

Náchylnost zemin ve výsypkách povrchových hnědouhelných lomů SHR k vytvoření plastického jádra

Anfälligkeit der Kippenböden in den Braunkohletagebauen des Nordböhmisches Braunkohlereviers für Setzungsfließen

Jan Kurka¹, Pavel Kotva, Miloslav Nechyba²

Abstrakt

Kolem roku 2000 přesahovala úhrnná plocha výsypek v severočeském hnědouhelném revíru 90 km², celkový objem uložených hmot 3,8 miliardy m³. Jen na výsypce Merkur s plochou cca 14 km² bylo uloženo přes 600 miliónů m³ nadložních zemin. Výsypka Obránců míru dosahuje mocnosti až 150 m.

Jako plastické jádro je ve výsypkách povrchových hnědouhelných lomů označována oblast nasycených zemin měkké až kašovitě konzistence, která je obklopena z technického pohledu nepropustnými vrstvami. Ty natolik zpomalují konsolidaci při sypání dalších vrstev do nadloží, že veškeré přetížení se projeví ekvivalentním nárůstem pórových tlaků. Existence plastického jádra je příčinou těch nejrozsáhlejších sesuvů výsypek v revíru. Příspěvek zkoumá podmínky, za kterých se plastické jádro může vytvořit.

Kurzfassung

Als plastischer Kern wird in Tagebauhalden der Bereich gesättigter Bodenschichten mit einer weichen bis breiigen Konsistenz bezeichnet, der von undurchlässigen Schichten umgeben ist. Durch diese wird die Konsolidierung bei der Aufschüttung weiterer überliegender, hangender Schichten verzögert. Diese Zusatzbelastung zeigt sich in einem entsprechenden Anstieg des Porendruckes. Das Vorkommen eines plastischen Kerns ist die Ursache der größten Haldenrutschungen im Revier. In dem Beitrag werden Bedingungen untersucht, unter denen sich ein plastischer Kern herausbilden kann und einige mögliche Berechnungsmethoden werden vorgestellt.

¹AZ Consult, spol. s r.o., Klíšská 12, 40001 Ústí nad Labem, kurka.jan@email.cz

²GEO-TOOLS, z.s., U Mlejniku 128, 25066 Zdiby, miloslav.nechyba@geo-tools.cz

1 Úvod

Nadložní vrstvy v SHR jsou tvořené převážně jemnozrnnými třetihorními jezerními sedimenty. Těžba nadloží sloje probíhá tak, že zemina v původním neporušeném stavu na straně skrývky je rozpojena do úlomků různé velikosti, přepravena na určené místo a uložena na výsypce. Původní objem s mezerovitostí n se zvětší o mezery mezi úlomky. Objemová hmotnost sušiny na skrývce ρ_{ds} klesne na objemovou hmotnost sušiny na výsypce ρ_{dv} kvůli nakypření, přítomnosti mezer m . Zeminám uloženým v podobě úlomků na výsypku se říká zeminy s dvojitou pórovitostí. Protože hustota pevných částic ρ_s se nezmění, vztahy pro výpočty platí stejně, jen je třeba upravit členy:

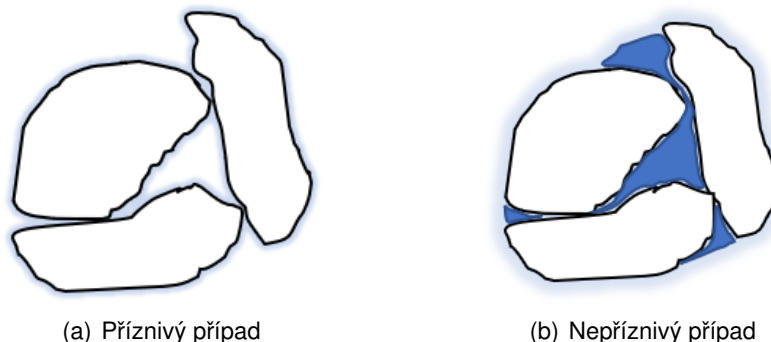
$$n = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ds}}{\rho_s} \right) (\%)$$

$$n + m = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{dv}}{\rho_s} \right) (\%)$$

2 Plastické jádro

Za kombinace nepříznivých okolností se uvnitř výsypky může vytvořit oblast, která je konsolidačně izolovaná od okolí, a ve které jsou mezery vyplněné vodou. Postupnou degradací úlomků dochází k homogenizaci této vrstvy a výsledkem je zemina s měkkou až kašovitou konzistencí. Taková oblast se označuje jako plastické jádro.

Termín „plastické“ znamená konzistenci zemin v dané vrstvě mezi mezí tekutosti a plasticity, tedy při I_C mezi 0 a 1 (což zahrnuje konzistenci kašovitou, měkkou i tuhou). S poklesem I_C se však zvyšuje nebezpečí plynoucí z existence plastického jádra, proto se jako hranice spíše uvažuje I_C mezi 0 (resp. 0,1) a 0,5 (konzistence kašovitá a měkká). S touto hranicí je nadále počítáno. Termín „jádro“ napovídá, že se objekt nalézá uvnitř výsypky. Podmínky pro jeho vznik se však tvoří v době, kdy daná vrstva je čerstvě nasypaná a tvoří dočasný povrch výsypkového tělesa. Teprve později je překryta dalšími vrstvami a jimi je izolována od okolí. Záleží na tom, v jakém stavu se při překrývání a izolaci nachází (obrázek 1).



