

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut geodézie a důlního měřictví

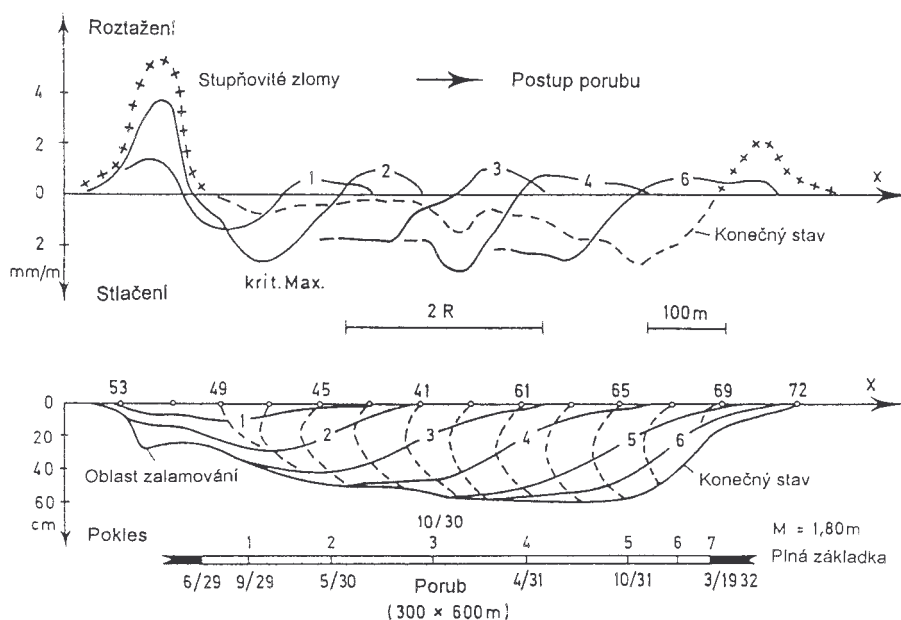
Prof. Ing. Jan Schenk, CSc

Dynamika poklesové kotliny

2000

1. Dynamika poklesové kotliny

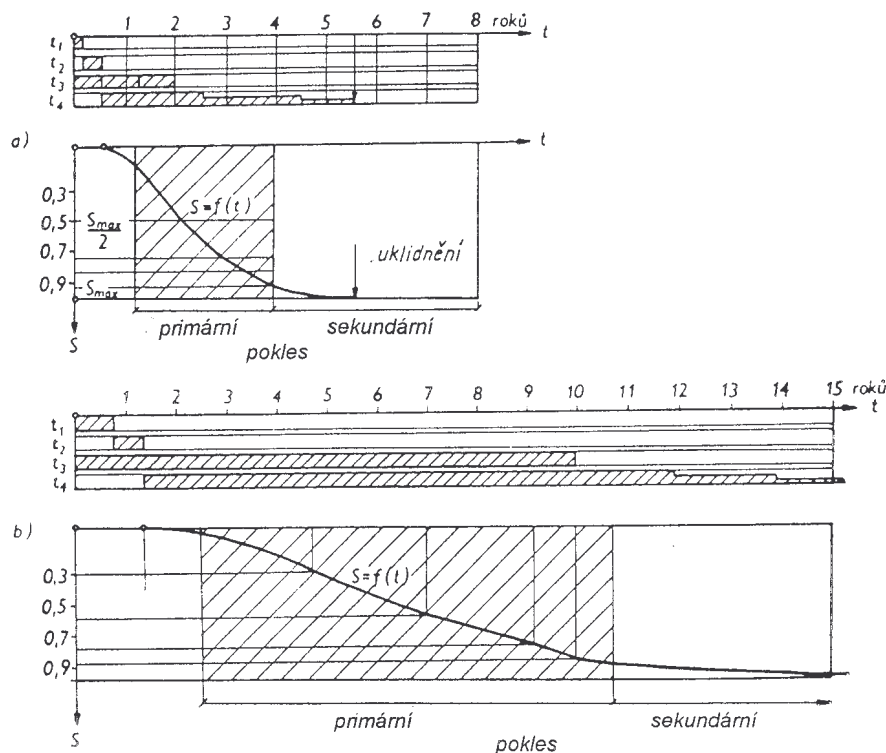
Co rozumíme dynamikou poklesové kotliny? Víme, že konečný tvar poklesové kotliny je závislý na řadě faktorů, z nichž nejdůležitější jsou vydobytá mocnost ložiska, velikost odrubané plochy, její hloubka, úklon a metoda dobývání. Sekundárně jsou to geomechanické vlastnosti podrubávaného nadloží. Konečný tvar se však vytváří postupně tak, jak pohyb postupuje k vyrubanému prostoru. Tento pohyb se neprojeví ihned po pohybu přímého nadloží, ale vlivem přetvárných vlastností hornin, jejich reologické charakteristiky, rozlohy vyrubané plochy a mocnosti nadloží uplyne určitá doba, než se na povrchu objeví první známka pohybu. Se zvětšující se plochou výrubu se poklesy zvětšují a přesunují za postupující porubní frontou. Pohyb povrchu neskončí ihned po ukončení dobývání ve vlivné oblasti, ale doznívá delší dobu, které je třeba k dosažení rovnovážného napětového stavu v horském masívu, jež byl porušen vyrubáním ložiska. To trvá zpravidla několik let, než se ovlivněná oblast dostane do klidu.



