

6. Hydrogeologie a hydrogeologické metody ve SG průzkumu

Podzemní voda (p. v.) je mimořádně závažným faktorem geologického prostředí (viz úvod do hydrogeologie v předmětu Geologie - 1. roč.). Pokud se podle čl. 20 ČSN 73 1001/1988 p. v. nepříznivě uplatňuje při návrhu objektů a znesnadňuje postup jejich zakládání je to jasným důvodem pro definování **složitých základových poměrů**. Naopak **jednoduché základové poměry** jsou podmíněny tím, že p. v. neovlivňuje uspořádání objektů a návrh jejich konstrukce

Jak je již uvedeno výše (v oddílu „Doplňkové práce...“) je nutné vždy v průzkumném díle dokumentovat **h. p. v. naraženou (navrtanou) a ustálenou**. Pokud pak není p. v. zastižena, je nezbytné tuto skutečnost výslovně zaznamenat.

Podle hydrostatického tlaku na úrovni h. p. v. může být ve zvodni:

- o **Hladina volná** (tlak na hladině p. v. je roven tlaku atmosférickému)
- o **Hladina napjatá - artéská** (tlak na hladině p. v. je vyšší než tlak atmosférický a voda po naražení vystoupí). Úroveň do které h. p. v. vystoupí se označuje **piezometrická (= výtláčná) výška**.

Podzemní voda se v horninovém prostředí může vyskytovat jako **volná** nebo jako (v minerálech) **vázaná**.

Volná voda pak může mít dvojí charakter: **kapilární voda** je vázána kapilárními silami v pórech malých rozměrů (pod 0,003 mm) a za normálního atmosférického tlaku není zpravidla v pohybu; **gravitační voda** bývá vázána na větší mezery a dutiny a působením gravitace proudí ve směru hydraulického gradientu.

Základními IG kriterii pro posouzení HG charakteru horninového prostředí jsou **pórovitost** a **propustnost**.

Propustnost se řadí k hydrofyzikálním vlastnostem horninového prostředí. V podstatě se jedná o schopnost hornin propouštět vodu. Základními typy propustností jsou:

- o Propustnost **průlinová**
- o Propustnost **puklinová**
- o Propustnost **kavernózní**
- o Propustnost **krasová**
- o Propustnost **smíšená**.

Základem pro hodnocení filtrace horninového prostředí pro podzemní vodu je znalost Darcyho zákona:

$$Q = K \cdot A \frac{H}{L}$$

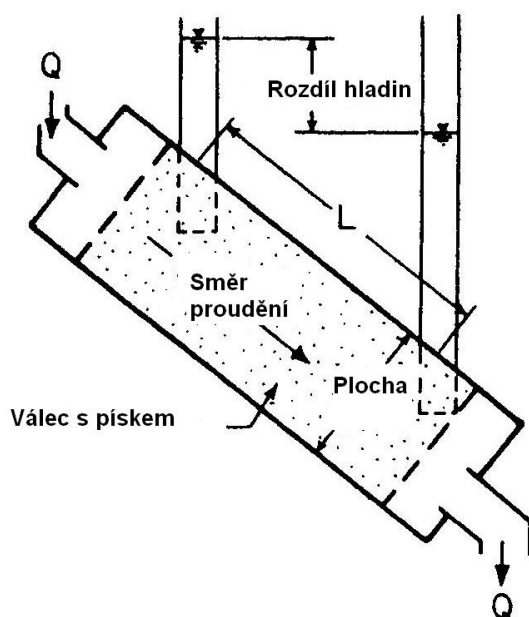
K- hydraulická vodivost (koeficient filtrace)

A- plocha průřezu

H- rozdíl hladin na vstupu a výstupu z přístroje

L- vzdálenost mezi vstupovou a výtokovou oblastí

přístroj, na základě kterého Henry Darcy odvodil zákon je zobrazen na obr 6.1



Obr. 6.1 Přístroj pro odvození Darcyho zákona.

