

MECHANIKA ZEMIN

<http://geotech.fce.vutbr.cz>

VÝUKA

MECHANIKA ZEMIN

- osnova
- podklady do cvičení
- učební texty
- doporučená literatura
- odkazy na jiné webové stránky
- zajímavosti

Z hlediska vědecké disciplíny sdružuje **geotechnika** především tyto dílčí inženýrské obory:

- geologii, inženýrskou geologii a hydrogeologii
- geomechaniku jako zvláštní obor mechaniky
 - mechanika zemin
 - mechanika skalních hornin
 - mechanika sněhu a ledu
- nauku o zakládání staveb
- nauku o způsobu výstavby podzemních děl

Definice Geotechnické společnosti Českého svazu stavebních inženýrů:

Geotechnika jako významná oblast stavebnictví **zkoumá vlastnosti zeminového a horninového prostředí, interakci tohoto prostředí s novými stavebními objekty, resp. jejich využitelnost jako konstrukčního materiálu.** Zahrnuje vzájemně propojené specializace, jako mechanika zemin, mechanika hornin, inženýrská geologie, zakládání staveb, podzemní stavby, zemní konstrukce, lomařství. Má přímý vztah k ochraně životního prostředí, zejména v souvislosti s přesunem velkého množství pevných hmot, ať již původních, nebo různých odpadů (výsyvky, odkaliště, skládky apod.).

GEOTECHNIKA

PRŮPRAVNÉ PŘEDMĚTY	TEORETICKÉ PŘEDMĚTY A MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	APLIKAČNÍ PŘEDMĚTY	
Geologie, inženýrská geologie G	Geomechanika GM	Geotechnické konstrukce GTK	Geotechnicko-ekologické konstrukce GTŽP

ZÁKLADY GEOTECHNIKY

GEOLOGIE	GEOTECHNICKÉ INŽENÝRSTVÍ		
<u>Inženýrská geologie</u> Hydrogeologie	<u>Mechanika zemin</u> Laboratoře mechaniky zemin <u>Mechanika hornin</u> Laboratoře mechaniky hornin Polní zkoušky v geotechnice	<u>Zakládání staveb</u> Speciál. metody zakládání stav. Zakládání při rekonstrukcích Zakládání - metody Zakládání staveb 2 Statika základových konstrukcí <u>Zemní konstrukce</u> <u>Podzemní stavby 1</u> <u>Podzemní stavby 2</u> Základy lomařství Destrukční práce ve staveb. Automatizace geotech. úloh Odborná exkurze z geotechniky	Geotechnika a životní prostředí Odpady a skládkování

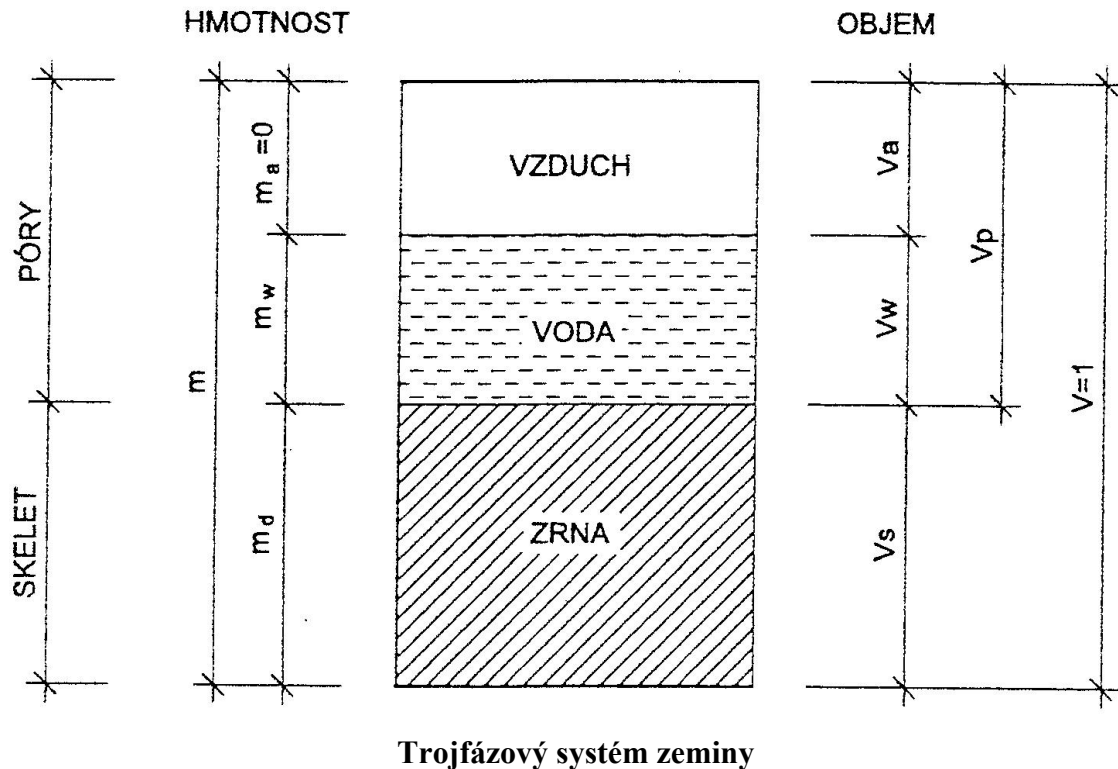
Tab. 1

Rozdělení geotechniky na specializace a předměty pro výuku na ČVUT Praha dle I. Vaníčka

Hlavní náplň MZ – zjištění vlastností zemin a jejich chování za různých podmínek a ve vyšetřování napjatostního stavu.

Zemina se od jiných látek odlišuje především tím, že sestává ze **tří fází** – **fáze pevné, kapalné a plynné**.

Napětí přenáší všechny fáze, **smykovou pevnost pouze pevná fáze**.



Vzájemný poměr těchto tří fází ovlivňuje chování zeminy jako celku a má vliv na pevnostní a deformační parametry zemin.

