

MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

Průtok

Označuje množství vody, které proteče daným profilem za jednotku času ($l \cdot s^{-1}$, $l \cdot \text{min}^{-1}$, $m^3 \cdot s^{-1}$).

Využití měření průtoků v hydrogeologii

V hydrogeologii je měření průtoků využíváno v řadě oblastí. Měření průtoků slouží jako vstupní údaje pro výpočty bilance podzemních vod, výpočty hydraulických parametrů hornin, při řízení exploatace podzemních vod, při odvodňování ložisek nerostných surovin, stavenišť, umělé infiltrace, hydromeliorací atd.

Průtok je podle jeho vztahu k hydrogeologickému objektu označován v hydrogeologické terminologii také jako:

Vydatnost

Množství vody, které je za daných podmínek objekt schopný dát:

- vydatnost pramene
- vydatnost vrtu

Vývěr

Voda vyvěrající z horninového prostředí na zemský povrch (pramen) nebo do důlních děl. Vývěr vody na zemský povrch může být přírodní, pak jej označujeme jako **pramen**.

Přeliv

Samovolně přetékající voda z vrtu (když vrt je vyhlouben do hornin s napjatou vodou s pozitivní piezometrickou úrovní).

Výtok

Množství vody vytékající z umělých děl (drenáž, štola) i vody vypouštěné z kanalizace nebo z čistírny do povrchových toků.

V hydrogeologii je řada termínů používaných právě ve spojitosti s měřením průtoků. Mezi **základní termíny** patří:

- *Objemový průtok* – objem kapaliny který proteče za časovou jednotku
- *Měrný průtok* – průtok připadající na 1 m šířky proudu, popř. podzemní průtok jednotkovou filtrační plochou
- *M-denní průtok* – průměrný denní průtok dosažený nebo překročený po M dní v hydrologickém roce
- *Čára průtoků* – choronologická čára průtoků v uvažovaném profilu (hydrogram)
- *Průtoková řada* – hydrologická řada průměrných denních, měsíčních nebo ročních aj. průtoků
- *Měrná křivka průtoků* – Závislost mezi průtoky a vodními stavy v daném profilu vodního toku - *konzumpční křivka*

Metody měření průtoků

Metody měření jsou různé podle toho v jakých podmínkách se průtoky měří:

- *Měření průtoků v korytech* – měření průtoků ve vodních tocích, měření vydatnosti pramenů, měření vertikálních průtoků ve vrtech, měření průtoků zvodněnými horninami.
- *Měření průtoků v potrubích* – měření při hydrodynamických zkouškách, jímání podzemních vod, hydraulické ochraně podzemních vod, odvodňování stavenišť a ložisek, vtačování kapalných odpadů do hornin, hydrochemické těžbě aj.

Pro měření průtoků v korytech se používají následující metody:

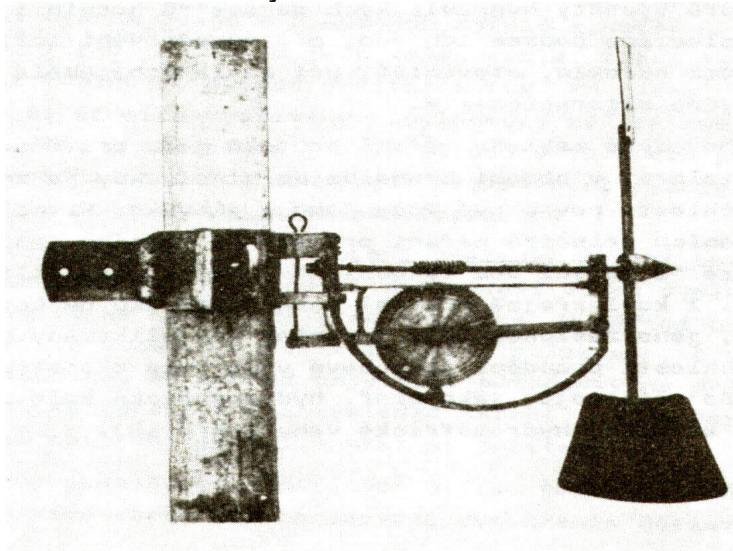
- hydrometrování
- měrné žlaby
- měrné přelivy
- měrné profily s vodočty
- stopovací zkoušky
- měření povrchové rychlosti proudění
- objemová měření

Hydrometrování

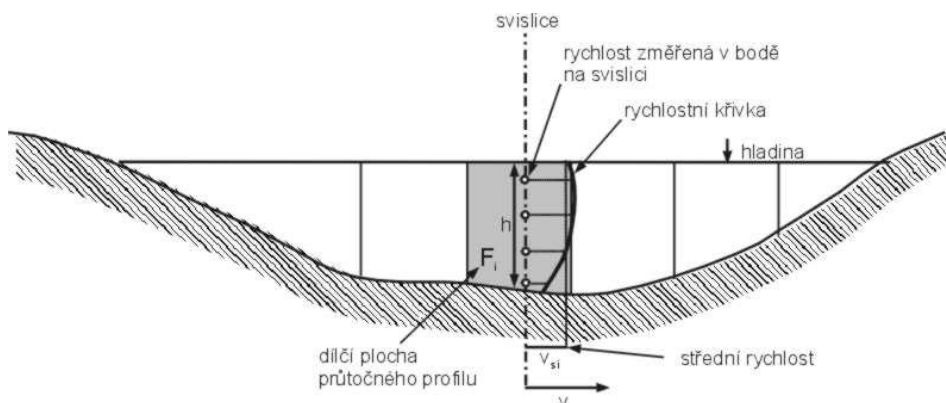
Hydrometrickou (vodoměrnou) vrtulí (obr. 1) je měřena rychlost proudění v různých bodech měrného profilu (obr. 2). Přesnost měření je $\pm 5\%$, pečlivým měřením a výběrem vhodného profilu lze dosáhnout přesnosti až $\pm 1\%$ měřené hodnoty.



Hydrometrics s.r.o.



Obr. 1 Hydrometrické vrtule



Obr. 2 Měrný profil vodotečí s vyznačením bodů měření hydrometrickou vrtulí

Měrné žlaby

Jejich využití je především při dlouhodobějších měření průtoků: exploatace vod, čerpací zkoušky atd. Jedná se o koryta se zúženým profilem. Měří se výška vodního sloupce v žlabu před a za zúžením, rozdíl hladin potom odpovídá průtoku žlabem (obr. 3). Mezi známé typy měrných žlabů patří Venturiho či Parshallův měrný žlab. Přesnost měření je 2-5 % měřené hodnoty.



Obr. 3 Parshallův (vlevo) a Venturiho (vpravo) měrný žlab

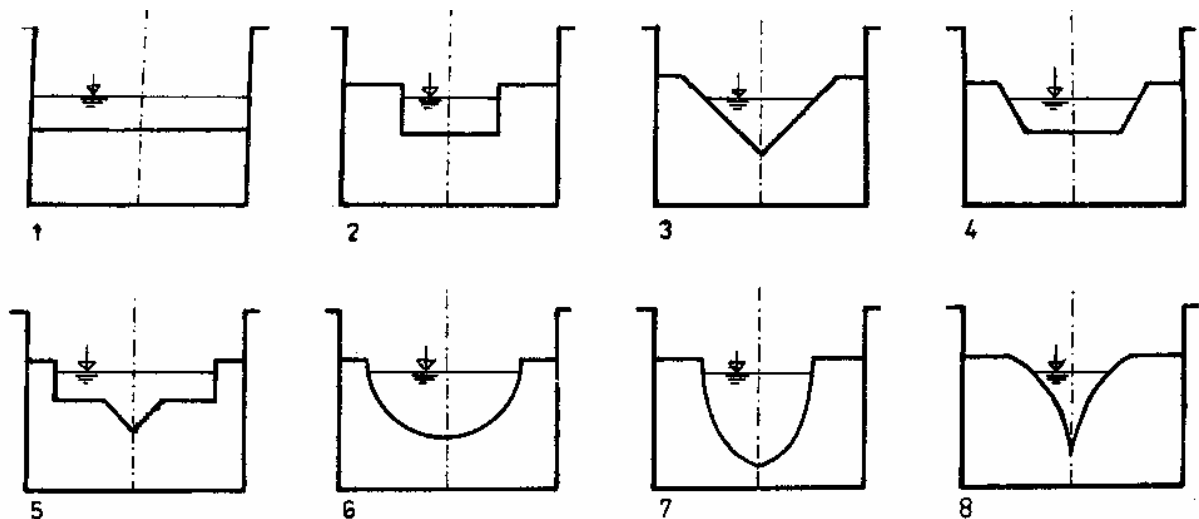
Pro Venturiho žlab platí při zanedbání přítokové rychlosti rovnice:

$$Q = \varphi b h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (1)$$

kde φ je součinitel vyjadřující odpor proudění vody, h_1 je hloubka vody před zúženým profilem, h_2 je hloubka vody v zúženém profilu a b je šířka zúženého profilu

Měrné přelivy

Přelivy jsou vhodné k jednorázovým (přenosné) i k dlouhodobým měřením průtoků. Měření jsou založena na průtoku vody přes známý geometrický tvar (obr. 4). Měří se výška přepadového paprsku h při dokonalém přepadu. K jednotlivým typům měrných přelivů patří pro výpočet průtoku příslušné rovnice. Přesnost výpočtu průtoku měrnými přelivy je při správném postupu a vhodných přelivech 1 – 5 % měřené hodnoty.



Obr. 31 Základní typy ostrohranných měrných přelivů

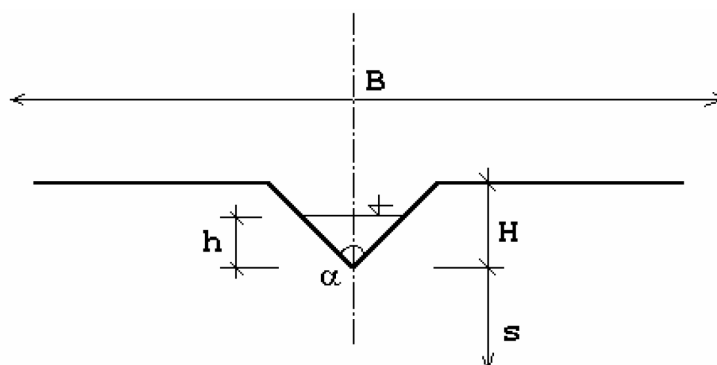
- | | |
|----------------------------------------------------------|------------------------|
| 1 - Obdélníkový přeliv bez postranní kontrakce (Bazinův) | 5 - Složený přeliv |
| 2 - Obdélníkový přeliv s boční kontrakcí (Ponceletův) | 6 - Kruhový přeliv |
| 3 - Trojúhelníkový přeliv (Thomsonův) | 7 - Parabolický přeliv |
| 4 - Lichoběžníkový přeliv (Cipolettiho) | 8 - Parabolický přeliv |

Obr. 4 Základní typy ostrohranných měrných přelivů

Thomsonův měrný přeliv

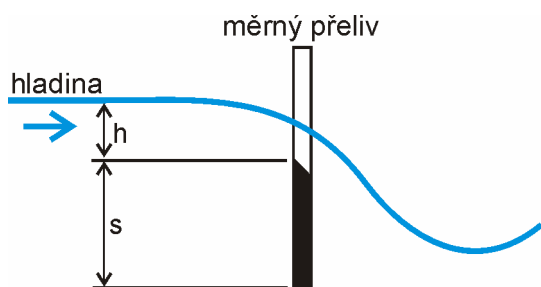
Tento typ měrného přelivu je poměrně často používán, hodí se zejména pro měření menších průtoků. Výřez je tvořen trojúhelníkem s pravým úhlem v jeho vrcholu (hrana přepadu by měla být ostrá 45°-60°). Podmínkou platnosti vzorců je průtok dokonalým přepadem přes ostrou hranu a platnost následujících geometrických podmínek:

$$B \geq 8h ; S > 3h ; ha < Sa \text{ (obr. 5)}$$



Obr. 5 Základní parametry měrného Thomsonova přelivu (www.hydromeliorace.cz)

Průtok lze vypočítat podle výšky vodního sloupce h ve vrcholu trojúhelníku ještě před zakřivením vodní hladiny v místech jejího přepadu přes výřez trojúhelníku (obr. 6).



