

UČEBNÍ TEXT

K PŘEDMĚTU

G7401

METODY HYDROGEOLOGICKÉHO VÝZKUMU



TOMÁŠ KUCHOVSKÝ

ADAM ŘÍČKA

BRNO 2009

Učební text vznikl jako pomůcka pro studenty předmětu *G7041 „Metody hydrogeologického výzkumu“*, který je vyučován s dvouletou periodicitou na Ústavu geologických věd Přírodovědecké fakulty v Brně. Text nenahrazuje plnohodnotná skripta, slouží jako pomůcka pro orientaci ve studovaných tématech, jeho hlavním cílem je definovat základní pojmy a metodické postupy, které budou detailně probírány na přednáškách.

Historie hydrogeologického výzkumu je poměrně mladá. Jakožto aplikovaná geologická věda vzniká hydrogeologie prakticky až ve druhé polovině 20. století. V souvislosti se stále rostoucími požadavky na zajištění potřebného množství podzemních vod k pitným i technologickým účelům, a to z hlediska množství i kvality, rostou nároky na přístrojové vybavení, ale i kvalitu hydrogeologa který s nimi pracuje, který má změřená data vyhodnotit a interpretovat.

Lidská civilizace je na vodě závislá a lidé odedávna měli empirické znalosti o vyhledávání a využívání zdrojů vod, podobně používali jednoduchá pozorování pro posouzení jejich kvality. Historický vývoj přístrojů souvisí s vývojem lidské civilizace a nároky na měření jednotlivých parametrů podzemních, zpočátku však především povrchových vod. Řada přístrojů, vyvinutá zpočátku pro sledování vodních stavů povrchových toků, byla později upravena pro účely sledování vod podzemních.

Nejstarší údaje o měření povrchových vod jsou z období starého Egypta – z doby 3000 – 5000 př.n.l. jsou datovány značky na březích Nilu, které sloužily k měření vodních stavů na Nilu. Podrobný výčet metod pro vyhledávání míst vhodných pro hloubení studní podává v 1.stol.př.n.l. Vitruvius - jedná se o geobotanické metody, ale i o metody založené na kondenzaci vodních par v místech s vyšší vlhkostí v půdách.

V Evropě prakticky nedošlo k progresi metod ani přístrojů až do období renesance. Stopovacími zkouškami a konstrukcí jednoduchých přístrojů pro měření průtoků a rychlostí proudění se mimo jiné zabýval i Leonardo da Vinci, který však své poznatky neshrnl do spisu; zůstaly po něm jen skicy a nákresy přístrojů.

K dalšímu rozvoji přístrojů dochází až v 18. století, kdy se objevují moderní srážkoměry, Halley definuje na základě měření srážek a výparu z vodní hladiny teorii o oběhu vody na Zemi. S rozvojem námořní dopravy se zavádí registrační a jednorázové přístroje na měření úrovní hladin vod v řekách, měří se rychlosti proudění vod v korytech pomocí prvních hydrometrických vrtulí.

Specializovaná technika se však objevuje až s rozvojem hydrogeologie jako vědy. Hydrogeologické přístroje pak již nejsou jen obdobou přístrojů pro měření povrchových vod, ale jsou konstruována přímo pro použití ve vrtech při známých specifikách, kterými se liší podzemní vody od vod povrchových. Zcela specifická technika je potom spojena s průzkumem v kontaminační hydrogeologii.

Obecnými zásadami měření se zabývá *metrologie*. Celosvětově existuje síť národních metrologických ústavů, v České republice je to Český metrologický ústav. Národní ústavy spravují tzv. *etalony* nejvyšších řádů. Ty mají za úkol uchovávat co nejpřesnější definici měrné veličiny (např. délkové, hmotnostní, apod.). Ve všech podnicích, jejichž zisk souvisí s měřením, musí být uchovávány podnikové etalony. Ty slouží jako kontrolní měřicí přístroje, ke kterým se srovnávají nebo *kalibrují* provozní měřicí přístroje. Podobně je vhodné i v hydrogeologické praxi mít k dispozici etalony, a to zejména pro kontrolu délky pásma hladinoměrů, kontrolu měření teploty, kontrolu měření průtokoměrů, apod. Je třeba mít na paměti, že všechny provozní přístroje se vlivem času a používáním opotřebují a snižuje se přesnost jejich měření. U hladinoměrů například dochází k prodlužování délky pásma – proto je nutné pomocí etalonu délku pásma pravidelně kontrolovat. V opačném případě se může stát, že hydrogeolog bude vymýšlet sáhodlouhé teorie o pozvolném nástupu hladiny podzemní vody ve všech vrtech a studních, které byly hladinoměrem měřeny.

