

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Prosedavé zeminy v ČR Collapsible soils in the Czech Republic

Bakalářská práce

Vojtěch Novák



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha 2010

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Boháčovi, CSc. za trpělivost při vedení práce, cenné rady a poskytnuté informační zdroje. Další dík patří Mgr. Vladislavě Kostkanové za poskytnutí informačních zdrojů a Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze za výborné studijní zázemí. Práce byla připravena za podpory grantu GAUK 11709.

Prohlášení

Prohlašuji, že tato bakalářská práce byla vypracována pouze mnou samotným a všechny použité informační zdroje byly řádně uvedeny v seznamu literatury.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá potenciálně prosedavými zeminami v České republice a podává přehled o jejich stupni prosedavosti a vytyčuje hlavní území výskytu těchto zemin. Kolapsibilita patří mezi obávané vlastnosti zemin a v extrémních případech dochází k rozsáhlým deformačním účinkům na stavby založené na takto problematických zeminách. Hydrokolaps se týká především kvartérních eolických sedimentů - spraší a volně sypaných zemních těles. Spraše zaujímají značnou část plochy České republiky a riziko prosedavosti je tudíž značné.

Výsledky práce byly dosaženy na základě rešeršního shrnutí výzkumných zpráv zabývajících se prosedavostí zemin. V úvodní části se práce věnuje samotné definici prosedavých zemin a jejím vlastnostem či faktorům, které ovlivňují hydrokolaps. Stěžejní část se zabývá vyhodnocením potenciální prosedavosti a zhodnocením jejího stupně. Dále je pojednáno o metodách eliminujících prosedavost spraší. Práce by měla sloužit jako podklad pro další výzkum prosedavosti na lokalitách spraší a výsypek v ČR.

Abstract

The present thesis deals with potentially collapsible soils in the Czech Republic. Collapsibility is one of the dangerous phenomena of soils and in some cases it causes extreme deformation of structures. Hydrocollapse may happen especially at quaternary sediments – loess and in the made ground - spoilheaps. Loess is present at a large part of the Czech Republic and the risk of collapsibility may therefore be considerable. First, in the state of the art an overview of soil collapsibility is provided and the regions where the collapsible soils are present are identified. The main part of the thesis deals with the evaluation of the collapse potential and assessing the degree of collapsibility. It is concluded that in the Czech Republic only slight to moderate degree of collapsibility should be expected in natural soils. With respect to the made ground the fresh lumpy clay fills may exhibit a substantial degree of collapsibility if the macro-voids (high intergranular porosity) are retained until sudden saturating. Finally the possible methods of soil improvement to minimise the collapsibility of loess deposits are briefly summarised.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. PROSEDAVOST ZEMIN	2
2.1 Původ prosedavých zemin	2
2.2 Stanovení prosedavosti zemin	2
2.2.1 Norma ČSN 73 1001	2
2.2.2 ASTM - Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils	3
2.2.3 Nepřímá kritéria určení prosedavosti	4
2.3 Vlastnosti prosedavých zemin	4
2.3.1 Metastabilní struktura	4
2.3.2 Vysoká propustnost	4
2.3.3 Částečná nasycenost	4
2.3.4 Nízká objemová hmotnost	4
2.3.5 Zrnitost	5
2.4. Faktory ovlivňující proces prosedavosti zemin	5
3. LABORATORNÍ ZKOUŠKY POTENCIÁLNĚ PROSEDAVÝCH ZEMIN	6
3.1 Oedometrický přístroj	6
3.2 Princip laboratorní zkoušky	5
3.3 Metodika oedometrických zkoušek prosedavosti	8
3.4 Průběh oedometrické zkoušky - Metoda dvou křivek	9
4. SPRAŠ	10
4.1 Geneze spraší a problémy definice	11
4.2 Faktory ovlivňující prosedání spraší	13
4.2.1 Vnitřní faktory ovlivňující prosedavost spraší	13
4.2.2 Vnější faktory ovlivňující prosedavost spraší	14
4.3 Spraše v České republice	14
4.4 Prosedání spraší v ČR	15
4.4.1 Lokalita Noutice	16
4.4.2 Lokalita Průhonský háj v Praze 6 - Nebušicích	16
4.4.3 Lokalita spraší v oblasti Kolína	16
4.4.4 Lokalita spraší Praha - Dejvice	17
5. ELIMINACE PROSEDAVOSTI SPRAŠÍ	18
5.1 Zhutnění spraší	19
5.1.1 Dynamické zhutnění	19
5.1.2 Hloubkové zhutnění promáčením	19
5.1.3 Hloubkové zhutnění vlivem energie podzemních výbuchů	20
5.2 Zpevňování spraší	20
5.2.1 Termální zpevňování	20
5.2.2 Chemické zpevňování	21
6. JÍLOVITÉ VÝSYPKOVÉ ZEMINY	22
6.1 Laboratorní testy neporušených vzorků	23
7. ZÁVĚR	25
8. SEZNAM LITERATURY	26

1. ÚVOD

Cílem této práce je podat přehled o potenciálně prosedavých zeminách na území České republiky, mezi něž řadíme především spraše. Odborná literatura týkající se této problematiky je soustředěna především do oblastí Ruska, Číny a USA, přičemž množství literatury týkající se České republiky existuje ve velmi omezeném množství. Evropané řeší otázku problému stratigrafie spojenou se sedimentací spraší. Oproti tomu v USA a Rusku byla pozornost věnována zejména inženýrsko - geologickým vlastnostem a samotné litologii.

Výsledkem práce je hypotéza řešící otázku míry nebezpečnosti prosedavosti zemin v České republice a vytyčení oblastí se zeminami náchylnými ke kolapsu. Práce se zabývá vlastnostmi zemin se sklonem k prosedání a faktory ovlivňující hydrokolaps, přičemž není též opomenuto pojednání o možných metodách odstranění prosedavosti.

2. PROSEDAVOST ZEMIN

Prosedavost je jednou z obsáhle zkoumaných vlastností chování zemím, přičemž Lu a Likos (2004) charakterizují prosedavost jako poces spojený s nenasyceností. Projevuje se sedáním povrchu terénu vlivem náhlého zmenšení objemu zeminy z důvodu jejího prosycení. Prosedavost je zpravidla spojena se ztrátou kapilárního sání v zemině. Kapilární sání mezi zrny zeminy tvoří kapilární menisky a zvětšuje její pevnost a snižuje stlačitelnost v jejím nenasyceném stavu a umožňuje existenci zeminy v metastabilním stavu. Přejchod z nenasyceného stavu do stavu saturovaného způsobí destrukci původně metastabilní struktury a následuje proces prosedání zeminy. Tento jev má za následek deformační účinky, které se mohou projevit vznikem trhlin či ohrožením bezpečnosti celé stavby založené na takto problematických zeminách.

2.1 Původ prosedavých zemin

Při zkoumání prosedavých zemin se setkáváme s dvěma druhy geneze, původ zemin náchylných ke kolapsu může být antropogenní nebo přírodní. Mezi prosedavé zeminou vzniklé činností člověka patří zejména volně sypaná zemní tělesa. Takovým zemním tělesem jsou výsypky, které vznikají volným sypaním nadložní zeminy při těžbě surovin. Sypaní zde způsobuje dvojí pórovitost, kde makropóry tvoří mezery mezi jednotlivými fragmenty sypané zeminy.

Mezi prosedavé zeminou přírodního původu řadíme váté spraše a kypré písky. Spraše jsou označovány za nejobávanější prosedavé zeminou, protože vykazují náhlá a značná sednutí v případě prosycení zeminy vodou. Mezi nejhojnější oblastí výskytu spraší patří Čína, Rusko, Amerika a Evropa. Mocnosti sprašových vrstev dosahují až stovek metrů, např. v oblasti sprašového plató v Číně byla zjištěna průměrná mocnost 80 – 120 m, přičemž v regionu Lachuan a Sichuanci mocnost vrstvy přesahuje 200 m (Rózicky 1991).

2.2 Stanovení prosedavosti zemin

Prosedavost a její stanovení je předmětem mnoha technologických předpisů a technických norem. Setkáváme se s různými definicemi prosedavosti zemin v závislosti na původu dané normy. Česká norma ČSN 73 1001 (ČSN 1987) pouze stanovuje, zda typ zeminy za předepsaných podmínek prosedavý je či není. Oproti tomu norma ASTM (ASTM 2003) stanovuje stupně prosedavosti a poskytuje tak lepší vstupní údaje pro další rozbor chování zeminy z hlediska jejich mechanických vlastností především pro stavební účely. Platnost normy ČSN 73 1001 (ČSN 1987) skončila v roce 2010, ale stále se hojně využívá.

2.2.1 Norma ČSN 73 1001 (ČSN 1987)

ČSN 73 1001 „stanoví zásady pro posuzování mezních stavů základových půd pod plošnými základy. Platí pro všechny druhy plošných základů u stavebních objektů a konstrukcí včetně panelových obytných budov, pokud pro ně nejsou vydány zvláštní předpisy. Norma neplatí pro stavby zemní, vodní, některé dopravní stavby (letišť, vozovky, tunely, železniční spodek i svršek) a zvláštní stavební objekty, které se řeší individuálně, popřípadě podle zvláštních předpisů.“

Prosedavé zeminou řadíme dle normy do kategorie zvláštních zemin. „Za zvláštní zeminou se považují takové, které se chovají odlišně v porovnání se zeminami zařazenými podle zásad kvalifikačního systému zemin. Tato odlišnost se vyjádří přidáním doplňkového písmene (v případě prosedavých zemin písmeno T), které se připojí k příslušnému symbolu.“

„K prosedání může docházet u jemnozrnných zemin, vyskytuje-li se některá z následujících podmínek:

- zemina je eolického původu,
- obsah prachové složky > 60 % hmotnosti suché zeminy,
- obsah jílové složky < 15 % hmotnosti suché zeminy,
- stupeň nasycení $S_r < 0,7$; mez tekutosti $w < 32$ %.“

Norma 73 1001 dále stanovuje: „Jemnozrnné zeminy jsou náchylné k prosedání, když jejich pórovitost $n > 40$ % a současně i jejich vlhkost $w < 13$ %. U náchylných zemin se prosedavost zjišťuje zkouškou neporušeného vzorku v edometru. Prosedavé jsou zeminy, u kterých je prosednutí po nasycení větší než 1 % výšky vzorku před nasycením při konsolidačním tlaku, odpovídajícím součtu tíhy nadloží a průměrného zatížení od stavby. Normové charakteristiky prosedavých typů zemin se stanovují podle výsledků zkoušek.“

2.2.2 ASTM - Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils (ASTM 2003)

Norma ASTM (ASTM 2003) určuje stupeň prosedavosti. Prosednutí je zde charakterizováno jako snížení výšky zeminy v důsledku nasycení za konstantního vertikálního tlaku. Prosedavé zeminy mohou vydržet poměrně velký vertikální tlak s nízkým sednutím za nízkého obsahu vody, ale naopak projevují náchylnost k sedání po nasycení i bez zvýšení napětí. Tudíž zvýšení totálního napětí není nezbytné pro prosednutí. Norma pojednává o součiniteli kolapsu I_c (collapse index) a dále o potenciálu kolapsu I_c (collapse potential). Potenciál kolapsu I_c charakterizuje prosednutí zeminy při libovolném vertikálním napětí. Součinitel kolapsu I_c stanovuje totéž, ale při vertikálním napětí 200 kPa. K výpočtu I_c a I_c lze dojít pomocí čísla pórovitosti či poměrného přetvoření, ale i znalostí pouhých změn výšky zeminy.

Potenciál kolapsu I_c :

$$I_c (\%) = ((d_f - d_i) / h_0) * 100 \quad (1)$$

$$I_c (\%) = \Delta e / (1 + e_0) * 100 \quad (2)$$

$$I_c (\%) = \Delta h / h_0 * 100 \quad (3)$$

d_f sednutí saturovaného vzorku v mm,

d_i sednutí nesaturovaného vzorku v mm,

h_0 počáteční výška vzorku v mm,

Δe změna čísla pórovitosti následkem nasycení,

e_0 počáteční číslo pórovitosti,

Δh změna výšky vzorku následkem nasycení.

Tab. 1. Klasifikace stupně prosedavosti pomocí součinitele kolapsu I_c (ASTM 2003).

Stupeň prosednutí	Součinitel kolapsu I_c v %
Žádný (None)	0
Nepatrný (Slight)	0,1 - 2
Mírný (Moderate)	2,1 - 6,0
Mírně zvýšený (Moderately severe)	6,1 - 10
Vysoký (Severe)	> 10

2.2.3 Nepřímá kritéria určení prosedavosti

V terénu lze získat přibližnou představu o prosedavosti pouze makroskopickým vyhodnocením zeminy. Např. spraš můžeme označit s určitou pravděpodobností za prosedavou, splňuje-li následující podmínky: disponuje nízkou vlhkostí s pevnou konzistencí, se shluky uhličitanových kongrecí, s převahou prachovité frakce, s makropórovitou strukturou.