Z pohledu propustnosti lze vyčlenit v horninovém prostředí:

- o **Hydrogeologický kolektor**, (= pórovité prostředí, kterým p.v. proudí relativně snadněji než okolním horninovým prostředím). Vodní těleso vyplňující kolektor se nazývá **zvoděň**
- o **Hydrogeologický izolátor** (= horninové prostředí, kterým p.v. proudí relativně obtížněji než okolním horninovým prostředím).

Kolektory a izolátory vytvářejí v horninovém prostředí **hydrogeologické struktury**. Hlavními HG strukturami jsou:

- o Artéské
- o Krystalinika
- o Vulkanitů
- o Údolních niv
- o Štěrkových teras
- o Říčních delt
- o Fluvioglaciálních sedimentů
- o Karbonátových oblastí
- o Křídové pánve
- o Flyše
- o Zřídelní apod..

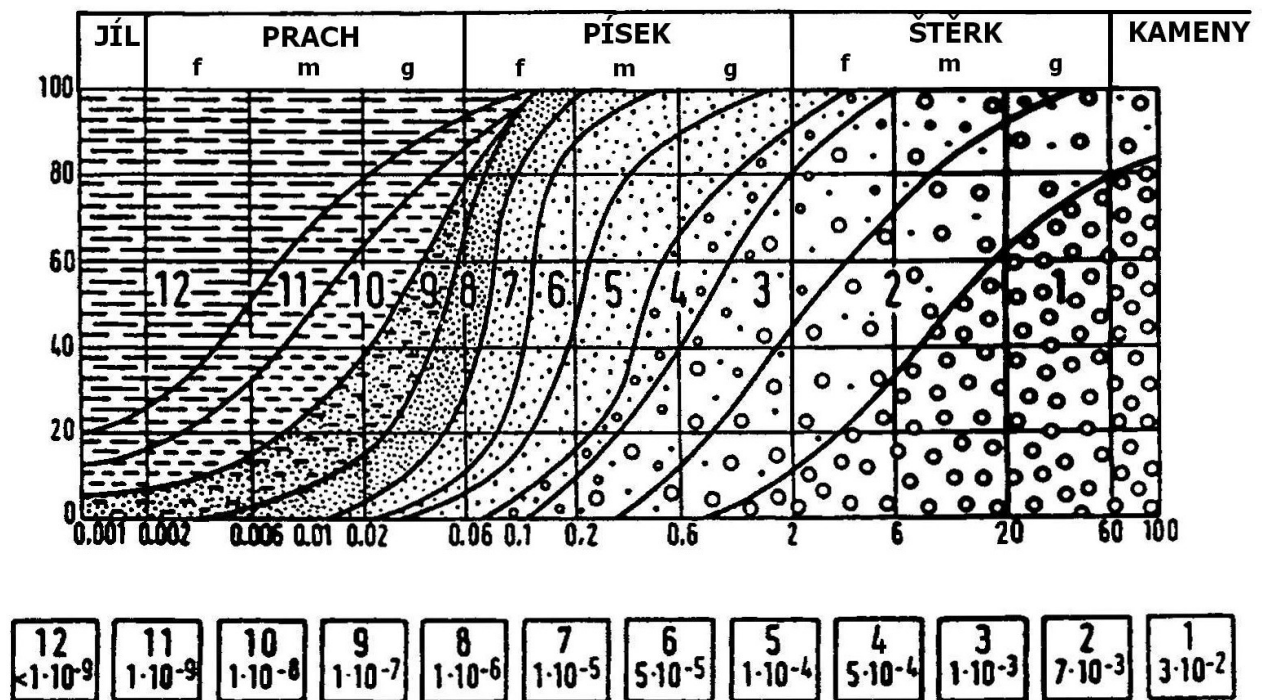
6.1 Stanovení hydraulické vodivosti (koeficientu filtrace)

je jedním z úkolů SG (IG, GT) průzkumu a základním úkolem HG průzkumu. Koeficient filtrace (hydraulickou vodivost) lze stanovit různými postupy:

- Přibližně **odečtem z křivky zrnitosti** u zemin (obr. 7.131) nebo **empirickými vzorci** vycházejícími z procentuálního obsahu různě velikých zrn v zemině (podle Terzaghi-ho, podle Hazena, podle Malleta a Pacquanta apod.)