K. Terzaghi **Princip efektivních napětí**

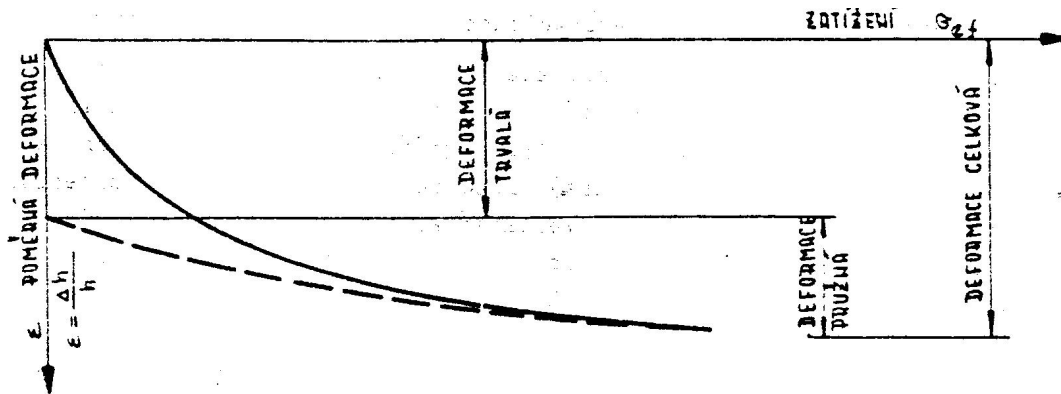
nasycená zemina $S_r = 1$

$$\sigma = \sigma_{ef} + u$$

- σ totální napětí
- σ_{ef} efektivní napětí
- u pórové (neutrální) napětí

Horniny jsou přírodní minerální seskupení různého složení a struktury, které vznikly působením geologických procesů.

Horniny nezpevněné nebo slabě zpevněné se označují jako **zeminy**

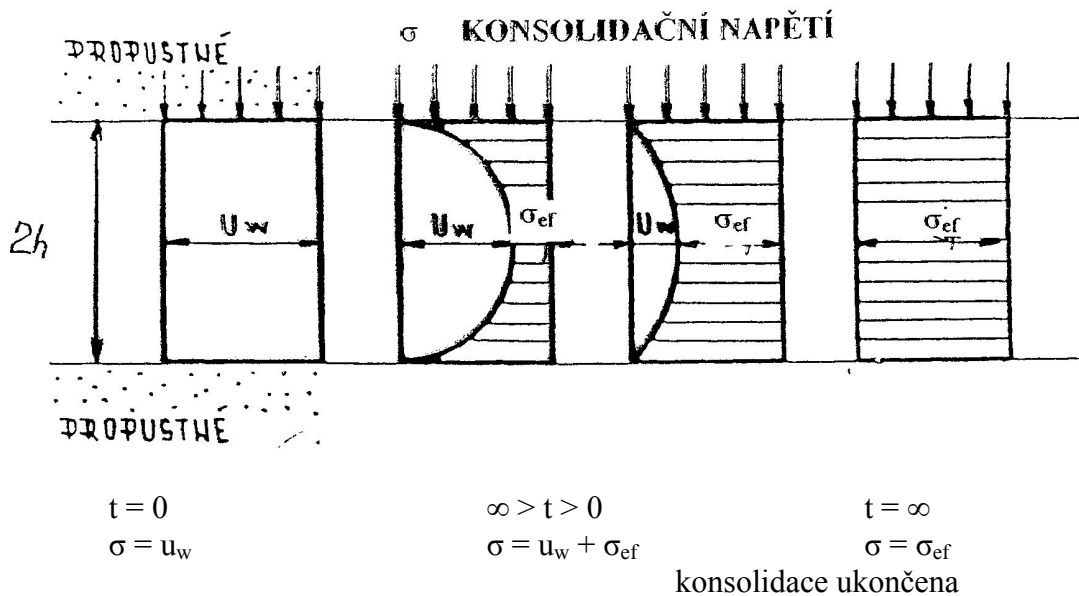


b) **Změna objemu – deformace zeminy je závislá na čase**

Zatížení přenáší všechny tři fáze – dochází ke změnám tlaku v pórech zeminy – pohyb vody v zemině – **vlastnosti zemin se mění s časem.**

KONSOLIDACE ZEMIN

Konsolidace je reologický proces postupného zmenšování objemu póru zeminy a změny struktury zeminy od působícího zatížení spojený s vytlačováním vody z póru zeminy. Dochází k postupnému zpevňování zeminy.



změna vlastností v čase

Prvním krokem je klasifikace zemin – vždy na základě laboratorních (fyzikálně indexových) zkoušek.

Nejběžnější pojmenování na základě **velikosti částic**.

NAVRHOVÁNÍ ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ

Základy staveb se navrhují na základě **mezních stavů**:

1. **mezní stav – únosnosti** (stabilita základové konstrukce)
2. **mezní stav – použitelnosti** (deformace základové půdy)

U nás byly mezní stavy zavedeny již v původní normě

z r. 1967 ČSN 73 1001 – Základová půda pod plošnými základy

v r. 1987 revize ČSN 73 1001 – Základová půda pod plošnými základy zde byla **nově zavedena mezinárodní klasifikace zemin** a hornin

v r. 2004 Eurokód 7 – Navrhování geotechnických onstrukcí

část 1 – Obecná pravidla

část 2 – Navrhování na základě laboratorních zkoušek

bude sloučeno
v část 2

část 3 – Navrhování na základě terénních zkoušek

Nyní platí jak Eurokód 7, tak i původní národní normy.

KLASIFIKACE ZEMIN PRO INŽENÝRSKÉ ÚČELY PODLE ČESKÝCH TECHNICKÝCH NOREM A EVROPSKÉ NORMY

Klasifikací nazýváme zatřídění zemin do skupin, tříd apod. Toto seskupení se užívá především proto, abychom si pod určitým symbolem zeminy mohli představit přesně definované skupiny zemin, které mají určité konkrétní a velmi blízké vlastnosti, zjištěné na základě fyzikálně-indexových laboratorních zkoušek a dlouhodobých zkušeností a korelací.

Získání charakteristických hodnot parametrů zemin nám umožňuje pro případy 1. a 2. geotechnické kategorie provést návrh založení konstrukce, posouzení stability svahu apod.

Víme, že v případě jemnozrnných zemin se vlastnosti výrazně liší a to v závislosti na vlhkosti, která významně ovlivňuje konzistenční stav těchto zemin. Pro skupinu sypkých zemin má vlhkost výrazně nižší vliv. Charakteristiky stavu nesoudržných zemin závisí především na hutnosti (ulehlosti) zeminy vyjádřené pórovitostí n nebo číslem pórovitosti e .

Základem klasifikace zemin je mezinárodně nejrozšířenější klasifikace USCS (Unified Soil Classification System). Z modifikovaného jednotného klasifikačního systému vychází i **ČSN 73 1001 Základová půda pod plošnými základy**, **ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže** a **ČSN 72 1002 Klasifikace zemin pro dopravní stavby**

KLASIFIKACE ZEMIN PRO ZAKLÁDÁNÍ STAVEB

podle ČSN 73 1001 – Základová půda pod plošnými základy

Základem klasifikace zemin je mezinárodně nejrozšířenější klasifikace USCS (Unified Soil Classification System). Z modifikovaného jednotného klasifikačního systému vychází i ČSN 73 1001 – Základová půda pod plošnými základy.