Všechny přístroje můžeme obecně rozdělit do 2 kategorií:

- 1) indikační přístroje
- 2) registrační přístroje.

Indikační přístroje ukazují nebo udávají okamžitou hodnotu měřené veličiny. *Přístroje registrační* chronologicky zaznamenávají změny měřené veličiny, zobrazení okamžité hodnoty u nich není podstatné.

Významnou vlastností měřících přístrojů je jejich *přesnost*. Přesností přístroje rozumíme jeho schopnost stanovit údaje blízké *pravé hodnotě veličiny*. Pravá hodnota veličiny je definována jako absolutně přesná hodnota veličiny za daných podmínek – tzn., že například u délky by byla definována s přesností na mnoho řádů. V praxi je pravá hodnota veličiny prakticky nezjistitelná, proto že pracuje s pojmem *konvenčně pravé hodnoty*, což je hodnota blížící se pravé hodnotě měřené veličiny natolik, že rozdíl mezi nimi můžeme pro daný účel měření považovat za zanedbatelný.

Kontrolu přesnosti přístroje bychom měli vždy provádět pomocí etalonu nebo měřícího přístroje, který pracuje s přesností minimálně o 1 řád vyšší. Např. u hladinoměrů, u kterých je přesnost ± 1 cm, bychom měli přesnost kontrolovat pásmem s přesností $\pm 0,1$ cm, tedy 1 mm. Jako základní vlastnost měřícího přístroje je definována chyba jeho měření. Ta ukazuje rozdíl mezi naměřenou a konvenčně pravou hodnotou. Udává se buď jako absolutní, nebo relativní. Absolutní chyba je udávána přímo v jednotkách, které jsou měřeny – u hladinoměru by to bylo např. 0,2 mm. Relativní chyba se udává v procentech – jako podíl absolutní chyby a konvenčně pravé hodnoty (proto se může relativní chyba lišit podle naměřené hodnoty, většinou se však pohybuje pouze v setinách procent nebo dosahuje ještě nižších hodnot).

Další základní vlastností přístrojů je jejich *citlivost*. Citlivost je pro danou hodnotu určena přírůstkem proměnné veličiny a příslušným přírůstkem měřené veličiny. U přístrojů se stupnicemi je definována jako podíl délky dílku stupnice a jeho hodnoty, u digitálních přístrojů je to změna hodnoty vyvolávající změnu nejmenšího digitu na displeji.

Rozlišovací schopnost přístroje (práh citlivosti, práh pohyblivosti) je zpravidla vyšší než citlivost přístroje. Je to nejmenší změna měřené veličiny, která vyvolá zjistitelnou změnu

údaje na přístroje. U digitálních přístrojů je citlivost shodná s rozlišovací schopností, u přístrojů se stupnicí bývá většinou vyšší. Např. u klasických průtokoměrů je rozlišovací schopnost velmi malá (pozorovatelná změna vychýlení ručičky), avšak citlivost přístroje je větší.

Významnou vlastností měřících přístrojů, které musíme před vlastním měřením v terénu věnovat pozornost, je *rozpětí přístroje*. Je to rozmezí měřené veličiny, kterou je schopen přístroj zaznamenat a především zobrazit.

Provozními podmínkami rozumíme rozmezí přírodních podmínek, které ovlivňují měření dané veličiny, za kterých je přístroj schopen udávat měřenou veličinu s požadovanou přesností. U některých přístrojů je přesnost měření rozdělena právě v závislosti na podmínkách. Např. klasické průtokoměry jsou kalibrovány na viskozitu běžné vody. Za atypických teplotních podmínek nebo při vysoké mineralizaci vody by bylo měření zatíženo větší chybou, než je chyba přípustná. Podobně jsou definovány provozní podmínky např. u přístrojů pro elektrochemická měření, apod.