Obr. 6 Schematický popis správného odečtu výšky vodního sloupce h z měrného přelivu

Výška vodního sloupce h je následně dosazena do rovnice 2 podle které je vypočten průtok:

$$Q = 1,4h^{5/2} \quad (2)$$

Měrný přeliv musí být do koryta toku zabudován tak, aby nedocházelo k jeho obtékání či podtékání. Z prostoru před přelivem musí být odstraněny překážky naplavené tokem.

Měrné profily s vodočty

Měrné profily jsou využívány pro dlouhodobé řady sledování průtoků. Jedná se o přesně definované průtočné plochy na kterých je opakovaným hydrometrováním zjištěn průtok odpovídající různým vodním stavům (výškám hladin). Vynesením průtoků proti výškám hladiny v toku vzniká tzv. *konzumpční křivka*. Takové měrné profily jsou osazeny svislou či šikmou vodočetnou latí (obr. 7), ze které je možné odečíst výšku hladiny a podle ní z konzumpční křivky určit odpovídající průtok.



Tři typy značení vodočtů

PREFA KOMPOZIT, a.s.

Obr. 7 Ukázky různých typů značení vodočetných latí

Stopovací zkoušky

Stopovací látky použité k určení průtoku vytváří „stopovací mrak“, přičemž je měřen časový rozdíl průchodu charakteristických bodů tohoto mraku – např. začátek, výskyt nejvyšší hodnoty, těžiště plochy mraku atd. Podle druhu použité stopovací látky je volen i způsob jejich indikace. K měření průtoku používáme indikátor, který je sledován v kontrolních profilech. Z charakteristiky průtoku stopovací látky vyhodnotíme průtok. Rzolišují se dvě základní metody: směšovací a integrační.

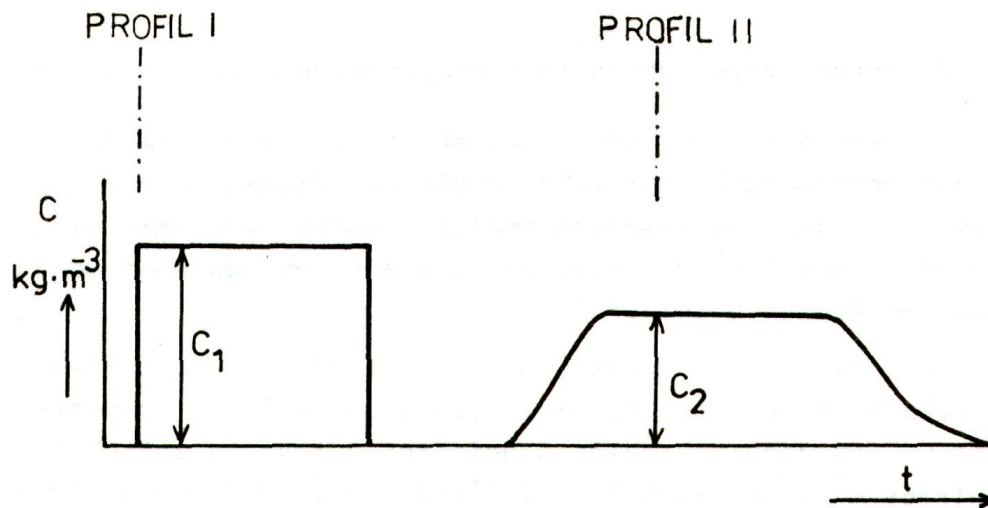
Směšovací stopovací zkouška

K měření průtoku je používán indikátor, který je sledován v kontrolních profilech. Z charakteristiky průtoku stopovací látky je vyhodnocen průtok. Jako indikátor se používá inertní chemická látka (např. NaCl). Při směšovací zkoušce (obr. 8) je do toku kontinuálně

přidáváno konstantní množství stopovače Q_1 o stále koncentraci C_1 . Po jeho dokonalém promíchání v toku se určí koncentrace C_2 v měrném profilu podle rovnice:

$$Q = Q_1 \frac{(C_1 - C_2)}{C_2 - C_0} \quad (3)$$

kde Q je zjišťovaný průtok, C_0 je koncentrace stopovače v pozadí, Q_1 je dávkovaný průtok stopovače, C_1 je koncentrace dávkovaného stopovače, C_2 je koncentrace stopovače v měřeném profilu.



Obr. 8 Měření průtoku směšovací metodou

Integrační stopovací zkouška

Tato metoda je založena na principu zachování jednorázově injektovaného množství stopovací látky po jejím dokonalém promíchání v proudící vodě. Průtok je vypočten ze známé koncentrace stopovače C_1 a jeho použitého objemu V , jeho koncentrace v pozadí C_0 a z průměrné koncentrace stopovače v toku při jeho průchodu měrným profilem C_2 :

$$Q = \frac{VC_1}{t(C_2 - C_0)} \quad (4)$$

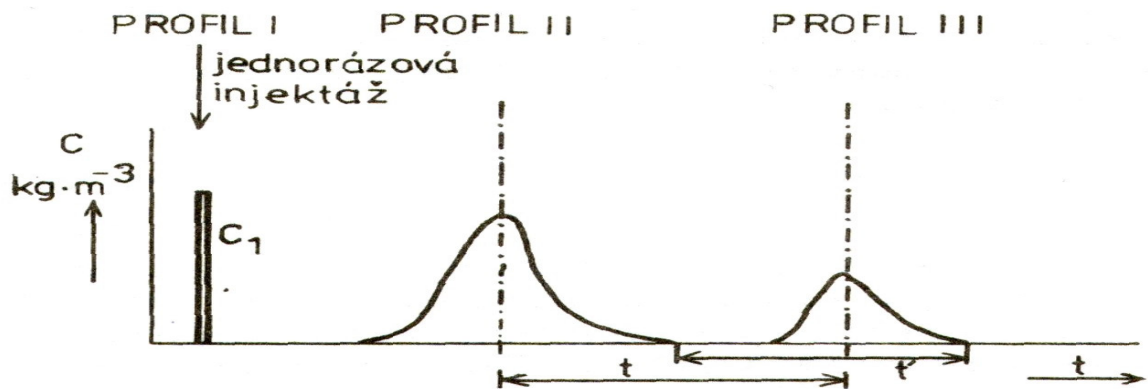
kde t je doba průchodu stopovače měrným profilem.

Měření povrchové rychlosti proudění

Jedná se o orientační metodu (obr. 9) kdy je průtok určen odhadem rychlosti proudu v toku pomocí doby unášení nějaké látky (např. NaCl) či tělesa (plovák, splývající tělíska) na vzdálenosti mezi dvěma profily přes měrný profil podle rovnice:

$$Q = \frac{L}{t} F \quad (5)$$

kde Q je průtok, L je vzdálenost mezi dvěma profily, t je doba unášení mezi dvěma profily a F je průtočná plocha měrného profilu.



Obr. 9 Měření průtoku stopovací metodou

Objemová měření

Jedná se o nejpřesnější druh měření používanému častěji ke kontrolnímu měření průtokoměrů. Objem nádoby by měl být zvolený tak, aby doba plnění byla větší než 10 s.

Lze jej obecně použít tam kde dochází k soustředěnému průtoku vod (např. zachycený pramen). Průtok je jednoduše vypočten podle rovnice:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

kde V je objem nádoby a t je doba jejího plnění

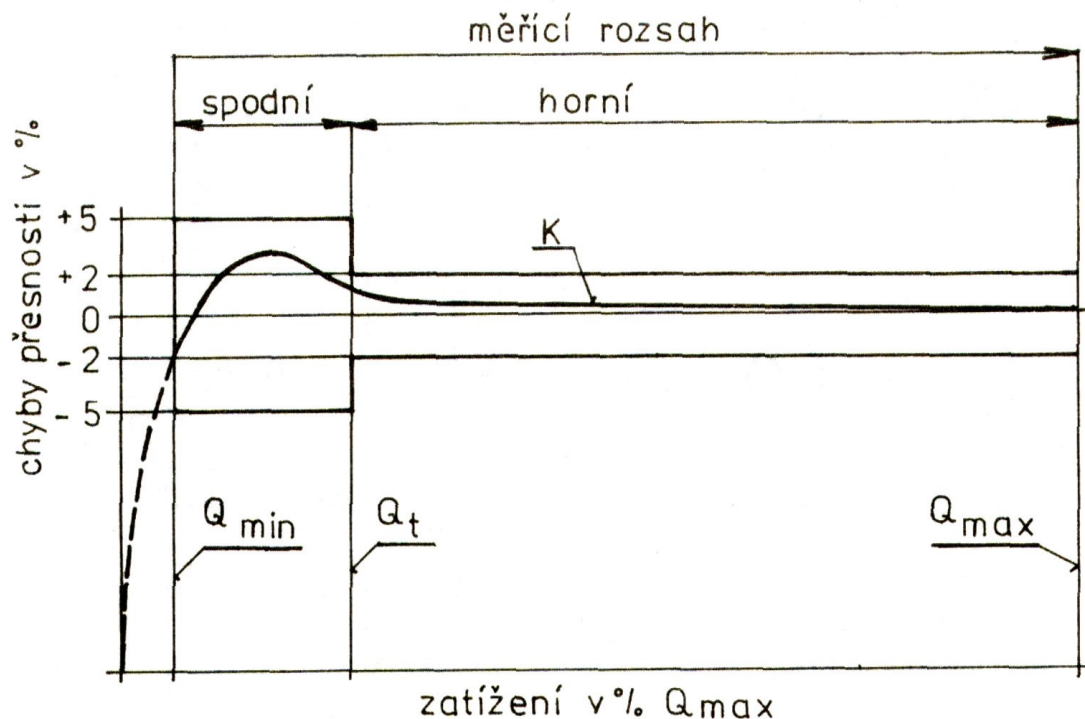
Měření průtoků v potrubí

Využívá se nejčastěji při hydrodynamických zkouškách, používají se:

- vodoměry
- průtokoměry
- objemová měření

Vodoměry

Nejčastěji používanými typy vodoměrů jsou lopatkové a šroubové vodoměry. Přesnost těchto vodoměrů je nižší při nízkých hodnotách průtoků (obr. 10).



Obr. 10 Metrologické vlastnosti lopatkového vodoměru, kde Q_{\min} je minimální průtok při kterém se nesmí překročit dovolená chyba přesnosti, Q_t je hodnota průtoku odpovídající spodní mezi horního měřicího rozsahu při které se dovolená chyba přesnosti vodoměru mění, Q_{\max} je maximální průtok při kterém se nesmí překročit dovolená chyba přesnosti a K je křivka charakterizující průběh chyby přesnosti měřené hodnoty v závislosti na průtoku.