Obrázek 1: Dva extrémní scénáře pro vznik plastického jádra 1(a) a 1(b).

3 Cíle zkoumání podmínek

Je zřejmé, že plastické jádro nevzniká ve výsypce vždy a automaticky. Naopak je k tomu zapotřebí splnění řady podmínek. Cílem zkoumání bylo po zadání známých vstupních dat stanovit pravděpodobnost (riziko) jeho vzniku. Protože v dalších výpočtech a úvahách nejsou využívány striktně pravděpodobnostní metody, je v hodnocení zkoumaná vlastnost označovaná jako náchylnost. Co je tedy určující:

- typ zemin, v čase se nemění,
 - zemina musí být jemnozrnná, obsah jemných částic f má dolní limit kolem 35%, se zvyšujícím se obsahem jemných částí náchylnost poroste,
 - mez tekutosti, mez plasticity (index plasticity) zemin,
 - hustota pevných částic (víceméně konstanta kolem 2650 až 2750 kg/m³),
- stav zemin, změní se mezi těžbou a uložením a dále se mění v čase,
 - objemová hmotnost sušiny,
 - vlhkost (konzistence) zemin,
 - pórovitost zeminy (n jako vnitřní pórovitost úlomků, m jako mezerovitost mezi úlomky),
 - stupeň nasycení (v zájmu bezpečnosti se předpokládá plná nasycenost),
 - pevnost úlomků,
- doba expozice vrstvy úlomků na povrchu,
- možnost dotace volné vody k plnění mezer mezi úlomky,
- hutnění (pojezdy auty, zakladačem, atp.), není možné obecně předpokládat jakýkoli pozitivní vliv hutnění.

Komentář: S rostoucí pevností úlomků lze předpokládat jak pozitivní (snižující riziko vzniku plastického jádra), tak negativní vlivy (vzniku plastického jádra napomáhající). Při vyšší pevnosti obvykle roste ρ_{ds} a může klesat i n , naopak pevnější úlomky vytvoří větší procento mezer (větší míru nakypření) s delší trvanlivostí a tudíž poskytují delší dobu pro dotaci mezer vodou.

Jednotlivé uvažované parametry jsou úzce provázané, ze vstupů odpovídajících reálným zeminám je tak možné usuzovat na zvyšování nebo snižování rizika s ohledem na reálnost jejich výskytu.

4 Matematické uchopení problému

Jak již bylo uvedeno, předpokládá se, že jsou k dispozici údaje o zrnitostním složení, hustotě pevných částic, váhové vlhkosti a objemové hmotnosti sušiny ρ_{ds} na vstupu (ze skrývkové strany) a konzistenčních mezích. Dále se předpokládá plná nasycenost zeminy ze skrývkové strany. Postup výpočtu logicky sleduje proces těžby a ukládání na výsypce.

Při plné saturaci platí, že

$$S_{rs} = 1 = \frac{(\rho_{ns} - \rho_{ds})}{(\rho_w \cdot n)}$$

odtud

$$n = \frac{\rho_{ds} \cdot w_s}{\rho_w} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ds}}{\rho_s}\right),$$

$$w_s = \frac{100 \cdot \rho_w \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ds}}{\rho_s}\right)}{\rho_s},$$

$$I_{cs} = \frac{(w_L - w_s)}{I_P} = \frac{\left(w_L - \frac{10^5}{\rho_{ds}} + \frac{10^5}{\rho_s}\right)}{I_P},$$

$$w_L = \frac{10^5}{\rho_{ds}} - \frac{10^5}{\rho_s} + I_{cs} \cdot I_P,$$

kde

- S_{rs} je stupeň nasycení zeminy ze skrývky (-),
 ρ_{ns} je objemová hmotnost vlhké zeminy ze skrývky (kg/m^3),
 ρ_{ds} je objemová hmotnost suché zeminy ze skrývky (kg/m^3),
 ρ_w je objemová hmotnost vody (1000 kg/m^3),
 ρ_s je měrná hmotnost zrn (2700 kg/m^3),
 w_s je váhová vlhkost zeminy ze skrývky (%),
 w_L je mez tekutosti (%),
 w_P je mez plasticity (%),
 I_P je index plasticity ($w_L - w_P$) (%),
 I_{cs} je index konzistence zeminy ze skrývky (-).