1. CHYBY MĚŘENÍ

Vznik chybných měření doprovází každé terénní práce. Důležité je vědět, jak s chybnými hodnotami pracovat, jak získat hodnoty co nejbližší konvenčně pravým hodnotám, případně jak chyb ze souboru dat eliminovat.

Nahodilé chyby jsou takové, jejichž hodnota i znaménko se při velkém počtu měření téže hodnoty dané veličiny za stejných podmínek mění nepředvídaným způsobem. Nahodilé chyby lze eliminovat pouze na základě statistického vyhodnocení souboru měření po skončení měření. Tyto chyby vykazují typicky Gaussovo rozdělení. Za konvenčně pravou hodnotu je vhodné považovat aritmetický průměr všech hodnot, při vyloučení chyb hrubých. Nevýhodou je jednoznačně to, že při terénních pracích zpravidla nemáme možnost měřit danou veličinu opakovaně a získat reprezentativní soubor dat, který by bylo možné statisticky vyhodnotit. Opakovaně se měří veličiny např. při měření průtoků pomocí stopovacích zkoušek s jednorázovou injektáží roztoku, naopak opakované měření např. hloubky hladiny podzemní vody ve vrtu se neprovádí.

Systematické chyby jsou takové, které mají za též podmínek stejné absolutní hodnoty i znaménko, případně se mohou měnit podle určitého zákona. Tento typ chyb je způsoben měřicím přístrojem nebo prostředím. Systematické chyby je možné opravit kontrolním měřením pomocí etalonů nebo měřících přístrojů vyšších řádů, nebo pomocí kalibrování přístrojů. Typickým příkladem jsou např. chybně stanovené hodnoty pH při použití nekalibrovaných přístrojů (platí pro všechny elektrochemicky stanovované parametry), chyby plovákových hladinoměrů (jsou kontrolovány elektrokontaktními hladinoměry), chyby běžných průtokoměrů kontrolované objemovým měřením s použitím kalibrovaných nádob, apod.

Hrubé chyby jsou takové, které přesahují rozmezí nahodilých chyb. Jsou způsobeny nesprávným měřením, špatným odečtením měřené hodnoty, záměnou rozsahu stupnice, apod. Hrubé chyby je možné ze souboru dat odstranit logickým zhodnocením souboru hodnot, nebo opakovaným kontrolním měřením. Hrubé chyby musíme ze souboru dat vyloučit, případně můžeme chybnou hodnotu nahradit hodnotou opravenou.

Jak již bylo zmíněno, nevýhodou při vyhledávání a odstraňování chybných hodnot ze souboru naměřených dat je zejména nedostatek opakovaných měření téže veličiny na téže objektu ve stejném nebo blízkém čase. Proto můžeme reálně uvažovat o statistickém vyhodnocení dat pro eliminaci chyb zejména u hydrodynamických zkoušek, měření hladin nebo průtoků u dlouhodobě exploatovaných objektů, případně při dlouhodobém sledování koncentrací ukazatelů při používání stejné metodiky vzorkování, apod. V ostatních případech se bohužel musíme uchýlovat k opakovaným kontrolním měřením, což vnáší zbytečné finanční nároky do ceny průzkumných prací.

2. MĚŘENÍ HLADIN PODZEMNÍCH A POVRCHOVÝCH VOD

Měření hloubek hladin podzemních a povrchových vod je základní a klíčovou terénní prací každého hydrogeologa, musíme mu tedy věnovat prvořadou pozornost. Uvědomme si, že v podstatě všechny úvahy o proudění podzemních vod, o množství zásob podzemních vod, komunikaci podzemních a povrchových vod, nebo o transportu látek vyžadují právě i interpretace dat získané měřením hloubek hladin a jejich vyhodnocením. Přístroje pro měření hladin označujeme jako *hladinoměry*. Podle způsobu měření můžeme hladinoměry klasifikovat na:

- 1) hladinoměry pro jednorázová měření
- 2) hladinoměry indikační bez dálkového přenosu údajů
- 3) hladinoměry indikační s dálkovým přenosem
- 4) hladinoměry registrační bez dálkového přenosu údajů
- 5) hladinoměry registrační s dálkovým přenosem