Průtokoměry

Průtokoměry využívají řady fyzikálních jevů podle kterých lze měřit průtok v potrubí:

Indukční průtokoměry

Faradayův zákon o elektromagnetické indukci podle rovnice:

$$U_i = Blv \quad (7)$$

kde B je magnetická indukce, l je vzdálenost elektrod, v je rychlost proudění

Tepelný účinek proudu

Rovnovážný stav mezi přívodem tepla do čidla a prouděním, zvýšení rychlosti proudění – zrychlený odvod tepla

Silový účinek proudu na pevné těleso

Obdoba např. Pitotovy trubice (stanovení dynamického tlaku)

Dopplerův princip

Změny rychlosti ultrazvukových vln po a proti proudu kapaliny, u spojitě vysílaných ultrazvukových vln vzniká fázový posun nebo posun frekvence

Měření průtoků ve vrtech

Umožňuje zjistit vzájemné vztahy mezi zvodněnými horizonty a určit podíl jednotlivých horizontů na celkové vydatnosti vrtu. Nejčastěji je tohoto měření využíváno při řešení odvodňování ložisek nerostných surovin a při průzkumu minerálních vod.

Měřit průtoky ve vrtech lze pomocí:

- *flowmetry* – vertikální hydrometrické vrtule – vyžaduje nějakou minimální rychlost proudění (uváděno výrobcem)
- *stopovací zkoušky*
- *termokarotáž*

Měření průtoků ve zvodněné vrstvě

Tato měření jsou nejčastěji vyžadována při výpočtech přírodních zásob podzemních vod, při stanovení podzemního odtoku v celkové hydrologické bilanci, při řešení otázek znečištění v podzemních vodách a při prognózách jeho likvidace. Průtok ve zvodněné vrstvě lze určit z Darcyho zákona tedy ze znalosti koeficientu filtrace, plochy měřeného profilu a sklonu hladiny podzemních vod. Přesnost takové metody je těžké ověřit a je dána znalostí přírodních podmínek (nehomogenity a anizotropie zvodněného prostředí).

Volba metody k měření průtoků

Volba metody měření průtoků je určena její použitelností na lokalitě a také nároky na přesnost měření. Kromě toho může být určení průtoků spojeno také s řadou dalších problémů, které mohou zkreslovat výsledky měření. Jedná se např. o měření průtoků proplyněných vod, vod s volnou fází ropných látek, či minerálních vod vytvářejících inkrustace na měřících zařízeních.

MĚŘENÍ ELEKTROCHEMICKÝCH VLASTNOSTÍ PODZEMNÍCH A POVRCHOVÝCH VOD

Pod pojem elektrochemické vlastnosti vody (někdy také fyzikálně-chemické parametry) patří tyto parametry:

- konduktivita
- pH
- Eh
- koncentrace rozpuštěného kyslíku
- teplota

Konduktivita

Konduktivita neboli specifická *elektrická vodivost* vody charakterizuje vodivost roztoku mezi dvěma elektrodami o ploše 1 cm^2 vzdálenými 1 cm. Jednotkou konduktivity je (SI) $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ (v hydrogeologii se nejčastěji používá $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ nebo $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Vodivost vody (elektrolytu) je dána koncentrací iontů (polárně rozpuštěných látek) a jejich pohyblivostí. Vodivost vody je závislá na teplotě a proto se údaje o konduktivitě udávají při tzv. *referenční teplotě* 25°C (dříve 20°C). *Teplotní koeficient* (α) udává změnu konduktivity při změně teploty o 1°C vyjádřenou v % naměřené konduktivity

Odporová konstanta vyjadřuje změnu naměřené hodnoty konduktivity způsobenou tvarem a materiálem elektrod. Tato hodnota je konstantní a převádí hodnotu naměřenou na hodnotu pravou.

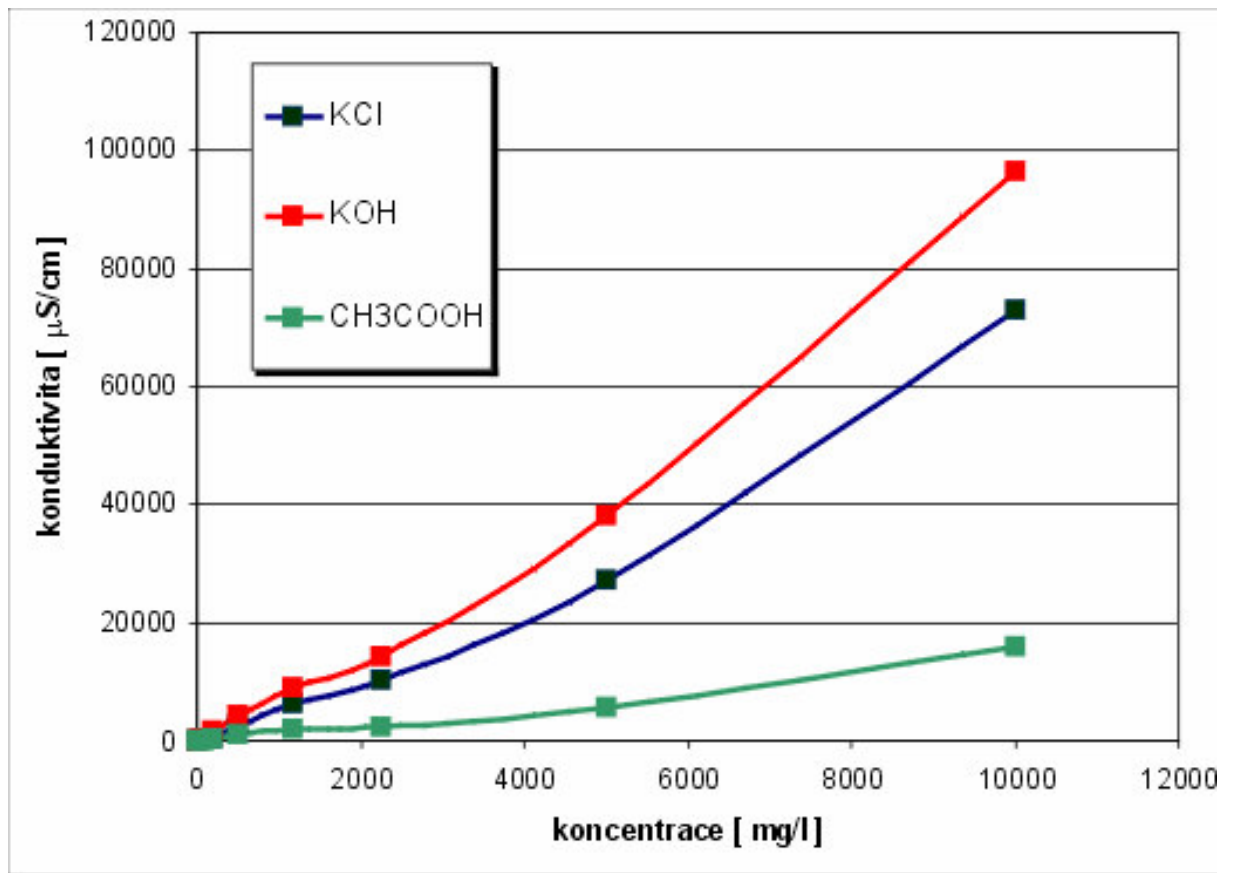
Využití měření konduktivity v hydrogeologii

Měření konduktivity poskytuje základní informace o mineralizaci vod. Sledováním prostorového vývoje konduktivity lze získat přehled o vertikálním (měření např. ve vrtech, v důlních dílech) i horizontálním rozložení (měření např. kolem skládek, při čerpacích zkouškách, regionální průzkum) mineralizace podzemních vod. Měření konduktivity ve vrtech poskytuje informace o vertikální zonalitě mineralizace vod, což lze využít např. při hodnocení znečištění nebo pro identifikaci preferenčních zón proudění podzemních vod. Měření konduktivity v okolí zdrojů znečištění podzemních vod, umožňuje jednoduše a rychle posoudit rozsah některých typů znečištění podzemních vod (kontaminace ovlivňující konduktivitu podzemních vod). V průběhu čerpacích zkoušek charakterizuje konduktivita mineralizaci vod v prostoru rozšiřujícího se depresního kuželu. Měření konduktivity je dále využíváno při regionálním hydrogeochemickém výzkumu podzemních vod pro určení zón s typickým chemismem podzemních vod. Při takovém průzkumu probíhá měření konduktivity často v režimu měření *salinity vod* (%). Měření konduktivity v povrchových tocích může být využito pro identifikaci přítoků podzemních vod atd.

Sledování časového vývoje konduktivity umožňuje posoudit vývoj chemismu podzemních vod např. v jejich vztahu k atmosférickým srážkám, ročnímu období a jiným proměnlivým činitelům. Měření konduktivity je nedílnou součástí dokumentace prováděné při odběru vzorků podzemních vod. Toto měření může být následně využito při kontrole výsledků chemických analýz.

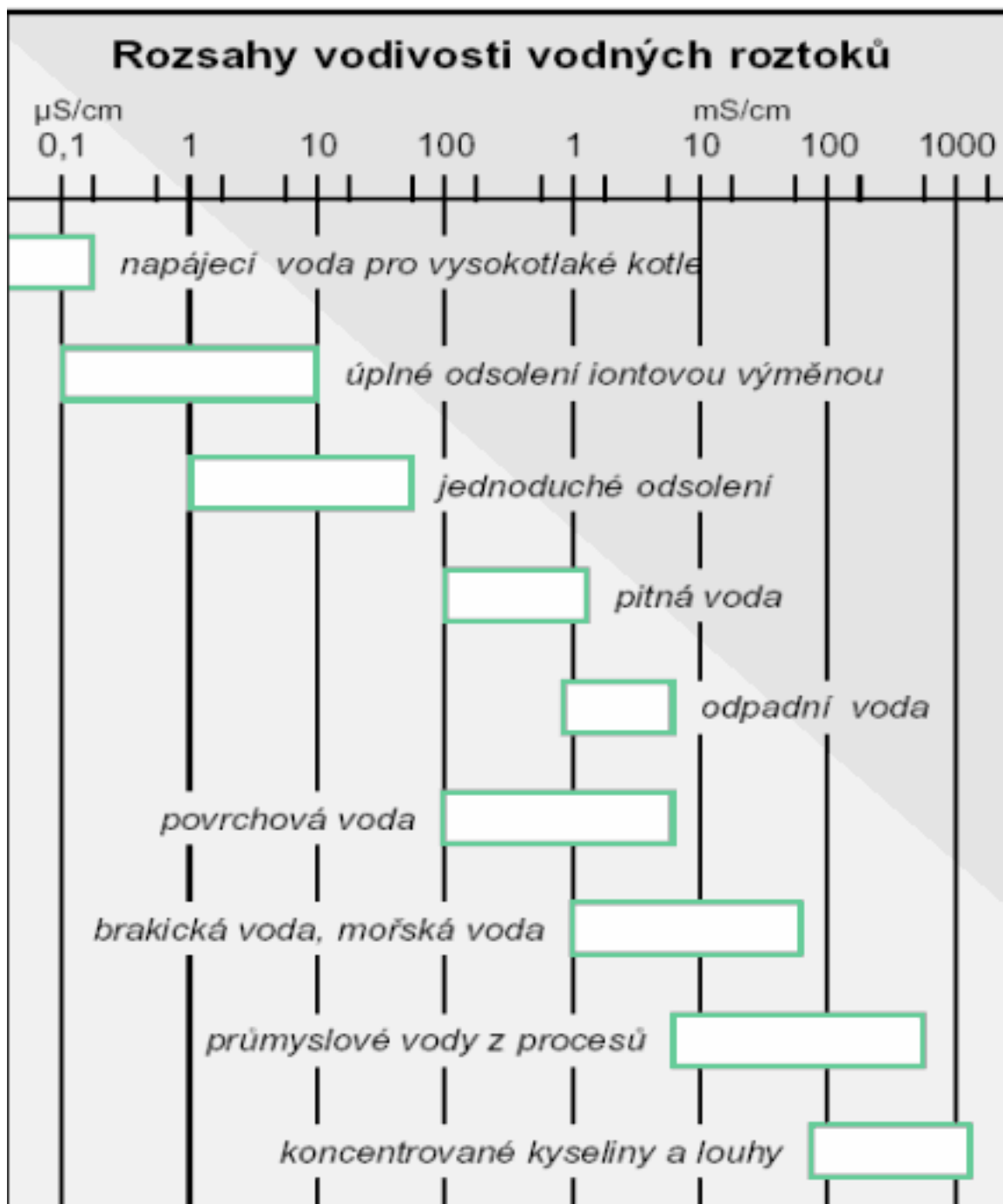
Grafy popisující závislost mezi koncentrací určité látky a konduktivitou téhož roztoku, se nazývají *nomogramy* (obr. 12). Z těchto grafů je možné na základě měření konduktivity