ČSN 73 1001 rozlišuje tři výchozí skupiny klasifikačního systému:

- skupina **F** – zeminy jemnozrné (**8 tříd** – F1 až F8)
- skupina **S** – zeminy písčité (**5 tříd** – S1 až S5)
- skupina **G** – zeminy štěrkovité (**5 tříd** – G1 až G5)

Frakce	Označení	Velikost částic [mm]	
jemné částice f	jílovitá	-c-	0,002
	prachovitá	-m-	0,002 – 0,06
hrubé částice	písčitá	-s-	0,06 – 2
	štěrkovitá	-g-	2 – 60
velmi hrubé částice	kamenitá	-cb-	60 – 200
	balvanitá	-b-	> 200

Symbols

jemnozrné zeminy **F** (fine soil)

jíl C (clay)

hlína M (mould)

hrubé zeminy

písek S (sand)

štěrk G (gravel)

velmi hrubé zeminy

kameny Cb (cobbles)

balvany B (boulders)

UPŘESNĚNÍ NÁZVU ZEMINY

a) soudržné zeminy

Casagrande zjistil, že vlastnosti zemin jsou podmíněny polohou v diagramu $I_p \times w_L$, který dostal název **diagram plasticity a vešel jako klasifikační základ pro soudržné zeminy do většiny klasifikačních systémů**

Čára A má rovnici

$$I_p = 0,73 (w_L - 20)$$

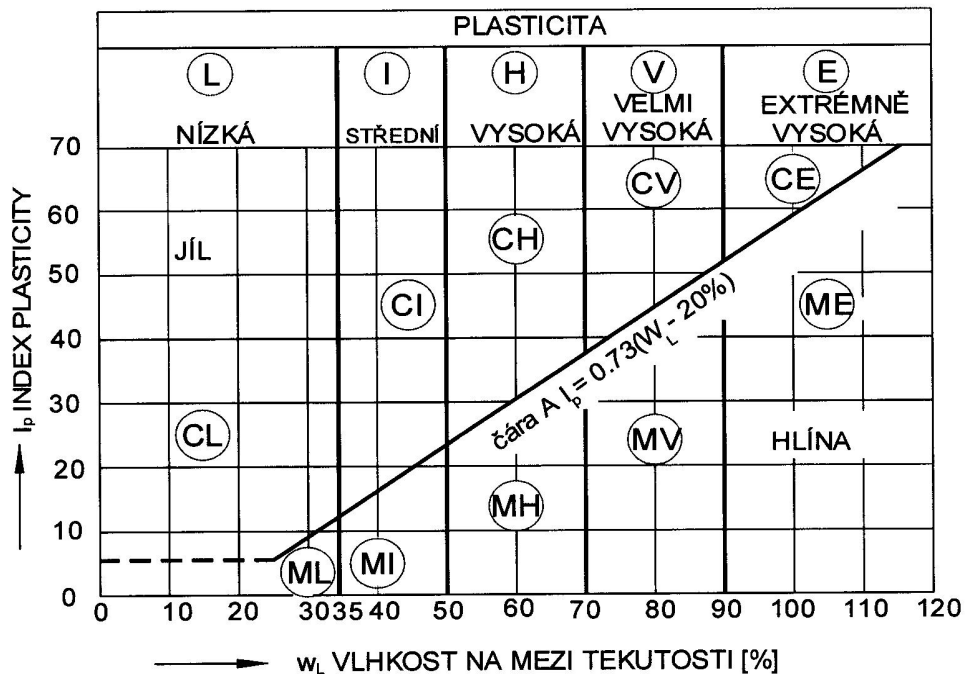
Nad čarou A se nachází zeminy s výrazně plastickými vlastnostmi.

Základní rozdíl mezi C a M je v aktivitě spolupůsobení jednotlivých frakcí a různých reakcí s vodou.

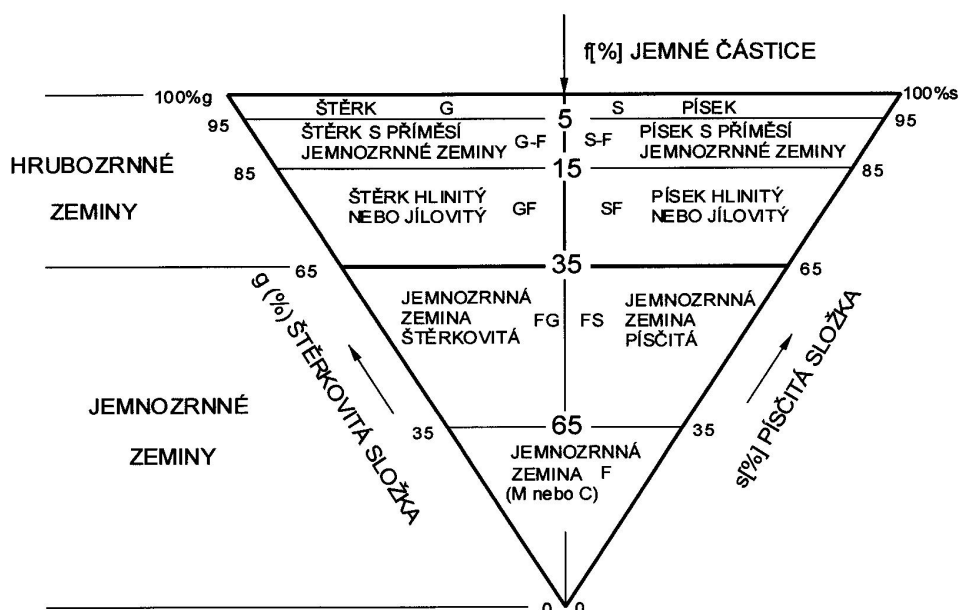
Podle hodnoty w_L přidáme k základnímu symbolu doplňující symbol vyjadřující plasticitu zkoumané zeminy

L, I, H, V, E

Digram plasticity pro jemnozrnné zeminy



Trojúhelníkový diagram



b) nesoudržné zeminy

u nesoudržných zemin z čísla nestejnzrnnosti a křivosti upřesníme

W – dobře zrněné

$$C_u > 5, \quad C_c = 1 - 3$$

P – špatně zrněné

nejsou splněny podmínky pro W

- nesoudržné zeminy

- podle čísla nestejnzrnnosti C_u
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

(charakterizuje tvar křivky zrnitosti)

- **dobře zrněné** – $WC_u > 6$ pro písky, $C_u > 4$ pro štěrky a zároveň $C_c = 1 - 3$

- **špatně zrněné** – P nejsou splněny podmínky pro W

Evropská norma EN ISO 14688-1 – Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin

Část 1: Pojmenování a popis (ISO 14688-1:2002)

Tato evropská norma byla schválena CEN 2002-06-24 a je platná od června 2003, ale není závazná.