Obdobné vztahy platí i pro zeminu na výsypce, jak již bylo zmíněno v úvodu, pórovitost n je třeba nahradit součtem ($n + m$) vyjadřujícím celkovou hodnotu dvojí pórovitosti zahrnující i mezery mezi úlomky a u všech veličin s indexem s (skrývka) se uvede v (výsypka).

$$w_L = \frac{10^5}{\rho_{ds}} - \frac{10^5}{\rho_s} + I_{cs} \cdot I_P = \frac{10^5}{\rho_{dv}} - \frac{10^5}{\rho_s} + I_{cv} \cdot I_P$$
$$I_{cv} = I_{cs} + \frac{10^5 \cdot (\rho_{dv} - \rho_{ds})}{I_P \cdot \rho_{dv} \cdot \rho_{ds}}$$

5 Výsledky parametrických výpočtů – krok 1

Je možné provést libovolně vysoký potřebný počet parametrických výpočtů kombinujících w_L , w_P , ρ_{ds} a další související parametry k tomu, aby bylo možné stanovit náchylnost ke vzniku plastického jádra prostřednictvím vybraných parametrů I_{cv} , m a ρ_{dv} . Protože tyto parametry jsou navzájem provázané, budou pro vysoké riziko vzniku plastického jádra přijatelné pouze výsledky, kdy jsou plněna kritéria výskytu všech parametrů v optimální rovnováze. Je zřejmé, že neexistuje jednoznačný výsledek kombinace v maximální míře napomáhající vzniku plastického jádra, a že jakkoli vyjádřená náchylnost bude závislá na zvolené cílové kombinaci. Například rostoucí počáteční mezerovitost sice teoreticky sama o sobě zvyšuje riziko vzniku plastického jádra tím, že umožňuje přijmout větší množství vody do zeminy a měnit konzistenci k měkčím stavům, vede však rovněž ke snižování objemové hmotnosti. Ta se může pak posunout do oblasti nereálně se vyskytujících hodnot. Primárně jako vstupní údaj tedy například rostoucí mezerovitost napomáhá vzniku plastického jádra, pokud je však mezerovitost posuzována jako odvozená hodnota z jiného parametru, ukazuje příliš nízká hodnota m na rezervu u vstupního údaje, který je možné posunout směrem k většímu riziku. Obecně nadměrný posun jednoho z parametrů do oblasti napomáhající vzniku plastického jádra posouvá jiný parametr mimo interval reality, proto je třeba rozbor posunů parametrů na jednu či druhou stranu popsat velmi obezřetně. Užité způsoby vyhodnocení hledají vyvážené hodnoty všech vstupních i výstupních (nejčastěji tří naposledy jmenovaných, I_C , m a ρ_{dv}) parametrů mezi účinky v maximální míře zvyšujícími riziko vzniku plastického jádra a dostatečnou pravděpodobností jejich výskytu.

Cílem prvního kroku výpočtů je zjednodušeně popsáno odvodit zpětně z hodnot I_{cv} , m , ρ_{dv} (stanovených odborným odhadem v optimální kombinaci pro vznik plastického jádra) příslušné hodnoty w_L , w_P , ρ_{ds} (při $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3 = \text{konst.}$). Provést citlivostní analýzu, jaký dopad na I_{cv} ; m ; ρ_{dv} má změna w_L , w_P , ρ_{ds} a pokud to bude možné a odůvodnitelné upravit výchozí cílová optima I_{cv} ; m ; ρ_{dv} .

Ve druhém kroku je pak cílem vytvořit objektivní reprodukovatelný postup ke stanovení náchylnosti zeminy se známými parametry w_L , w_P , ρ_{ds} například tak, že procentuální přiblížení k hodnotám I_{cv} ; m ; ρ_{dv} stanoveným v předcházejícím kroku je u všech 3 parametrů shodné.

Pro první krok řešení dané problematiky byl zvolený algoritmus založený na úplném prohledání celého prostoru vstupních proměnných (pomocí vnořených cyklů v rozsahu od minima

do maxima s krokem Δ) při současném výpočtu hodnot výstupních proměnných pro aktuální kombinace vstupních hodnot s použitím vzorců uvedených v kapitole 4. Hodnoty indexu konzistence, vyhovující zadaným vstupním podmínkám, byly ukládány do jednotlivých řádků matice výsledné společně s příslušnými vstupními hodnotami w_L , w_P , ρ_{dv} , ρ_{ds} , n , m a I_{cv} . Dále byla stanovena podmínka $w_L > w_P$, plynoucí z požadavku nenulovosti a kladné hodnoty indexu plasticity I_P .

Tabulka 1: Vstupní proměnné výpočtu.

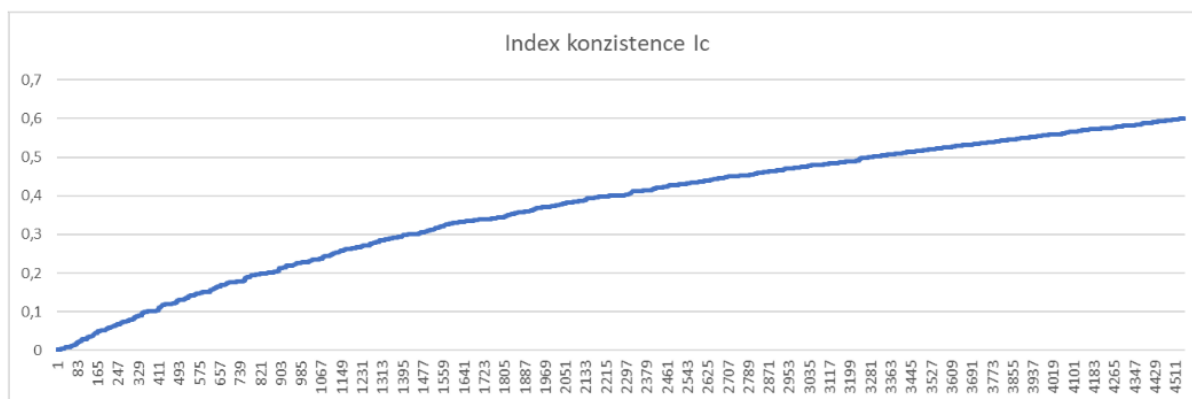
Proměnná	Označení	Jednotka	Minimum	Maximum	Krok Δ
Mez tekutosti	w_L	%	30	100	5%
Mez plasticity	w_P	%	20	60	5%
Objemová hmotnost sušiny na skrývce	ρ_{ds}	kg/m ³	1400	2000	50
Objemová hmotnost sušiny ve výsypce	ρ_{dv}	kg/m ³	950	1300	20