2.3 Vlastnosti prosedavých zemin

Pro všechny prosedavé zeminy platí následující charakteristiky:

2.3.1 Metastabilní struktura

Metastabilní (otevřená) struktura je charakterizována přítomností pórů různé velikosti. Kapilární a v menším zastoupení i cementační síly umožňují existenci makropórů, které jsou řádově větší než ostatní póry v zemině. Zemina je schopna existovat v částečně nasyceném stavu stabilně, ale při následném syčení zeminy dochází ke kolabování makropórů.

Delage a kol. (2005 v Herbstová a Herle 2009a) využili pro charakteristiku pórů metody rtuťové porosimetrie na spraších z oblasti severovýchodní Francie. Došli k závěru, že vlivem náhlého snížení objemu zeminy došlo ke zmenšení středně velkých a největších pórů mezi jednotlivými fragmenty zeminy, přičemž nejmenší póry nebyly nikterak ovlivněny.

Herle a kol. (1998) se zabývali zkoumáním makropórů u částečně nasyceného kypřého písku a posuzovali jejich vliv na prosedavost. Bylo zjištěno, že prosedavost je ovlivněna zrnitostním složením písku. Po nasycení vzorku písku se prosedavost zvyšovala v závislosti na úbytku středního průměru zrn. Byla prokázána též spojitost zvýšení prosednutí se vzrůstající nestejnozrnitostí použitých vzorků.

2.3.2 Vysoká propustnost

U prosedavých zemin se setkáváme s vysokou propustností. Ta je dána otevřenou strukturou zeminy obsahující velké množství vzájemně propojených makropórů, což podstatně zvyšuje proudění vody v zemině. Důsledkem je tedy rychlé nasycení zeminy a následné rychlé a náhlé sednutí ve velkém objemovém rozsahu, přičemž hydraulická vodivost zeminy se s postupně narůstajícím nasycením zvětšuje.

2.3.3 Částečná nasycenost

Na kontaktu mezi zrny dochází vlivem kapilárních sil k vytvoření kapilárního menisku při rozhraní vody a vzduchu. Tento jev zapříčiňuje vznik makropóru již při genezi zeminy. Kapilární síly ovlivňují smykovou pevnost, která je u částečně nasycené zeminy podstatně větší než u zeminy nasycené, a snižují jejich stlačitelnost.

2.3.4 Nízká objemová hmotnost

Otevřená struktura je úzce spjata s nízkou objemovou hmotností zeminy. Nejvyšší hraniční objemová hmotnost dle Mackechnie (1989 v Herbstová a Herle 2009a) byla stanovena na hodnotu $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$. Ale při působení vyšších tlaků a nižšího stupně nasycení mají sklon k prosedání i ulehlejší zeminy.

2.3.5 Zrnitost

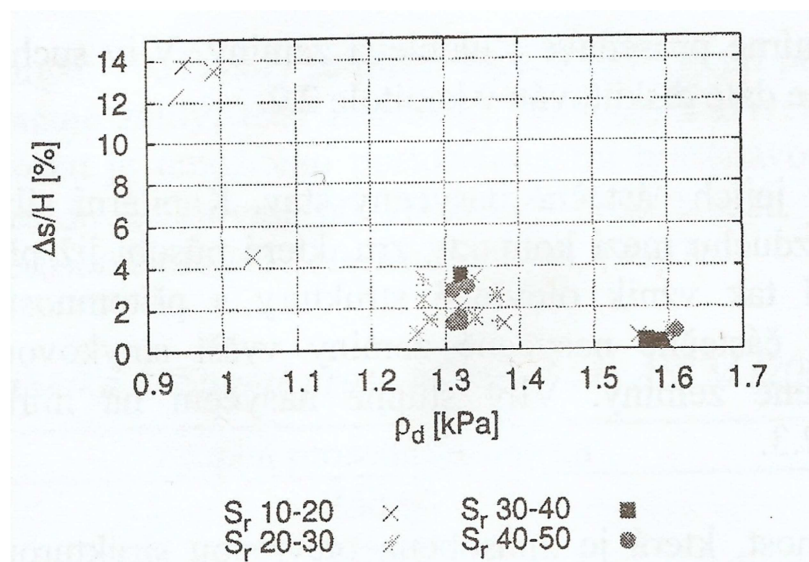
Za typicky prosedavou zeminu jsou označovány spraše. Jedná se o jemnozrnnou zeminu s nízkou plasticitou a zrnitostním složením, kde je obsaženo až 90 % siltových zrn. Avšak zrnitostní složení není ideálním parametrem k určování prosedavosti zemin. Za prosedavé zeminu můžeme označit i kypřé písky (Herle a kol. 1998) či výsypky tvořené ukládáním jílových hrud s vysokou plasticitou (Herbstová a kol. 2007). Norma ČSN 73 1001 (ČSN 1987) udává, že k prosednutí jsou náchylné zeminu s vlhkostí na mezi tekutosti $w_L < 32$ %. Jílovitá výsypka v severních Čechách disponuje průměrnou vlhkostí na mezi tekutosti $w_L = 59,4$ %, ale prosedavost se u několika vybraných vzorků přesto projevila.

2.4. Faktory ovlivňující proces prosedavosti zemin

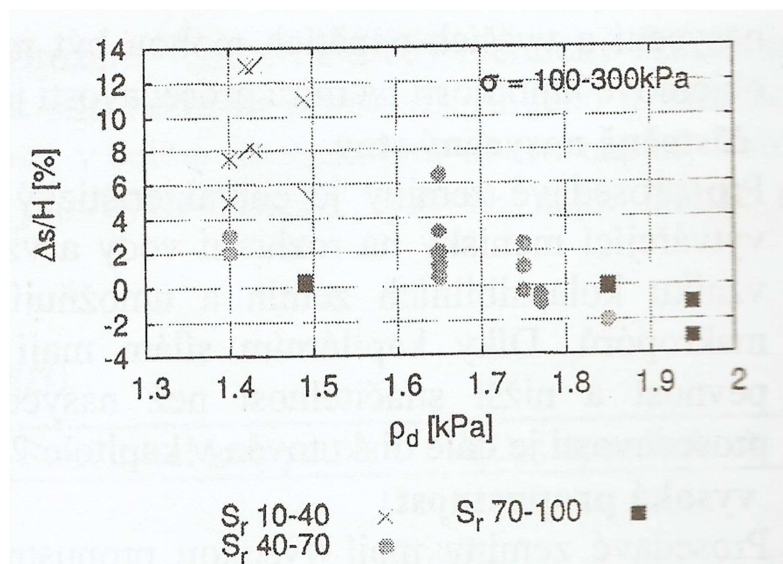
Mezi hlavní faktory ovlivňující prosedavost zemin patří historie sycení zemin, objemová hmotnost, stupeň nasycení a velikost napětí.

Zeminu prosedají při jejich prvním nasycení, kdy přecházejí ze stavu otevřené struktury na strukturu stabilní. Při dalším sycení zeminu již nedochází k následnému procesu prosednutí, jelikož zeminu je sycena ve svém stabilním stavu. K prosednutí tudíž mají tendenci zeminu, které nebyly v minulosti saturovány.

Vliv objemové hmotnosti na prosedání zeminu je patrný z následujících grafů. Obr. 1 reprezentuje závislost přetvoření na počáteční suché objemové hmotnosti vzorku písku, který byl zalit při napětích 0 - 200 kPa. Obr. 2 ukazuje výše uvedenou závislost pro vzorky spraše s nízkou plasticitou. Vzorky byly saturovány pod tlakem 100 - 300 kPa. Mackechnie (1989 v Herbstová a Herle 2009a) stanovil nejnižší možnou suchou objemovou hmotnost zeminu potenciálně náchylných k prosedání na $\rho_d = 1,6$ g/cm³. Ovšem použitý graf jasně ukazuje, že pro objemové hmotnosti $\rho_d = 1,6 - 1,75$ g/cm³ jeví vzorky určitý kolaps při nižším stupni nasycení a použitím vyšším napětí při zalití.



Obr. 1. Zobrazení závislosti přetvoření na počáteční suché objemové hmotnosti písku při zalití 0 – 200 kPa (Herbstová a Herle 2009a).



Obr. 2. Zobrazení závislosti přetvoření na počáteční suché objemové hmotnosti spraší s nízkou plasticitou při zalití 100 – 300 kPa (Herbstová a Herle 2009a).

Stupeň nasycení je jedním z nejdůležitějších faktorů z hlediska prosedavosti. Obecně platí, že čím menší je stupeň nasycení, tím větší je působení kapilárního sání mezi jednotlivými kontakty zrn. Kapilární sání snižuje stlačitelnost zeminy v přirozeně vlhkém stavu a dochází ke zvýšení náchylnosti k prosednutí.

Velikost napětí a jeho vliv na prosednutí je velice individuální. Různé druhy zemin reagují na velikost napětí odlišně. Při působení totálního napětí se kolaps u jemnozrnných zemin projevuje až při jeho vyšších hodnotách, kdy dojde k překročení překonsolidačního napětí. Toto napětí je hranicí mezi vratným chováním zeminy při nižších hodnotách napětí a nevratným chováním za působení vyššího napětí, kdy dochází k prosednutí. Překonsolidační napětí je závislé na stupni nasycení a objemové hmotnosti nenasycené zeminy. Hrubo zrné zemin vykazují prosedání již při nulových totálních napětí z důvodu geometrie pórů, jelikož kapilární síly u těchto zemin jsou nižší než u zemin jemnozrnných. Tudíž u spraší je k uzavření struktury potřeba většího působení napětí oproti pískům. Výše napětí hraje svou roli i z hlediska stupně nasycení. Pro uzavření struktury prosedavé zeminy s menším stupněm nasycení je potřeba vyššího napětí k překonání kapilárních sil (Herbstová a Herle 2009a).

3. LABORATORNÍ ZKOUŠKY POTENCIÁLNĚ PROSEDAVÝCH ZEMIN

3.1 Oedometrický přístroj

Pro stanovení prosedavosti zeminy se zpravidla používá přístroj oedometr, kde dochází k simulaci jednoosé stlačitelnosti. Oedometr je tvořen oedometrickou krabicí a tuhým válcovým prstencem. Vzorek se do prstence přetlačuje přímo z odběrného válce nebo se zemina zhutňuje v prstenci. U staršího typu oedometru činil průměr prstence 120 mm, což byl nejčastější rozměr odběrných válců. V současné době se používá prstavec s rozměrem 50 - 100 mm a to z důvodu odstranění zeminy nejvíce porušené po obvodě vzorku v případě přetlačování z odběrného válce. Vzorek v prstenci se následně seřízne pomocí bříty na výšku 20 – 30 mm v závislosti na výšce prstence (konsolidačního kroužku). Zemina je na horní i dolní podstavě opatřena filtračními destičkami, které umožňují

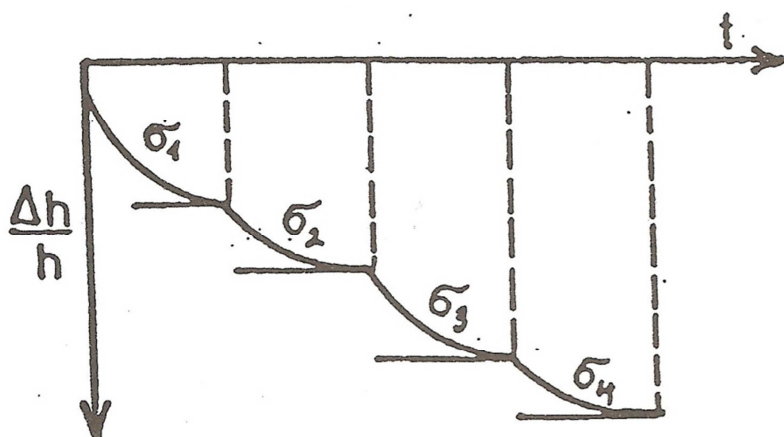
oboustrannou drenáž. Zatížení je realizováno přidáváním závaží přes pákový mechanismus pomocí pístu, který je mírně kónicky tvarovaný, a filtrační destička je do něj zapuštěna z důvodu zachování co největší rovnosti plochy pístu. Celý vzorek může být chráněn poklopem z plexiskla, aby nedošlo k vysychání vzorku a bylo udrženo požadované klima.

