné vody ze 14,5 °C na 15,5 °C. V technické praxi se užívá častěji kilokalorie (velké kalorie), označované kcal a rovné 1000 cal. Je to teplo, které ohřeje za normálního tlaku 1 kg vody ze 14,5 °C na 15,5 °C. (Teplotní interval je třeba zvlášť definovat, neboť k ohřátí 1 g vody o jeden stupeň v jiném oboru teplot je třeba jiného množství tepla než 1 cal.) Takto definovaná kilokalorie se nazývá patnácti-stupňová nebo Maxwellova a označuje se také kcal₁₅. Kromě ní byly ještě definovány jiné kalorie.

[2]

Domněnka, že teplo je nějaká zvláštní látka (podle Horák, Krupka, 1981), byla bezpečně vyvrácena nesčetnými pokusy, které provedl v první polovině 19. stol. především James P. Joule a to aby se vysvětlilo, proč se třením tělesa zahřívají. Zjistilo se totiž, že mechanická práce vynaložená při těchto pokusech a vzniklé teplo jsou vždy ve stejném poměru nezávisle na tom, jakým způsobem se mechanická energie přeměnila v teplo, zda třením, nebo stlačením nějakého plynu apod. Z toho lze soudit, že teplo je jen jistý druh energie tak jako mechanická energie, a že tedy zákon zachování tepla není zvláštním zákonem, ale je obsažen v obecném principu zachování energie: Při přeměnách tepla v mechanickou energii nebo v jiné druhy energie je úbytek tepelné energie úměrný přírůstku energie mechanické nebo jiné, a naopak. Nenastává-li energetická přeměna, má celková tepelná energie uzavřené soustavy stálou hodnotu. Stejně jako se mechanická energie tělesa měří prací sil, které na těleso působí, nebo naopak prací sil, jimiž těleso působí na okolní tělesa (jde-li o úbytek jeho mechanické energie), měří se i množství tepla, které těleso přijme nebo vydá, prací sil, odpovídající příslušnému zvýšení nebo snížení energetického obsahu tělesa. Teplo jakožto druh energie zvláštní jednotku nevyžaduje; i u něho plně dostačuje jednotka společná pro všechny druhy energie, tj. jednotka SI joule [J]. Kilokalorie není tedy jednotkou zvláštní fyzikální veličiny, ale dočasnou (po 1. 1. 1980 zakázanou) jednotkou pro energii nebo i mechanickou práci, které se však z historických důvodů v technické praxi používá jen pro jistý druh energie, a to pro energii tepelnou. S jednotkou SI, joule, souvisí převodním vztahem

1 kilokalorie = 4 186,8 joule = 4,1868 kJ = 4,1868 kWs

[2]

1.5 měrná tepelná kapacita

K stejnému oteplení různých látek téže hmotnosti (podle Horák, Krupka, 1981) je třeba různého množství tepla. Pro vystižení této skutečnosti je zavedena veličina měrná tepelná kapacita (měrné teplo c), definována jako množství tepla Q , kterým se teplota látky z teploty t_1 zvýší na teplotu t_2 , dělené hmotností látky m a zvýšením teploty $t_2 - t_1$, tedy podle vztahu č. 3:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (t_2 - t_1)} \quad (3)$$

Protože se měrné teplo dost málo mění s teplotou, je prakticky číselně rovno teplu potřebnému k ohřátí látky s jednotkovou hmotností o jeden stupeň (z teploty $t - 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ na $t + 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Měrná tepelná kapacita je konstanta, takzvaná látková konstanta, o různých velikých hodnotách, pro různé látky různých skupenství.

[2]

1.6 Šíření tepla

Tepelná energie (podle Horák, Krupka, Šindelář 1954) se může šířit v podstatě dvěma různými způsoby, které jsou po fyzikální stránce zcela odlišné:

1. vedením (kondukcí) a prouděním (konvekcí), při nichž zprostředkuje přenos energie hmotné prostředí.
2. zářením či sáláním (radiací), při němž tepelnou energii přenášejí elektromagnetické vlny, které se šíří i ve vakuu.

Částice (molekuly, atomy, ionty), z nichž jsou tvořena fyzikální tělesa, nejsou v klidu, ale v neustálém pohybu, který je tím intenzivnější, čím vyšší je teplota tělesa. V pevných tělesech jsou částice neustále v silovém poli ostatních (hlavně nejbližších) částic a vychýlení každé z nich má proto za následek vychýlení sousedních částic. Nemá-li proto těleso ve všech svých částech stejnou teplotu, vyrovnává se vzájemným působením částic, například molekul, jejich kinetická energie. Takže teplejší části tělesa s větší energií molekul se ochlazují a chladnější části těles s menší energií molekul se ohřívají. Ponoříme-li například těleso do lázně o jiné teplotě než má těleso, děje se tato výměna tak dlouho, až nastane ustálený stav, v kterém má celé těleso stejnou teplotu, stálo i časově. Jsou-li naproti tomu dvě části tělesa trvale udržovány na nestejných teplotách například dvěma lázněmi, mají molekuly v teplejších částech trvale větší pohybovou energii než molekuly v chladnějších částech a dochází k trvalému přenosu energie z teplejší části tělesa na chladnější část. V obou případech označujeme přenos tepelné energie vedením tepla a to v prvním případě, kdy se teploty různých částí tělesa postupně vyrovnávají, jako neustálené (nestacionární) vedení a v druhém případě, kdy je v tělese časově stálý teplotní spád, ustáleným (stacionárním) vedením tepla.

[3]

Je zřejmé, že přenos tepla (podle Horák, Krupka, Šindelář 1954) se značně zesílí, jestliže jsou v pohybu části hmoty větší oproti molekulám. Tak dochází v kapalinách nebo v plynech, zahříváme-li je zdola, k proudění, neboť dolní části se zahřátím roztahují, stávají se řidšími, stoupají vzhůru a přinášejí do chladnějších míst teplo. Chladnější části kapaliny naproti tomu klesají do míst bližších tepelnému zdroji a rychle se ohřívají. Teplo se tedy v tomto případě přenáší kromě vedením také

prouděním kapaliny nebo plynu. Není-li v proudící látce všude stejná teplota, pak je proudění současně provázeno přechodem energie od částice k částici. Také proto označujeme takový přenos tepla jako proudění či konvekci tepla. Přitom proudění kapaliny vzniklé pouze rozdílem hustot v kapalině označujeme jako proudění volné či přirozené. Naproti tomu nazýváme proudění kapaliny nebo plynu vzniklé vnějšími silami (čerpadlem, ventilátorem a podobně) nezávisle na transportu tepelné energie, jako proudění vynucené. Užívá se ho v různých aplikacích (například teplovodní vytápění) k zesílení přenosu tepla konvekci.

[3]

Tepelné záření (podle Horák, Krupka, Šindelář 1954), nebo-li sálání je zcela jiné povahy, protože se jím přenáší tepelná energie z tělesa na těleso, i když prostor mezi tělesy není vyplněn hmotou. Rozdíl se jeví také v tom, že přenos energie zářením mezi dvěma tělesy vzniká, i když teplota prostředí mezi nimi je podstatně nižší nebo vyšší než je teplota obou těles (například výměna tepelné energie mezi Sluncem a Zemí), zatím co k vedení nebo konvekci tepla dochází vždy jen ve směru klesající teploty. Tepelné záření (vlnová délka tepelného záření je od 770 nm do 1 mm) je stejné povahy jako záření světelné (vlnová délka světelného záření je od 380 nm do 740 nm) a patří do skupiny fyzikálních jevů, které souhrnně označujeme jako elektromagnetické záření.

[3]

1.7 Vedení tepla

Udržíme-li protilehlé rovnoběžné povrchy tělesa (podle Horák, Krupka, Šindelář 1954), které jsou svými rozměry značně větší než je jejich vzájemná vzdálenost na stálých teplotách t_1 a t_2 ($t_1 > t_2$), vznikne po určité době rovnovážný stav, při němž prostupuje teplo tělesem z povrchu o vyšší teplotě t_1 k povrchu o nižší teplotě t_2 . Teplo Q , které projde za dobu τ plochou S (malou proti povrchu tělesa), je podle zkušenosti přímo úměrné velikosti plochy S , teplotnímu rozdílu ($t_1 - t_2$) a době τ a nepřímo úměrné vzdálenosti d mezi protilehlými rovnoběžnými povrchy tělesa tedy podle vztahu č. 4:

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{t_1 - t_2}{d} \cdot \tau \quad (4)$$

[3]

1.8 Tepelná vodivost

Konstantu úměrnosti λ (podle Sazima, Kmoníček, Schneller a kol. 1989) označujeme jako tepelnou vodivost materiálu tělesa. Udává množství tepla, které projde za jednotku času krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1 K, jsou-li ostatní stěny krychle dokonale izolovány. Rozměr tepelné vodivosti plyne z vztahu č. 5:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S \cdot \tau \cdot (t_1 - t_2)} \quad (5)$$

Tepelná vodivost tuhých těles podstatně závisí na druhu látky, na její struktuře, popř. na stlačení. U pórovitých látek záleží na velikosti pórů a na druhu tekutiny, která póry zaplňuje; u sypkých hmot záleží na stlačení a velikosti zrna; u krystalických látek na fázích a jemnosti struktury; u amorfních látek zejména na stupni orientace molekul.

[4]

Ryzí kovy, které jsou dobrými vodiči tepla, mají tepelnou vodivost vždy větší než kovy znečištěné nebo slitiny. Tepelná vodivost čistých kovů s teplotou klesá, u nekovů naopak stoupá. Slitiny mají chování přechodné. Suché pórovité látky jsou špatnými vodiči tepla a hodí se pro tepelné izolace. U vlhkých pórovitých látek tepelná vodivost s vlhkostí pomalu roste až do stavu přirozené vlhkosti, potom náhle stoupá i na hodnoty větší, než jsou tepelné vodivosti látek ve směsi.

[4]

Ze všech látek (podle Horák, Krupka, 1981) mají nejmenší tepelnou vodivost plyny. Proto je vodivost látek, obsahujících v drobných dutinách vzduch, který v nich nemůže znatelně proudit, poměrně malá; užívá se jich jako dobrých tepelných izolátorů. Jsou to například skelná vata, pěnový beton, cihly a podobně. Tepelná vodivost takových látek však závisí na vlhkosti, a to tak, že vodivost vlhkých látek je značně větší. Nejlepším tepelným izolátorem je vakuum (v něm se ovšem zase znatelněji projevuje tepelné záření). Vakua jako tepelného izolátoru je užito například v takzvané Dewarově nádobě (známé také například jako termoizolační láhev, nebo-li termoska), pojmenované podle jejího vynálezce Sira Jamese Dewara, což je nádoba s dvojitými stěnami, mezi nimiž je značně vysoké vakuum. Tepelné záření je sníženo postříbřením vnitřních povrchů dvojitých stěn.

[2]

Tabulka 1 Vybrané příklady součinitelů tepelné vodivosti λ materiálů podle jejich publikování. Z tabulky jsou zřejmé rozdíly součinitele tepelné vodivosti λ u stejného materiálu, dané použitou metodou měření těchto hodnot. [5, 6, 7]

Součinitel tepelné vodivosti λ					
Farouki (1986)		Drbal (1969)		Geiger (2003)	
materiál	λ [W. m ⁻¹ . K ⁻¹]	materiál	λ [W. m ⁻¹ . K ⁻¹]	materiál	λ [W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
křemen	8,4	suchý písek jemné zrno	0,19	suchá písčité půda	0,167
minerální půda	2,9	vodou nasycený písek jemné zrno	1,63	mokrý písčité půda	1,167
organická půda	0,25	vodou nasycená rašelina	0,46	rašelina	0,063
vzduch	0,026	vzduch	0,02	nehybný vzduch	0,02
voda	0,6	voda	0,5	stojatá voda	0,628
led	2,5			led	2,3

1.9 Tepelný tok

Hustotou tepelného proudu (podle Horák, Krupka, Šindelář 1954), nebo-li tepelným tokem φ označujeme množství tepla Q prošlé za čas τ plochou S kolmou ke směru toku tepla, dělené dobou a velikostí plochy, tedy podle vztahu č. 6:

$$\varphi = \frac{Q}{S \cdot \tau} \quad (6)$$

V tělese s protilehlými rovnoběžnými povrchy za ustáleného stavu je pak podle vztahu č. 7:

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{(t_1 - t_2)}{d} \quad (7)$$

Uvažujeme-li uvnitř těles s protilehlými rovnoběžnými povrchy tenkou rovinnou vrstvou tloušťky dx , je patrně v obou rovinách, které vrstvu ohraničují, pokles teploty dt , takže hustota tepelného proudu vrstvou je podle vztahu č. 8:

$$\varphi = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \quad (8)$$

Záporným znaménkem naznačujeme, že teplo proudí ve směru klesající teploty. Poměr dt/dx nazýváme teplotním růstem nebo-li gradientem a označujeme jej obecně: $\text{grad } t$

2 Výpočet vlhkosti dle ČSN 17892-1

ČSN CEN ISO/TS 17892-1

Tato technická specifikace popisuje laboratorní stanovení vlhkosti zkušební vzorku Zeminy pomocí vysoušení v sušárně, v rámci rozsahu geotechnických průzkumů podle prEN 1997-1 a prEN 1997-2. Stanovení vlhkosti zeminy je u přirozené Zeminy požadováno při jejím zatřídování u zhuňovaných zemín jako kontrolní kritérium. Vlhkost zeminy se stanovuje u zkušebních vzorků při většině polních a laboratorních zkoušek. Základní referenční postup stanovování vlhkostí, běžný v laboratorní praxi, je vysoušení v sušárně. Vhodný postup pro stanovení vlhkosti zeminy je určit hmotnost vody odstraněné při vysoušení vlhké zeminy (vlhkého zkušební vzorku) na ustálenou hmotnost v regulovatelné sušárně při stanovené teplotě a poté tuto hodnotu použít jako hmotnost vody ve zkušebním vzorku vztáženou k hmotnosti pevných částic vzorku. Jako hmotnost pevných částic vzorku je použita hmotnost zeminy po vysoušení.

[8]

2.1 Termíny a definice

Pro Účely této normy platí následující termíny a definice.

vlhkost zeminy (water (moisture) content) (W)

poměr hmotnosti „pórové“ nebo „volné“ vody, z předem určené hmotnosti zkušební vzorku zeminy, k hmotnosti „suchých“, pevných částic zkušební vzorku zeminy

V této souvislosti je zemina považována za suchou v momentě, kdy už nemůže být odstraněna žádná voda ze vzorku při teplotním intervalu $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

[8]

2.2 Přístroje

2.2.1 Sušárna

Je nutno přednostně zajistit užívání sušárny s nucenou cirkulací vzduchu, schopné zaručit konstantní teplotu $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ v celé sušicí komoře. U sušáren s nucenou cirkulací vzduchu nesmí být odtah vzduchu příliš silný, aby nedocházelo k přemisťování částic zeminy ze zkušební vzorku.

[8]

2.2.2 Váhy

Přesnost vážení vah musí být:

- $\pm 0,03$ g pro zkušební vzorek o hmotnosti 200 g a méně,
- $\pm 0,3$ g pro zkušební vzorek o hmotnosti mezi 200 g a 1 000 g, nebo
- ± 3 g pro zkušební vzorek o hmotnosti větší než 1 000 g

Přesnost stanovené vlhkosti na vahách, které vyhovují výše zmíněným technickým požadavkům, odpovídá třem platným číslicím.

[8]

2.2.3 Vysoušecí nádoby

Vysoušecí nádoby na zkušební vzorek musí být z korozivzdorného materiálu a odolné proti změně hmotnosti při opakovaném zahřívání, zchlazování a čištění. Potřebný počet nádob má být uzavíratelný. Na jedno stanovení vlhkosti zkušební vzorku je zapotřebí jedna vysoušecí nádoba.

Podle druhu zeminy se mají použít následující vysoušecí nádoby:

- a) pro jemnozrnné zeminy: skleněná baňka vybavená skleněným víkem, nebo vhodná korozivzdorná kovová nádoba;
- b) pro střednězrnné zeminy: korozivzdorná nádoba o kapacitě 500 g;
- c) pro hrubozrnné zeminy: korozivzdorná nádoba o kapacitě 4 kg;

U hygroskopických zemin, nebo pokud je za zkoušky vlhkost vzduchu větší než 60 %, má být v případě, že hmotnost zkušební vzorku je menší nebo rovna 200 g, na stanovení vlhkosti použita uzavíratelná nádoba. Funkce uzávěru je zabránit ztrátě vlhkosti ze zkušební vzorku před počátečním vážením a zabránit absorpci vlhkosti z atmosféry před jeho konečným vážením.

[8]

2.2.4 Exsikátor

Exsikátor musí mít přiměřenou velikost. Exsikátor není vyžadován, pokud jsou použity uzavíratelné nádoby. Funkce exsikátoru je zabránit absorpci vlhkosti zkušební vzorku v případě, že není použito uzavíratelné nádoby.

[8]

2.3 Průběh zkoušky

2.3.1 Příprava zkušební vzorku

Zkušební vzorky, které se před vlastní zkouškou skladují, musí být uchovávány v nekorodujících vzduchotěsných nádobách, při teplotním rozsahu přibližně 3 °C až 30 °C a v místě, kde není přímé sluneční záření. Stanovení vlhkosti má být provedeno co nejdříve po odběru vzorků, zvláště v případech, jestliže jsou použity na odběr vzorků sáčky nebo potencionálně korodující nádoby (jako jsou ocelová tenkostěnná odběrná pouzdra, natřená odběrná pouzdra, apod.).

Způsob odběru zkušební vzorku a požadavky na jeho hmotnost jsou závislé především na zkušebním záměru (použití), druhu zeminy určené ke zkoušce a na druhu vzorku (zkušební vzorek jiné zkoušky, ze sáčky, z dělené penetrační trubky apod.). Ze zeminy musí být buď odebrán jeden vzorek reprezentující celek, nebo z každého typu zeminy musí být odebrán zvláštní vzorek. Jestliže je zemina složená z více vrstev, pak odebraný zkušební vzorek musí být reprezentativní pro celek, nebo se musí odebrat zkušební vzorky z každé vrstvy zeminy. Odběr zkušební vzorku z velkého objemu zeminy musí být proveden až po řádné homogenizaci celého objemu zeminy. Minimální hmotnost odebíraného vlhkého zkušební vzorku se musí stanovit v souladu s tabulkou č. 2.

[8]

Tabulka 2 Hmotnost zkušební vzorku zeminy se určuje podle získání zrna zeminy o průměru D. [8]

Průměr zrna D mm	Minimální hmotnost zkušební vzorku o přirozené vlhkosti g
1,0	25
2,0	100
4,0	300
16,0	500

Z dodaných vzorků malého množství musí být reprezentativní zkušební vzorek odebírán následovně:

U nesoudržných (hrubozrnných) zemin musí být tato zemina řádně zhomogenizovaná a poté má být odebrán vlhký zkušební vzorek o hmotnosti v souladu s tabulkou 2.

U soudržných (jemnozrnných) zemin musí být tento zkušební vzorek rozkrojen (pro kontrolu vrstevnatosti zeminy) a poté má být odebrán zkušební vzorek o hmotnosti v souladu s tabulkou 2. Minimální hmotnost vlhké odebrané zeminy nemá být menší než 25 g, nebo v případě zjištění hrubozrnných částic má být odebíraná hmotnost v souladu s tabulkou 2.