Na základě těchto vstupních proměnných podle tabulky 1 byly vypočteny výstupní proměnné, jejichž přehled uvádí tabulka 2.

Tabulka 2: Výstupní proměnné výpočtu.

Proměnná	Označení	Jednotka	Minimum	Maximum	Krok Δ
Objemová hmotnost pevných částic	ρ_s	kg/m ³	2700	2700	(konst.)
Index konzistence	I_{cv}	%	0,0	0,6	nestanoveno
Pórovitost	n	%	25	40	nestanoveno
Přídavná pórovitost - mezerovitost	m	%	15	35	nestanoveno

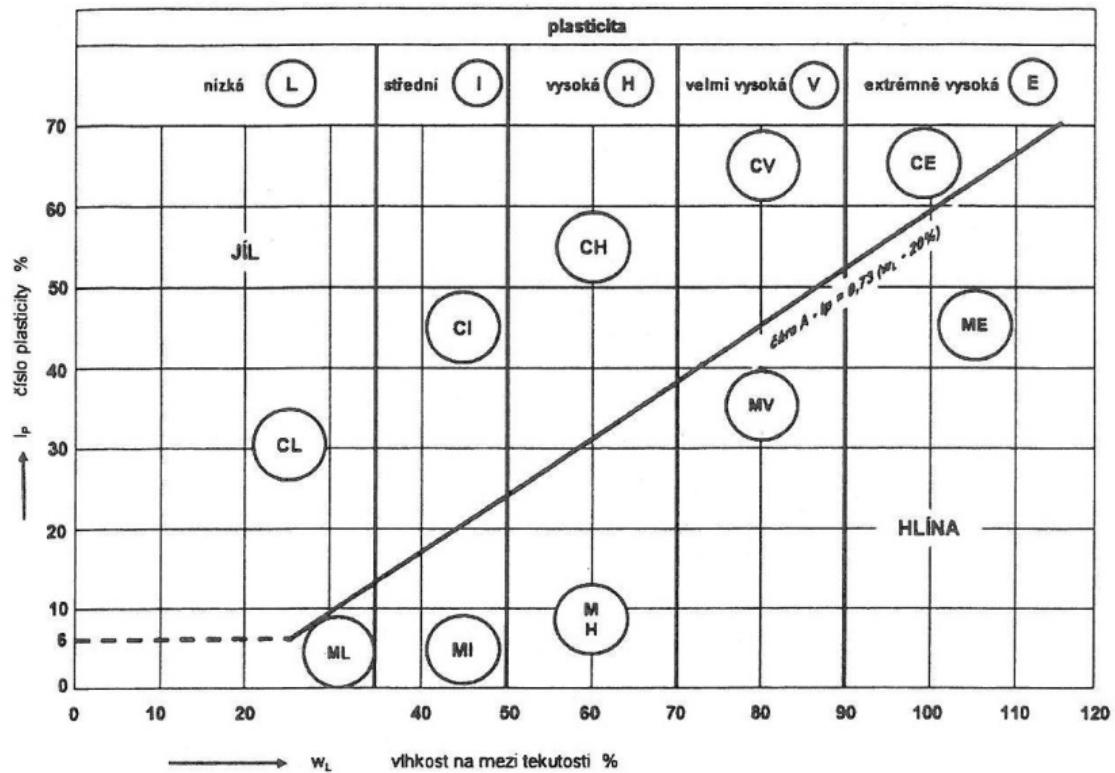
Výsledná výstupní matice má celkem 4549 řádků s kombinacemi hodnot, které vyhovovaly zadání. Setříděné výsledky z matice podle I_{cv} jsou uvedené v obrázku 2.



Obrázek 2: Setřídění výsledné matice podle I_{cv} .