Část 2: Zásady zařídování a kvantifikace popisných vlastností – EN ISO 14688-2 dosud nevydaná.

Normativní odkazy

ISO 710-1	Grafické symboly užívané v podrobných mapách, plánech a geologických řezech dosud nevydaná
ISO 710-2	Grafické symboly užívané v podrobných mapách, plánech a geologických řezech dosud nevydaná
ISO 11259	Kvalita zemin – Zjednodušený popis zemin dosud nevydaná
ISO 14689	Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a popis skalních hornin dosud nevydaná
ISO	Mezinárodní organizace pro novelizaci sdružuje 90 zemí celého světa včetně USA, Japonska a většiny evropských zemí.
CEN	Evropská komise pro novelizaci sdružuje 18 západoevropských zemí a ČR jako jedinou zemi z bývalého východního bloku

Část 1 Pojmenování a popis zemin

Norma umožňuje:

- **předběžné pojmenování** a popis na základě určení vlastností a chování zemin in situ
- **přesnější pojmenování** na základě laboratorních zkoušek (především zrnitosti a konzistenčních mezí, ale také na základě stanovení mineralogického složení a organických příměsí)

Pojmenování zemin

Pojmenování a popis zemin se obvykle provádí podle blokového diagramu.

Přesnější popis a zařídění je založeno na základě laboratorních zkoušek.

Kromě popisu zemin mají být uvedeny podmínky, ve kterých se zemina nachází, jakékoliv druhotné složky, další vlastnosti zeminy, jako obsah uhličitánů, tvar zrn, drsnost zrn, obecný název a geologický popis.

Velikosti zrn

Velikost zrn je základním parametrem pro pojmenování zemin.

Zeminy se rozdělují podle frakce na zeminy:

- velmi hrubozrnné
- hrubozrnné
- jemnozrnné

Tab. 10 Velikost zrn frakcí

Skupiny zemin	Frakce	Značka	Velikost zrn mm
velmi hrubozrnná zemina	velký balvan	LBo	630
	balvan	Bo	200 – 630 vč.
	valoun	Co	63 – 200 vč.
hrubozrnná zemina	štěrk	Gr	2,0 – 63 vč.
	hrubozrnný štěrka	CGr	20 – 63 vč.
	střednězrnný štěrka	MGr	6,3 – 20 vč.
	jemnozrnný štěrka	FGr	2,0 – 6,3 vč.
	písek	Sa	0,063 – 2,0 vč.
	hrubozrnný písek střednězrnný písek jemnozrnný písek	CSa MSa FSa	0,63 – 2,0 vč. 0,2 – 0,63 vč. 0,063 – 0,2 vč.
jemnozrnná zemina	prach	Si	0,002 – 0,063 vč.
	hrubozrnný prach střednězrnný prach jemnozrnný prach	CSi MSi FSi	0,02 – 0,063 vč. 0,0063 – 0,02 vč. 0,002 – 0,0063 vč.
	jíl	Cl	0,002 vč.

Smíšené zeminy

Většina zemin obsahuje podíly různých zrnitostních frakcí, které jsou buď rovnoměrně promíchány, nebo tvoří vrstvičky jiného materiálu v mateřské zemině.

Zeminy smíšené se skládají z hlavních a druhotných frakcí

Hlavní frakce

Hlavní hmotnostní frakce předurčuje inženýrské vlastnosti zeminy. V názvu je hlavní frakce uváděna velkými písmeny (včetně rozlišení hrubozrnný, střednězrnný, nebo jemnozrnný materiál – označení jedním velkým písmenem). Názvy frakcí zemin mají vždy dvě písmena. V případě hlavní frakce je první písmeno velké, druhé malé – např. jemnozrnný prach FSi.)

Druhotné frakce

Druhotné a další frakce nejsou určující, ale ovlivňují inženýrské vlastnosti zemin.

Druhotné frakce, jako přídatná jména, musí být napsány (malými písmeny) společně s názvem popisujícím hlavní frakce v pořadí jejich významu:

- písčité štěrka (*sandy gravel*) **saGr**

- hrubě písčité jemný štěrk (*coarse sandy fine gravel*) **csaFGr**
- středně písčité prach (*medium sandy silt*) **msaSi**
- jemně štěrkovitý hrubozrnný písek (*fine gravelly coarse sand*) **fgrCSa**
- prachovitý jemný písek (*silty fine sand*) **siFSa**
- jemně štěrkovitý, hrubozrnně písčité prach (*fine gravelly, coarse sandy silt*) **fgrcsaSi**
- středně písčité jíly (*medium sandy clay*) **msaCl**

Vrstevnaté zeminy mohou být napsány malými podtrženými písmeny po základní frakci zeminy (např. štěrkovitý jíl s vložkami písku (*gravelly clay interbedded with sand*) **grCl^{sa}**).

Metody pro identifikaci a popis zeminy

- Zrnitostní analýza
- Stanovení tvaru částic
- Stanovení minerálního složení
- Stanovení obsahu jemnozrnné frakce
- Stanovení barvy zeminy
- Stanovení pevnosti v suchém stavu
- Stanovení dilatance
- Stanovení plasticity
- Stanovení obsahu písku, prachu a jílu v zeminách
- Stanovení obsahu uhličitánů
- Stanovení obsahu organických látek
- Obsah vulkanických látek
- Stanovení konzistence

Část 2

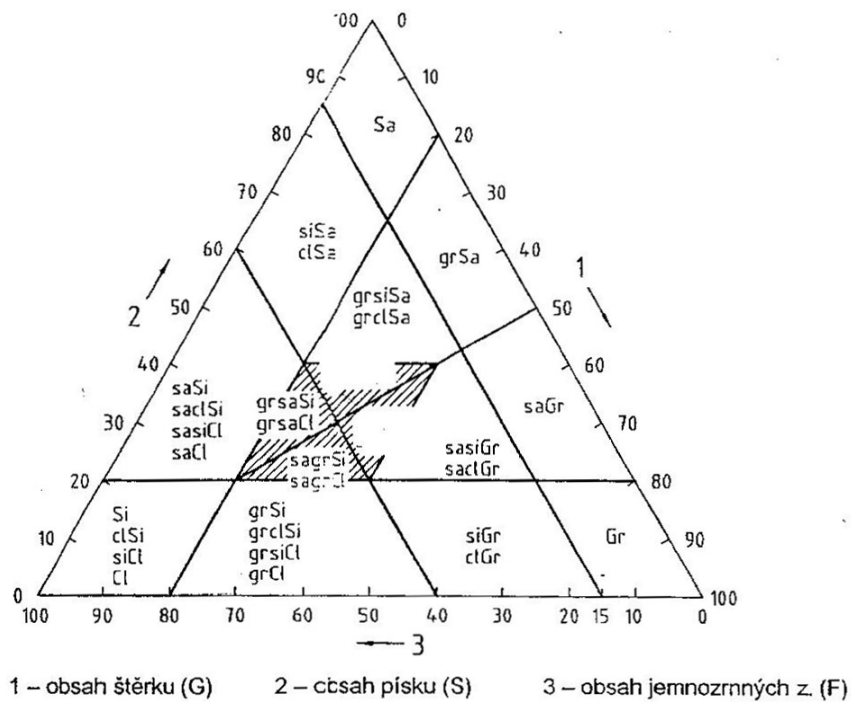
Zásady zařídování a kvantifikace popisných vlastností