Toto dělení hladinoměrů je spíše technické. Při jednorázovém měření v terénu pracujeme zpravidla s hladinoměry indikačními bez dálkového přenosu. Naopak do dlouhodobě sledovaných objektů se zpravidla umísťují hladinoměry registrační. Dálkový přenos dat není v současnosti technicky komplikovaný, promítá se však do celkové ceny přístroje. Přístroje s dálkovým přenosem dat se tak používají především tam, kde by nefunkčnost nějakého prvku mohla znamenat závažná rizika (např. konstantní snížení hladiny v sanačně čerpaných vrtech, požadovaná čerpaná množství z vodárensky exploatovaných objektů, apod.).

Podstatně větší význam má rozdělení hladinoměrů podle druhu čidla. Základní princip funkce jednotlivých čidel by měla znát každý hydrogeolog, protože může významně ovlivnit výběr hladinoměru vhodného pro specifické účely a podmínky ve zvodních a také rozhodující měrou kvalitu získaných dat. Podle druhu čidla dělíme hladinoměry na:

- 1) hladinoměry plovákové
- 2) hladinoměry akustické
- 3) hladinoměry manometrické
- 4) hladinoměry Elektrokontaktní
- 5) hladinoměry kapacitní
- 6) hladinoměry pneumatické
- 7) hladinoměry bezdotykové

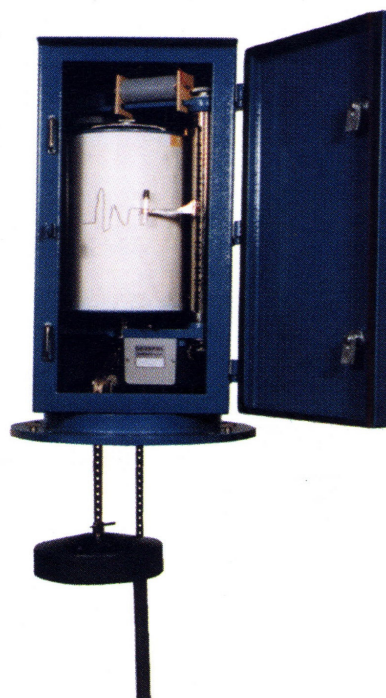
Akustické hladinoměry jsou konstrukčně velmi jednoduché, při kontaktu s hladinou vydávají zvuk. Příkladem je Rangova píšťala, což je kovová trubka na obvodu opatřená miskovými žlábkami vzdálenými od sebe 1 cm a připevněná na pásmo. Při ponoření do vody

vzduch uniká z píšťaly a vydá tón. Nevýhodou Rangovy píšťaly je to, že přesná hloubka se určuje podle hloubky ponoření píšťaly, což indikuje voda zachycená ve žlábkách po obvodu píšťaly. Opakované měření je tedy možné pouze pokud se žlábky vysuší, píšťala je tedy určena jen pro jednorázová měření, nevýhodou je také malá přesnost měření (1 - 2 cm).

Na území ČR jsou často používány i *plovákové hladinoměry*, přestože jsou konstrukčně i co do přesnosti získaných výsledků zastaralé. Nejčastěji používanými plovákovými hladinoměry jsou především hladinoměry registrační. Označují se též jako limnigrafy a jsou jimi osazeny dlouhodobě sledované vrty ČHMÚ, případně jiné sledované objekty, ve kterých není nutné použít měřicí přístroje s vyšší přesností. Princip plovákového hladinoměru je jednoduchý – přístroj obsahuje plovák spojený lankem s protizávažím. Lanko prochází přes měrné kolečko, které se otáčí podle pohybu plováku. Měrné kolečko je spojeno s registračním přístrojem, který ukazuje okamžitou hodnotu hloubky hladiny, případně je pohyb plováku přenášen na zapisovací zařízení (tužku), které se pohybuje vertikálně podle pohybu plováku. Součástí přístroje je dále buben s namotaným papírem, který se otáčí pomocí hodinového strojku, a tužkou je chronologicky zaznamenávána hloubka hladiny. Přesnost těchto plovákových hladinoměrů závisí především na kalibraci, která se provádí jednorázovými měřeními, nejčastěji s použitím elektrokontaktních hladinoměrů. Přesnost plovákových hladinoměrů může být až kolem 0,1 cm.