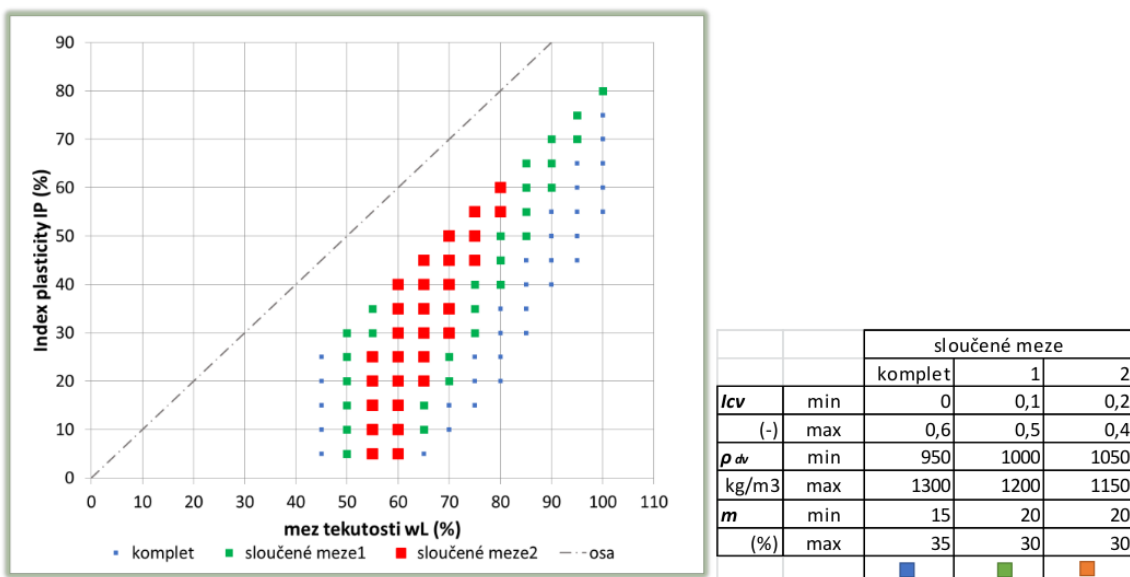
Jestliže výsledek dokážeme vypočítat, je určitým problémem jeho názorné zobrazení. Množina výsledků je tedy různými způsoby filtrována tak, aby se vyváženě zužovaly rozsahy jednotlivých parametrů. V následujícím obrázku 3 je uveden graf s osami w_L (vodorovná) a I_P (svislá), označovaný v mechanice zemin jako diagram plasticity, užívaný k zařazení zemin. Toto užívané grafické schéma je využito jako základ pro další prezentaci výsledků.

Jeden ze způsobů názornější prezentace výsledků je právě zobrazení v grafu s výše uvedenými osami, jestliže jsou měněny požadavky na intervaly přípustných výsledných hodnot. V obrázku 4 jsou zobrazeny výsledky v bodech se souřadnicemi $(w_L; I_P)$, které vyhovují postupně se zužujícím intervalům vybraných parametrů. Modře jsou zobrazeny hodnoty z úplného



Obrázek 3: Diagram plasticity pro částice < 0,5 mm (ČSN 73 6133 - CL, CI ... – symboly pro třídy zemin, viz [1]).

souboru podle tabulky 1, zeleně a červeně pak ty, které vyhovují mezím podle sloupce označeného 1, resp. 2 ve zmíněném obrázku 4. Jestliže zužujeme intervaly kolem stejného centra, bude se výsledná oblast vyhovujících výsledků centricky zmenšovat. Pokud bude zmenšování asymetrické, opět zužování bude směřovat ke zvolenému centru.



Obrázek 4: Sloučené meze – různé intervaly.

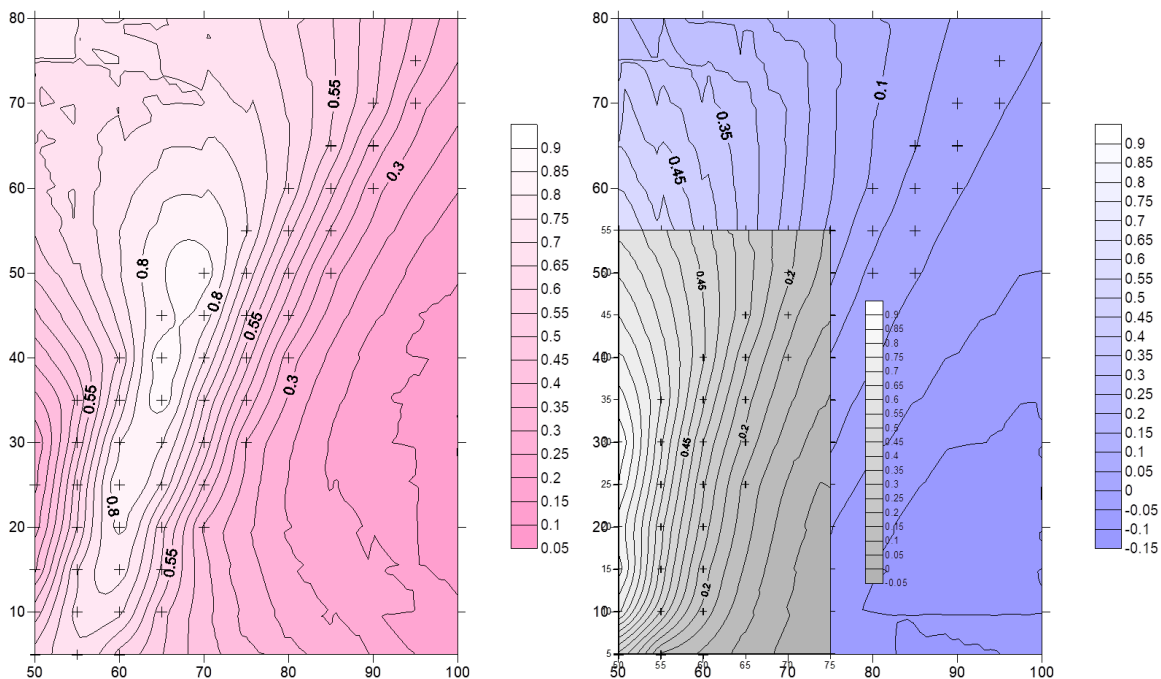
6 Kvantifikace míry náchylnosti – krok 2

