



Publikace je zpracována v rámci projektu: „Podpora dalšího vzdělávání pracovníků vodního hospodářství v Jihočeském kraji“, registrační číslo projektu: CZ.1.07/3.2.08/02.0043, který realizuje Výzkumné centrum VSERS, o.p.s.

Miloslav Šír

ZÁKLADY TECHNICKÝCH ZNALOSTÍ VE VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ

České Budějovice

2013

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.

Vzor citace: ŠÍR, M. Základy technických znalostí ve vodním hospodářství.
České Budějovice: Vysoká škola evropských a regionálních studií, 2013, 144 s.
ISBN 978-80-87472-50-7

Ediční rada VŠERS

Dr. Milena BEROVÁ; doc. JUDr. PhDr. Jiří BÍLÝ, CSc.;
Ing. Jiří DUŠEK, Ph.D.; RNDr. Růžena FEREBAUEROVÁ;
PhDr. Jan GREGOR, Ph.D.; PhDr. Lenka HAVELKOVÁ, Ph.D.;
doc. Ing. Marie HESKOVÁ, CSc.; doc. Dr. Lubomír PÁNA, Ph.D. (předseda);
doc. Ing. Oldřich PEKÁREK, CSc.; doc. Ing. Ladislav SKOŘEPA, Ph.D.

ZÁKLADY TECHNICKÝCH ZNALOSTÍ VE VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ

© Ing. Miloslav Šír, CSc., 2013

Vydavatel: Vysoká škola evropských a regionálních studií, o.p.s.

České Budějovice

ISBN 978-80-87472-50-7

Obsah

Úvod.....	5
1 Voda, život na Zemi a vodní stavby.....	7
2 Hydrologie a hydrologický cyklus.....	11
3 Světlo, teplo a teplota.....	21
4 Atmosférická voda.....	27
5 Vsakování vody do půdy.....	33
6 Povrchový a podpovrchový odtok.....	37
7 Půdní voda.....	39
8 Podzemní voda a základní odtok.....	47
9 Výpar vody z vodní hladiny, půdy a rostlin.....	55
10 Povrchová voda.....	61
11 Odtok z povodí.....	63
12 Hydraulika.....	71
13 Hydrostatický tlak.....	73
14 Proudění kapaliny a rovnice kontinuity.....	89
15 Hydrodynamický tlak.....	95
16 Proudění ve vodních tocích.....	101
17 Přepady a přelivy.....	105
18 Proudění vody v potrubí.....	107
19 Výtok z otvorů.....	109
20 Závěr.....	111
Příloha č. 1: Výpočet průtoku vody korytem – Chezyho rovnice.....	113
Příloha č. 2: Proudění v potrubí.....	117
Příloha č. 3: Výtok z otvorů.....	125
Příloha č. 4: Proudění přes přepady a přelivy.....	133
Literatura – hydrologie a hydraulika.....	141
Literatura – hydrotechnické stavby.....	142
Seznam zkratk.....	143

Úvod

Vodní hospodářství je činnost směřující k ochraně, využití a rozvoji vodních zdrojů a k ochraně před škodlivými účinky vod. K hospodaření s vodou slouží *vodní stavby*. Plánování, výstavba a provoz vodních staveb je složitá činnost, která vyžaduje přírodovědné a technické znalosti, týkající se vody.

Přírodovědné znalosti o vodě jsou náplní vědního oboru *hydrologie*, technické znalosti o vodě tvoří náplň disciplíny *hydrauliky*.

První část studijní opory je věnována základním hydrologickým poznatkům o koloběhu vody v přírodě. Jsou popsány jednotlivé druhy vod – voda atmosférická, povrchová, půdní a podzemní – a souvislosti mezi nimi. U každé z vod je nastíněn způsob, jakým se měří její oběh v přírodě. Zmíněna je energetická bilance krajiny a její souvislosti s vodním režimem. Je popsána transformace srážek na odtok a základní zákony, které ji řídí. Jsou vyjmenovány vlivy, kterými působí vodní stavby na jednotlivé vody a naopak, jak vody působí na konstrukce vodních děl.

Druhá část studijní opory přináší přehled základů hydrauliky. Jsou uvedeny vztahy pro výpočet hydrostatických a hydrodynamických sil, působících na konstrukce vodních staveb. Vysvětlují se zákony, které popisují proudění vody v otevřených korytech, na přelivech a přepadech a v potrubí. Jsou vysvětleny hydraulické základy typických měřících přístrojů, které se užívají pro hydraulická měření, jako jsou: diferenciální manometr, Pitotova trubice, Venturiho trubice, statická trubice, měrné přepady apod.

Výpočetní vzorce pro proudění korytem, proudění přes přepady a přelivy, proudění v potrubí a výtok z otvorů jsou obsaženy ve čtyřech přílohách. Slouží k základní orientaci v hydraulických výpočtech běžných prvků hydrotechnických staveb.

Je přiložen seznam literatury rozdělený podle oborů – hydrologie, hydraulika a hydrotechnické stavby. Při tvorbě studijní opory byly využity bohaté internetové zdroje, jejich seznam by přesahoval účel tohoto orientačního textu. Obrázky byly zkompileovány z volně přístupných internetových zdrojů.

1 Voda, život na Zemi a vodní stavby

Základní fyzikální vlastnosti vody

Voda je mezi kapalinami výjimkou z hlediska závislosti objemu na teplotě. Zahřívá-li se voda z 0 °C na 4 °C, zmenšuje se její objem a její hustota roste. Ve 4°C voda dosahuje max. hustoty 1000 kg na kubický metr. Teprve od teploty 4 °C výše se objem vody zvětšuje a hustota se zmenšuje. Tato odlišná závislost teploty a hustoty vody v porovnání s ostatními kapalinami je *hustotní anomálie vody*. Hustota kapalné vody je větší, než hustota ledu, což je rovněž anomálie. Hustotní anomálie vody má zásadní význam pro přežití vodních živočichů po dobu zimy. Chladnější (a lehčí) voda u hladiny zmrzne dříve než u dna a vytvoří tak příkrov, který chrání život v tekuté vodě u dna. Rozpínání tuhé fáze v zimním období zase vede k erozi hornin.

Kritická teplota vody je 374,15 °C. Mezi touto teplotou a teplotou varu se vyskytuje jako vodní pára nebo přehřátá kapalina. Stabilní kapalinou je voda mezi 100 °C a 0 °C. V trojném *bodu vody* (0,01 °C při tlaku 0,61 kPa) mohou existovat v rovnováze všechna tři skupenství. Pod bodem tuhnutí se vyskytuje jako led nebo podchlazená voda. Podchlazená voda při sebemenším podnětu rychle krystalizuje.

Měrné teplo (4184 J.K⁻¹.kg⁻¹, kapalina při 20 °C) vody je třikrát větší, než má většina ostatních látek. Je také dvakrát větší u kapalné vody než u ledu nebo páry. To způsobuje její poměrně velkou tepelnou setrvačnost, které se využívá k transportu tepla (např. v ústředním topení). Je základem termohalinní cirkulace v oceánech, kterou se rozvádí velké množství tepla po celé Zemi. Např. sever Evropy podstatně ohřívá Golfský proud.

Specifické skupenské teplo (333,7 J/g při tání ledu a 2255,5 J/g při varu vody) má voda neobvykle veliké (téměř jako stříbro). To například umožňuje rostlinám účinné ochlazování výparem vody z listů.

Voda má vysoké *povrchové napětí* (72,75 mJ/m² při 20 °C). Závislost povrchového napětí na teplotě kupodivu nemá anomálii, která by odpovídala hustotní anomálii.

Viskozita vody je veličina charakterizující vnitřní tření. Závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Větší viskozita znamená větší brždění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Viskozita je závislá na teplotě. *Dynamická viskozita* vody při 20 °C je 1,002.10⁻³ Pa.s. Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se označuje jako *kinematická viskozita*.

Voda je zejména díky své malé molekule, polarizaci a vysoké *dielektrické konstantě* výborným rozpouštědlem, hlavně pro polární a iontové sloučeniny a soli. Díky tomu voda rozpouští skalní podloží a minerální složku půdy.

Druhy vodních staveb

Vodními stavbami se ovlivňuje pohyb vody v malém hydrologickém cyklu za účelem:

- Využívání vod (zásobování vodou, hydroenergetika, plavba...).
- Ochrany před nepříznivými účinky vod (protipovodňová ochrana, ochrana proti suchu...).

Přehled vodních staveb

Vodní stavba je obecně používaný termín pro každou stavbu sloužící k:

- zadržování (přehrada, nádrž, jez...),
- jímání (studna, jímací galerie...),
- vedení (tok, vodovod, kanalizace...)
- nebo jinému nakládání s *povrchovou*, či *podzemní* vodou.

Mezi vodní stavby patří zejména:

- přehrady, hráze, vodní nádrže, jezy a zdrže,
- stavby, jimiž se upravují, mění nebo zřizují koryta vodních toků,

- stavby vodovodních řadů a vodárenských objektů včetně úpraven vody, kanalizačních stok a kanalizačních objektů včetně čistíren odpadních vod, jakož i stavby k čištění odpadních vod před jejich vypouštěním do kanalizací,
- stavby na ochranu před povodněmi,
- stavby k vodohospodářským melioracím, zavlažování a odvodňování pozemků,
- stavby, které se k plavebním účelům zřizují v korytech vodních toků nebo na jejich březích,
- stavby k využití vodní energie a energetického potenciálu,
- stavby odkališť,
- stavby sloužící k pozorování stavu povrchových nebo podzemních vod,
- studny,
- stavby k hrazení bystřin a strží,
- jiné stavby potřebné k nakládání s vodami.

Vodní dílo

Vodní dílo je vodní stavba, kterou explicitně uvádí vodní zákon č. 254/2001 Sb.

Kontrolní otázky:

- *Co je hustotní anomálie vody?*
- *Jaké jsou druhy vodních staveb?*
- *Jak se liší vodní stavba a vodní dílo?*

2 Hydrologie a hydrologický cyklus

Hydrologie (z řečtiny: Υδρολογία, Υδωρ+Λογος, Hydrologia, studium vody) je věda zabývající se pohybem a rozšířením vody na Zemi. Studuje velký a malý hydrologický cyklus. Má úzkou vazbu na hydrometeorologii (voda v atmosféře) a oceánografii (voda v oceánech).

Obory hydrologie

1. Podle předmětu zkoumání:

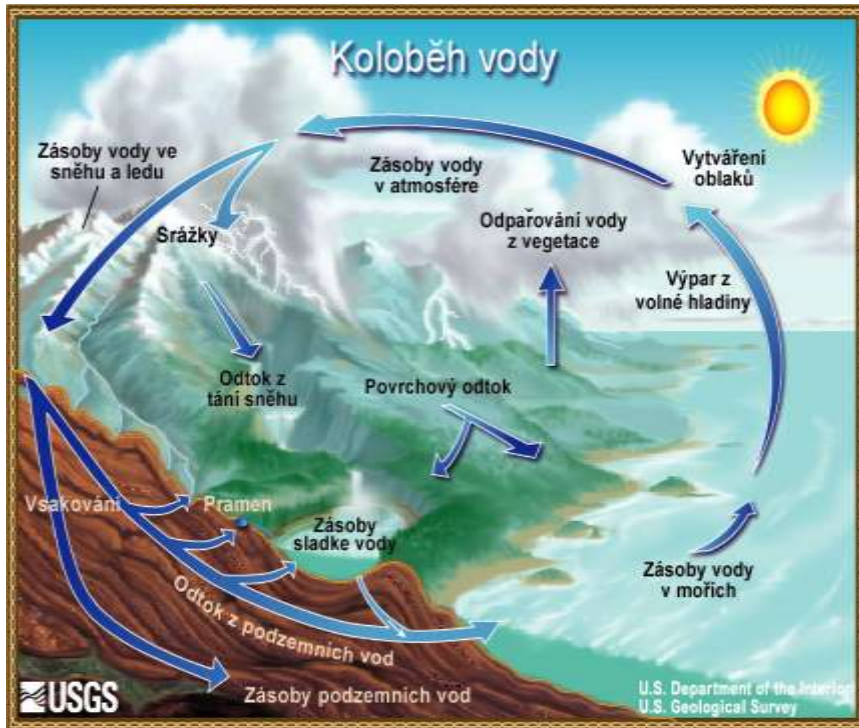
- Hydrometrie – hydrologická měření (srážky vodní a sněhové, vodní stavy a průtoky, poloha hladiny podzemní vody, zásoba vody ve sněhu, výpar...),
- hydrografie – popis vodních těles (toky, nádrže, prameny, mokřady, vodonosné vrstvy...)

2. Podle výskytu vody:

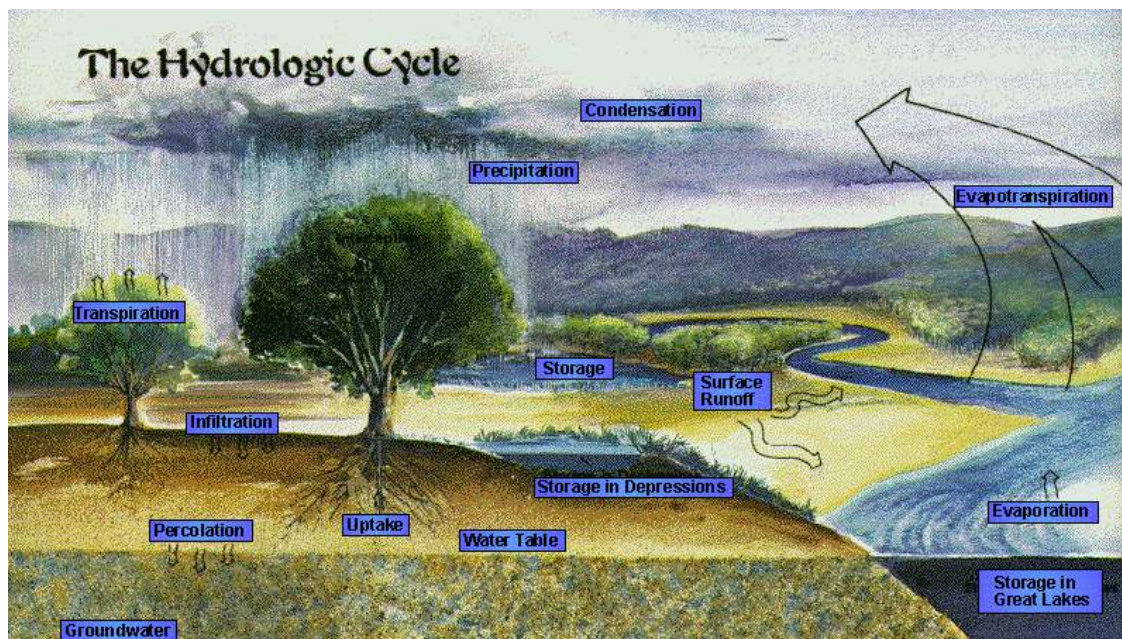
- hydrometeorologie – voda v atmosféře,
- hydrologie povrchových vod – voda v tocích a nádržích (limnologie), voda v povrchovém odtoku,
- hydroopedologie – voda v nenasycené a nasycené zóně půdy, asi do hloubky 120 cm,
- hydrogeologie – voda v geologickém podloží,
- oceánografie – voda v oceánech.

Velký oběh vody

Velký – oběh vod mezi oceánem, atmosférou a pevninou ukazuje Obr. 1. Velký oběh je celozemsky uzavřený – množství vody na Zemi je stálé.



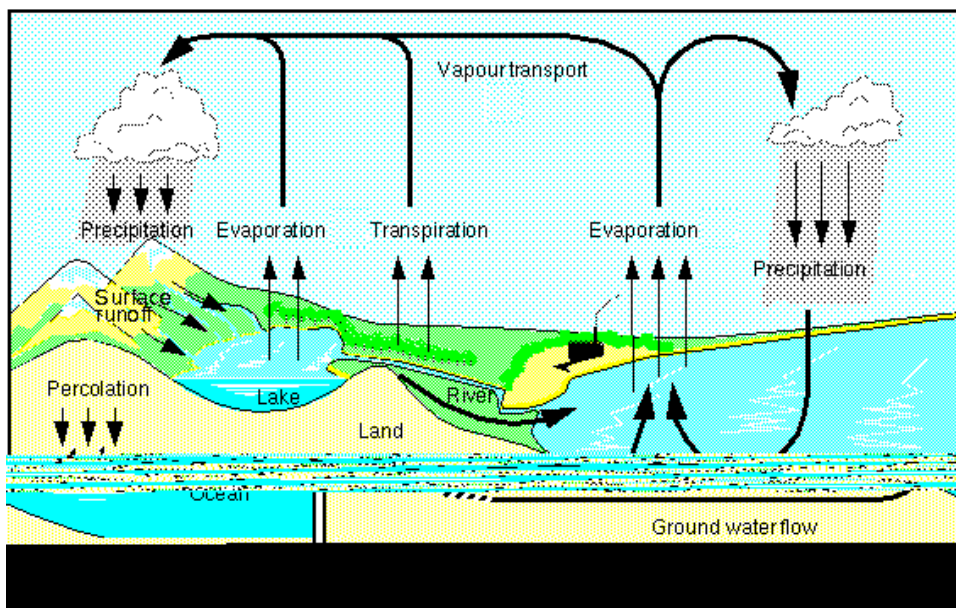
Obr. 1: Oběh vody na Zemi



Obr. 2: Malý oběh vody

Malý oběh vody

Malý – oběh vod mezi atmosférou, půdou, rostlinami, podzemím a vodními toky znázorňuje Obr. 2. Malý oběh není uzavřený – množství vody kolísá v závislosti na atmosférické cirkulaci. Doplňování vody do malého cyklu zajišťují srážky (Obr. 3). Voda z malého cyklu uniká do oceánu.



Obr. 3: Výpar a srážky

Co pohání cirkulaci atmosféry

Cirkulace atmosféry okolo celé Země pohání:

- sluneční energie,
- teplotní rozdíly povrchu,
- Coriolisova síla – otáčení Země okolo osy,
- gravitace – nestejná hustota teplého a studeného vzduchu,
- výměna tepla s oceánem.

Sluneční energie

Sluneční energie ve formě světla dopadá na horní vrstvy atmosféry a proniká atmosférou na zemský povrch. Z celkového příkonu světla:

- 30 % ohřeje přímo atmosféru průchodem záření,
- 70 % dopadne jako světlo na zemský povrch.

Na zemském povrchu se část světla odrazí a vyzáří zpět ve formě světla do atmosféry. Zbylá část světla se na povrchu pohltí, změní se vlnová délka ze světelné na tepelnou, teplo se pak z povrchu vyzáří do atmosféry ve formě tepelného záření. Toto teplo je dominantní příčinou ohřívání přízemní vrstvy atmosféry.

Rozdíl teplot zemského povrchu

Rozdílné povrchy se ohřívají při stejném dopadu světla na rozdílnou teplotu. Tmavší povrchy jsou teplejší než povrchy studené. Povrchy porostlé rostlinami jsou při intenzivním oslunění chladnější než povrchy holé.

Na teplejších místech vzduch stoupá do výšky. Na uvolněné místo se doplňuje vzduch z okolí. Výsledkem je vítr.

Voda na povrchu krajiny

Na povrchu krajiny voda obíhá:

- v transpirujících rostlinách (malá zásoba vody, voda vystupuje v důležité roli chladiwa při výparu, rostliny jsou čerpadla vody z půdy do atmosféry),
- na holém povrchu (poměrně malý výpar),
- na hladině vody (poměrně velký výpar),
- v půdě (velká zásoba vody, slouží jako zdroj vody pro transpiraci rostlin).

Hlubinná podzemní voda

- Je v zásadě mimo hydrologický oběh.
- Doplnjuje se velice málo průsakem srážkové vody.

Povrchová voda

- Je to voda obsažená v tocích a nádržích.
- Uniká z pevniny do oceánu sítí vodních toků.
- Vypařuje se do atmosféry.
- Doplnjuje se srážkami.

Transpirace rostlin

- Rostliny se chrání před přehřátím nad 25 °C výparem vody – transpirací.
- Obvyklá denní transpirace je ve vegetační sezóně 2 až 3 mm/den.
- V kořenové zóně půdy je obvyklá dispoziční zásoba vody (retenční kapacita) asi 60 mm vody, tudíž půdní voda postačí na krytí transpirace rostlin po 20 až 30 dní.
- Když neprší delší dobu, vzniká vegetační sucho a horko (nechladí se). V krajním případě může dojít k odumření rostlin.

Holý povrch krajiny

- Výpar z holého povrchu je malý oproti výparu z rostlin, protože přes prázdné póry se děje výpar pomalou difúzí.
- Proto je nad holým povrchem podstatně větší teplota vzduchu než nad transpirujícím porostem (transpirační výpar odebírá teplo na skupenskou přeměnu vody v páru).
- Horký vzduch stoupá do výše, tam se ochladí a vznikne přívalová srážka, případně lokální povodeň.

Voda v půdě

- Obsahuje 10x více vody než nádrže a vodní toky na území ČR.
- Typická retenční kapacita je 60 – 90 mm na horách a 120 – 160 mm v nížinách.
- Doplnjuje se vsakem dešťové nebo sněhové vody.
- Odebírá se na transpiraci rostlin.
- Prosakuje do podzemní vody.
- Na svazích je zdrojem podpovrchového odtoku.

Vodní režim půdy a krajiny

Vyjadřuje časovou posloupnost objemu vody a toků vody. Sleduje se:

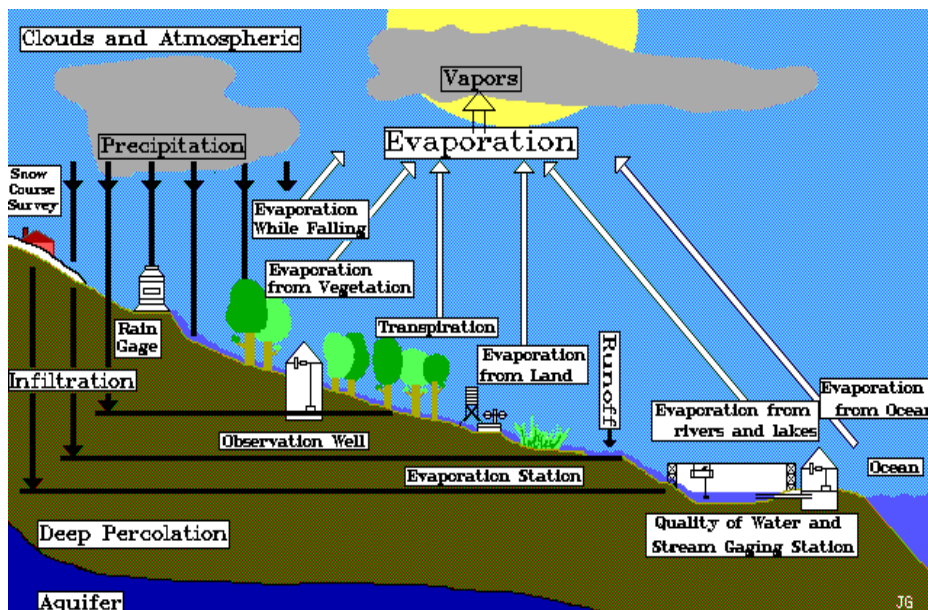
- Déšť nebo sníh.
- Výpar a transpirace.
- Však do půdy a zásoba vody v půdě.
- Výtok z půdy do podzemí.
- Povrchový odtok po půdě do toků.
- Odtok půdní a podzemní vody do toků.
- Zásoba vody v tocích a nádržích.

Jak se měří oběh vody

K měření oběhu vody se používají:

- Srážkoměry, totalizátory.
- Hladinoměry a průtokoměry na tocích a v nádržích.
- Vlhkoměry a tenzometry v půdě.
- Měřiče mízního toku vody ve stromech.
- Lyzometry měří výpar vody z půdy a porostů.
- Mlhoměry zachycují vodu z mlhy a nízké oblačnosti.

Měření oběhu vody je schematicky zachyceno na Obr. 4.



Obr. 4: Měření oběhu vody

Atmosférická voda a oběh tepla

Atmosférická voda:

- Je v plynném skupenství (pára – není vidět), v kapalném skupenství ve formě kapének (oblaka a mlha) a v pevné formě (sníh, ledové kroupy) převážně v troposféře.
- Do atmosféry se dostává ze Země:
 - výparem kapalné vody (z hladiny nebo z mokré půdy, řízeno fyzikálními zákony výparu),
 - sublimací z ledu a sněhu (změna skupenství z pevného na plynné bez kapalného přechodu),
 - transpirací rostlin (řízeno rostlinami).
- Z atmosféry vypadává na Zem díky srážení (kondenzaci) ve formě:
 - kapalné: déšť, rosa, sedimentace mlhy (mlha je vidět),

- pevné: sníh, kroupy, námraza.

Výpar (nebo sublimace) a kondenzace:

- Výpar: skupenské teplo výparu (nebo sublimace) 2260 kJ/kg je množství tepla, které se spotřebuje na fázovou přeměnu 1 kg vody v páru. Při výparu se prostředí ochlazuje.
- Kondenzace: opačný děj než výpar, při kondenzaci vodní páry se prostředí ohřívá.
- Výpar (nebo sublimace) a kondenzace jsou vratné děje – kolik tepla se spotřebuje na výpar, tolik se ho uvolní při kondenzaci.

Atmosférická voda – oběh tepla:

- procesy kondenzace a výparu (nebo sublimace) tvoří kondenzačně-evaporační cyklus,
- při něm se cyklicky spotřebovává teplo na skupenskou přeměnu vody v páru (prostředí se proto chladí) a uvolňuje teplo (prostředí se proto ohřívá) při přeměně páry ve vodu.

Povrchová voda

- Hladina povrchové vody je v přímém kontaktu s atmosférou (hladiny toků a nádrží),
- voda se z hladiny odpařuje do atmosféry,
- na hladinu dopadají atmosférické srážky,
- obíhá v kondenzačně-evaporačním cyklu,
- významně ovlivňuje teplotu prostředí,
- povrchová voda prosakuje do půdy a doplňuje tak zásobu vody v půdě.

Půdní voda

- Zásoba půdní vody se zvětšuje průsakem povrchové vody,
- zásoba půdní vody se zmenšuje výtokem vody do podzemní vody, výparem do atmosféry a odběrem vody na transpiraci rostlin,

- obíhá v kondenzačně-evaporačním cyklu,
- objem půdní vody na území ČR asi 10 x převyšuje objem povrchové vody.

Podzemní voda

- Zásoba podzemní vody se zvětšuje přítokem půdní vody,
- zásoba podzemní vody se zmenšuje vzlínáním do půdy, případně umělým odběrem (čerpáním) a výtokem do povrchových vod (do toků a nádrží).

Souvislosti mezi vodami

- Atmosférická voda doplňuje zásoby vody povrchové, půdní a zprostředkovaně přes půdu i podzemní vody,
- půdní voda doplňuje průsakem vodu podzemní,
- podzemní voda doplňuje vzlínáním vodu v půdě,
- podzemní voda vytéká do povrchových vod,
- povrchová a půdní voda doplňuje výparem, sublimací a transpirací atmosférickou vodu.

Pohon hydrologického cyklu slunečním zářením

- Sluneční záření ohřívá převážně povrch Země (asi 70 % tepelného příkonu ze Slunce),
- od teplého povrchu se ohřívá atmosféra,
- atmosférické teplo spolu se slunečním zářením způsobuje výpar vody z povrchu-vých a půdních vod do atmosféry,
- kondenzací páry v atmosféře vznikají srážky, které dopadají zpět na Zem,
- procesy kondenzace a výparu (nebo sublimace) tvoří kondenzačně-evaporační cyklus.

Hydrologické extrémy

Hydrologické extrémy v malém hydrologickém cyklu často způsobují poruchy v kondenzačně-evaporačním cyklu:

- při dostatku povrchové a půdní vody vyrovnává kondenzačně-evaporační cyklus průběh teplot v čase a prostoru,

- při nedostatku povrchové a půdní vody kondenzačně-evaporační cyklus nefunguje a selhává proto vyrovnávání teplot v čase a prostoru,
- důsledkem jsou dlouhá období sucha, vichřice, prudké dešťové srážky a povodně.

Kontrolní otázky:

- *Jaký má charakter velký oběh vody?*
- *Čím se vyznačuje malý oběh vody?*
- *Co pohání cirkulaci atmosféry?*
- *Co je to kondenzačně-evaporační cyklus?*
- *Jaké přístroje se používají k měření oběhu vody?*
- *Jaké se rozeznávají vody v oběhu?*
- *Jak vznikají hydrologické extrémy?*

3 Světlo, teplo a teplota

Teplo a teplota

Teplo je míra změny vnitřní energie systému při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Je třeba rozlišovat dvě různé veličiny:

- Teplo popisuje změnu stavu tělesa. Jednotka v soustavě SI je Joule, značka J. Nejnižší možná teplota se nazývá absolutní nula $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota popisuje stav tělesa. Jednotkou v soustavě SI je Kelvin, značka K. Odvozená jednotka je stupeň Celsia, značka $^\circ\text{C}$.

Světlo a teplo

Sluneční záření je elektromagnetické záření vydávané Sluncem. V soustavě SI se udává ve W/m^2 . Příkon záření dopadajícího na povrch zemské atmosféry činí $1\,373 \text{ W/m}^2$. Toto množství se nazývá solární konstanta. Příkon slunečního záření na zemský povrch se měří jako globální radiace.