3.2 Princip laboratorní zkoušky

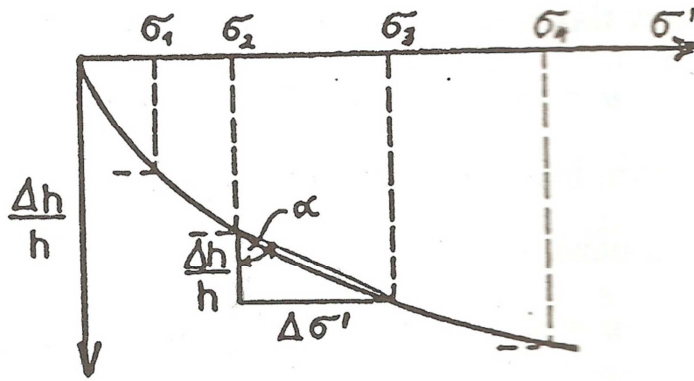
Nejběžnější je dnes zkouška se stupňovitým přitěžováním (Šimek a kol. 1990). Zatížení se provádí v jednotlivých zatěžkávacích stupních, přičemž dochází ke stlačování vzorku zeminy v prstenci bez možnosti vodorovných deformací. Od okamžiku zatížení se zaznamenává výškové přetvoření vzorku v závislosti na funkci času (viz obr. 3). Při nedostatečně dlouhém časovém intervalu působení daného stupně zatížení je část totálního napětí stále přejímána pórovým tlakem a při nadměrně dlouhém intervalu může dojít k ovlivnění výsledku sekundární konsolidací. V běžné praxi se proto stanovují smluvní hodnoty:

- stanovení celkového času jednoho zatěžovacího stupně,
- změna deformace za 1 hodinu musí být menší než 1% rozdílu deformace současné a deformace na konci minulého zatěžovacího stupně.

Po splnění některé z těchto podmínek se zvýší zatížení na další zatěžovací stupeň. V běžné praxi se doporučuje zvolit jednotlivé kroky tak, aby následující zatěžovací stupeň byl dvojnásobkem předchozího stupně. V případě aplikace menších kroků dostaneme plynulejší křivku stlačitelnosti, naopak nadměrně velký krok může nepříznivě ovlivnit celou deformaci. Maximální zatížení by mělo být nepatrně vyšší, než je předpokládané zatížení pro danou situaci. Konečné výsledné přetvoření vzorku zeminy se vynese v závislosti na napětí a tímto se získá oedometrická křivka stačitelnosti (viz obr. 4), přičemž se někdy naměřená data vynášejí v semilogaritmickém měřítku.



Obr. 3. Přetvoření vzorku v závislosti na čase (Lamboj a Štěpánek 2005).



Obr. 4. Oedometrická křivka (Lamboj a Štěpánek 2005).

Pro vyjádření jednoosé stlačitelnosti se využívají následující deformační charakteristiky, vycházející ze závislosti $\Delta\varepsilon$ a Δe na $\Delta\bar{\sigma}_{ef}$, které lze ze změřených hodnot vypočítat.

Oedometrický modul přetvárnosti E_{oed} :

$$E_{oed} = \Delta\sigma_{ef} / \Delta\varepsilon \quad (4),$$

$\Delta\sigma_{ef}$... změna efektivního napětí,

$\Delta\varepsilon$ změna přetvoření.

Přetvoření ε_v :

$$\varepsilon_v = -\Delta h / h_0 \quad (5),$$

Δh změna výšky,

h_0 počáteční výška.

index stlačitelnosti C_c :

$$C_c = -\Delta e / \Delta \log \bar{\sigma}_{ef} \quad (6),$$

Δe změna čísla pórovitosti,

$\Delta \log \bar{\sigma}_{ef}$ změna dekadického logaritmu efektivního napětí.

3.3 Metodika oedometrických zkoušek prosedavosti

Při určování prosedavosti zeminy pomocí oedometru se využívá dvou základních metod. Při neznalosti pracovního napětí stavebního objektu v dané lokalitě je vhodné využití metody dvou křivek (Jennings a Knight 1957). V opačném případě lze použít metodu založenou na zalití vzorku při zvoleném vertikálním napětí $\bar{\sigma}_v$.

Metodou dvou křivek se prosedavost stanovuje jako rozdíl křivek stlačitelnosti pro daný vzorek. Při této metodě se zkoušce podrobují dva stejné vzorky zeminy. Jeden vzorek je nesaturován a jeho vlhkost by měla být identická jako v místě odběru. Druhý vzorek se zalévá vodou při určitém vertikálním napětí $\bar{\sigma}_v$. Poté se výsledná křivka saturovaného vzorku posune tak, aby byla totožná s křivkou nesaturovaného vzorku v bodě pro geostatické napětí.

3.4 Průběh oedometrické zkoušky – Metoda dvou křivek

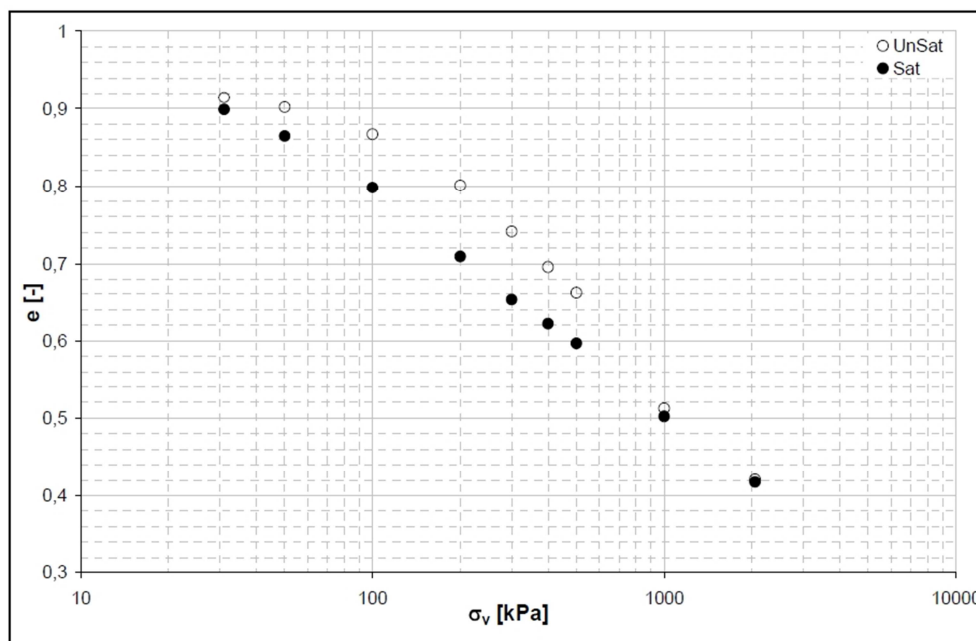
Před zahájením zkoušky dochází k počátečnímu měření, tj. vážení vzorku s prstencem, měření počáteční výšky vzorku před a po osazení do přístroje.

Vzorek se opatří propustnou filtrační destičkou na horní a dolní podstavě a je uložen do oedometru. První nesaturovaný vzorek si zachovává svoji vlhkost a stupeň nasycení. Dochází k jeho rekonsolidaci na hodnotu geostatického napětí odpovídající hloubce místa odběru. Následně dochází k vyvozování napětí v jednotlivých krocích. Druhý vzorek se též rekonsoliduje na hodnotu geostatického napětí a je při tomto napětí zalit vodou. Poté dochází k podrobení stejným zatěžovacím krokům jako bylo u vzorku nesaturovaného. Při každém zatěžovacím stupni je měřeno sedání vzorku tj. změna výšky vzorku v čase. Po ukončení zkoušky ($\bar{\sigma}_v = 0$ kPa) se změří výška vzorku, vzorek je zvážen, stanoví se hmotnost a hmotnost sušiny, číslo pórovitosti e a vlhkost vzorku.

Beneda (2009) provedl oedometrické zkoušky prosedavosti na neporušených vzorcích spraše odebraných z boční stěny výkopové rýhy v obci Noutice z hloubky 1,5 m. Při stanovení prosedavosti použil metodu dvou křivek. Saturovaný a nesaturovaný rekonsolidoval při $\bar{\sigma}_v = 31$ kPa (napětí odpovídající geostatickému napětí v místě odebrání vzorku). Posléze došlo k podrobení vzorků následujícím přitěžovacím krokům: A: 31 → 50 kPa, B: 50 → 100 kPa, C: 100 → 200 kPa, D: 200 → 300 kPa, E: 300 → 400 kPa, F: 400 → 500 kPa, G: 500 → 1000 kPa, H: 1000 → 2050 kPa, I: 2050 → 3100 kPa a J: 3100 → 0 kPa. Každý zatěžovací stupeň ponechal působit až do skončení primární konsolidace vzorku zeminy (24hodin). Po ukončení oedometrické zkoušky vypočítal číslo pórovitosti e podle rovnice:

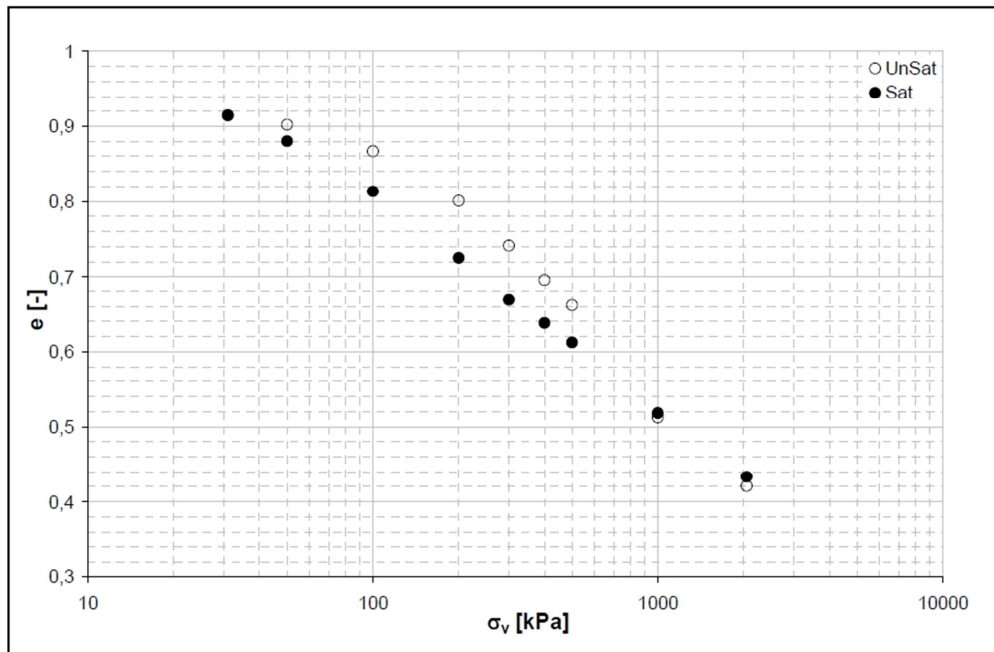
$$e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d (7),$$

kde ρ_s je hustota pevných částí skeletu a ρ_d je objemová hmotnost suché zeminy. Pro zkoušený vzorek zeminy pracoval s hodnotou $\rho_s = 2,717 \text{ g.cm}^{-3}$. Z výsledných čísel pórovitosti a znalosti vertikálního napětí bylo možno vynést křivku stlačitelnosti.



Obr. 5. Metoda dvou křivek pro vzorek spraše (Beneda 2009).

Rozdíl v poloze čísel pórovitosti při geostatickém napětí při této metodě přisuzuje Beneda odlehčení vzorku a jeho porušení při odběru (Jennings a Knight 1957). Na grafu metody dvou křivek není interpretován zatěžovací stupeň I: 2050 → 3100 kPa a J: 3100 → 0 kPa. Při zkoušce došlo k sednutí ramene oedometru na čep a to znemožnilo dokončení zkoušky. Po vyhodnocení se posune křivka saturovaného vzorku do společného bodu pro geostatické napětí s křivkou nesaturovaného vzorku .



Obr. 6. Ztotožnění křivky saturovaného vzorku do společného bodu geostatického napětí s křivkou nesaturovaného vzorku (Beneda 2009).

Prosedavost byla stanovena v souladu s normou ASTM pomocí součinitele kolapsu I_c dle rovnice 1 a 2. Beneda došel k závěru, že vzorek spraše je mírně prosedavý. Součinitel kolapsu I_c činil 4,2 %.

4. SPRAŠ

Spraše jsou na světě jedním z nejdiskutovanějších útvarů vůbec. Jsou předmětem mnoha vědních oborů, přičemž mnoho názorů ohledně tohoto sedimentu si vzájemně protiřečí. Evropská literatura se zaměřuje spíše na studium stratigrafie spraší, přičemž studie z USA a Ruska se zabývají problematikou geneze, litologie a v neposledním případě zasahují do oboru inženýrské geologie.