[8]

2.3.2 Postup zkoušky

Do čisté suché předem odvážené vysoušecí nádoby se má vložit zkušební vzorek. Jestliže je možné nádobu uzavřít víkem, tak se má uzavřít a stanoví se hmotnost vysoušecí nádoby se zkušebním vzorkem. Všechny hodnoty mají být zaznamenány. Jestliže je používána vysoušecí nádoba bez víka, pak zvážení má proběhnout ihned po vložení zkušební vzorku do vysoušecí nádoby. Pro snadnější vysoušení objemných zkušebních vzorků, mají být tyto vzorky umístěny do nádob s velkou povrchovou plochou (jako jsou pánve) a zemina má být rozpojena na menší shluky.

[8]

Jestliže je používána uzavíratelná vysoušecí nádoba, pak víko má být odklopeno a nádoba s vlhkým zkušebním vzorkem má být umístěna do sušárny s teplotním rozsahem 105 °C ± 5 °C a vysušena na ustálenou hmotnost.

[8]

Požadovaná doba vysoušení zkušební vzorku na ustálenou hmotnost se liší v závislosti na typu zeminy, velikosti zkušební vzorku, typu a kapacitě sušárny a dalších faktorech. Vliv těchto faktorů na dobu vysoušení může být předem stanoven kvalifikovaným odhadem, který je opřen o zkušenosti s danou zemínou a s používanými sušárnami. Ve většině případů se za dostatečnou dobu považuje 16 až 24 hodin. Jestliže je nejistota ohledně řádného vysoušení vzorku, pak se může ve vysoušení pokračovat až dokud rozdíl zjištěných hmotností na dvou měřeních, provedených v dostatečném časovém intervalu (déle než 1 h) významně neliší (rozdíl naměřených hmotností je menší než 1 % hmotnosti zkušební vzorku). Zkušební vzorek z písku může být většinou vysušen na ustálenou hmotnost již po 4 hodinách sušení při použití sušárny s nucenou cirkulací vzduchu.

[8]

U zemin obsahujících sádrovec nebo jiné minerály mající významné množství chemicky vázané vody a u zemin obsahujících významné množství organického materiálu nemusí hodnota stanovená vysoušením při $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ vždy znamenat pouze vlhkost vzorku. V některých případech proto může být, s ohledem na další záměr použití daného typu zeminy, vhodnější udržovat v sušárně nižší teplotu (například 40 °C). Nicméně jestliže je pro stanovení vlhkosti zkušební vzorku použita nižší teplota vysoušení, pak stejná teplota musí být použita i při vysoušení zkušební vzorku při stanovování zdánlivé hustoty pevných částic.

[8]

Před umístěním nových, vlhkých zkušebních vzorků do sušárny mají být již vysušené zkušební vzorky vyjmuty, aby se zabránilo možné absorpci vlhkosti u některých vysušených zemin. Nicméně, tento požadavek nemusí být splněn, jestliže již předsušené zkušební vzorky mají zůstat v sušárně na dosušení na dobu dalších 16 hodin. Po vysoušení zkušební vzorku na ustálenou hmotnost se nádoba vyjme ze sušárny.

[8]

Jestliže je vysoušecí nádoba uzavíratelná, pak se ihned po vyjmutí ze sušárny musí znovu uzavřít a nechat vychladnout buď na pokojovou teplotu, nebo na teplotu, při které může být s nádobou bez problémů ručně manipulováno. Pak bude zajištěno, že chod vah nebude narušen konvekčním vedením tepla. Musí se stanovit hmotnost vysoušecí nádoby s vysušeným zkušebním vzorkem. Tato hodnota musí být zaznamenána.

[8]

Jestliže vysoušecí nádoba není uzavíratelná, pak se musí nádoba po vyjmutí ze sušárny umístit do exsikátoru, kde se nechá vychladnout na pokojovou teplotu. Poté musí být vysoušecí nádoba s vysušenou zemínou zvážena. Pro zeminy s malou, nebo žádnou náchylností k absorpci vody, se nemusí vysoušecí nádoba s vysušenou zemínou umístit do exsikátoru ani v případě, že nebyla použita uzavíratelná vysoušecí nádoba. Vážení pak musí být provedeno ihned po dosažení takové teploty, při níž nebude ovlivněna přesnost vah.

[8]

2.3.3 Výsledky zkoušek

Vlhkost zeminy musí být vypočítána podle vztahu č. 9:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \cdot 100$$

(9)

kde

W je vlhkost zeminy (%);

m_1 hmotnost vysoušecí nádoby a vlhkého zkušební vzorku (g);

m_2 hmotnost vysoušecí nádoby a suchého zkušební vzorku (g);

m hmotnost vysoušecí nádoby (g);

[8]

2.3.4 Doplnující informace

V některých situacích, např. V oblasti kontroly zemních prací, kdy je požadováno okamžité stanovení vlhkosti, je možno použít některou z následujících metod: metoda pískové lázně, metoda vysoušení v mikrovlnné troubě a metoda tlaku plynu při využití karbidu vápníku. Nemělo by se předpokládat, že tyto zkoušky jsou vhodné pro všechny typy zemin a jestliže se takováto metoda použije, pak se má zároveň provést kontrolní zkouška vlhkosti pomocí vysoušení zkušební vzorku v sušárně. Zejména to platí pro zeminy s obsahem jílu nebo organických materiálů.

[8]

3 Samokalibrovatelné čidlo toku tepla HFP 01-SC

Samokalibrovatelné čidlo toku tepla HFP 01-SC (viz. příloha č. 1) je varianta čidla HFP 01 (viz. příloha č. 2) s rozšířením o funkci samokalibrace.

Princip měření čidla HFP 01-SC je založen na vlastnostech termočlánků určitého počtu, spojených do série. Každý termočlánek je vyroben z dvou rozdílných materiálů (měď a konstantan: konstantan obsahuje obvykle 55 % mědi a 45 % niklu, jeho rezistivita je v širokém rozsahu teplot konstantní [10]). Jejich kombinacemi měď – konstantan a konstantan – měď jsou vytvořeny dva spoje na nichž vzniká teplotní rozdíl, který je přímo úměrný generovanému napětí na výstupu termočlánku. Teplotní rozdíl na spojích termočlánku je přímo úměrný toku tepla φ , závislém na tloušťce a tepelné vodivosti čidla (viz. příloha č. 6, obr. č. 1) Každé takto vyrobené čidlo má vlastní citlivost E_{sen} vyjádřenou ve voltech $V \cdot m^2/W$. Tok tepla φ je vypočítán dle vztahu č. 10:

$$\varphi = \frac{V_{sen}}{E_{sen}} \quad (10)$$

kde φ je tok tepla, V_{sen} je výstupní napětí čidla a E_{sen} je citlivost čidla.

[9]

Princip realizace samokalibrace čidla HFP 01-SC spočívá v umístění slabé topné vrstvy (filmu) na jednu stranu plochého čidla (viz. příloha č. 6 obr. č. 9) Tato topná vrstva generuje v určeném čase tok tepla o známé velikosti. Diference napětí na výstupu čidla ΔV_{sen} mezi vypnutým a zapnutým ohřevem čidla je násobena dvakrát, protože vždy prochází čidlem polovina toku tepla a dělena tokem tepla φ vyjadřuje citlivost čidla E_{sen} podle vztahu č. 11:

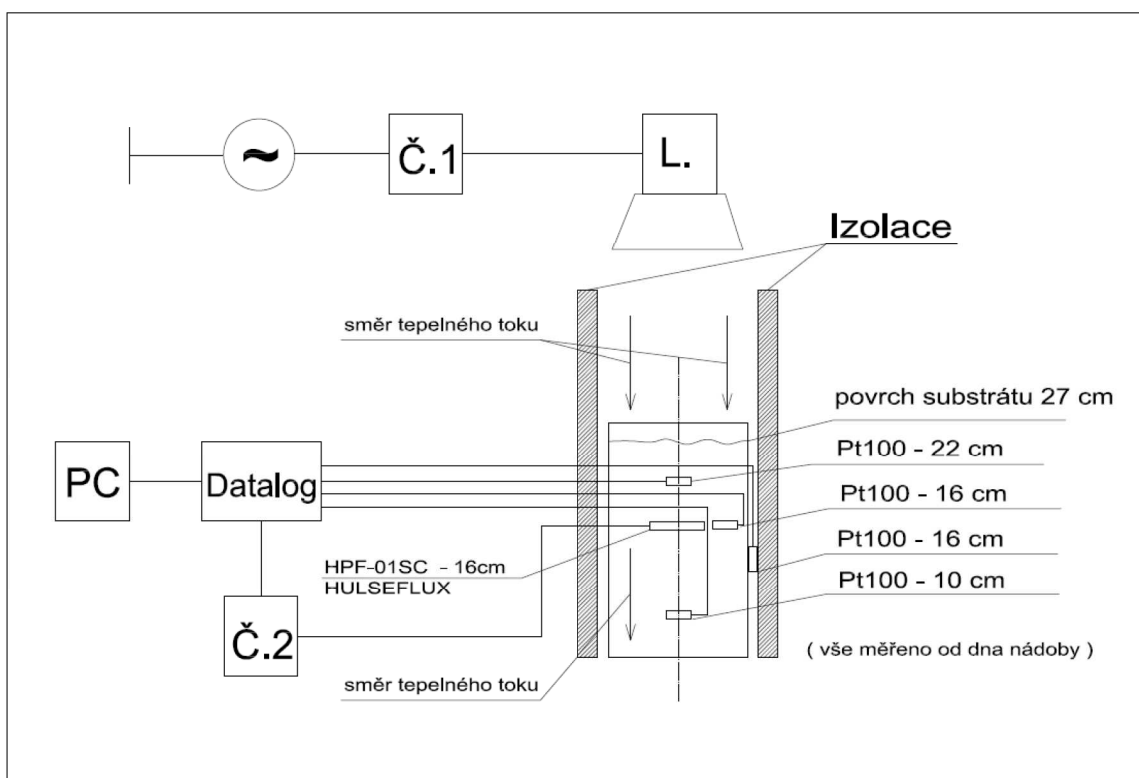
$$E_{sen} = \frac{2 \cdot \Delta V_{sen}}{\varphi} \quad (11)$$

kde φ je tok tepla, ΔV_{sen} je diference napětí na výstupu čidla mezi vypnutým a zapnutým ohřevem čidla a E_{sen} je citlivost čidla.

[9, 10]

4 Realizace pokusu, popis praktické části:

Ve vhodné nádobě zaplněné zvoleným substrátem byla umístěna teplotní čidla Pt100, v definovaných vzdálenostech od sebe, společně s čidlem Hukseflux HFP-01SC (viz. blokové schéma obr. č. 1). Všechna čidla byla připojena do dataloggeru M4216 napájenému bateriemi. Datalogger je zařízení určené k sběru a ukládání elektrických veličin v reálném čase po dobu danou velikostí jeho paměti, případně životností napájecího zdroje. Po připojení počítače k dataloggeru lze tato data ukládat na další paměťová média. Datalogger byl připojen k počítači pomocí sériového portu. Všechna čidla byla umístěna v ose nad sebou v následujícím pořadí: 10 cm nad dnem nádoby Pt100, 16 cm nad dnem nádoby čidlo Hukseflux HFP-01SC a čidlo Pt100, 22 cm nad dnem nádoby Pt100. Na úrovni 16 cm společně vedle čidla Hukseflux HFP-01SC bylo umístěno další čidlo Pt100 (obr. č. 2), jako jediné neumístěno v ose určeno pro kontrolu správnosti měření. Mezi nádobou a izolačním obalem bylo umístěno další čidlo Pt100 určené k monitorování okolní teploty. Nádoba se substrátem byla temperována parabolickou čirou žárovkou 60W (viz. příloha č. 4), aplikovanou do stínítka kancelářské lampy. Vzdálenost žárovky od povrchu substrátu byla 30 cm. Substrát byl temperován po dobu 24 hodin s přestávkou dalších 24 hodin, ve třech periodách. Nádoba se substrátem byla izolována po svém obvodu izolační podložkou, (pěnový polyuretan o síle 8 mm). Toto opatření zajistilo směr tepelného toku od povrchu substrátu ke dnu a dále do betonové podlahy.



obr. 1 Blokové schéma sestavy měření toku tepla v substrátu, kde PC značí počítač, Č.1 značí časový spínač napájení lampy s žárovkou, Č.2 značí časovač ohřevu a samokalibrace čidla HFP 01-SC, L. značí lampu s žárovkou, Datalog značí datalogger

4.1 Aplikace měřicích čidel do substrátu (písek)

Pro první část měření byl použit říční písek o hustotě $1484,2 \text{ kg / m}^3$, používaný k výrobě malty, ve druhé části byl použit rašelinový substrát o hustotě $420,8 \text{ kg / m}^3$, určený k pěstování květin. Oba vzorky byly zvoleny tak aby dostatečně reprezentovaly rozdílné vlastnosti obou použitých substrátů. Jako vhodná nádoba bylo použito černé plastové zednické vědro o průměru 40 cm a výšce 27 cm. Ve vědru byly umístěny protilehle, pro potřebu plnění do přesných výšek, dva plastové skládací metry (obr. č. 1), zajišťující potřebnou přesnost měření výšek uložení čidel teploty a tepelného toku. Zvolený substrát byl vždy doplněn v plastovém vědru do požadované výšky a utážen rovnoměrně tlakem ruky přes plochu dřevěné desky zhruba o rozměru 10 cm x 15 cm. Poté bylo vždy potřeba doplnit substrát opět nad požadovanou výšku a opět utáhnout. Přesná výška utáženého substrátu byla kontrolována dřevěnou laťkou o dostatečné délce, přiloženou na požadovanou hodnotu výšky současně na obou protilehlých metrech. Po dosažení potřebné výšky utáženého substrátu bylo umístěno čidlo do středu vzniklého půdorysu povrchu substrátu s vyvedenými vodiči k okraji nádoby. Po té byla vršena další vrstva substrátu do další požadované výšky a umístěno čidlo popsáním postupem. Tímto postupem bylo dosaženo v mezích daných možností přesných vzdáleností mezi umístěním jednotlivých čidel. Po zaplnění nádoby substrátem do výšky 28 cm, byla nádoba izolována od okolního prostředí po svém obvodu. Izolační podložka byla v celé své délce omotána těsně kolem vědra a zajištěna proti odvinutí gumovým provazem s háky. Na horním okraji takto vzniklého válce vysokém 60 cm byly uchyceny kolíky všechny vodiče vedoucí od čidel umístěných v substrátu. Tím byly tyto vodiče vhodně zajištěny po jejich vytvarování proti nežádoucímu visení v prostoru uvnitř válce nad povrchem substrátu a současně částečně ochráněny před uvolněním z substrátu nevhodnou manipulací, například při jejich připojování k dataloggeru. První část pokusu měření substrátu reprezentovaného pískem proběhla za stočtyřicet čtyři hodin, kdy se po sobě vždy opakovalo dvacetičtyřhodinové temperování substrátu a po té dvacetičtyřhodinové chladnutí substrátu.

4.2 Aplikace měřicích čidel do substrátu (rašelina)

Ve druhé části pokusu byl písek nahrazen rašelinou a to stejným postupem jakým se do daných definovaných výšek utáženého písku umísťovala jednotlivá čidla Pt100 a Hukseflux HFP-01SC. Byl použit stejný postup měření a zachovány dvacetičtyřhodinové cykly ohřevu substrátu a chladnutí substrátu ve třech periodách. Zachováním shodných postupů měření u obou substrátů byly vytvořeny podmínky pro porovnání výsledků měření teplot a tepelného toku mezi zmíněnými substráty.

4.3 Elektronická část

Vodiče čidel byly postupně připojovány do vstupní svorkovnice dataloggeru. Čidlo Hukseflux HFP-01SC bylo připojeno také k časovacímu obvodu zajišťujícímu jeho temperování potřebně k jeho samokalibraci probíhající současně s temperováním v pravidelných periodách tří minut temperování s samokalibrací a tří hodin bez temperování. Tímto časovačem lze skokově měnit

nastavení doby temperování a samokalibrace po patnácti vteřinách a nastavení doby bez temperování po patnácti minutách a to v rozsahu patnáct až dvěstěčtyřicet vteřin temperování a kalibrace a patnáct až dvěstěčtyřicet minut prodlevy do další kalibrace s temperováním. Tento obvod také disponuje dvěma výstupy určenými k signalizaci temperování a kalibrace, konkrétně jeden výstup napájí dvoubarevnou diodu LED, která značí červenou barvou temperování s kalibrací a zelenou barvou klidový stav a druhý výstup je určen k připojení na datalogger, pro binární signalizaci opět stavu temperování s kalibrací. Oba výstupy je vhodné využít k jejich funkcím. Po připojení čidel k dataloggeru, byla umístěna lampa, určená k ohřevu substrátu, žárovkou 30 cm nad povrch substrátu, ovládána zásuvkovým časovým spínačem a celou sestavu bylo možno odzkoušet. Po připojení počítače k použitému dataloggeru pomocí sériového portu je potřeba pro komunikaci mezi počítačem a dataloggerem software (program) určený k monitorování vstupních veličin dataloggeru a nastavení a určení jeho rozsahů a veličin, také pro následný sběr dat z dataloggeru. V našem případě byl použit software Most2.3 verze 230.54 komunikační a vyhodnocovací program pro monitorovací stanici M4216, program a datalogger byl navržen a zrealizován firmou FIEDLER-MÁGR elektronika pro ekologii, sídlem v Českých Budějovicích. Po potřebných nastaveních parametrů dataloggeru tímto programem byly prvotně odzkoušeny a potvrzeny funkčnosti všech aplikovaných čidel v substrátu i vně obalu. Po ověření funkčnosti elektronické části pokusu bylo zahájeno vlastní měření teplot a tepelného toku substrátem a to dvacetičtyřhodinovým ohřevem substrátu lampou k tomu určenou. Data z aplikovaných čidel byla ukládána po celou dobu měření v minutových intervalech.



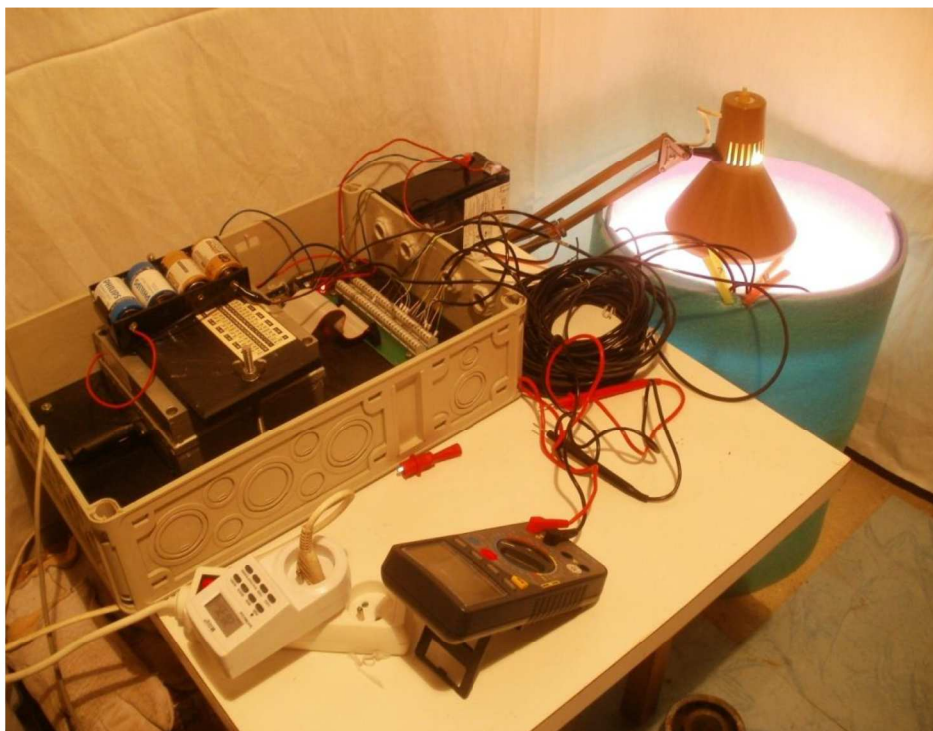
Obr. 2 *Způsob měření výšky povrchu substrátu ve vědru umožňoval dostatečně přesně umístit jednotlivá čidla do určených výšek měřených od dna vědra.*



Obr. 3 S čidlem Hukseflux HFP-01SC bylo umístěno do substrátu ve stejné úrovni 16 cm čidlo PT100 pro kontrolu správnosti měření.