Obrázek 1: Časový průběh pohybu povrchu ve směru postupu porubu v plochém uložení v hloubce 175 m, pokryv mocný 145 m, maximální pokles asi 90 cm (podle Januse a Flaschentragera).

Dynamiku vytváření poklesové kotliny ovlivňují tři faktory:

- velikost průhybu přímého nadloží vlivem stlačování základky nebo závalového prostoru,
- pevnost horninového masívu v nadloží na ohyb a tah, včetně stupně jeho porušení dřívějším podrubáním. a
- rychlost postupu porubní fronty,



Obrázek 2: Příklad průběhu poklesů bodů z OKR a Kladenské uhelné pánve

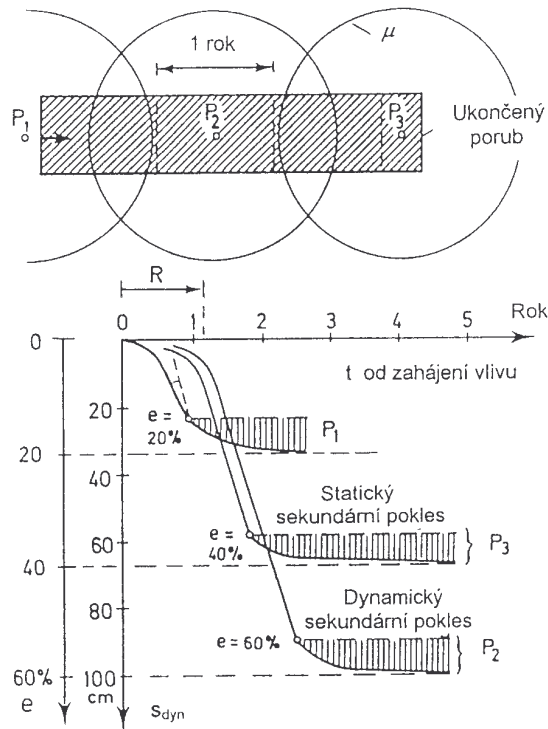
Podle Neseta lze čas, který potřebuje bod povrchu v oblasti plné účinné plochy od začátku dobývání porubu až po své uklidnění, rozdělit do čtyř etap:

- doba t_1 potřebná k tomu, aby od zahájení dobývání nastalo první zavalení vyrubaného prostoru, a tím průhyb přímého nadloží výrubu,
- doba t_2 , které je potřeba, aby první pohyb způsobený závalem nebo prohnutím efektivního nadloží se projevil až na povrchu,
- doba t_3 , po kterou se dobývá v rámci plné účinné plochy,
- doba t_4 , potřebná k tomu, aby se porušené vrstvy přemístily směrem k vyrubanému ložisku a stlačily do původního objemu, nebo zaujaly nový, poměrům odpovídající nejmenší objem.