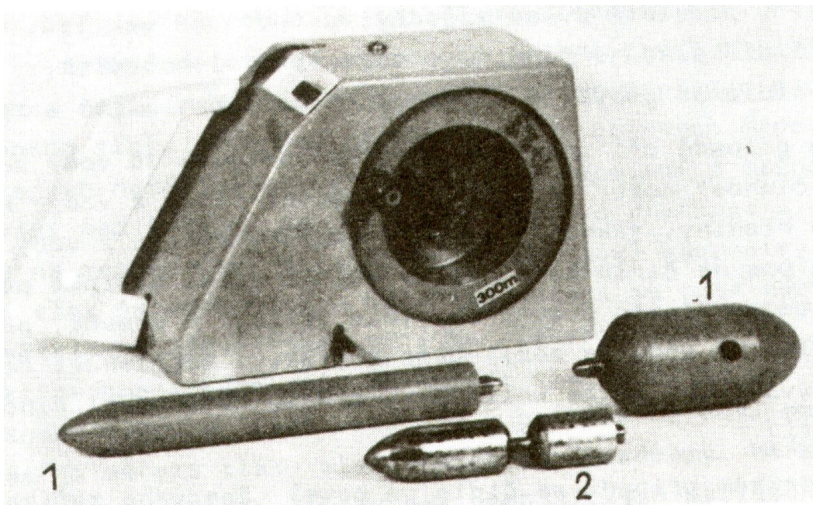


Obr. 2.1a: Plovákový hladinoměr (ve vrtu)



Obr. 2.1b: Limnigraf

Mechanické hladinoměry jsou rovněž konstrukčně zastaralé a mají nižší přesnost měření (kolem 1 cm). Používají se spíše výjimečně, nejčastěji v objektech se silně kontaminovanou podzemní vodou (např. s výskytem LNAPL's), kde dojde k nevratnému znečištění hladinoměru, a tento je pak nepoužitelný v objektech s nekontaminovanou podzemní vodou. Mechanický hladinoměr obsahuje závaží, které je připevněno na závěsném lanku. Setrvačnick udržuje konstantní rychlost sestupu závaží a lanka; při nárazu na hladinu se změní tah v lanku a dojde k aretaci hladinoměru. Na číselníku, který je spojen s bubnem na němž je namotáno lanko, potom odečteme hloubku hladiny. Mechanické hladinoměry jsou použitelné pouze pro jednorázová měření.