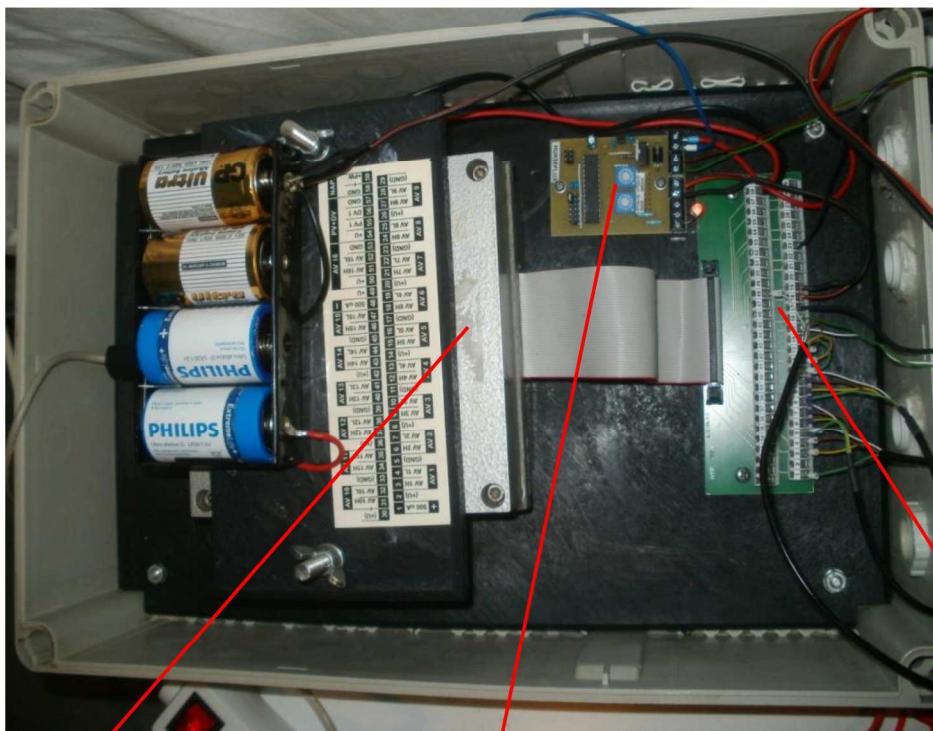
Obr. 4 Nádoba se substrátem a čidly umístěnými do substrátu v určených výškách s výškou povrchu substrátu 27 cm měřeno od dna nádoby.



Obr. 5 Realizovaná funkční sestava měření toku tepla substrátem čidlem tepelného toku Hukseflux HFP-01SC.



Obr. 6 Detail dvacetičtyřhodinového ohřevu substrátu rašeliny lampou s čirou parabolickou žárovkou 60W.

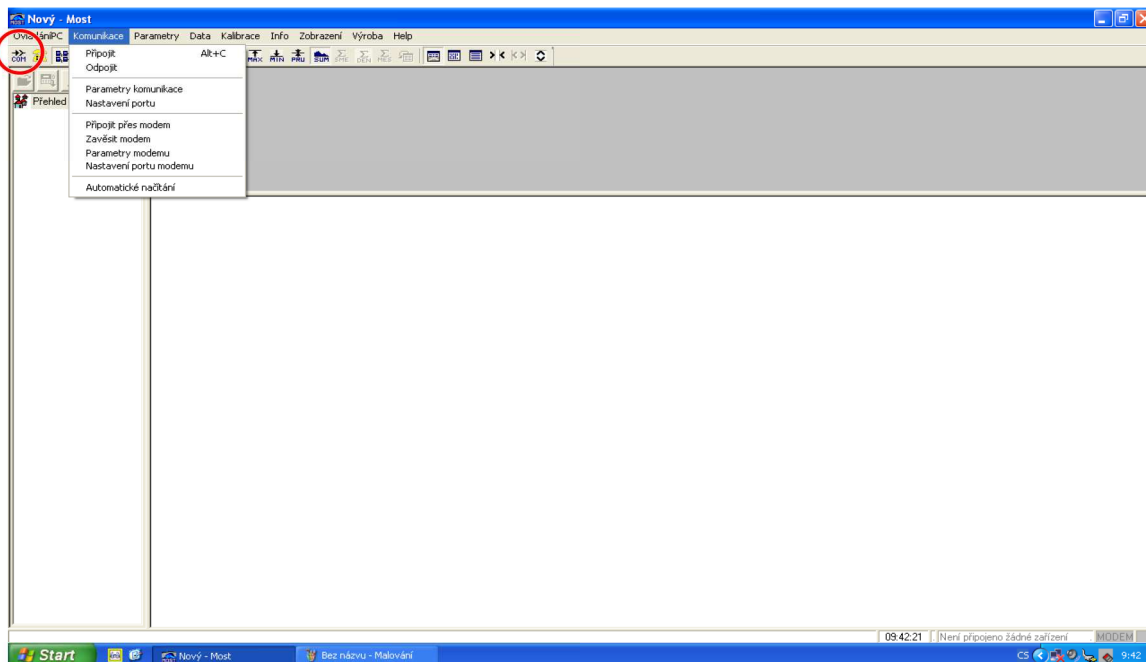


obr. 7 Detail dataloggeru a jeho napájecího zdroje, časovače pro čidlo tepelného toku Hukseflux HFP 01-SC, sběrnice datologgeru, vše je umístěno v plastovém uzavratelném obalu umožňujícím použití v terénu.

5 Popis programu Most 2.3 a jeho funkcí

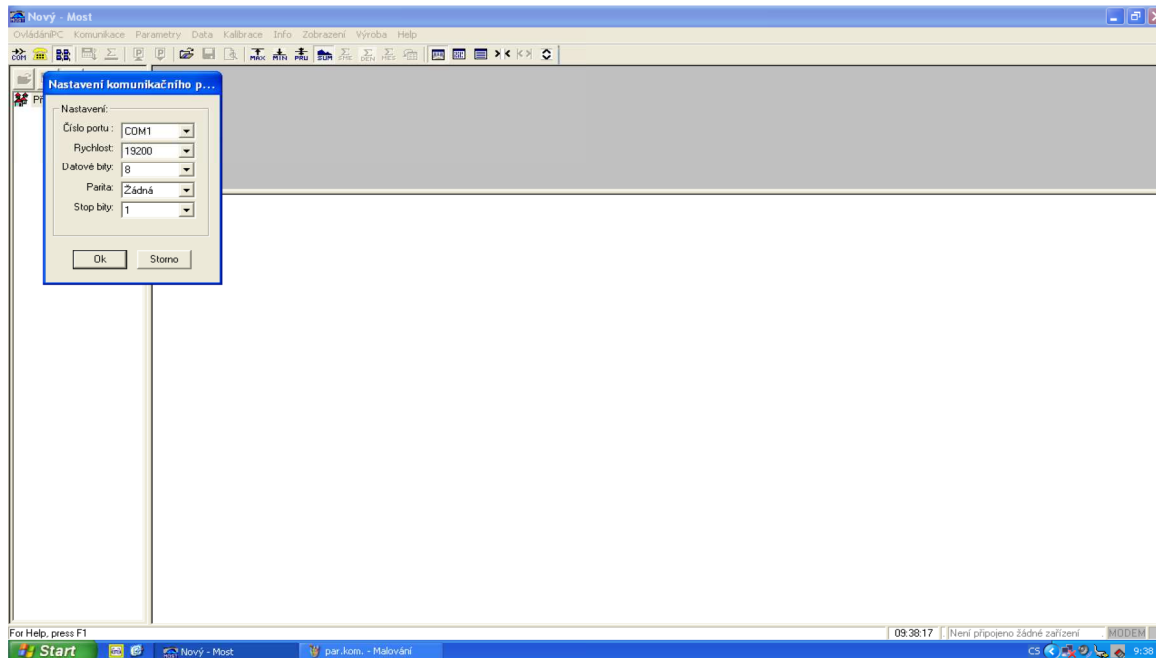
Program „Most2.3 verze 230.54 komunikační a vyhodnocovací program pro monitorovací stanici MS16“ je určen mimo jiné pro online monitorování měřených elektrických veličin dataloggerem, tak pro sběr dat měřených veličin dataloggeru a následné zpracování. Stažená data z dataloggeru jsou ukládána do souborů typu .dta a následně je lze zobrazit v běžných textových a tabulkových editorech. Níže uvedený popis se týká funkcí programu Most2.3 použitých k monitorování a sběru dat výše popsaných měření teplot a tepelného toku. Konkrétně znázorněná data v obrázcích pochází z uvedených pokusů, zde budou uvedena pro vysvětlení použitých funkcí programu.

Program Most2.3 verze 230.54 po otevření, před navázáním komunikace s dataloggerem (obr. č. 7). V pravém horním rohu obrázku je rozbalena nabídka klikem levého tlačítka myši na záložku „Komunikace“ kde lze volit způsob a parametry připojení. Volba „připojit“ má stejné vlastnosti jako tlačítko „com“ označené červeným kroužkem. Všechna tlačítka i záložky tohoto programu jsou aktivovány/deaktivovány jedním klikem levého tlačítka myši. V následujícím popisu toto už nebude zmiňováno.

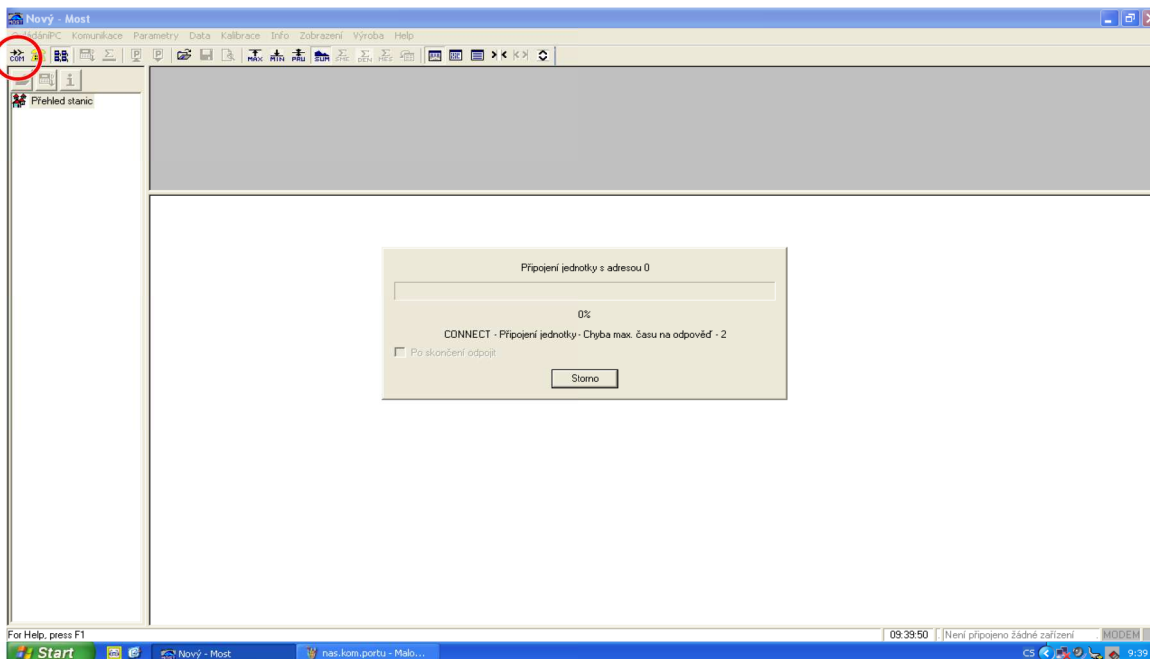


Obr. 7 Program *Most2.3* po otevření s rozbalenou nabídkou komunikace v levém horním rohu obrázku.

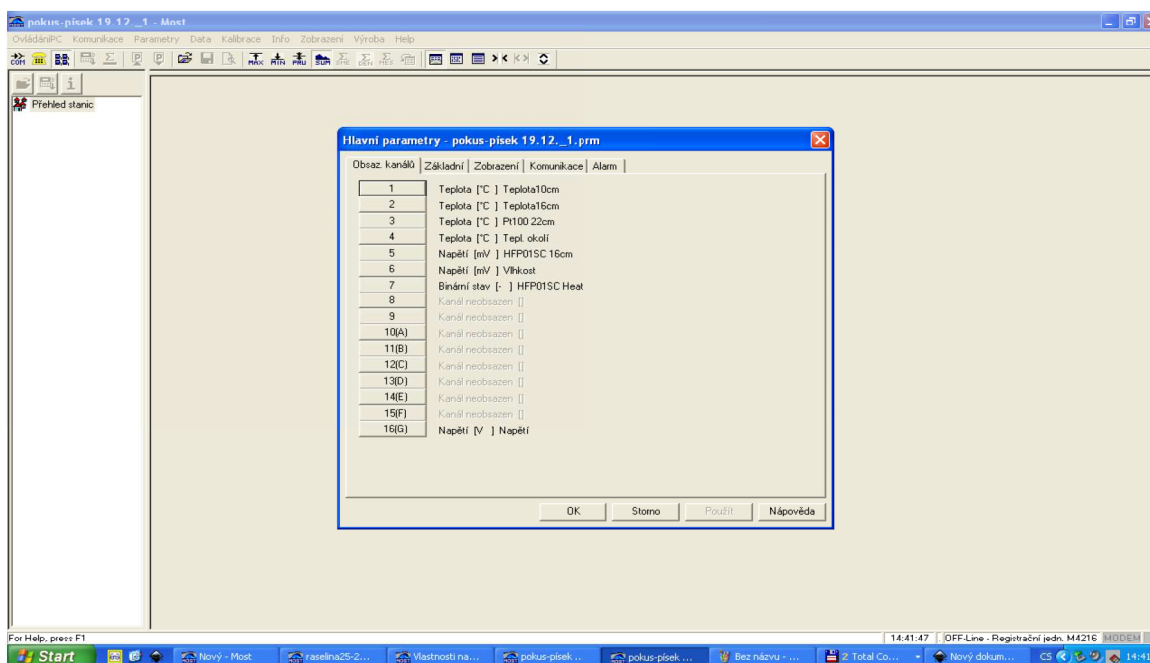
Volba „nastavení komunikačního portu“ (obr. č. 8) v záložce „Komunikace“. Nastavení komunikačního portu tak, jak je zřejmé z okna „Nastavení komunikačního portu“ je podmínkou pro funkční navázání komunikace s dataloggerem.



Obr. 8 Detail nastavení komunikačního portu, lze nastavit hodnoty dle funkčního nastavení v okně „Nastavení komunikačního portu“ v horním levém rohu obrázku.



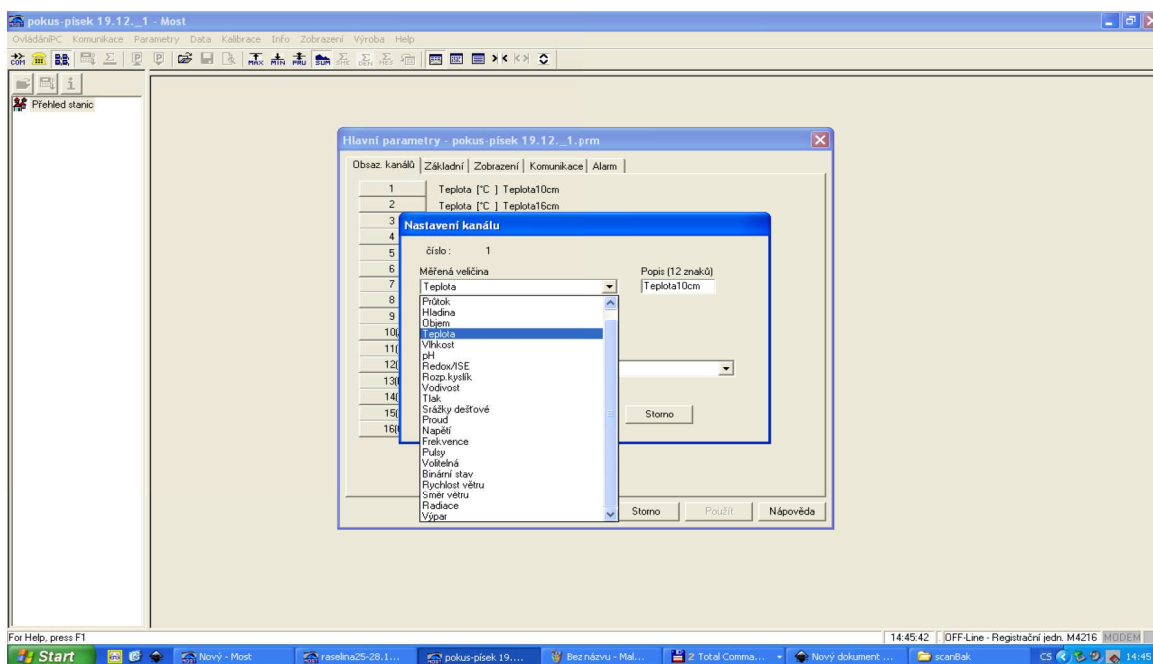
Obr. 9 Průběh navázání komunikace s dataloggerem po kliknutí na tlačítko „com“ označené červeným kroužkem v levém horním rohu obrázku.



Obr. 10 Okno hlavních parametrů s určenými přidělenými vstupy jednotlivým čidlům se automaticky otvírá po úspěšném navázání komunikace s dataloggerem.