Prezentace podle obrázku 4 ukazuje rozložení vyhovujících výsledků kolem zvoleného centra. Nevyjadřuje však přímo výši náchylnosti k vytvoření plastického jádra. Ke kvantifikaci náchylnosti bylo vytvořeno více alternativních postupů, z nichž dva jsou dále podrobněji popsány. Ačkoli vycházejí z poněkud odlišných výchozích pozic, výsledek je srovnatelný. První z postupů vychází z matice všech výsledků. Ve zvolených rozmezích I_{cv} , m a ρ_{dv} se vypočítají partikulární součinitele náchylnosti Ψ jako relativní vzdálenosti od zvoleného centra, přičemž centrum je možné volit ve středu intervalu, na jeho okraji nebo i v libovolném místě uvnitř intervalu. Například při m v rozmezí 15 až 35% s centrem uprostřed intervalu je

$$\Psi_m = 1 - |(m - (35 + 15) / 2) / ((35 - 15) / 2)|$$

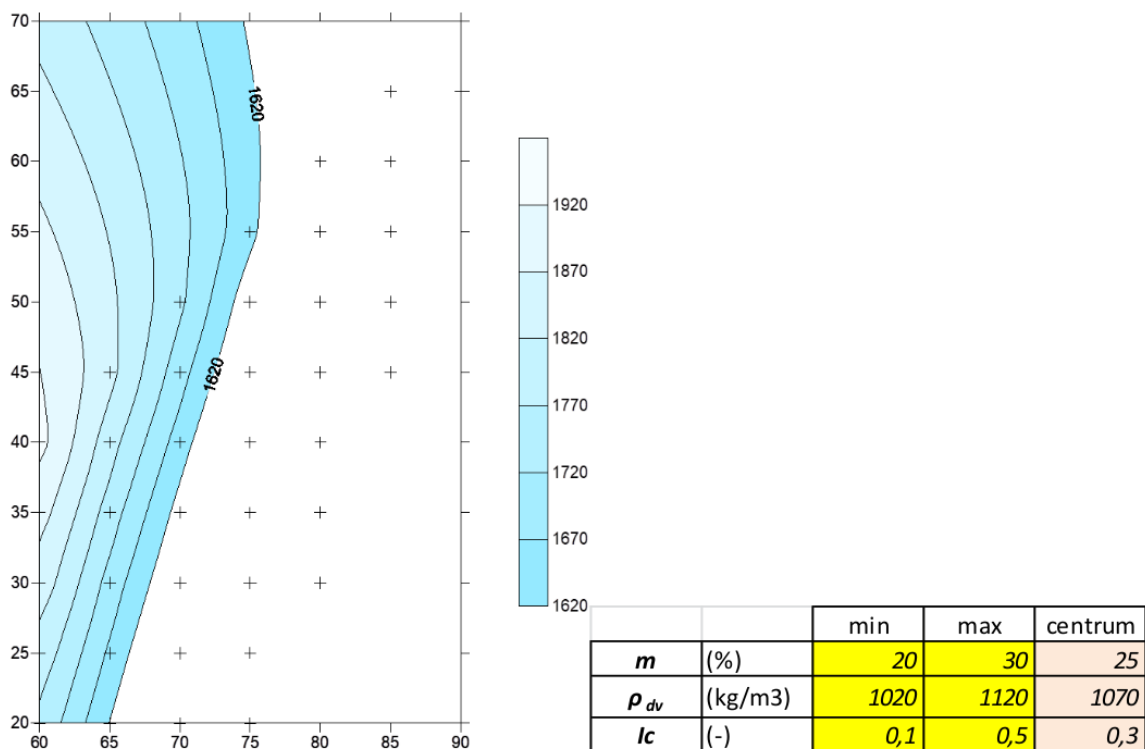
Je-li $m = 15$ nebo 35 , vychází Ψ_m rovno 0 (nejnižší náchylnost), pro $m = 25$ je Ψ_m rovno 1 (nejvyšší náchylnost). Je-li m mimo zvolený rozsah, výpočet neproběhne. Součinem partikulárních součinitelů dostaneme celkový součinitel náchylnosti v rozsahu 0 až 1.

Na obrázku 5 je uveden výsledek výpočtu součinitelů náchylnosti v grafu s osami w_L (vodorovná) a I_P (svislá). Izočáry ukazují soustředění nejvyšších součinitelů podle toho, zda centrum bylo zvoleno uprostřed intervalu (levá část, růžová barva) nebo na okraji. V pravé části obrázku 5 je uvedena kombinace zvolených center pro jednotlivé parametry, pro I_{cv} a ρ_{dv} je zvolené centrum na okraji intervalu u nižší hodnoty, pro m je centrum uprostřed intervalu. Modrá část zobrazuje všechny hodnoty Ψ z intervalu (0; 1), šedá část z intervalu (0,13; 1). Výsledek je prakticky shodný, protože smysluplný výsledek se nachází pouze v oblastech vyznačených křížky (obdobná oblast jako na obrázku 4).