odhadnout koncentrace látky pro níž byl nomogram vytvořen. Toho bývá využíváno v kontaminační hydrogeologii při monitoringu lokalit.



Obr. 12 Nomogram zobrazující vztah mezi konduktivitou a koncentrací KCl, KOH a CH₃COOH

Hodnoty konduktivity se pohybují ve velmi širokém rozpětí od jednotek až po desetitisíce $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. U podzemní neznečištěné vody se konduktivita pohybuje nejčastěji v prvních stovkách $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Povrchová voda má konduktivitu v desítkách $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Znečištěné vody mohou mít konduktivitu až v desetitisících $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (obr. 13).



Obr. 13 Konduktivita různých typů vod

K měření konduktivity je možné použít některý ze široké nabídky přístrojů. Rozhodující je, kromě přesnosti přístrojů, zda-li bude měření probíhat v laboratoři anebo v terénu. Pro měření v terénu je nutné, aby byl přístroj přenosný a odolný vůči nárazům, vlhkosti a různým povětrnostním vlivům. Takovým požadavkům odpovídají často používané přístroje firmy WTW (obr. 14). Před každou sérií měření je nutné přístroj zkalibrovat – tedy nastavit tak, aby přístrojem měřené hodnoty odpovídaly skutečnosti. *Kalibrace* je prováděna pomocí *pufru*, tedy roztoku o přesně známé konduktivitě (0,01 mol/l roztok KCl – odpovídá konduktivita 1413 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).



Obr. 14 Přístroje firmy WTW vhodné k terénnímu i laboratornímu měření konduktivity a ostatních fyzikálně-chemických parametrů vod (pH, Eh, koncentrace rozpuštěného kyslíku, teplota)

15. Zobrazení a popis těla sondy používané k měření konduktivity je znázorněn na obrázku



Obr. 15 Popis těla sondy sloužící k měření konduktivity

pH

pH je definováno jako záporný dekadický logaritmus aktivity vodíkových iontů (s rostoucí hodnotou pH se snižuje aktivita vodíkových iontů a naopak). Rozmezí měření pH se běžně pohybuje od 0 do 14. Neutrální pH značí stejný poměr vodíkových (H^+) a hydroxylových iontů (OH^+) a v normálních povrchových podmínkách mu odpovídá hodnota pH 7. Termální roztoky mohou však mít neutrální pH podstatně nižší – např. kolem 5. Kyselé pH odpovídá vyšší aktivitě („koncentraci“) H^+ , naopak zásadité pH odpovídá nižší aktivitě H^+ . Reakce při kterých dochází ke změnám pH se nazývají *acido-bazické reakce*.

Opačnou hodnotou pH je pOH, tedy záporný dekadický logaritmus aktivity hydroxylových iontů (OH^-).

Využití měření pH v hydrogeologii

Každé vzorkování vod je vhodné doplnit měřením pH, které umožňuje následnou interpretaci hydrogeochemických procesů probíhajících v prostředí hornina-voda-atmosféra. Rovněž je doporučeno sledovat pH společně s konduktivitou při dynamickém odběru vzorků podzemních vod až do jejich ustálení, kdy teprve je vhodné vzorek odebrat. Pomocí pH může být indikováno znečištění vod.

Běžné hodnoty pH přírodních vod:

- pH povrchových toků 5,5 (u pramene) až 8,5 (nižší části toku)
- pH podzemních vod se zvyšuje od zóny infiltrace (5,5) směrem k jejich drenáží
- mořská voda pH 8,3

Způsoby stanovení pH

pH lze stanovit dvěma způsoby:

- kolorimetricky
- potenciometricky

Kolorimetrická stanovení pH

Kolorimetrická stanovení vycházejí z indikace pH změnou barev typických pro různé hodnoty pH:

Univerzální acidobazické indikátory (např. indikátor Čůta – Kámen, pojmenováno po profesorech pražského VŠCHT)

Některé organické látky mění uspořádání dvojných vazeb v molekule v závislosti na pH prostředí, což se projevuje změnou barvy roztoku. Tyto látky lze použít jako tzv. acidobazické indikátory. Po přidání takového acidobazického indikátoru se voda zbarví a pomocí srovnání s kalibrovanou barevnou škálou je určeno její pH. Přesnost určení pH je asi 0,5.

Dalším způsobem stanovení pH je použití *univerzálních indikačních papírků* (méně přesný je lakmusový papírek). Po jejichž vnoření do vody dochází k jejich obarvení typickému určité hodnotě pH (červená pH<1, až tmavě modrá pH >13). Využití těchto indikátorů slouží pouze pro orientační stanovení hodnot pH použitelném např. při hydrogeologickém mapování během rekognoskační etapy.

Tlumivé roztoky

Opět se k určení pH používají acidobazické indikátory, tedy látky které při určitém pH mění zbarvení. Při takovém stanovení pH se zpravidla kvůli vyšší přesnosti používá více roztoků s překrývajícím se rozsahem.

Pro barevné porovnání se používají také *kolorimetry* což jsou přístroje sloužící k měření barevných změn a chromatičnosti (teploty barvy).

Potenciometrické stanovení

V současné době se téměř výlučně používá měření pH pomocí potenciometrie, což je metoda založená na měření rovnovážného napětí článku, který je složen z měrné (indikační) a srovnávací (referenční) elektrody (obr. 16). Změny napětí mezi oběma elektrodami jsou vyvolány změnou aktivity H^+ . Při potenciometrickém stanovení pH je používána skleněná měrná elektroda, jako srovnávací elektroda je nejčastěji využíváno kalomelové nebo argentchloridové elektrody. Svým elektrickým potenciálem určuje měrná skleněná elektroda kyselost měřeného roztoku. Tato elektroda je tvořena tenkostěnnou baňkou ze speciálního skla jejíž vnitřní objem je vyplněn roztokem s konstantním pH. Vnější povrch této baňky je ve styku s měřeným roztokem a rovnováha mezi H^+ v tomto roztoku a ionty povrchu skla dávají změnu elektrického potenciálu elektrody. Elektrický potenciál mezi měrnou a srovnávací elektrodou je potom měřen voltmetrem.

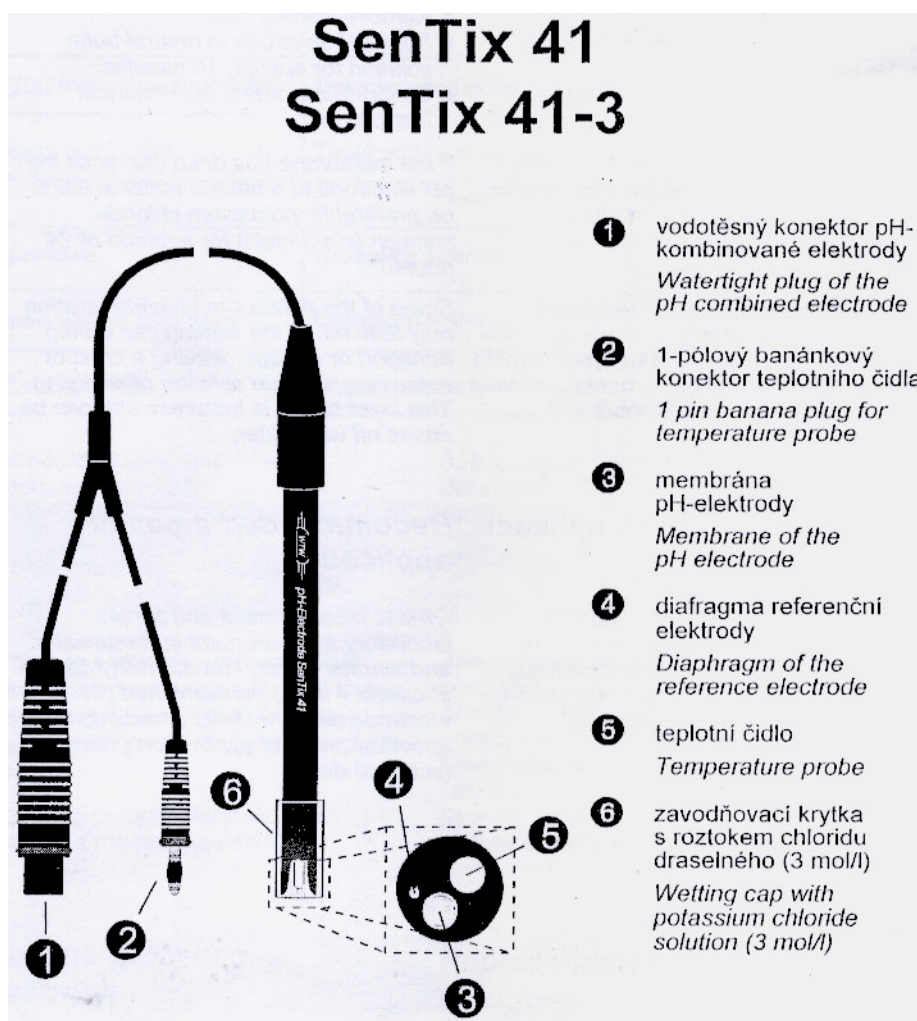
Vzhledem k závislosti pH na teplotě roztoku je současně s pH měřena rovněž teplota roztoku (obr. 16).

V současné době je na výběr řada přístrojů k potenciometrickému stanovení pH, lišících se přesností a velikostí od laboratorních stolních přístrojů až ke kapesním přístrojům. Přesnost měření pH se dnes i u přenosných, terénních přístrojů pohybuje od 0,01 do 0,001 jednotky pH.