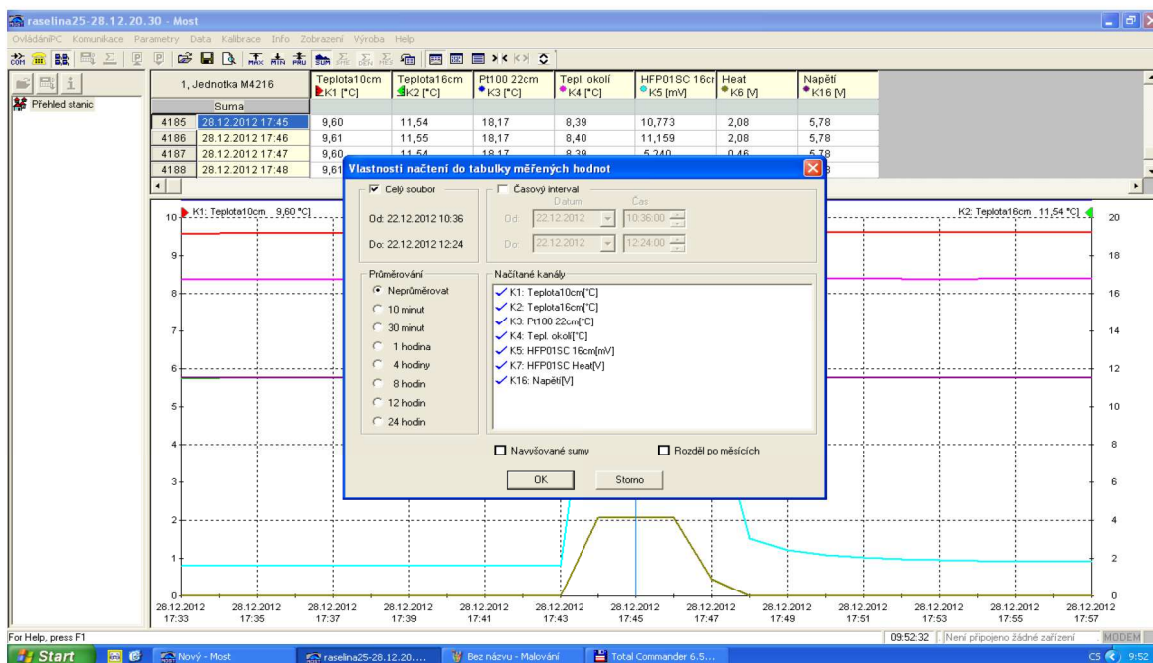
Program Most2.3 verze 230.54 navazuje komunikaci s dataloggerem (viz. obr. č. 9), po stisku tlačítka „kom“ v pravém horním rohu obrázku. V tomto případě je odpojen komunikační kabel, program reaguje oznámením „chyba max. času na odpověď“ a počtem uběhnutých vteřin od počátku neúspěšného pokusu o navázání komunikace, stejným způsobem reaguje i při chybném nastavení komunikačního portu. V opačném případě se bargraf okna „připojení jednotky s adresou 0“ vyplní indikačním modrým pruhem, jak je tomu běžné v obdobných aplikacích. Po navázání komunikace definujeme vlastnosti jednotlivých měřících kanálů dataloggeru v automaticky

otevřeném okně „Hlavní parametry“ (viz. obr. č. 10). Stlačením tlačítka s číslem se otevře panel nastavení parametrů daného měřicího kanálu dataloggeru, kde se definuje měřená veličina, určuje její rozsah a přepočítá na výslednou požadovanou veličinu (viz. obr. č. 11).



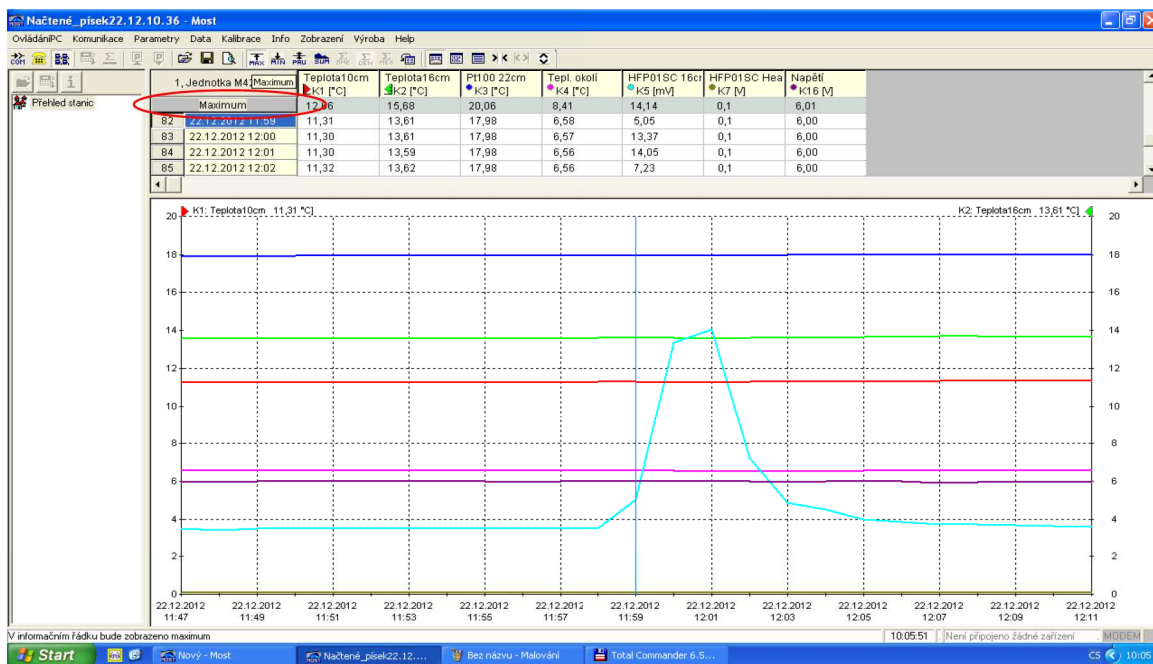
Obr. 11 Příklad nastavení měřené veličiny v rozbalovacím okně „Nastavení kanálu“, které se otvírá po stlačení tlačítka s přiděleným čídem v okně „Hlavní parametry“.

Po tomto nastavení lze zahájit vlastní měření, případně ukládání dat a dále s nimi pracovat. Otevřením záložky „Data“ se rozbaluje nabídka možností načítání a ukládání dat. Lze načíst data z dataloggeru příkazem „načtení dat ze sériového portu“ Následně data uložit na disk počítače příkazem „uložení dat na disk“ a tato data opět otevřít v programu Most 2.3 příkazem „načíst data z disku“. Pro práci s daty v počítači je možné také definovat vlastnosti načtení dat (viz. obr. č. 12).

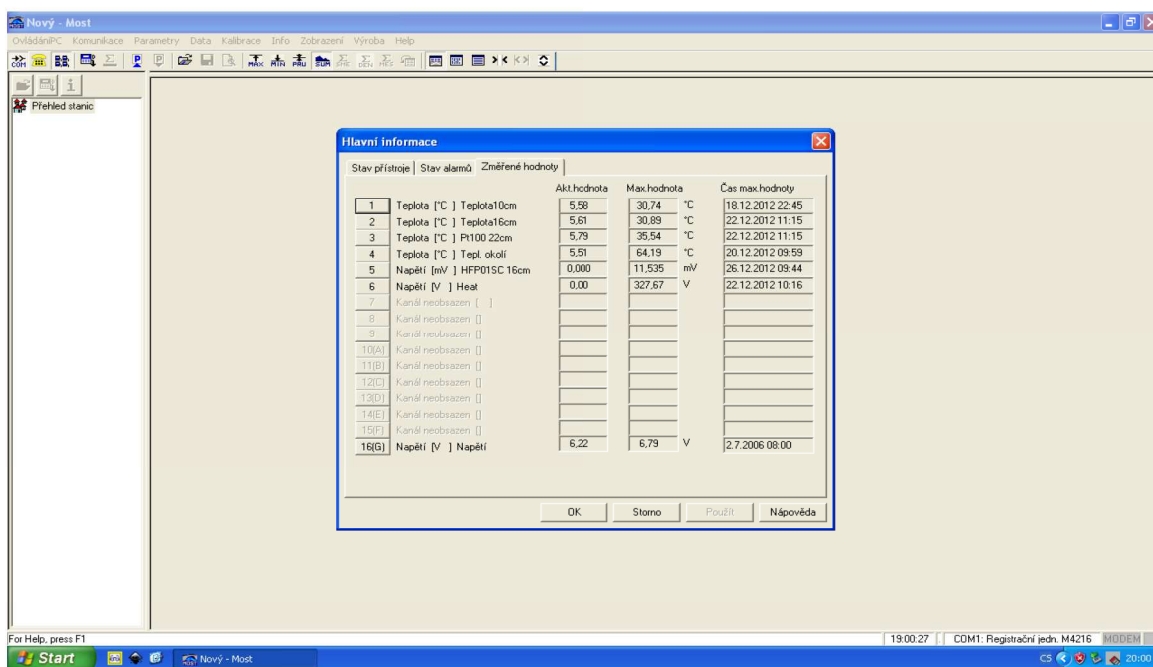


Obr. 12 Okno „Vlastnosti načtení do tabulky měřených hodnot“ automaticky vyskakuje při načítání dat z paměťového média počítače a lze v něm nastavit časový interval načítaných dat.

Pokud nejsou kladeny jiné požadavky než základní dané oknem „vlastnosti načtení do tabulky načtených hodnot“, není potřeba další úprava nastavení. Toto okno se automaticky zobrazuje při načítání dat z dataloggeru i při načítání dat z disku. Po načtení dat z disku nebo dataloggeru lze s výhodou používat tlačítek v nástrojové liště „max“ maximum měřené hodnoty z načteného souboru, „min“ minimum měřené hodnoty z načteného souboru, „pru“ průměr měřené hodnoty z načteného souboru, „sum“ suma měřené hodnoty z načteného souboru. Požadované hodnoty dle volby tlačítka se zobrazují v řádku vpravo vedle popisu zvolené funkce (označena červenou elipsou).



Obr. 13 Načtená data lze upravovat mimo jiné tlačítky „min“, „max“, „pru“, „sum“ v liště tlačítek, jejich celý název se zobrazuje v okně označeném červenou elipsou v horním levém rohu po stlačení příslušného tlačítka.



Obr. 14 Zobrazení aktuálně měřených hodnot dataloggerem M4216 v okně „Hlavní informace“ v záložce „Změřené hodnoty“ programu Most 2.3.

5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty tepelného toku v substrátu písku a rašeliny proběhly po třech dvacetičtyřhodinových cyklech ohřevu žárovkou 60W (viz. příloha č. 4) a třech dvacetičtyřhodinových cyklech chladnutí tj. bez ohřevu žárovkou. Ve všech grafech č. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 průběhů toku tepla a teplot v substrátech písku a rašeliny jsou naměřené hodnoty zobrazeny v časové posloupnosti tak jak byly zaznamenány dataloggerem. Části naměřených hodnot toku tepla a teplot v substrátu písku (viz. graf č. 1, 3, 5, 7) se nepodařilo z dataloggeru přenést do počítače. To je zřejmé z grafu měřených hodnot v substrátu písku kde absence těchto hodnot není nahrazena spojnicí mezi takto vzniklými jednotlivými částmi křivky a to pro zachování autentičnosti naměřených hodnot. I přes absenci těchto dat je zachována vypovídající hodnota pro vyhodnocení výsledků. Protože vlhkost ovlivňuje tepelnou vodivost λ , byla určena vlhkost obou substrátů výpočtem vlhkosti dle vztahu č. 9 a to před zahájením prvního ohřevu žárovkou a po ukončení třetího tj. posledního chladnutí substrátů písku a rašeliny (viz. Tabulka č. 3):

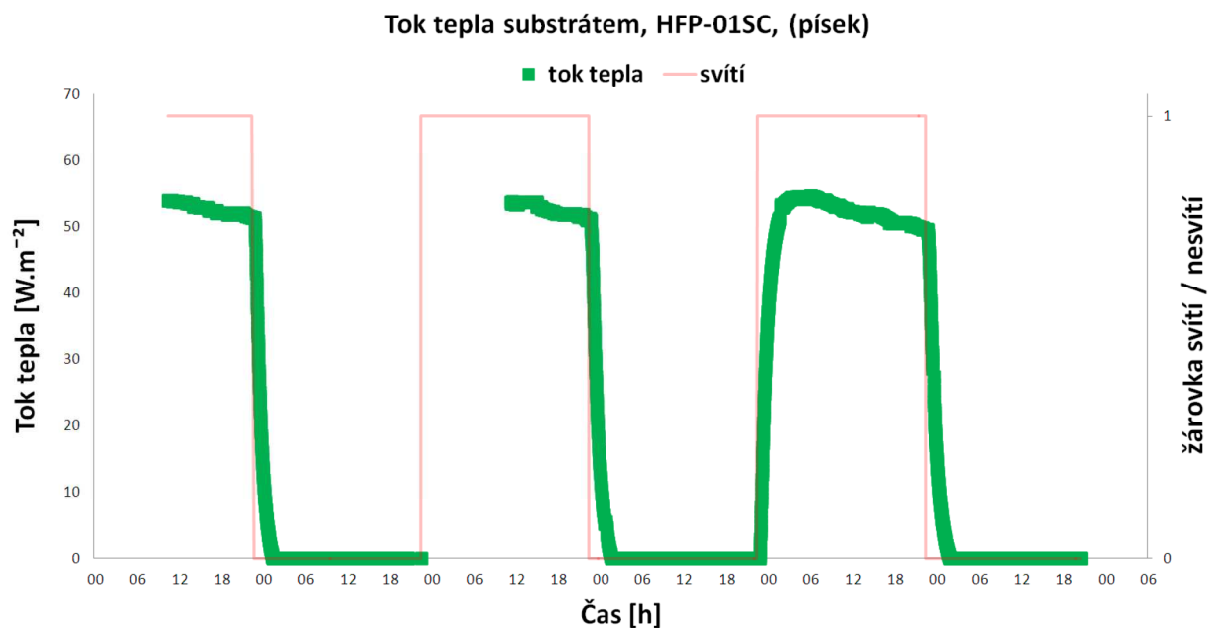
Tabulka 3 Hmotnostní vlhkost obou substrátů v % před zahájením prvního ohřevu žárovkou a po ukončení třetího tj. posledního chladnutí substrátů písku a rašeliny v hloubkách 16 cm a nad povrchem dna nádoby substrátu.

substrát	Vlhkost substrátu		
	před	po d (16 cm)	po nad dnem
písek	4,49 %	2,35 %	4,43 %
rašelina	68,38 %	67,70 %	67,80 %

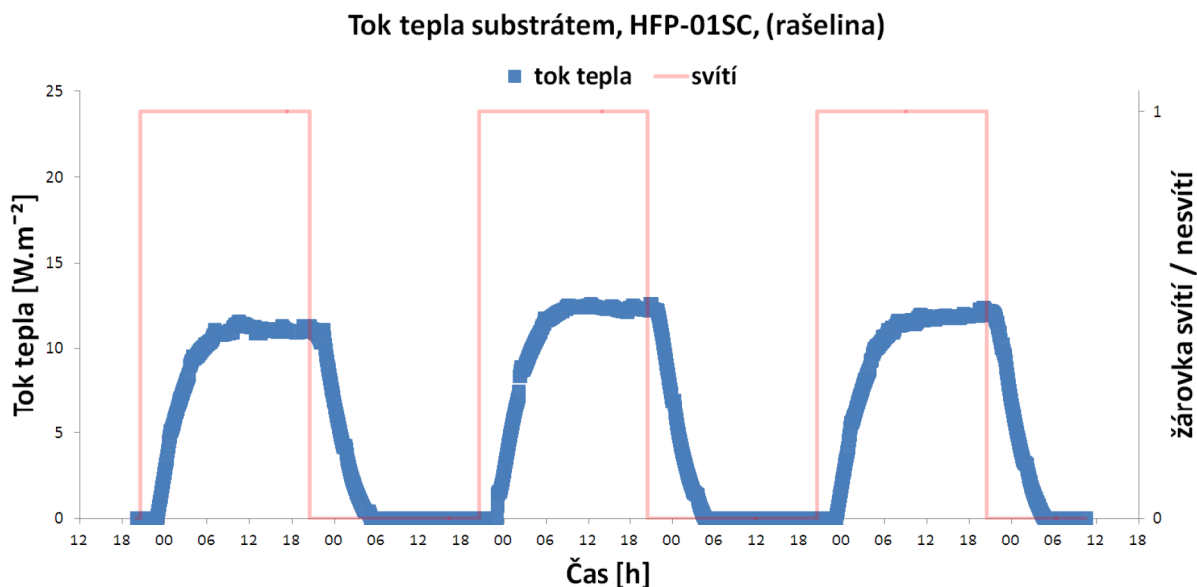
Z tabulky je zřejmý rozdíl vlhkostí substrátu písku, kde po třetím chladnutí substrátu byla v hloubce 16 cm od dna nádoby vlhkost o 2,08 % nižší než u dna nádoby. Oproti tomu vlhkost substrátu rašeliny zůstala po posledním vychladnutí substrátu v hloubce 16 cm od dna nádoby o 0,1 % nižší než u dna nádoby. Rozdíl vlhkostí obou substrátů po posledním chladnutí určují rozdílné fyzikální vlastnosti písku a rašeliny.

Okolní teplota nádoby substrátů byla v obou případech po celou dobu poměrně nízká a stabilní. Pohybovala se v rozmezí 1,97 °C a průměrná hodnota byla 6,57 °C u substrátu písku. U substrátu rašeliny v rozmezí 1,79 °C a průměrná hodnota byla 7,32 °C. Díky umístění nádoby substrátu za těchto podmínek, nedocházelo k značným změnám vlhkosti obou substrátů a naměřené hodnoty toku tepla φ a teplot t nebyly vlhkostí značně ovlivňovány.

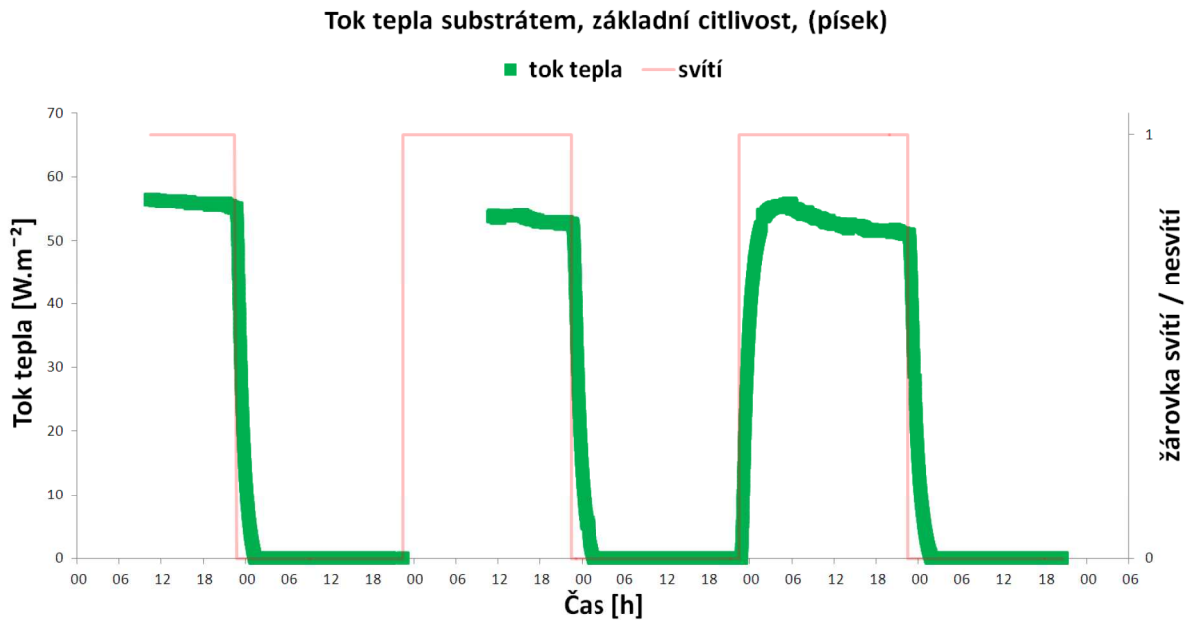
Hodnoty toků tepla φ v obou substrátech byly měřeny samokalibrovatelným čidlem toku tepla HFP 01-SC za použití funkce samokalibrace (viz. graf č.1 a č. 2) tj. po každé kalibraci s tříhodinovým intervalem je přizpůsobována citlivost čidla dle poslední kalibrace a výpočtem dle vztahu č. 10. Všechny hodnoty tepelného toku (viz. graf č. 3 a č.4) byly také počítány dle vztahu č. 10 ze základní citlivosti čidla (viz. příloha č. 4). Pro porovnání s hodnotami měřenými čidlem HFP 01-SC byly vypočítány toky tepla φ dle vztahu č. 7 z teplotních gradientů d (10 – 16 cm), d (16 – 22 cm), d (10 – 22 cm) nad dnem nádoby (viz. graf č. 5 a č. 6).