EN ISO 14688-2 dosud nevydaná (ing. Nešvara – SG Geotechnika, a. s. – seminář Klasifikace zemin a hornin 28. 2. 2001 v Praze)

Klasifikační systém uvedený v této normě umožňuje rozdělit zeminy do skupin obdobných vlastností pro inženýrské účely jako jsou:

- zakládání staveb
- zlepšování zemin
- konstrukční materiály pro silnice
- konstrukční materiály pro násypy
- konstrukční materiály pro hráze
- konstrukční materiály pro drenážní systémy

Klasifikace na základě zrnitosti se provádí dle následujícího diagramu:



Obr. 7 Trojúhelníkový diagram pro zrna menší než 63 mm

Výše uvedený trojúhelníkový diagram se používá pro zrna menší než 63 mm. Velmi hrubozrnné zeminy se klasifikují mimo tento diagram na balvanité a kamenité.

Dále se hodnotí:

- tvar zrn (dobře opracované, středně opracované, špatně opracované a neopracované)
- plasticita jemnozrnné frakce (neplastické, nízkoplastické, středněplastické a vysoceplastické)
- obsah organických látek (nízký, střední a vysoký obsah)
- případně soudržné vulkanické zeminy (podle meze tekutosti)

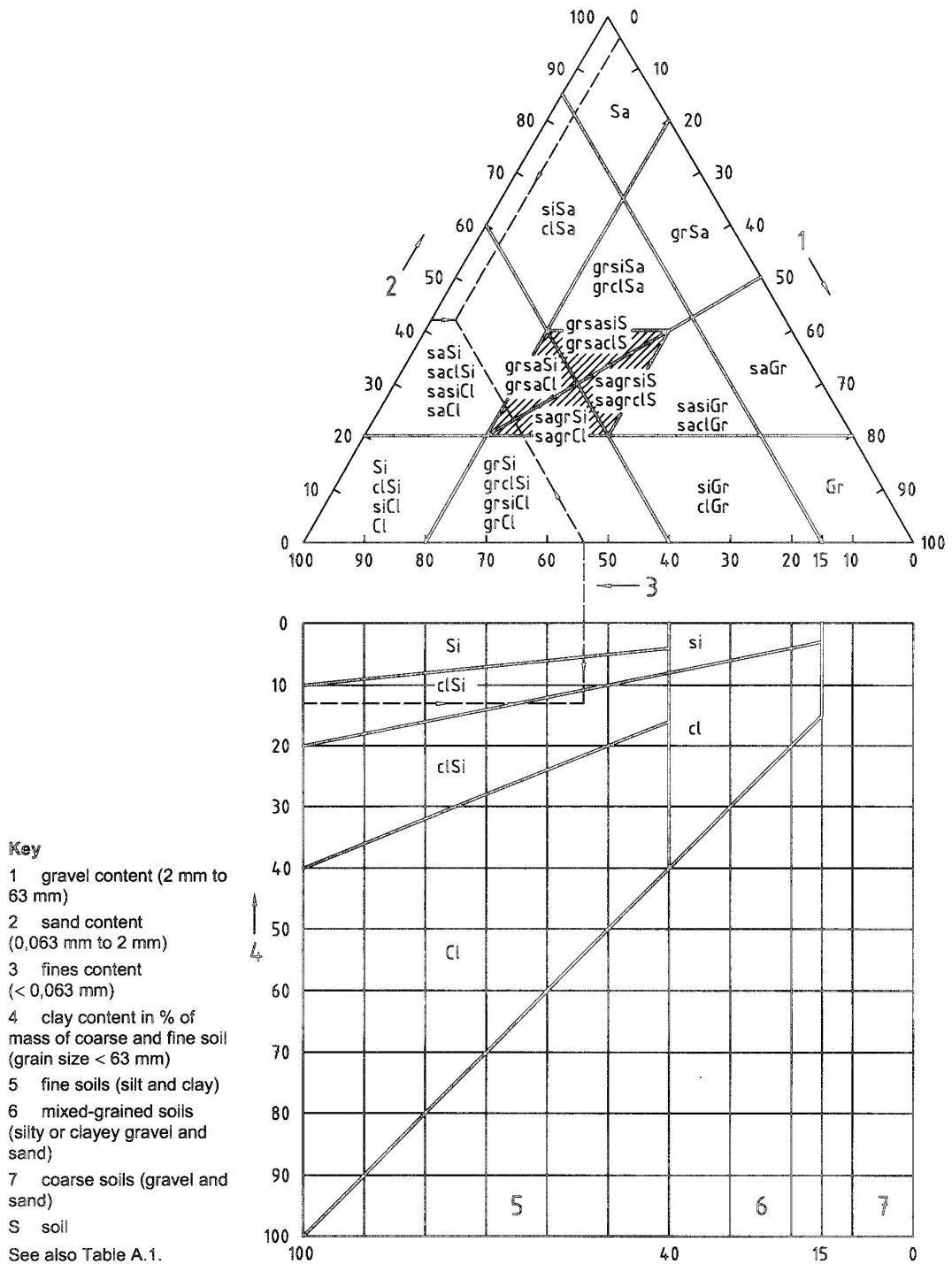


Figure B.1 — Classification of soils, based on grading alone

PEVNÁ FÁZE ZEMIN

Popis pevné fáze můžeme provést na základě různých hledisek.