Membrána měrné elektrody musí být udržována ve vlhkosti. K tomu slouží zavodňovací krytka s roztokem 3 mol KCl. V případě vyschnutí dochází k urychlenému stárnutí elektrody a elektroda musí být před měřením 24 hodin saturována v roztoku 3 mol KCl aby byla opět schopna dalšího měření.

Před každou sérií měření je nutné přístroj zkalibrovat. Ke kalibraci se používá jednoho (pufr s pH 4,01 jednobodová kalibrace), dvou (pufr s pH 4,01 a 7, tzv. dvoubodová kalibrace) nebo tří pufrů (pufr s pH 4,01, 7 a 9, tzv. tříbodová kalibrace), tedy roztoků se známým pH. V případě, že jsou měřeny vody s extrémními hodnotami pH (silně kyselé či silně zásadité roztoky) je vhodné kontrolovat přesnost měření pufrům i po několika měřeních.

Měření pH ve vzorku podzemní vody je nutné provést co nejdříve po jeho odběru v ideálním případě přímo ve vrtu či v prameni. Jakmile se podzemní voda dostane do kontaktu s atmosférou, začne být totiž původní pH ovlivňováno rozpouštěním atmosférického CO_2 ve vodě vzorku.



Obr. 16 Popis těla sondy sloužící k měření pH

Oxidačně-redukční potenciál

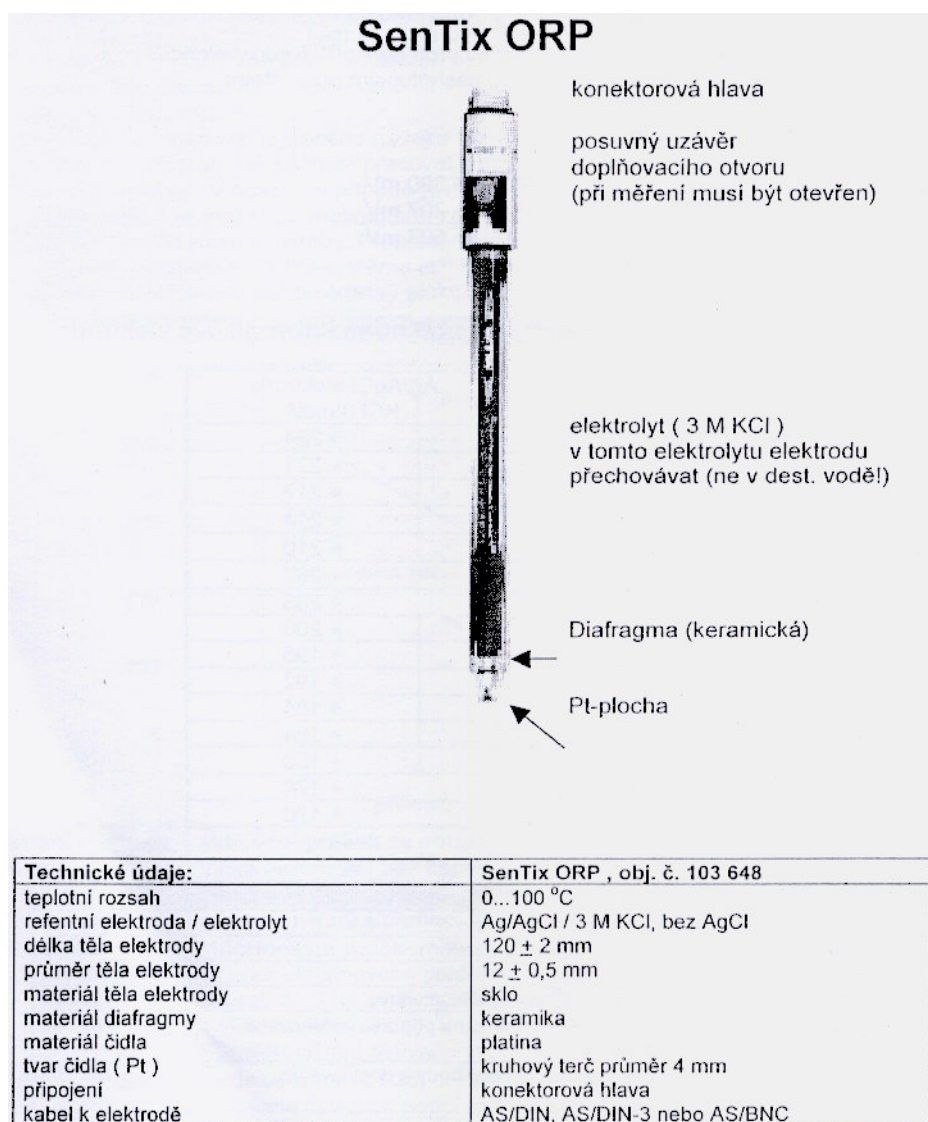
Oxidačně-redukční potenciál (ORP) vyjadřuje schopnost převést jednoho z reakčních partnerů do oxidovaného stavu. Existují dva způsoby pro vyjádření ORP:

- E_h – redoxní potenciál
- p_e – záporný dekadický logaritmus aktivity elektronů

E_h značí redoxní potenciál, který je vyjádřený v napětí měrné elektrody ve voltech proti srovnávací H_2 (vodíkové) elektrodě. Standardně je měřené napětí redoxpotenciál platinové měrné elektrody proti jiné srovnávací elektrodě (argentchloridová, kalomelová). V takovém případě je nutné provést přepočít těchto elektrod vůči normální srovnávací H_2 elektrodě (tab. 1). Ukázka sondy používané k měření E_h je na obr. 17.

Tab. 1 Napětí argentchloridové elektrody proti normální vodíkové elektrodě

Teplota (°C)	Ag/AgCl elektroda KCL 3 mol/l
0	224
5	221
10	217
15	214
20	210
25	207
30	203
35	200
40	196
45	192
50	188
55	184
60	180
65	176
70	170

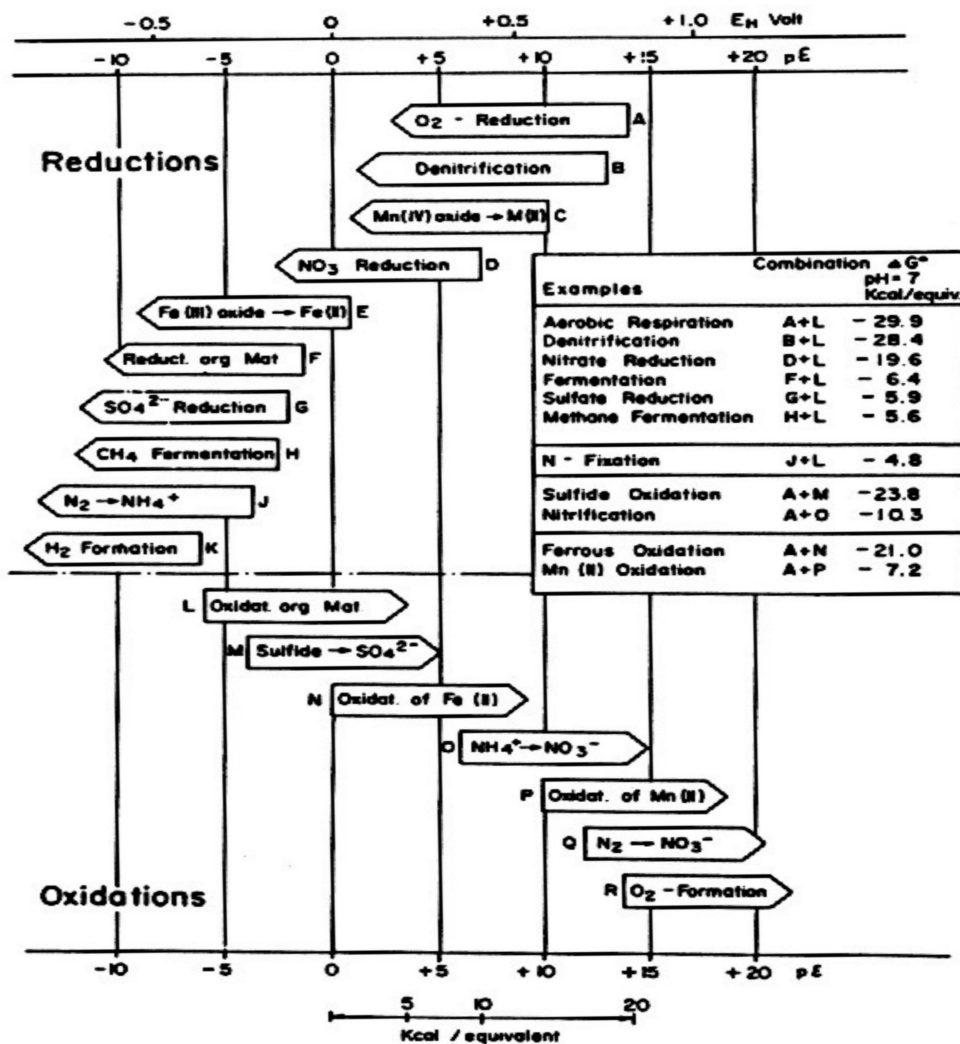


Obr. 17 Popis těla sondy určené k měření pH

Eh měřením napětí mezi elektrodami (mV, V) ukazuje jak je roztok silně redukční, resp. oxidační, neboli množství volných elektronů v roztoku. Je-li Eh nízké (nízké napětí mezi elektrodou a roztokem kde je hodně elektronů → hodnoty okolo 0 mV a záporné hodnoty) je v roztoku větší množství elektronů a prostředí je tedy redukční (při redukci dochází k získání elektronů, snižuje se tedy oxidační číslo). Naopak jsou-li hodnoty Eh kladné (velké napětí mezi elektrodou a roztokem kde je málo elektronů) je možné prostředí označit jako oxidační (při oxidaci dochází ke ztrátě elektronů a zvýšení oxidačního čísla).

Využití měření Eh v hydrogeologii

Měřením Eh je nutné doplnit každý odběr vzorků vod, protože pomocí výsledků chemických analýz, hodnot Eh (a ostatních fyzikálně-chemických parametrů, zejm. pH) lze následně zhodnotit hydrogeochemické poměry panující v prostředí vzorkovaných vod. Ve vodných systémech se podle koncentrací jednotlivých prvků a hodnot Eh a pH (a teploty) vyskytují různé formy látek. Eh a pH tedy určují také formy výskytu anorganických kontaminantů. To může být velmi důležité, protože různé formy stejného prvku mají různé chování a toxicitu při určitém mocenství. Pomocí Eh lze posoudit kontaminaci také organickými polutanty - bakteriálně řízené procesy - tzv. redox žebřík (obr. 18), dehalogenace chlorovaných uhlovodíků atd.