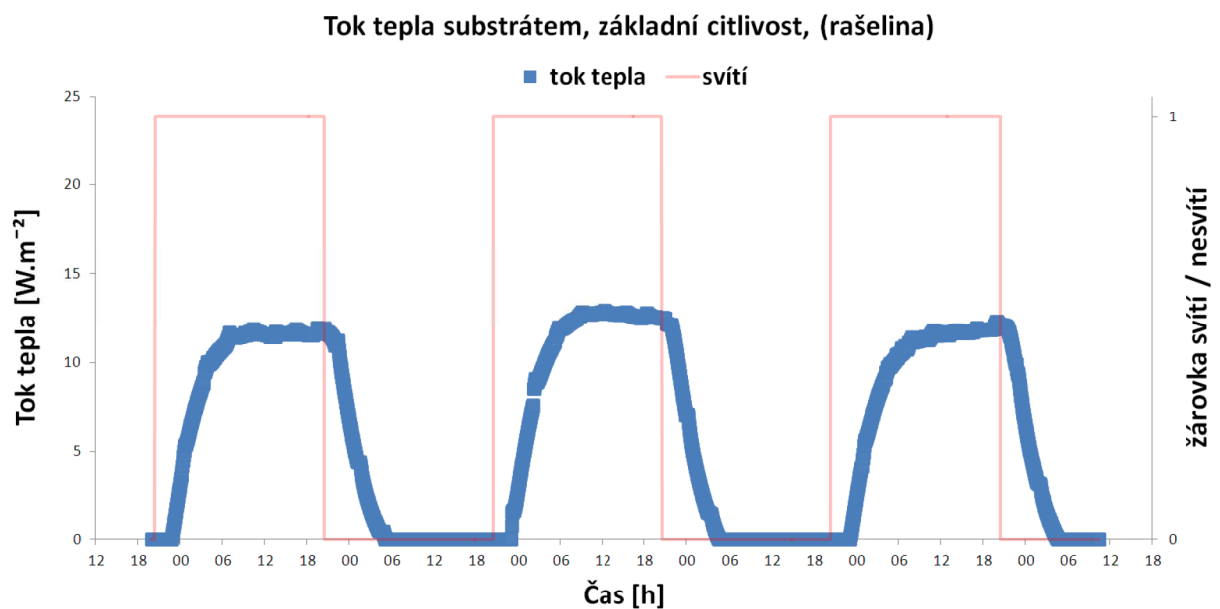
graf 1 Tok tepla substrátem (písek), měřeno samokalibrovatelným čidlem tepelného toku HFP-01SC v hloubce 16 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



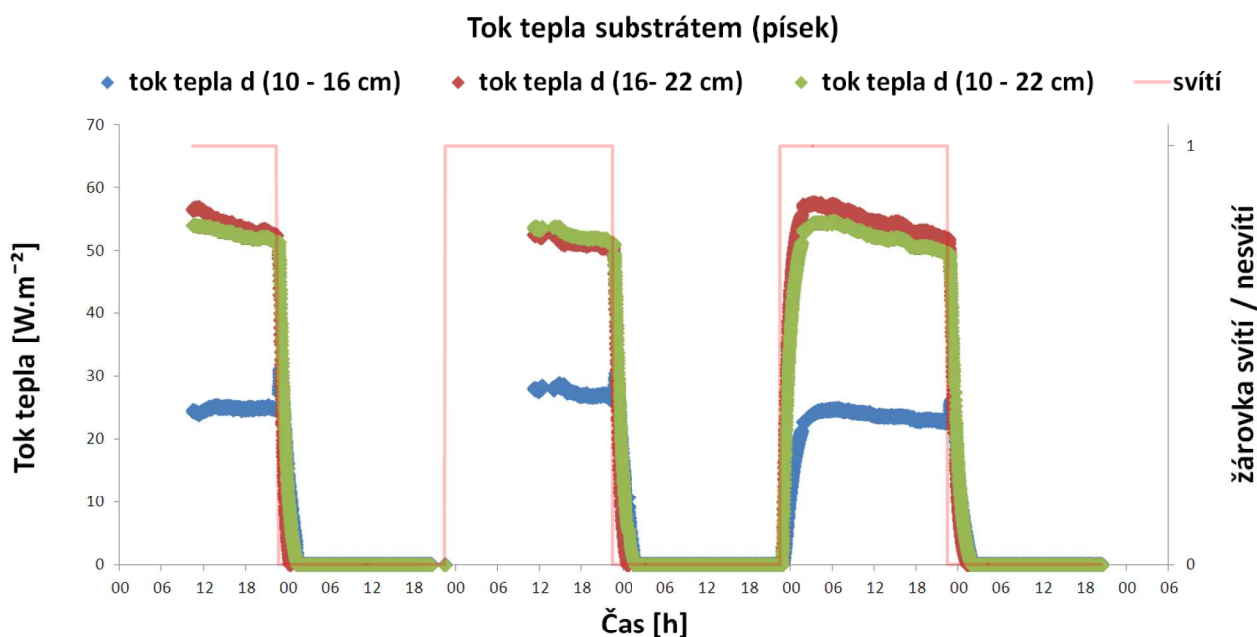
graf 2 Tok tepla substrátem (rašelina), měřeno samokalibrovatelným čidlem tepelného toku HFP-01SC v hloubce 16 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



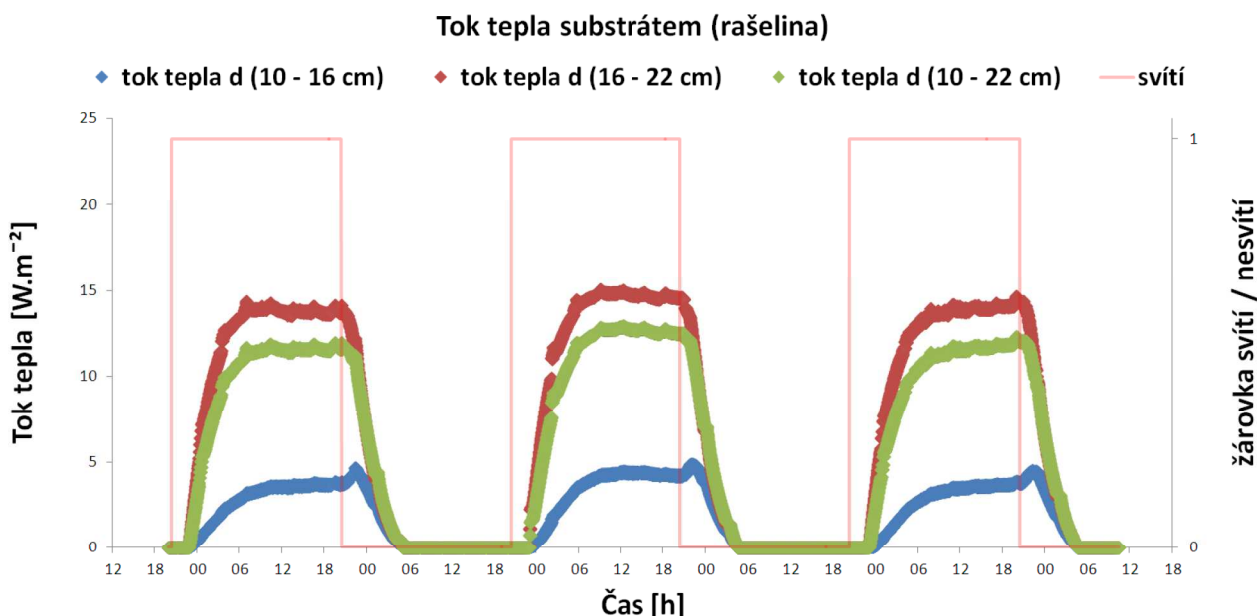
graf 3 Tok tepla substrátem (písek), měřeno samokalibrovatelným čidlem tepelného toku HFP-01SC s jeho základní citlivostí, tj. bez korekce samokalibrací v hloubce 16 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



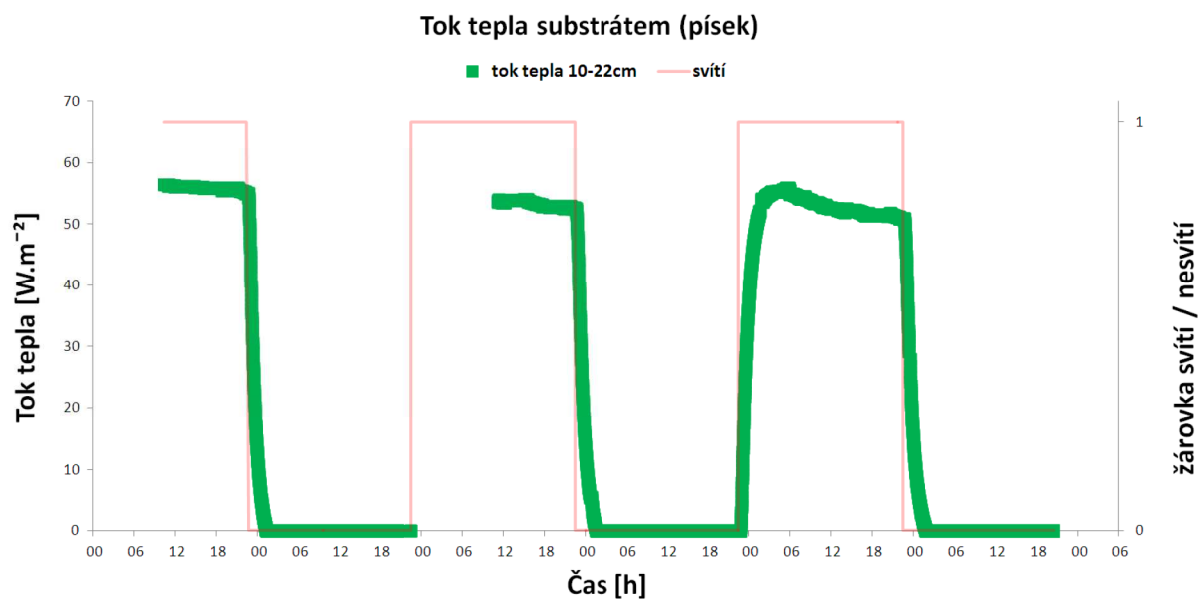
graf 4 Tok tepla substrátem (rašelina), měřeno samokalibrovatelným čidlem tepelného toku HFP-01SC s jeho základní citlivostí, tj. bez korekce samokalibrací v hloubce 16 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



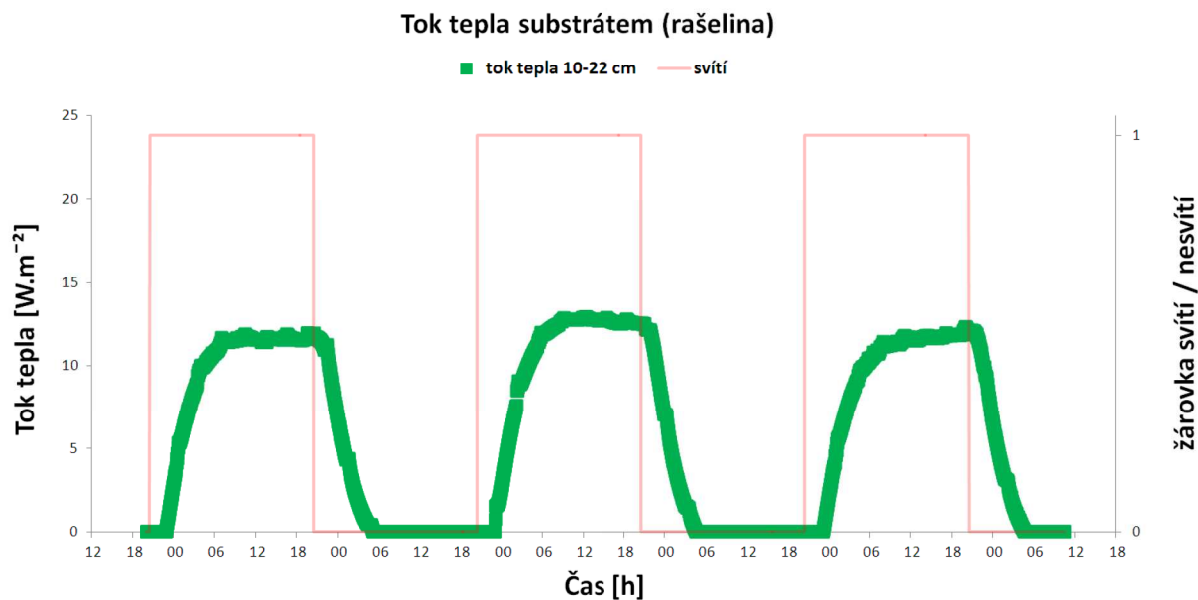
graf 5 Porovnání toku tepla substrátem (písek), vypočítáno dle vztahu č. 7 za použití teplot měřených čidly Pt100 v hloubkách 10 cm a 16 cm, 16 cm a 22 cm, 10 cm a 22 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



graf 6 Porovnání toku tepla substrátem (rašelina), vypočítáno dle vztahu č. 7 za použití teplot měřených čidly Pt100 v hloubkách 10 cm a 16 cm, 16 cm a 22 cm, 10 cm a 22 cm nad dnem nádoby substrátu. Červená čára značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



graf 7 Tok tepla substrátem (písek), vypočítaný dle vztahu č. 7 za použití teplot měřených čidly Pt100 v hloubkách 10 cm a 22 cm nad dnem nádoby substrátu. Toto měření je nejbližší měření čidlem HFP 01-SC (viz. graf č. 1). Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.



graf 8 Tok tepla substrátem (rašelina), vypočítaný dle vztahu č. 7 za použití teplot měřených čidly Pt100 v hloubkách 10 cm a 22 cm nad dnem nádoby substrátu. Toto měření je nejbližší měření čidlem HFP 01-SC (viz. graf č. 2). Červená linie značí dvacetičtyřhodinový ohřev žárovkou ve třech periodách.

Hodnoty toků tepla substráty písku a rašcliny se shodují vždy při dvacetičtyřhodinovém chladnutí. Při ohřevu substrátů žárovkou byly posouzeny vždy hodnoty toku tepla a teplot v 23. hodině ohřevu, stejně byly posouzeny hodnoty toku tepla a teplot při chladnutí substrátů. Společně byly vyhodnoceny vždy hodnoty týkající se jednoho druhu substrátu (viz. Tabulka č. 4 a č. 5).

Tabulka 4 Hodnoty toku tepla naměřeny v 23. hodině prvního, druhého a třetího chladnutí byly vždy nulové a nejsou v tabulce zahrnuty. Každý sloupec zobrazuje hodnoty naměřené v 23. hodině ohřevu žárovkou. Metoda měření určuje způsob získání hodnoty v daném řádku, kde HFP 01-SC E_{sen} dle kal. značí hodnotu toku tepla získanou čidlem HFP 01-SC s funkcí samokalibrace, HFP 01-SC základní E_{sen} značí hodnotu toku tepla získanou čidlem HFP 01-SC bez funkce samokalibrace, teplotní grad. d (10 – 22 cm), (10 – 16 cm), (16 – 22 cm) značí hodnotu toku tepla získanou výpočtem ze vztahu č. 7 a teplot v hloubkách uvedených v závorce, měřeno od dna nádoby.

Metoda měření	Tok tepla substrátem (písek)		
	[W.m ⁻²]		
	1. ohřev 23h	2. ohřev 23h	3. ohřev 23h
HFP 01-SC E_{sen} dle kal.	51,85	51,86	50,00
HFP 01-SC základní E_{sen}	55,55	52,81	51,29
teplotní. grad. d (10 – 22 cm)	51,84	51,86	50,00
teplotní. grad. d (10 – 16 cm)	24,91	27,18	22,89
teplotní. grad. d (16 – 22 cm)	52,85	50,61	52,10

Tabulka 5 Hodnoty toku tepla naměřeny v 23. hodině prvního, druhého a třetího chladnutí byly vždy nulové a nejsou v tabulce zahrnuty. Každý sloupec zobrazuje hodnoty naměřené v 23. hodině ohřevu žárovkou. Metoda měření určuje způsob získání hodnoty v daném řádku, kde HFP 01-SC E_{sen} dle kal. značí hodnotu toku tepla získanou čidlem HFP 01-SC s funkcí samokalibrace, HFP 01-SC základní E_{sen} značí hodnotu toku tepla získanou čidlem HFP 01-SC bez funkce samokalibrace, teplotní grad. d (10 – 22 cm), (10 – 16 cm), (16 – 22 cm) značí hodnotu toku tepla získanou výpočtem ze vztahu č. 7 a teplot v hloubkách uvedených v závorce, měřeno od dna nádoby.

Metoda měření	Tok tepla substrátem (rašelina)		
	[W. m ⁻²]		
	1. ohřev 23 h	2. ohřev 23 h	3. ohřev 23 h
HFP 01-SC E_{sen} dle kal.	10,93	12,24	11,91
HFP 01-SC základní E_{sen}	11,55	12,54	11,88
teplotní. grad. d (10 – 22 cm)	11,55	12,54	11,87
teplotní. grad. d (10 – 16 cm)	3,66	4,20	3,71
teplotní. grad. d (16 – 22 cm)	13,62	14,60	14,90

Z tabulky č. 4 a č. 5 je zřejmá podobnost měření toku tepla čidlem HFP 01-SC s vypočítanými hodnotami toku tepla dle vztahu č. 7 z teplotního gradientu d (10 - 22 cm). Podmínkou přesnosti výpočtu toku tepla z teplotního gradientu dle vztahu č. 7 je přesné určení tepelné vodivosti λ měřeného substrátu. V praxi většinou není známa přesná tepelná vodivost λ měřeného substrátu (materiálu) a za vodivost dosazujeme přibližné hodnoty z tabulek (viz. Tabulka č. 1).

Při porovnání hodnot toků tepla φ obou substrátů měřených čidlem HFP 01-SC s použitím funkce samokalibrace a bez použití funkce samokalibrace jsou zřejmé rozdíly, v průměru 3,85 % u písku a v průměru 2,62 % u rašeliny, které potvrzují očekávanou zvýšenou přesnost měření za použití funkce samokalibrace. Blízká podobnost rozdílů při měření toku tepla φ v substrátech s odlišnými fyzikálními vlastnostmi potvrzuje použitelnost čidla HFP 01-SC v různých materiálech s odlišnými vlastnostmi.

6 Diskuze

Pro ověření měření toku tepla byly vybrány substráty s rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Rašelina je organický substrát s nedokonalé rozložitelnými zbytky rostlin. V převážné většině obsahuje organické látky (celulózu), organické kyseliny [9], 20 – 30 % organického uhlíku a má schopnost zadržovat vodu. Má výrazně nižší tepelnou vodivost λ než písek (viz. tabulka č. 1). Během měření toku tepla vznikla na rašelině suchá vrstva cca 3 cm silná, která se oddělila od svého podloží vlhké rašeliny v celé výšce s rozdílem vlhkosti 0,1 % (viz. tabulka č. 3). Naproti tomu písek je minerální substrát o různé zrnitosti a struktuře. Jednotlivá zrna písku velmi snadno vedou teplo do spodních vrstev. V měření byl použit čistý s minimálním obsahem organické hmoty.