Zemský povrch část dopadlého slunečního záření pohltí a část odrazí (Obr. 5). Odrazivost se udává jako albedo. Je to poměr odraženého slunečního záření k množství dopadajícího záření podle vztahu (1). Odražené záření má vlnovou délku velice podobnou dopadlému záření.

$$a = \frac{O}{G} \tag{1}$$

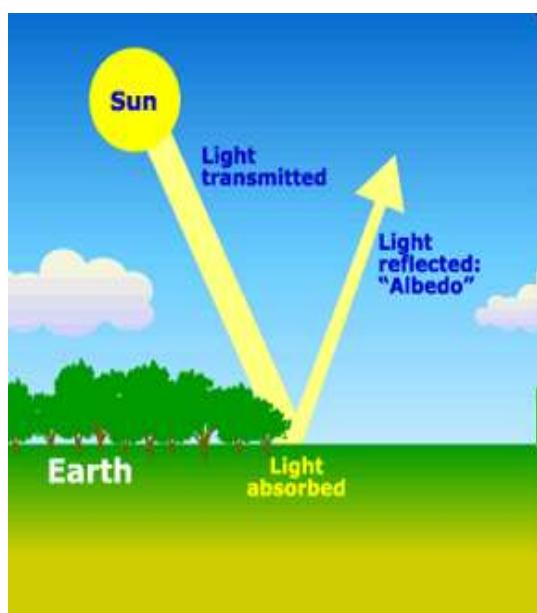
Ve vztahu (1) značí a (–) – albedo, O (W/m^2) – odražené záření, G (W/m^2) – dopadlé záření (globální radiace).

V ČR dopadá na vodorovný povrch globální radiace:

- v letním poledni max. 1 000 až 1 050 W/m²,
- v zimním poledni max. 300 W/m²,
- při souvisle zatažené obloze max. 100 W/m²,
- v noci (při úplňku) max. 0,01 W/m².

Některé hodnoty albeda:

- průměrné albedo Země 0,37 až 0,39
- čerstvý sníh až 0,9
- led 0,20 až 0,40
- holá půda 0,05 až 0,45
- zelená hustá vegetace 0,15 až 0,25
- voda 0,03 až 1 podle úhlu dopadu záření



Obr. 5: Pohlcení a odraz slunečního záření na Zemi

Světlo má krátkou vlnovou délku, je vyzařováno ze Slunce s vysokou povrchovou teplotou (asi 6700 °C), snadno prochází atmosférou. Atmosféru ohřívá jen málo. Při odrazu od Země se jeho vlnová délka téměř nemění.

Teplo má dlouhou vlnovou délku, vyzařuje ze zemského povrchu o nízké povrchové teplotě (asi 15 °C). Nesnadno prochází atmosférou od zemského povrchu do vesmíru. Atmosféru proto významně ohřívá, což je podstatou skleníkového efektu. Světlo pohlcené zemským povrchem se z něj zpět vyzařuje jako teplo. Pohlcení tudíž mění vlnovou délku z krátké na dlouhou. Světlo odražené zemským povrchem zůstává světlem.

Měření teplot vzduchu, půdy a vody

Pro měření teplot se používají teploměry:

- Kapalinový teploměr – teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny (rtuť, líh apod.).
- Bimetalový teploměr – teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá bimetalový pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku přístroje.
- Plynový teploměr – teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popř. závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku.
- Odporový teploměr – teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá závislost elektrického odporu vodiče nebo polovodiče na teplotě (běžný typ Pt 100).
- Termoelektrický teploměr (termočlánek) – teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá termoelektrický jev (elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu se významně podílejí na vedení tepla). Změnou teploty spoje dvou různých kovů se mění vzniklé termoelektrické napětí.
- Radiační teploměr (infrateploměr) – teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření.

Měření globální radiace

Globální radiace se měří radiometrem. Radiometr je přístroj užívaný k zjištění množství energie pocházejícího ze zdroje záření. V principu se tok záření odvozuje z rozdílu teplot černého a bílého tělesa ve vakuu, na něž padá ten samý tok radiace.



Obr. 6: Radiometr

Energetická bilance povrchu krajiny

Na povrchu krajiny se stanovuje, jak se povrchem pohlcená globální radiace rozdělí na tok tepla do z povrchu do půdy, tok tepla z povrchu do atmosféry a na latentní teplo spotřebované výparem. Energetickou bilanci vyjadřuje vztah (2). Toky vody a tepla na zemském povrchu porostlém vegetací znázorňuje Obr. 7

$$G \cdot (1 - a) = P + H + LE \quad (2)$$

Ve vztahu (2) značí G (W/m^2) – příkon globální radiace, a (–) – albedo, $G \cdot (1 - a)$ (W/m^2) – globální radiace pohlcená povrchem, P (W/m^2) – tok tepla z povrchu do půdy, H (W/m^2) – tok tepla z povrchu do vzduchu, LE (W/m^2) – latentní teplo spotřebované na výpar vody (příp. transpiraci rostlin).

Výměna tepla mezi atmosférou a půdou

Ohřívání přízemního vzduchu teplem vyzařovaným ze Země:

- Teplota přízemního vzduchu se mění téměř současně s tím, jak se mění teplota povrchu Země.
- S rostoucí výškou se zmenšují denní výkyvy teploty i průměrná teplota vzduchu.

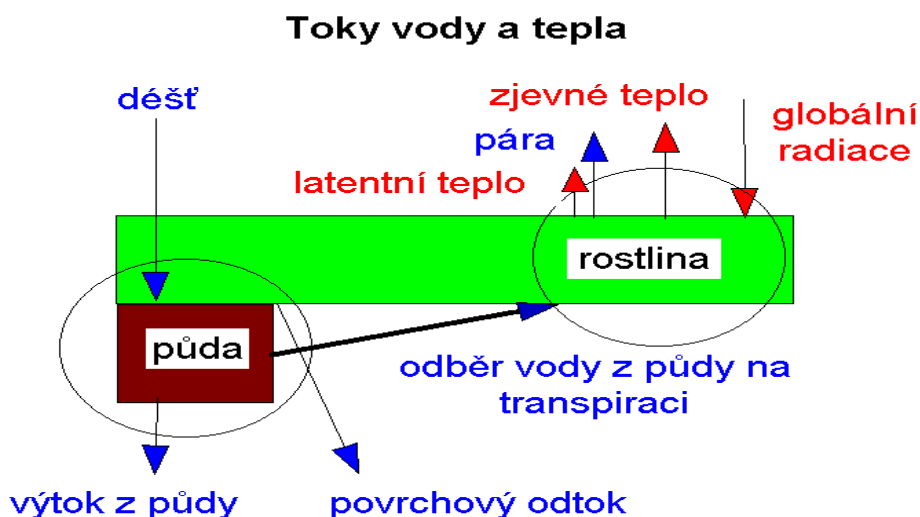
Na Obr. 8 je znázorněno kolísání teplot vzduchu a půdy v letním měsíci.

Ohřívání–chlazení půdy teplem pronikajícím z povrchu Země:

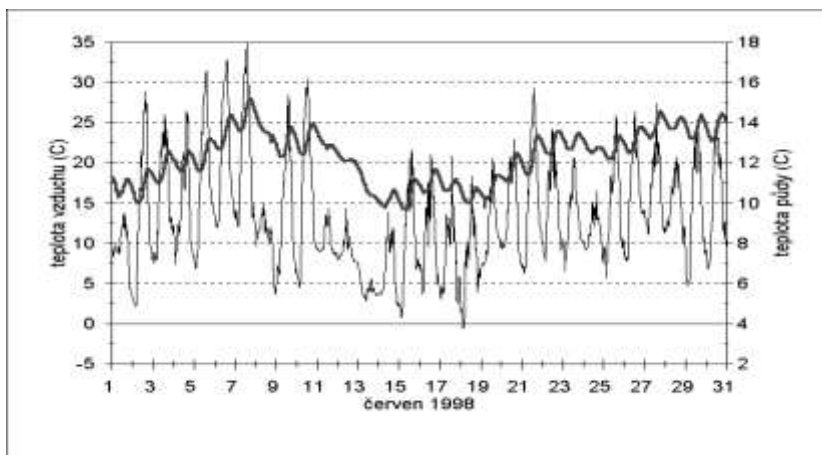
- Teplota půdy se mění opožděně vůči tomu, jak se mění teplota povrchu Země. Zpoždění je tím větší, čím větší je hloubka měření.
- Teplota půdy je v létě podstatně nižší než teplota povrchu Země, v zimě je to naopak.
- S rostoucí hloubkou se zmenšují denní výkyvy teploty i průměrná teplota půdy.

Ohřev půdy teplem ze zemského jádra:

- Zdrojem tepla, které ohřívá půdu zespoda, je žhavé zemské jádro.
- Tento tok tepla je malý ale celoročně stálý. Zaručuje, že v zimě půda nikdy nezamrzne hlouběji, než je nezámrazná hloubka (asi 100 cm v nížinách a 140 cm na horách).



Obr. 7: Toky vody a tepla na zemském povrchu porostlém vegetací



Obr. 8: Průběh teplot vzduchu ve výšce 200 cm nad zemí a půdy v hloubce 15 cm v červnu roku 1998

Vliv vodních staveb na toky tepla v krajině

Vodní stavby mohou měnit albedo na velkých plochách (vodní hladina místo porostu nebo holé půdy), a tak měnit ohřev krajiny pohlcenou globální radiací.

Vodní stavby mohou měnit zásobu vodu v půdě (odvodněním nebo závlahou), a tak měnit poměr mezi zjevným teplem (ohřívá vzduch) a latentním teplem (spotřebuje se na výpar, transpiraci rostlin).

Velkoplošné odvodnění půd může způsobit oteplení klimatu. Velkoplošná závlaha může vyústit v ochlazení klimatu.

Kontrolní otázky:

- *Jak se odlišuje teplo a teplota?*
- *Čím se měří teplota?*
- *Čím se měří globální radiace?*
- *Co je to albedo?*
- *Co ovlivňuje energetickou bilanci povrchu krajiny?*

4 Atmosférická voda

Druhy srážek

1. podle skupenství:

- Kapalné: déšť, mrholení, rosa.
- Tuhé: sníh, mrznoucí a zmrzlý déšť, mrznoucí mrholení, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, kroupy, ledové jehličky, zmrzlá rosa, jíní, námraza, ledovka.
- Smíšené: směs kapalných a tuhých srážek

2. podle usazování:

- Vertikální: padají na povrch shora – déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, kroupy, ledové jehličky.
- Horizontální: usazují se na povrch ze všech stran – mlžná voda, rosa, jinovatka, námraza, ledovka.

Měření srážek

Srážky se měří jako množství kapalné vody na ploše. Často se vyjadřují ve výškovém tvaru jako výška vodní vrstvy (např. v mm) na vodorovném povrchu. Tuhé a smíšené srážky se nechají roztát a měří se rovněž množstvím kapalné vody. Horizontální srážky se rovněž vyjadřují na průmět do vodorovné plochy, i když obalují složitě členěné povrchy (např. stromy).

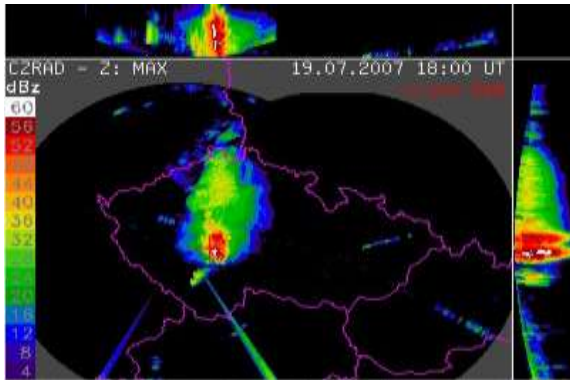
Co se měří:

- Doba trvání: od kdy, do kdy, jak dlouho (hod).

- Intenzita: množství kapalné vody za čas na jednotku vodorovné plochy ($\text{litr/m}^2/\text{hod} = \text{kg/m}^2/\text{hod} = \text{mm}/\text{hod}$), je to vlastně rychlost deště.
- Úhrn: celkové množství kapalné vody na jednotku vodorovné plochy za dobu trvání ($\text{litr/m}^2 \text{ kg/m}^2 = \text{mm}$).

Druhy měření srážek:

- Bodové měření: Měří se v malé plošce – bodě.
- Odhad plošných srážek: Na ploše je umístěna síť bodových měření, z nich je nutno sestavit odhad celkové srážky dopadlé na plochu (trojúhelníková metoda).
- Radarový odhad srážek (Obr. 9): Odhad množství vody v oblaku se získá přepočtem z radarové odrazivosti, časový krok měření je 10 minut, prostorové rozlišení 2krát 2 km.
-



Obr. 9: Radarový odhad srážek

Měření dešťových srážek

Srážkoměr je přístroj používaný v meteorologii a hydrologii k měření srážkových úhrnů a intenzity srážek. Záchytná plocha srážkoměru je 200 cm^2 nebo 500 cm^2 . Čím je záchytná plocha větší, tím je měření přesnější.

Ombrometr (Obr. 10) se používá k měření srážkových úhrnů. Je tvořen válcem s nálevkou, kterou jsou padající srážky sváděny do nádoby uvnitř válce. Úhrn se zjistí přelitím obsahu této nádoby do kalibrovaného odměrného válce.



Obr. 10: Ombrometr



Obr. 11: Ombrograf

Ombrograf (Obr. 11) umožňuje měřit srážkové úhrny kontinuálně. Srážky stékají do nádoby s plovákem, na plovák je napojeno registrační zařízení, které zapisuje na otáčející se papír. Takto vytvořený záznam se nazývá ombrogram, jedná se o průběh celkového množství srážek v čase, z něho se dá odvodit intenzita srážky.

Člunkový srážkoměr (Obr. 12) je moderní ombrograf. Zachycená srážka je sváděna na dělený překlápěcí člunek. Po naplnění jeho jedné poloviny příslušným objemem vody (odpovídajícím úhrnu srážek např. 0,1 mm) se člunek překlopí, čímž z první poloviny vyteče voda a srážka začne stékat do druhé poloviny. Překlopení je zaznamenáno spolu s uplynulým časem. Tak se určuje intenzita srážky. Z celkového počtu překlopení člunku za dobu deště se určuje celkový úhrn srážek. Člunkové srážkoměry se vyrábějí s různou záchytnou plochou (např. 200 cm² nebo 500 cm²).



Obr. 12: Člunkový srážkoměr

Měření sněhu

Výška sněhu se měří sněhovou latí (tyčí). Používají se latě pevné a přenosné. Pevné sněhoměrné latě jsou zapuštěny po nulu stupnice v zemi a většinou dosahují délky 2 až 3 metry. Jsou osazeny v síti meteorologických stanic. Přenosné latě se užívají pro expediční měření výšky sněhové pokrývky.

Vodní hodnota sněhové pokrývky je množství vody ve sněhové pokrývce. Vyjadřuje se ve výškovém tvaru v milimetrech. Zjišťuje se pomocí velké srážkoměrné nádoby nebo váhovým sněhoměrem.

Váhový sněhoměr je v podstatě úzký dutý válec dlouhý až 2 metry s ozubeným okrajem, který se zarazí do sněhové pokrývky až k půdě. Po vytažení ve válci zůstává odebraný sníh. Ten se zváží a váha sněhu se přepočte na výšku vrstvy vody.

Měření mlžné a oblačné vody

Voda ve formě malých kapiček volně poletuje vzduchem. Při nárazu na povrch se usadí a povrch smočí. Je-li povrch příliš mokrá, odkapávají z něj kapičky vody na zem. Takto vznikají pod lesními porosty *podkorunové srážky*.

Mlhoměr je zařízení, na kterém se usazuje mlžná a oblačná voda (většinou soustava strun). Usazená voda je svedena do srážkoměru, který je chráněn před vtokem dešťové vody. Pomocí srážkoměru se měří intenzita usazování vody. Z ní se určí úhrn usazené mlžné vody během mlžné události.

Rozeznávají se dva typy mlhoměrů:

- Aktivní mlhoměr – mlha se prohání pomocí ventilátoru soustavou strun.
- Pasivní mlhoměr – mlhu prohání soustavou strun pouze vítr.

Význam měření srážek pro vodní stavby

Na základě dlouhodobých měření srážek se určuje *návrhová srážka* jako hydrologický podklad pro návrh technického řešení vodního díla (návrhové srážky s uvedením intenzity, doby trvání a periodicity).

- Odvozuje se z ní návrhový průtok.
- Užívá se pro dimenzování kanalizace, odvodňovacích příkopů, kanálů, vodních toků apod.
- Návrhový průtok podstatně ovlivňuje konstrukci, funkci, bezpečnost provozu a cenu vodní stavby.

Kontrolní otázky:

- *Podle jakých kritérií se dělí srážky?*
- *Jak se odlišuje ombrograf a ombrometr?*
- *Jak je konstruován člunkový srážkoměr?*
- *Jak se měří výška sněhové pokrývky?*
- *Co je to vodní hodnota sněhu a jak se zjistí?*
- *Jak se měří depozice mlžné vody?*
- *K čemu se používá návrhová srážka?*

5 Vsakování vody do půdy

Infiltrace vody

Infiltrace je součástí koloběhu vody, jedná se o vsakování vody do půdy a propustných hornin. Infiltrace je nejdůležitějším způsobem vzniku podzemní vody (vedle kondenzací vodních par v půdě a kondenzací vodních par magmatu).

Infiltrace se dělí na přirozenou a umělou.

- Při přirozené infiltraci se vsakuje voda ze srážek, povrchových vod nebo z roztáleného sněhu.
- Umělá infiltrace je vsakování vyvolané umělým zaplavením povrchu země. Používá se např. pro získávání pitné vody v infiltračních polích.

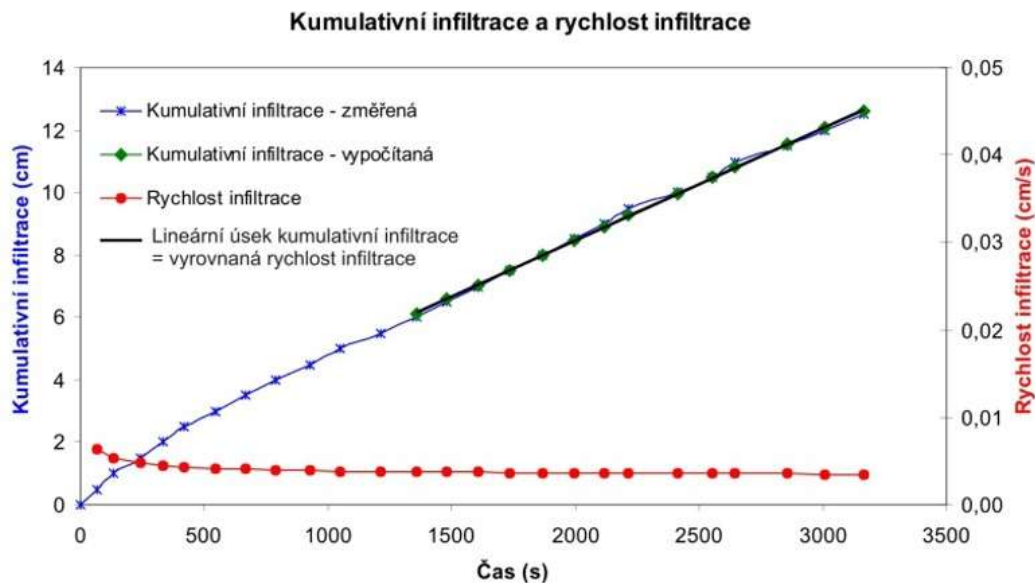
Břehová a dnová infiltrace:

- Při vsakování vody z řek, rybníků či nádrží dochází k infiltraci břehové a dnové.
- Jedná o průsak břehy a dnem.
- Průsak může být obousměrný – z nádrže do podloží i z podloží do nádrže (např. když se zvedne hladina podzemní vody).

Infiltrační křivka

Infiltrační křivka je průběh intenzity infiltrace vody v závislosti na čase (Obr. 13). Je to obdoba intenzity deště. Udává se ve stejných jednotkách (např. mm/min).

Kumulativní infiltrace je součtová čára infiltrační křivky (Obr. 13). Je to obdoba dešťového úhrnu. Udává se ve výškovém tvaru v milimetrech.



Obr. 13: Infiltrační křivka

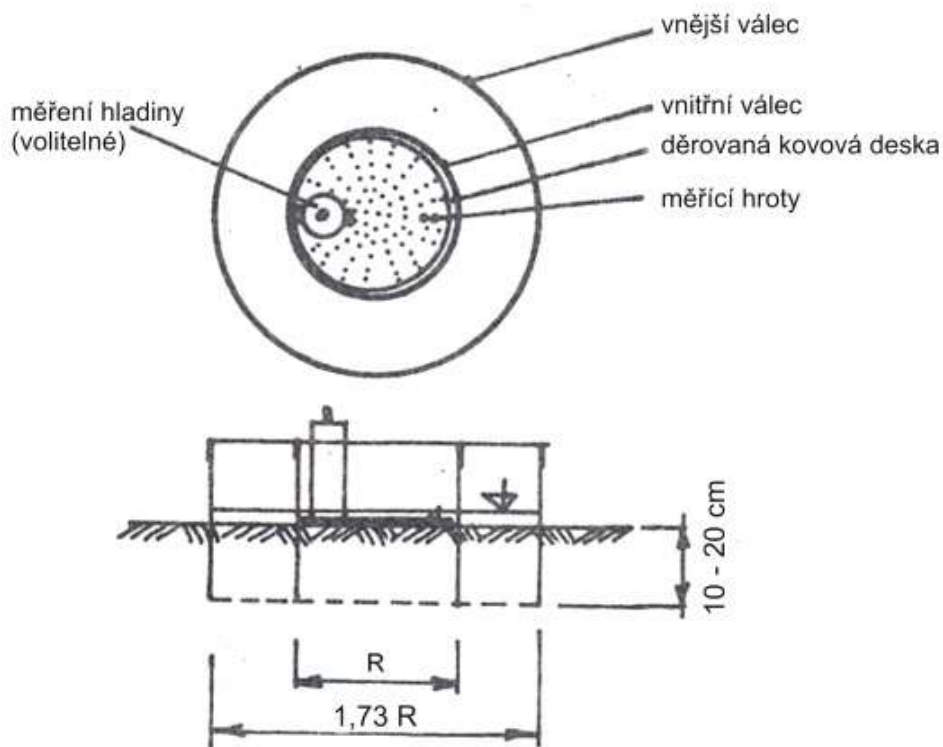
Měření infiltrace z výtopy a z postřiku

Infiltrační křivky se měří v terénních podmínkách ve dvou uspořádáních:

- Z výtopy, kdy je na půdě mělká vrstva vody. K měření se používá:
 - dvouválcový infiltrometr,
 - tlakový infiltrometr, podtlakový infiltrometr.
- Z postřiku, kdy se voda na půdu stříká. K postřiku se používá:
 - simulátor deště.

Dvouválcový infiltrometr se skládá ze dvou soustředných válců, které jsou zaraženy do země, a děrované vnitřní desky s měřicími hroty (Obr. 14). Měření se provádí ve vnitřním válci, vnější válec má za úkol jen zachovávat svislost proudnic pod válcem vnitřním při infiltraci. Uvnitř vnitřního válce je umístěna děrovaná kruhová deska se dvěma hroty, které slouží k odečítání poklesu hladiny. Deska také zabraňuje rozplavení zeminy při doplňování vody pro infiltraci. Válec se zaráží do hloubky cca 10–20 cm pod terén (je vhodné nejprve po obvodu válců rozříznout travní drn nožem, půda se tak méně rozruší), umístí se kruhová deska s hroty a do obou válců současně se nalije voda tak, aby ve

vnitřním dosahovala na vyšší hrot. V té chvíli se spustí stopky a měří se čas, za který poklesne hladina z úrovně horního hrotu na úroveň hrotu dolního. Za tuto dobu zasákne určité množství vody (v našem případě 500 ml). Ve chvíli dosažení dolního hrotu se odečte čas a dolije opět stejné množství vody z odměrné nádoby (500 ml). Ve vnějším válci se hladina udržuje na úrovni vnitřního válce. Změřená data se zaznamenávají do formuláře a vynesou se do grafu.



Obr. 14: Měření infiltrace dvouválcovou metodou

Průsaky a vodní díla

Infiltrace (průsak):

- Způsobuje nežádoucí přítok vody do stavebních jam.
- Je nebezpečným jevem, který znamená ztrátu vodotěsnosti hrází apod.
- Je základem veškerých průsaků, které ohrožují stabilitu hrází, břehů, násypů apod.

Kontrolní otázky:

- *Co je to infiltrace?*
- *Jak se měří infiltrační křivka?*
- *Popište dvouválcový infiltrometr.*
- *Čím je nebezpečný průsak pro vodní díla?*

6 Povrchový a podpovrchový odtok

Povrchový odtok a odtok ze saturace

Je-li intenzita infiltrace menší než je intenzita deště, pak nestačí všechna voda vsáknout do půdy. Nevsáklý přebytek vody stéká po půdním povrchu a vzniká *hortonovský odtok*. K hortonovskému povrchovému odtoku dochází takto:

- Intenzita deště překračuje infiltrační kapacitu půdy,
- tenká vrstva vody se utváří na povrchu a začíná pohyb vody dolů po svahu,
- tekoucí voda se akumuluje v povrchových depresích,
- po zaplnění deprese přetékají,
- vzniká povrchový odtok, který přechází do rýh a stružek, ty se spojují do toků, odtok vody z povrchu krajiny se zrychluje,
- následně rychle roste výška hladiny v toku.

Pokud voda zasákne do povrchové vrstvy půdy a přesytí ji, vzniká *odtok ze saturace*. Odtok ze saturace vzniká při menší intenzitě srážek než hortonovský odtok. K odtoku ze saturace dochází takto:

- Po vypadnutí srážek se většina vsákne do půdy a nastává *podpovrchový odtok* ve svrchní sklonité vrstvě půdy směrem dolů k toku,
- podél toku na úpatí svahů vzniká malá oblast nasycené půdy – *zdrojová zóna*,
- v případě, že na zdrojovou zónu spadnou další srážky, nevsakují se, ale odtékají povrchovým odtokem směrem k toku,
- v průběhu srážek se zdrojová zóna rozšiřuje směrem od toku do svahu,
- tam, kde zdrojová zóna narazí na půdu, v níž probíhá podpovrchový odtok, dojde k vývěru vody z půdy na povrch (*zpětný tok*) a voda teče povrchovým odtokem dolů k toku,

- po skončení srážek velmi rychle skončí povrchový odtok ze zdrojové zóny a zpětný tok, naopak velmi pozvolna klesá podpovrchový odtok.

Vodní eroze půd a zemin

Povrchový odtok, hortonovský i nehortonovský, způsobuje vznik *preferenčních cest odtoku* na povrchu krajiny mimo koryta stálých vodních toků. V preferenčních cestách odtoku často dochází k *vodní erozi půd* smyvem. Smyv se udává v tunách půdy na hektar za rok.

Eroze smyvem má dvě základní podoby:

- plošná – odnos půdy se děje po celé ploše pozemku,
- rýhová – odnosem půdy se vytvářejí na pozemku rýhy.

Za přípustný smyv se v dnešní době v ČR považuje:

- 1 t/ha/rok pro půdy do hloubky 30 cm,
- 4 t/ha/rok pro půdy do hloubky 60 cm,
- 10 t/ha/rok pro půdy hlubší než 60 cm.

V ČR je ohroženo 46 % rozlohy zemědělské půdy silnou vodní erozí.

Kontrolní otázky:

- *Za jakých podmínek vzniká povrchový odtok?*
- *Jak souvisí povrchový odtok s vodní erozí půd?*
- *Co značí slovo smyv?*

7 Půdní voda

Půdní voda

Půdní voda je voda obsažená v půdě bez ohledu na skupenství. Půdní voda obvykle nevytváří souvislou hladinu. Zabývá se jí hydroopedologie.

Podle vazby vody v půdě se rozeznávají tři základní kategorie:

- Voda adsorpční – pevně vázaná půdními částicemi. V kapalném stavu je prakticky nepohyblivá.
- Voda kapilární – ta část půdní vody, jejíž stav v půdě závisí na kapilárních silách. Pohybuje se jako kapalina vlivem kapilárních sil. Zvyšováním vlhkosti půdy se zvětšuje obsah této vody do té míry, že se stále více uplatňuje vliv zemské tíže, až vznikne voda gravitační.
- Gravitační voda – je ta část vody v půdě, jejíž pohyb a hydromechanické účinky jsou určovány převážně působením zemské tíže. Způsobuje hydrostatický tlak a vztlak! Chová se jako voda.

Pásma nasycení a aerace, hladina podzemní vody

Podle toho, zda póry půdy obsahují vzduch nebo vodu, se rozlišuje:

- Pásmo (zóna) nasycení (saturace). Další názvy: pásmo zvodnění, pásmo plného nasycení, pásmo gravitační podzemní vody. Je dole pod pásmem provzdušnění.
- Pásmo (zóna) provzdušnění (aerace). Další názvy: nenasyčené pásmo. Je nad hladinou podzemní vody nad pásmem nasycení.

Pásma nasycení a provzdušnění jsou od sebe oddělena obvykle volnou hladinou podzemní vody, na které je tlak rovnající se tlaku atmosférickému.

Výška pásma provzdušnění (aerační zóny) se řídí hloubkou půdního profilu, vodním režimem půdy a polohou hladiny podzemní vody.