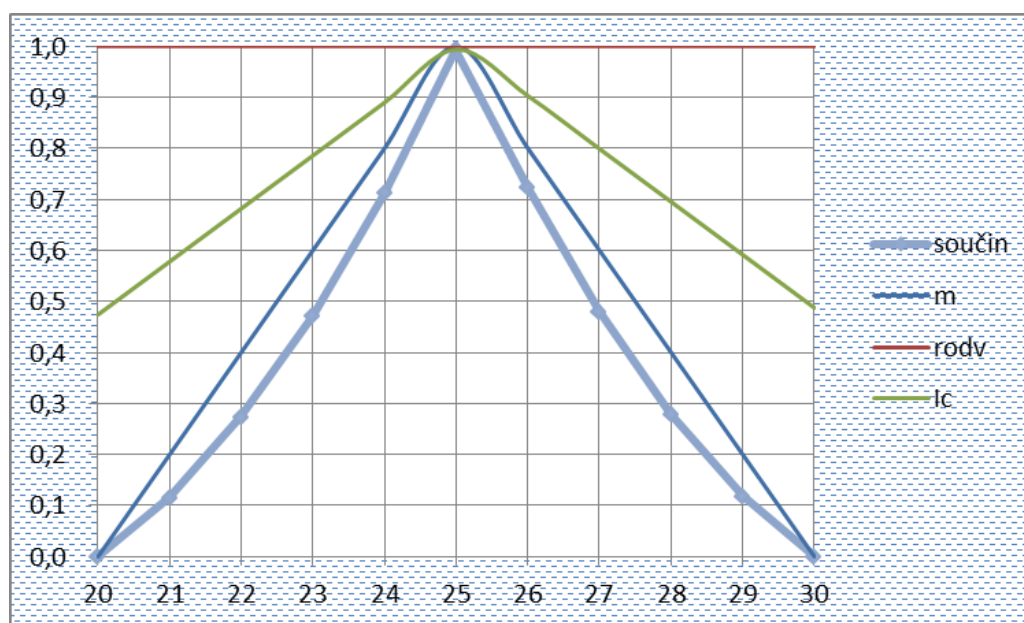
Obrázek 5: Izočáry shodných součinitelů Ψ pro maximum volené v centru nebo na okraji intervalu; na vodorovné ose je w_L (%), na svislé I_P (%).

Prezentace podle obrázku 6 umožňuje kontrolovat i další ze vstupních a výstupních proměnných. Obrázek ukazuje izočáry hodnot objemové hmotnosti sušiny na skrývce ρ_{ds} potřebné pro dosažení celkových součinitelů $\Psi > 0,95$. Oblast je omezena hodnotou $\rho_{ds} = 1620 \text{ kg/m}^3$, protože pak při $\rho_{ds} = 2700 \text{ kg/m}^3$ hodnota pórovitosti n přesáhne stanovenou hranici 40%.