Pro běžné dlouhodobé měření tepelného toku v materiálech např. ve stavebnictví zdi domů apod. může zcela jistě dostačovat aplikace teplotních čidel Pt100 s pořizovací cenou cca 600 Kč (ceny r. 2012) za kus. Pokud se tato čidla umístí ve vzdálenostech o známé velikosti, výpočtem dle vztahu č. 7 lze získat výsledky omezené vlastnostmi čidel Pt100 (dle normy ČSN EN 60751 [10]) v aplikacích kdy nedochází k výrazným změnám tepelné vodivosti např. změnou vlhkosti materiálu (substrátu), struktury, pórovitosti apod. Výrobce (HFP 01-SC) Hukseflux, Holandsko nabízí čidla ve dvou variantách: (1) bez funkce samokalibrace (viz. příloha č. 2), s cenou za kus pohybující se okolo cca 8000 Kč (ceny r. 2012), může být ekonomicky přijatelnější a (2) ve variantě s samokalibrací. V porovnání s variantou (2) HFP 01-SC (viz. příloha č. 1), která se pohybuje okolo cca 16000 Kč (ceny r. 2012). Čidlo HFP 01-SC je schopno měřit přesněji díky své citlivosti upravované funkcí samokalibrace. Toto lze s výhodou použít při potřebě přesných měření, například v podmínkách výrazně se měnící tepelné vodivosti (změna vlhkosti, kolísání vodní hladiny). V neposlední řadě se nabízí možnost získávat za pomoci čidla HFP 01-SC hodnoty z kterých lze následně určit tepelnou vodivost λ odpovídající konkrétním fyzikálním vlastnostem měřeného materiálu.

Samokalibrovatelné čidlo HFP 01-SC se osvědčilo v měření toku tepla substrátem, za poměrně stabilních podmínek, kdy došlo k zpřesnění měření s funkcí samokalibrace. Rozdíl mezi měřením s kalibrací a bez kalibrace: v průměru 3,8 % s směrodatnou odchylkou $\pm 2,3$ % u substrátu písku a v průměru 2,6 % s směrodatnou odchylkou $\pm 2,4$ % u substrátu rašeliny. Uvedené zpřesnění je v podmínkách, kdy prakticky nedocházelo k změně vlhkosti substrátu. Naproti tomu v podmínkách s kolísavou vlhkostí, by zpřesnění dosahovalo desítky procent (až 20 %). Čidlo HFP 01-SC se používá zejména při měření toku tepla do půdy ve studiích zabývajících se energetickou bilancí porostů rostlin [13]. Porovnávací metoda s Pt100 je přesná pokud nedochází ke změně vlastností (tepelná vodivost viz. tabulka č. 1). Tuto metodu nelze doporučit tam, kde dochází ke změně tepelné vodivosti. Je vhodné stanovit tepelnou vodivost pro různé stupně vlhkosti.

[13]

7 Závěr

Použití samokalibrovatelných čidel je velmi jednoduché, nenáročné na manipulaci a vhodné pro substráty kde dochází k výrazným změnám tepelné vodivosti. Funkce samokalibrace zpřesnila o 3,8 % se směrodatnou odchylkou $\pm 2,3$ % měření toku tepla písku a o 2,6 % s směrodatnou odchylkou 2,4 % měření toku tepla rašeliny.

Srovnání s měřením toku tepla metodou teplotních gradientů bylo v případě substrátů, kde nedochází k změnám vlhkosti velmi dobré. Tato metoda není vhodná pro materiály, kde dochází k častým změnám tepelné vodivosti, kde je potřeba znát tepelnou vodivost substrátu (tabulka č. 1) a vzdálenost mezi čidly. Metoda teplotních gradientů je cenově dostupnější než použití čidla HFP 01 s samokalibrací nebo bez samokalibrace.

Při použití nepřesných hodnot tepelné vodivosti je v případě metody teplotních gradientů výsledná tepelná vodivost zatížena velkou chybou (řádově desítky procent).

8 Použitá literatura

- [1] BROŽ, J. a kol. Základy fyzikálních měření. Praha: SPN 1983, str. 180-185 MULLER, W.
- [2] HORÁK, Z., KRUPKA, F. Fyzika. Praha: SNTL 1981
- [3] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠINDELÁŘ, V. Základy technické fyziky. Praha: Práce - vydavatelstvo ROH 1954
- [4] SAZIMA, M., KMONÍČEK, V., SCHNELLER, J. a kol. Teplo. Praha: SNTL, 1989, str. 119-123
- [5] FAROUKI, O.T., 1986: *Thermal Properties of Soils*. Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11, Trans Tech, 136 pp.
- [6] DRBAL, J. Meliorační pedologie. Praha: VŠZ, 1969
- [7] GEIGER, R., ARON, R.H., TODHUNTER, P. The Climate Near the Ground. Rowman & Littlefield Publishers, INC, USA 2003
- [8] ČSN CEN ISO/TS 17892 – 1 Část 1: Stanovení vlhkosti zemin. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [9] HUKSEFLUX Application and specification of heat flux sensors. Version 9904. Holandsko: Hukseflux Thermal Sensors <http://www.hukseflux.com>
- [10] <http://cs.wikipedia.org/wiki/konstantan>
- [11] ČSN EN 60751 Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové snímače teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [12] <http://cs.wikipedia.org/wiki/raselina>
- [13] DYKYJOVÁ, D. a kol. Metody studia ekosystému. Praha: Academia 1989 str. 81-82 Prokop, M.

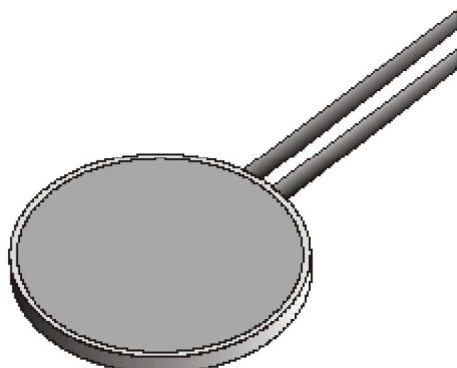


Figure 1 HFP01SC outlook

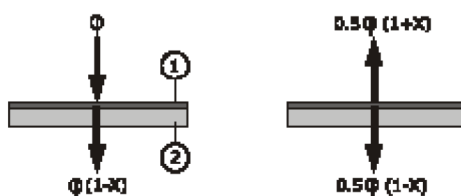


Figure 2 Explanation of the self-calibrating principle: On the left the normal situation with a heat flux ϕ . On the right, the film heater that is mounted on top (1) is activated to generate a well known heat flux ϕ . The response of the heat flux sensor is measured. In the ideal situation 50% of the generated flux ϕ would pass through the plate (typically 150 W/m^2). In case of non matching thermal conductivities, a deviation (X) will occur. The essence of this approach is that the flow is divided in an upward flow through undisturbed medium ($1+X$) and a downward flow through the heat flux sensor (a disturbance) plus underlying medium. The $(1-X)$ signal level however, still represents a 0.5ϕ heat flux level of the normal situation of the picture on the left.

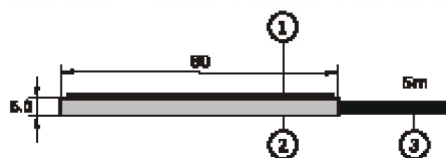


Figure 3 HFP01SC dimensions in mm: heater (1) heat flux sensor body (2), cable (3)

HFP01SC SELF-CALIBRATING HEAT FLUX SENSOR™

The HFP01SC self-calibrating heat flux sensor™ is a sensor intended for high accuracy measurement of soil heat flux. Also it offers improved quality assurance of the measurement. The on-line calibration (the Van den Bos-Hoeksema method) automatically corrects for various common errors, in particular those due to the non-perfect matching of the thermal conductivity of sensor and soil, and due to variations of the thermal conductivity of the soil caused by varying moisture content.

HFP01SC is a combination of a heat flux sensor and a film heater. The primary purpose is to estimate the heat flux through the surrounding soil. The HFP01SC output is a voltage signal that is proportional heat flux through the sensor. The film heater that is mounted on top can be activated to perform a calibration (see figure 2), resulting in a new calibration factor that compensates for the errors made under the circumstances of that moment. Implicitly also cable connection, data acquisition and data processing are tested. Also errors due to temperature dependence and instability of the sensor are eliminated. The result is a much improved accuracy & quality assurance of the measurement (relative to conventional models such as model HFP01).

A typical measurement location is equipped with 2 sensors for good spatial averaging. The product manual can be obtained via e-mail. Programs for the Campbell Scientific CR10X and CR1000 are available.

SUGGESTED USE

- Scientific measurement of soil heat flux.

HEAT FLUX SENSOR SPECIFICATIONS

Sensitivity (nominal):	50 $\mu\text{V/Wm}^2$
Resistance (nominal):	2 Ω
Temperature range:	-30 to +70 $^{\circ}\text{C}$
Expected accuracy:	+/- 3%

FILM HEATER SPECIFICATIONS

Resistance (nominal):	100 Ω
Voltage input/output:	9-15 VDC/ 0-2VDC
Duration of calibration:	± 3 min at 1.5 Watt, typically every 3 or 6 hours
Average power consumption:	0.02 or 0.04 Watt

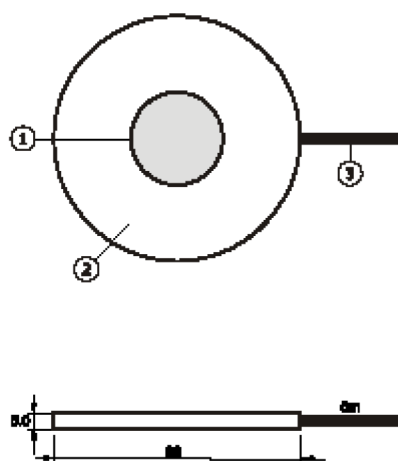


Figure 1
 HFP01 heat flux plate dimensions:
 (1) sensor area, (2) guard of ceramics-plastic composite, (3) cable, standard length is 5 m.
 All dimensions are in mm.

HFP01
 HEAT FLUX PLATE/ HEAT FLUX SENSOR

HFP01 is the world's most popular sensor for heat flux measurement in the soil as well as through walls and building envelopes. By using a ceramics-plastic composite body the total thermal resistance is kept small.

INTRODUCTION

HFP01 serves to measure the heat that flows through the object in which it is incorporated or on which it is mounted. The actual sensor in HFP01 is a thermopile. This thermopile measures the differential temperature across the ceramics-plastic composite body of HFP01. Working completely passive, HFP01 generates a small output voltage proportional to the local heat flux. Using HFP01 is easy. For readout one only needs an accurate voltmeter that works in the millivolt range. To calculate the heat flux, the voltage must be divided by the sensitivity; a constant that is supplied with each individual instrument. HFP01 can be used for in-situ measurement of building envelope thermal resistance (R-value) and thermal transmittance (H-value) according to ISO 9869, ASTM C1046 and ASTM 1155 standards.

Traceability of calibration is to the "guarded hot plate" of National Physical Laboratory (NPL) of the UK, according to ISO 8302 and ASTM C177. A typical measurement location is equipped with 2 sensors for good spatial averaging. If necessary two sensors can be put in series, creating a single output signal.

If measuring in soil, in case a more accurate measurement is needed, the model HFP01SC should be considered. If measuring on glass, the PU-series should be considered. See also models HFP03 and the PU series.

MORE INFORMATION / OPTIONS

Additional cable length x metres (add to 5m),
 AC100 amplifier, LI 19 hand held readout

HFP01 SPECIFICATIONS

Sensitivity (nominal):	50 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$
Temperature range:	-30 to +70 $^{\circ}\text{C}$
Sensor thermal resistance:	$< 6.25 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$
Range :	+2000 to -2000 Wm^2
Calibration traceability:	NPL, ISO 8302 / ASTM C177
Expected typical accuracy: (12hr totals)	within +5/- 15% in most common soils, within +5/- 5% on walls

11 Příloha 3



Hukseflux Thermal Sensors B.V.

URL: www.hukseflux.com

E-mail: info@hukseflux.com

The Netherlands

Certificate of calibration

Type: HFP01SC-05
Serial number: 2791

Calibration Date: 14-02-2012
Performed By: Ruben MAESSEN
Sensitivity: 65.7 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
 R_{self} : 98.8 Ω
Remarks:

Performed By: Ruben MAESSEN

Connections

White thermopile +
Green thermopile -

Brown Heater
Green Heater

A_{self} 0.003885 m^2

Calculation of the valid sensitivity during field measurement, is done using the following formula:

$$E_{\text{sen}} = 2 * [V_{\text{sen}}(0) - V_{\text{sen}}(180)] * (R^2_{\text{cur}} * A_{\text{self}}) / (V^2_{\text{cur}} * R_{\text{self}}).$$

See the HFP01SC manual for further comments

Traceability of calibration is to the "guarded hot plate" of National Physical Laboratory (NPL) of the UK. Applicable standards are ISO 8302 (EN 12664:2001) and ASTM C177.



Reflektorové R80/90/95/125

Reflector 60W E27 230V NR80 25D 1CT

Standardní reflektorové žárovky s vnitřním kruhovým hliníkovým zrcadlem umístěným za vláknem

Údaje o produktu

• Obecná informace

Patice	E27
Provedení baňky	NR80 [NR 80mm]
Finální úprava baňky	Matná
Poloha svícení	Univerzální [Univerzální]
Průměrná životnost	1000 hr

• Světelná charakteristika

Vyzařovací úhel	25 D
Tech parametry úhlu vyzařování	25 D
Intenzita světla	1000 (max) cd
Index podání barev	100 Ra8

• Elektrické údaje

Příkon zdroje	60 W
Napětí	230 V
Stmívatelný	Ano

• Rozměry produktu

Čalková délka C	116 (max) mm
-----------------	--------------

Rozměry D

80 mm

• Produktová informace

Objednávkové číslo	065810 78
Kód produktu	871150006581078
Název produktu	Reflector 60W E27 230V NR80 25D 1CT
Název objednávaného produktu N	Ref 60W E27 230V NR80 25D 1CT/30
Pocet kusů v balení N	1
Balici množství	30
Pocet balení v transportním balení	30
EAN produktu	8711500065810
EAN transportního balení	8711500368959
wop_12nc	923331044253
ILCOS kód N	IRR/F-60-230-E27-80/25
Hmotnost produktu	40.900 gr

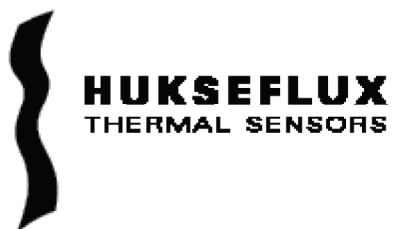
Rozměrové výkresy

PHILIPS
sense and simplicity

13 Příloha 5

CD obsahující:

1. Bakalářskou práci: Experimentální stanovení toku tepla půdou nebo umělým substrátem pomocí čidla HFP01-SC
2. Příloha 5: Application and specification of heat flux sensors. Version 9904. [9]



**APPLICATION AND SPECIFICATION
OF HEAT FLUX SENSORS**

Version 9904

Edited & Copyright by:

Hukseflux Thermal Sensors
<http://www.hukseflux.com>
P.O. BOX 2816
NL 2601 CV Delft
The Netherlands
e-mail: info@hukseflux.com

Contents

List of symbols	2
Introduction	3
1 General theory	6
1.1 <i>Frequent applications of Heat Flux Sensors</i>	6
1.1.1 Measuring conductive heat flow	6
1.1.2 Measuring radiation	6
1.2 <i>Special Heat Flux Sensor designs</i>	7
2 The Heat Flux Sensor	8
2.1 <i>Heat Flux Sensor properties</i>	8
2.2 <i>Sensor related error sources</i>	9
2.2.1 Dynamic effects	9
2.2.2 Sensitivity to lateral heat flux	10
3 The application of Heat Flux Sensors	10
3.1 <i>Application related error sources</i>	10
3.1.1 Traceability; application versus specification	10
3.1.2 Distortion of the original thermal phenomenon	11
3.1.3 Data acquisition	12
3.2 <i>Measuring soil heat flux</i>	12
3.2.1 Conventional methods	12
3.2.2 Using temperature difference sensors	12
3.2.3 Using self-calibrating heat flux plates	13
3.3 <i>Measuring heat flux in walls</i>	14
3.4 <i>Measuring heat exchange of human beings</i>	14
4 The calibration of Heat Flux Sensors	14
5 Quality assurance of the heat flux measurement	15
6 Conclusions	16
7 References	16

Using Hukseflux sensor type HFP01 please read: 1.1.1., 3.1, 3.2 and 3.3

Using Hukseflux sensor type UT03 please read: 1.1.1., 3.1, 3.2, 3.3 and 3.4

Using Hukseflux sensor type HFP01-SC please read: 1.1.1., 3.1, 3.2 and 3.5

Using Hukseflux calibration facility HFCAL please read: 4

List of symbols

Thermal resistance	R	K/W
Heat capacity	C	J/K
Response time	T	s
Thickness	d	m
Thermal conductivity	λ	W/mK
Surface area	A	m ²
Density	ρ	Kg/m ³
Specific heat capacity	C _p	J.m ² /K.Kg
Voltage output	U	V
Sensitivity	E	V.m ² /W
Time	t	s
Temperature	T	K
Heat Flux	λ	W/m ²
Dynamic temperature offset	D	W/m ²
Electrical resistance	R _e	Ω
<i>Subscripts</i>		
Property of Heat Flux Sensor	sen	
Condition during calibration	cal	
Property of the film heater for self test	self	
Property of the current sensing resistor	cur	

Introduction

In many physical phenomena heat is exchanged. Everyday examples are buildings cooling down by cold wind and solar radiation heating a solar collector. Knowing the heat flow, one can analyse insulation of buildings and the efficiency of solar collectors.

Heat Flux Sensors are meant for measuring heat flows.

As such they are used in studies of thermal phenomena like the ones mentioned above.

Alternatively Heat Flux Sensors can be incorporated in measurement equipment as a sensor, for example to measure radiation.

Figure 1 shows the general characteristics of a Heat Flux Sensor.

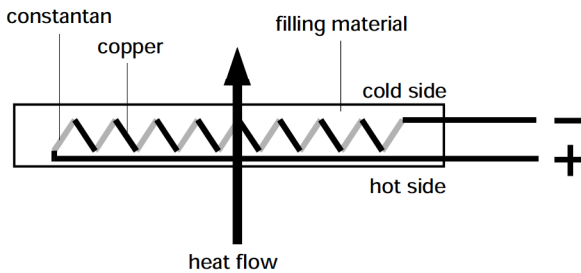


Figure 1 General characteristics of a Heat Flux Sensor. When heat is flowing through the sensor in the indicated direction, the filling material will act as a thermal resistance. Consequently the heat flow, ϕ , will go together with a temperature gradient across the sensor, flowing from the hot to the cold side. The majority of Heat Flux Sensors is based on a thermopile; a number of thermocouples connected in series. A single thermocouple will generate an output voltage that is proportional to the temperature difference between the joints (copper-constantan and constantan-copper). This temperature difference is, provided that errors are avoided, proportional to the heat flux, depending only on the thickness and the thermal conductivity of the sensor. Using more thermocouples in series, will enhance the output signal. In the picture the joints of a copper-constantan thermopile are alternatively placed on the hot- and the cold side of the sensor. The thermopile is embedded in a filling material, usually a plastic.