Obr. 15: Voda v půdě

Voda v pásmu provzdušnění se dále dělí do tří pásem (Obr. 15):

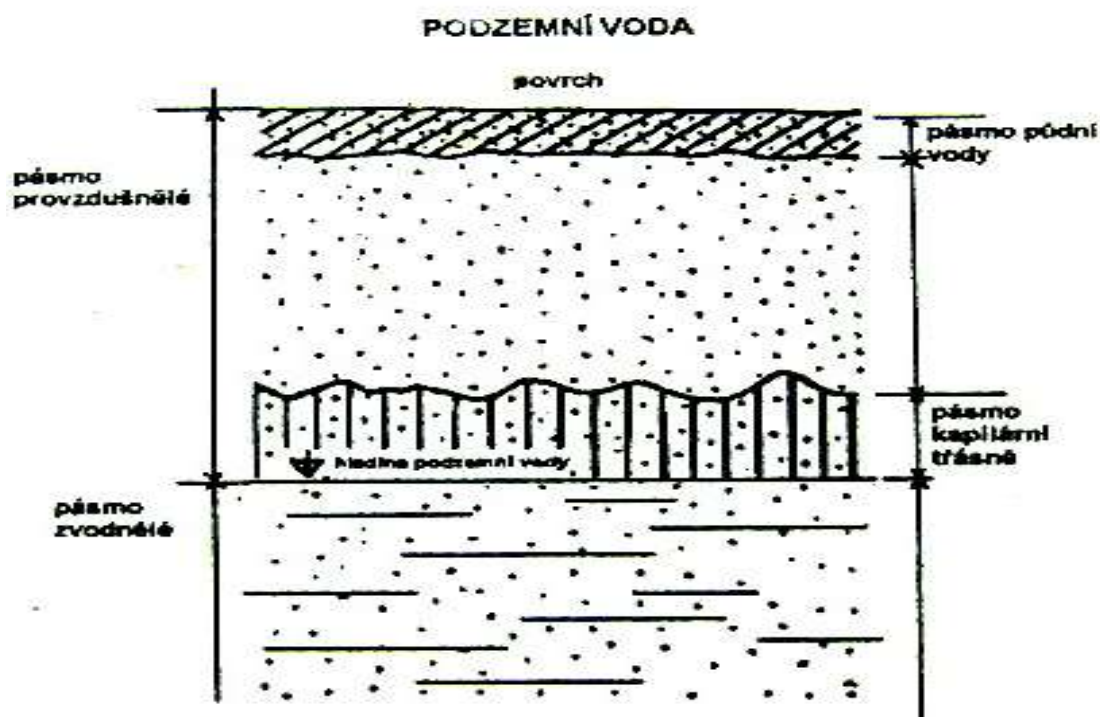
- pásmo zavěšené kapilární vody (také pásmo půdní vody),
- přechodné pásmo,
- pásmo kapilárně podepřené vody (nad hladinou podzemní vody).

Podepřená kapilární voda

Nad hladinou podzemní vody tvoří vztlínající voda podepřené kapilární pásmo (Obr. 16). Výška podepřené kapilárního pásma (kapilární zóny) nad hladinou podzemní vody nabývá velice rozdílných hodnot v závislosti na zrnitosti materiálu.

Výška kapilární zóny (m)

- štěrky do 0,03
- hrubé písky 0,03 – 0,10
- jemné písky 0,10 – 0,50
- hlinité písky 0,50 – 2
- sprašové hlíny 2 – 5
- hlíny 5 – 15
- jílovité zeminy 15 – 50
- jíly až přes 50



Obr. 16: Kapilární voda podepřená nad hladinou podzemní vody

Vlhkost půdy

Rozlišují se dva způsoby vyjádření vlhkosti:

- *Hmotnostní vlhkost* je dána poměrem hmotností vody v půdě k hmotnosti půdy s vodou a vzduchem.

- *Objemová vlhkost* je dána poměrem objemu vody v půdě k objemu půdy s vodou a vzduchem.

Měření vlhkosti:

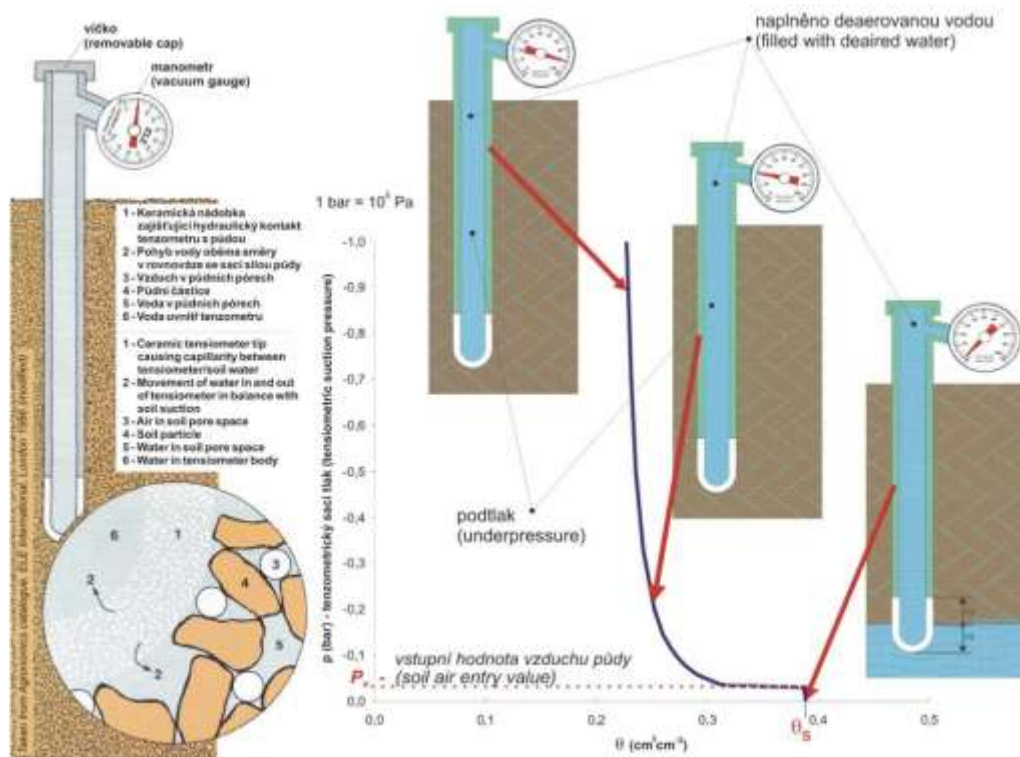
- Přímé: Měří se hmotnost (objem) vody) – metoda gravitační.
- Nepřímé: Měří se jiná veličina, která je s vlhkostí spjata známým způsobem – metody elektrické (vodivostní, odporová, dielektrická atd.), nukleární apod. Nepřímé měření se musí kalibrovat. To je přepočíst změřenou veličinu na vlhkosti pomocí známého kalibračního vztahu.

Gravitační metoda: Vzorek půdy daného objemu (obvykle 100 cm³, Kopeckého váleček) se zváží. Poté se půda vysuší (obvykle při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin) a vzorek se znovu zváží. Úbytek váhy je roven hmotnosti vody.

Tenzometrický tlak půdní vody

Voda obsažená v půdních pórech je napjatá vlivem kapilárních a jiných sil. Je v ní podtlak vůči tlaku atmosférickému. Tento podtlak se nazývá *tenzometrický tlak půdní vody*. Měří se *vodním tenzometrem*.

Vodní tenzometr se skládá z trubice, opatřené na spodním konci polopropustnou membránou (porézní keramickou nádobkou), na horním konci víčkem a vakuometrem (Obr. 17). Tenzometr je naplněn odvzdušněnou vodou a osazen v půdě. Voda může proudit póry v keramické nádobce ven z tenzometru do půdy a zase dovnitř. Když je okolní půda nenasycená vodou, půda vysává vodu z tenzometru, tím vzniká uvnitř tenzometru podtlak. Proudění vody z tenzometru ustává ve chvíli, kdy se vzniklý podtlak v tenzometru vyrovná sání půdy. Vakuometr v tom okamžiku ukazuje podtlak, kterým je poutána voda v půdě, tedy *tenzometrický tlak*.

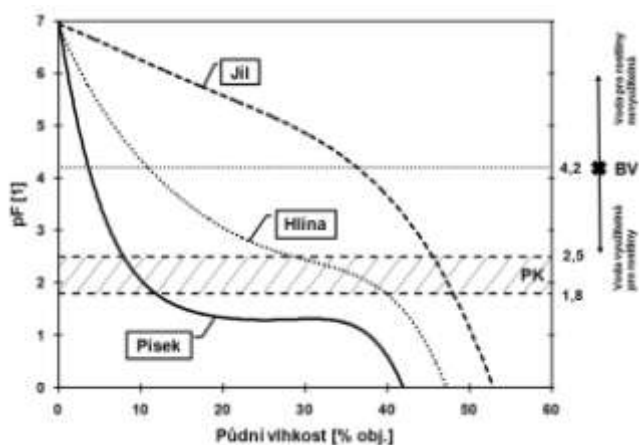
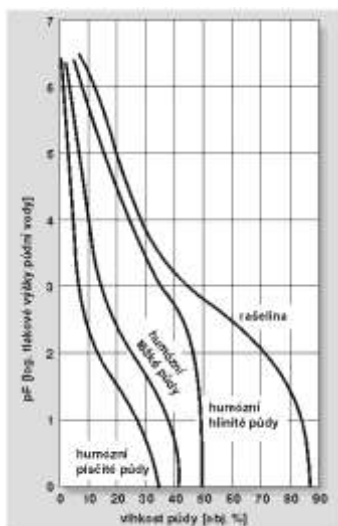


Obr. 17: Vodní tenzometr

Retenční křivka

Retenční křivka půdy je závislost tenzometrického tlaku půdní vody na vlhkosti půdy (Obr. 18). Pomocí retenční křivky se stanovuje schopnost půdy zadržovat vodu při různé vlhkosti. Označuje se také jako retenční čára vlhkosti, popř. s logaritmickou tlakovou osou jako pF-křivka.

Retenční křivka je hysterezní, neboť se odlišuje retenční křivka měřená při zvlhčování půdy (*zvlhčovací větev*) od retenční křivky měřená při vysušování půdy (*odvodňovací větev*, drenážní větev).



Obr. 18: Retenční křivka

Tenzometrický tlak lze přepočítat na vlhkost půdy pomocí příslušné retenční křivky. Převod tenzometrického tlaku na vlhkost je zatížen nejistotou, plynoucí z hystereze retenční křivky.

Retenční křivka se měří nejčastěji v *přetlakovém aparátu*. V něm se z půdy vytlačuje voda přetlakem vzduchu. Měří se tak odvodňovací větve retenční křivky. Měření zvlhčovací větve retenční křivky se provádí jen výjimečně.

Měření zásoby vody v půdě a pohybu půdní vody

Zásobu vody v půdě lze měřit:

- *vlhkoměry* – vlhkoměr měří obsah vody v půdní vrstvě.
- *vodními tenzometry* – tenzometr měří tenzometrický tlak půdní vody, ten se převádí na objemovou vlhkost pomocí retenční křivky.

Protože půda sestává z více půdních horizontů (vrstev) různých vlastností, měří se často zásoba vody v každém horizontu zvlášť. Celková zásoba v půdním profilu je pak dána součtem zásob vody ve všech půdních horizontech. Obvyklá hloubka půdy je 60 cm v horských oblastech a 120 cm v nížinách. Půda nejčastěji sestává ze tří nebo čtyř horizontů.

Pohyb půdní vody se vyhodnocuje pomocí řady měření zásob vody v půdních horizontech. Dříve se měření zásob vody v půdě zaznamenávalo v jednodenním intervalu. V současnosti je měření automatizováno, vlhkoměry a tenzometry jsou připojené k monitorovacím stanicím, které měří vlhkosti a tlaky v desetiminutovém intervalu. Současně se zásobou půdní vody se měří srážky a evapotranspirace. Z těchto dat se vyhodnocuje *bilance půdní vody* pomocí bilanční rovnice.

Bilanční rovnice vody v půdě

Bilance půdní vody se vyčísľuje pomocí bilanční rovnice, která vyjadřuje zákon zachování hmotnosti vody v půdním pokryvu povodí. Členy bilanční rovnice se vyjadřují ve výškovém tvaru (často v mm) jako výška vody na ploše vodorovného průmětu povodí. Myslí se vždy za určité období, ačkoliv se to často v jednotkách nevyjadřuje. Správně by mělo být např. milimetry za rok (mm/rok) a nikoliv jen milimetry.

Bilanční rovnice je dána vztahem (3).

$$\Delta Z = S - O - R - ET \quad (3)$$

Ve vztahu (3) značí ΔZ (mm) – změna zásoby vody v půdě, S (mm) – srážkový úhrn (mm), O (mm) – voda prosáklá z půdy do podloží (mm), R (mm) – voda odtéká povrchovým a/nebo podpovrchovým odtokem (mm), ET (mm) – evapotranspirace (mm).

Bilance půdní vody je důležitým podkladem pro plánování odvodňovacích a závlahových staveb. Rovněž je třeba se jí zabývat v případech, kdy může dojít ke změně vegetačního pokryvu krajiny.

Vliv půdní vody na vodní stavby

Půdní voda má zásadní vliv na konstrukce vodních staveb.

- Adsorpční voda – může být chemicky agresivní.
- Kapilární voda – způsobuje vlhnutí staveb.
- Gravitační voda – namáhá stavby tlakem a vztlakem (stavba „plave“ v mokré půdě).

Kontrolní otázky:

- *Jaké jsou základní kategorie půdní vody?*
- *Jaké jsou druhy půdní vlhkosti a jak jsou definovány?*
- *Jakým přístrojem se měří půdní vlhkost?*
- *Co měří vodní tenzometr?*
- *Jak je definován tenzometrický tlak?*
- *Jaké veličiny ovlivňují bilanci vody v půdě?*

8 Podzemní voda a základní odtok

Podzemní voda

Podzemní voda zahrnuje veškerou vodu, která se vyskytuje pod zemským povrchem. Podle původu může být juvenilní a vadózní.

- *Juvenilní* podzemní voda vystupuje k povrchu z nitra Země. Vyskytuje se např. ve vulkanických oblastech nebo v blízkosti hlubokých zlomových struktur. Tvoří poměrně malou část podzemní vody.
- *Vadózní* podzemní voda vzniká průsakem srážkové vody pod zemský povrch. Část této vody může být po dlouhá geologická období uzavřena mezi nepropustnými vrstvami, tato podzemní voda se označuje jako *fosilní*.

Gravitační podzemní voda je voda, jejíž pohyb je určován gravitačními silami. Je-li voda gravitační, pak zaplňuje téměř všechny póry v půdě nebo hornině. V takovém případě se vyskytuje jen malé množství porů zaplněných vzduchem. Půda nebo hornina je tedy vodou zcela nasycena.

Hladina podzemní vody

Z geometrického a hydrogeologického hlediska rozlišujeme *hladinu podzemní vody*:

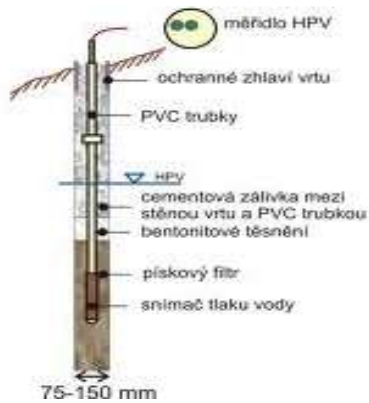
- Volnou – tlak podzemní vody na hladině je roven tlaku atmosférickému. Je to plocha omezující shora volnou zvodně.
- Napjatou – svrchní hraniční plocha zvodně, charakterizovaná tlakem podzemní vody vyšším než je tlak atmosférický. Představuje horní ohraničení napjaté zvodně.
- Výtlačnou – jedná se o piezometrickou hladinu napjaté zvodně.

Piezometr

Piezometr měří tlak v podzemní vodě. Používá se:

- Otevřený piezometr – na obou koncích otevřená trubka, v níž se měří poloha hladiny (Obr. 19). Je nevhodný pro artézské zvodně.
- Uzavřený piezometr – nahoře uzavřená trubka s tlakoměrem (Obr. 20).

Obr. 5.3.3 Otevřený jednotrubicový piezometr (upraveno podle Rozsypala, 2001)



Obr. 19: Otevřený piezometr

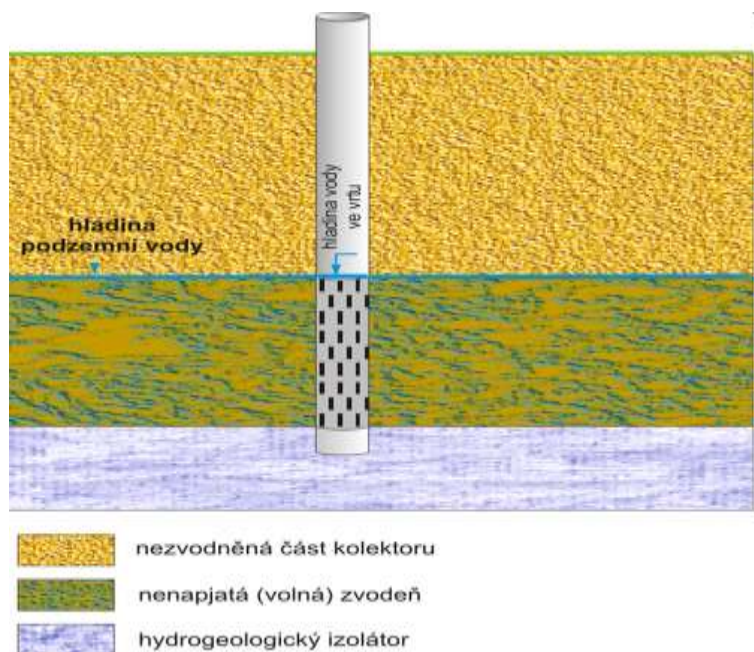
Obr. 5.3.2 Příklad různých typů piezometru (Geokon - a, Sisgeo - b,c, 2003)



Obr. 20: Uzavřený piezometr

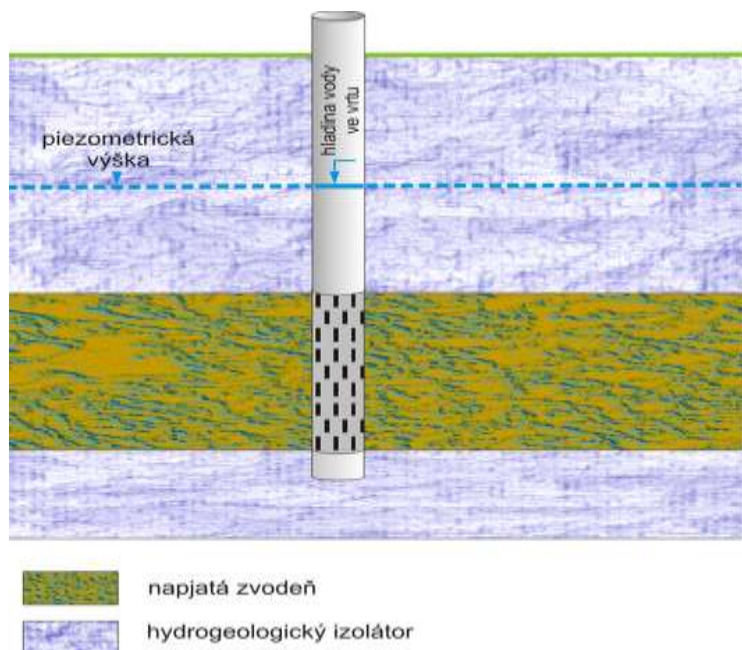
Zvodně

Zvoděň je hydraulicky jednotná a souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině. Podle tlaku na vrchní hranici zvodně se rozlišuje zvoděň s napjatou hladinou a zvoděň s volnou hladinou. Zvláštním případem zvodně s napjatou hladinou je zvoděň artézská. Freatická zvoděň je častým případem zvodně s volnou hladinou.



Obr. 21: Zvoděň s volnou hladinou

Zvoděň s volnou hladinou je shora volná, může do ní voda vtékat z nadložních horizontů z ní voda ubývat vztlínáním do nadloží. Dole je zvoděň ohraničena nepropustným dnem (Obr. 21). Na hladině podzemní vody je tlak atmosférický. Po navrtání zvodně se ve vrtu vystaví hladina podzemní vody. Nad hladinou podzemní vody se nalézá *pásma provzdušnění*. Pod hladinou podzemní vody, kde jsou póry nebo pukliny jsou zcela vyplněny vodou, leží *pásma nasycení*.

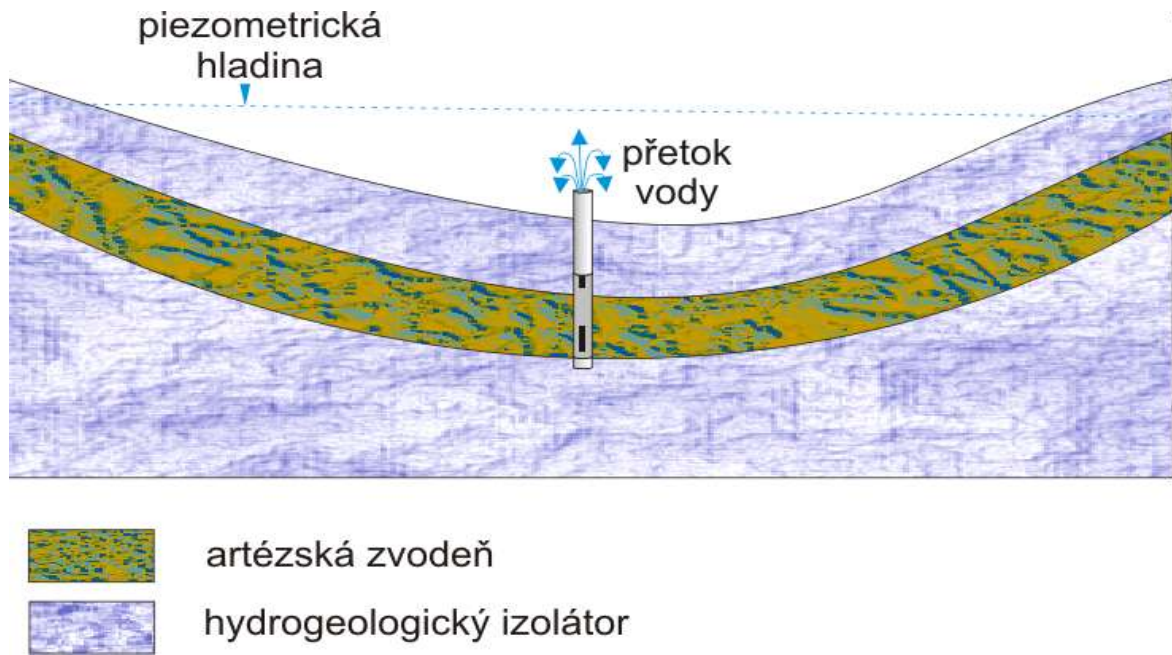


Obr. 22: Zvoděň s napjatou hladinou

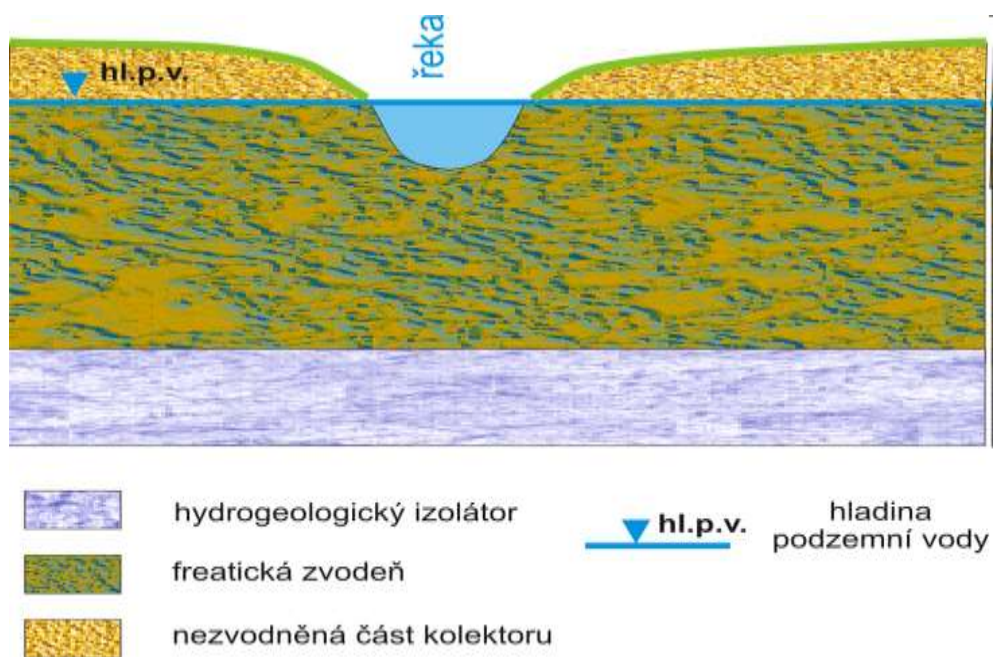
Zvoděň s napjatou hladinou je shora uzavřená nepropustným stropem a dole nepropustným dnem. Na strop zvodně tlačí hydrostatický tlak větší, než je atmosférický tlak (Obr. 22). Po navrtání stropu vystoupí hladina podzemní vody nad úroveň stropu, ale nevystoupí nad úroveň terénu, jako je tomu v případě artézské zvodně.

Artézská zvoděň je shora uzavřená nepropustným stropem (artéským stropem) a zdola nepropustným dnem s napjatou hladinou (Obr. 23). Na strop tlačí hydrostatický tlak větší, než je atmosférický tlak. Po provrtání artézského stropu vystoupí hladina vody nad úroveň terénu, často voda z vrtu stříká.

Freatická zvoděň je uložena v malé hloubce pod povrchem terénu. Nejčastěji vzniká v mělkých zvětralinách. Vytéká z ní podzemní voda do toků a nádrží (Obr. 24). Tento výtok se označuje jako *základní odtok*.



Obr. 23: Artézská zvědeň



Obr. 24: Freatická zvědeň

Základní odtok

Pro základní odtok platí:

- Je tvořen vodou, která vytéká ze zvodně, nejčastěji freatické.
- Základní odtok kolísá v závislosti na poloze hladiny podzemní vody.
- Když se zvyšuje hladina podzemní vody, základní odtok roste.
- Když zaklesává hladina podzemní vody, základní odtok klesá.

Agresivita podzemní vody

Agresivita podzemní vody může být způsobena obsahem rozpuštěných látek nebo jejich nedostatkem a kyselostí nebo zásaditostí. Rozeznává se agresivita:

- síranová,
- uhličitá,
- hladová (nedostatek rozpuštěných minerálů),
- kyselá nebo zásaditá.

Síranovou agresivitu mohou způsobovat různé minerály obsažené v horninách. Patří k nim zejména:

- sírany (sádrovec, anhydrit)
- sulfidy (pyrit, pyrhotin).

Uhličitá agresivita vzniká rozkladem organogenní příměsi v aluviálních sedimentech. Je častá v oblastech vývěru pramenů minerálních vod, bohatých na oxid uhličitý.

Hladová voda neobsahuje rozpuštěné soli, je v podstatě destilovanou vodou. Vyluhuje proto soli z okolního horninového i stavebního (např. betonu) prostředí.

Podzemní voda s vysokým i velmi nízkým pH působí agresivně na své okolí.

Opatření proti podzemní vodě při výstavbě vodních děl

- Nejjednodušším způsobem kontroly podzemní vody v základové jámě je snížení její hladiny čerpáním.
- Ve složitějších případech se provádí injektáž, chemické zpevňování a ochrana stavební jámy štětovými stěnami.
- U složitých inženýrských staveb se provádí zmrazování.
- Agresivita podzemní vody ohrožuje konstrukce vodních děl. Ty se proto musí chránit účinnou izolací.

Kontrolní otázky:

- *Jak se odlišuje vadózní a juvenilní podzemní voda?*
- *Jaké se odlišují hladiny podzemní vody podle napjatosti?*
- *Co je charakteristické pro artézskou zvodněň?*
- *Z jakého typu zvodně nejčastěji vytéká základní odtok?*
- *Která voda je hladová?*
- *Co způsobuje agresivita podzemní vody?*

9 Výpar vody z vodní hladiny, půdy a rostlin

Evapotranspirace, transpirace a evaporace

Odlišují se dva pojmy:

- Vypařování (evaporace) – proces, při kterém voda přechází z kapalného nebo pevného skupenství do plynného.
- Výpar – objem vody, nebo výška vrstvy vody, vypařené za určitý časový interval z určité plochy.

Evaporace je fyzikální vypařování (proces v anorganickém prostředí).

- Vypařování z volné vodní hladiny – výpar z povrchu vodních toků, nádrží a zatopených terénních depresí.
- Vypařování vody zadržované smáčeným povrchem vegetace (není to transpirace).

Transpirace (transpirační vypařování) je výdej vody povrchem rostlin, hlavně listů nebo jehlic. Je ukončením transpiračního proudu, který vede vodu z kořenů cévními svazky do listů. Transpirace umožňuje zásobování všech částí rostliny vodou a minerálními živinami. Odběr tepla na vypařování vody zabraňuje přehřívání listů. Zajišťuje správný průběh fotosyntézy a dýchání. Transpirace je řízena rostlinou.

Evapotranspirace je celkový výpar, který se vztahuje k určitému území. Tento celkový výpar se skládá z:

- výparu vody z půdy (evaporace),
- vodní hladiny a vody zachycené na vegetaci (evaporace),
- fyziologického výparu z rostlin (transpirace).

Faktory ovlivňující evaporaci

Intenzitu evaporace ovlivňuje:

- sluneční radiace (radiační bilance vypařujícího povrchu),
- teplota vypařujícího povrchu,
- sytostní deficit vzduchu (rozdíl mezi napětím nasycených vodních par a aktuálním napětím vodních par v ovzduší nad aktivním povrchem),
- rychlost větru nad vypařujícím povrchem,
- atmosférický tlak,
- charakter vypařujícího povrchu (ovlivňuje bilanci sluneční radiace a drsností modifikuje režim větru),
- hustota vody (zvětšení hustoty způsobuje zmenšení evaporace),
- zásobování výparného povrchu vodou.

Měření výparu z volné hladiny

Výparoměr (evaporimetr, atmometr) je přístroj k měření výparu vody (množství vody vypařené do vzduchu za jednotku času nebo za určitý časový interval) z volné vodní hladiny, hlavně stojatých vod, nebo z půdy. Zapisovací výparoměr je evaporigraf.

Měří se pokles hladiny ve výparoměrném bazénu nebo pokles váhy výparoměrného bazénu (Obr. 25).