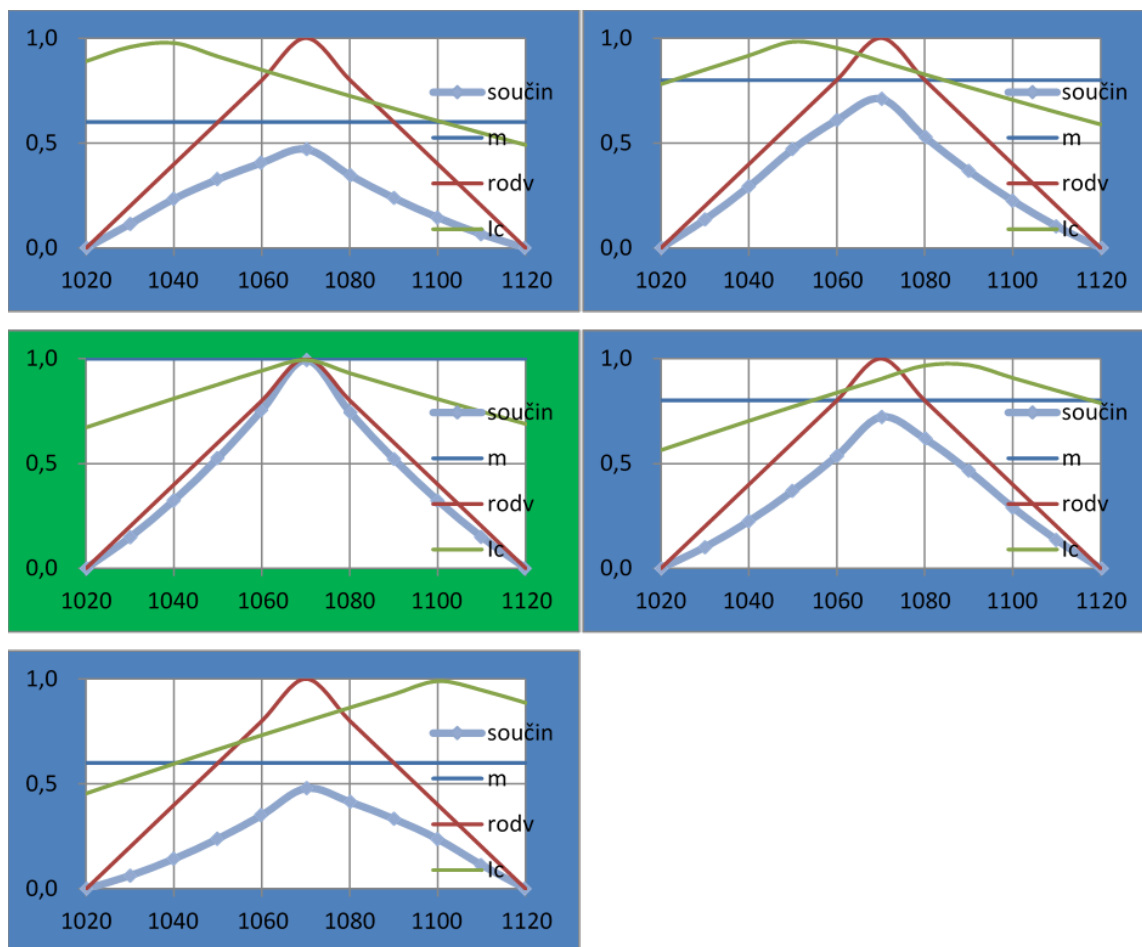


Obrázek 6: Izočáry shodných hodnot ρ_{ds} pro maximum volené v centru intervalu podle doprovodné tabulky; na vodorovné ose je w_L (%), na svislé l_P (%).

Na obrázcích 7 a 8 jsou výsledky pomocných a kontrolních výpočtů přibližování k výsledkům uvedeným na obrázku 6. Na vodorovné ose je mezerovitost m , jednotlivé křivky ukazují partikulární součinitele Ψ_{ro} a Ψ_{lc} , resp. celkový součinitel Ψ , jsou-li hodnoty ρ_{dv} a l_{cv} ve středu intervalů. Kontrola je ukázána na obrázku 8, kde je recipročně na vodorovné ose objemová hmotnost sušiny na výsypce ρ_{dv} a mezerovitost m je postupně vkládána hodnotami lišícími se o -2, -1, 0, +1 a +2 % od střední hodnoty intervalu. Výsledek vyznačený zeleně je shodný s výsledkem na obrázku 7.



Obrázek 7: Celkový a partikulární součinitele Ψ pro mezerovitost m na vodorovné ose.



Obrázek 8: Celkové a partikulární součinitele Ψ pro objemovou hmotnost sušiny na výsypce ρ_{dv} na vodorovné ose s variantním zadáním mezerovitosti m .

7 Závěr

Základní výpočet úplné výsledkové matice byl provedený pomocí software naprogramovaného v jazyce R, který je součástí Expertního systému GERIT. Hlavním úkolem systému je poskytnutí podpory rozhodování v oblasti využití krajiny na území, kde došlo ke skončení báňského provozu. Příkladem využití území jsou právě výsypky povrchových hnědouhelných lomů. Systém bude sdružovat relevantní data a vytvářet podklady pro hodnocení rizik z pohledu využití území po rekultivaci ve vazbě např. na budování sídel a infrastruktury. Výše uvedené výpočetní metody jsou jedny z příkladů funkcionalit systému.

Po porovnání rozsahů proměnných ve výše uvedených lze konstatovat následující:

- Při zahrnutí většího počtu řádků matice (zvětšení rozsahu I_C) se rozsahy proměnných w_L , n , m a ρ_{ds} nemění nijak významně. Největší změnu rozsahu vykazuje vstupní proměnná w_P .
- Vzhledem k velmi plochému tvaru křivky I_C (obrázek 2 - unimodální průběh bez skokových změn) by bylo vhodné zvážit k popisu závislosti I_C na vstupních proměnných použití teorie fuzzy množin, která by umožnila namísto intervalů ostře oddělených přesnými čísly používat vágně stanovené intervaly pomocí jazykového popisu.

Vztahy mezi jednotlivými parametry vstupujícími do zkoumaného problému jsou známými základními vztahy mechaniky zemin. Jakkoli výsledek lze spočítat, je určitým problémem jeho

názorné zobrazení a soustředění na vyhledání kombinací na jedné straně reálně se vyskytujících, a na druhé napomáhajících vzniku stavu zemin v plastickém jádře. Nelze jednoznačně určit cílový výsledek výpočtu, protože neexistuje z pohledu teorie i praxe žádný optimální stav s maximální náchylností zeminy k vytvoření plastického jádra. Vždy se bude jednat o oblast kombinací vybraných prostřednictvím odborného odhadu a nepříliš četné dokumentace z terénu. Také proto se výsledek a jeho zobrazení budou lišit podle zvoleného maxima či centra intervalů.

Práce na problematice plastického jádra a jeho vzniku dále pokračují.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován v rámci výzkumného projektu TH02030069 „Expertní systém pro monitoring, hodnocení rizik a podporu rozhodování v oblasti využití krajiny“ s podporou Technologické agentury ČR.

Literatura

[1] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT: ČSN 73 6133 - Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací.

URL http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/73/52174/52174_nahled.htm