Each individual sensor will have its own sensitivity, E_{sen} usually expressed in Volts output, V_{sen} per Watt per square metre heat flux, ϕ . The flux is calculated $\phi = V_{sen} / E_{sen}$.

Heat Flux Sensors have been used since the fifties, and have proven to be very well applicable. There is a great diversity of fields of application; the scientific disciplines of building physics, agricultural meteorology and medicine are major users of Heat Flux Sensors.

Essentially, Heat Flux Sensors are very sensitive temperature difference sensors. Differences of less than 0.001 degree Celsius can easily be detected.

It has however to be acknowledged that the behaviour of Heat Flux Sensors is more complex than it seems. As a result measurement results are often misinterpreted.

Causes for this misinterpretation are error sources related to both the sensor and to the application.

This paper gives background information on Heat Flux Sensors and their application. It concentrates on the application for measurement of conductive heat fluxes in soil and in walls. As a conclusion it proposes a set of specifications that should be watched when choosing a sensor for a particular application.

Chapter 1 will give general theory, chapter 2 will treat sensor related properties and sensor related error sources.

In chapter 3 the physics and error sources of particular applications are addressed. Chapter 4 treats the subject of calibration. The quality assurance of the measurement is discussed in chapter 5 and the resulting conclusions are listed in chapter 6.

1 General theory

1.1 Frequent applications of Heat Flux Sensors

The two major applications of Heat Flux Sensors are measuring conductive heat flows and measuring radiation.

A few cases are known of Heat Flux Sensors being used for different purposes. Incorporated in measurement equipment they are used for determining mass flow of gasses, thermal conductivity of gasses, liquids and solids and hydration heat of materials.

1.1.1 Measuring conductive heat flow

Used as a sensor for measuring conductive heat flow, expressed in Watts per square metre, the sensor is simply mounted on or in the object of interest. (see figure 2). Mounted on top of an object, the sensor will also measure heat that is transferred by convection. At the sensor surface, the convective heat is transformed into conductive heat.

Frequent applications include the measurement of heat flows through walls in studies of building physics, heat flows through soils in climatological studies, and heat flows through human skin for medical studies and tests of insulation of clothing and suits. These three applications are treated below.

In the following paragraphs of this paper, under chapter 3, the same applications are again treated in more depth, specifically focusing on the role of the Heat Flux Sensor.

In building physics, a frequently occurring measurement is that of the U-value of walls. This factor contains information on the insulation of the wall. This result is obtained from long term monitoring of inside- and outside air temperature and of the heat flux.

Heat flux measurements are also used in building climate control. Knowing the heat flux through a wall, a temperature change in a room can be anticipated. This can make the control more efficient, saving energy.

In climatological studies, the measurement of heat flux through soils is used to determine evaporation of water. Besides the heat flux data,

the estimation of evaporation also requires data on solar radiation, wind speed and temperature. The estimation is used for scheduling irrigation in agriculture. This generally serves to give crops sufficient water, which is of major importance in areas where water is scarce.

In medical applications, heat exchange of human beings can be studied using Heat Flux Sensors. This information can be of use in diagnostics. Also insulation of clothing can be assessed. This is often done when designing clothing for arctic or desert environments or insulating suits for diving.

1.1.2 Measuring radiation

Apart from measuring conductive fluxes, which was done in the applications mentioned in 1.1.1, Heat Flux Sensors are often used for measuring radiation. This is not the main subject of this paper, and this application is only treated in this paragraph.

When using Heat Flux Sensors for radiation detection, one should be aware of the fact that a sensor that is mounted on the outside of an object is always, whether or not on purpose, detecting both convective and radiative fluxes.

The spectral properties are determined by the outer sensor surface.

In order to act as a radiation sensor only, the Heat Flux Sensor is provided with an absorbent coating, and is mounted on a heat sink. (see figure 3). The coating will transform radiation into a heat flux. The coating, possibly in combination with a filter, should have the right spectral properties for the specific radiation that one wants to detect.

In order to eliminate sensitivity to convective fluxes, construction should be such that convective losses are negligible. This can be achieved by creating an environment without convection, and by keeping the sensor as close as possible to ambient air temperature. Whenever the sensor temperature differs from ambient air temperature, this will cause thermal convection.

Advantages of using Heat Flux Sensors as radiation sensors are the possibilities of detecting within a broad spectral range, from UV to the Far Infra Red, and of having a large dynamic range, from weak to strong radiation intensities.

Applications are found in laser power measurement, solar energy measurement, pyrometry and burglar alarms.

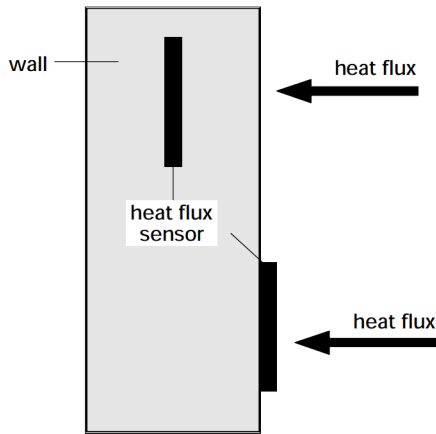


Figure 2 Estimation of conductive heat flux. The Heat Flux Sensor is simply mounted on or in the object of interest.

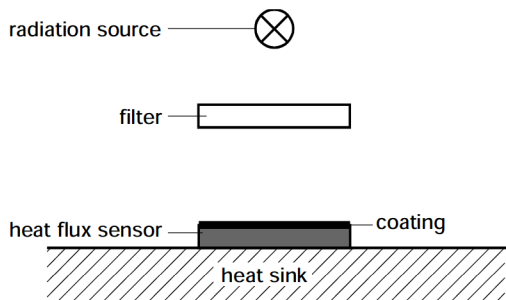


Figure 3 Heat Flux Sensor being used as a radiation sensor. The sensor is provided with a radiation absorbent coating and is mounted on a heat sink. Sometimes spectrally selective filters are used to get the total spectral properties right.

1.2 Special Heat Flux Sensor designs

In the application of measuring soil heat flux, conventional Heat Flux Sensors are not very reliable. This has to do with the fact that thermal parameters of soil are constantly changing by absorption and subsequent evaporation of water. In other applications, like building physics, the accuracy of conventional sensors is judged to be insufficient.

In some testing applications where one works with human beings, an on-line test of sensor performance is useful.

An alternative way of dealing with these problems is the use of so-called "self-calibrating heat flux plates". The working principle of this kind of sensor is described in figure 4. These sensors essentially will give an indication of the quality of

the measurement, and will show a deviation from the ideal behaviour if either the contact with the surrounding environment is lost or if the thermal properties of the sensor and the surrounding environment do not match any longer. An additional advantage is that a self test heat flux plate can easily be recalibrated by the user, only requirements are a metal block, a voltage source and a 2-channel Voltage measurement.

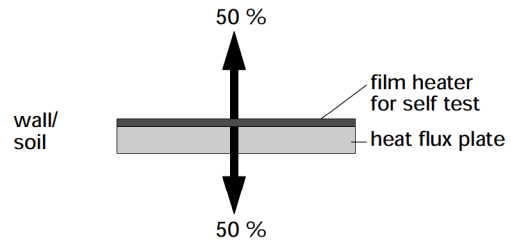


Figure 4 Self-calibrating heat flux plate. On top of a conventional heat flux sensor, a film resistor is mounted. In the ideal case, the heat that is generated by the film resistor will be equally divided between the up- and down direction. The artificially generated heat flux is known, and the heat flux sensor output should indicate 50% of this. If the output deviates from the predicted value, either the thermal contact is disturbed, or the thermal properties of the sensor and the surrounding medium do not sufficiently match. Main applications of self-calibrating heat flux plates are the measurement of soil heat flux, testing of clothing and suits, and heat flux in walls.

For constructing radiation sensors sometimes laterally sensitive Heat Flux Sensors are used. These have the advantage that the mass can be made very low, so that sensors with rapid response times can be constructed.

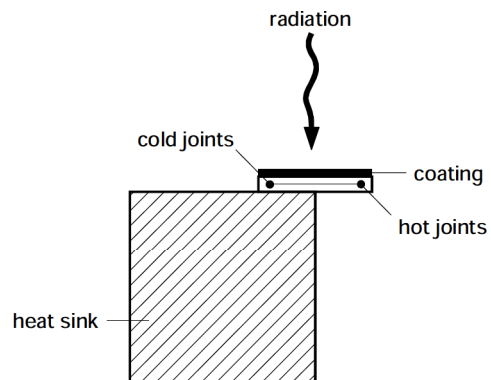


Figure 5 Radiation sensor. The sensor consists of a Heat Flux Sensor with lateral sensitivity, that is mounted on a heat sink.

2 The Heat Flux Sensor

In paragraph 2.1 the sensor properties are treated. These are roughly determined by the dimensions, the material properties of the filling material and by the electrical characteristics of the thermocouples.

Apart from these "ideal" specifications there are various error sources that are specifically caused by sensor shortcomings. Two major sources are the sensor "mass", resulting in dynamic errors, and the sensor layout, possibly resulting in sensitivity to lateral fluxes. The topic of sensor related error sources is addressed in paragraph 2.2.

Error sources that are related to the application are treated in chapter 3.

2.1 Heat Flux Sensor properties

A Heat Flux Sensor should measure the local heat flux in one direction. The result is expressed in Watts per square metre. The calculation is done according to formula 1.

$$\varphi = V_{\text{sen}} / E_{\text{sen}} \quad (1)$$

As shown before in figure 1, Heat Flux Sensors generally have the shape of a flat plate and a sensitivity in the direction perpendicular to the sensor surface.

Usually thermopiles are used. General advantages of thermopiles are their stability, low ohmic value (which implies little pickup of electromagnetic disturbances), good signal-noise ratio and the fact that zero input gives zero output. Disadvantageous is the low sensitivity.

For better understanding of Heat Flux Sensor behaviour, it can be modeled as a simple electrical circuit consisting of a resistance, R, and a capacitor, C.

In this way it can be seen that one can attribute a thermal resistance R_{sen} , a thermal capacity C_{sen} and also a response time T_{sen} to the sensor. Usually, the thermal resistance and the thermal capacity of the entire Heat Flux Sensor are equal to those of the filling material.

$$T_{\text{sen}} = R_{\text{sen}} \cdot C_{\text{sen}} = d^2 \cdot \rho \cdot C_p / \lambda \quad (2)$$

In which d is the sensor thickness, ρ the density, C_p the specific heat capacity and λ the thermal conductivity.

From 2 one can conclude that material properties of the filling material and dimensions are determining the response time.

As a rule of thumb, the response time is proportional to the thickness to the power of two.

Other parameters that are determining sensor properties are the electrical characteristics of the thermocouple.

The temperature dependence of the thermocouple causes the temperature dependence and the non-linearity of the Heat Flux Sensor. The non linearity at a certain temperature is in fact the derivative of the temperature dependence at that temperature.

However, a well designed sensor may have a lower temperature dependence and better linearity than expected. There are two ways of achieving this:

As a first possibility, the thermal dependence of conductivity of the filling material and of the thermocouple material can be used to counterbalance the temperature dependence of the voltage that is generated by the thermopile. Another possibility to minimise the temperature dependence of a Heat Flux Sensor, is to use a resistance network with an incorporated thermistor. The temperature dependence of the thermistor will balance the temperature dependence of the thermopile.

Another factor that determines Heat Flux sensor behaviour, is the construction of the sensor. In particular some designs have a strongly non-uniform sensitivity. Others even exhibit a sensitivity to lateral fluxes. The sensor in figure 1 would for example also be sensitive to heat flows from left to right.

This type of behaviour will not cause problems as long as fluxes are uniform and in one direction only.

To promote uniformity of sensitivity, a so-called sandwich construction as shown in figure 6 can be used. The purpose of the plates, which have a high conductivity, is to promote the transport of heat across the whole sensitive surface.

It is difficult to quantify non-uniformity and sensitivity to lateral fluxes. Some sensors are equipped with an extra electrical lead, splitting the sensor into two parts. If during application, there is non-uniform behaviour of the sensor or the flux, this will result in different outputs of the two parts.

Finally there is the question of stability. Material properties of the filling material and the thermopile will largely determine this. Generally, stability will have to be proven empirically, by doing repeated calibrations.

Summarising: The intrinsic specifications that can be attributed to Heat Flux Sensors are thermal conductivity, total thermal resistance, heat capacity, response time, non linearity, stability, temperature dependence of sensitivity, uniformity of sensitivity and sensitivity to lateral fluxes. For the latter two specifications, a good method for quantification is not known.

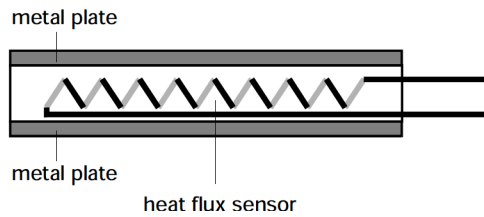


Figure 6 Sandwich construction. In order to promote uniformity of sensitivity and to minimise sensitivity to lateral fluxes, some Heat Flux Sensors are placed in a sandwich between two plates of high thermal conductivity.

2.2 Sensor related error sources

The interpretation of measurement results of Heat Flux Sensors is often done assuming that the phenomenon that is studied, is quasi-static and taking place in a direction transversal to the sensor surface.

Dynamic effects and lateral fluxes are possible error sources.

2.2.1 Dynamic effects

The assumption that conditions are quasi-static should be related to the response time of the detector.

The case that the Heat Flux Sensor is used as a radiation detector (see figure 3) will serve to illustrate the effect of changing fluxes. Assuming that the cold joints of the sensor are at a constant temperature, and an energy flows from $t > 0$, the sensor response is

$$U = E \cdot (1 - e^{-t/T_{sen}}) \quad (3)$$

This shows that one should expect a false reading during a period that equals several response times, T_{sen} . Generally Heat Flux Sensors are quite

slow, and will need several minutes to reach 95% response. This is the reason why one prefers to work with values that are integrated over a long period; during this period the sensor signal will go up and down. The assumption is that errors due to long response times will cancel. The upgoing signal will give an error, the downgoing signal will produce an equally large error with a different sign. It is obvious that this will only be valid if periods with stable heat flow prevail.

In order to avoid errors caused by long response times, one should use sensors with low value of $R_{sen} \cdot C_{sen}$ (see formula 2). In other words: sensors with low mass or small thickness.

Equation 3 holds as long as the cold joints are at a constant temperature. An unexpected result shows when the temperature of the sensor changes.

Assuming that the sensor temperature starts changing at the cold joints, at a rate of $\delta T/\delta t$, starting at $t=0$, T_{sen} is the sensor response time, the reaction to this is:

$$U = E \cdot \{ \delta T/\delta t \cdot t - \delta T/\delta t \cdot T_{sen} \cdot (1 - e^{-t/T_{sen}}) \} \quad (4)$$

The term $-\delta T/\delta t \cdot T_{sen}$ can be considered to be an offset. It has to do with the fact that the sensor itself takes up energy when its temperature rises.

$$D = \delta T/\delta t \cdot R \cdot C \quad (5)$$

In the output signal the dynamic temperature offset, D , is not easily detected because it stabilises at a constant level if $\delta T/\delta t$ is constant.

The offset will be at worst when the sensor changes temperature quickly and with sensors with high resistance and high heat capacity. These dynamic temperature offsets can be avoided by using low mass Heat Flux Sensors, or stable heat sinks. Another possibility, seen in radiation sensors, is to use a compensation sensor that is exposed to the same temperature changes, but not to radiation. This compensation sensor is electrically connected in anti-series. In other measurement equipment, like thermal flow sensors, the same effect is achieved by using a symmetrical buildup. In case of a temperature change, energy will flow to both sides of the sensor at the same rate, resulting in a negligible offset.

Whether or not dynamic temperature offsets are significant in a certain application, can be estimated by comparing D of formula 5 with the occurring fluxes.

Although the case that is presented here is a single one (the sensor is mounted as in figure 3),

the point is that in all applications of Heat Flux Sensors, errors will occur due to slow response times and dynamic temperature offsets. The analysis of both the step response and the reaction to temperature changes show that, when this is possible, sensors with low mass are to be preferred.

2.2.2 Sensitivity to lateral heat flux

Using Heat Flux Sensors, it is silently assumed that heat flux is uniform and flowing perpendicular to the surface of the sensor. An exception to the rule is mentioned in paragraph 1.2. It follows that errors are made when sensors are sensitive to lateral heat fluxes or when heat is flowing in another direction. The problem of the sensor's sensitivity to lateral fluxes has been addressed in chapter 2.1. Lateral heat flux should be avoided as much as possible by choosing the right experimental setup.

3 The application of Heat Flux Sensors

Choosing a sensor for a particular application, first of all one has to consider practical things such as size, operating temperature and sensitivity. A second consideration is that the measurement should be correct. Apart from the sensor, which is treated in chapter 2, the measurement-setup or application also contains possible error sources. Assuming that the Heat Flux Sensor is applied for measuring conductive fluxes, errors can be caused by the fact that the sensor either is not calibrated under the right conditions or significantly influences the undisturbed thermal phenomenon. A third error source is the data acquisition. The paragraphs under 3.1 will treat these application related error sources. Paragraph 3.2 will focus on application for measuring soil heat flux, 3.2 will treat measurement of heat flux in walls, paragraph 3.3 will deal with measuring heat exchange of human beings.

3.1 Application related error sources

3.1.1 Traceability; application versus specification

With any sensor one can distinguish between sensor specifications and application related specifications. The overall measurement accuracy is affected by both.

As an example: A sensor has been calibrated at 20 °C, resulting in a sensitivity of 10 $\mu\text{V}\text{m}^2/\text{W}$. Working at 120°C it will have a different sensitivity. When the sensor specification of temperature dependence of sensitivity is 0.1 %/°C, the sensitivity will be 11 $\mu\text{V}\text{m}^2/\text{W}$. The conclusion is that the sensitivity has to be corrected under conditions that differ from the circumstances during calibration.

Calibration spec	Sensor spec.	Application	Calibration correction
T= 20°C	Temp. Dep: 0.1%/°C	120°C	+ 10%
$\phi = 500 \text{ W/m}^2$	Non linearity: 0.05 %m ² /W	800 W/m ²	+ 15%
...			

Table 1 Traceability
The schedule shows how calibration can be corrected in a certain application. One needs information on the calibration, on the sensor and on the application.

3.1.2 Distortion of the original thermal phenomenon

It is obvious that there is a possibility that the sensor significantly disturbs the phenomenon that it is supposed to measure; by adding a sensor to the material under observation, one adds some extra and sometimes differing thermal resistance's, contact resistance's and spectral properties. These error sources will be treated in the following text.

Knowing that the heat flux is likely to be disturbed by the Heat Flux Sensor, the sensor should have a large surface; a small surface would show a proportionally large dependency on local conditions and of local irregularities.

As a rule, a surface area of at least $4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ is suggested.

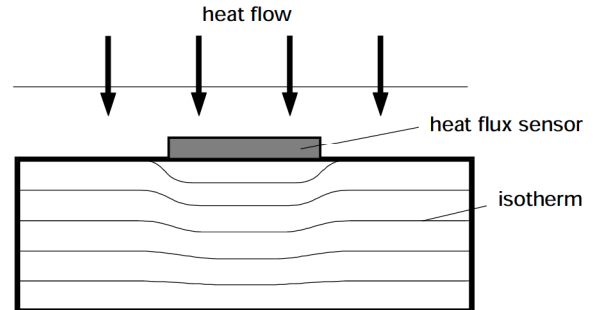
It has been shown by Van der Graaf [1] that resistance effects can be separated into two classes: a resistance error and a deflection error. (see figures 8 and 9). Both errors add.