Spraše jsou sedimenty s velkým plošným rozšířením. Sergejev (1976 v Šajgalík a Modlitba 1983) reprezentuje plošný rozsah hodnotou 13 milionů km². Jejich výskyt je patrný na všech kontinentech, nejvíce jsou však zastoupeny v Asii, Evropě a Americe. Za severní hranici spraše v Evropě je pokládána linie přibližně 62° severní šířky. Spraše jsou zde vytyčeny pásmem táhnoucím se ze severní a střední Francie směrem přes střední Evropu do Maďarska, Rumunska a Ukrajiny. V Asii se spraše vyskytují ještě severněji a jejich jižní hranici tvoří rovnoběžka 28° severní šířky. V Severní Americe se spraše vyskytují především v oblasti údolí řek Mississippi a Missouri a v oblastech ležících východně od Skalistých hor. Mimo tato hlavní sprašová území se dále vyskytují pouze ostrůvky spraše.

Z geografického hlediska je patrné, že spraše zaujímají především oblasti mírného pásu. Na jižní polokouli je největší oblast výskytu lokalizována na jihu Argentiny.

Spraš je sediment tvořený eolickým prachem a je charakteristický světle žlutým až žlutohnědým zbarvením, které způsobuje přítomnost sloučenin železa a uhličitanu vápenatého. Spraše jsou tvořeny zrnky s převládající frakcí od 0,002 mm do 0,063 mm (prach). Z hlediska minerálního složení převládá křemen, živce a karbonáty. Malé procento je tvořeno jílovými minerály, jejichž frakce je menší než 0,01 mm, slídkami a těžkými minerály. Další příměsovou frakcí jsou písčité částice o rozměru 0,5–2 mm. Flint (1971 v Krystková 1974) uvádí, že z 40 váhových % je sediment tvořen uhličitánem vápenatým, přičemž vápnitost spraší není závislá na geologickém podkladu. Složení je u spraší proměnlivé, jelikož se musí brát v úvahu původ mateční horniny a přítomnost zvětrávacích procesů působících na sediment.

Mezi typické vlastnosti spraší řadíme jejich vysokou pórovitost a sloupcovitou odlučnost. Spraše jsou schopny tvořit téměř svislé srázy bez výrazného zvrstvení. V suchém stavu je spraš výrazně drolivá a po zvlhčení se chová plasticky.

Horniny spraší podobné, které postrádají některé z výše uvedených znaků spraše, se pokládají za sprašové zeminy. Odvápněné spraše jsou nazývány jako prachovice (Kadlec ústní sdělení 2010).

4.1 Geneze spraší a problémy definice

První zmínky o výzkumu spraše sahají do 19. století (Šajgalík a Modlitba 1983), kdy se tento sediment stal předmětem výzkumu zásluhou Charlese Lyella. Právě tento geolog vyslovil poprvé termín spraš, který použil v roce 1834 ve své publikaci o spraších v údolí řeky Rýn. Lyell byl přesvědčen, že spraše jsou fluvialní sedimenty a vyslovil tvrzení: „Je nepochybnou pravdou, že v každé krajině ve všech geologických obdobích ukládaly řeky jemnou hlínu na zaplavených nížinách“. Poukázal na zásadní úlohu ledovce při tvorbě spraší, dále však nerozebral všechny faktory při přemísťování spraší.

Další hypotéza původu spraše jasně poukazovala na eolický původ (Richthofen 1877 v Šajgalík a Modlitba 1983). Tato teorie byla přejata dalšími evropskými státy a začala se aplikovat.

Chamberlin (1897 v Šajgalík a Modlitba 1983) naopak popřel předchozí tvrzení a původ spraší označil za glacienní. Toto tvrzení bylo dalším zvratem ve studii původu spraší a následně se objevovaly teorie, které si značně protřečily. Např. Keilhack (1920 v Šajgalík a Modlitba 1983) se domníval, že sprašový materiál je charakteru mimozemského. Vznikla tak teorie o kosmické spraši.

Počátkem 60. let se ve střední a západní Evropě ujímá eolická hypotéza vzniku spraše (Šajgalík a Modlitba 1983). Tato teorie je však znovu vyvrácena Bondarčukem (1961 v Šajgalík a Modlitba 1983), který byl názoru, že v období pleistocénu nebyly vhodné podmínky pro činnost větru. Zastával názor, že v ledovcovém období panovaly silně niveální vlhké podmínky a ledovce pokrývaly široké plochy, přičemž bylo znemožněno působení eolického zvětrávání na horniny. Tavné vody ledovce v periglaciálních oblastech zaujímaly velké plochy, kde též nebyly vhodné podmínky pro činnost větru. Bondarčuk (1961 v Šajgalík a Modlitba 1983) je tudíž zastáncem aluviální hypotézy vzniku spraší.

K současné teorii se blížil Maruszczak (1967 v Šajgalík a Modlitba 1983), který byl názoru, že sprašový materiál na území České republiky, Polska a severního Maďarska se tvořil v periglaciálních podmínkách vlivem mrazového drcení a zvětrávání, přičemž sběrné oblasti a oblasti usazování se navzájem prolínaly. Maruszczak (1967 v Šajgalík a Modlitba 1983) předpokládal transport východními větry, to ale bylo odmítnuto Minkovem (1968 v Šajgalík a Modlitba 1983), který předpokládal působení západních větrů. Doklad působení západního proudění je jasně patrný na území ČR, kdy spraše zakrývají východní svahy říčních údolí (Kadlec ústní sdělení 2010).

V roce 1971 se konalo v Budapešti symposium komise INQUA (International Union for Quaternary Research) řešící problematiku spraší ve střední a východní Evropě, kde byly shrnuty dosavadní výzkumy a dán další směr výzkumu spraší především z hlediska geotechniky. Na tento směr výzkumu navázal Sergejev (1976 v Šajgalík a Modlitba 1983), který řešil otázku geneze spraší ve spojitosti s jejími geotechnickými vlastnostmi. Zastával názor, že fyzikální a mechanické vlastnosti tohoto sedimentu jsou závislé na jeho genezi. Definici spraší zakládá na jejich zásadní vlastnosti – prosedavosti. Sergejev (1976 v Šajgalík a Modlitba 1983) tvrdil, že spraš se „obává vody“, a tudíž nemůže mít polygenetický původ. Je též názoru, že jsou-li všechny spraše prosedavé a shodné z morfologického hlediska, mají monogenetický původ.

Ložek (1973 v Krystková 1974) zaujímá podstatně komplikovanější stanovisko týkající se vzniku spraší a tvrdí, že proces vzniku spraší je velmi složitý a skládá se ze dvou procesů – eolický přenos a zesprašení. Eolický přenos podmiňuje vytržení zrn a určuje tvar nakupenin a úložné poměry. Zesprašení je pochod, který určuje spraši její charakteristickou skladbu, formu sloučenin železa, vápnitost, makropórovitost a paleontologický obsah. Spraš je tudíž nejen sedimentem, ale zároveň i půdou, která se tvoří souběžně s usazováním prachu. Proto je dle Ložka (1973 v Krystková 1974) nutno rozlišovat spraš pravou (eolickou) a sprašové zeminy, jejichž způsob přenosu a usazení je jiný. Ložek (1973 v Krystková 1974) je toho názoru, že pro vznik spraší je potřeba deflační plochy bez výraznějšího porostu a příznivých podmínek pro sedimentaci. Tyto deflační plochy jsou situovány především do oblasti pouští, ale i jiných míst, kde došlo k akumulaci prachového materiálu a následného vyvátí jemných částíček větrem.

Jak je vidět, názorů na genezi a původ sedimentu je nespočetně. Ve výše uvedeném textu jsou shrnuta zajímavá a zásadní tvrzení o genezi, počínaje mimozemskou hypotézou vzniku spraší a konče hypotézou fluvialní a eolickou. V České republice je běžně přijímaný model Ložka (1973 v Krystková 1974).

Z uvedených tvrzení o genezi spraše vyplývá, že definovat tento sediment je poměrně obtížné. Z vývojem výzkumu přicházejí stále nové teorie, které mnohdy rezolutně odmítají předešlé teorie. Zatímco představy o genezi spraše se mezi jednotlivými autory často velmi liší, názory z hlediska mineralogického složení, fyzikálních vlastností, strukturních a texturních znaků jsou velmi blízké. INQUA v roce 1974 přišla s návrhem pracovní definice, aby výzkum spraší postoupil kupředu a mohly se vyhotovit geologické mapy rozšíření spraší v Evropě. INQUA charakterizovala spraš jako poměrně suchý nevrstevnatý sediment žluté až žlutohnědé barvy s kapilární pórovitostí a primární vápnitostí. Převládající zrnitostní složení se pohybuje v rozmezí 20 - 50 μm .

Flint (1971 v Krystková 1974) označil spraš za nevrstevnatý, nezpevněný sediment, tvořený převážně siltovými částicemi (0,002– 0,063 mm) s akcesorickým zastoupením jílu a písku. Spraš je podle Flinta extrémně porézní (dosahuje hodnoty až 50%) a je navátá větrem. Barvu charakterizoval jako žlutou, oranžovou až hnědou, v závislosti na obsahu oxidů železa. Spraš označil za jeden z nejvýznamnějších pleistocenních sedimentů.

Ložek (1973 v Krystková 1974) pojednával o spraši jako o zemině tvořené převážně prachem (0,002– 0,063 mm) s nízkým podílem jílu a písku. Spraš se vyznačuje okrově hnědou až světle žlutou barvou, která je ovlivněna obsahem sloučenin železa a uhličitanu vápenatého. Spraše jsou nevrstevnaté a mají svíslou hrubě hranolovitou odlučnost. Materiál spraší byl transportován větrem.

4.2 Faktory ovlivňující prosedání spraší

4.2.1 Vnitřní faktory ovlivňující prosedavost spraší

Největší náchylnost ke kolapsu vykazují spraše eolického původu sedimentované v období suchého klimatu. Existují též spraše, které nejsou jednoznačně eolické geneze, a přesto disponují prosedavostí. Schopnost prosedat se utvořila v postsedimentačních procesech a tudíž není možné prosedavost přisuzovat pouze genezi spraše (Lysenko 1972 v Šajgalík a Modlitba 1983).

Geomorfologická pozice je jedním z prvních vnitřních faktorů ovlivňujícím náchylnost spraší k prosedání, přičemž spraše vyskytující se v oblasti rozvodí a vyšších teras vykazují větší potenciál k prosednutí, nežli spraše vyskytující se v oblasti údolí. Schopnost prosedat klesá v horských oblastech se stoupající nadmořskou výškou. Svou roli hraje též sklon svahu v souvislosti s odtokem srážkových vod (Šajgalík a Modlitba 1983).

Hloubka sprašového souvrství do jisté míry prosedavost ovlivňuje. V Podunajské nížině bylo zjištěno, že spodnější vrstvy souvrství jsou zpravidla méně prosedavé, a to z důvodu vyšší vlhkosti, vyššího obsahu jílových částic a vyššího stupně ulehlosti (Šajgalík a Modlitba 1983). Bereme-li v potaz, že oblast Podunajské nížiny spadá do oblasti sprašového pásma tahnoucího se z Normandie po Ukrajinu, můžeme tento faktor uplatnit i v České republice.

Zrnitost spraší je z hlediska prosedavosti důležitou vlastností. Vazby působící mezi prachovými zrny jsou evidentně slabší než vazby působící mezi agregáty jílu. Je tedy zjevné, že v případě nasycení dojde k rozrušení vazeb mezi prachovými zrny podstatně rychleji a snáze. Tudíž přítomnost většího obsahu jílovité a pískové frakce zpomaluje proces prosedání.

Pórovitost spraší je pro proces prosedání velice důležitá. Proces prosedání vypukne pouze za vysokých pórovitostí (nad 45%), přičemž po prosednutí se pórovitost snižuje o 5 – 10 % (Lysenko 1972 v Šajgalík a Modlitba 1983). Maslov a Kotov (1971 v Šajgalík a Modlitba 1983) rozlišují 5 stupňů prosedavosti spraší na základě pórovitosti a ke každému stupni prosedavosti přiřazují orientační modul prosedavosti M_{pr} , který definuje deformaci (mm) vrstvy o mocnosti 1 m při daném napětí. M_{pr} lze orientačně určit pro spraše s pórovitostí nad 45% a přirozenou vlhkostí 4 - 9 % ze vztahu:

$$M_{pr} = 15 * (n - 45) + 10 \quad (8),$$

kde M_{pr} je modul prosedavosti a n (%) je pórovitost.