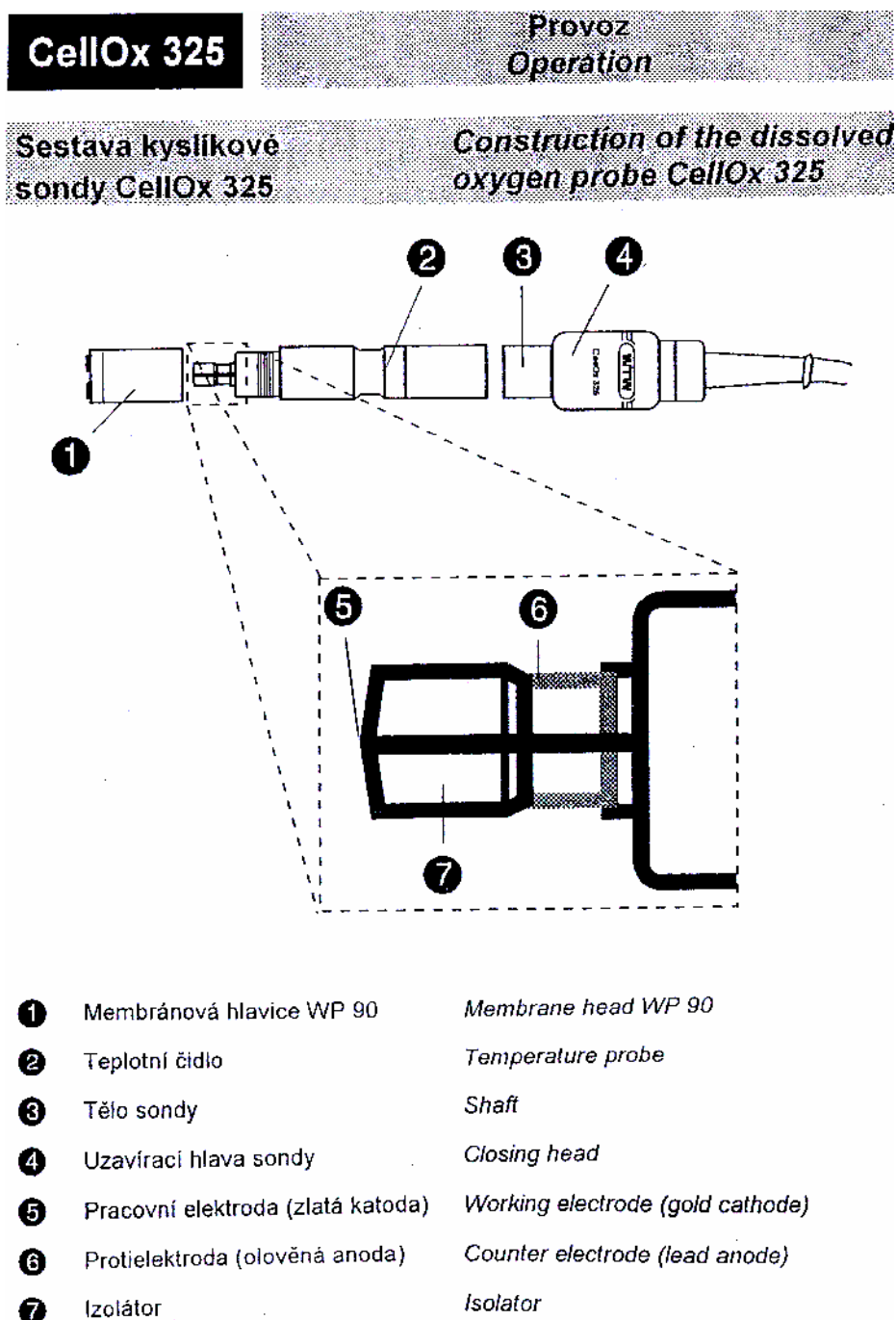
Postup mikrobiálně řízených redoxních procesů (Stumm and Morgan 1981)

Obr. 18 Redoxní žebřík

Stejně jako u pH je nutné měřit také Eh podzemní vody co nejdříve po jejím odběru, nejlépe pak přímo ve vrtu či prameni. Jakmile se podzemní voda dostane do kontaktu s atmosférou, dojde vlivem rozpuštění atmosférického kyslíku ve vodě vzorku ke změnám Eh. V případě měření Eh v povrchovém toku je nutné vyvarovat se ponoření sondy do stagnující vody či do dnových sedimentů (více redukční prostředí). Před každou sérií měření je nutné zkontrolovat přístroj k měření Eh pomocí *ZoBellova roztoku*. Tento roztok si dlouhodobě udržuje hodnotu Eh, která je pro Ag/AgCl elektrody 231 ± 10 mV. Je-li hodnota Eh od této hodnoty výrazně odlišná, je nutné Eh sondu očistit v aktivačním prášku, či upravit povrch elektrody ve speciálních přípravcích.

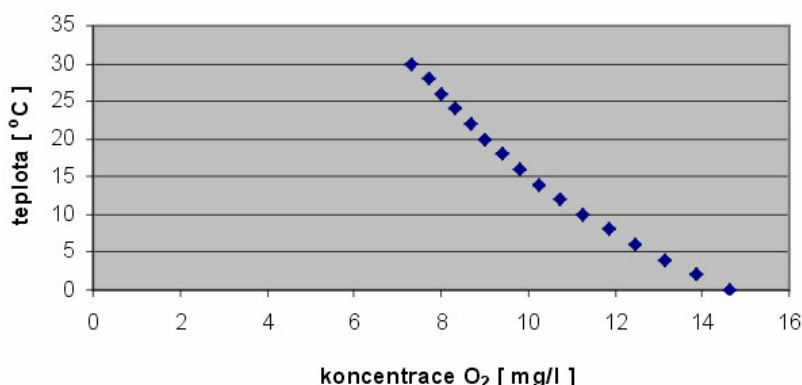
Koncentrace rozpuštěného kyslíku

Množství rozpuštěného kyslíku je možné stanovit několika způsoby (titrací, kolorimetricky), v současné době však převládá elektrochemický způsob jeho stanovení. Při elektrochemickém způsobu měření je používáno sondy (obr. 19) složené z pracovní elektrody (zlatá katoda) a z protielektrody (olověná anoda). Sonda je doplněna teplotním čidlem, protože koncentrace kyslíku je nepřímo úměrná teplotě - s klesající teplotou roste rozpustnost plynů (obr. 20). Rozpustnost kyslíku je různá v různých kapalinách.



Obr. 19 Popis těla sondy určené k měření koncentrace rozpuštěného kyslíku

Závislost koncentrace O₂ na teplotě



Obr. 20 Vztah mezi koncentrací rozpuštěného kyslíku a teplotou roztoku

Obě elektrody jsou v elektrolytu, odděleném od měřeného roztoku „propustnou“ membránou. Na katodě se molekuly kyslíku redukují na hydroxidové aniony, přičemž mezi elektrodami vzniká elektrický proud. Životnost elektrody je při jednom elektrolytu minimálně 6 měsíců, poté je vhodné elektrolyt vyměnit. Výměnná je rovněž membránová hlavice, která poměrně rychle stárne. Pronikání i jiných molekul přes membránu (dusík, amoniak) může snížit přesnost měření.

Využití měření koncentrace rozpuštěného kyslíku v hydrogeologii

Naměřené hodnoty kyslíku lze obdobně jako Eh použít při identifikaci organických kontaminantů. Kyslík je podle tzv. redox žebříku na prvním místě při jeho spotřebě oxidací organických látek. Měřením rozpuštěného kyslíku nelze posoudit míru redukčních poměrů ve vodném prostředí, kde Eh může jít narozdíl od koncentrace kyslíku do záporných hodnot.

Měřením kyslíku lze posoudit životní podmínky ve vodném ekosystému pro ryby aj. živočichy, lze jím identifikovat koroze potrubí, přítomnost odpadních vod, umožňuje posoudit trvanlivost potravin atd.

Koncentrace rozpuštěného kyslíku lze udávat v mg/l anebo jako nasycení kyslíku v roztoku v % (nasycení kyslíkem pro danou teplotu roztoku). Stejně jako u předchozích parametrů je i měření koncentrace rozpuštěného kyslíku nutné provádět co nejdříve po odběru vzorku vody nebo přímo ve vrtu či prameni. Před každou sérií měření je nutné přístroj k měření kyslíku zkalibrovat. Kalibrace probíhá pomocí nádoby, do které je uzavřena sonda k měření kyslíku. Sonda je v této nádobce obklopena vlhkou molitanovou vložkou, prostředí v této vlhké pórovité vložce je tedy 100% nasyceno rozpuštěným kyslíkem a toto prostředí tedy odpovídá pufri se 100% nasycením.

Teplota

Během vývoje měření teplot vzniklo několika teplotních stupnic. K nejstarším (1724) patří Fahrenheitova teplotní stupnice, ve které je 32°F = 0°C a 212°F = 100°C. Novou stupnici navrhnul v roce 1730 švédský fyzik A. Celsin. Tato stupnice je používána dodnes - Celsiova stupnice má 0° v bodu tání ledu a 100° v bodu varu vody při tlaku 101325 Pa. V termodynamice je používáno Kelvinovy stupnice kde 0° odpovídá absolutní nule (-273,15 °C) a jeden K je rovný jednomu °C.

V 19. století dochází k rozvoji geotermických měření (měření teploty vod a hornin), přinášejících závažné informace potřebné při výzkumu ložisek, geologických struktur a hydrogeologických poměrů.

Využití měření teploty vod v hydrogeologii

Měřením teploty povrchových vod lze v obdobích, kdy je rozdíl mezi teplotou vod a ovzduší maximálně kontrastní, identifikovat přítoky podzemních vod do povrchových vodotečí. Plošné posouzení teploty pramenů a její proměnlivosti během ročních období umožňuje posoudit hloubku oběhu podzemních vod. Měřením ve vrtech lze zjistit geotermální gradient, vertikální proudění vody ve vrtu, přítoky podzemních vod z jednotlivých zvodněných úseků hornin a průtoky mezi jednotlivými horizonty podzemních vod. Režimním měřením (měření v čase) teplot je možné posoudit vztah mezi povrchovými a podzemními vodami, infiltraci atmosférických srážek, zhodnocení typu pramenů aj. Měření teploty vod je nezbytné u měření elektrochemických parametrů (konduktivita, pH, Eh a koncentrace rozpuštěného kyslíku), protože jejich hodnoty jsou teplotou v určité míře ovlivněny. Měření teploty lze dále využít pro určení hydraulické vodivosti dnových sedimentů toků, výtoků vod z pobřežních zvodní do mořských vod, kalibrace modelů proudění podzemních vod a tepla atd.

Základní terminologie měření teplot

- *Geotermický stupeň* - udává rozdíl hloubek, mezi nimiž dojde ke změně teploty o 1 °C
- *Měrné teplo* - množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 °C
- *Tepelná vodivost* - charakterizuje proces šíření tepla, které za ustáleného stavu prochází průřezem látky
- *Tepelný tok* - množství tepla, které projde danou plochou za jednotku času
- *Teplotní gradient* - přírůstek teploty na jednotku hloubky horniny pod zemským povrchem, nejčastěji se udává ve °C.km⁻¹, při detailním průzkumu v °C.m⁻¹.
- *Teplotní pole* – rozložení teploty v zemské kůře

Základní druhy teploměru

Teploměry dilatační – měření teploty je založeno na roztažnosti látek vlivem teploty:

- kapalinové
- plynové
- roztažnost pevných látek

Teploměry tlakové – Měření teploty je založeno na udržování látky v nádobě, jejíž teplota se mění, v konstantním objemu. Změna teploty se tak projevuje změnou tlaku (teploměry plněné heliem, vodíkem).

Teploměry odporové – využíváno látek měnících svůj elektrický odpor se změnou teploty:

- Vodičové – kovové teploměry; s teplotou roste jejich odpor – nejdokonalejším vodičem je platina, přičemž změna odporu je prakticky lineární.
- Polovodičové – nekovové teploměry; s teplotou jejich odpor klesá, změna odporu s teplotou je nelineární. Citlivost termistorových teploměru je výrazně vyšší oproti kovovým. Nejčastěji jsou používány oxidy kovů (Ni, Mn, Co, Fe, Ti aj.).