The resistance error represents the case in which a sensor is mounted on or in an existing material. The total heat resistance changes, and therefore the heat flux is not representative any more. This error is relevant when mounting sensors on walls and on human skin. A typical value for a 10 cm insulating wall is 5%. This error can easily be calculated and corrected for. The resistance error can also be minimised by using a thin sensor.

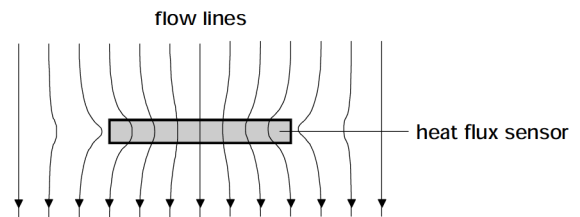
The deflection error represents the effect that as a result of differing resistance's the flow pattern will change, especially at the edges of the Heat Flux Sensor. An order of magnitude of this error for strongly different thermal conductivity's between sensor and its environment (0.6 for a typical sensor and 0.03 for an insulating wall) is 40%.

The deflection error can be minimised by using a guard, which is a non-sensitive part consisting of the same filling material, around the sensitive area. The flow pattern may be irregular at the guard. This however will not influence the measurement. At the sensitive area, the flow pattern will be improved.

In some applications, the deflection error is the largest error source. In particular this is true for measurements in soils, where the thermal properties of the medium (and with it the deflection error) are constantly changing.



*Figure 7 Resistance error
Added or less resistance will cause that less or more heat will flow through the part of the material where the sensor is mounted.*



*Figure 8 Deflection error
The heat flux is deflected at the edges of the sensor. As a result, the heat flow at the edges is not representative.*

Apart from the sensor thermal resistance, contact resistance's between sensor and surrounding material are demanding special attention. In all cases the contact between sensor and surrounding material should be as well and as stable as possible, so that it is not influencing the measurement. It should be noted that the conductivity of air is approximately 0.02 W/m.K , ten times smaller than that of the Heat Flux Sensor [3]. It follows that air gaps form major contact resistance's. Usually air gaps are filled using glues or pastes.

The aspects of differing thermal properties between sensor and its environment and contact resistance can also be dealt with during the

measurement using a "self-calibrating Heat Flux Sensor" (see 1.2 and 3.2).

Finally spectral properties of the Heat Flux Sensor can influence the measurement.

When measuring radiant heat transfer, the sensor surface should have the same absorption and reflection properties as the surface under observation. This is especially recommendable when solar radiation is involved; spectral differences of different materials are typically large in the solar range of the spectrum. Solar radiation intensities are typically large, ranging from 0 to 1300 W/m².

If no solar-, but only Far Infra Red radiation is involved, most materials and paints behave like black bodies, metals excepted. Intensities are proportional to the temperature difference between sensor surface and the object within the field of view, typically 5 W/m² per degree temperature difference. In this case the spectral properties of the sensor surface are less significant.

3.1.3 Data acquisition

Because of the low sensitivity of Heat Flux Sensors, the readout of the sensor signal is critical. Outputs of Heat Flux Sensors are generally in the 0 to 50 millivolt range.

When choosing the data acquisition equipment, one should watch the following specifications:

- Sensor output range (equals expected heat flux range multiplied by sensitivity)
- Sensor impedance
- Wiring impedance
- Readout range
- Readout temperature dependence of sensitivity
- Readout zero offset (output at short circuited input, 0 Volt)
- Readout temperature dependence of zero offset
- Readout input impedance
- Readout resolution of analog to digital conversion

The sensor output range should match the readout input range.

If one has a certain accuracy demand, this implies that readout zero offset and resolution should be an order of magnitude better than this, at all relevant temperatures.

As a rule sensor impedance should be as low as possible, to avoid pickup of electromagnetic disturbances. In most surroundings with electrical noise, one should preferably use sensors with an impedance below 500 ohms.

To avoid sensitivity loss, the input impedance of the readout equipment should be larger than the combined resistance of sensor and wiring. It is advised to use a readout device with an input impedance that is at least 1000 times higher. In this case the sensitivity will be affected less than 0.1%. A typical cable resistance is 0.1 Ω/ m.

3.2 Measuring soil heat flux

Soil heat flux is a most important parameter in agro-meteorological studies. Typically two or three sensors are buried in the ground around a meteorological station at a depth of around 4 cm below the surface. In many aspects this measurement is comparable to the measurement of heat flux in walls. (see 3.3).

The problems that are encountered in soil are threefold: First is the fact that the thermal properties of the soil are constantly changing by absorption and subsequent evaporation of water. Secondly the flow of water through the soil also represents a flow of energy, going together with a "thermal shock", which often is misinterpreted by conventional sensors. The third aspect of soil is that by the constant process of wetting and drying and by the animals living in the soil, the quality of the contact between sensor and soil is not known. The result of all this is the quality of the data in soil heat flux measurement is not under control; the measurement of soil heat flux is considered to be extremely difficult.

3.2.1 Conventional methods

Conventional methods of measuring soil heat flux simply consist of burying a conventional heat flux sensor. Apart from the defects that are described above, most conventional heat flux sensors do not have a thermal resistance that is matched to that of the soil, which causes large errors.

3.2.2 Using temperature difference sensors

A way of getting around several of the shortcomings of conventional sensors, is to do a number of temperature measurements at different levels in the soil. The advantages are evident, the disadvantages are that one needs an estimation of the thermal conductivity of the soil

at all times, an accurate positioning of the temperature sensors, and an accurate differential temperature measurement.

3.2.3 Using self-calibrating heat flux plates

A new, and probably the best solution for measuring soil heat flux with a well known level of accuracy, is to use a self-calibrating heat flux plate. This method is developed at Hukseflux.

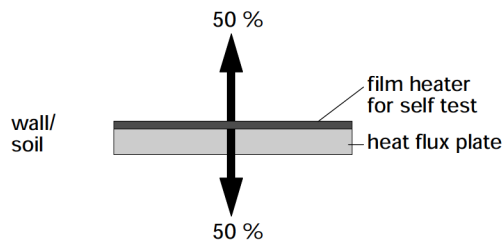


Figure 9 In the self-calibrating heat flux plate, a heater is incorporated. The reaction to a pulse in heating represents the currently valid calibration constant. This principle is valid in all environments, and eliminates errors due to the changing thermal conductivity of the environment (soil moisture), which causes the deflection error and temperature. (In reality, the heat fluxes will deviate from 50%. For calculation purposes however, the 50% -50% division remains valid. Actually, in the ideal situation 50% of the generated flux ϕ would pass through the plate (typically 150 W/m^2). In case of non matching thermal conductivities, a deviation (X) will occur. The essence of this approach is that the flow is divided in an upward flow through undisturbed medium ($1+X$) and a downward flow through the heat flux sensor (a disturbance) plus underlying medium. The difference in signal level still represents the same 0.5ϕ , automatically correcting for disturbances of the flow, and sensor instability.

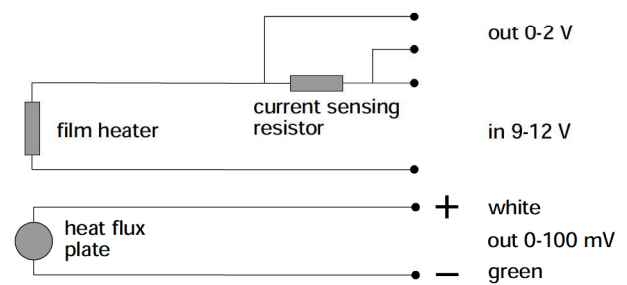


Figure 10 The electrical connection of a self-calibrating heat flux plate. The film heater for self test is attached to the heat flux sensor in order to generate a well known heat flux when this is judged to be necessary. This is done by closing a relay. The resistance of the film heater for self test, R_{self} is known, also the sensor surface, A_{sen} is known. R_{self} typically is 100Ω , A_{sen} typically is $40.71 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. The current through R_{self} is measured by doing a voltage measurement across a current sensing resistor, with a known R_{cur} . This setup is chosen to avoid errors due to variations in the supply voltage and errors by a varying length of the lead wires.

The self-calibrating possibility generally is switched on every two hours. The total self test takes about 8 minutes. During these 8 minutes, a current is lead through the film resistor for self test, in order to generate a well known heat flux. The difference in voltage output of the sensor when heating and not heating, V_{sen} , during the experiment multiplied by 2 (because only half of the flux passes the sensor) divided by the heat flux, ϕ_{sen} , is the valid sensor sensitivity, E_{sen} . Typically measurements are done at 0 and 190 seconds.

$$\phi_{sen} = (V_{cur}^2 \cdot R_{self}) / (R_{cur}^2 \cdot A_{self}) \quad (6)$$

$$V_{sen} = V_{sen}(0) - V_{sen}(190) \quad (7)$$

$$E_{sen} = 2 \cdot V_{sen} / \phi_{sen} \quad (8)$$

Concluding:

$$E_{sen} = 2 \cdot [V_{sen}(0) - V_{sen}(190)] \cdot (R_{cur}^2 \cdot A_{self}) /$$

$$(V_{cur}^2 \cdot R_{self}) \quad (9)$$

For type HFP-01 SC a A_{self} of ($d=72 \text{ mm}$), a R_{cur} of 10Ω and a R_{self} of 100Ω , $\phi_{sen} = 246 \cdot V_{cur}^2$. Please mind that V_{cur} in this case is about 0.1 times the voltage that is applied across the total circuit. At a 12 Volt power supply, V_{cur} would be 1.09 Volt, the heat flux would be 292 W/m^2 , half of which would pass the Heat Flux Sensor. Power would be around 1.3 Watt, of which about 0.12 Watt would be consumed in the sensing resistor.

For type HFP-01SC:

$$E_{\text{sen}} = [V_{\text{sen}}(0) - V_{\text{sen}}(190)] / 123 * V_{\text{cur}}^2(0) \quad (5)$$

In normal soils, corrections of up to 20% relative to the normal calibration coefficient can be expected.

If *self-calibrating* heat flux sensors are used, there are additional requirements for data acquisition and control:

- a programmable or otherwise controllable relay
- 9-15 VDC 1.5 Watt power supply
- Voltage readout

The timing of the self-calibrating could be as follows.

Time	Film resistor for self test	Readout of V_{sen}	Readout of V_{cur}
Repetition every two hours or event controlled			
0	off	$V_{\text{sen}}(0)$	$V_{\text{cur}}(0)$
10	off	$V_{\text{sen}}(10)$	$V_{\text{cur}}(10)$
20	on	$V_{\text{sen}}(20)$	$V_{\text{cur}}(20)$
180	on	$V_{\text{sen}}(180)$	$V_{\text{cur}}(180)$
190	on	$V_{\text{sen}}(190)$	$V_{\text{cur}}(190)$
200	off	$V_{\text{sen}}(200)$	$V_{\text{cur}}(200)$

3.3 Measuring heat flux in walls

The measurement of heat flux in walls is comparable to that in soil in many respects. Two major differences however are the fact that the thermal properties of a wall generally do not change and that it is not always possible to insert the Heat Flux Sensor in the wall, so that it has to be mounted on top of the wall.

When the Heat Flux Sensor has to be mounted on top of the wall, one has to take care that the added thermal resistance is not too large. Also the spectral properties should be matching those of the wall as closely as possible. If the sensor is exposed to solar radiation, this is especially important. In this case one should consider to paint the sensor in the same color as the wall. Also in walls the use of *self-calibrating* heat flux sensors should be considered.

3.4 Measuring heat exchange of human beings

The measurement of the heat exchange of human beings is of importance for medical studies, and when designing clothing, immersion suits and sleeping bags.

A difficulty during this measurement is that the human skin is not particularly suitable for mounting of heat flux sensors. Also the sensor has to be thin; the skin essentially is a constant temperature heat sink, so added thermal resistance has to be avoided. Another problem is that test persons might be moving. The contact between the test person and the sensor can be lost. For this reason, whenever a high level of quality assurance of the measurement is required, it can be recommended to use a self-calibrating sensor.

4 The calibration of Heat Flux Sensors

The sensitivity E of a Heat Flux Sensor is defined as the output V for each Watt per square metre heat flowing through it, in a stationary transversal heat flow, see equation 1.

In a relatively well known method for calibration of Heat Flux Sensors, two plates of different temperatures are used. (see figure 11).

A well known heat flux is created by putting a plate of known thickness and thermal conductivity between the plates. In this heat flux a Heat Flux Sensor is placed for calibration.

A drawback of this method is that the accuracy of the relevant parameters (temperature measurements, the thickness, the conductivity and unknown contact resistance's) are large possible error sources.

A more sophisticated method [1] uses an additional Heat Flux Sensor and a heating element (see figure 12). In this way the only parameters are the heater power consumption and the heater area. These parameters can be determined with a high accuracy, resulting in a calibration with a higher reliability.

During calibration a stable signal should not be mistaken for a stationary flow. An additional temperature measurement should be done in order to check for dynamic temperature offsets as mentioned in paragraph 2.2.1.

Once a Heat Flux Sensor has been calibrated in an absolute way, as described above, it is possible to calibrate similar types using the calibrated sensor as a reference. These

comparative methods are generally simpler to perform and are more efficient in production.

With each calibration, at least information should be given on the sensor temperature and heat flux at which the calibration has been performed. This will serve for correction of the sensitivity in case of significant non-linearity and temperature dependence.

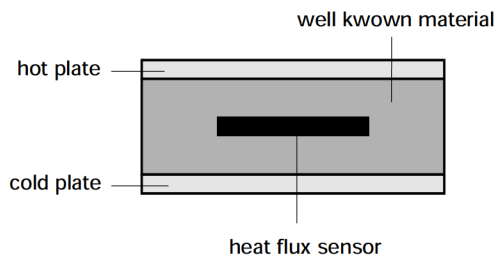


Figure 11 Measuring setup to determine the calibration factor of a Heat Flux Sensor. Hot and cold plates are temperature stabilised. The material between the plates is of known conductivity and thickness.

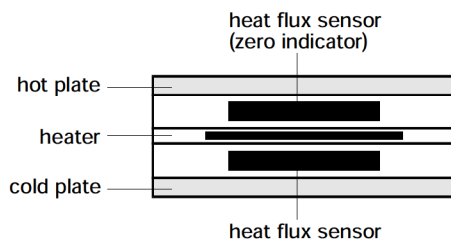


Figure 12 Measuring setup to determine the calibration factor of a Heat Flux Sensor. The heater is controlled in such a way that the zero-indicator (a Heat Flux Sensor) reads zero all the time. The heat flux equals the heater power consumption divided by the heater area.

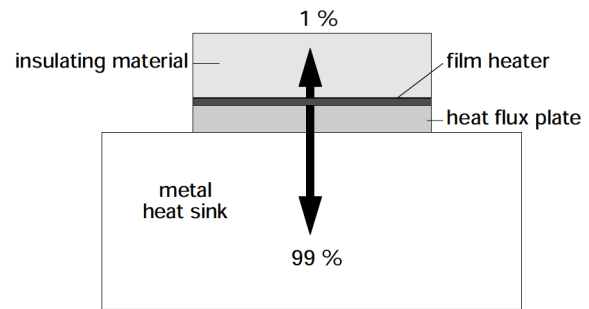


Figure 13 A modification of the method of figure 12; a self-calibrating Heat Flux Sensor is calibrated by mounting it on a metal heat sink with a constant temperature. When the thermal conductivity of the sensor is 0.8 W/m.K , at a heat flux of 300 W/m^2 , and a sensor thickness is 5mm , the temperature raise at the heater is 2 degrees. For an un-insulated sensor, this would result in an error of about 20 W/m^2 because of radiative and convective losses. For this reason the heater is again insulated, using foam insulating material. Now 99% of the heat flux passes through the sensor. As a result the accuracy is about 1%. As a result, a self-calibrating Heat Flux Sensor can easily be recalibrated by the user, only requiring a block of metal, insulating material, a voltage source and 2-channel Voltage data acquisition.

5 Quality assurance of the heat flux measurement

A problem with the measurement of heat flux is that in many applications the accuracy of the measurement is not known.

There are several methods to improve the reliability of the data; by data analysis using software, by doing additional temperature measurements and by using *self-calibrating* heat flux plates.

Software can be used to analyse unlikely events, like a heat flux that changes too quickly, that gets too high or that gets too low.

As an example, for soil heat flux, fluxes during daytime are generally positive and lower than 1000 W/m^2 . During night-time they are negative but not smaller than -200 W/m^2 . At a characteristic depth of 4 cm , changes quicker than $0.2 \text{ W/m}^2/\text{s}$ are unlikely to occur.

Additional temperature measurement is useful to detect the danger of dynamic temperature offsets (see 2.2.1).

Finally in demanding applications in which the Heat Flux Sensor is built-in, a *self-calibrating* heat flux plate can be used. Using this type of sensor, and the additional evaluation by software (see 3.2.3) is a very powerful tool in quality assurance of the data.

6 Conclusions

When choosing Heat Flux Sensors for a particular application, one will have to compromise between different sensor specifications. The choice will depend on the application.

The checklist below can be used as a first guideline.

Whenever this is possible, sensors of the lowest mass and largest area are to be preferred.

Designing an experiment, errors can be avoided by choosing the right setup. Please mind the following:

Application specifications

1. Maximum rate of temperature change
2. Occurrence of lateral fluxes
3. Data acquisition
4. Calibration conditions versus application conditions
5. Change of thermal parameters of the medium (eliminated using the self-calibration technique)
6. Allowable size
7. Heat flux time constants
8. Temperature dependence medium (eliminated using the self-calibration technique)

If used in an application measuring soil heat flux, heat flux in walls, tests with living test persons or applications in which quality control of the data and recalibration is particularly important, the use of *self-calibrating* heat flux plates could be considered.

Based upon the previous chapters, the checklist below can be suggested.

All specifications are supposed to be relative to calibration conditions.

Part of the terminology is taken from the ISO specification of radiation sensors [3].

Sensor specifications

1. Sensitivity
2. Response time (95% of end value, theoretical value based on sensor properties)
3. Non-linearity (output at twice the input during calibration, minus two times the output during calibration, divided by two times the output during calibration)
4. Sensitive area
5. Thermal conductivity
6. Thermal Resistance
7. Heat capacity
8. Guard area
9. Non stability (maximum % change of sensitivity per year under calibration conditions, empirical value)
10. Operating temperature

Electrical specifications

1. Impedance
2. Specifications of incorporated temperature sensor (if applicable)

Optical specifications

1. Spectral properties of the sensor surface

Calibration specifications

2. Temperature
3. Heat flux

Data quality assurance

1. Film resistor for self test
2. Software
3. Additional temperature measurement

7 References

- [1] Van der Graaf, F., Sensors: Heat Flux Sensors, Gopel, W., Hesse, J., Zemel, J.N., (eds); VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- [2] Ortolano, D.J., Hines, F.F., A simplified Approach to Heat Flow Measurement, Advances in Instrumentation Volume 38, part 2. Proceedings of the International Conference and Exhibit, Houston Texas October 10-13, 1983. Instrument Society of America, 1983.
- [3] Holman, J.P., Heat Transfer; McGraw-Hill, 1990.
- [4] International Standard 9060, First edition 1990-11-01, Solar Energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation, ISO 1990