Tab. 2. Závislost stupně prosedavosti spraší na pórovitosti (Maslov a Kotov 1971 v Šajgalík a Modlitba 1983).

Stupeň prosedavosti spraší	Pórovitost n (%)	Modul prosedavosti M_{pr} (mm/m)
Neprosedavé	< 40	0
Slabě prosedavé	40 – 45	10
Prosedavé	45 – 50	50
Silně prosedavé	50 – 55	100
Velmi silně prosedavé	> 55	> 100

Prosedavé spraše se vyznačují nízkou přirozenou vlhkostí (cca 10%). Se snižováním přirozené vlhkosti se u spraší projevuje tendence stoupající prosedavosti. Při opačném procesu naopak dochází ke snížení náchylnosti k prosednutí.

4.2.2 Vnější faktory ovlivňující prosedavost spraší

Vlastní proces prosednutí nastává při překročení pevnosti soudržnosti vazeb mezi jednotlivými zrny. To zapříčiní proces zhroucení metastabilní struktury a vyvolá se proces prosedání. Je tedy zapotřebí přesáhnout kritickou hodnotu smykového napětí, která je vyvolána hmotností nadloží a vnějším přitížením.

Výskyt podzemní vody je jedním ze zásadních faktorů. Spraše situované v dosahu kapilární vzlínivosti z hladiny podzemní vody, a tudíž nasycené, jsou neprosedavé. V případě, že se hladina podzemní vody vytvoří až po uložení nadložních spraší, dojde vlivem kapilární vzlínivosti k prosednutí spraší do výšky 1,5 - 3,5 m nad hladinou podzemní vody a dále se jeví jako neprosedavé (Šajgalík a Modlitba 1983).

Za další faktor Mustafajev (1978 v Šajgalík a Modlitba 1983) označuje infiltrační proudění, které se projevuje v místech předpokladu velké plošné infiltrace, a to především u hydrotechnických staveb. Nejintenzivnější prosedání nastává v okamžiku nástupu infiltrace. Poté dochází ke zmenšování míry deformace vlivem nasycení zeminy a přechodu do stabilního stavu.

4.3 Spraše v České republice

Spraše České republiky jsou součástí pásma tahnoucího se z Normandie přes střední Evropu dále do Maďarska, Rumunska a na Ukrajinu. Spraše se ve střední Evropě vyskytují v nižších polohách s teplejším a suchým klimatem. Pelíšek (1972 v Krystková 1974) tvrdí, že výškový limit rozšíření spraší u nás je 100 - 300 m.n.m. Horní hranice dle Macouna (1961 v Krystková 1974) činí na Ostravsku pouze 200 m.n.m. Ve vyšších polohách se vyskytují pouze prachové hlíny (prachovice). Lokálním zdrojem prachu pro tvorbu spraše je Kladensko (opukový prach a písek) a Hradec Králové (prach a písek z labských teras). Vzdálenějším zdrojem prachu je lokalita v podhůří Alp, kde je výskyt glaciofluviálních sedimentů a dále lokalita sedimentů kontinentálního zalednění na severní Moravě (Kadlec ústní sdělení 2010). Spraše zakrývají východní svahy říčních údolí, což je dáno směrem proudění větru ze západu.

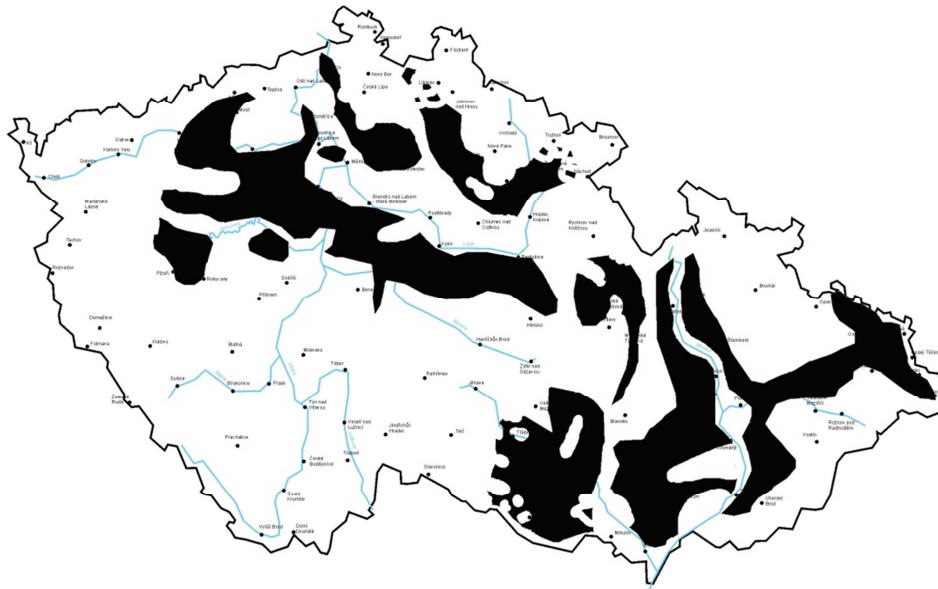
Pelíšek (1972 v Krystková 1974) pro spraše České republiky uvádí pro frakci 0,01 - 2,00 mm následující složení: křemen 32 - 48%, živce 6 - 14%, slídy (muskovit a biotit) 4 - 10%, těžké minerály 1 - 5 %. Z jílových minerálů jsou zastoupeny illit a montmorillonit. Obsah karbonátů spraší kolísá a pohybuje se v rozmezí 3 - 18%. Na bázi sprašových vrstev je materiál hrubšího charakteru a disponuje nižším obsahem uhličitanu vápenatého, oproti tomu svrchnější části vykazují jemnější zrnitost a zároveň vyšší obsah uhličitanu vápenatého.

Macoun (1961 v Krystková 1974) vyčlenil pro naše území základní dvě oblasti výskytu spraší, a to sprašovou oblast středočeskou (vnitročeskou) a sprašovou oblast moravských úvalů.

Sprašová oblast středočeská kopíruje levý břeh řeky Labe a směřuje dále přes dolní Povltaví okolo západního a jižního okraje Českého středohoří a zasahuje k úpatí Krušných hor. Samostatně jsou vyčleněny spraše v okolí Plzně a sprašové oblasti v okolí Berouna jsou výběžky sprašové oblasti Středočeska. Sprašové lokality pravého břehu Labe jsou menšího rozsahu a méně souvislé, výjimku však tvoří spraše na Hradecku.

Sprašová oblast moravských úvalů se rozpadá na více celků. Za hlavní zónu považujeme pásmo jihovýchodního okraje Českého masívu směřující přes Brno až k pravému břehu řeky Moravy a k Hané. Dále mnoho sprašových okrsků kryje svahy jihomoravských pahorkatin od úpatí Pavlovských vrchů až na jihovýchodní svahy Chřibů. Na východním břehu Moravy mezi Přerovem a Strážnicí jsou též patrné lemy spraší. Jihovýchodní okraj Českomoravské vysočiny je též pokryt nesouvislou řadou

spraší. V oblasti Přerova navazuje sprašová oblas moravských úvalů na sprašovou oblast Ostravy. Obr. 7 vymezuje hlavní lokality výskytu spraší v ČR.



Obr.7. Hlavní výskyt spraší v ČR je vyznačen černou barvou.

4.4 Prosedání spraší v ČR

Spraše se právě pro svou možnou prosedavost zpravidla řadí mezi obávané a nespolehlivé základové půdy. V případě nasycení vodou vykazují náhlá a značná sednutí pouze v místě promáčení. Prosedavost spraše způsobuje značné deformace na vystavěných objektech náhlým nadměrným a nerovnoměrným sedáním. Příčinou nasycení může být porucha či opotřebení vodovodního nebo kanalizačního potrubí, změna hydrologického režimu podzemních vod či vlhkostního režimu sprašových souvrství a jiné příčiny.

V minulosti došlo na Zelném trhu v Brně ke zřícení dvou vícepatrových domů a k popraskání budovy Moravského muzea. Mocnost spraší zde dosahuje až 20 metrů a příčinou zavlážení byla unikající voda z cisterny (Záruba a Mencl 1974).

Prosedavost spraší je ovlivněna mnoha faktory. Nebezpečí prosedavosti spraší se od místa k místu mění, a je tedy potřeba cíleně sbírat regionální zkušenosti. Prosedavost spraše je velmi proměnlivá. Např. ostravská sprašová oblast je známa jako bezpečná z hlediska zakládání staveb. Oproti Ostravsku se na Brněnsku v oblasti Kraví hory vyskytují spraše, kde riziko prosednutí je mnohem větší, a v minulosti zde došlo k porušení některých rodinných domů (Záruba a Mencl 1974). Paradoxem je, že ve vzdálenosti 3 kilometrů od Kraví Hory se nacházejí spraše naváté z neogenních slínů a ty vykazují poměrně příznivé vlastnosti po zakládání staveb, neboť mají poměrně velký obsah jílových částic, a proto i méně prosedavý charakter. Je tedy patrné, že místní poměry jsou z hlediska prosedavosti velmi důležité. Je třeba vzít v úvahu, zda jednotlivé horizonty tvořily původní povrch a zda byly vystaveny zvětrávání či účinkům povrchových vod.

4.4.1 Lokalita Noutice

Beneda (2009) prováděl výzkum na spraších katastrálního území obce Noutice za účelem stanovení prosedavosti těchto zemin. Studované území je pokryto kvarténními sedimenty, které vyplňují předkvarténní deprese. Mocnost kvarténních pokryvů je místy až 10 m. V území však převažují eolické kvarténní sedimenty - spraše.

Vyhodnocení zkoušek prosedavosti bylo provedeno pro dva vzorky spraše (N - 1 a N - 2). Oba vzorky byly odebrány z hloubky 1,5 m jako neporušené. Beneda (2009) zatřídil zeminu v souladu s normou ČSN 73 1001 (ČSN 1987) jako jemnozrnnou třídy F6, jíl se střední plasticitou CI s tuhou až pevnou konzistencí.

Po dokončení zkoušek byl vypočten součinitel kolapsu I_e , který vykazoval hodnotu 4,2 % pro oba testované vzorky (N - 1 a N - 2). Dle normy ČSN 73 1001 (ČSN 1987) jsou spraše označeny za prosedavé, avšak podle normy ASTM (ASTM 2003) nevykazují silnější náchylnost k prosednutí a oba vzorky jsou vyhodnoceny pouze jako mírně prosedavé.

4.4.2 Lokalita Průhonský háj v Praze 6 - Nebušicích

Boháč a Feda (1994) vypracovali posudek výsledků předběžného inženýrskogeologického průzkumu v souvislosti s výstavbou rodinných domů a mezinárodní školy v povodí Nebušického potoka. V lokalitě bylo nutno ověřit vliv přístupu dešťové vody do podloží a zhodnotit případná rizika týkající se stability základů pro navrhnuté stavební objekty.

Mocnost pokryvu spraší v zájmovém území se pohybuje v rozhraní od 1,4 do 11,6 m, přičemž výstavba objektů proběhla na spraších o mocnostech 5 - 10 m. Spraše v lokalitě jsou jmenovitě písčité se silnou vápnitostí.

Boháč a Feda (1994) došli k závěru, že spraše Průhonského háje nelze označit za prosedavé. Prosedavost spraší disponuje souvztažností ke stupni nasycení S_r , vlhkosti w , pórovitosti n a napětí, která se v tomto případě neprojevila (Feda 1988). A to přesto, že vysoký obsah uhličitánu vápenatého naznačuje, že spraš je v původním uložení a mohla by projevit sklon k prosedání.

Pórovitost spraše před zkouškou se u třech odebraných vzorků pohybovala v rozmezí 30,8 - 42,4 % (Boháč a Feda 1994). Maslov a Kotov (1971 v Šajgalík a Modlitba 1983) rozlišili na základě pórovitosti spraše pět stupňů prosedavosti, přičemž většina odebraných vzorků v souladu s touto teorií se jeví jako neprosedavé, či vykazují slabou prosedavost.

4.4.3 Lokalita spraší v oblasti Kolína

Nejrozsáhlejší sprašové sedimenty v oblasti Kolína zaujímají pozici na levém břehu Labe mezi Kolínem, Ratboř a Sedlcem u Kutné Hory, kde tvoří souvislou pokryvnou plochu reliéfu Kolínské plošiny. Mocnost spraší je v zájmovém území velice proměnlivá, protože sprašový pokryv vyrovnává nerovný povrch území, přičemž zjištěná mocnost spraše se pohybuje v rozmezí od 1,3 až do 29,5 m (Lochmann 2002).