- V laboratoři na (neporušených, uměle nahutněných) vzorcích zemin a hornin, obvykle v tzv. **propustoměrech** (propustoměr s konstantním spádem; propustoměr s proměnným spádem)
- Přímě v terénu (in situ) **čerpací zkouškou** pomocí čerpací hydraulicky úplné studny a pozorovacích vrtů osazených ve dvou profilech na koncentrických kružnicích (= tzv. úplný hydraulický kříž. Za jistých okolností, je-li znám směr proudění a charakter kolektoru lze použít i kříže poloviční nebo čtvrtinové)
- **Nálevovou** nebo **vsakovací zkouškou** v terénu, případně zkouškami **indikátorovými**
- **Vodní tlakovou zkouškou** (VTZ) v terénu na skalních nebo poloskalních horninách.

Stanovení odečtem z křivky zrnitosti zeminy:



Obr. 6.2. Vztah mezi hydraulickou vodivostí K (m/s) a zrnitostí zemin (Šamalíková, 1996)

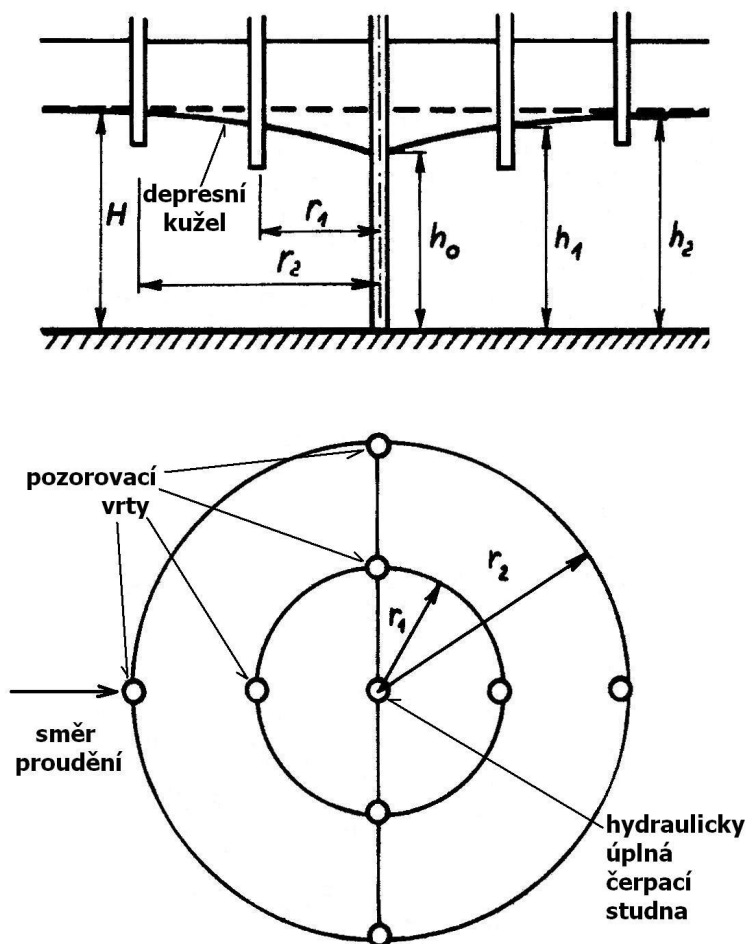
Empirické vzorce pro stanovení hydraulické vodivosti :

- o **Hazen** doporučuje pro písky vztah: $K = 100d_{10}^2$ [cms⁻¹]
kde d_{10} ...Ø zrna odpovídající v křivce zrnitosti 10% obsahu [cm]
- o **Terzaghi** přihlíží i k číslu pórovitosti: $K = 200d_{10}^2 e^2$ [cms⁻¹]
kde e ...číslo pórovitosti zeminy.