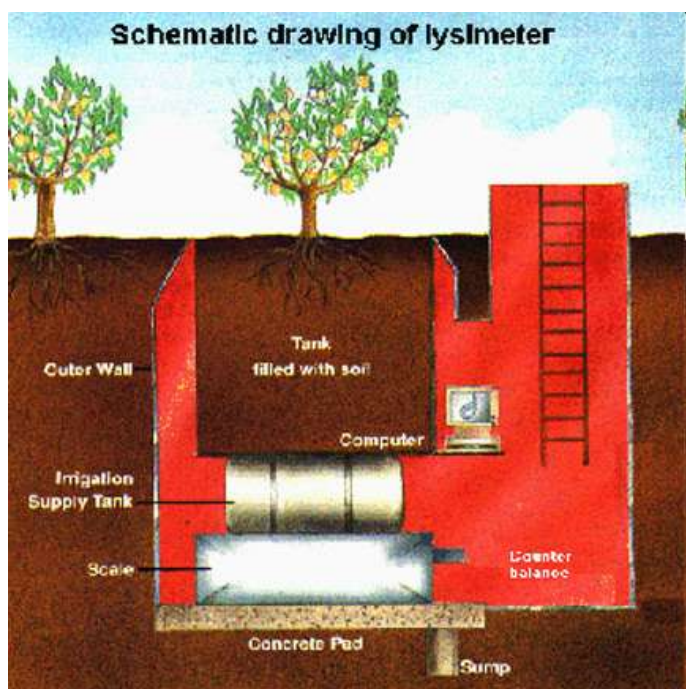
Obr. 25: Výparoměrný bazén

Měření výparu z půdy

Výpar z půdy porostlé vegetací se měří *lyzimetrem*. Je to blok půdy s vegetací, který je umístěn na váze (Obr. 26). Lyzimetr je umístěn v půdním profilu, aby teplota půdního bloku odpovídala teplotě půdy v přírodním uložení.

Pokles váhy lyzimetru v bezsrážkovém období odpovídá celkovému výparu z půdy a vegetace.

Poblíž lyzimetru se měří srážky, takže je možné ve srážkovém období bilancovat celkový výpar, infiltraci srážek a množství vody v půdním bloku v lyzimetru.

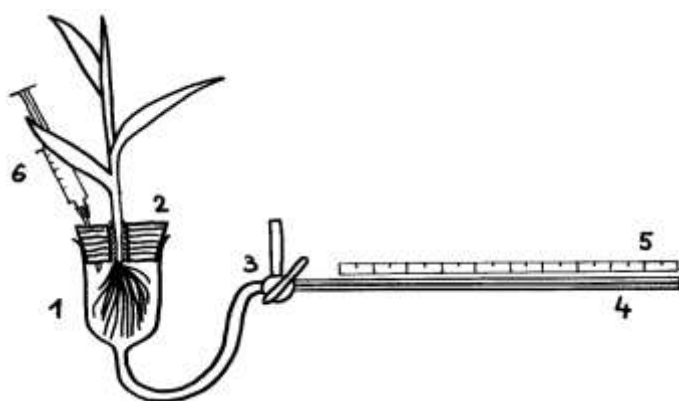


Obr. 26: Lyzimetr

Měření transpiračního výparu

K měření transpiračního výparu se používá:

- Phytometr – nádoba s vodou a zakořeněnou rostlinou, omezení výparu z půdy parafínem atd., měří se úbytek váhy phytometru s rostlinou.
- Potometr – nádoba s uříznutou částí rostliny, naplněná vodou, únik vláhý možný jen formou transpirace (Obr. 27).
- Měření transpiračního toku v kmenech stromů:
 - elektrický ohřev (Obr. 28),
 - měření měnícího se obvodu/průměru kmene,
 - injekce stopovacích látek.



Obr. 27: Potometr

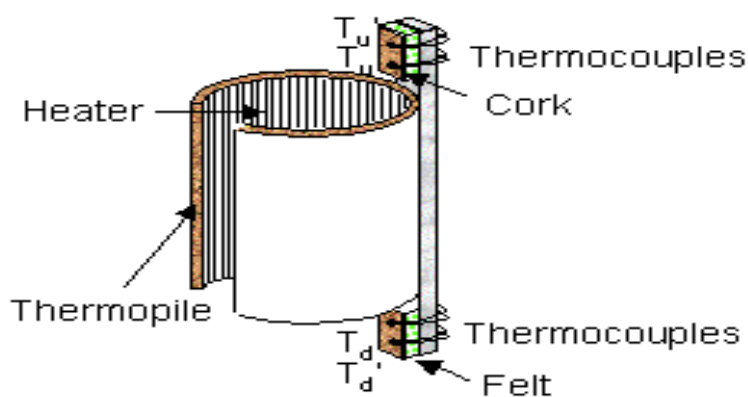


Fig. 2. Diagram of the heat balance sap flow sensor (Sakuratani, 1984).

Obr. 28: Měření transpiračního toku v kmenech stromů elektrickým ohřevem

Vliv půdního sucha na evapotranspiraci

Vliv půdního sucha na evapotranspiraci:

- Nedostatek vody v půdě (půdní sucho) podstatně snižuje evaporaci vody z půdy a omezuje transpiraci rostlin, protože brání odběru vody z půdy kořenovou soustavou rostlin.
- V důsledku toho nefunguje evapotranspirační chlazení prostředí a nepřevádí se voda z půdy do atmosféry. Vzniká tak klimatické sucho.

Ovlivňování teploty vzduchu a půdy evapotranspirací

Souvislé rostlinné porosty transpirací:

- vyrovnávají teplotní rozdíly mezi dnem a nocí, proto jsou na územích bez vegetace (např. pouště) velké rozdíly mezi denní a noční teplotou,
- zvětšují denní vlhkost vzduchu,
- soustavně snižují teplotu půdy.

Evapotranspirace a závlahové stavby

- Závlahové stavby se dimenzují tak, aby přiváděly rostlinám nejméně tolik vody, kolik se jí vypaří evapotranspirací.
- Navíc se musí dodávat voda pro promývání půdy, které zabraňuje zasolení půd.

Kontrolní otázky:

- *Jak se odlišuje evaporace a evapotranspirace?*
- *Jakým přístrojem se měří evaporace?*
- *Jak se měří transpirace rostlin?*
- *Co měří lyzimetr?*
- *Jaký vliv má půdní sucho na evapotranspiraci?*

10 Povrchová voda

Povrchová voda v hydrologickém cyklu

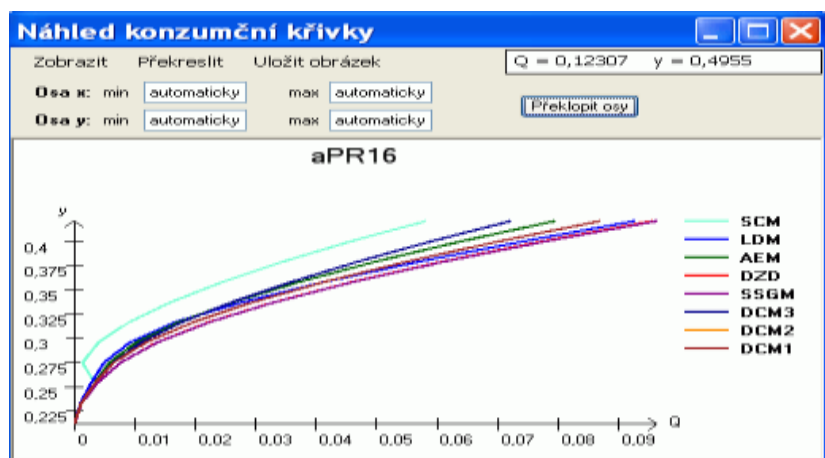
Povrchovou vodu charakterizuje, že:

- má hladinu ve volném styku s atmosférou,
- je v nádržích a vodních tocích,
- se vypařuje do atmosféry.

Měření vodních stavů a průtoků

Vodní stav je výšková poloha hladiny v toku nebo nádrži nad referenční (smluvenou) úrovní. Měří se hladinoměrem.

Průtok je množství vody proteklé za jednotku času (m^3/s). Měří se průtokoměrem. Často se odvozuje průtok v toku z vodního stavu pomocí *konzumční křivky*.



Obr. 29: Konzumční křivka

Hladinoměry a limnigrafy

Pomocí *hladinoměru* se měří vodní stavy. Běžně se užívají tyto konstrukce hladinoměru:

- hladinoměrná lať,
- plovákový hladinoměr,
- ultrazvukový hladinoměr,
- kapacitní hladinoměr,
- tlakový hladinoměr.

Limnigraf je záznamový hladinoměr:

- slouží k měření a registraci vodních stavů,
- základem konstrukce limnigrafu je hladinoměr a záznamové zařízení (otáčející se papír s pisátkem, elektronická paměť, dálkový přenos dat).

Stanovení průtoku pomocí konzumční křivky

Průtok ve vodním toku se odvozuje z vodního stavu ve vhodném místě (měrném profilu) pomocí *konzumční křivky* (Obr. 29). Konzumční křivka měrného profilu se získá:

- přímým měřením (pracné, vhodné jen pro menší průtoky),
- hydraulickým výpočtem (měrné přelivy, žlaby atd.),
- odhadem (v říčních korytech např. pomocí Chezyho rovnice).

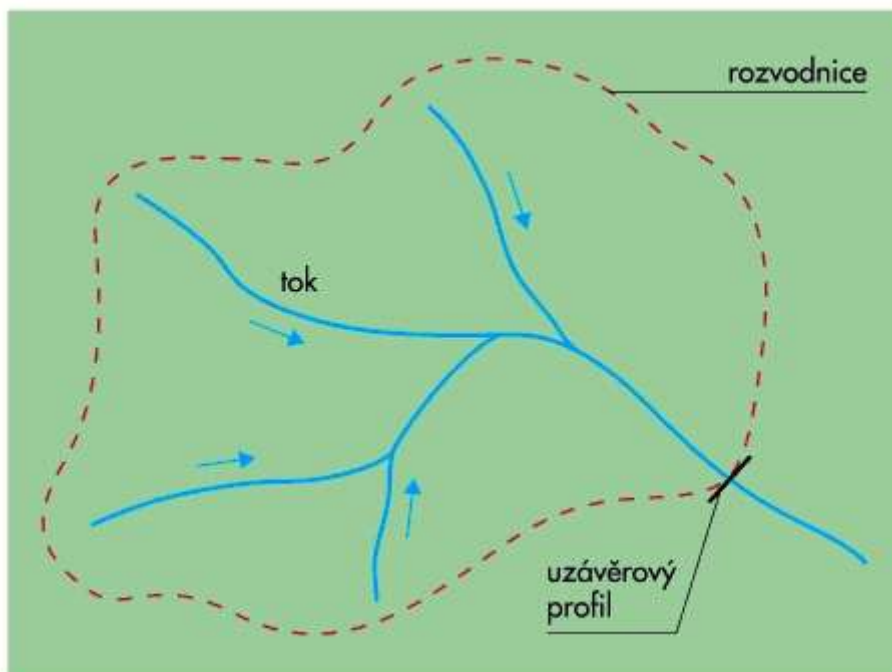
Kontrolní otázky:

- *Jak se měří vodní stavy?*
- *Jak je definován průtok?*
- *Co měří limnigraf?*
- *Jak se získá konzumční křivka?*
- *Jaké jsou konstrukce průtokoměrů?*

11 Odtok z povodí

Povodí

Povodí je oblast, ze které voda odtéká jedním *uzávěrovým profilem*. Hranice mezi dvěma povodími se nazývá *rozvodnice* (Obr. 30).



Obr. 30: Povodí, rozvodnice, uzavěrový profil

Rozvodí tvoří hranici v terénu mezi sousedícími povodími. Rozvodí se nejčastěji nachází na topografických vrcholech a horských hřebenech. V rovinách je rozvodí neznatelné a těžko se určuje. Rozvodí je na mapě označeno čarou, která se nazývá *rozvodnice*. Všechna povodí konkrétního moře či oceánu tvoří *úmoří*.

Rozvodnice je smyšlená čára, která vyznačuje geografickou hranici mezi sousedními povodími. Rozlišujeme rozvodnice orografické a hydrogeologické.

- *Orografická rozvodnice* ohraničuje povodí povrchových vod. Nachází se na povrchu, většinou na horských vrcholcích, hřebenech nebo na jiných vysokých útvarech.
- *Hydrogeologická rozvodnice* zase ohraničuje povodí podzemních vod, pro jejich určení je však potřeba znát geologické složení podpovrchových vrstev.

Odtok z povodí

Odtok je hydrologický pojem vyjadřující objem vody, která odeče za určité časové období z povodí. Vyjadřuje se v jednotkách průtoku (např. m³/s), případně ve výškovém tvaru jako výška vody odeklé z plochy povodí za časové období (např. mm za rok). Odtok je tvořen několika složkami, jejichž součet se označuje jako *celkový odtok*.

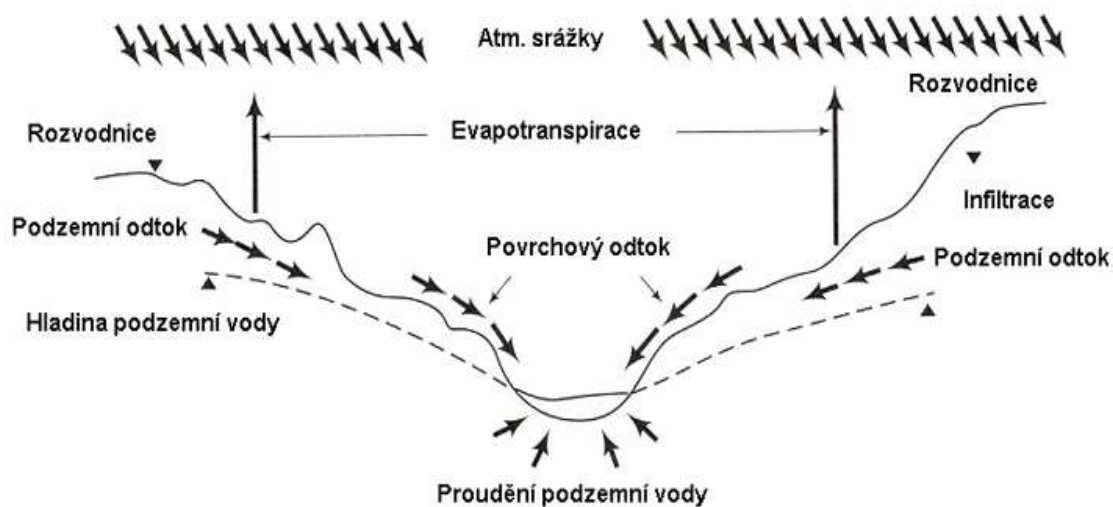
Složky celkového odtoku povodí (Obr. 31):

- povrchový odtok – voda odteklá po povrchu terénu z míst, kde vznikly podmínky pro tvorbu odtoku (srážky převažovaly nad ztrátami),
- podpovrchový (podzemní) odtok – voda infiltrovaná do půdy, která před odtokem z povodí nedosáhla hladiny podzemní vody,
- základní odtok – proudění podzemní vody do toku.

Celkový odtok z povodí se skládá ze složek podle vztahu (4).

$$Q_c = Q_p + Q_h + Q_b \quad (4)$$

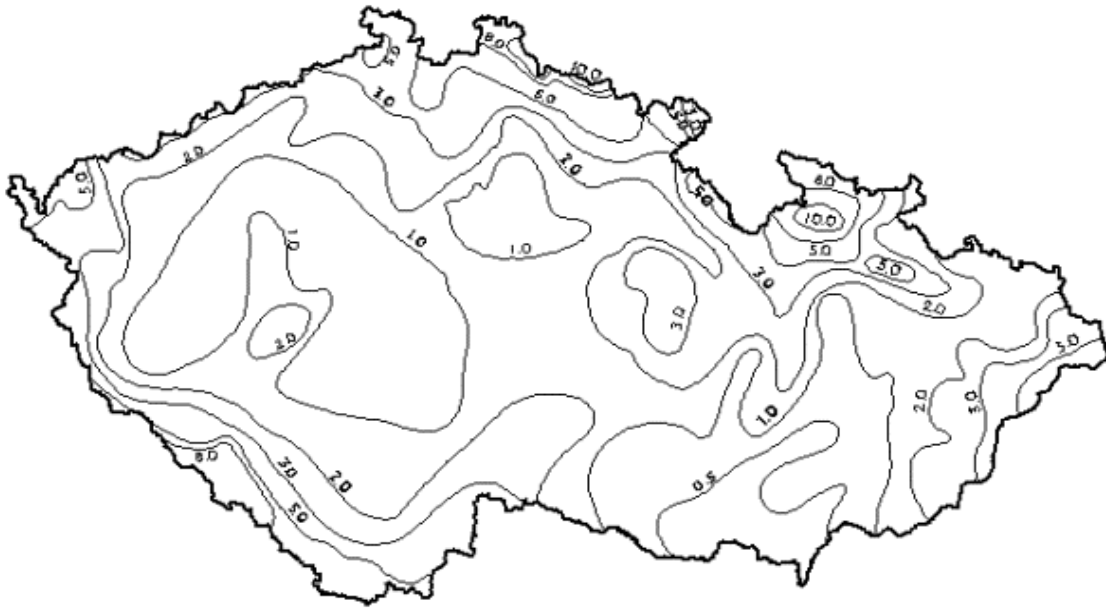
Ve vztahu (4) značí Q_c (m^3/s) – celkový odtok, Q_p (m^3/s) – povrchový odtok, Q_h (m^3/s) – hypodermický (podpovrchový) odtok, Q_b (m^3/s) – základní odtok.



Obr. 31: Schéma odtoku

Přímý odtok je souhrnné označení povrchového a hypodermického odtoku.

Specifický odtok vyjadřuje, jaké množství vody odtéká za jednotku času z jednotky plochy povodí, udává se v $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (litr za sekundu na kilometr čtvereční). Izohydrohypsy základního odtoku v ČR ukazuje Obr. 32.



Obr. 32: Izohydrohypsý základního odtoku v ČR udané jako specifický odtok v $l.s^{-1}km^{-2}$

Generace odtoku z povodí

Generace odtoku z povodí (srážko-odtokový proces) je označení pro přeměnu ovzdušné srážky na odtok vody v korytech či její akumulaci v nádržích. Složkami srážko-odtokového procesu jsou:

- tok vody po povrchu půdy,
- infiltrace srážky do půdy,
- podpovrchový tok půdní vody k toku,
- výtok podzemní vody do toku,
- evapotranspirace (často se během srážky zanedbává).

Srážko-odtokový vztah je kvantitativní vyjádření srážko-odtokového procesu. Cílem studia srážko-odtokového vztahu je určit průtok v uzávěrovém profilu povodí v závislosti na srážkách dopadlých na povodí. Srážko-odtokový vztah může být vyjádřen různě komplexními způsoby – od prostého vzorce až po složitý výpočetní postup.

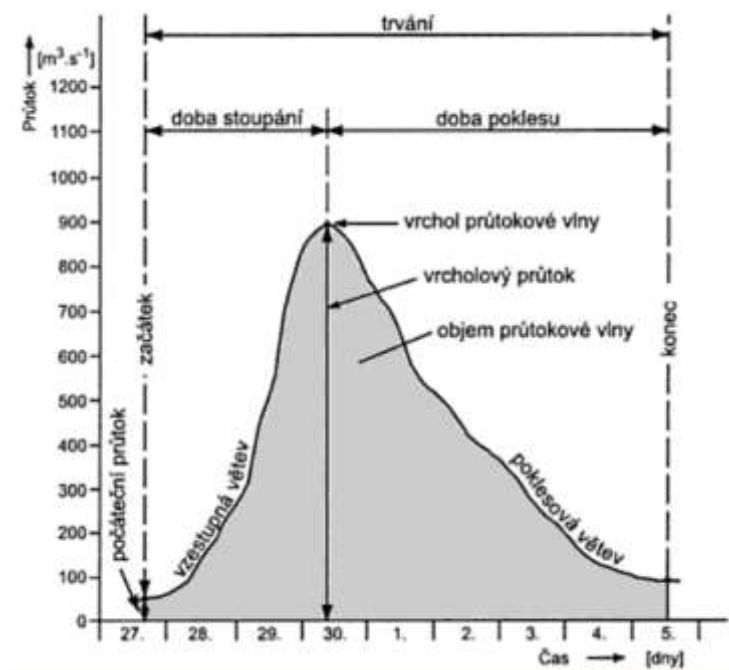
Odtok z povodí je průtok v uzávěrovém profilu povodí dělený plochou povodí.

Říční povodeň

Říční povodeň je významné zvětšení průtoku v říčním korytě a v záplavovém území. Průběh povodně je ovlivňován:

- odtokem vody z povodí,
- postupem vody v korytě nebo v rozlivném (inundačním) území.

Při povodni probíhá v korytě toku *průtoková vlna*, při ní dochází k přechodnému zvětšení (*vzestupná větev*) a následnému poklesu průtoku (*sestupná větev*). *Tvar povodňové vlny* se vyjadřuje hodnotami průtoků, které určují počátek, vrcholení a ukončení povodně (Obr. 33). Největší, *kulminační* nebo vrcholový průtok odpovídá době vrcholení (*kulminaci*) povodně.



Obr. 33: Průtoková vlna

Trvání povodně je časový úsek mezi počátkem a ukončením povodně. Směrem po toku se trvání často zvětšuje, neboť povodeň se zplošťuje, zvláště při průchodu rozlivným územím. *Objem povodně* je množství vody, které proteče tokem během trvání povodně.

Rychlost průběhu povodně se určuje z doby, za kterou povodeň proběhne mezi dvěma vodoměrnými stanicemi. Doba se určí z rozdílu mezi časem kulminačního průtoku v obou stanicích. Rychlost je pak podílem délky toku mezi oběma stanicemi a doby a udává se v km/hod. Na témže toku bývají rychlosti každé povodňové vlny rozdílné, protože podmínky pro jejich tvoření odtokem vody z povodí, pohybem v korytě či inundací se v průběhu roku mění.

V odtoku z povodí lze v průběhu mnoha desetiletí nalézt několik zákonitostí. Nejdůležitější jsou:

- menší odtoky se vyskytují častěji než odtoky větší,
- velké odtoky se zpravidla vyskytují opakovaně v krátké době, poté následuje dlouhé období, kdy se velké odtoky nevyskytují.

Z těchto poznatků vychází pojem tzv. Nletých odtoků (někdy se mluví o Nleté vodě). Podle platné názvoslovné normy vyjadřují tzv. Nleté hodnoty průměrnou dobu opakování nějakého hydrologického jevu. V případě povodní jde o posouzení extrémnosti kulminačního průtoku. Hodnoty extrémních průtoků se zjišťují analýzou dlouhodobých časových řad pozorování průtoků na tocích.

Nletý odtok je takový odtok, který je v dlouhodobém průměru dosažen nebo překročen jedenkrát za N let.

Dvacetiletá voda je tedy menší než stoletá voda. Avšak neplatí přímá úměra mezi jednotlivými hodnotami Nletých vod. Proto hodnota 100leté povodně není dvojnásobkem 50leté povodně, hodnota 500leté povodně není 5násobkem 100leté povodně a podobně. Také nelze tvrdit, že dvacetiletá voda se vyskytuje v intervalu dvaceti let a stoletá voda v intervalu sta let.

Podle ČHMÚ 100letá povodeň je taková povodeň, jejíž kulminační průtok je v dlouhodobém průměru dosažen nebo překročen 1 krát za 100 let. Jde o statistickou charakteristiku, nikoliv předpovědní. Tudíž neplatí, že v případě výskytu 100leté povodně se další povodeň této velikosti či vyšší vyskytne až za 100 let.

Z metodiky výpočtu Nletých vod, používané ČHMÚ, vyplývá, že 100letá nebo vyšší voda se teoreticky vyskytne za období dlouhé 100 let s pravděpodobností 63,4 %, za období 200 let s pravděpodobností 86,6 % a až za období 500 let s pravděpodobností 99,3 %.

Zodpovědně stanovené hodnoty Nletých vod jsou základním návrhovým parametrem pro protipovodňovou ochranu.

Hydrologická bilance povodí

Bilanční rovnice vyjadřuje zákon zachování hmotnosti vody v povodí. Členy bilanční rovnice se vyjadřují ve výškovém tvaru (často v mm) jako výška vody na ploše povodí. Myslí se vždy za určité období, ačkoliv se to často v jednotkách nevyjadřuje. Správně by mělo být např. mm za rok a nikoliv jen mm. Hydrologická bilance povodí je dána vztahem (5).

$$\Delta Z_p = S - ET - Q_c \quad (5)$$

Ve vztahu (5) značí ΔZ_p (mm) – změna zásoby vody v povodí, S (mm) – srážkový úhrn (mm), ET (mm) – evapotranspirace (mm), Q_c (mm) – celkový odtok z povodí (mm).

Bilanční rovnice vody v povodí jsou důležitým podkladem pro plánování vodárenských a závlahových nádrží. Rovněž je třeba se jimi zabývat v případech, kdy může dojít ke změně vegetačního pokryvu krajiny, obhospodařování rozsáhlých ploch apod.

Vliv vodních staveb na odtok z povodí

Nepříznivý vliv vodních staveb na srážko-odtokový proces spočívá v urychlení odtoku srážkové vody a zvětšení přímého odtoku na úkor odtoku základního. To způsobuje:

- systematická trubní drenáž,
- narovnání a/nebo zatrubnění vodních toků,
- vyspádování, vyhlazení a znepropustnění povrchu pozemků.

Příznivý vliv vodních staveb na srážko-odtokový proces spočívá ve zpomalení (retardaci) odtoku srážkové vody a zmenšení přímého odtoku (retenci vody). To způsobují:

- vsakovací rýhy,
- zasakovací pásy a průlehy,
- revitalizace vodních toků,
- výstavba mokřadů.

Kontrolní otázky:

- *Jak je definováno povodí?*
- *Jak se odlišuje rozvodí a rozvodnice?*
- *Kde je uzávěrový profil povodí?*
- *Z jakých složek se skládá celkový odtok z povodí?*
- *Co je charakteristické pro říční povodeň?*
- *Jaké složky obsahuje hydrologická bilance povodí?*

12 Hydraulika

Hydraulika, hydrologie a vodní stavby

Hydraulika je technická disciplína zabývající se využitím mechanických vlastností tekutin pro technické účely. Řeší za jakých vnějších podmínek, s jakými ztrátami (odpory), při jakém průtoku, při jaké hladině a tlaku, jakou formou, s jakým silovým účinkem proteče voda potrubím, trubní soustavou, korytem toku, objektem, vodním dílem nebo zemním prostředím.

Hydraulika studuje:

- kapaliny v klidu – hydrostatika, hydrostatický tlak,
- kapaliny v pohybu – hydrodynamika, hydrodynamický tlak,
- vzájemné působení kapalin a tuhých těles,
- kapaliny v porézním materiálu.

Základem mnoha hydrologických poznatků jsou hydraulické znalosti o hydrostatice a hydrodynamice vody a o vodě v porézním materiálu. V hydrologii se pomocí hydraulických poznatků studuje pohyb vody:

- povrchový odtok,
- podpovrchový odtok a pohyb půdní vody,
- pohyb podzemní vody,
- odtok ze zvodní (základní odtok).

Pro navrhování, výstavbu a provoz vodních staveb se využívá všech poznatků hydrauliky. Hydraulika tvoří teoretický základ celého oboru vodních staveb.

Tekutiny, kapaliny a plyny

Teoretické základy poskytuje hydraulice *mechanika tekutin*. Tekutina je společný název pro kapaliny a plyny, jejichž významnou společnou vlastností je tekutost neboli neschopnost udržet svůj stálý tvar díky snadnému vzájemnému pohybu částic. Pro tekutiny je charakteristické, že:

- nemají vlastní tvar, podřizují ho tvaru nádoby,
- vytvářejí volný povrch, který je v klidu vodorovný,
- jsou tekuté, dají se přelévat,
- jsou téměř nestlačitelné,
- zachovávají si stálý objem, nejsou rozpínavé,
- jsou dělitelné.

Odpor tekutin proti změně tvaru se charakterizuje *viskozitou*. Viskozita se projevuje jen při pohybu tekutiny, kdy způsobuje odpor proti proudění – vnitřní tření. Viskozita je analogií tření ve fyzice pevných těles. Podle *Newtonova zákona viskozity* je odpor způsobený vnitřním třením v tekutině přímo úměrný rychlosti pohybu tekutiny. Konstantou úměrnosti je dynamická viskozita. Podle toho, jak tekutiny splňují Newtonův zákon viskozity, se rozlišují:

- newtonské tekutiny – z praktického hlediska dost dobře splňují Newtonův zákon viskozity (např. voda),
- nenewtonské tekutiny – zjevně nesplňují Newtonův zákon viskozity (např. bahna, kaly, suspenze).

Za *dokonalou (ideální) tekutinu* se označuje myšlená tekutina, která má nulovou viskozitu. Je to myšlenkový konstrukt, který se používá pro teoretické účely v mechanice tekutin.

Tekutiny dělíme na *plyny a kapaliny*. Vzájemně se liší především:

- hustotou – plyny mají ve srovnání s kapalinami velice malou hustotu,
- viskozitou – plyny mají ve srovnání s kapalinami velice malou viskozitu,
- stlačitelností – plyny jsou mnohem více stlačitelné než kapaliny,
- rozpínavostí – plyny jsou rozpínavé a v gravitačním poli nevytvářejí žádné ostré rozhraní, naproti tomu kapaliny vytvářejí v gravitačním poli volnou hladinu, která odděluje kapalinu a plyn.

Kontrolní otázky:

- *Čím se zabývá hydraulika?*
- *Jak se odlišují kapaliny a plyny?*
- *Co značí viskozita?*
- *Jak je charakterizována ideální tekutina?*

13 Hydrostatický tlak

Hydrostatický tlak v kapalině a hydrostatická síla

Hydrostatický tlak je tlak, který vzniká v kapalině její tíhou. Aby byl v kapalině hydrostatický tlak, musí se kapalina vyskytovat v gravitačním poli.