Spraše jsou makroskopicky velmi obtížně rozlišitelné od sprašových hlín vzniklých vyluhováním uhličitánu vápenatého. Dále disponují vertikální odlučností, jsou nevrstevnaté a často hrudkovitě rozpadavé. Ve spodních částech obsahují větší množství jílu a v oblastech terasových sedimentů jsou písčitéjší.

Ze studovaného území bylo vyčleněno 10 lokalit rovnoměrně rozmístěných po celém území s výskytem spraše, přičemž ze 107 odebraných vzorků spadalo 75% do třídy jemnozrnných zemin se

symbolsy CL a CI, tj. jíly s nízkou a střední plasticitou. Spraše v daném území vykazují pórovitost v rozhraní 30,3 - 49,3 % a přirozenou vlhkost v rozmezí 8,3 - 32,3 %. Je tedy zřejmé, že v oblasti Kolína nebudou spraše vykazovat náchylnost k prosednutí. Z průzkumných vrtů uskutečněných ve sledované oblasti pouze ve dvou případech v hloubce 3 m byla zjištěna spraš s kritickými parametry pórovitosti a vlhkosti (Lochmann 2002).

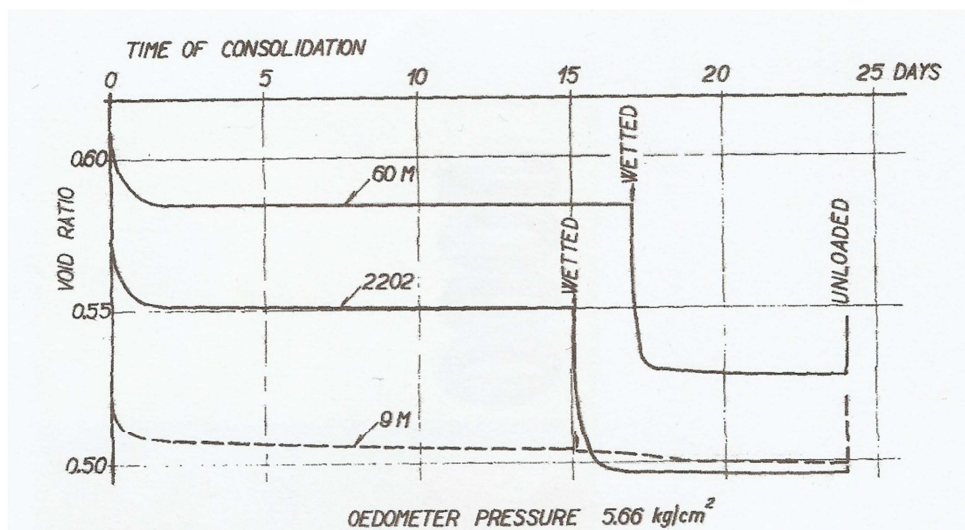
4.4.4 Lokalita spraší Praha - Dejvice

Feda (1966) se zabýval výzkumem prosedavosti dejvických spraší. V zájmovém území identifikoval tři sprašová souvrství, z nichž nejstarší vrstva je tvořena písčitou sprašovou hlínou hnědé barvy bez obsahu uhličitanu vápenatého s příměsí kamenitého materiálu uloženého soliflukcí. Druhá a první vrstva reprezentuje typickou spraš s velmi pórovitou strukturou a obsahem uhličitanu vápenatého. Tyto dvě vrstvy jsou od sebe odděleny tenkou vrstvou jílovitého štěrku.

Dejvické spraše pokrývají místní ordovické podloží a vyskytují se v mocnostech 2,5 - 4,85 m (Záruba 1948 v Feda 1966). Hladina podzemní vody byla zjištěna v rozmezí 10,7 - 14,3 m (Záruba a kol. 1959 v Feda 1966).

Ze dvou vrtů umístěných na okraji základové jámy došlo z hloubky 2,5 m k odběru dvou neporušených vzorků spraše s obsahem CaCO_3 (vzorek 60M a 2202) a jednoho neporušeného vzorku sprašové hlíny (vzorek 9M).

Vzorky byly podrobeny oedometrické zkoušce stlačitelnosti, přičemž vzorky o přirozené vlhkosti se po ukončení konsolidace nasatily vodou při tlaku $5,66 \text{ kg/cm}^2$ (obr. 8). Z grafu vyplývá, že vzorek 9M nevykazoval známky prosedavosti, zatímco u vzorků 60M a 2202 došlo k velmi rychlému a náhlému stlačení.



Obr.8. Kolaps vzorků spraše po zalití při tlaku $5,66 \text{ kg/cm}^2$ ($555,05 \text{ kPa}$) (Feda 1966).

Následující tabulka udává hodnoty koeficientu prosedavosti R a počáteční pórovitosti n_0 . Z definice vyplývá, že hodnoty koeficientu prosedavosti R (%) jsou totožné s hodnotami součinitele kolapsu i_m (%) (kritérium prosedavosti dle ČSN 73 1001).

Tab. 3. Koeficient prosedavosti R a počáteční pórovitost n_0 dekvických spraší (data převzata z Feda 1966)

vzorek	Koeficient prosedavosti R (%)	Pórovitost n_0 (%)
9M	0,32	38,7
60M	3,52	43,5
2202	3,44	41,6

Feda (1966) označil vzorky 60M a 2202 za prosedavé, tedy vzorky s pórovitostí $n_0 > 40\%$ a obsahem CaCO_3 . Je tedy patrné, že náchylnost k prosednutí vykazují spraše s vyšším obsahem CaCO_3 . Na základě koeficientu prosedavosti R lze dle normy ČSN 73 1001(ČSN 1987) označit vzorky 60M a 2202 taktéž za prosedavé, avšak v souladu s teorií Maslova a Kotova (1971 v Šajgalík a Modlitba 1983) jsou pouze slabě prosedavé. Zalití vzorku proběhlo při 555,05 kPa, tudíž nelze určit stupeň prosedavosti v souladu s normou ASTM (ASTM 2003).

5. ELIMINACE PROSEDAVOSTI SPRAŠÍ

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, spraše s metastabilní strukturou jsou s vodou silně problematické základové půdy. Po nasycení vodou vykazují náhlá a značná sednutí vlivem zatížení. Z tohoto důvodu je potřeba přijmout důsledná opatření, která jsou schopna prosedavost celkově odstranit, či ji eliminovat na přijatelnou hodnotu z hlediska budoucího zatížení objektu.

Inženýrský geolog by měl vždy upozornit na nebezpečí prosedavosti a podle okolností se je snažit analyzovat a kvantifikovat stupeň prosedavosti a v případě potřeby navrhnout důslednou ochranu sprašové základové půdy před provlhčením. Při řešení umístění základů stavby na takto problematických zeminách je nutno vycházet z průzkumu možných zdrojů vody, které by mohly negativně ovlivnit základy provlhčením. Mezi tyto zdroje patří především porušené kanalizační potrubí či vodovod, nekvalitní povrchová drenáž povrchových vod, voda unikající z místních zdrojů atd. Možné je i provlhčení vlivem srážkových vod proudících do otevřených stavebních výkopů.

Bylo zjištěno, že určitý vliv na provlhčení spraší zapříčiňuje tepelný tok pod základem stavby. Rozdíl teplot půdy pod centrální částí objektu a okrajovými základy činí 4 - 8 °C. V takovém případě dojde pod objektem k vytvoření kopulovité hladiny podzemní vody a následně dochází k provlhčení základové půdy (Litvinov 1977 v Šajgalík a Modlitba 1983).

Účinek nerovnoměrného sedání lze vyřešit použitím tuhých stavebních konstrukcí s vysokou pevností, případně netuhých konstrukcí, které se svými vlastnostmi přizpůsobí deformaci základové půdy. Je tedy potřeba navrhnout příslušná opatření a vyhnout se negativním vlivům těchto zemin. Mezi hlavní přijímaná opatření patří: vytvoření účinné povrchové drenáže srážkových vod, zabezpečení výkopu proti nahromadění vody, zhotovení izolace zabraňující tepelnému a vlhkostnímu úniku pod základy, vhodné umístění inženýrských sítí, zvýšení pevnosti prvků konstrukce armováním, snížení kontaktní napětí zvětšováním plošných základů atd.

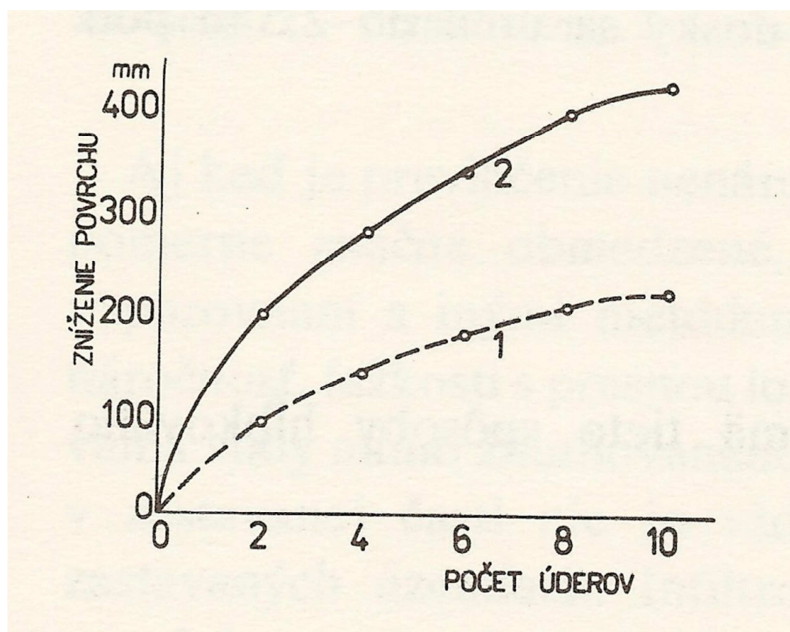
Tato opatření jsou často jen dočasná a snadno vlivem únavy použitého materiálu dochází k poruchám, od nichž se odvíjí provlhčení a kolaps objektu. Proto se přistupuje k radikálnějších postupům, které jsou v některých případech schopny prosedavost zcela odstranit. Mezi nejvíce používané metody patří zhutnění a zpevňování spraší. Základem těchto metod je vytvoření nové hutnější struktury, která nejeví sklony k prosedání, záměrně vyvolaným prosednutím. Zemina se stává pevnější, přičemž se snižuje její stlačitelnost, pórovitost a přechází do více rezistentního stavu proti účinkům vody.

5.1 Zhutnění spraší

5.1.1 Dynamické zhutnění

Jednou ze základních metod zhutnění spraší je aplikace dynamického zhutnění. Používá se v místech, kde mocnost prosedavé vrstvy nepřesahuje 3,5 m. Zhutnění zeminy se provádí ve stavební jámě, kde deska o váze 3000 - 9000 kg zhotovená ze železobetonu padá volným pádem z výšky 5 - 9 m. Při povrchovém zhutnění zůstává vrchní vrstva zeminy nakypřená, což je způsobeno vznikem velkých pružných deformací na kontaktu mezi deskou a zemínou, majících za následek nakypření horní vrstvy. Tento problém je na konci procesu zhutňování odstraněn pouštěním desky z menší výšky (1 - 2 m).

Abelev (1979 v Rybářová 1980) uvádí, že nejefektivnější dynamické zhutnění nastává u zemín, se stupněm nasycení $S_r \leq 0,7$, přičemž hodnotu S_r je zhutněním možné posunout na $S_r = 0,93 - 0,96$. Při vlhkosti, kdy $S_r \geq 0,7$, je výsledek zhutnění malý, se zpravidla dynamické zhutnění nepoužívá. Účinnost výsledného zhutnění závisí na hmotnosti desky, jejím povrchu, výšce pádu a vlhkosti zeminy. Nejvíce efektivní zhutnění se projevuje na zemině s vlhkostí srovnatelnou s vlhkostí na mezi plasticity. Švec (1959 v Šajgalík a Modlitba 1983) dokazuje, že u spraší s vlhkostí mezi 19 - 20% je efekt zhutnění dvojnásobný nežli u spraší s přirozenou vlhkostí 14% (viz obr. 9).



Obr. 9. Závislost snížení povrchu na počtu úderů deskou: 1 - spraš s přirozenou vlhkostí $w_n = 14\%$, 2 - spraš s optimální vlhkostí $w_{opt} = 19 - 20\%$ (Švec 1959 v Šajgalík a Modlitba 1983).

5.1.2 Hloubkové zhutnění promáčením

Metoda zhutňování promáčením je používána v případě, že mocnost vrstvy prosedavé spraše nepřesahuje 15–20 m. Jedná se o nejjednodušší způsob zhutnění, avšak náročný na čas a množství spotřebované vody, který se nehodí do zastavěných oblastí. V zastavěných oblastech je doporučeno dodržet vzdálenost rovnající se minimálně trojnásobku hloubky zhutňované vrstvy (Litvinov 1977 v Šajgalík a Modlitba 1983). Tato metoda je vhodná jako doplňující k některým ostatním metodám, protože sycením se zvyšuje účinek dalších druhů zhutnění.