Propustoměry: viz mechanika zemin.

Čerpací zkouška je polním stanovením, při kterém se čerpá voda ze studny (vrtu) s cílem získat informace o vydatnosti čerpacího objektu případně i o parametrech testovaného kolektoru a zvodně a o možném účinku odběru vody na okolí. Vychází se zde z předpokladu **ustáleného proudění** – tzn. že množství vody přitékající do studny je rovno množství vody z ní čerpaného. Při ustáleném proudění se vytvoří v povrchu h. p. v. **depresní kužel** – ve svislém řezu představovaný **depresní křivkou**.

Praktická aplikace spočívá v provedení řádně vystrojené **čerpací studny** ($\varnothing 150 \div 400$ mm), **hydraulicky úplné** (dokonalé) – tzn. kruhového $\varnothing$ a sahající až na nepropustné podloží. Depresní křivka se měří v **pozorovacích vrtech** na **hydraulickém kříži** (obr. 6.132, 6.133). Úrovně hladin v pozorovacích vrtech se určí jako průměr pro kružnice poloměru r_1 a r_2 .



Obr. 6.3
Hydraulický kříž
(I. Vaníček, 1984)

Hydraulická vodivost se určí z rovnic:

- o Pro napjatou (artéskou) zvodně:

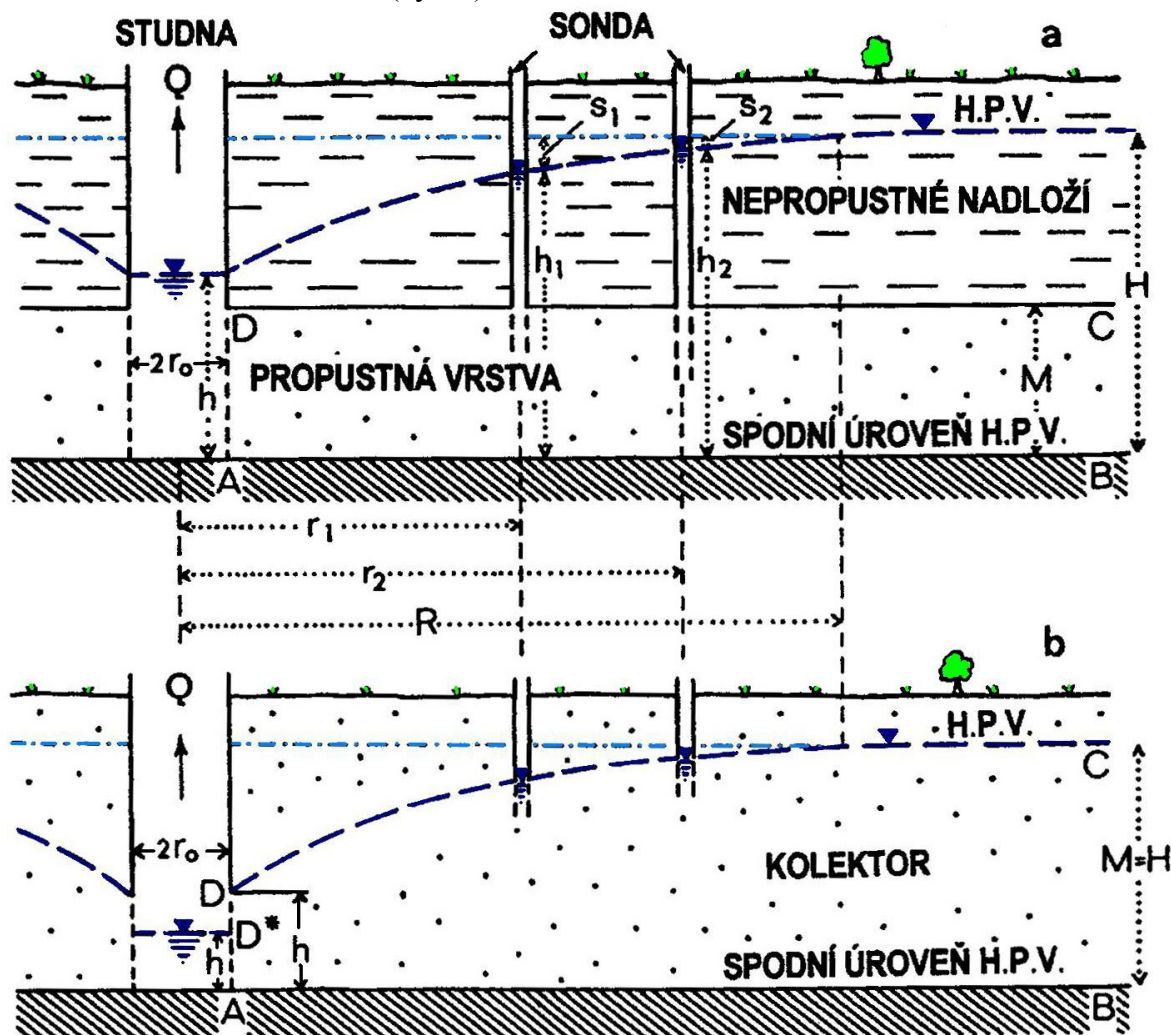
$$K = \frac{Q \log \frac{r_2}{r_1}}{\pi 2M(h_2 - h_1)}$$