Termoelektrické teploměry – převádějí měření teploty na měření elektrického proudu.

Teploměry radiální – měří tepelné záření – využíváno při teplotním mapování zemského povrchu.

Teploměry rezonanční – měření teploty je založeno na změně kmitočtu krystalového nebo strunového oscilátoru se změnou teploty. Tyto teploměry mají vzhledem k vysoké citlivosti oscilátoru na teplotní změny vysokou rozlišovací schopnost až 0,001 °C.

Výběr teploměru

Výběr teploměrů pro měření teploty vody je v hydrogeologii určen těmito podmínkami:

- rozsah měření – běžně postačuje 0 °C – 30 °C, termální vody až 80 °C
- přesnost měření – dostatečná je 0,1 °C
- rozlišovací schopnost – jedná se o citlivost teploměru a tedy jeho schopnost reagovat na změny teploty, běžně postačuje 0,1 °C, požadavky na rozlišovací schopnost (i přesnost měření) rostou s klesající velikostí zkoumané oblasti
- hloubka měření – běžně první desítky metrů, výjimečně vyšší (např. vrty hluboké stovky až tisíce metrů)
- způsob registrace naměřených dat – jednorázová měření nebo možnost automatické registrace naměřených teplot v určité frekvenci
- mechanická odolnost teploměru

Metrologie měření teplot a zkoušky teploměrů

Přesnost měření používaných teploměrů by měla být občas (četnost roste s požadavkem na přesnost měření teplot) ověřena jejich porovnáním s vhodnými etalony.

Zásady měření teplot

Povrchové toky – teplotu vody je nutné měřit v proudící vodě (v několika profilech), ve stojaté vodě je vhodné měření teploty ve více hloubkových profilech.

Prameny – teplotu vody je nutné měřit přímo v místech vývěru podzemní vody u dna, u pramenů s vydatností nad 1 l.s⁻¹ je možné měřit uprostřed proudu vytékající vody.

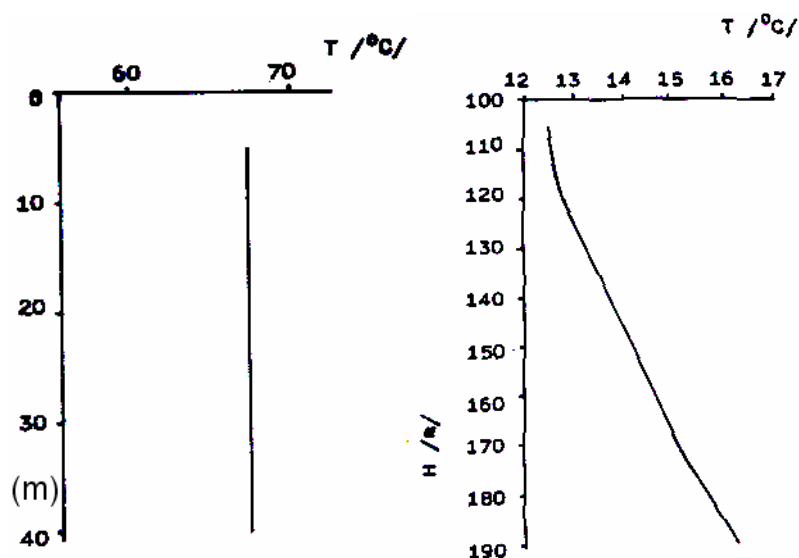
Vrty – u vrtů se samovolným přelivem do 1 l.s⁻¹ je vhodné provádět měření teploty pod úrovní terénu, nad 1 l.s⁻¹ pak přímo z přelivu (je již možné zanedbat vliv teploty ovzduší). Naměřené teplotní profily je vhodné srovnat s perforací, protože za reprezentativní je možné považovat jenom ty části profilů probíhající v perforovaných úsecích. Teplotní profily mohou poskytnout cenné poznatky jejich porovnáním s petrografickou charakteristikou hornin, kterými vrt proniká. Dále je vhodné doplnit měření teploty měřením průtoku ve vrtech (přetoky mezi horizonty).

Vybrané příklady použití teplotních měření

Termokarotážní křivky

Vrty se stálým přelivem

Pokud se voda ve vrtu pohybuje, snižuje se vliv teploty okolních hornin a teplotní gradient se zmenšuje. Pro vrty se stálým přelivem je typický velmi strmý průběh *termokarotážní křivky* (vertikální průběh teploty) – při rychlém výstupu vody až vertikální sklon. Na obr. 21 je znázorněna termokarotážní křivka na vrtu V-1 v Pišťanech. Jedná se o trvalý přeliv, při kterém nedochází k mísení vody a teplota ve vrtu je konstantní.



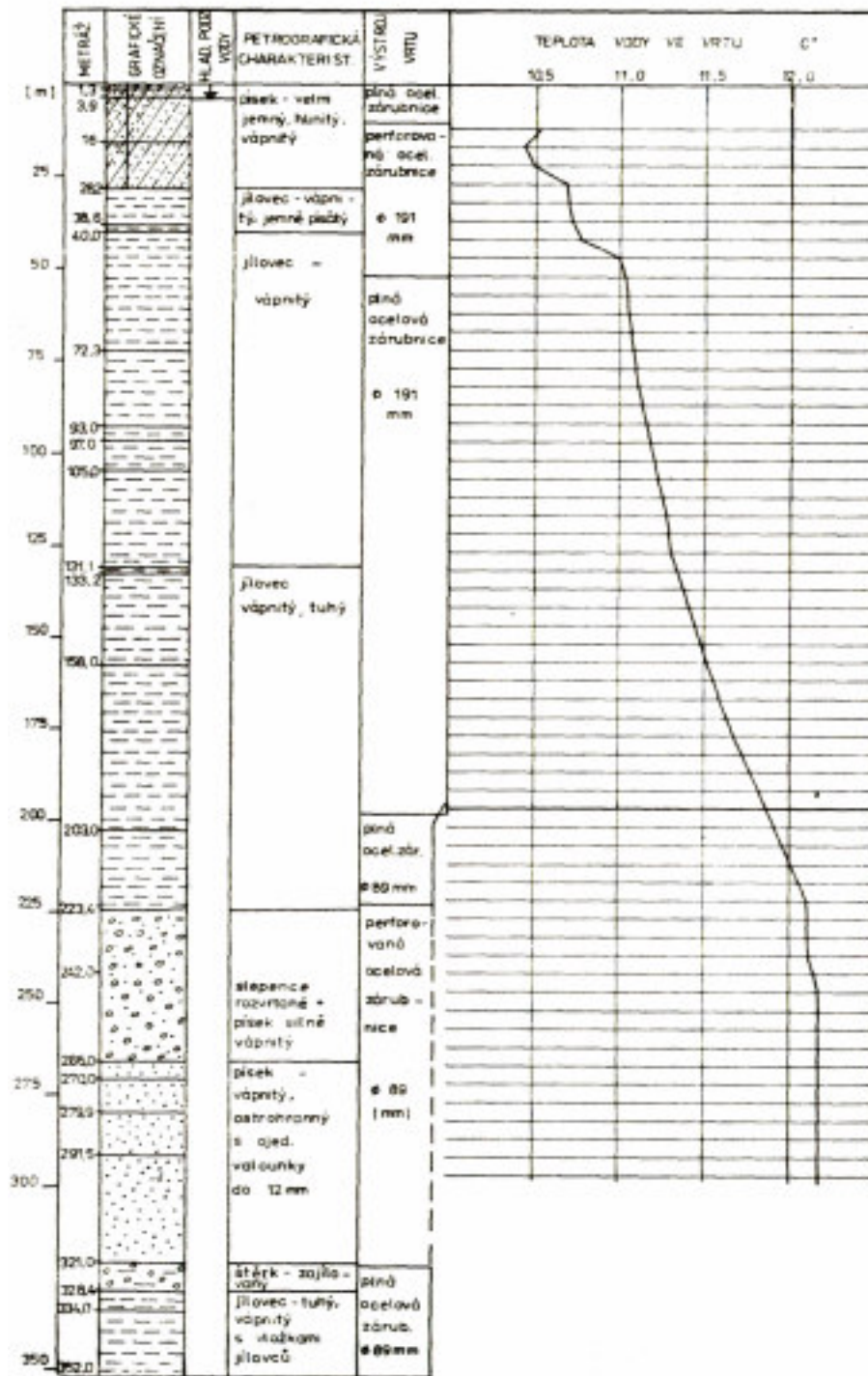
Obr. 21 Vrt Pišťany V-1 se stálým přelivem (vlevo) a vrt Hdodonín V-140 se stagnující vodou (vpravo)

Vrty se stagnující vodou

Teplota vody ve vrtu je ovlivněna teplotou okolních hornin, což vede k tomu, že v případě stagnující vody se teplota vody s hloubkou zvyšuje podle geotermického gradientu (obr. 21). Pro stagnující vody je tak typický téměř lineární průběh termokarotážní křivky, kdy je sklon křivky určen tepelnou vodivostí a měrným teplem hornin. Čím vyšší je její sklon, tím vyšší je tepelná vodivost a měrné teplo (hornina odvádí více tepla). Takový teplotní gradient vodního sloupce se velmi blíží geotermickému gradientu. Ten lze vypočítat pomocí obturátorů, které v měřeném úseku zamezí vertikálnímu pohybu vody.

Pohyb vody ve vrtech

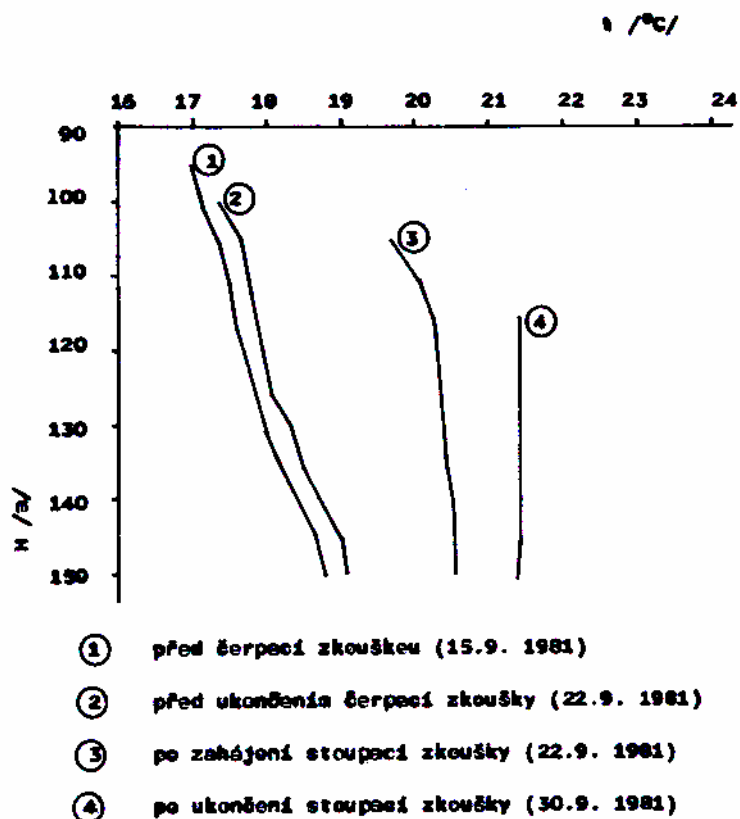
Pohyb podzemní vody snižuje vliv okolních hornin na její teplotu a teplotní gradient se tak zmenšuje. Ani ve zdánlivě stagnujícím vrtu nemusí teplota vody odpovídat teplotnímu gradientu, pokud dochází k přetoku vody mezi horizonty (obr. 22).