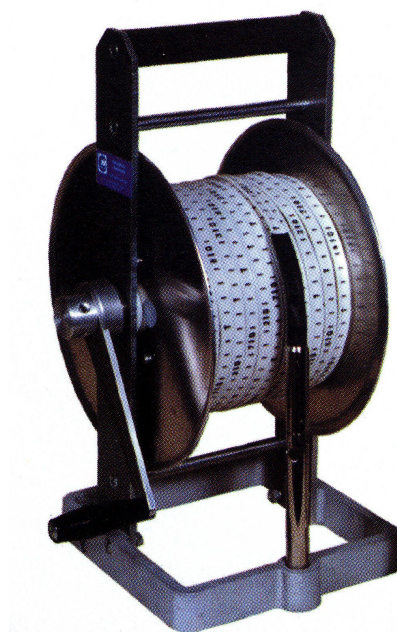


Obr. 2.2: Mechanický hladinoměr

Nejpoužívanějšími hladinoměry jsou v dnešní době jednoznačně *hladinoměry elektrokontaktní*. Jsou konstrukčně jednoduché, spolehlivé, při správném používání dostatečně přesné a cenově snadno dostupné. Elektrokontaktní hladinoměr obsahuje pásmo namotané na bubnu. Pásmem jsou vedeny navzájem izolované dráty napojené na bateriový zdroj. K vodivému spojení může dojít jen přes vnitřní hrot a plášť kovové koncovky pásma (špička hrotu odpovídá nule na měrném pásmu) ve vodivém prostředí (elektrolytu). Protože podzemní voda zpravidla obsahuje polárně rozpuštěné látky v koncentracích umožňujících vodivé spojení, dojde při ponoru hrotu ke vzniku vodivého spojení, což je signalizováno akustickým signálem a opticky. Konduktivita vody potřebná ke vzniku vodivého spojení je minimálně 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, většina podzemních i povrchových vod tuto podmínku splňuje. Elektrokontaktní hladinoměry se vyrábějí s různými délkami pásma, nejčastěji od 20 do 200 m. Hladinoměry mají přesnost kolem 0,1 cm, používány jsou zejména při jednorázových měřeních hloubek hladin. Elektrokontaktní hladinoměry je možné použít i při průběžných měřeních, tato měření však mají nižší přesnost. Posun čidla k hladině zajišťuje elektromotor; čidlo sleduje hladinu buď v rozmezí 2 bodů (vzdálených od sebe cca 2 cm – to je zároveň přesnost měření), nebo je čidlo spouštěno z výchozího bodu k hladině a potom se opět vrátí do výchozího bodu.



Obr. 2.3a: Elektrokontaktní hladinoměr (20m)

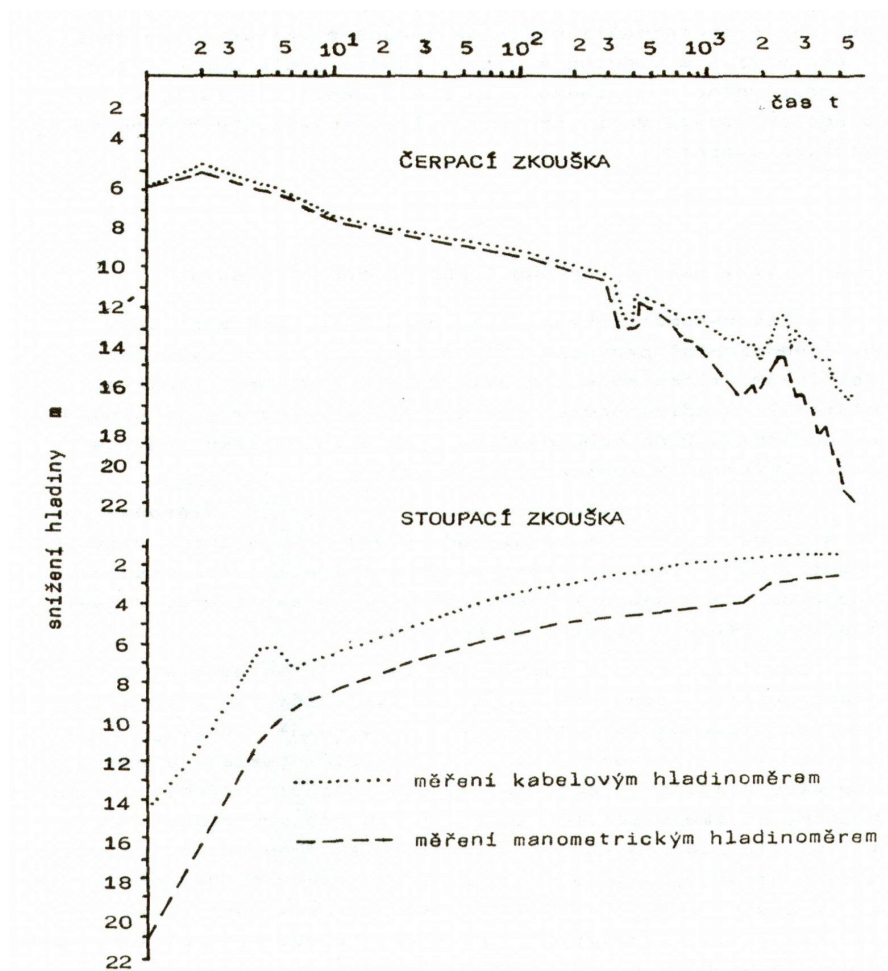


Obr. 2.3b: Elektrokontaktní hladinoměr (200 m)