- o Pro zvodně s volnou hladinou:

$$K = \frac{Q \log \frac{r_2}{r_1}}{\pi(h_2^2 - h_1^2)}$$

kde: Q množství vody čerpané ze studny při ustáleném proudění

h_1, h_2 výška vody v pozorovacích vrtech
 r_1, r_2 vzdálenost pozorovacích vrtů od čerpací studny
 M mocnost (výška) zvodně.



Čerpací pokus v prostředí s napjatou (a) a volnou (b) hladinou

Obr. 6.4 (M. Šamálíková, 1996)

Takto stanovená hydraulická vodivost K představuje střední hodnotu, platnou v okolí čerpacího vrtu.

Nálevová (vsakovací) zkouška je jednodušší a rychlejší než zkouška čerpací, její výsledky jsou však výrazněji nepřesnější. Princip metody spočívá v postupném hloubení vrtu paženého výpažnicí, nalévání vody a měření jejího vsáklého množství (objemem, výškou sloupce). Voda vsakuje buď pouze dnem nebo dnem i stěnou vrtu. Vsakovací zkouška může být realizovaná i na povrchu. Velmi přibližně lze hydraulickou vodivost stanovit podle:

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

kde: Δh výška sloupce
 Δt čas

Obr. 6.5
Instrumentace vsakovací
zkoušky (podle Nestěreva)
na povrchu hutního pole.
Průzkum pro VD Slezská
Harta



Indikátorové zkoušky se používají ke stanovení **směru a rychlosti proudění**, bez čerpání. Do studny či pozorovacího vrtu se zavede indikátor (barviva, radioaktivní látky, elektrolyty [nejčastěji jednoduchý, laciný a ekologický NaCl]) a v pozorovacích vrtech po proudu se měří čas po kterém je k nim indikátor dopraven proudící vodou. K takovýmto měřením se nejčastěji používají 3 pozorovací vrtu (studny, sondy) v řadě.

Vodní tlakové zkoušky (VTZ) jsou nejčastějším polním testem pro stanovení propustnosti ve skalních a poloskalních horninách (standardně vykazujících propustnost puklinovou). Budou podrobněji rozvedeny v oddílu týkajícím se polních zkoušek mechaniky hornin.