Je zapotřebí vytvořit systém drenážních vrtů v rastru s rozměry 4x4 - 7x7 m v závislosti na propustnosti spraše. Průměr jednotlivých vrtů se pohybuje okolo 50 - 70 cm. Vrty jsou vyplněny propustným materiálem (písek či drobný štěrk). Hloubka vrtu závisí na chování podloží prosedavé vrstvy. V případě, že podloží prosedavé vrstvy je propustné, je zapotřebí vrty ukončit v hloubce 1,5 - 2,5 m nad bází. V opačném případě dochází k vyvrtání až na podloží. Následně se vrty zavlažují, přičemž voda infiltruje do spraše, která záměrně prosedá.

5.1.3 Hloubkové zhutnění vlivem energie podzemních výbuchů

Tato metoda poskytuje velice efektivní zhutnění spraší. Použitelná je pro sprašové vrstvy o mocnostech vyšší než 10 m. Litvinov (1977 v Šajgalík a Modlitba 1983), zakladatel této metody, tvrdí, že proces zhutnění zeminy je až 10 x rychlejší a až 5 x intenzivnější než ostatní používané metody. Její využití je prý ideální pro zastavěné oblasti, jelikož energie výbuchů je natolik obrovská, že není třeba spraše příliš vlhčit, čímž klesá riziko poškození sousedních budov vlivem promáčení jejich základové půdy.

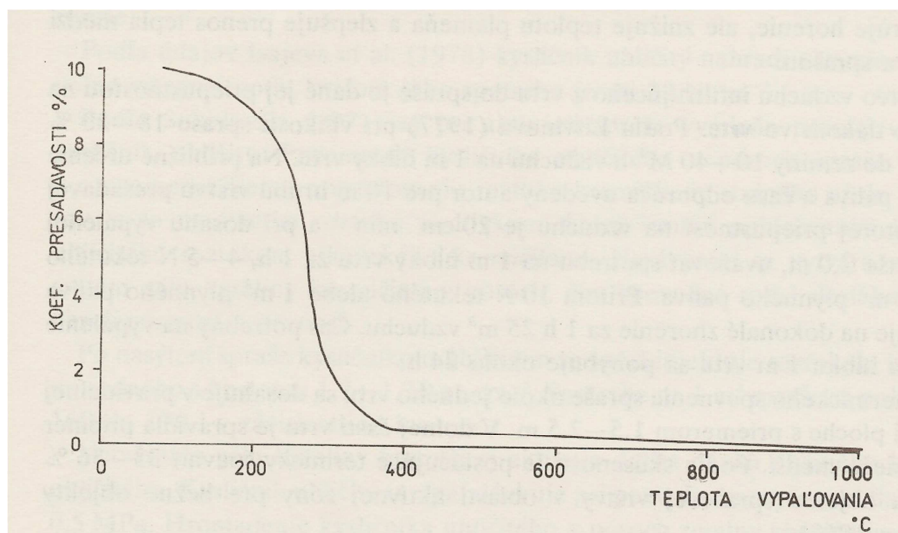
K použití tohoto způsobu je opět nutno vybudovat síť drenážních vrtů o průměru 30 - 70 cm, které sahají až k podloží vrstvy. Následně dochází k sycení spraše do stavu, který bude dostatečně nasycený, přičemž ale nedojde k porušení struktury spraše. Po tomto procesu dochází k odpálení náloží ve speciálních vrtech o průměru 6 - 8 cm. Interval mezi jednotlivými výbuchy činí 1 sekundu, přičemž vzdálenost mezi jednotlivými vrty pro efektivní zhutnění je 4 m. Před odpálením je nutno vrty zasypat hlinitopísčitou či písčitou zeminou. Vlivem silných explozí dochází ke zhutňování spraše. Po zkončení explozí si povrch zhutněné zeminy sedne o 1,5 - 2,5 m. Po třech týdnech dochází ještě k dodatečnému klesnutí povrchu o ¼ původního kolapsu.

5.2 Zpevňování spraší

5.2.1 Termální zpevňování

Výsledkem termálního zpevňování je velmi pevná, málo stačitelná zemina s vysokou rezistencí vůči působení vody. Vlivem působení tepelné energie zemina částečně či úplně ztrácí své přirozené vlastnosti v důsledku ztráty chemicky vázané vody a následných fyzikálně - chemických změn. Vysoká efektivita této metody je však ekonomicky silně nevyhovující a převážně se používá v havarijních případech, kdy je nutno urychleně obnovit bezpečnost objektů.

Za teplot 100 - 200 °C nedochází k výrazným změnám vlastností spraše, které při této teplotě nadále zůstávají silně prosedavé. Z obr. 10 vyplývá, že při zvýšení teploty na 300 - 600 °C začíná metoda být velice efektivní. V důsledku dehydratace ztrácí křemen, jílové minerály a slídy většinu chemicky vázané vody a dochází k razantnímu zpevnění spraše. Po dosažení teploty 1000 °C se barva spraší mění na hnědočervenou a získává velice tvrdou strukturu s vysokou odolností vůči vodě.



Obr. 10. Závislost koeficientu prosedavosti na teplotě výpalu (Litvinov 1977 v Šajgalík a Modlitba 1983).

Litvinov (1977 v Rybářová 1980) vypracoval velmi účinnou a ekonomicky přijatelnou metodu vypalování spraše. Do vrtů o průměru 10 - 20 cm, které jsou pravidelně rozmístěny v síti v oblasti zhutňované zeminy, se vhání palivo (kapalné, plynné či tuhé) a následně dochází k jeho spalování přímo v oblasti zhutňované zeminy, či v místě ústí vrtu, který je termicky uzavřen. Produkty hoření se obohacují chemickými přísadami, které zvyšují produktivitu tepelné přeměny. Ideální teplota výpalu se pohybuje okolo 700 - 1000 °C. Prohřívání probíhá především díky tlakové infiltraci produktů hoření do pórů spraše vlivem přetlaku hořících plynů ve vrtu. Zvýšením přetlaku dosáhneme efektivnějšího výpalu. Teplota spalování se udržuje vháněním určitého množství studeného vzduchu do vrtu. Průměr zóny zpevňované spraše okolo vrtu dosahuje až 2,5 m, přičemž výpal 1m hloubky vrstvy trvá 24 hodin. Průměr zóny při bázi vrtu je o něco menší nežli oblast ve svrchních partiích vrtu. V aktivní zóně objektu zpravidla postačuje zpevnit okolo 35 % plochy a objemu sprašové vrstvy.

5.2.2 Chemické zpevňování

Metoda chemického zpevňování spočívá v injektáži chemického roztoku do prosedavých spraší. Dochází k utvoření pevné struktury s vysokou inertností vůči vodě v důsledku chemické reakce roztoku, či reakce mezi roztokem a zeminou. Jako chemický roztok se nejčastěji používal křemičitan sodný, který reaguje s iontem vápníku za vzniku gelu kyseliny křemičité. Křemičitý gel následně zpevňuje zeminu a dodává jí již zmiňovanou inertnost vůči vodě. Tento způsob zpevňování se označuje jako silikace spraše.

Průměr aktivní zóny okolo injektážních vrtů je závislý na koeficientu filtrace ve vertikálním i horizontálním směru. Ržanicyn (1962 v Rybářová 1980) uvádí, že aktivní zóna okolo vrtu činí 40 - 60 cm v případě, kdy se koeficient filtrace pohybuje v rozmezí $3,4 \cdot 10^{-6} - 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zeminy s koeficientem filtrace $\leq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se aktivní zóna rozšíří o 50 cm. Dále Ržanicyn (1962 v Rybářová 1980) uvádí, že metoda je vhodná pro spraše s přirozenou vlhkostí < 18 - 20 % a koeficientem filtrace v rozmezí $1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Šajgalík a Modlitba (1983) však doporučují pro spraše s vlhkostí > 20 % použít metodu plynové silikace. Před vlastní injektáží roztoku křemičitanu sodného do vrtu dochází k vhánění kysličníku uhličitého s postupně narůstajícím tlakem. Vlivem působení plynu dochází k okyselení fyzikálně vázané vody a zároveň se přetlakem vytlačuje voda z pórů spraše. Sokolovič (1971 v Rybářová 1980)

tvrdí, že při křemičitanové silikaci ztverdne pouze 30 - 50 % roztoku, přičemž při aplikaci plynové silikace lze snížit dávku roztoku až o 40%.

Je třeba si uvědomit, že metody chemického a termálního zpevňování praší jsou několik desítek let staré a otázkou zůstává, zda jsou vzhledem k dnešním ekologickým požadavkům použitelné a do jaké míry.

6. JÍLOVITÉ VÝSYPKOVÉ ZEMINY

Potenciálně prosedavými zeminami antropogenního původu jsou i volně sypaná zemní tělesa. Tato tělesa by mohla být náchylná k prosednutí z důvodu dvojí pórovitosti, částečné nasycenosti a možné otevřené skruktury. Materiál výsypek bývá v povrchové zóně nenasyčený a změny kapilárního sání ovlivňují objemové chování zeminy, přičemž při snížení sání dochází k snížení pevnosti zeminy a zvýšení její stlačitelnosti. Vlivem prosycení dochází ke snížení kapilárního sání a následuje hydrokolaps.

Problém jílovité výsypky se v ČR dotýká oblasti severočeských uhelných dolů. Zásoby hnědého uhlí se vyskytují v hloubce 80 - 200m, přičemž nadloží je tvořeno jílovci, které jsou rozpojovány na hrudky nebo bloky o rozměrech od centimetrů do desítek centimetrů. Rozpojené jílovce jsou následně vyváženy a tvoří tělesa o mocnosti až 100 m (Mašín a kol. 2005 v Herbstová a Herle 2009b). Plošný rozsah těchto výsypek dosahuje téměř 100 km² (Herbstová a kol. 2007). Obr. 11 interpretuje plošný rozsah a umístění výsypek v ČR.



Obr. 11. Rozšíření jílovitých výsypek v ČR znázorněno černou barvou.

Čerstvě vyvezený výsypkový materiál ve formě hrud dosahuje totální pórovitosti n_t 70%. Vysoká hodnota pórovitosti je dvojí pórovitostí. Totální pórovitost je spočítána ze vztahu:

$$n_{tot} = n_i (1 - n_e) + n_e \quad (9)$$

kde n_{tot} je totální pórovitost, n_i je intragranulární pórovitost (póry v hrudkách) a n_e označuje intergranulární pórovitost (póry mezi fragmenty hrudek).

Póry mezi jednotlivými hručkami nejsou vyplněny vodou, zatímco póry v samotných hručkách dosahují přirozené vlhkosti $w = 34\%$. Kapilární sání v makropórech čerstvé výsypky není významné, především vzhledem k jejich velikosti. Významné je však v hručkách, kde působí negativní pórový tlak vzniklý vyjmutím materiálu z prostředí pod hladinou podzemní vody. Následné změny kapilárního sání jsou vázány na kolísání počasí, respektive na změny vlhkostních poměrů. Čerstvě vyvezená výsypka je vysoce propustná, dokud nedojde ke zhroucení struktury výsypky, protože makropóry vytvářejí kanály pro odtok povrchové vody.

Počáteční hručkovitá struktura pomalu degraduje vlivem zatěžování další navezenou vrstvou, kdy v hlubších partiích výsypky zcela ztrácejí makropórovitost. V menších hloubkách jsou změny kapilárního sání hlavní příčinou degradace svrchní vrstvy výsypky. Je tedy zřejmé, že prosedavost jílových výsypek je značně vázána na výšku hladiny podzemní vody a následné vlhkostní změny působící na již vyvezený materiál. Obr. 12 znázorňuje čerstvou výsypku a její stav po 10 letech, kdy došlo k přechodu hrudek do stavu jemnější celistvější hmoty.



Obr.12. Čerstvě vyvezená výsypka (vlevo) a její stav po 10 letech (vpravo) (Herbstová a kol. 2007)

6.1 Laboratorní testy neporušených vzorků

Prosedavost byla zjišťována na neporušených vzorcích odebraných z rekultivované výsypky bývalého dolu 5. května v blízkosti dálnice D8 u Ústí nad Labem. Dálnice křížuje výsypkové zeminy v délce 12 km. Zdejší výsypkový materiál o stáří 40 let je silně homogenizován s velmi nízkým stupněm makropórovitosti.