Obr. 22 Termokarotážní křivka a petrografický popis vrtu H3404 v Nové Vsi

Vliv čerpací zkoušky na průběh termokarotážní křivky

K maximálnímu získání informací o poměrech panujících ve zvodni lze čerpací zkoušky doplnit také termokarotážním měřením. Měření teploty ve vrtu je vhodné provést ještě před zahájením čerpacích zkoušek, dále v průběhu čerpací zkoušky a po jejím ukončení. Termokarotážní křivky dokumentující vývoj teplotních profilů ve vrtu během hydrodynamických zkoušek jsou na obr. 23. Podle těchto termokarotážních křivek, dochází u stoupacích zkoušek k posunu teploty vod ve vrtu k maximálním hodnotám a k minimalizaci termálního gradientu. To indikuje, že hlavní přítok podzemních vod do vrtu je z nejhlubších částí vrtu.



Obr. 23 Změny teploty ve vrtu při čerpací zkoušce (M. Kameň VN-11)

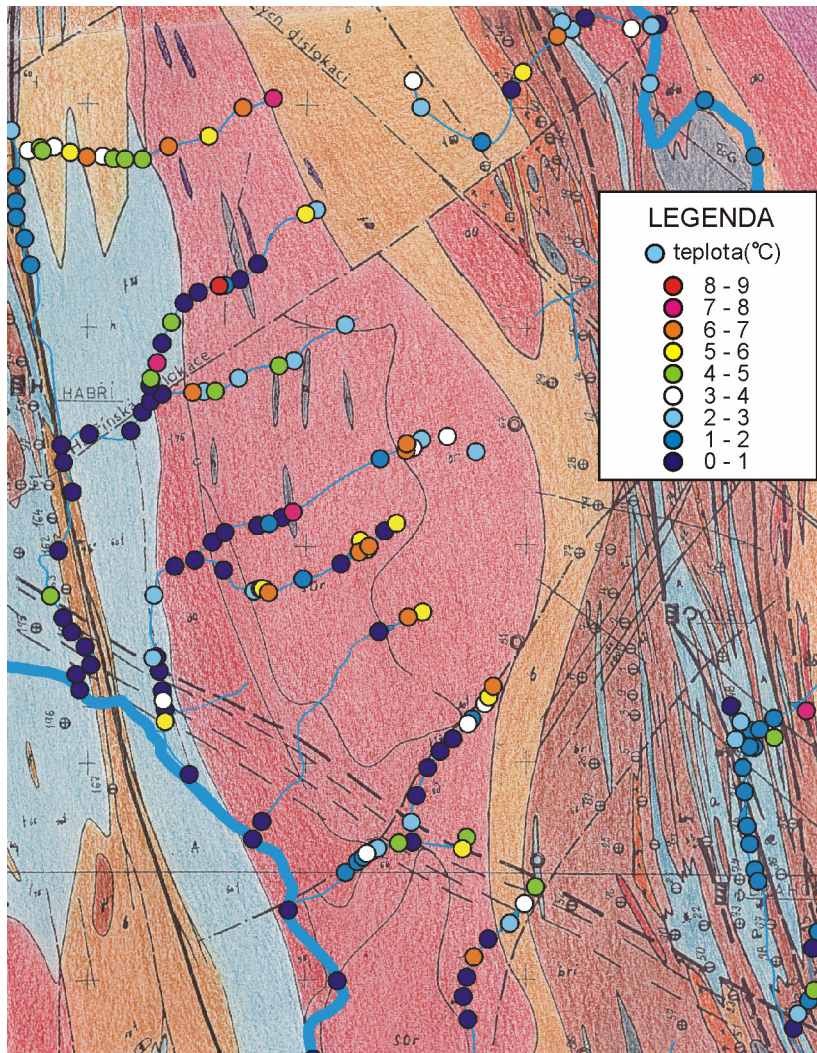
Regionální oběh podzemních vod

Termální gradient může být použit také k identifikaci zón vertikálního proudění v regionálním měřítku. Oblasti doplňování podzemních vod jsou totiž typické nízkým termálním gradientem. Naopak oblasti odvodňování podzemních vod se vyznačují vysokým teplotním gradientem.

Povrchová měření teploty vod

Termometrie povrchových toků je metoda využívající tepla jako stopovače. Povrchové toky drénující podzemní vody nebo jejich části mohou být identifikovány anomálními teplotami (obr. 24).

Korelací takto identifikovaných přítoků podzemních vod s okolními geologickými poměry a morfologií terénu lze relativně kvalifikovat hydrogeologické parametry přítomných horninových typů a zlomových systémů.



Obr. 24 Termometrie povrchových toků ve vztahu ke geologickým poměrům - kolečka s teplými barvami představují přítoky podzemních vod do vodoteče

MĚŘENÍ TLOUŠŤEK VRSTEV LNAPLs

Tloušťka vrstvy ropných látek (LNAPLs) bývá měřena z následujících důvodů:

- stanovení celkového rozsahu znečištění a bilance uniklých ropných látek
- režimní sledování rozsahu znečištění ropnými látkami
- kontrola účinnosti ochranných opatření
- regulace odčerpávání ropných látek při samostatném odčerpávání vody a ropných látek

Kapaliny, které mají oproti vodě nižší hustotu se označují jako *LNAPLs* (Light Non-Aqueous Phase Liquid). K takovým látkám patří nejčastěji ropné látky, ropné uhlovodíky, technické pohonné hmoty atd. Tyto látky se mohou v saturované zóně vyskytovat jako rozpuštěné látky, v podobě emulze či vytvářet samostatnou, *volnou fázi*. Volné fáze LNAPLs, vzhledem k jejich nižší hustotě, na hladině podzemní vody plavou a mohou vytvářet vrstvu o různé tloušťce.

Tloušťka vrstvy ropných látek (LNAPLs) je kolmá vzdálenost mezi rozhraním ropná látka-vzduch a ropná látka-voda. Měří se buď přímo ve vrtech nebo na vzorcích odebraných do průhledného válce. Udává se v délkových mírách, zpravidla v cm. Měřit lze vrstvu ropných látek s tloušťkou nad 1 mm. Tloušťka takové vrstvy je dobře patrná na stěně vzorkovacího válce. Vrstvy ropných látek s menší tloušťkou se označují jako *tenká vrstva ropných látek* (dobře viditelná souvislá vrstva na stěně vzorkovacího válce) a *film ropných látek na hladině* (velmi tenká vrstva, kterou není možné rozlišit na stěně vzorkovacího válce).

Zařízení pro měření tloušťky vrstvy ropných látek (dále jen TVRL) se dělí na:

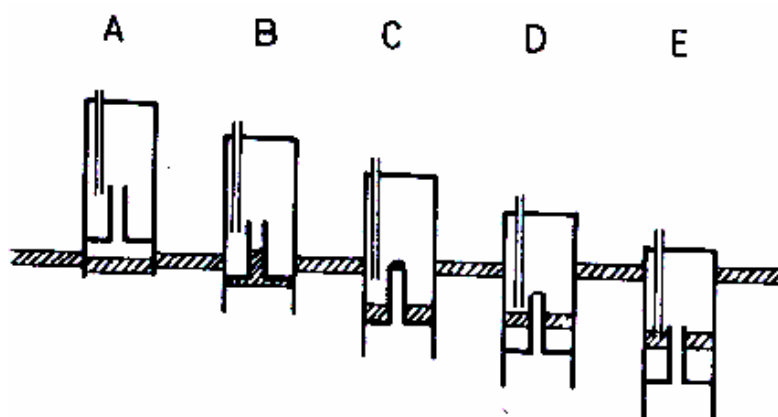
- měřidla TVRL pro jednorázová měření
- měřidla TVRL pro průběžná měření

Podle způsobu měření je pak možné rozdělit měřidla TVRL na:

- vzorkovací válce pro měření TVRL
- změna elektrické vodivosti
- termistorová měřidla TVRL
- fotoelektrická měřidla TVRL
- plováková měřidla TVRL

Vzorkovací válce

Přímo k měření TVRL se používá vzorkovacího válce s přelivnou trubicí (obr. 25). Přelivnou trubicí ve dně vzorkovací komory dochází při zanořování válce k nabírání ropných látek, přičemž odvzdušňovací trubicí uniká vzduch. Jakmile dosáhne hladina kapaliny odvzdušňovací trubice, nemůže dále docházet k dalšímu přítoku kapaliny do válce. Maximální měřitelná TVRL je dána výškou vzorkovací komory (vzdáleností mezi dnem vzorkovacího válce a odvzdušňovací trubicí). Rychlost zapouštění válce musí být dostatečně pomalá na to, aby z odvzdušňovací trubice stačil unikat vzduch.



Obr. 25 Fáze činnosti vzorkovacího válce při odběru vrstvy ropných látek z hladiny podzemní vody

Změna elektrické vodivosti

Změnu v elektrické vodivosti lze zaznamenat pouze na fázovém rozhraní ropná látka-voda. Úroveň hladiny lze určit pouze jejím rozvířením při zanoření sondy nebo změřením rozhraní ropná látka-vzduch jiným měřidlem. Správné výsledky lze při měření získat pouze tehdy, je-li fázové rozhraní ropná látka-voda zjišťováno pohybem sondy směrem nahoru, tedy směrem z vody do ropných látek. V opačném případě (měření odshora dolů) vzniká na čidle při průniku sondy ropnými látkami film, který omezuje následný kontakt sondy s vodou. Tato metoda je vhodná spíše jako doplněk pro měření termistorovými a fotoelektrickými měřidly.

Termistorová měřidla

Je využito měření tepelné vodivosti jednotlivých fází k zjištění fázových rozhraní voda-ropná látka a ropná látka-vzduch. Princip měření termistorovým čidlem je založen na tom, že v neproudící kapalině jsou ztráty tepla úměrné tepelné vodivosti kapaliny.

Fotoelektrická měřidla

Metoda využívá optických jevů na rozhraní fází. Vhodným indikátorem rozhraní je fotoodpor osvětlovaný žárovkou. Změna optických vlastností prostředí se projevuje změnou elektrického proudu. Prochází-li zdroj světla i fotoodpor právě rozhraním fází, dopadá na fotoodpor nejméně světla, což se projevuje na měřícím přístroji nejmenší hodnotou proudu.

Jak termistorová, tak i fotoelektrická čidla jsou velmi přesná (desetiny mm) avšak nelze je použít k měření TVRL <1cm. Pro TVRL <1 cm je možné použít pouze vzorkovací válec.

Plováková měřidla

Metoda je založena na rozdílné hustotě ropných látek a vody. Toho je využito dvěma plováky rozdílných hmotností z nichž jeden plave na fázovém rozhraní ropná látka-vzduch a

druhý na fázovém rozhraní voda-ropná látka. Přesnost měření TVRL plováky je ze zmíněných metod nejnižší. Tato metoda je použitelná především pro TVRL >5 cm a ve vrtech, kde je prostor pro umístění plováků o průměru >100 mm.