Nejdůležitější je:

1. Vznik zemin

- a) **zeminy reziduální** – vznikly zvětráváním, ale nebyly přemístěné
- b) **sedimenty** – zemina byla po erozi transportována

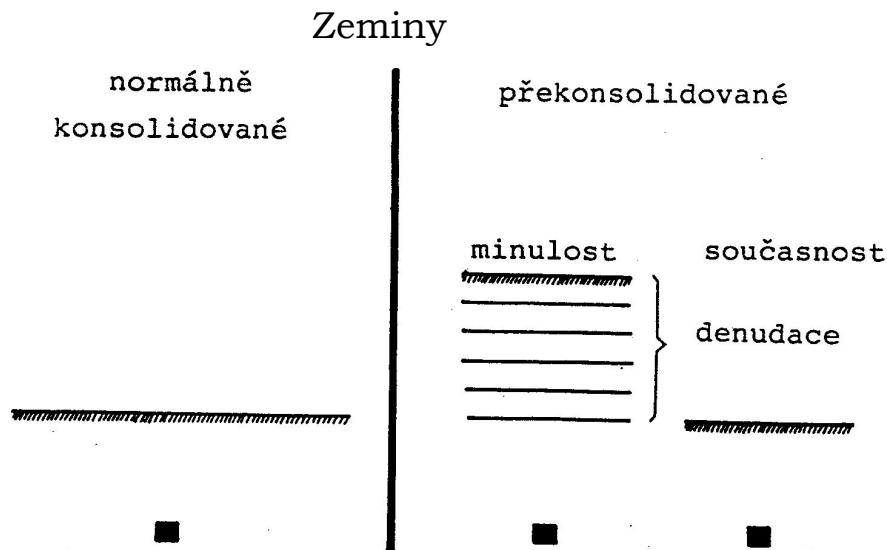
Podle přenosového media rozlišujeme

- naplavené (aluviální) – říční
- svahové (deluviální) – gravitace + voda
- váté (eolické)
- ledovcové (glaciální)
- mořské usazeniny

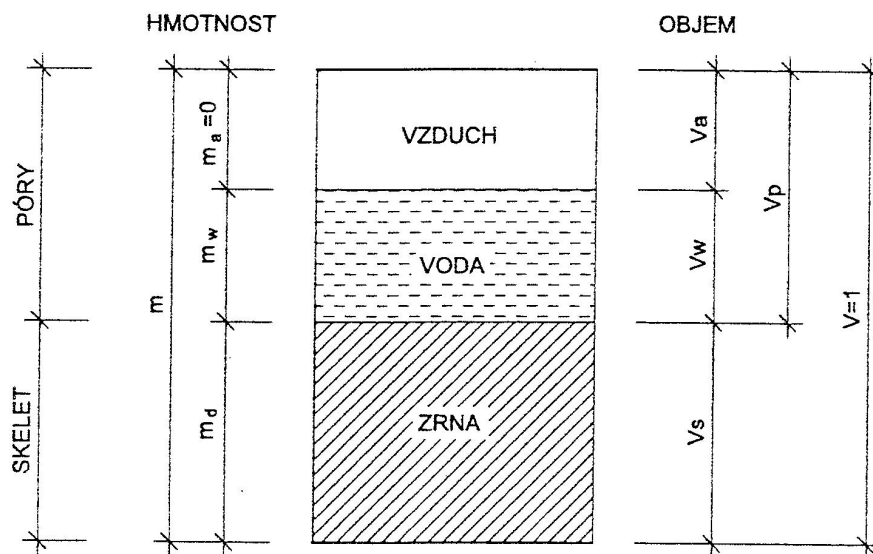
Mezi dobou sedimentace a dnešním stavem dochází k mnoha změnám. Dochází k ovlivňování přímo na kontaktech pevné fáze nebo prostřednictvím vody v pórech – **konsolidace** ⇒ zvyšování pevnosti, zlepšení modulu přetvoření.

Zeminy **normálně konsolidované** – současné zatížení (např. od vlastní tíhy) nebylo nikdy překročeno.

Zeminy **překonsolidované** jsou ty, u kterých zatížení v (dávnné) minulosti bylo větší než v současnosti.



2. Obsah pevné fáze



Trojfázový systém zeminy

Objemově lze charakterizovat obsah pevné fáze pomocí **pórovitosti n**

pórovitost	$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100$	[%]	V_p – objem páru
objem pevné fáze	1 – n		
písky	$n = 30 - 40 \%$		
jemnozrnné zeminy	$n = 35 - 55 \%$		

číslo pórovitosti

$$e = \frac{V_p}{V_d} = \frac{n}{1 - n}$$

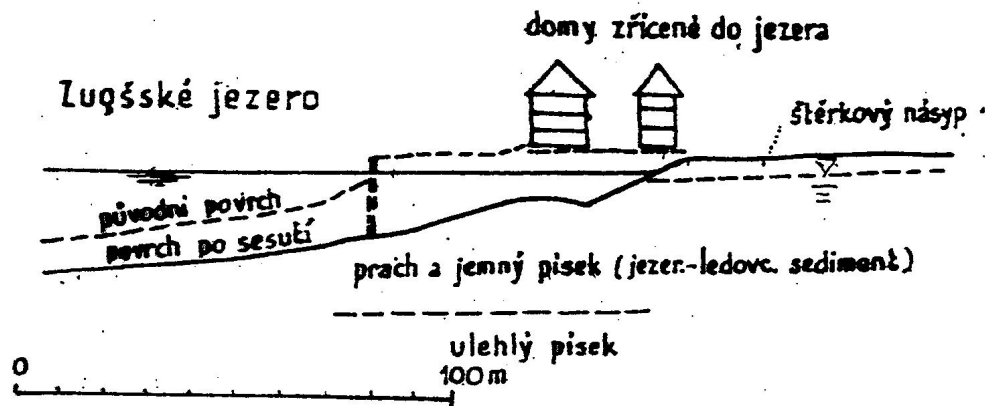
V_d – objem sušiny (zrn)
(obvykle vyjádříme jako desetinné číslo)

Číselným podkladem k posouzení ulehlosti je **pórovitost**.

ulehlé písky	n pod 36 %
nakypřené písky	n nad 40 %

Písčité a prachovité zeminy s velkou propustností – **velmi stlačitelné** zejména při dynamickém namáhání.

Pozor na nakypřené písčité a prachovité zeminy **pod hladinou vody** – mohou se chovat jako **tzv. tekuté písky** (vliv dynamického namáhání)



Švýcarsko – beranění pilot v nakypřeném písku pod HPV

Hmotnostně je obsah pevné fáze charakterizován pomocí **objemové hmotnosti vysušené zeminy**

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \left[\text{kgm}^{-3} \right]$$

Velikost ρ_d nezávisí pouze na objemu pevné fáze, ale také na hodnotě **hustoty pevných částic**

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d} \left[\text{kgm}^{-3} \right]$$

$$\rho_s = 2650 - 2750 \text{kgm}^{-3}$$

Základním ukazatelem stavu sypkých zemin je **index relativní ulehlosti I_D** .