6.2 Režimní pozorování podzemních vod

- Spočívá na konkrétní lokalitě ve vytvoření pozorovacího(ch) objektu(ů) [PHJ..., PHV...] a následného monitorování kolísání h. p. v.. Doba pozorování musí být dostatečně dlouhá – pro důležité stavby minimálně 1 rok. Znamená to realizovat počáteční fáze průzkumu s dostatečným předstihem. Odečítání h. p. v. bývá obvykle realizováno klasicky (píšťalka, hladinoměr). U velmi významných průzkumů lze zřídit automatické (limnigrafické) stanice s kontinuálním záznamem kolísání h. p. v. a případně i s dálkovým přenosem dat. Velmi důležité je porovnání kolísání h. p. v. se srážkovými úhrny. Tyto srážkové úhrny vede a za úplaty poskytuje Český hydrometeorologický ústav – ČHMÚ (www.chmi.cz). Často bývá součástí režimního pozorování i sledování chemismu příp. i teploty p. v.
- Lze-li (s hledem na polohu lokality či staveniště), tak s plným využitím komerčně získaných dat ČHMÚ. Území republiky je pokryto sítí trvale a dlouhodobě sledovaných pozorovacích objektů, které lze často k tomuto účelu úspěšně využít. Např. ČHMÚ – pobočka Brno (www.chmi.cz/BR/brno.html) má ve svém referátu 221 pozorovacích vrtů (viz dále výpis z internetových stránek pobočky Brno):

Pracovní skupina podzemních vod se zabývá měřením, sběrem, revizí, zpracováním a vyhodnocováním dat o množství a kvalitě podzemních vod. Pozorovací síť je tvořena základní pozorovací sítí mělkých podzemních vod, sítí hlubinných vrtů preventivního indikačního systému, sítí hydropedologických profilů a sítí pramenů. Pozorovací síť podzemních vod zahrnují celkem 644 objekty. Interval pozorování u pramenů, hydropedologických profilů a velké části mělkých vrtů je týdenní, u 34 vrtů s mělkým oběhem je záznam kontinuální a u celé sítě preventivního indikačního systému a u 4 vrtů s mělkým oběhem je měření ve 24 hodinovém intervalu.

Základní síť

Základní pozorovací síť podzemních vod tvoří 221 pozorovacích vrtů. Těmito vrty se sleduje režim mělkých podzemních vod. U vybraných 17 vrtů se měří teplota podzemní vody. Pozorovací síť vznikala od konce padesátých let a dokončena byla v druhé polovině šedesátých let. Vrty jsou situovány převážně v kvartéřních fluvialních sedimentech údolních niv a nízkých teras hlavních říčních toků. Hloubky vrtů jsou od 5 do 37 metrů, převážná většina vrtů však má hloubku 10 - 12 metrů. Do hlásné sítě je zařazeno 37 vrtů, do sítě sledování jakosti 25 vrtů.

Preventivní indikační systém

Pozorovací síť preventivního indikačního systému je tvořena 30 vrty situovanými do hydrogeologických struktur s hlubším oběhem podzemních vod - převážně do neogenních, křídových a devonských sedimentů. Pozorovací síť vznikala koncem osmdesátých a začátkem devadesátých let. Všechny vrty jsou osazeny automatickými měřicími systémy NOEL s 24 hodinovým intervalem záznamu. Hloubky vrtů jsou od 45 do 711 metrů. Všechny vrty jsou zařazeny do sítě sledování jakosti.

Hydropedologické profily



Pro plánovanou výstavbu průplavu Dunaj - Odra - Labe se začaly v třicátých letech budovat v povodí úzkoprofilové zarážené sondy, situované do profilů a vedoucí napříč přes povrchový tok, který byl osazen vodočtem. Tímto způsobem jsou získávány z hydrologického hlediska velmi cenné informace o vztazích podzemní a povrchové vody. Nejstarší pozorování jsou od roku 1933, velká část profilů je pozorována od začátku čtyřicátých let. Koncem čtyřicátých a padesátých let byla síť hydropedologických profilů rozšířena i na povodí Dyje. V současné době se pozoruje 20 profilů s 304 objekty. Hloubky těchto neúplných vrtů jsou do 10 metrů, většinou však 5 - 7 metrů.