Hydrostatickým tlakem tlačí kapalina na tělesa do ní ponořená nebo na stěny nádoby nebo na své vlastní části (výše položené části tlačí svou tíhou na níže položené části kapaliny).

Hydrostatický tlak závisí přímo úměrně na hloubce v kapalině (výšce kapalinového sloupce), hustotě kapaliny a na gravitaci. *Nezáleží* na množství (hmotnosti, objemu) kapaliny. Hydrostatický tlak v určitém bodu kapaliny se vypočítá podle vzorce (6).

$$p = \rho \cdot g \cdot h \tag{6}$$

Ve vzorci (6) značí p (Pa) – hydrostatický tlak, ρ (kg/m³) – na hustota kapaliny, g (m/s²) – gravitační konstanta, h (m) – hloubka pod povrchem kapaliny.

Hydrostatický i celkový statický tlak v kapalině působí všemi směry stejnou velikostí. Působí-li na volný povrch kapaliny vnější tlak, vzniká uvnitř kapaliny dodatkový tlak, který je ve všech místech kapaliny stejně velký (Pascalův zákon). Proto lze dodatkový tlak v kapalině způsobený vnějším tlakem, např. tlakem plynu na hladinu kapaliny, k hydrostatickému tlaku přičíst podle vzorce (7). Součet tlaků se nazývá *celkový statický tlak* (Obr. 34).

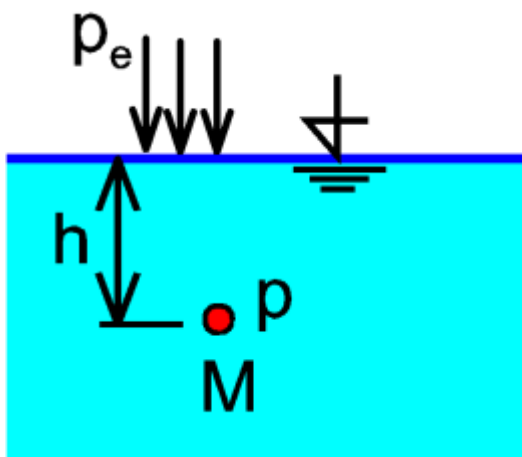
$$p_c = p_v + \rho \cdot g \cdot h \tag{7}$$

Ve vzorci (7) značí p_c (Pa) – celkový statický tlak, p_v (Pa) – vnější tlak působící na hladinu kapaliny.

Kapalina v nádobě působí na dno nádoby, stěny nádoby, ale také na libovolnou plochu uvnitř nádoby *hydrostatickou tlakovou silou*, jejíž směr je vždy kolmý na libovolnou plochu uvnitř nádoby. Původ této síly je v působení gravitační síly Země na kapalinu. Velikost hydrostatické tlakové síly závisí na hustotě kapaliny, na ploše stěny a na hloubce h (m) pod povrchem kapaliny podle vztahu (8).

$$F = S \cdot p \quad (8)$$

Ve vztahu (8) značí F (N) – hydrostatická tlaková síla, S (m²) – plocha stěny, p (Pa) – hydrostatický tlak.



Obr. 34: Celkový statický tlak v kapalině

Pokud na plochu působí v každém bodě jiný hydrostatický tlak (šikmé stěny apod.), pak se plocha rozdělí na dílčí plošky s přibližně stejným hydrostatickým tlakem a vztah (8) se použije pro výpočet hydrostatické síly na každou z těchto plošek zvlášť. Výsledná síla, působící na celou plochu, je součtem sil působících na dílčí plošky.

Pascalův zákon

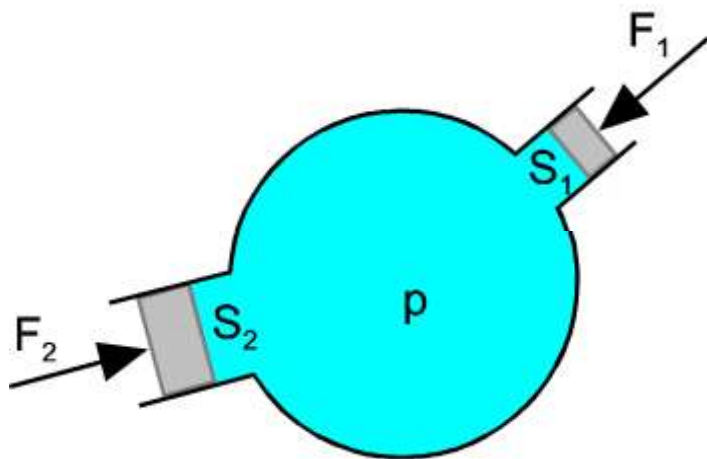
Pozvolná změna tlaku v malém uzavřeném objemu kapaliny se šíří všemi směry a předává se všem částem kapaliny beze změny. Působí-li na volný povrch kapaliny vnější tlaková síla, vzniká uvnitř kapaliny tlak, který je ve všech místech kapaliny stejně velký. Tento tlak je roven podílu síly a plochy kapaliny, na kterou síla působí.

Pascalův zákon vyjadřuje vztah (9).

$$p_v = \frac{F_v}{S_v} \quad (9)$$

Ve vztahu (9) značí p_v (Pa) – tlak v kapalině způsobený působením vnější tlakové síly na povrch kapaliny, F_v (N) – vnější tlaková síla působící na povrch kapaliny, S_v (m²) – plocha kapaliny, na kterou působí vnější tlaková síla.

Z Pascalova zákona plyne, že tlačení na kapalinu vznikne v kapalině tlak ve všech místech kapaliny stejný podle vztahu (9). To je odlišné od tlaku hydrostatického, který se zvětšuje s hloubkou kapaliny. Celkový statický tlak proto závisí na hloubce kapaliny.



Obr. 35: Šíření tlaku v kapalině

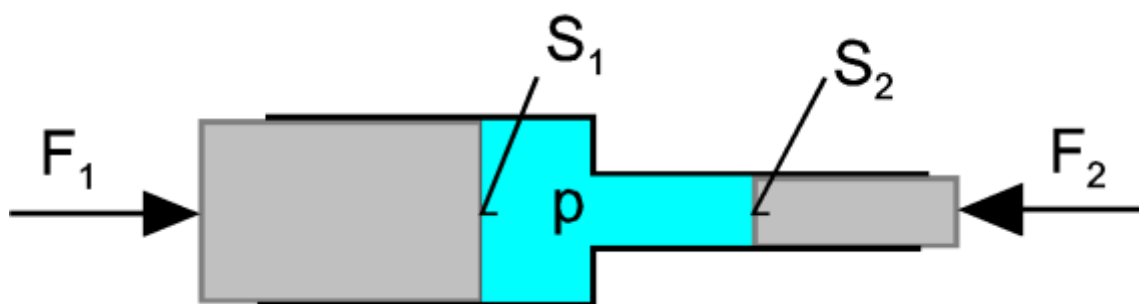
Hydraulický lis

Na principu šíření tlaku v kapalině podle Pascalova zákona je založen *hydraulický lis* a mnoho dalších zařízení, jako jsou zvedáky, posilovače brzd a řízení v automobilech. Společnou myšlenkou všech těchto zařízení je vybudit velkou sílu pomocí síly malé na základě šíření tlaku v kapalině.

Obvyklá konstrukce hydraulického lisu spočívá ve dvou spojených válcových nádobách, v nichž je uzavřena kapalina. Ve válcových nádobách běhají volně pohyblivé písty, jeden o malé ploše styku s kapalinou, druhý o velké ploše styku s kapalinou. Když se působí malou silou na malý píst směrem do kapaliny, vznikne podle vztahu (y4) tlak v kapalině. Ten se přenesе kapalinou na velký píst. Na něj pak působí kapalina tlakovou silou směrem z kapaliny podle vztahu (y3). Takto vzniklá síla je větší, než síla, kterou je působeno na malý píst. Zvětšení síly je přímo úměrné podílu ploch obou pístů. Čím má velký píst větší plochu než píst malý, tím větší silou na něj kapalina působí. Zvětšení síly ukazuje vztah (10).

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (10)$$

Ve vztahu (10) značí F_1 (N) – vnější tlaková síla působící na povrch kapaliny o ploše S_1 (m^2), F_2 (N) – vnější tlaková síla působící na povrch kapaliny o ploše S_2 (m^2).



Obr. 36: Hydraulický lis

Hydraulický lis splňuje podmínku zachování mechanické práce podle vztahu (11).

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \quad (11)$$

Ve vztahu (11) značí F_1 (N) – vnější tlaková síla působící na povrch kapaliny o ploše S_1 , F_2 (N) – vnější tlaková síla působící na povrch kapaliny o ploše S_2 , l_1 (m) – vtlačení pístu o ploše S_1 do kapaliny, l_2 (m) – vytlačení pístu o ploše S_2 . Proto malé vytlačení pístu o velké ploše vyžaduje velké zatlačení pístu o malé ploše.

Na principu hydraulického lisu je ve vodních stavbách založen pohon mnoha hydrotechnických zařízení (pohyblivé jezy).

Volný povrch kapaliny

Na kapalinu, která se nachází v gravitačním poli Země, působí gravitační síla. *Volný povrch kapaliny* na rozhraní s plynem (atmosférou) zaujímá takovou polohu, aby byl kolmý ke směru působení gravitační síly.

V malých nádobách je volná hladina kapaliny označována jako vodorovná, protože zakřivení povrchu Země lze na malých plochách zanedbat. Na velkých vodních ploch (např. oceánů) je zakřivení hladiny dobře patrné, zhruba odpovídá zakřivení povrchu Země.

Volný povrch kapaliny se označuje také jako *volná hladina* nebo *prostá hladina*.

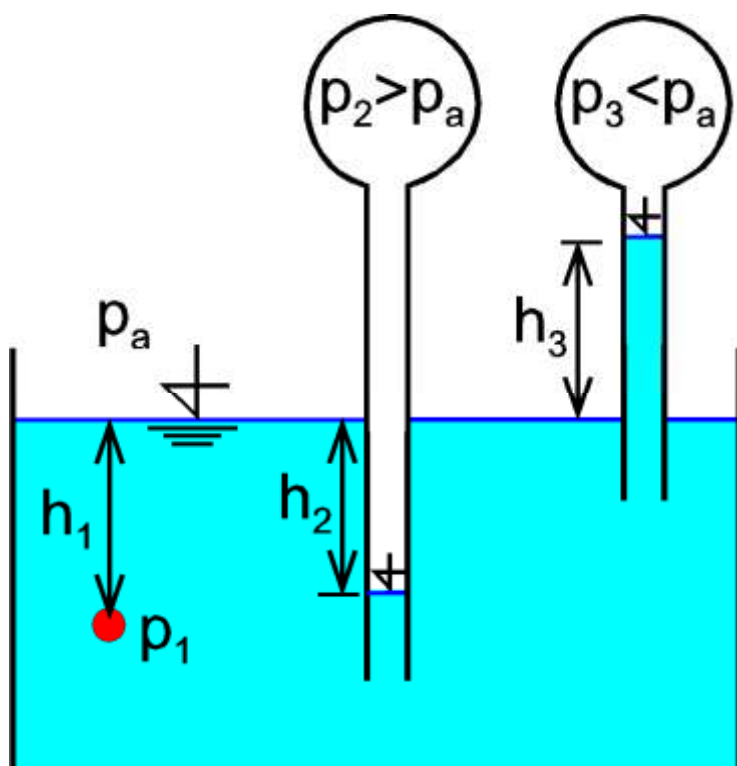
Přetlak a podtlak

Na hladinu kapaliny působí tlak plynu – často atmosféry. Normální atmosférický tlak je asi 1013 hPa. Tlak menší než atmosférický tlak se nazývá *podtlak*, tlak větší než atmosférický tlak se nazývá *přetlak*. Prostor s takřka nulovým tlakem se nazývá *vakuum*.

Na (Obr. 37) je znázorněno, kam dostoupí hladina kapaliny při působení přetlaku nebo podtlaku plynu p_v na volnou hladinu s tlakem p_a . Působením přetlaku plynu se hladina kapaliny sníží, působením podtlaku se zvýší oproti volné hladině. Velikost snížení nebo zvýšení plyne ze vzorce (12).

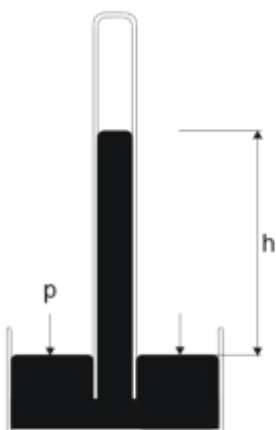
$$h = \frac{p_a - p_v}{\rho \cdot g} \quad (12)$$

Ve vzorci (12) značí p_a (Pa) – atmosférický tlak na volné hladině, p_v (Pa) – přetlak nebo podtlak působící na hladinu kapaliny, ρ (kg/m^3) – hustota kapaliny, g (m/s^2) – gravitační konstanta, h (m) – snížení nebo zvýšení hladiny kapaliny vůči volné hladině kapaliny.



Obr. 37: Přetlak a podtlak

Na tomto principu je založen *kapalinový tlakoměr*, kterým se měří atmosférický tlak (Obr. 38). Jako kapalina se používá často rtuť, protože má velkou hustotu, takže normálnímu atmosférickému tlaku odpovídá sloupec 760 mm rtuti. Rtuťový tlakoměr udává tlak výškou rtuťového sloupce ve vzduchoprázdne skleněné trubici, která je nahoře uzavřena a dole ponořena do nádoby s rtutí. Podle vzorce (12) se rtuť se v trubici ustálí v takové výšce, při níž je hydrostatický tlak rtuťového sloupce roven atmosférickému tlaku (tlak p_v je nulový).



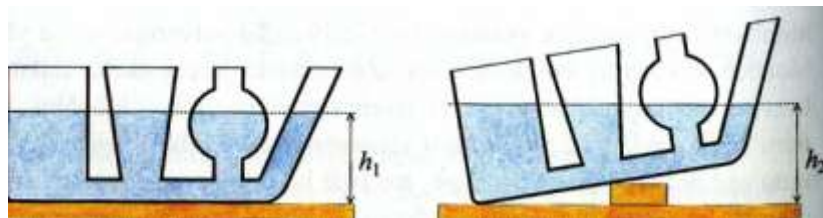
Obr. 38: Kapalinový tlakoměr

Normálnímu tlaku atmosféry odpovídá tlak asi 10 m vysokého sloupce vody. V důsledku toho zemská atmosféra vytlačí vodu do trubice s vakuem do výšky max. 10 m. Tato skutečnost omezuje maximální dopravní výšku sacích čerpadel.

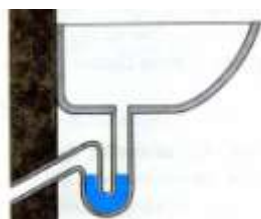
Spojené nádoby

Ve spojených nádobách se projevuje Pascalův zákon vyrovnáním výškové polohy hladin. Pokud je ve všech ramenech spojených nádob jedna kapalina a působí na ni stejný vnější tlak (atmosférický), pak se volná hladina kapaliny ustálí ve všech ramenech ve stejné výšce, protože ve všech ramenech musí být ve stejné hloubce stejný hydrostatický tlak (Obr. 39).

Tento jev se využívá v konstrukci mnoha běžných zařízení – např. sifonu kuchyňské výlevky (Obr. 40), vodoznaku kotle nebo varné konvice, hadicové libely apod. Ve vodních stavbách se užívá např. v plavebních komorách.



Obr. 39: Spojené nádoby

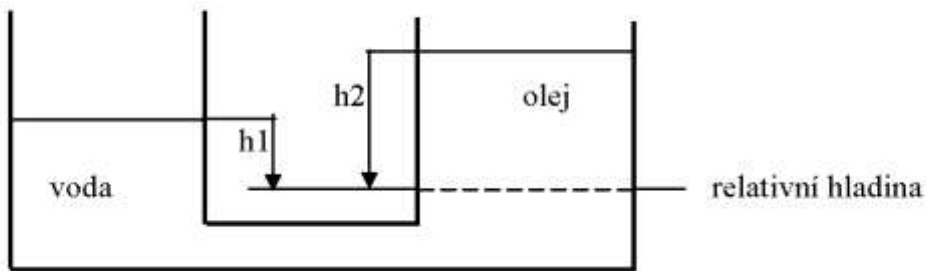


Obr. 40: Sifon na principu spojených nádob

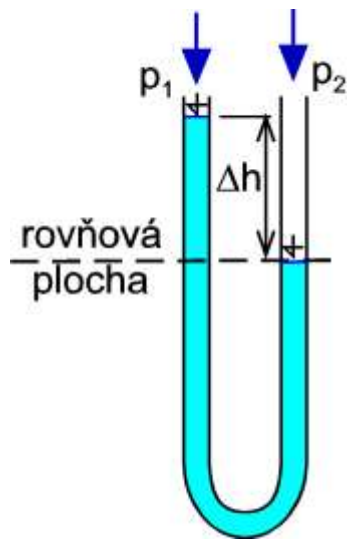
Jsou-li v ramenech spojených nádob odlišné kapaliny, které se vzájemně nepromísí, ustálí se výšky absolutních hladin nad rozhraním kapalin (relativní hladina) nepřímo úměrné hustotám obou kapalin podle vztahu (13). Na rozhraní kapalin je hydrostatický tlak shodný (Obr. 41).

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (13)$$

Ve vztahu (13) značí ρ_1 (kg/m^3) – hustota kapaliny 1, h_1 (m) – výška hladiny kapaliny 1 nad rozhraním kapalin, ρ_2 (kg/m^3) – hustota kapaliny 2, h_2 (m) – výška hladiny kapaliny 2 nad rozhraním kapalin.



Obr. 41: Rozhraní nemísitelných kapalin ve spojených nádobách

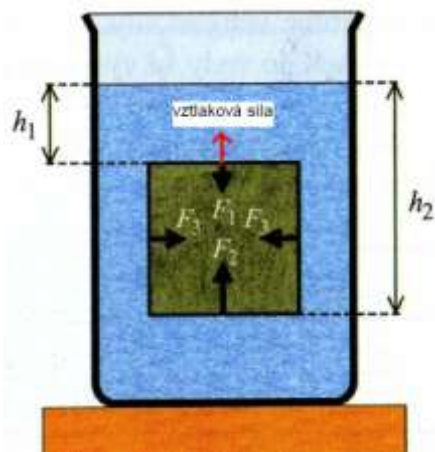


Obr. 42: Diferenciální tlakoměr

Pokud na kapalinu v ramenech působí odlišný vnější tlak, nastaví se hladina v rameni, na který působí větší vnější tlak, níže, než je hladina v rameni, na který působí menší vnější tlak. Výškový rozdíl hladin udává vztah (14). Na tomto principu je založen diferenciální tlakoměr (Obr. 42).

$$\Delta h = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} \quad (14)$$

Ve vztahu (14) značí, Δh (m) – výškový rozdíl hladin kapaliny, p_2 (Pa) – tlak v kapalině způsobený působením vnější tlakové síly (větší) na povrch kapaliny, p_1 (Pa) – tlak v kapalině způsobený působením vnější tlakové síly (menší) na povrch kapaliny, ρ (kg/m³) – na hustotu kapaliny, g (m/s²) – gravitační konstanta.



Obr. 43: Vztlaková síla

Archimédův zákon

Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou. Tato síla je výslednicí hydrostatických tlakových sil, působících na horní a dolní podstavu tělesa ponořeného do kapaliny. Protože dolní podstava je v kapalině hlouběji než horní podstava, působí na dolní podstavu větší hydrostatický tlak než na podstavu horní. Výslednice obou sil je vztlaková síla, která působí směrem nahoru proti směru gravitační síly. Výslednice hydrostatických tlakových sil působící na boční stěny jsou rovny nule (síly mají stejnou velikost a vzájemně opačný směr). Velikost vztlakové síly udává vztah (15).

$$F_{vz} = \rho \cdot g \cdot W \tag{15}$$

Ve vztahu (15) značí ρ (kg/m^3) – měrná hustota kapaliny, g (m/s^2) – gravitační konstanta, W (m^3) – objem ponořené části tělesa.

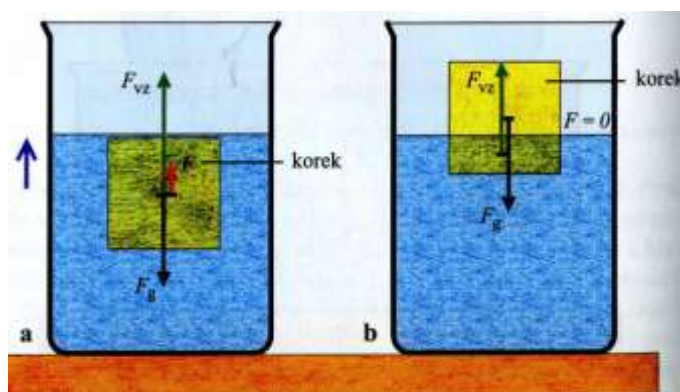
Vztah (y8) je vyjádřením Archimédova zákona: Velikost vztlakové síly je rovna tíze kapaliny tělesem vytlačené.

Plování těles

Plování těles závisí na poměru velikosti gravitační a vztlakové síly, působících na těleso ponořené do kapaliny. Vztlaková síla působící na těleso v kapalině je dána vztahem (16), gravitační sílu působící na těleso (jeho tíhu) udává vztah (16).

$$G = \rho_t \cdot g \cdot V \quad (16)$$

Ve vztahu (16) značí G (N) – tíha tělesa, ρ_t (kg/m^3) – měrná hustota tělesa, g (m/s^2) – gravitační konstanta, V (m^3) – objem celého tělesa.



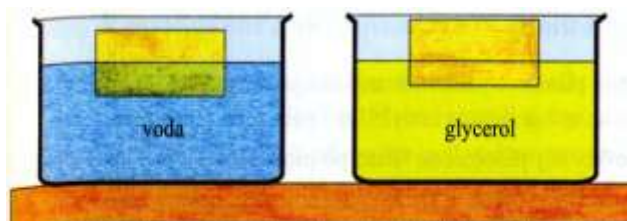
Obr. 44: Vztlaková síla a plování těles

Podmínky plování těles:

- vztlaková síla je větší než tíha tělesa – těleso plave,
- vztlaková síla je menší než tíha tělesa – těleso se potápí,
- vztlaková síla je rovna tíze tělesa – těleso se vznáší.

Plave-li těleso v kapalině, je určitou částí svého objemu do kapaliny ponořeno. O jak velkou část se jedná, závisí na hustotě kapaliny a hustotě látky, z níž je těleso zhotoveno (Obr. 44, Obr. 45). Při plování tělesa v kapalině se ponoří vždy taková část tělesa, že jsou v rovnováze gravitační síla působící na celé těleso a vztlaková síla, působící na ponořenou část tělesa.

Plovoucí *homogenní těleso* je v kapalině ponořeno tím větší částí svého objemu, čím menší je hustota kapaliny a čím větší je hustota látky, z níž je těleso zhotoveno.



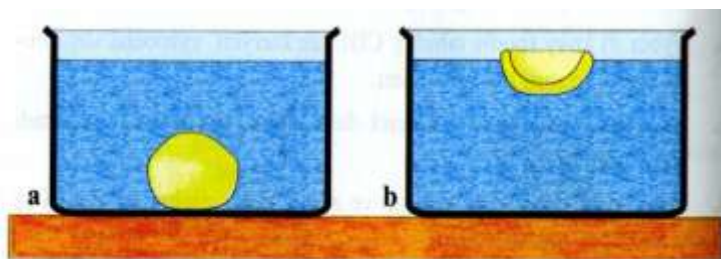
Obr. 45: Hloubka ponoru homogenního tělesa

V případě *nehomogenních těles* je situace jiná. Uděláme-li z plastelíny např. kouli (homogenní těleso), bude se ve vodě potápět, ale těleso tvaru misky vyrobené z plastelíny bude ve vodě plovat (Obr. 46). Je to způsobeno tím, že vnitřní objem misky je vyplněn vzduchem, jehož hustota je velmi výrazně menší, než hustota vody – jedná se tedy o těleso nehomogenní. Proto plovat mohou i tělesa zhotovená z látky s vyšší hustotou, než je hustota kapaliny, pokud jsou k tomu tvarově přizpůsobena tak, aby jejich výsledná tíha byla menší než vztlaková síla.

Na principu plování nehomogenních těles je založena konstrukce *lodí*. Trup lodi je z materiálu, který se sám do vody potopí (ocel, železobeton atd.). Trup je však dutý, je vyplněn vzduchem o nepatrné tíze. Loď musí být zkonstruována tak, aby celková tíha lodi

byla menší než vztlaková síla, která na trup působí. Pak je při plování loď částečně vynořena nad hladinu, úroveň vynoření se označuje jako *čára ponoru*.

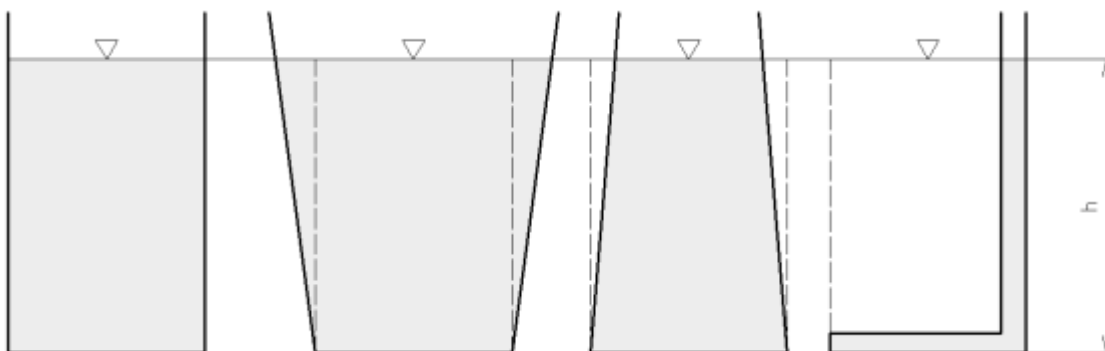
Ponorka je schopna se potopit, vynořit i se ve vodě vznášet podle toho, kolik nabere vodní přítěže. Napouštěním a vypouštěním přítěže se totiž mění celková tíha ponorky, a tím i poměr vztlakové síly a tíhy ponorky.



Obr. 46: Plování nehomogenních těles

Hydrostatický paradox

Velikost hydrostatické tlakové síly na dno nezávisí na tvaru a celkovém objemu kapalného tělesa. Proto v nádobách různého tvaru se dnem stejné plochy a při stejné výšce hladiny kapaliny o stejné hustotě působí na dna nádob stejná tlaková síla. Tento jev se nazývá hydrostatický paradox. Je důsledkem Pascalova zákona. Hydrostatický paradox objevil Simon Stevin (1548/49–1620).



Obr. 47: Hydrostatický paradox

Hydrostatický paradox se projevuje tím, že hydrostatická tlaková síla na dno nádoby naplněné do stejné výšky stejnou kapalinou je vždy stejná bez ohledu na objem či hmotnost kapaliny. Nádoby stejně vysoké se stejně velkým dnem se mohou lišit jedině tvarem nádoby – nahoře zužující se nádoba pojme menší množství kapaliny, nahoře rozšiřující se nádoba pojme větší množství kapaliny. Tíha kapalin v těchto nádobách je různá, avšak tlaková síla na dno je stejná. Hydrostatický paradox ilustruje Obr. 47. Ve všech čtyřech nádobách s kapalinou o shodné hustotě je hydrostatická síla F na dno shodná, protože mají shodnou plochu dna S a hloubku kapaliny h .

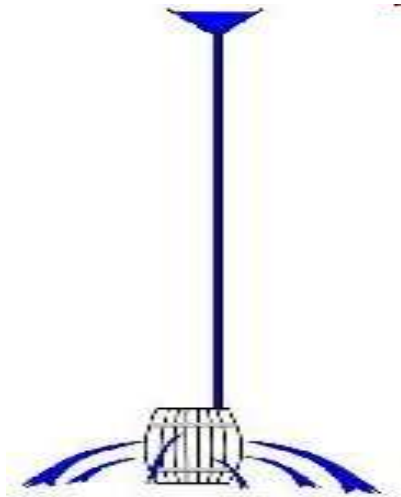
Hydrostatický paradox odporuje „selskému rozumu“, proto se nazývá „paradox“, neboť selský rozum napovídá, že hydrostatická síla působící na dno nádoby by měla být rovna tíze kapaliny v nádobě. To není pravda. Rozdíl mezi tíhou kapaliny a tlakovou silou kapaliny na dno je způsoben silou reakce stěn, která u rozšiřující se nádoby působí na kapalinu směrem šikmo vzhůru (kapalinu nadlehčuje), u zužující se nádoby působí na kapalinu šikmo dolů (kapalinu přitlačuje na dno).

Hydrostatický paradox má zásadní dopady do technické praxe. Jeho neznalost může mít za následek závažné havárie nádob na kapaliny, vodních a jiných staveb, jak ukazuje Pascalův pokus.

Pascalův pokus

B. Pascal (1623–1662) předvedl na náměstí v Rouenu překvapivý pokus (Obr. 48). Pevný dřevěný sud výšky 100 cm a průměru 80 cm, opásaný železnými obručemi, naplnil vodou. Sud vodu držel a nepraskl. Pak zasadil do horního víka sudu 9 m dlouhou tenkou svislou trubici zakončenou trychtýřem. Trubicí pak zaplnil zcela jednou sklenicí vody. V tom okamžiku se sud roztrhnul. Hydrostatická tlaková síla 9 m vysokého vodního sloupce sud roztrhla, přestože tíha vody přilité do trubice byla nepatrná vůči tíze vody v sudu.

Vysvětlení spočívá v tom, že hydrostatický tlak závisí pouze na výšce hladiny, nikoli na množství vody (hydrostatický paradox). Takže když voda z jediné sklenice zaplnila úzkou trubičku až do výšky kostelní věže, vyvinula hydrostatický tlak odpovídající výšce věže. Tlaková síla je součinem tlaku a plochy, proto úzká trubička o malé ploše stěny tlakovou sílu snadno vydržela, zatímco na velkou plochu stěny sudu působila mnohem větší tlaková síla, která sud roztrhla.