Kriteria ulehlosti:

$I_D < 0,33$	kypré písky (nevhodné pro zakládání)
$I_D = 0,33 - 0,67$	středně ulehlé písky
$I_D > 0,67$	ulehlé písky

3. Velikost částic

Pro detailnější popsání velikosti zrn – **křivka zrnitosti**

- sítový rozbor
- hustoměrná zkouška

STOKESŮV USAZOVACÍ ZÁKON

udávající vztah mezi průměrem zrn a rychlostí jejich usazování v kapalině

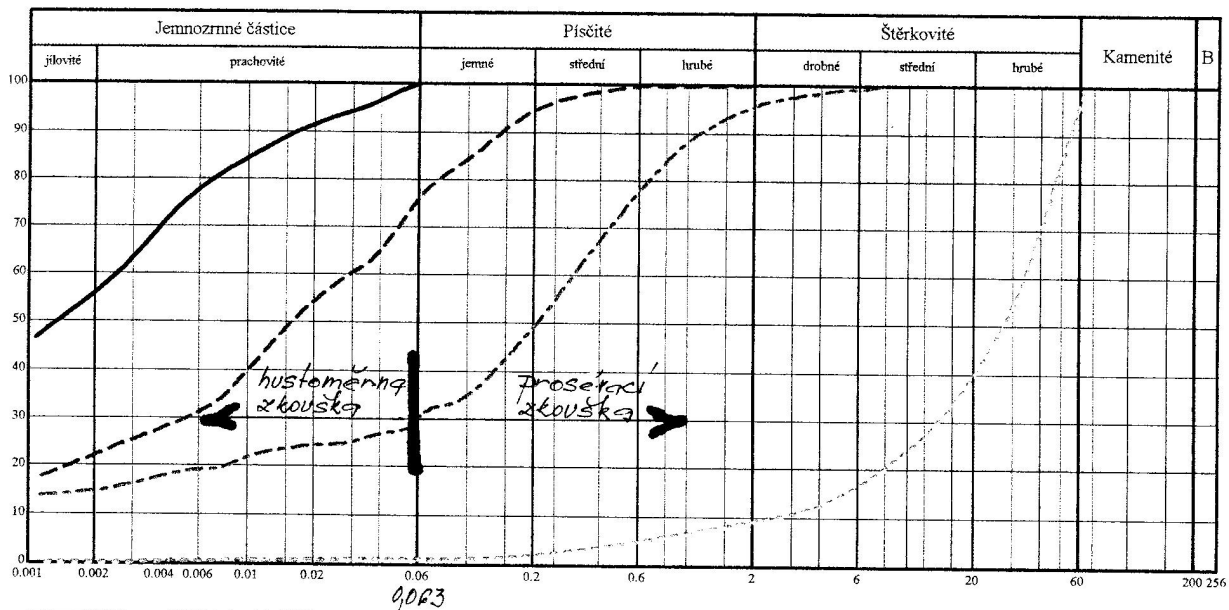
$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

- kde: v je rychlost klesání částice v kapalině
 g gravitační konstanta
 ρ_s měrná hmotnost zrn zeminy
 ρ_w měrná hmotnost vody
 η dynamická viskozita vody
 d průměr částice

KŘIVKY ZRNITOSTI ZEMINY



Název akce: ČOV-Modřice



Sonda	Hloubka	Vzorek	Křivka	Symbol	Název zeminy	C_u	C_c	w_L	I_p
MO-100	4,7-4,9	575		F8=CV	jíl s velmi vysokou plasticitou	2.35	0.43	81.70	51.70
MO-100	5,5-6,0	576		F8=CH	jíl s vysokou plasticitou	25.08	0.79	64.90	35.00
MO-100	0,6-0,8	577		S5=SC	písek jílovitý	265.87	10.27	26.30	11.00
MO-100	5,0-5,2	578		G1=GW=Cb	štěrk dobře změněný s příměsí kamenů	14.80	2.41	26.32	11.01

U nesoudrzných zemín je důležitý charakter zrnitostní křivky.

Číslo nestejnozrnosti $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

$C_u < 5$ stejnozrná zemina
 $C_u = 5 - 15$ středně nestejnozrná zemina
 $C_u > 15$ nestejnozrná zemina

$C_u = 6$ pro písky
 $C_u = 4$ pro štěrky

Číslo křivosti $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$

(charakterizuje přibližně tvar křivky zrnitosti)

Zeminy s hodnotami C_c v rozsahu 1 až 3 a číslem nestejnozrnosti $C_u > 5$ považujeme za **dobře zrněné** (symbol W)

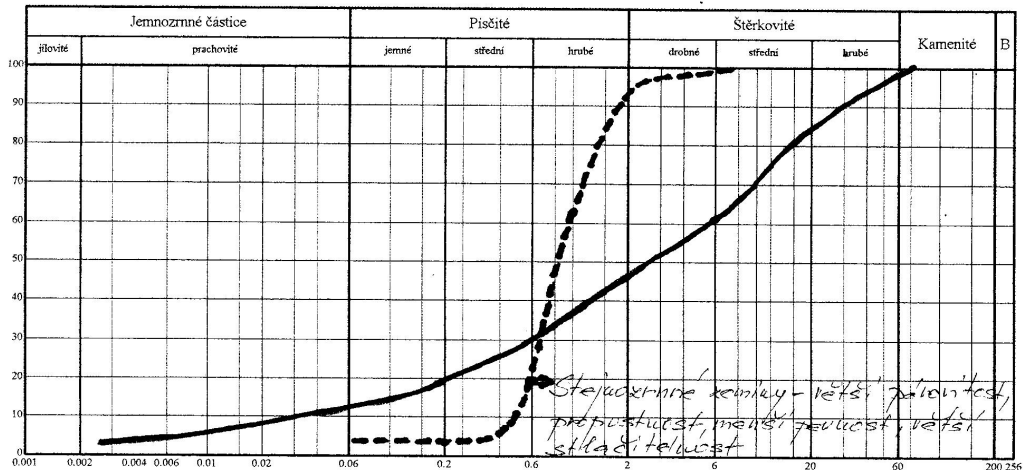
nejsou splněné podmínky pro W – **špatně zrněné** – symbol P