Velmi přesné a často používané jsou *manometrické hladinoměry*. Jejich principem je měření tlaku ve zvodněném prostředí v určité hloubce pod hladinou, tlak se potom přepočítává přímo na úroveň hladin podzemní vody (není třeba pracovat s měřením hloubky hladiny a následným přepočtem na úroveň hladin, tak jako u všech předchozích typů hladinoměrů). Při kolísání hladiny se mění i tlak ve zvodni, který manometr zaznamená jako změnu tlaku. Tento typ přístrojů je vhodný pro jednorázová, především však pro průběžná měření úrovní hladin podzemních vod. Manometry obsahují celou řadu typů čidel – mechanická, elektromechanická, elektronická, atd. Manometry jsou nejpřesnější přístroje pro měření úrovní hladin podzemních vod (z cenově přijatelných přístrojů), mají jednoduchou obsluhu. Jsou to jediné přesně měřící přístroje v proplyněných vodách, protože měří přímo tlak a ne úroveň hladiny, která může být proplyněním ovlivněná. Často jsou používány při dlouhodobých čerpacích zkouškách, nebo při dlouhodobém čerpání jako registrační přístroje.

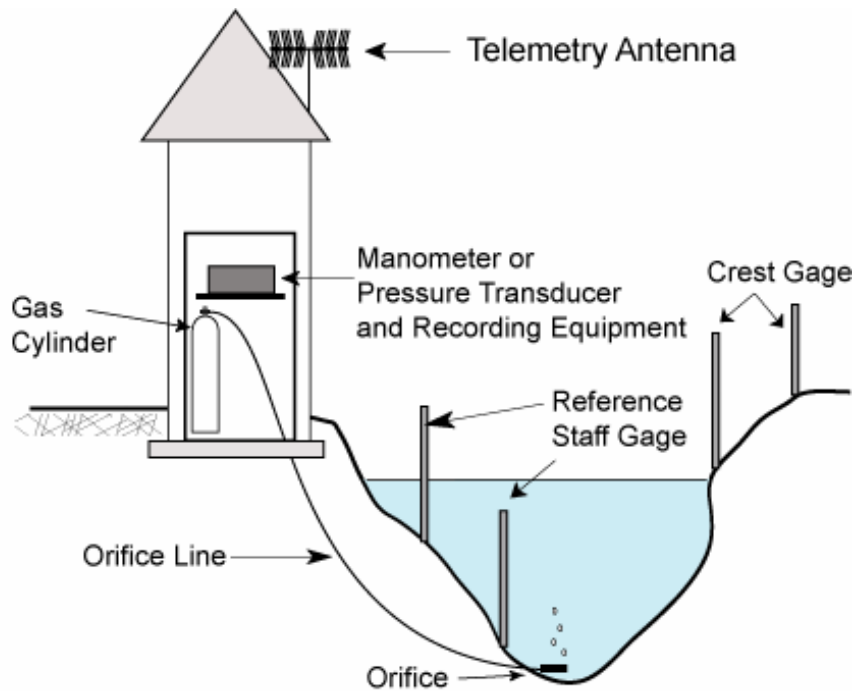


Obr. 2.4: Manometrický hladinoměr



Obr. 2.5: Srovnání měření hladin manometrickým a elektrokontaktním hladinoměrem v proplyněných minerálních vodách

Podobným přístrojem jsou *hladinoměry pneumatické*, které rovněž měří tlak. Měření tlaku se provádí v určité hloubce pod hladinou, kam se zapustí tenká trubička, z jejíhož ústí vycházejí bublinky plynu, který je injektován z tlakové nádoby z povrchu. Při ustanovení rovnováhy mezi tlakem plynu injektovaného do trubičky a tlakem plynu vycházejícího z trubičky je změřena hodnota tlaku ve zvodni. U proplyněných vod je nutné umístit ústí trubičky pod bodem evaze. Výhodou pneumatického hladinoměru je minimální prostor pro trubičku ve vrtu a minimální riziko poškození hladinoměru, což je naopak velké riziko u hladinoměru manometrických.



Obr. 2.6: Schéma pneumatického hladinoměru

Existuje i další řada hladinoměru, které používají pro měření specifická čidla, jakou jsou čidla termistorová, fotoelektrická, ultrazvuková, apod. Výhodou těchto hladinoměru je jejich velká přesnost a citlivost, nevýhodou je vyšší cena a často nižší mechanická odolnost čidla. Tyto typy hladinoměru se používají ve specifických případech, kdy je potřebné měřit hloubky hladiny s velkou přesností a zejména v případech, kdy je vyžadována registrace dat.