Obr. 6.6 Sonda č. 30 z HP 222 - Lanžhot

Prameny



*Obr. 6.7 Pramen - PB 148 - Rokytno
"Sládkovo"*

Pozorovací síť pramenů je v současné době tvořena 89 prameny, u kterých se sleduje vydatnost a teplota vody. Část pramenů je osazena Thomsonovými měrnými přelivy, část jich je stavebně upravena. Začátky pozorování vydatnosti pramenů spadají do poloviny padesátých let. V síti sledování jakosti je 21 pramen, v hlásné síti 29 pramenů.

Hlásná síť

Hlásná síť je tvořena 37 vrtů základní pozorovací sítě mělkých podzemních vod a 29 prameny. Výběr byl proveden na základě hydrologické reprezentativnosti jednotlivých objektů.

Síť sledování jakosti

Síť sledování jakosti byla vytvořena v polovině osmdesátých let, od začátku devadesátých let byly do této sítě zařazeny vrtů s hlubším oběhem podzemní vody. Síť je tvořena 25 mělkými vrtů, 30 hlubinnými vrtů a 21 pramenem. Odběry vzorků vody se provádějí 2x ročně - na jaře a na podzim, u vrtů po čerpací zkoušce. Kromě fyzikálně chemických vlastností se sledují obsahy těžkých kovů, jedenkrát ročně vybrané organické látky a radioaktivita.

6.3 Chemismus podzemní vody

Velmi významnou skutečností vždy, když je p. v. zastižena a základové konstrukce mohou být pod její hladinou, je její chemismus resp. její případné působení na stavební materiály. Provádí se řada stanovení; z pohledu stavebního jsou nejdůležitější:

- Tvrdost
- pH (kyselost)
- Síranová agresivita
- Uhličitá agresivita.

Tvrđost p. v. je dána obsahem rozpuštěných solí alkalických zemin, především iontů Ca^{2+} a Mg^{2+} . Rozlišuje se **tvrdost celková, přechodná, trvalá, uhličitá, neuhličitá**. Tvrđost se udává v mval l^{-1} ($1 \text{ mval l}^{-1} = 20,04 \text{ mg l}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ nebo $12,16 \text{ mg l}^{-1} \text{ Mg}^{2+}$). V ČR se používají jako jednotky i stupně německé ($1^\circ \text{N} = 10 \text{ mg l}^{-1} \text{ CaO}$). Vedle stupňů německých jsou ve světě používány též stupně francouzské, anglické a americké ($1^\circ \text{F} = 10 \text{ mg l}^{-1} \text{ CaCO}_3$; $1^\circ \text{angl.} = 1 \text{ g CaCO}_3 \text{ na galon}$; $1^\circ \text{amer.} = 1 \text{ mg l}^{-1} \text{ CaCO}_3$).

Podle tvrđosti máme vody:

- **velmi měkké (= hladové)** [do $1,5 \text{ mval l}^{-1}$] – vyluhují karbonáty ze staviv. Patří sem např. dešťová voda
- **měkké** [do 3 mval l^{-1}]
- **mírně tvrdé** [do 6 mval l^{-1}]
- **tvrdé** [do 9 mval l^{-1}]
- **velmi tvrdé** [nad 9 mval l^{-1}] – mohou být agresivní (viz dále).

pH p. v. představuje zápornou hodnotu dekadického logaritmu aktivity vodíkových iontů ($\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+}$). Destilovaná voda má při 25°C $\text{pH} = 7$, a tedy **neutrální** reakci. Prostředí s nižším pH je **kyselé**, prostředí s vyšším pH je **zásadité**. pH podzemní vody se většinou pohybuje mezi 4,5 až 8 (rašeliniště až 3,6).