d_{10}
 d_{30}
 d_{60} ekvivalentní průměry zrn při 10%, 30%, 60% propadu

KŘIVKY ZRNITOSTI ZEMINY



Název akce: ČOV-Modřice

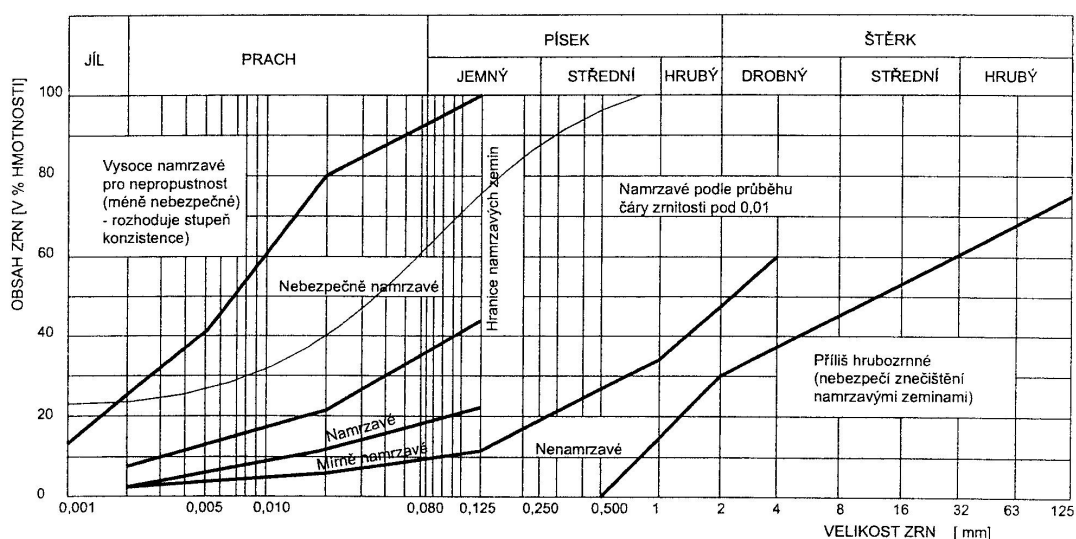


Sonda	Hloubka	Vzorek	Křivka	Symbol	Název zeminy	C_u	C_c	w_L	I_p
MO-100	6,5-6,8	579	—	G3=G-F	šterk + příměsí jemn.zeminy	182.19	2.05	0.00	0.00
MO-100	7,5-8,0	580	- - -	S2=SP	písk špatně zrněný	1.97	0.97	50.00	20.00

Zrnitost jedna ze základních zkoušek

- klasifikace zeminy
- propustnost
- promrzání zeminy
- vhodnost zeminy do filtračních vrstev
- vhodnost zeminy do betonu atd.

KRITERIUM NAMRZAVOSTI podle zrnitosti zemin ČSN 72 1002



4) Mineralogické složení

horninotvorné minerály – prvotní – v průběhu zvětrávání přechází do zemin z mateční horniny. Většinou mají krystalickou stavbu.

minerály jílovité – druhotné – vznikají chemickými procesy prvotních minerálů v průběhu zvětrávání.

jílovité minerály (označujeme částice < 0,002 mm) mají z hlediska MZ největší význam – jejich přítomnost určuje **mechanické chování** a to i při velmi malém podílu jílovité frakce.

5% jílu (např. v písku) – zmenší propustnost, sníží pevnost, zvýší stlačitelnost. Nejčastěji se vyskytující jílové minerály:

- **kaolinit**
- **illit**
- **montmorillonit** – nejvíce bobtná

Typickým projevem jílovitých minerálů je vázat vodu

smržitelnost a bobtnavost

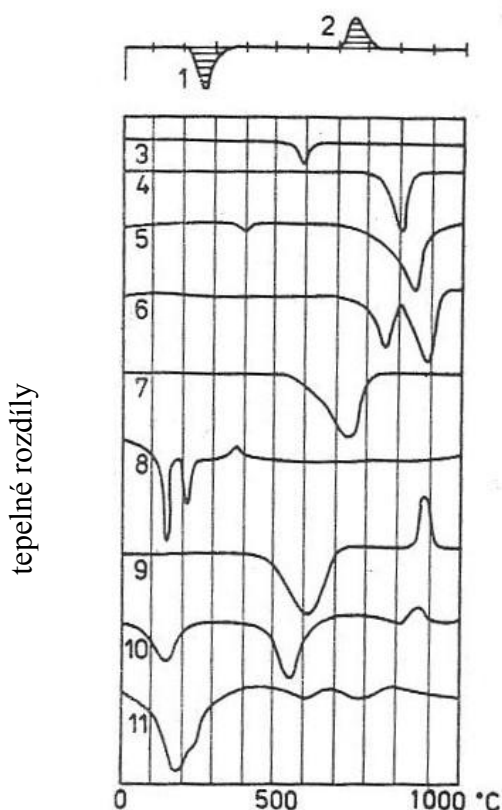
Metody identifikace jílových minerálů

přibližně IA – Index aktivity (Skempton)

$$\text{Index aktivity } I_A = \frac{I_p}{\text{podíl zrn } < 0,002 \text{ mm}}$$

IP index plasticity $IP = w_L - w_p$ vyjadřuje schopnost jílovitých minerálů vázat vodu. Podle velikosti IA můžeme usuzovat na minerál, který je v zemině obsažen. jílovité minerály: illit $IA = 0,29$; kaolinit $IA = 0,33$ až $0,46$, montmorillonit $IA = 7,2$. Jíly se stejným mineralogickým složením, původem a geologickou minulostí mají podle Skemptona stejnou aktivitu.

- **DTA** Diferenční tepelná analýza
konstantní zvyšování teploty o 10 až 15° C



DTA – gramy některých minerálů
(Jesenáková, 1985)

- 1 – endotermní reakce
- 2 – exotermní reakce, 3 – křemen
- 4 – kalcit, 5 – argonit,
- 6 – dolomit, 7 – magnezit,
- 8 – sádrovec, 9 – kaolinit, 10 – illit,
- 11 – montmorillonit

Dále se k identifikaci používají

- rentgenografické metody
- elektronoskopické metody
- chemické metody
- optické metody

Konzistenční meze jílových materiálů

Charakteristickou vlastností je výměna iontů

Minerál	Výměnný kationt	w _L [%]	w _P [%]	I _P
Montmorillonit	Na	710	54	656
	Ca	510	81	429
	Fe	290	75	215
Illit	Na	120	53	67
Kaolinit	Na	53	32	21

Skutečné **zeminy** však **obsahují pouze určitý podíl jílovitých minerálů** a hodnoty konzistenčních mezí bývají nižší.

Např.

Zemina	w _L [%]	w _P [%]	I _P
jíl Brno (příklad)	80	30	50
sprašová hlína (příklad)	40	25	15

5. Tvar zrn

6. Vzájemné uspořádání pevných částic (struktura)

7. Obsah organických částí, síranů, vápna apod.