Obr. 48: Pascalův pokus, roztržení sudu

Pascalův pokus je ilustrací toho, jak může dojít k havárii vodní stavby vlivem nepatrného množství vody, která se dostala na nevhodné místo a vytvořila tak velkou hydrostatickou sílu. Takto může dojít roztržení betonového bloku v důsledku vysoké svislé praskliny, do které se dostala voda.

Hydrostatické síly a zatěžovací obrazce

Správné určení hydrostatických sil je základem bezpečného návrhu konstrukcí vodních staveb a zařízení, které jsou ve styku s kapalinami. V mnoha případech lze celkové působení hydrostatických sil na konstrukci složit z *dílčích hydrostatických sil*, které působí na dílčí *zatěžované plochy* konstrukce ve styku s kapalinou. *Výsledná hydrostatická síla* je vektorovým součtem všech dílčích hydrostatických sil. Pro návrh jakékoliv konstrukce, na kterou působí kapalina, je důležité znát nejen velikost a směr působení dílčích hydrostatických sil, ale i velikost a směr výsledné hydrostatické síly. Tyto údaje jsou důležité pro posouzení celkové stability konstrukce.

Pokud mají zatěžované plochy jednoduchý geometrický tvar (obdélník, válcová plocha), lze vyčíslit působící hydrostatické síly pomocí jednoduchých vzorců, založených na faktu, že hydrostatický tlak je úměrný hloubce kapaliny. Jsou-li zatěžované plochy tvarově komplikované, užívají se pro vyčíslení hydrostatických sil složitější výpočetní postupy. V mnoha případech je užitečné grafické znázornění hydrostatického tlaku. Umožňuje

jednoduché a účinné posouzení konstrukce z hlediska odolnosti vůči hydrostatickému tlaku a z hlediska stability.

Grafické znázornění hydrostatického tlaku působícího na zatěžované plochy se nazývá *zatěžovací těleso*. Zatěžovací těleso je tvořeno zatěžovací plochou jako podstavou, z níž vycházejí kolmice o velikosti hydrostatického tlaku v daném místě zatěžovací plochy. *Hydrostatická síla* působící na zatěžovanou plochu je rovna objemu zatěžovacího tělesa vynásobenému hustotou kapaliny a gravitační konstantou. Hydrostatická síla působí ve směru kolmém na zatěžovanou plochu a prochází těžištěm zatěžovacího tělesa.

Zatěžovací těleso obecného tvaru lze získat pomocí sady *zatěžovacích obrazců*. Zatěžovanou plochou se vedou svislé řezy a ke každému řezu se stanoví zatěžovací obrazec. Zatěžovací obrazec je tvořen řezem zatěžovanou plochou jako podstavou, z níž vycházejí kolmice o velikosti hydrostatického tlaku v daném místě řezu. *Hydrostatická síla příslušná k řezu* zatěžovanou plochou je rovna ploše zatěžovacího obrazce vynásobenému hustotou kapaliny, gravitační konstantou a odstupem mezi dvěma sousedícími řezy. Hydrostatická síla příslušná k řezu zatěžovanou plochou působí ve směru kolmém na zatěžovanou plochu a prochází těžištěm zatěžovacího obrazce. *Výsledná hydrostatická síla* působící na celou zatěžovanou plochu je dána vektorovým součtem hydrostatických sil příslušných ke všem řezům zatěžovanou plochou.

Působení hydrostatické síly na vodní stavby

- **Pozor:** hydrostatická síla působí nejen v kapalině, ale působí zcela stejně i ve vodou plně nasycené půdě nebo hornině.
- Hydrostatická síla konstrukce zdola nadnáší (mají tendenci plavat) a z boku zatěžuje tlakem (mají tendenci se posunout ve směru působící síly). Všechny konstrukce musí spolehlivě vzdorovat vzlaku i tlaku.

Kontrolní otázky:

- *Jak vzniká hydrostatický tlak?*
- *Jak se projevuje hydrostatický paradox?*
- *Co říká Archimédův zákon a proč tělesa plovou?*
- *Jak souvisí hydrostatická síla s hydrostatickým tlakem?*

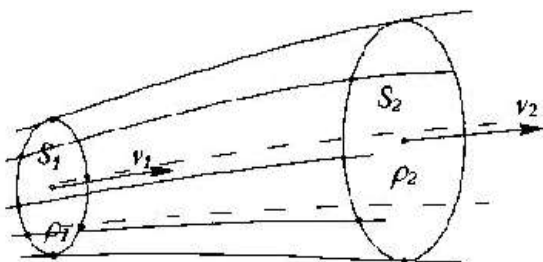
14 Proudění kapaliny a rovnice kontinuity

Pohyb kapaliny, proudnice a proud

Hydrodynamika odvozuje zákony *pohybu kapaliny*. Pohyb kapaliny se děje pohybem jednotlivých částic kapaliny v prostoru. Proudění je pohyb tekutiny, při kterém se částice tekutiny pohybují svým neuspořádaným pohybem a zároveň se posouvají ve směru proudění.

Částice tekutiny se při proudění pohybují po určitých drahách. Dráha částice je křivka, kterou opisuje částice tekutiny v prostoru v průběhu času. Dráhy částic se v ustáleném proudění ztotožňují s tzv. *proudnicemi*. V neustáleném proudění je proudnice obalovou křivkou těchto drah. Proudnice jsou křivky v prostoru, jejichž tečny udávají směr proudění v bodech dotyku. Každá proudnice je spojitá křivka, která znázorňuje okamžitý stav proudění.

Zvolme v prostoru uzavřenou křivku (např. kružnici). Každým bodem této křivky prochází jedna proudnice, což vytvoří stěny *proudové trubice* (Obr. 49). Proudovou trubicí si lze přestavit jako zdánlivé potrubí, jehož stěny jsou tvořeny proudící vodou.



Obr. 49: Proudová trubice

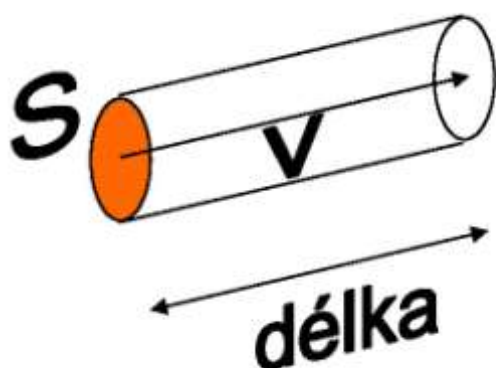
Pohybem kapaliny vzniká *proud kapaliny* tento proud lze definovat jako svazek mnoha proudových trubic. V každé proudové trubici se kapalina může pohybovat jinou rychlostí.

Rovnice kontinuity

Pro pohyb kapaliny platí *rovnice kontinuity*, která je vyjádřením zákona zachování hmotnosti. Pro pohyb tekutiny proudovou trubicí nabývá rovnice kontinuity tvaru (17). Průtok, tedy součin průřezové plochy a střední průřezové rychlosti je po celé délce proudové trubice konstantní.

$$Q = v \cdot S = konst. \quad (17)$$

Ve vztahu (17) značí Q (m³/s) – objemový průtok, v (m/s) – střední průřezová rychlost proudění, S (m²) – průtočná plocha. Pojmy jsou znázorněny na Obr. 50.



Obr. 50: Průtočná plocha a střední průřezová rychlost

Potenciálové a vířivé proudění

Podle způsobu, jakým se částice kapaliny při proudění pohybují, se rozeznává:

- Potenciálové (nevířivé) proudění – Při tomto pohybu konají částice kapaliny pouze posuvný pohyb, tzn. nerotují kolem své osy.
- Vířivé proudění – Částice kapaliny se kromě posuvného pohybu také otáčejí kolem své osy.

Laminární a turbulentní proudění

Podle toho, jak jsou uspořádány proudnice v proudu, se rozeznává:

- Laminární proudění – při tomto proudění jsou dráhy jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují ve vzájemně rovnoběžných vrstvách, aniž by přecházely mezi jednotlivými vrstvami.
- Turbulentní proudění – při tomto proudění přechází částice mezi různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání jednotlivých vrstev kapaliny.

Laminární proudění je takové proudění vazké kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice kapaliny se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách – „destičkách“ (destička = latinsky lamina), které se vzájemně nepromíchávají. Odtud také laminární neboli vrstevnaté proudění. Laminární proudění lze použít jako vhodnou aproximaci proudění reálných kapalin při malých rychlostech.

Turbulentní proudění je takové proudění vazké tekutiny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů (bouřit = latinsky turbo – odtud také název proudění). Rychlosti jednotlivých částic tekutiny se nepravidelně mění, tzn. částice již nemají ve všech místech neměnnou rychlost. Turbulentní proudění se objevuje při větších rychlostech proudění a u tekutin s menší přitažlivou silou mezi částicemi.

Kavitace

Kavitace (z latinského *cavitas* – dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině.

Ustálený a neustálený pohyb

Podle toho, jak se v jednom místě mění rychlost pohybu, se rozlišuje:

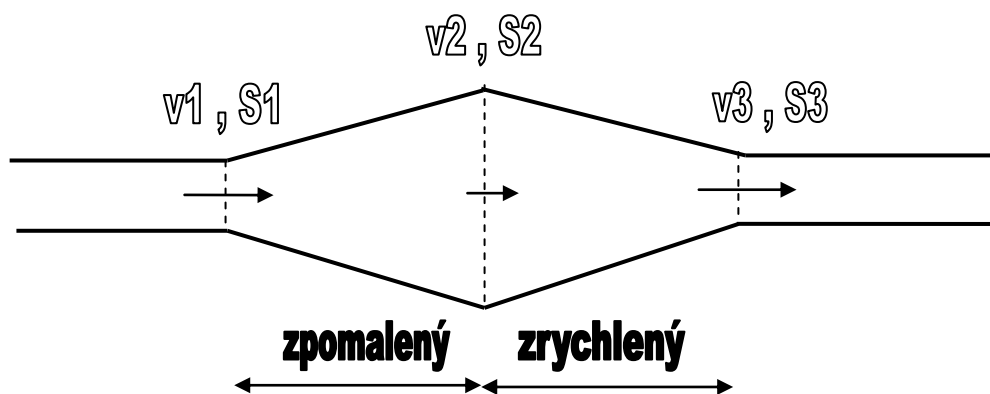
- *ustálený pohyb* (stacionární) – rychlost proudění je pohyb v čase stálá,
- *neustálený pohyb* (nestacionární) – rychlost proudění v jednom místě se v čase mění.

Pokud zůstává po délce potrubí nebo koryta průtočná plocha stejná, nemění se ani průřezová rychlost. Takové proudění se označuje jako *ustálený pohyb rovnoměrný*.

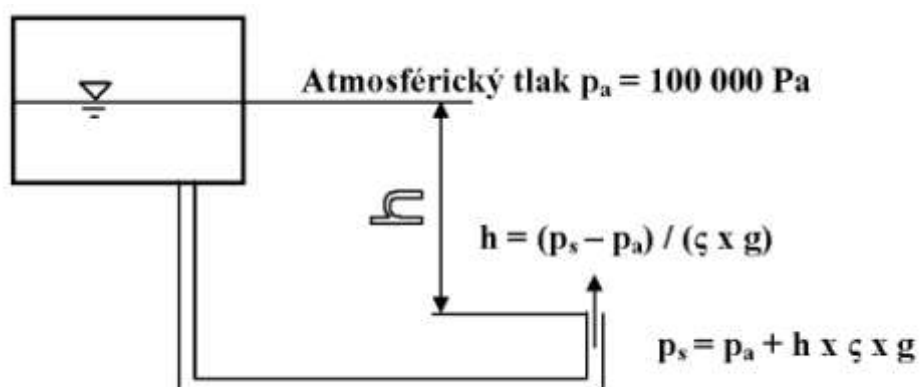
V případě, že se mění průtočná plocha, dojde v důsledku rovnice kontinuity také ke změně průřezové rychlosti, tak aby byl průtok zachován. Vzniká tak *pohyb ustálený nerovnoměrný*. Rozlišuje se pohyb:

- zpomalený – střední průřezová rychlost proudění se s rostoucí dráhou zmenšuje,
- zrychlený – střední průřezová rychlost proudění se s rostoucí dráhou zmenšuje.

Na Obr. 51 je příklad zpomaleného a zrychleného nerovnoměrného pohybu ustáleného.



Obr. 51: Nerovnoměrný pohyb zpomalený a zrychlený



Obr. 52: Tlakové proudění

Rozlišujeme tři základní druhy proudění :

- *Proudění s volnou hladinou:* Typickým příkladem je průtok vody v říčním korytě. Tento průtok je ovlivněn dnem a svahy. Pohyb vody vyvolává vlastní tíha vodní masy.
- *Proudění tlakové:* Typickým příkladem je průtok vody vodovodním potrubím, průtok je ovlivněn stěnami potrubí po celém obvodu průtočné plochy. Pohyb způsobuje rozdíl hydrostatického tlaku (Obr. 52).

- *Proudění proudovým paprskem:* Proud kapaliny je ohraničen pouze plynným, nebo kapalným prostředím. Typický příklad je proud vody při zalévání postřikem z hadice. Pohyb je způsoben setrvačnou silou a také vlastní tíhou kapaliny.

Proudění vody a vodní stavby

- Kavitace je velice nebezpečná, ničí a boří veškeré stavby a technologická zařízení.
- Turbulence je někdy nežádoucí, protože způsobuje energetické ztráty při proudění.
- Vodní skok se používá pro tlumení energie vodního proudu.

Kontrolní otázky:

- *Čím se zabývá hydrodynamika?*
- *Jak se liší proudové vlákno od proudové trubice?*
- *Co je charakteristické pro laminární proudění?*
- *Kdy vzniká kavitace?*
- *Kde typicky dochází k proudění s volnou hladinou?*
- *Čím se liší ustálený a neustálený pohyb?*
- *Co vyjadřuje rovnice kontinuity?*

15 Hydrodynamický tlak

Hydrodynamický tlak a hydrodynamická síla

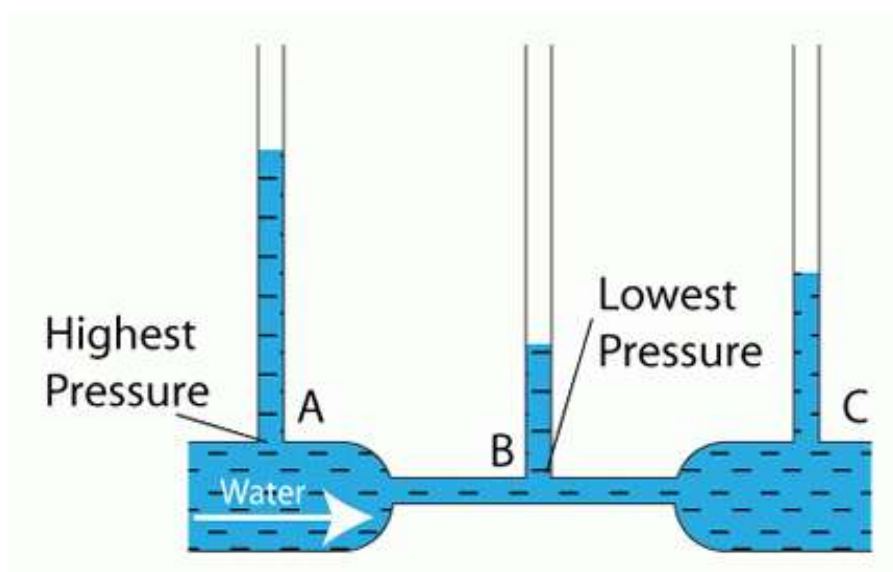
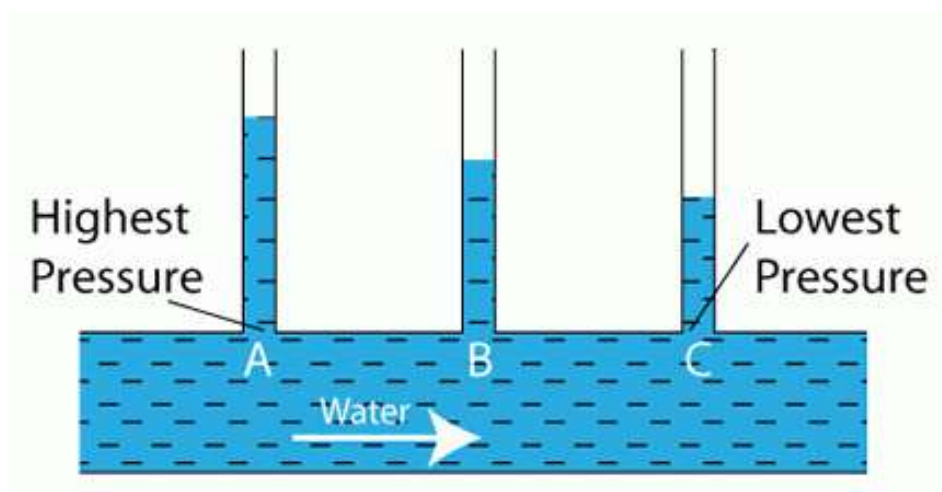
Hydrodynamický tlak je tlak v proudící kapalině. Je obecně **jiný** než hydrostatický tlak v kapalině stojaté.

Hydrodynamický paradox

Hydrodynamický paradox je skutečnost, že tlak v proudící kapalině je nepřímo úměrný rychlosti proudění kapaliny neboli že v užší části trubice, kde kapalina proudí rychleji, má kapalina menší tlak (Obr. 53).

V horní části Obr. 53 je naznačen průběh hladin ve spojených nádobách (svislé trubice napojené na vodorovné potrubí v bodech A, B a C) v případě že kapalina protéká potrubím o konstantním průřezu. V důsledku platnosti rovnice kontinuity teče kapalina potrubím konstantní rychlostí po celé délce. Pokles hladiny v připojených trubicích A, B, C se zvětšuje s délkou potrubí od vtoku. Tento pokles je způsoben ztrátami třením kapaliny o stěny potrubí. Ztráty jsou tím větší, čím je potrubí delší.

V dolní části Obr. 53 je naznačen průběh hladin ve spojených nádobách (svislé trubice napojené na vodorovné potrubí) v případě že kapalina protéká potrubím, které je uprostřed zúžené (C). V důsledku platnosti rovnice kontinuity teče kapalina zúženou částí C větší než v nezúžených částech A a B. Pokles hladiny v zúžené prostřední trubicí C (dolní část obrázku) je větší než v případě, kdy trubice není zúžena (horní část obrázku). Zvětšení poklesu hladiny je způsobeno větší rychlostí proudění v tom místě potrubí, ze kterého trubice vychází. Tento jev tvoří podstatu hydrodynamického paradoxu.



Obr. 53: Hydrodynamický paradox. Highest Pressure – nejvyšší tlak, Lowest Pressure – nejnižší tlak. Water – voda

Obdoba hydrodynamického paradoxu nastává také při proudění plynů. Někdy se nazývá *aerodynamický paradox*. Fyzikální objasnění hydrodynamického a aerodynamického paradoxu podává Bernoulliho rovnice.

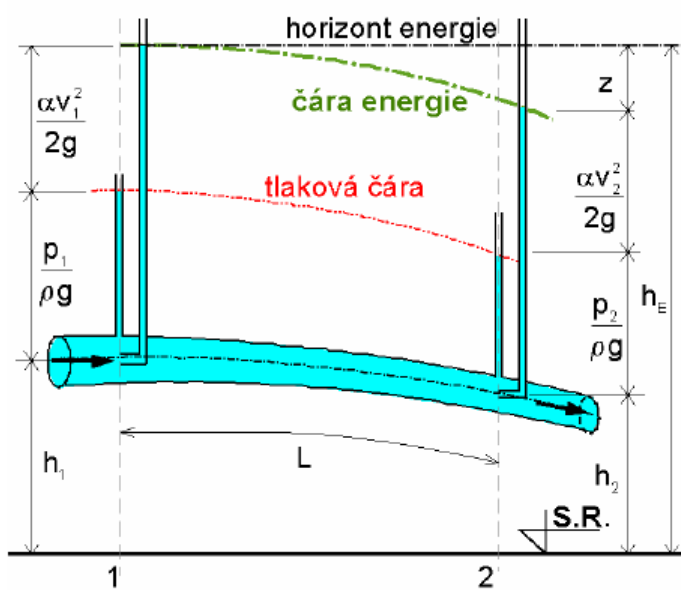
Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie proudící kapaliny. Základní pojmy jsou vysvětlené na Obr. 54.

Pro ideální kapalinu (bez ztrát) má Bernoulliho rovnice tvar (18).

$$\frac{1}{2}\rho.v^2 + p + \rho.g.h = konst. \quad (18)$$

V rovnici (18) značí v (m/s) – rychlost proudění (m/s), p (Pa) – tlak, h (m) – výška (gravitační), ρ (kg/m³) – hustota kapaliny, g – gravitační konstanta (na povrchu Země 9,81 m/s²). V podobě (18) mají členy rovnice rozměr v Pascalech. Pokud se celá rovnice vydělí výrazem $\rho.g$, mají členy rovnice rozměr v metrech (myšleno v metrech sloupce kapaliny o hustotě ρ v gravitačním poli o intenzitě g). Takto se odvodí výškový tvar Bernoulliho rovnice.



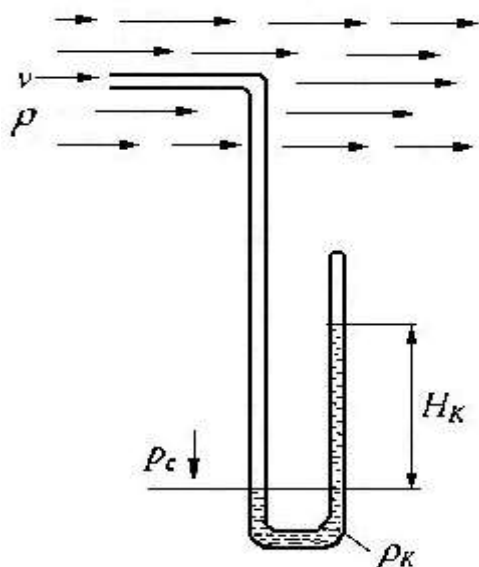
Obr. 54: Horizont energie, čára energie a tlaková čára

Měření tlaků a rychlostí

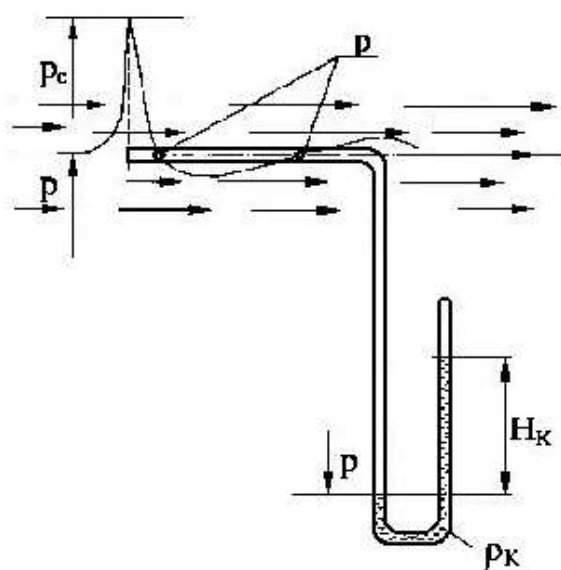
Celkový tlak

Celkový tlak se měří *Pitotovou trubicí*. Je to trubice, jejíž otevřené rameno směřuje proti proudu, a je s ním rovnoběžné (Obr. 55). Druhý konec je připojen k tlakoměru, kterým je dnes zpravidla elektronické čidlo, to znamená, že toto rameno trubice končí membránou snímače. Druhá možnost je, že trubice je připojena ke kapalinovému manometru s tekutinou o hustotě ρ_K , která při působení proudu vystoupí do výšky H_K , jestliže nad hladinou v uzavřeném konci je vakuum. V obou případech je trubice uzavřená, což znamená, že částice tekutiny pronikající po centrální proudnici otevřeným ramenem do trubky jsou bržděny na nulovou rychlost a tlak je zde celkový.

Pitotova trubice je měřicí přístroj, který umožňuje určit rychlost proudění tekutiny ze změny tlaku v tekutině. Vynalezl ji roku 1732 francouzský inženýr – hydraulik Henri Pitot (1695 –1771), když měřil průtok v řece Seině. Největší význam má používání její vylepšené varianty jako rychloměru u letadel, ale i měření rychlosti průtoku v průmyslových aplikacích.



Obr. 55: Pitotova trubice



Obr. 56: Statická trubice

Statický tlak

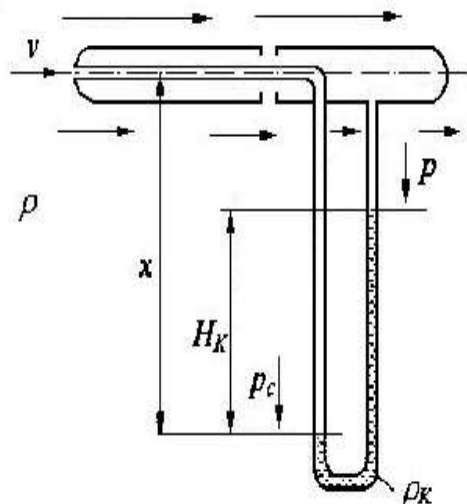
Pro měření statického tlaku uvnitř proudu se používá *statická trubice* (Obr. 56). Ohnuté rameno rovnoběžné s proudem má náběžný konec uzavřený a aerodynamicky upravený, aby trubice byla hladce obtékána. V plášti jsou malé otvory pro snímání statického tlaku. Průběh tlaku podél povrchu trubice znázorněné na obrázku ukazuje, že jsou dvě místa, kde mohou být otvory umístěny. V místě za náběžným bodem tlak prudce klesá ze své celkové hodnoty a místo statického tlaku je nejisté. Vhodnější je zadní bod, kde se tlak mění kolem statické hodnoty pozvolna. Statický tlak se určuje z hustoty kapaliny ρ_k , která vystoupí do výšky H_K .

Dynamický tlak

Pro měření dynamického tlaku se používá *Prandtlova* nebo *Venturiho* trubice. Nouzově bychom jej mohli určit jako rozdíl tlaků měřených Pitotovou a statickou trubicí.

Prandtlova trubice vznikla spojením Pitotovy a statické trubice v jeden celek (Obr. 57). Pitotova trubice je vložena do osy statické trubice a obě trubice jsou připojeny ke vstupům

diferenciálního manometru. Pokud požadujeme automatizaci měření, manometr je elektrický, jinak může být kapalinový.



Obr. 57: Prandtlůva trubice

Hydrodynamický tlak a vodní stavby

Hydrodynamický tlak je velice nebezpečným jevem zejména na jezích. Může způsobit vtáhnutí neopatrného plavce pod vodu padající přes jez, neboť vysoká rychlost padající vody má za následek snížení tlaku ve vodě pod jezem. Proto snížený tlak ve vodě pod jezem nasává plavce pod padající vodu a nepustí ho ven z vodního válce, který se tvoří v podjezí.

Kontrolní otázky:

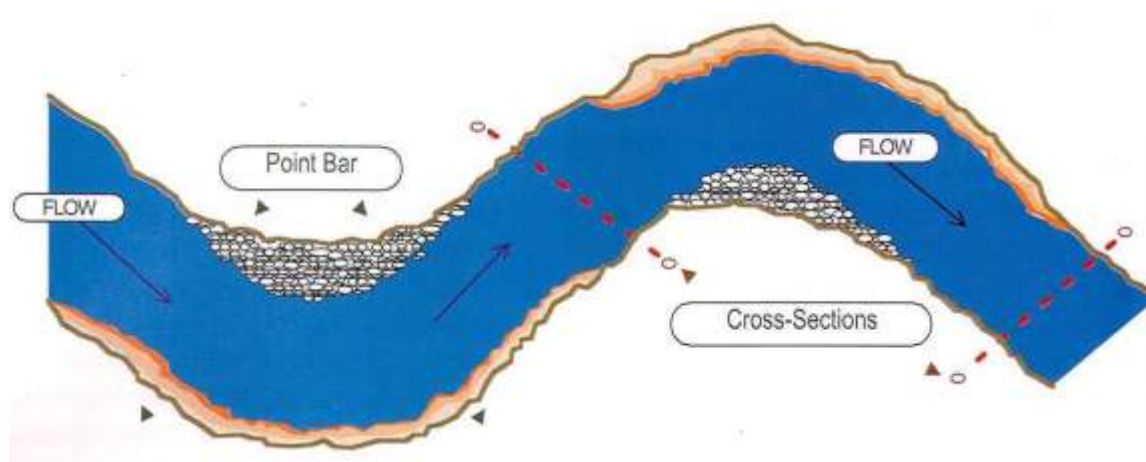
- *Popište hydrodynamický paradox.*
- *Co vyjadřuje Bernoulliho rovnice?*
- *Čím se liší statický a dynamický tlak?*
- *Co se měří Pitotovou trubicí?*

16 Proudění ve vodních tocích

Vodní toky

Vodní tok je odborný termín z hydrologie, který označuje jakýkoliv vodní útvar na zemském povrchu (popř. pod ním), tvořený tekoucí vodou. Je ohraničen korytem, jehož součástí je dno a levý a pravý břeh.

Vodní tok může být vytvořen přirozeně nebo uměle. Přirozené vodní toky mají vlnící se trasu koryta – vytvářejí meandry, pokud to geologické podmínky dovolí (Obr. 58). Umělé vodní toky mají nejčastěji přímá koryta s vloženými protisměrnými oblouky, čímž se napodobuje mandrování přirozených vodních toků.