Vzorky byly odebrány z vrtů o hloubce 15 - 20 m. Hladina podzemní vody byla zastižena pouze v jednom případě, a to v hloubce 2 m pod terénem ve vrtu J801 (AZ 2003 v Boháč a Herbstová 2004). Boháč a Herbstová (2004) označili zeminy jako jíl vysoké plasticity, přičemž průměrná vlhkost na mezi tekutosti $w_L = 59,4\%$, vlhkost na mezi plasticity $w_p = 28,4\%$. Obr. 12 ukazuje hodnoty součinitele kolapsu i_m (%) u jednotlivých dvojic vzorků.

vrt	hloubka [m]	i_m	
		%	
J801	1-1,3	0,9	
	1,7-2	-2,1	
	2,7-3	-0,9	
	4,3-4,6	1,6	
	5-5,3	0,5	
	5,7-6	-1,6	
	6,2-6,5	-0,3	
	8,1-8,4	-1,9	
	9,2-9,5	0,6	
	10,7-11	-1,7	
	11,7-12	4,1	
	13-13,30	0,2	
	J802	0,5-0,8	2,5
1,2-1,5		0,8	
2-2,3		1,1	
3,4-3,7		-2,5	
4,6-4,9		-3,6	
5,5-5,8			
7-7,3		1,9	
7,7-8		-1,3	
9,2-9,5		0,3	
10,2-10,5		0,6	
11,5-11,8		1,2	
12,3-12,6	-2,8		
J803	1,8-2,1	1,1	
	3,5-3,8	0,4	
		-0,9	
	4,7-5	0,5	
	6,7-7	0,5	
	7,6-7,9	-5,6	
	9,6-9,9	1,0	
	10,7-11	-2,1	
	12,5-12,8	0,3	
	13,6-13,9	-0,9	
	14,6-14,9	-1,1	
	79125	13,6	-1,4
		17,6	-1,1
19,6		0,3	
79151	13,2	-0,8	
	18,0	-1,1	
	23,0	-0,4	
	24,5	0,1	
	25,6	0,1	

Obr.13. Součinitele kolapsu i_m (%) jednotlivých dvojic vzorků (upraveno z Boháč a Herbštová 2004).

Vzorky byly podrobeny oedometrickému testu a vyhodnoceny na základě metody dvou křivek. Z 42 dvojic zkoušených vzorků pouze 6 dvojic vykazovalo hodnotu součinitele kolapsu i_m (%) > 1 (kritérium prosedavosti dle ČSN 73 1001). Nejvyšší hodnotu součinitele kolapsu $i_m = 4,1\%$ vykazoval vzorek z hloubky 11,7 - 12m z vrtu J801, kde však byla zjištěna hladina podzemní vody 2 m pod povrchem. Avšak dle normy ASTM (ASTM 2003) jsou pouze 2 dvojice vzorků označeny za mírně prosedavé (Herbštová a kol. 2007).

Z výsledků je patrné, že riziko prosedavosti je velmi nízké, ale je třeba sledovat výšku hladiny podzemní vody, která u výsypkových zemin hraje prvořadou roli z hlediska náchylnosti ke kolapsu.

7. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit náchylnost k prosedavosti zemin na území České republiky. Problematika se vztahuje zejména na spraše, které zaujímají podstatnou část plochy ČR, a jílovité výsypkové zeminy v oblasti Podkrušnohoří.

Kolapsibilita zemin je však ovlivněna mnoha regionálními faktory přírodního, ale i umělého rázu. Tudíž nelze vyčlenit oblast prosedavých a neprosedavých zemin ani v regionálním měřítku, jelikož situace se v závislosti na místních podmínkách může prudce měnit.

Dnes již zrušená česká norma ČSN 73 1001, ale stále využívaná, disponuje poměrně přísným kritériem pro prosedavost. Bylo tedy zapotřebí výsledky jednotlivých zkoušek prosedavosti srovnat s jinými dostupnými kritérii, především normou ASTM a teorií Maslova a Kotova. Norma 73 1001 pouze rozlišuje, zda je, či není zemina prosedavá, a neposkytuje detailnější informace o stupni prosedavosti. Z dostupných výzkumných zpráv bylo zjištěno, že většina spraší na území ČR se dle normy ČSN 73 1001 jeví jako prosedavé. Spraše vykazující náchylnost ke kolapsu však nejsou dramaticky nebezpečné, jelikož ve srovnání s normou ASTM byly označeny maximálně za mírně prosedavé a obdobný závěr lze učinit podle Maslova a Kotova, kteří vycházející z pórovitosti spraše.

Hydrokolaps rekultivované jílovité výsypky se nejevil jako nebezpečný. Pouze ve dvou případech byly vzorky označeny v souladu s normou ASTM za mírně prosedavé. Jak se však ukázalo, i v případě jílovité výsypky, je třeba sledovat lokální podmínky a to zejména výšku hladiny podzemní vody.

Z hlediska bezpečnosti zakládání staveb nehrozí v ČR výrazné nebezpečí, neboť nebyla prokázána výrazná prosedavost. Důležitý je zodpovědný přístup inženýrského geologa, který svým pečlivým výzkumem musí v případě prokázání nebezpečného stupně prosedavosti vyvodit důsledná opatření k zajištění bezpečnosti zakládaných objektů.

7. SEZNAM LITERATURY

- Abelev J. M., 1979. *Osnovy projektovanja i sroitel'stva na prosadočnyh makroporistyh gruntach*. Strojizdat, Moskva
- ASTM, 2003. Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils. ASTM D5333-03
- AZ, 2003. *Závěrečná zpráva o odběru neporušených vzorků zemin v prostoru projektovaného SO 203 dálnice D8. Č. zak. 112/03*. AZ Consult, Ústí nad Labem
- Beneda J., 2009. *Inženýrskogeologická mapa pro obec Lichočeves - Noutice v podrobném měřítku 1:5000 s využitelností pro místní územní plánování*. MS diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Praha, 114 str., 6 příl.
- Boháč J., Fedá J., 1994. *Posouzení výsledků předběžného inženýrskogeologického průzkumu pro lokalitu Průhonský háj v Praze 6 - Nebušicích*. Akademie věd České republiky, Praha, 9 str.
- Boháč J., Herbstová V., 2004. Prosedavost jílovité výsypkové zeminy. In: *32. konference se zahraniční účastí*, Brno, listopad, 2004, str. 82-87.
- Bondarčuk V. G., 1961. Strojénije četvertičnyh (antropogénovyh) otloženij i problemy geologii kvartera Ukrajiny. Četv. Period, Vyp. 13, 14, 15. K VI Kongr. INQUA. Kijev, Izd. AN USSR, str. 25-41.
- ČSN, 1987. ČSN 73 1001. Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy.
- Delage P., Cui Y.J., Antoine P., 2005. Geotechnical Problems related with Loess Deposits in Northern France. In: *Proc. Of Int. Conf. on Problematic Soils*, Cyprus, Vol. II, str. 517-540.
- Fedá J., 1966. Structural stability of subsident loess soil from Praha - Dejvice, *Engineering Geology*, 1(3): 201-219.
- Fedá J., 1988. Collapse of loess upon wetting, *Engineering Geology*, 25: 263-269.
- Flint R. F., 1971. *Glacial and Quarternary Geology*. New York
- Herbstová V., Boháč J., Herle I., 2007. Suction and Collapse of lumpy Spoil-heaps in Northwestern Bohemia. In: T. Schanz (Ed.) *Conf. on Mechanics of Unsaturated Soils in Weimar, Experimental Unsaturated Soil Mech. 112 Springer Proc. in Physics*, str. 293-300.
- Herbstová V., Herle I., 2009a. Vlivy na prosedavost zemin. In: *37. konference se zahraniční účastí*, Brno, říjen, 2009, str. 13-18.
- Herbstová V., Herle I., 2009b. Structure transitions of clay fills in North-Western Bohemia, *Engineering Geology*, 104: 157-166.
- Herle I., Wehr W., Gudehus W., 1998. Influence of macropores on sand behaviour. In: *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 1998, Vol. 1, str. 157-166.
- Chamberlin T. C., 1897. Supplementary Hypothesis Respecting the origin of the Loess of the Mississippi, *Valey Jour. Geol.*, 5: 795-802.
- Jennings J. E., Knight K., 1957. The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on der Lossbildung, *Zeitschr. deutsch. geo. Gesellsch.*, 72: 146-161.
- Krystková L., 1974. *Spraš a jiné váte sediment*. Odborná práce ke kandidátskému minimu, Geologický ústav ČSAV, Praha, 91 str.
- Lamboj L., Štěpánek Z., 2005. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 218 str.

- Litvinov I. M., 1977. *Ukrepnenije i uplotnenije prosadočnych gruntov v žiliščnom i promyšlennom stroitel'stve*. Izd. Budivel'nik, Kijev
- Lochman Z., 2002. Inženýrskogeologické zhodnocení sprašových sedimentů na listu 13-322 Kolín. In: *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2001*. Česká geologická služba, Praha, str. 164-166.
- Ložek V., 1973. *Příroda ve čtvrtohorách*. Academia, Praha
- Lu N., Likos W. J., 2004. *Unsaturated soil mechanics*. J. Wiley & Sons, New Jersey, 256 str.
- Lysenko M., 1972. *Sostav i fizikomechaničeskije svojstva gruntov*. Izd. Nedra, Moskva
- Mackechnie W. R., 1989. General Report / Discussion session 7: Collapsible and swelling soils - Part 1: Collapsible Soils, In: *Proceedings of 12th ICSMFE*, 1989, Vol. 4, str. 2485-2490.
- Macoun J., 1961. *Přehled výsledků geologických výzkumů eolických sedimentů v Československu do r. 1961*. (Rukopis)
- Maruszczak H., 1967. Kierunki wiatrów w okresiv akumulacji lessu mlodszege we wschodniej cześci Europy środkowej, *Rocznik Pol. Tow. Geol.*, 37 (2): 184-188.
- Maslov N. N., Kotov M. F., 1971. *Inženernaja geologija*. Izd. lit. po stroitel'stvu, Moskva
- Mašín D., Herbstová V., Boháč J., 2005. Properties of double porosity clay fills and suitable constitutive models. In: *Proc. 16th Int. Conference ICSMGE*, Osaka (Japan), Vol. 2, str.827-830.
- Minkov M., 1968. *The Loess in North Bulgarien*. Acad. Sci, Sofija, 198 str.
- Mustafajev A. A., 1972. When will the Present Interglacial end?. *Quaternary Research*, 2 (3): 341-349.
- Pelíšek J., 1972. Spraše a sprašové hlíny Československa. *Geol. Pruz.*, 14 (9): 257-260.
- Richthofen F., 1887. *China I*. Berlin
- Rózický S. Z., 1991. *Loess and loess-like deposits*. Ossolineum Publishing House, Wroclaw, 187 str.
- Rybárová P., 1980. *Geotechnické vlastnosti spraší Trnavskej pahorkatiny a ich vplyv na zakladanie stavieb*. MS disertační práce, katedra geotechniky stavební fakulty Slovenské vysoké školy technické, Bratislava, 195 str.
- Ržanicyn B. A., 1962. Zakreplenije i uplotnenije prossadočnych l'ossovyh gruntov. ZB. NIIOPS Zakreplenije gruntov 50, Gosstrojizdat , Moskva, str. 4-9.
- Sergejev E. M., 1976. Genezis l'ossov v svjazi s ich inženerno - geologičeskimi osobennost'ami. *Vest. Mosk. Univ.* 5, str. 3-14.
- Sokolovič V. E., 1971. Novojev chimičeskom zakrepleniji gruntov. Osnovaniija, fundamenty i mech. Gruntov, 2, str. 23-25.
- Šajgalík J., Modlitba I., 1983. *Spraše Podunajskej nížiny a ich vlastnosti*. VEDA ,Bratislava, 242 str.
- Šimek J., Jesenák J., Eichler J., Vaníček I., 1990. *Mechanika zemin*. STNL, Praha, 388 str.
- Švec V. B., 1959. Issledovanije effektivnosti uplotnenija gruntov osnovanij ťažolyimi trambovkami. *Vopr. Stroit. na makroprosadočnych gruntach*, 37, Gosstrojizdat, Moskva, str. 51-67.
- Záruba Q., 1948. *Geologický podklad a Základové Poměry Vnitřní Prahy*. Státní. Geol. Ústav, Praha, 83 str.
- Záruba Q., Myslivec A., Fencel J., 1959. *Zpráva o Geologických a Základových Poměrech na Území Stanoviště Budov Nové Tehchniky v Praze - Dejvicích.*, Internal Rept., Praha, 8 str.

Záruba Q., Mencl V., 1974. *Inženýrská geologie*. 3. Vydání. Academia, Praha, 512 str.