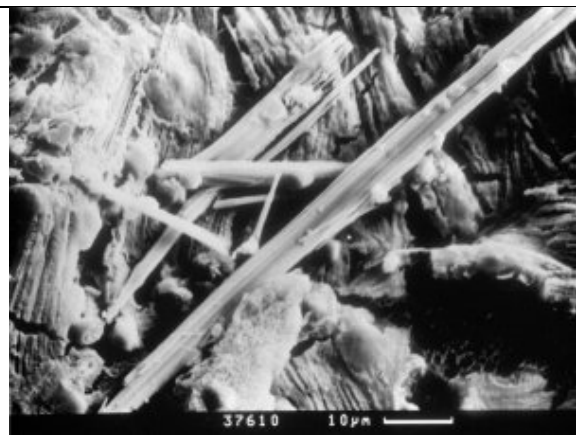
Kyselé vody s přebytkem iontů H^+ rozkládají některé minerály (např. živce) a tím snižují pevnost horniny (např. působení kyselých dešťů na stavební kámen).

Zásadité vody s přebytkem iontů OH^- zpravidla naznačují, že se voda již dostala do styku s betonem (cementem) nebo byla jinak chemicky ovlivněna.

Síranová agresivita p. v. je dána přebytkem iontů SO_4^{2-} . Ty pocházejí z oxidace sirníků (pyrit, pyrotin – např. z uhelných slojí, z rudných ložisek, z ordovických vrstev), z rozpuštění síranů (sádrovec v neogenních a paleogenních vrstvách) či z kontaminace srážkovými a odpadními vodami (kyselé deště, úniky z kanalizace).

Důsledkem působení síranové agresivity na beton je vznik sekundárních minerálů např. ettringitu thaumasitu (tzv. „**cementového bacilu**“), kdy se portlandský slínek mění na sádrovec či síran vápenato-hlinitý s rozpínavými účinky a beton se zcela stráven rozbíjí na kamenivo.

Ochranou před síranovou agresivitou je použití hutných betonů (s vodním součinitelem $< 0,5$) a struskoportlandských či struskových cementů – tzv. **primární ochrana**, případně i izolacemi povrchu konstrukce – tzv. **sekundární ochrana**.



Obr. 6.8 Krystaly ettringitu krystalizované v pórovém systému betonu



Obr. 6.9 Příklad keramzit betonu degradovaného ettringitem (světle šedé povlaky)

Uhličitá agresivita p. v. se zvýšeným obsahem rozpuštěného CO₂. Rozeznáváme:

- vody slabě uhličitě
- vody středně uhličitě
- vody silně uhličitě (= kyselky).

CO₂ je volný a rovnovážný; dále může být CO₂ agresivní na Fe nebo na CaCO₃.

Uhličitá agresivita p. v. je velmi až mimořádně nebezpečná, mimo jiné i tím, že ochrana před ní je velmi obtížná (používají se izolační hmoty a fólie, speciální receptury betonu, zvýšené krytí konstrukce – tedy její předimenzování; extrémním případem je použití nerezových ocelí).

Hodnocením agresivity p.v. vůči základovým konstrukcím se zabývaly dnes již neplatné ČSN 73 1214 a ČSN 73 1215 viz tabulka (VI.I):

Hodnocení agresivity p.v.

Tab. VI.I

Stupeň agresivity	oxid uhličitý CO₂ mg.l⁻¹	SO₄²⁻ mg.l⁻¹	Celková mineralizace v roztoku pokud se odpařuje z povrchu betonové konstrukce g.l⁻¹
(la) slabě agresivní	4 až 15	250 až 500	10 až 20
(ma) středně agresivní	15 až 30	500 až 1000	20 až 50
(ha) silně agresivní	>30	>1000	>50

Průzkum by měl zvážit intenzitu a tendenci vývoje zdroje agresivity, rozložení agresivity po ploše staveniště a pohyb (proudění) agresivní vody. Jedná se o velmi obtížný úkol, ne vždy zcela splnitelný. V případě pochyb je na místě vysoká opatrnost a skeptická prognóza vývoje!