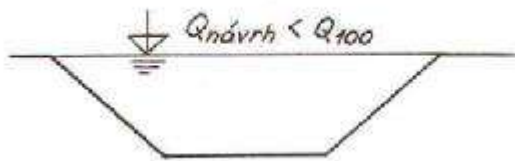
Obr. 58: Meandrování koryta

Tvary koryt

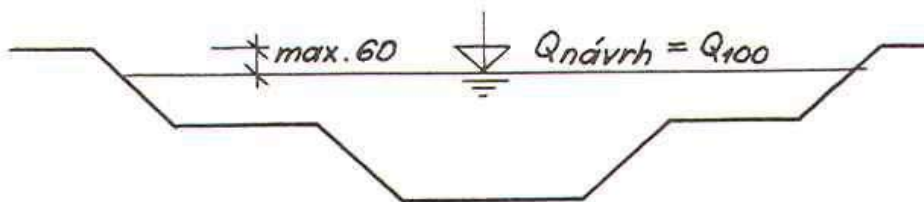
Přirozená koryta – vytvořená přírodními pochody. Mají většinou miskovitý tvar. V rovné trati symetrický, v oblouku asymetrický.

Umělá koryta – vytvořená lidmi. Mají jednoduché nebo složené geometrické tvary:

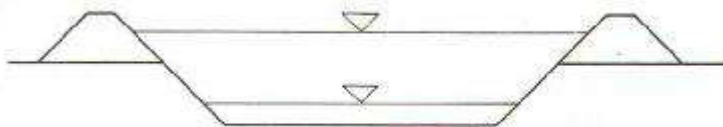
- Obdélníkový profil – především v městských tratích.
- Lichoběžníkový profil – nejčastější tvar profilu upraveného koryta (Obr. 59).
- Složený profil – v případě převádění velkých průtoků (Obr. 60).
- Ohrázovaný profil (Obr. 61, Obr. 62).
- Miskovitá koryta.



Obr. 59: Lichoběžníkový profil koryta



Obr. 60: Složený profil koryta



Obr. 61: Ohrázovaný profil koryta

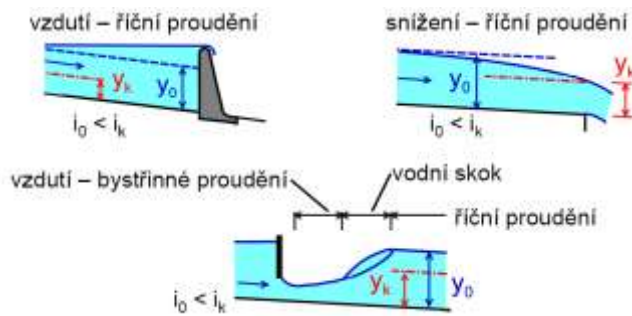


Obr. 62: Složený ohrázoovaný profil koryta

Říční a bystrinné proudění

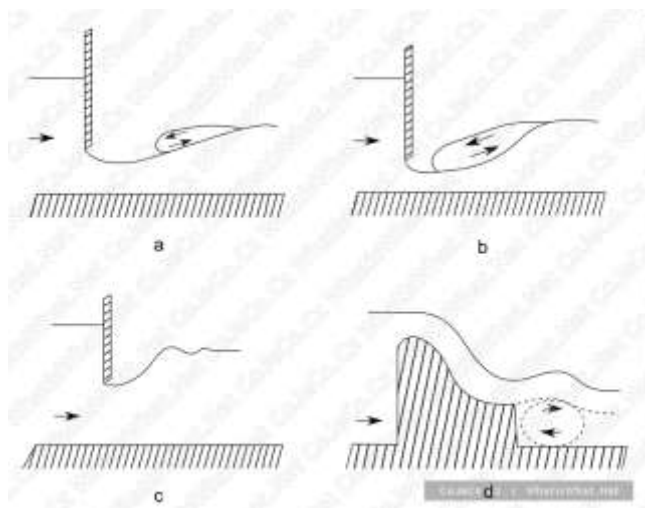
V otevřeném korytě rozlišujeme:

- *bystrinné proudění* tam, kde se kapalina pohybuje rychleji, než se šíří vlny po její hladině – vlny nejsou schopny se šířit proti proudu,
- *říční proudění* tam, kde se vlny proti proudu šířit mohou.

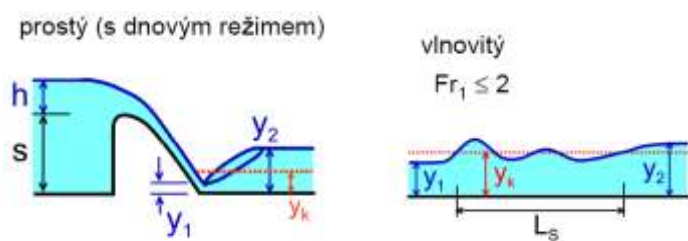


Obr. 63: Příklady proudění

Přechod z říčního do bystrinného proudění se odehrává plynule, přechod z bystrinného do říčního proudění vytváří *vodní skok* (Obr. 64, Obr. 65). Proudění na rozhraní mezi říčním a bystrinným se nazývá *kritické proudění*.



Obr. 64: Vodní skok



Obr. 65: Prostý a vlnovitý vodní skok

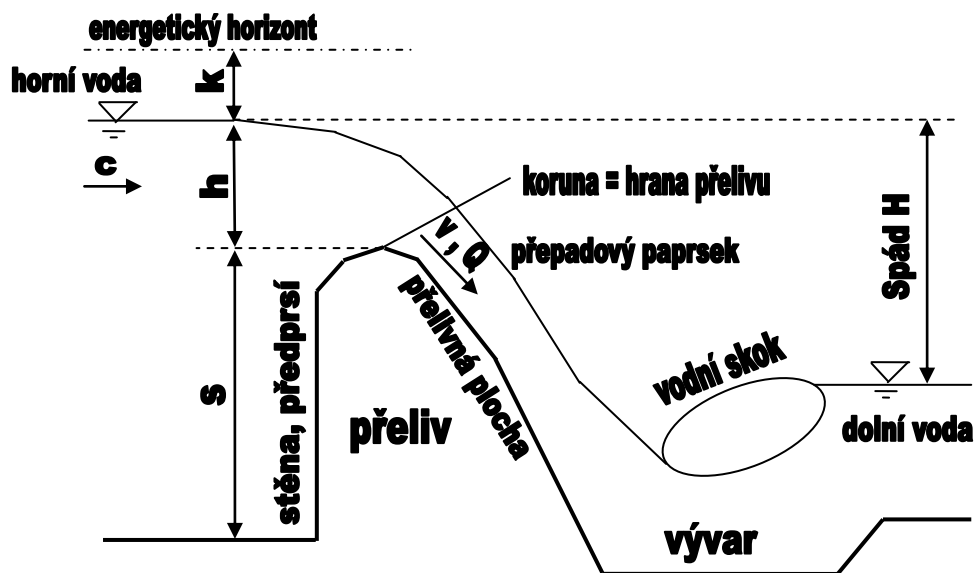
Vztahy pro dimenzování koryt vodních toků pomocí Chezyho rovnice obsahuje příloha 1.

Kontrolní otázky:

- Jak se rozlišují koryta vodních toků?
- Co je to vodní skok a kde vzniká?
- Jak se odlišuje bystrinné a říční proudění?
- Kde dochází ke kritickému proudění?

17 Přepady a přelivy

Přepad kapaliny vzniká postavením překážky do cesty vodnímu proudu. Touto překážkou může být např. konstrukce jezu, nebo hráz, nebo hradící stěna. Přes tuto konstrukci (*přeliv*) přepadá voda (Obr. 66). Nejvyšší hrana přelivu je *koruna přelivu* nebo *přelivná hrana*, pokud je přepadová stěna zaoblená, navazuje na korunu přelivu *přelivná plocha*. Délka předivné hrany (koruny) je *šířka přelivu*.



Obr. 66: Schéma přelivu

Přepadový paprsek je proud kapaliny, který přetéká přelivnou hranu, jeho tvar za přelivnou hranou je ovlivněn tlakovými poměry na přelivné ploše, případně tlakovými poměry v prostoru pod přepadovým paprskem.

Výška přelivné stěny je svislá vzdálenost mezi původním dnem koryta a korunou přelivu.

Přepadová výška je svislá vzdálenost mezi korunou přelivu a hladinou tzv. *horní vody*.

Spád přepadu je rozdíl hladin horní a dolní vody.

Přepadový průtok je množství vody protékající přes přeliv za jednotku času.

Rozdělení přepadů podle polohy přelivné hrany vůči směru vodního proudu:

- čelný (kolmý),
- šikmý,
- křivočarý,
- složený,
- postranní (boční).

Rozdělení přepadů podle výšky dolní vody:

- dokonalý (nezatopený – dolní voda nedosahuje úrovně přelivné hrany),
- nedokonalý (zatopený – dolní voda ovlivňuje přepadový průtok).

Rozdělení přepadů podle šířky přítoku vodního proudu a koruny přelivu:

- nezúžený,
- s bočním zúžením.

Rozdělení přepadů podle tloušťky t přelivné hrany a přelivné výšky h :

- ostrá hrana ($t < 2/3 h$),
- jezové těleso ($2 h > t > 2/3 h$),
- široká koruna ($t > 2 h$),
- přepad zvláštní.

Vztahy pro dimenzování přepadů a přelivů obsahuje příloha 4.

Kontrolní otázky:

- *Kde leží koruna přelivu?*
- *Jak se určí přepadová výška?*
- *Co je spád přepadu?*
- *Jak se dělí přepady podle výšky dolní vody?*
- *Jaké se rozlišují přepady podle tloušťky přelivné hrany?*

18 Proudění vody v potrubí

Potrubí se používá k dopravě kapalin. Kapalina buďto vyplní celý prostor potrubí, takže v celém objemu kapaliny je tlak vyšší než atmosférický (proudění tlakové), nebo proudí kapalina potrubím s volnou hladinou. Tlakové proudění je typické pro vodovodní síť, k beztlakovému proudění dochází nejčastěji ve stokové síti.

Rozlišuje se tlakové proudění:

- ustálené,
- neustálené pomalu proměnné,
- neustálené rychle proměnné.

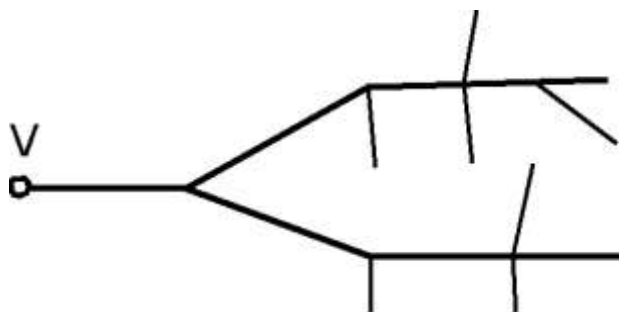
Typickým příkladem neustáleného tlakového proudění pomalu proměnného je proudění v potrubí při zásobování pitnou vodou ve vodárenských soustavách, kdy průtok závisí na velikosti odběrů a rozložení spotřeby vody v průběhu dne.

K neustálenému tlakovému proudění rychle proměnnému dochází při náhlé změně průtoku v potrubí při rychlém uzavření nebo otevření uzavíracích armatur, turbín a čerpadel. Důsledek je vodní ráz, při kterém se rychle šíří tlakové změny ve vodě v potrubí. Střídá se tlak a podtlak, což způsobuje chvění, které se přenáší na konstrukci potrubí. Příčinou vodního rázu je objemová stlačitelnost kapalin

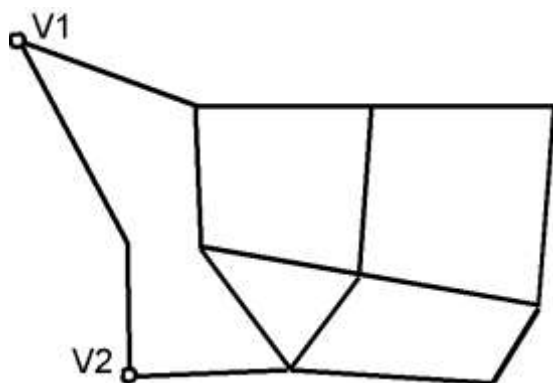
Potrubí se zhotovuje z těchto materiálů: ocel, litina, plasty, beton a železobeton, kamenina, sklolamináty, sklo a dalších. Tvar průřezu bývá většinou kruhový, ale můžeme se setkat i s obdélníkovým, eliptickým, vejčitým, nebo tlamovým průřezem.

Z hlediska výpočtu dělíme potrubí na dlouhé (jednoduché potrubí stálého průřezu) a krátké. Na dlouhém potrubí nepočítáme s místními ztrátami, které jsou oproti ztrátě třením zanedbatelné.

Potrubí se může dále větvit, takže může vytvářet složitější trubní sítě, jako je větevná síť (Obr. 67) a okruhová síť (Obr. 68).



Obr. 67: Schéma větevné trubní sítě



Obr. 68: Schéma okruhové trubní sítě

Vztahy pro dimenzování potrubí obsahuje příloha 2.

Kontrolní otázky:

- *K čemu slouží potrubí?*
- *Jaké jsou druhy trubních sítí?*
- *Z jakého materiálu se zhotovuje potrubí?*

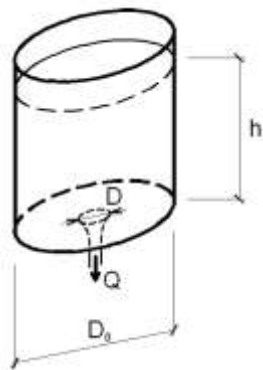
19 Výtok z otvorů

Rozlišuje se výtok otvorem:

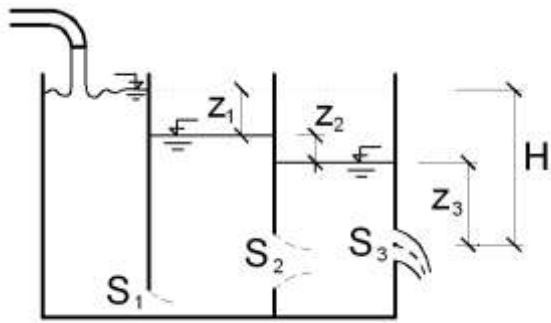
- ustálený – výtoková rychlost a množství se s časem nemění, hladina v nádrži konstantní, přítok se rovná výtoku,
- neustálený – výtoková rychlost a množství se v čase mění, hladina v nádrži je proměnná, nádrž se plní nebo prázdní.

Z hydraulického hlediska může být výtok:

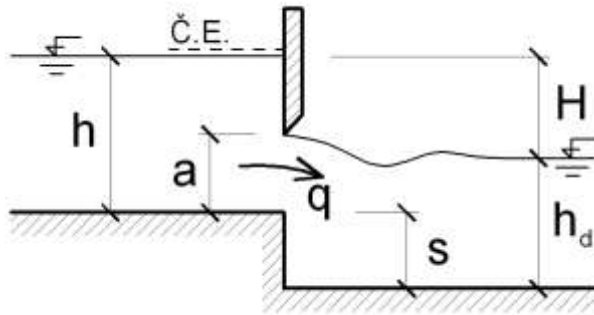
- volný (nezatopený) – kapalina vytéká do volného prostoru, výtokové charakteristiky nejsou ovlivňovány kapalinou za otvorem (Obr. 69),
- zatopený – kapalina vytéká pod hladinu (Obr. 70),
- částečně zatopený – část výtokového otvoru je pod hladinou, kapalina vytéká současně do volna i pod hladinu (Obr. 71).



Obr. 69: Volný výtok dnem nádoby



Obr. 70: Zatopený výtok S1 a S2, volný výtok S3



Obr. 71: Částečně zatopený výtok

Vztahy pro výpočet výtoku z otvorů obsahuje příloha 3.

Kontrolní otázky:

- Jak se liší ustálený a neustálený výtok?
- Co charakterizuje zatopený výtok?

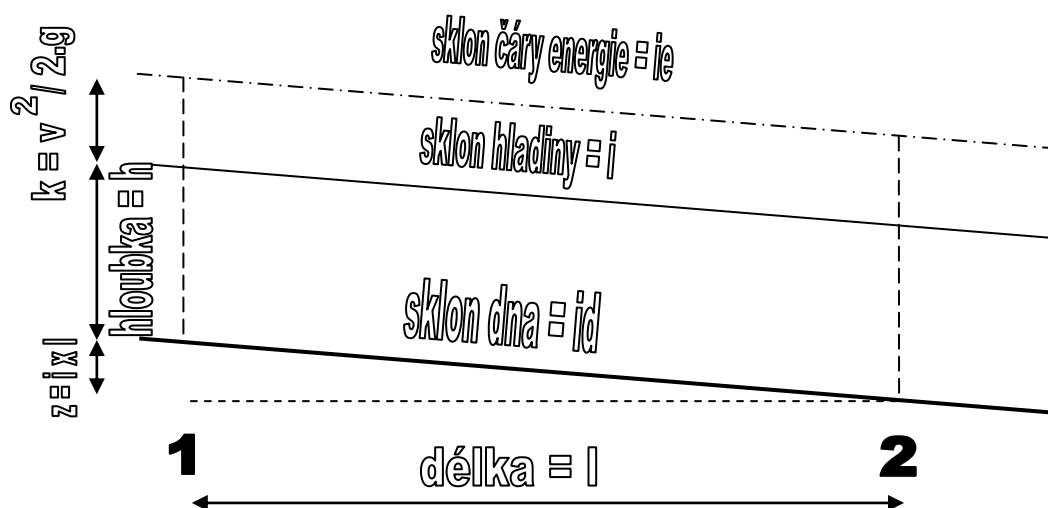
20 Závěr

Přírodovědné a technické znalosti vody jsou základním předpokladem pro zodpovědný přístup k ochraně a využití vody. V oboru vodního hospodářství je jejich respektování povinné ze zákona, neboť jsou zakotveny v soustavě zákonů, vyhlášek, vládních nařízení a technických norem.

Studijní opora obsahuje informativní výběr poznatků o vodě. Byla sestavena tak, aby poskytovala základní přehled hydrologie a hydrauliky pracovníkům ve vodním hospodářství, úředníkům státní správy a samosprávy a obecním zastupitelům.

Příloha č. 1: Výpočet průtoku vody korytem – Chezyho rovnice

Sklon koryta vodního toku se při rovnoměrném ustáleném pohybu spotřebuje na překonání ztrát třením, které při pohybu kapaliny vznikají. Sklon koryta je bezrozměrná veličina, která udává výškový rozdíl hladiny, který nastane na jednotkové délce koryta (Obr. 72). Často jej uvádíme v násobcích základní hodnoty, a to 100x (v procentech), nebo 1000x (v promilích). Do výpočtu jej vždy dosazujeme jako bezrozměrnou veličinu.



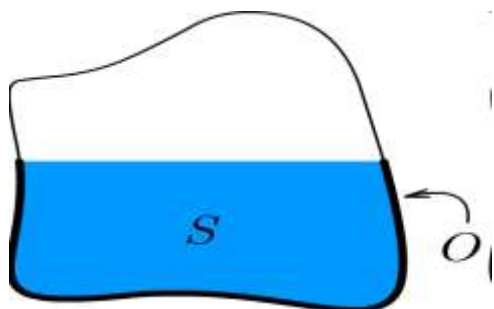
Obr. 72: Sklon čáry energie, hladiny a dna koryta

Průtočná plocha je plocha řezu vodou v korytě vedeného kolmo na osu koryta. Udává se v m^2 .

Omočený obvod je délka styku kapaliny s pevnými stěnami (např. koryta nebo potrubí) na průřezu kolmém na směr toku (Obr. 73). Jednotkou omočeného obvodu je metr.

Hydraulický poloměr R (m) je roven průtočné ploše S (m^2) lomené omočeným obvodem o (m).

$$R = \frac{S}{O}$$



Obr. 73: Průtočná plocha a omočený obvod

Pro jednotkovou délku koryta pak platí vztah pro sklon hladiny

$$i = \lambda \times \frac{1}{d} \times \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Za d dosadíme $4R$: ($R = S/O = (\pi d^2/4) / \pi d = \pi d^2/4 \pi d = d/4$)

$$i = \lambda \times \frac{1}{4 \cdot R} \times \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Vyjádríme z této rovnice vztah pro rychlost:

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda}} \times \sqrt{R \times I} = C \times \sqrt{R \times I}$$

C je rychlostní součinitel (Chezyho) (jednotkou je $\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda}}$$

Průtok pak vyjádříme jako součin střední profilové rychlosti a průtočné plochy

$$Q = C \times \sqrt{R \times I} \times S$$

Stanovení rychlostního součinitele C

Rychlostní součinitel pro otevřená koryta vyjadřuje vliv drsnosti povrchu (zrnitostní složení dna a vliv vegetačního krytu svahů) a tvaru koryta. V praxi se vyjadřuje řadou empiricky odvozených vztahů, z nichž nejjednodušší je Manningův výraz:

$$C = \frac{1}{n} \times R^{1/6}$$

Kde n je Manningův součinitel drsnosti, který dosahuje hodnot od 0,009 pro výjimečně hladké povrchy po 0,04 pro koryta ve velmi špatném stavu (výmoly, nánosy, zarostlé kořeny, zanesené kamením), vliv keřů a vzrostlých stromů pak dále zvyšuje hodnotu součinitele drsnosti n . Hodnotu součinitele drsnosti odečteme na základě stavu koryta v tabulkách.

Antoine de Chézy (1718–1798) byl francouzský hydrolog a autor tzv. Chézyho rovnice pro výpočet rychlosti rovnoměrného proudění. Publikována byla v roce 1775.

Příloha č. 2: Proudění v potrubí

Základem pro výpočet proudění v potrubí jsou vztahy odvozené z rovnice Bernoulliho (zachování energie):

$$h_1 + \frac{p_1}{\zeta \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\zeta \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum Z$$

Energie kapaliny na začátku potrubí (průřez č. 1) je zčásti zachována i na konci potrubí (průřez č. 2), a část této energie kapalina vynaloží na překonání odporů, které jsou způsobeny jednak třením a také změnami směru a rychlosti proudových vláken.

Ve výše uvedené rovnici si dosadíme

$$H_0 = h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - h_2$$

kde H_0 je hydraulický spád vyjádřený rozdílem geodetických výšek h_1 a h_2 se započtením vlivu rychlosti proudění na začátku potrubí.

Rozdíl tlaků $p_1 - p_2$ si nahradíme $p_{rel.}$

Po úpravách můžeme z rovnice vyjádřit vztah pro výpočet rychlosti proudění v_2 :

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \left(H_0 - \frac{p_{rel.}}{\zeta \cdot g} - \sum Z \right)}$$

Pokud vytéká kapalina do volné atmosféry, pak výraz

$$\frac{P_{rel.}}{\zeta \cdot g}$$

je nula, protože rozdíl tlaků je nulový a vztah se zjednoduší na:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g (H_0 - \sum Z)}$$

kde

$$H_0 = h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - h_2,$$

$\sum Z$ jsou všechny ztráty v potrubí.

Ztráty v potrubí

Rozdělujeme do dvou skupin:

- ztráty třením,
- místní ztráty.

Ztráty třením vznikají v důsledku tření o stěny potrubí a vnitřního tření vazké kapaliny při pohybu proudových vláken. Souhrn těchto ztrát vyjadřujeme jako část rychlostní výšky:

$$Z_t = \xi_t \times \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Z_t je ztráta třením v m, ξ_t je ztrátový součinitel ztráty třením, který udává, jaké procento z kinetické energie se při průtoku kapaliny ztratí (promění v teplo) v důsledku tření.

$$\xi_t = \lambda \times \frac{l}{d}$$

λ je součinitel drsnosti potrubí, l je délka potrubí v m, d je vnitřní průměr (světlost) potrubí v m.

Ztráty místní vznikají:

- na vtoku z nádrže do potrubí,
- vlivem rozšíření průřezu,
- vlivem zúžení průřezu,
- změnou směru potrubí (oblouk, koleno),
- v měřicím zařízení, nebo v sacím koši,
- v uzávěrech (šoupata, klapky, ventily a kohouty).

$$Z_m = \xi_m \times \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Z_m je příslušná místní ztráta, ξ_m je ztrátový součinitel příslušné místní ztráty, který udává, jaké procento z kinetické energie se při průtoku kapaliny ztratí (promění v teplo).

Součinitelé ztrát pro místní ztráty jsou uvedeny v hydraulických tabulkách. Často se v praxi místní ztráty zahrnují do výpočtu jako náhradní délky potrubí l_n , které se přičítají ke skutečné délce potrubí l , a příslušná místní ztráta se tímto zahrne do výpočtu ztráty třením. V tabulkách pro různá potrubí pak odečítáme přímo sklon čáry energie.

$$J = 100 \times \lambda / d \text{ v \%}.$$

Výsledná ztráta

$$Z = \frac{J}{100} \times (l + \sum l_n)$$

Jednoduché potrubí stálého průřezu

Pro dlouhé potrubí stálého průřezu převládají ztráty třením nad místními ztrátami, které se mohou ve výpočtu zanedbat. Rychlost proudění je v celé délce potrubí konstantní. Pokud je v místě výtoku atmosférický tlak, prochází tlaková čára těžištěm výtokového otvoru. Pokud je potrubí zaústěno do nádrže, končí tlaková čára v hladině kapaliny v této nádrži.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H_0}{1 + \lambda \cdot \frac{l}{d}}}$$

Krátké potrubí

U krátkých potrubí se místní ztráty zanedbat nedají a výraz pro výpočet rychlosti se použije v nezkrácené podobě:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H_0}{1 + \sum \xi_m + \lambda \cdot \frac{l}{d}}}$$

Typickým krátkým potrubím je shybka, násoska a potrubí v sestavě s čerpadlem.

Shybka

Shybka je krátké potrubí, kterým se převádí kapalina pod překážkami (např. křížení kanalizace s vodním tokem, křížení drobného vodního toku s plavebním kanálem apod.)

Shybka začíná vtokovým objektem, za ním následuje sestupná větev potrubí, která se lomí do středního úseku, a končí výstupní větví zaústěnou do původního koryta. Ve shybce proudí voda pod tlakem, často vyšší rychlostí, přičemž se hydraulické ztráty projeví snížením hladiny v profilu za shybkou oproti hladině před shybkou. Pro výpočet tohoto snížení se započítají všechny ztráty v krátkém potrubí.

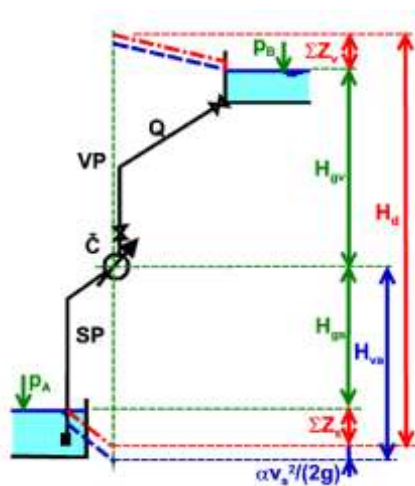
$$Z = \frac{v^2}{2 \cdot g} \times \left(1 + \sum \xi_m + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right)$$

Rychlost proudění se spočítá z rovnice kontinuity

$$v = Q/S$$

Potrubí a čerpadlo

Čerpadla se používají ke zdvihu kapaliny. Pokud je osa čerpadla (odstředivého) umístěna výše než hladina čerpané kapaliny (geodetická sací výška H_{gs}), je nutné kapalinu dopravit k čerpadlu sacím potrubím (Obr. 74). Po průchodu kapalinou čerpadlem tlačí čerpadlo vodu do horní nádrže (např. vodojem). Rozdíl hladiny v horní nádrži a výšky osy čerpadla je geodetická výtlačná výška H_{gv} .



Obr. 74: Soustava potrubí – čerpadlo

V sacím potrubí je nutné překonat kromě H_{gs} také ztráty, Z_s a vyvodit rychlost proudění v (1 až 2 m/s).

Vakuometrická výška je

$$H_{vak} = H_{gs} + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \times \left(1 + \sum \xi_m + \lambda \cdot \frac{l_s}{d_s} \right)$$

Ve výtlačném potrubí překonává kapalina kromě geodetické výtlačné výšky také ztráty a část energie se spotřebuje na vyvození rychlosti proudění kapaliny.

Manometrická výška je

$$H_{man} = H_{gv} + \frac{v_v^2}{2 \cdot g} \times \left(1 + \sum \xi_m + \lambda \cdot \frac{l_v}{d_v} \right)$$

Celková geodetická výška H_g je dána rozdílem hladin. $H_g = H_{gs} + H_{gv}$

Dopravní výška čerpadla je větší a získá se sečtením výšky vakuometrické a manometrické.

$$H_d = H_{vak} + H_{man}$$

Potřebný výkon čerpadla spočítáme z potřebné dopravní výšky a průtoku kapaliny.

$$P = \zeta \cdot g \cdot Q \cdot H_d$$

$$(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W})$$

Podtlakové potrubí – násoska

Stejný vztah pro výpočet ztráty se použije u násosky (Obr. 75). Násoska je krátké potrubí, kterým se kapalina převádí přes překážky (stáčení vína z demizonu, násoskové přelivy na vodních nádržích).

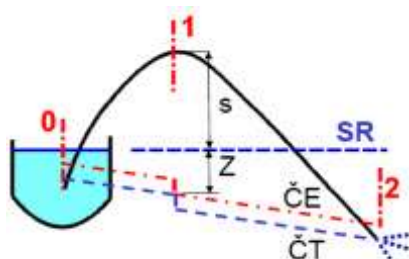
Potrubí násosky se uvádí do funkce zavodněním (vytlačení vzduchu), nejdříve kapalina stoupá vzestupnou větví násosky a za vrcholem proudí kapalina vlivem své hmotnosti. Aby násoska fungovala, je nutné, aby i v nejvyšším místě násosky zůstal tlak nad absolutní nulou. V praxi musí tento tlak zůstat vyšší než 3 m vodního sloupce. Tlak spočítáme od hladiny na začátku násosky.

Atmosférický tlak u hladiny činí cca 10 m vodního sloupce, od něj odečteme rozdíl výšky hladiny a vrcholu násosky s (hydrostatický tlak), dále odečteme hydraulické ztráty ve vzestupné větví násosky a rychlostní výšku proudu.

$$10 - s - \sum Z - \frac{v^2}{2 \cdot g} \geq 3$$

Pokud by tato podmínka nebyla splněna, dojde k roztržení proudu vody, a násoska se vyřadí z funkce.

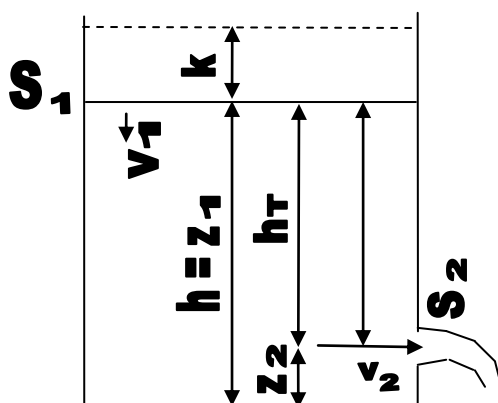
Kapalina proudí vlastní tíhou (gravitační proudění), vrchol je nad hladinou v horní nádrži, musí se zalít.



Obr. 75: Násoska

Příloha č. 3: Výtok z otvorů

Předpokládáme, že v nádobě je *stálá hladina vody*, vytékající množství vody se neustále doplňuje (Obr. 76).



Obr. 76: Schéma výtoku kapaliny z otvoru

Hodnota k označuje rychlostní výšku, je to podíl kinetické energie vyplývající z pohybu vody v nádobě (rychlosti proudění) a spočítáme ji jako

$$k = \frac{v^2}{2 \times g}$$

Pro ideální kapalinu lze napsat základní rovnici ve tvaru

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{v_1^2}{2 \times g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{v_2^2}{2 \times g}$$

Na hladinu i na otvor, kterým vytéká kapalina působí atmosférický tlak ($p_1 = p_2$), takže se rovnice zjednoduší na:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2 \times g}$$

Poloha otvoru vůči hladině je $h = z_1 - z_2$

$$h = \frac{v_2^2}{2 \times g} - \frac{v_1^2}{2 \times g}$$

Za v_1 dosadíme

$$v_1 = v_2 \times \frac{S_2}{S_1}$$

z rovnice kontinuity

$$h = \frac{v_2^2}{2 \times g} - \frac{v_2^2 \times \frac{S_2^2}{S_1^2}}{2 \times g} = v_2^2 \times \frac{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}{2 \times g}$$

Odtud plyne

$$v_2^2 = \frac{2 \times g \times h}{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}}$$

Pro velmi malý otvor se podíl S_2/S_1 po umocnění blíží 0 a je možné jej zanedbat a rovnice se zjednoduší na výraz:

$$v_i = \sqrt{2gh}$$

a průtok je

$$Q = v \times S = S \times \sqrt{2gh}$$

Je-li otvor ve dně nádoby, dosadí se hloubka otvoru, pro malý otvor ve stěně se dosadí *hloubka těžiště* otvoru. Rychlost v_i nazýváme ideální rychlost výtoku a platí pouze pro ideální kapalinu, u níž se neprojeví žádné hydraulické ztráty.

Pro *skutečnou kapalinu* je výtoková rychlost nižší vlivem ztrát a podíl skutečné (snížené) a ideální rychlosti se nazývá rychlostní součinitel

$$\varphi = \frac{v}{v_i} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}$$

kde α_c je Coriolisovo číslo (přibližně 1), ξ (ksi) je ztrátový součinitel (závisí na tvaru a tloušťce stěny otvoru), φ (fi) je rychlostní součinitel. Základní hodnota rychlostního součinitele pro malý otvor a vodu je $\varphi = 0,97$.

Skutečná rychlost vytékajícího paprsku je pak

$$v = \varphi \times \sqrt{2gh}$$

Při výtoku dochází ale také k zúžení výtokového paprsku z plochy otvoru S na zmenšenou plochu S_c . Toto zúžení vyjadřuje *součinitel kontrakce* (epsilon)

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S} ,$$

pro malé otvory a dostatečné hloubky ($h > 0,6$ m) je ε rovno přibližně 0,6–0,64.

Součinitel výtoku μ (mí) je pak roven součinu rychlostního součinitele a součinitele kontrakce:

$\mu = \varphi * \varepsilon$, pro malý otvor a vodu přibližně vychází $\mu = 0,97 * 0,64 = 0,6-0,62$.

Vytékající množství kapaliny se spočítá jako

$$Q = \mu \times S \times \sqrt{2gh}$$

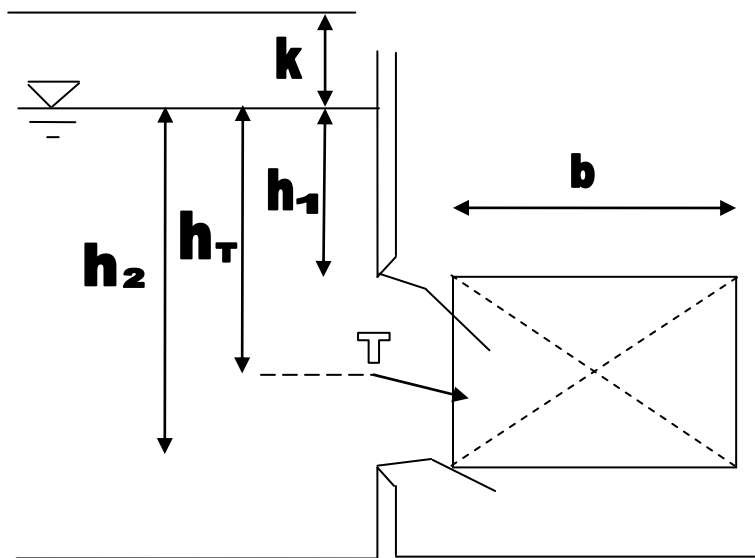
Výtok kapaliny velkým otvorem

Při výtoku velkým otvorem (Obr. 77) se projeví vliv přítokové rychlosti kapaliny, do výpočtu se zavádí pojem rychlostní výška: $k = c^2/2.g$, kde c je přítoková rychlost (rychlost proudění v nádobě).

Odvození výpočtu průtoku je založeno na rozdělení otvoru na vodorovné proužky a sečtení (integrování) jednotlivých dílčích průtoků.

Pro výtokové množství (průtok) pak platí výraz:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b \times \sqrt{2 \times g} \times \left[(h_2 + k)^{\frac{3}{2}} - (h_1 + k)^{\frac{3}{2}} \right]$$



Obr. 77: Výtok kapaliny velkým otvorem

Vliv rychlostní výšky lze pro výpočet průtoku zanedbat, pokud je k vzhledem k h_1 a h_2 malá.

Pak se výraz zjednoduší na:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b \times \sqrt{2 \times g} \times \left(h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}} \right)$$

Výtoková rychlost v celém otvoru se mění, lze pouze přibližně stanovit z rovnice kontinuity:

$$v = \frac{Q}{\varepsilon \times S}$$

Pokud je otvor umístěn ve stěně skloněné po vodě pod úhlem $\delta < 90^\circ$, pak platí:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b \times \sqrt{2 \times g} \times \frac{1}{\sin \delta} \times \left(h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}} \right)$$

Množství vytékající otvorem je v případě šikmé stěny větší oproti stěně kolmé.

Výtok kapaliny velkým kruhovým otvorem

Pro kruhový otvor je situace složitější, protože šířka otvoru se mění s hloubkou, pokud je otvor umístěn ve větší hloubce než 3,33 r, je možno počítat podle vzorce pro výpočet výtoku malým otvorem.

$$Q = \mu \times \pi \times r^2 \sqrt{2 \times g \times h_T} ,$$

kde h_T je hloubka středu kruhového otvoru pod hladinou.

Čím bude otvor hlouběji, tím bude výpočet přesnější. Součinitel výtoku $\mu = 0,59 - 0,60$.

Výtok kapaliny otvorem zatopeným dolní vodou

Je-li hladina dolní vody nad úrovní horní hrany výtokového otvoru (otvor je celý otvor zatopen), proudění výtokového paprsku je značně složitě, avšak z Bernoulliho rovnice vyplývá výraz pro výtokovou rychlost:

$$v = \varphi \times \sqrt{2 \times g \times (H + k)}$$

Pro průtok *zatopeným* otvorem pak platí vztah:

$$Q = \mu \times S \times \sqrt{2 \times g \times (H + k)} ,$$

kde H je rozdíl hladin horní a dolní vody.

Součinitel rychlosti φ a součinitel výtoku μ bývá přibližně stejný, jako při výtoku nezatopeném. Rovnice platí pro otvor jakéhokoliv tvaru.

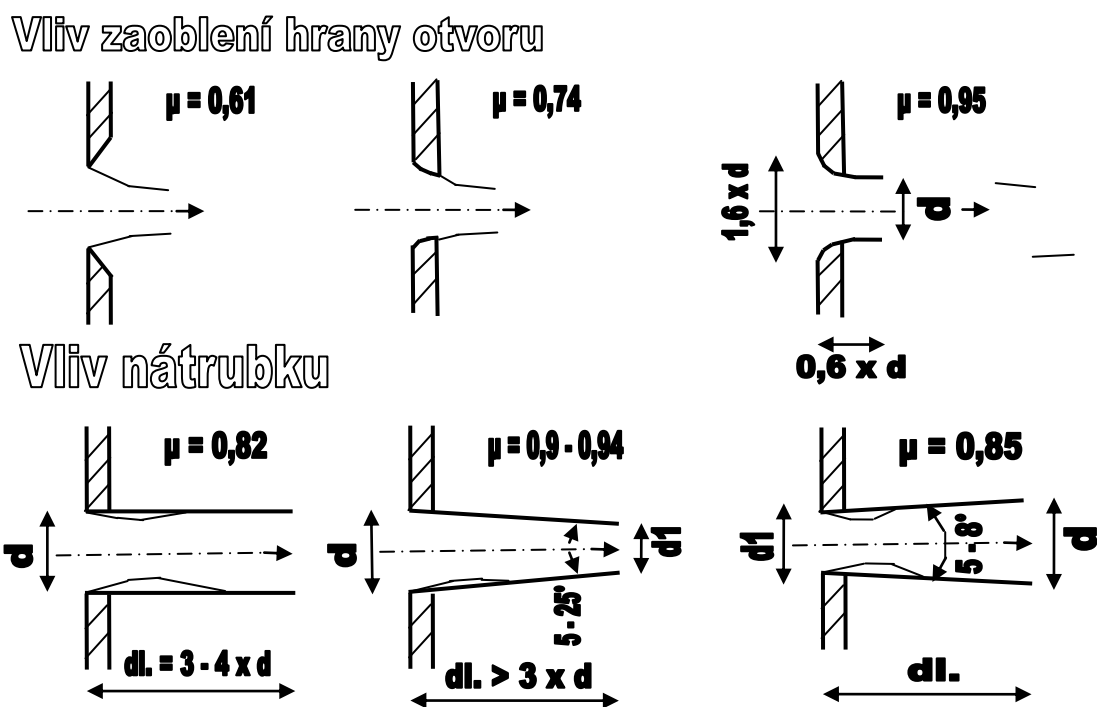
Pokud je otvor zatopený pouze zčásti, rozdělí se plocha otvoru na 2 části a počítá se výtok pro každou část samostatně, horní část podle vztahu pro nezatopený otvor a dolní část se spočítá jako otvor zatopený.

Úprava výtokového otvoru

Z výše uvedených vztahů pro stanovení výtoku otvorem vyplývá, že kromě velikosti otvoru S a spádu H zvýšeného o rychlostní výšku k má velký vliv na vytékající množství kapaliny součinitel výtoku μ .

Pro neupravený otvor počítáme $\mu = 0,61$. Takže snižujeme kapacitu výtoku o 39% oproti ideálnímu stavu (stav při zanedbání hydraulických ztrát).

Dále jsou uvedeny některé úpravy výtokového otvoru, které zvyšují součinitel výtoku μ a tím také kapacitu výtoku.



Obr. 78: Úpravy výtokového otvoru

Příloha č. 4: Proudění přes přepady a přelivy

Přepad kapaliny přes ostrou hranu

Přes ostrou hranu přepadá kapalina tehdy, když $t > 2/3 h$.

Rovnice přepadu je odvozena stejně jako pro výtok velkým otvorem.

$$Q = \frac{2}{3} \mu \times b \times \sqrt{2g} \left[(h+k)^{3/2} - k^{3/2} \right]$$

Kde b je šířka přepadu, h je přepadová výška, k je rychlostní výška a spočítá se z přítokové rychlosti

$$k = \frac{C^2}{2g}$$

μ je součinitel přepadu závislý na tvaru přepadového paprsku a tlaku pod ním.

Pokud se dá zanedbat vliv přítokové rychlosti (k je oproti h zanedbatelné), pak se výraz zjednoduší na:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \times b \times \sqrt{2g} \times h^{3/2}$$

Typy přepadových paprsků

Na tvar přepadového paprsku má rozhodující vliv uzavřený prostor pod paprskem (ohrazený shora paprskem, zdola hladinou dolní vody a z boku přelivnou stěnou).

Volný přeřadový paprsek vzniká tehdy, když je prostor pod paprskem zavzdušněn (spojen s volným prostorem). Paprsek má stálý tvar a jeho rozměry jsou závislé na přeřadové výšce. Tento přeřad se stal základním měrným přeřadem, pro nějž Bazin odvodil výraz pro výpočet:

$$Q = m \times b \times \sqrt{2g} \times h^{3/2}$$

kde

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \times \left[1 + 0,55 \times \left(\frac{h}{h+s} \right)^2 \right]$$

kde h je přeřadová výška, s je výška přelivné stěny.

Při uzavřeném prostoru pod přeřadovým paprskem vzniká podtlak a ten má vliv na tvar a stabilitu paprsku, jedná se o *snížený přeřadový paprsek*. Tento paprsek může být při vyšší hladině dolní vody *spodem zatopený*, kdy podtlak v prostoru pod paprskem zvýší hladinu vody, a tato prostor téměř zaplní. Takový paprsek zvyšuje kapacitu přeřadu až o 15 % oproti volnému přeřadovému paprsku. Při nízké hladině dolní vody zůstává paprsek snížený, ale *spodem nezatopený*.

Při malé přeřadové výšce nedojde k dostatečnému odskoku paprsku od přelivné stěny a tento přilne vlivem podtlaku k přelivné stěně, jedná se o *paprsek lpící* s až o 25 % vyšší kapacitou oproti volnému paprsku.

Při snižování přeřadové výšky se paprsek opře o stlačený vzduch pod paprskem a přeřadový paprsek je *zdvižený*.

Všechny podtlakové paprsky mají vyšší kapacitu přeřadu, ale s ohledem na stabilitu a možnost porušení přelivu se v praxi nepoužívají.

Naopak se používají přepady s *volným* paprskem, které vzniknou výřezem v tenké stěně a projeví se u nich boční zúžení přepadového paprsku. Tyto přepady slouží k měření nízkých průtoků v korytech s volnou hladinou (např. vypouštěné odpadní vody nebo vody prosakující přehradní hrázi)

Měrné přepady

Měrné přepady se používají pro měření průtoků. Mají několik typických tvarů, které ukazuje Obr. 79.

Trojúhelníkový (Thomsonův) přepad

vznikne výřezem ve tvaru trojúhelníka v tenké stěně, takže šířka přepadajícího paprsku roste s výškou paprsku od 0 do hodnoty $(2 \times h \times \operatorname{tg} \alpha/2)$. Průtok se vypočítá podle rovnice:

$$Q = m_t \times \sqrt{2g} \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \times h^{5/2}$$

Nejčastěji se používá trojúhelníkový přepad se středovým úhlem $\alpha = 90^\circ$, $\operatorname{tg} \alpha/2 = 1$, pro nějž platí vztah:

$$Q \cong 1,4 \times h^{5/2}$$

Obdélníkový (Ponceletův) přepad

je přepad, který vznikne výřezem ve tvaru obdélníka, šířka přepadajícího paprsku se s výškou hladiny horní vody nemění. Pro obdélníkový přepad se součinitel přepadu m_b vypočítá podle:

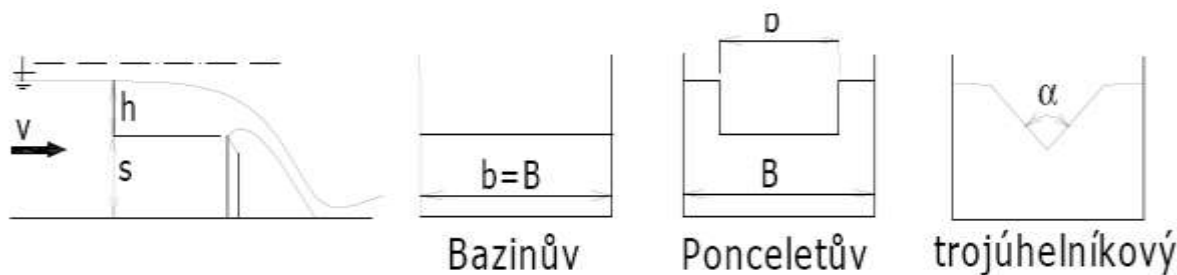
$$m_b = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \times \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right] \times \left[1 + 0,55 \times \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \right]$$

kde B je šířka koryta před přepadem, b je šířka zúženého přepadu, S_0 je plocha průřezu přírodního žlabu, S je plocha průřezu zúženého přepadu.

Lichoběžníkový (Cipollettiho) přepad

vznikne výřezem ve tvaru lichoběžníka se sklony bočních hran 4:1, čímž se vyrovná vliv boční kontrakce přepadajícího paprsku a průtok se spočítá:

$$Q \cong 1,86 \times b \times h^{3/2}$$



Obr. 79: Měrné přepady

Nedokonalý přepad přes ostrou hranu

Nedokonalý (zatopený) přepad vznikne, je-li hladina dolní vody nad přelivnou hranou. Dokonalé zatopení přepadu nastane při poměru $H : h < 0,70$. Pro výpočet přepadajícího množství platí:

$$Q = \sigma_z \times m \times b \times \sqrt{2g} \times h^{3/2}$$

kde součinitel zatopení

$$\sigma_z = 1,05 \times \left(1 + 0,2 \times \frac{h_z}{s} \right) \times \sqrt[3]{\frac{H}{h}}$$

Přepad přes jezové těleso

Jezové těleso je přelivná konstrukce, která má šířku větší než $2/3$ výšky přepadajícího paprsku h , ale menší než dvojnásobek h . Pro tvar přepadového paprsku je důležitý tvar

jezového tělesa, které ze spodní strany ohraničuje přepadový paprsek. Příčný řez jezu tak může být ve tvaru obdélníka, lichoběžníka, nebo ve tvaru zaobleném, kdy horní hrana jezového tělesa kopíruje tvar volného paprsku, který vzniká na ostré hraně.

Pro výpočet *dokonalého přepadu* na jezu se používá upravená Bazinova rovnice:

$$Q = m \times b_0 \times \sqrt{2g} \times h_0^{3/2}$$

kde m je přepadový součinitel, který vyjadřuje vliv tvaru přelivné hrany (ztráty), b_0 je účinná šířka přelivu (vysvětleno dále), h_0 je výška přepadového paprsku zvýšená o tzv. rychlostní výšku (vliv přítokové rychlosti).

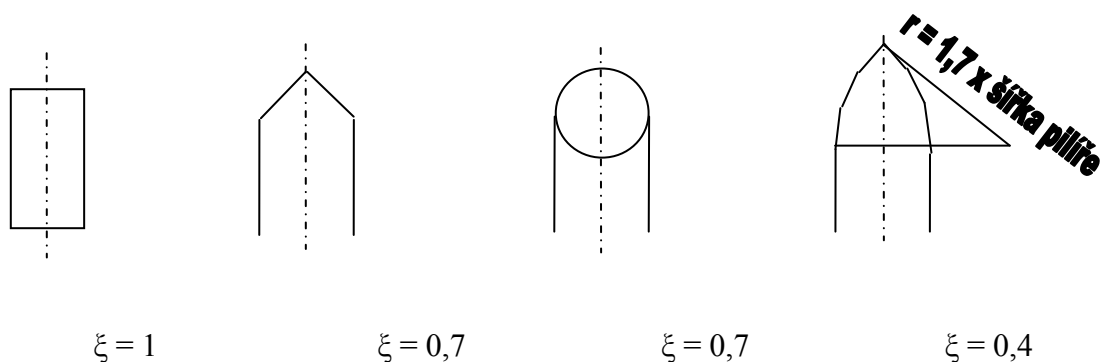
$$h_0 = h + \frac{v^2}{2g}$$

Šířka přelivu bývá rozdělena do několika jezových polí, které jsou odděleny pilíři, a tyto pilíře způsobují na okrajích polí boční zúžení přepadajícího paprsku.

Proto se zavádí účinná šířka přelivu b_0 , která se vypočítá ze vztahu:

$$b_0 = b - 0,1 \times \xi \times n \times h_0$$

kde b je součet skutečných šířek jezových polí, ξ je součinitel boční kontrakce, jehož hodnota závisí na tvaru obtékané stěny pilíře (obr. x), n je počet všech kontrakcí (na jednom pilíři, obtékaném z obou stran dojde ke 2 kontrakcím), h_0 je výška přepadového paprsku zvýšená o tzv. rychlostní výšku (vliv přítokové rychlosti).



Obr. 80: Hodnoty součinitele boční kontrakce podle tvaru jezové pilíře

Hodnoty přepadového součinitele m jsou nejnižší u obdélníkového jezového tělesa ($m = 0,3-0,42$), tvar obdélníka není totiž z hydraulického hlediska pro návrh jezu vhodný (Obr. 80). U starších jezů se častěji setkáme s lichoběžníkovým průřezem přelivné konstrukce, kde $m = 0,35-0,44$ v závislosti na sklonu stěn a poměru přepadové výšky a tloušťky jezové konstrukce. Zaoblené profily jezů modernějších konstrukcí dosahují hodnoty přepadového součinitele m až 0,47.

Proudnicové přelivy

Aby nedocházelo k vytváření podtlaku pod přepadovým paprskem, navrhuje se zaoblené přelivné plochy ve tvaru spodního líce Bazinova přepadového paprsku (parabolická plocha), součinitel přepadu bývá vysoký.

Beztlaková přelivná plocha kopíruje tvar spodního líce přepadajícího paprsku a tudíž na ní nevzniká ani tlak, ani podtlak, přepadový součinitel $m = 0,51$.

Předivná plocha *podtlaková* leží níže než tvar spodního líce přepadajícího paprsku a tento se snaží odtrhnout, v důsledku čehož dochází k vytvoření podtlaku, což má za následek zvýšení přepadového součinitele, ale také zvýšené riziko kavitace a porušení povrchu konstrukce jezu.

Z tohoto důvodu se v praxi používají spíše plochy *tlakové*, které leží výše než tvar spodního líce přepadajícího paprsku, který na ně vyvozuje tlak, hodnota přepadového součinitele $m = 0,499$.

Přelivné plochy se navrhují na přepadovou výšku spočítanou z maximálního (návrhového) průtoku jezu.

Přepad přes širokou korunu

Široká koruna je práh, přes nějž přepadá voda, a jehož tloušťka je větší než dvojnásobek přepadové výšky. Na horní hraně přelivu dojde nejdříve ke snížení hladiny na výšku h_1 , za tímto snížením vzniká vlnovitý vodní skok, jehož výška je $h_2 > h_1$, pro výpočet přepadu se používá Bazinova rovnice, v níž přepadový součinitel m nabývá hodnot 0,3–0,36 v závislosti na úpravě prahu a zaoblení vstupní hrany.

Při hladině spodní vody nad sníženou hladinou nad prahem dojde k zatopenému přepadu, pro nějž se průtok přibližně počítá z rovnice:

$$Q = \varphi \times b \times h_2 \times \sqrt{2g \times (h_0 - h_2)}$$

kde součinitel $\varphi = 0,88$ až $0,95$ a je závislý na úpravě vstupní hrany.

Zvláštní druhy přelivů

Šachtové přelivy

Zvláštním přepadem je šachtový přepad, se kterým se můžete setkat na přehradách, kde slouží k bezpečnému odtoku povodňových stavů na šachtových přelivech. Tvar přelivné hrany je kruhový, svislá šachta je ukončena pravoúhlým obloukem zaústěným do odpadní štoly. Pro dokonalý přepad se použije rovnice:

$$Q = m \times b \times \sqrt{2g} \times h^{3/2}$$

Kde $b = 2\pi r$ (obvod kruhu), součinitel přepadu $m = 0,412$.

Dokonalý šachtový přepad vzniká při poměru $h/d < 0,225$, při zvýšení hladiny je přepad částečně zahlcený ($0,225 < h/d < 0,5$). Pokud výška přepadového paprsku je větší než $0,5 d$, dojde k úplnému zatopení přepadu, a množství přepadající vody se spočítá jako výtok otvorem v místě zaústění oblouku šachty do odpadní štolky.

$$Q = \mu \times S \times \sqrt{2gH}$$

kde výtokový součinitel μ při kruhovém tvaru kolene = $0,8$, S je průtočná plocha šachty.

Boční (postranní) přelivy

Boční přeliv je umístěn rovnoběžně s osou koryta, průtočné množství Q_1 se za přelivem sníží o přepadající množství Q_b , takže v korytě pokračuje průtok $Q_2 = Q_1 - Q_b$.

Proudění v okolí přelivné hrany dostává prostorový charakter. Největší snížení hladiny vlivem bočního přepadu nastane na začátku přepadu, odtud hladina stoupá až na konec přelivu. Řešení bočního přepadu je složité, spočívá v rozdělení přepadové šířky na několik úseků, v nichž se pro každý úsek počítá ΔQ .

Literatura – hydrologie a hydraulika

Kemel, M. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Praha:FS ČVUT. 1996.

Sommer, M. *Hydrologie*. Praha:SNTL. 1985.

Hubačiková, V.: *Hydrologie, skriptum MZLU Brno, 2002*

Krešl, J.: *Hydrologie, skriptum MZLU Brno, 2001*

Kemel, M.: *Hydrologie, skriptum FS ČVUT Praha, 1991*

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha:SNTL/ALFA. 1968. 520 stran.

Gruber, J. *Mechanika V – Hydromechanika*. Střední průmyslová škola strojnická a střední odborná škola profesora Švejcara, Plzeň. 41 stran.

Hálek, V., Švec, J. *Hydraulika podzemní vody*. Praha:Academia. 1973. 376 stran.

Havlík, V., Marešová, I. *Hydraulika I, Příklady*. Praha:ČVUT. 1994. 243 stran.

Havlík, V., Marešová, I. *Hydraulika II, Příklady*. Praha:ČVUT. 1995. 245 stran.

Jandora, J., Stara, V., Starý, M. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2002.

Jandora, J., Uhmánová, H. *Základy hydrauliky a hydrologie – Příklady*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 1999. ISBN 80-214-1160-0.

Kunštátský, J., Patočka, C. *Základy hydrauliky a hydrologie*. Praha:SNTL/ALFA. 1966. 250 stran.

Literatura – hydrotechnické stavby

Bařková, K., Matula, S., Miháliková, M.: Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. <http://hydropedologie.agrobiologie.cz/>

Broža, V., Haindl, K., Patera, A.: Provoz vodních děl. FSv ČVUT, 1993.

Broža, V., Kazda, I., Patera, A., Přenosilová, E.: Vodohospodářské stavby. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1993, 1999, 162 s., ISBN 80-01-01021-X.

Broža, V., Kratochvíl, J., Peter, P., Votruba, L.: Přehrady. SNTL, Praha, 1987.

Broža, V., Satrapa, L.: Hydrotechnické stavby 10 – Přehrady. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000, 128 s., ISBN 80-01-02209-9.

Broža, V., Satrapa, L.: Navrhování přehrad. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000, 127 s., ISBN 80-01-01424-X.

Čábelka: Vodní cesty a plavba. SNTL, Praha, 1976.

Čihák, F., Medřický, V.: Hydrotechnické stavby 20 – Navrhování jezů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2001, 154 s., ISBN 80-01-02402-4.

Gabriel, P.: Vodní cesty. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997, 170 s., ISBN 80-01-01570-X,

Gabriel, P., Čihák, F., Kalandra, P.: Malé vodní elektrárny. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998, 321 s., ISBN 80-01-01812-1.

Gabriel P., Grandtner T., Průcha M., Výbora P.: Jezy. SNTL, Praha 1989.

Gabriel, P., Kučerová, J.: Navrhování vodních elektráren. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1995, 2000, 195 s., ISBN 80-01-02214-5.

Kutílek, M.: Vodohospodářská pedologie. SNTL, Praha, 1978, 296 s.

Medřický, V.: Hydrotechnické stavby 30 – Navrhování plavebních stupňů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2003, 88 s., ISBN 80-01-02255-2.

Patera, A., Nacházel, K., Fošumpaur, P.: Nádrže a vodohospodářské soustavy 10. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2002, 217 s., ISBN 80-01-02620-5.

Toman, M.: Hydrotechnické stavby I – technické a provozní parametry československých vodních děl (1975-1995). FSv ČVUT, Praha, 1991, 61 s., ISBN 80-01-00685-9.

Toman, M.: Hydrotechnické stavby II – Technické a provozní parametry českých a slovenských vodních děl (1965-1975). FSv ČVUT, Praha, 1993, 59 s., ISBN 80-01-00908-4.

Seznam zkratek

ČHMÚ Český hydrometeorologický ústav

HPV hladina podzemní vody

Autor: Ing. Miloslav Šír, CSc.
Název: Základy technických znalostí ve vodním hospodářství
Recenze: Ing. Jiří Kaňka
Ing. Jiří Kubeš
Rozsah: 144 stran
Náklad: 100 ks
Účel: Studijní text
Rok vydání: 2013
Vydavatel: Vysoká škola evropských a regionálních studií, o.p.s.,
Žižkova 6, 370 01 České Budějovice, www.vsers.cz
Tisk: Inpress, a. s., Žerotínova 554/5, České Budějovice

ISBN 978-80-87472-50-7