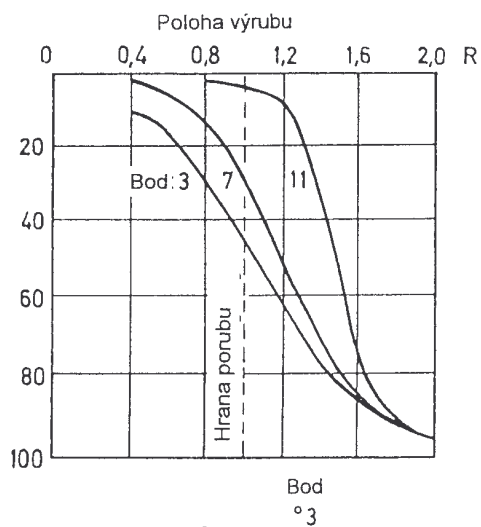
Doba $t_1 + t_2$ je zpoždění projevu vlivu dobývání na povrchu od zahájení dobývání v účinné vzdálenosti od bodu na povrchu. Doba t_3 se skládá z počáteční fáze pohybu (5% S_{cel}), intenzivní fáze (do 80%) a toto období označujeme jako primární pohyb vyvolaný dobýváním ve vlivné vzdálenosti. Doba t_4 se označuje jako doznívání pohybu, který pokračuje i po ukončení dobývání ve vlivné vzdálenosti, a označuje se také jako sekundární pohyb.

Jak bylo uvedeno, na obr. 1 přesunují se pohyby s rozvíjejícím se porubem. Zatím co poklesy v prostoru poklesové kotliny plynule narůstají až do konečné velikosti, mění se ostatní deformační parametry tak, že jejich konečná velikost může být menší než jejich dynamická velikost v průběhu vývoje kotliny. Platí to zejména u bodů, ke kterým se porub nejprve přiblíží, podejde je a vzdálí se.

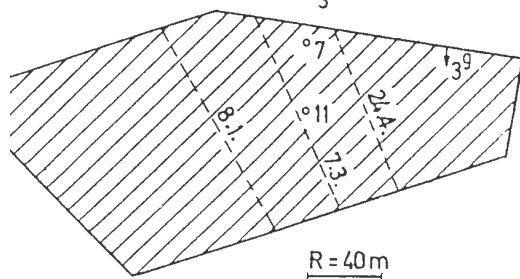
Z této skutečnosti platí i různý průběh klesání bodů podle jejich polohy vzhledem k rozvíjejícímu se porubu.



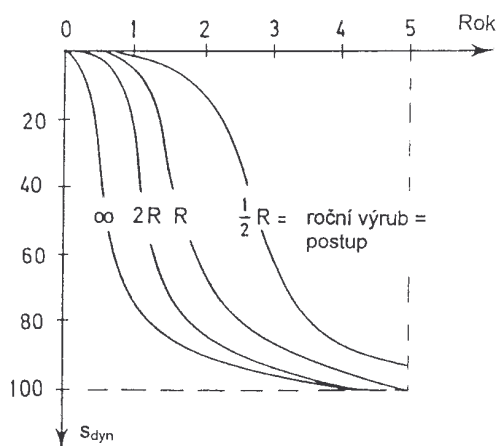
Obrázek 3: Časový průběh poklesů bodů ve směru postupu poruby (podle Kratzsche)



Obrázek 4: Časový průběh poklesů bodů ležících příčně ke směru porubní fronty (podle Fleminga)

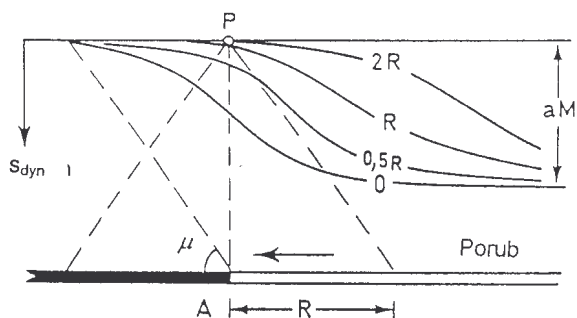


Pro různou rychlost poruby nastane i různý časový průběh poklesů bodu. Na obr. 5 je časový průběh poklesu bodu při různých rychlostech postupu porubní fronty.



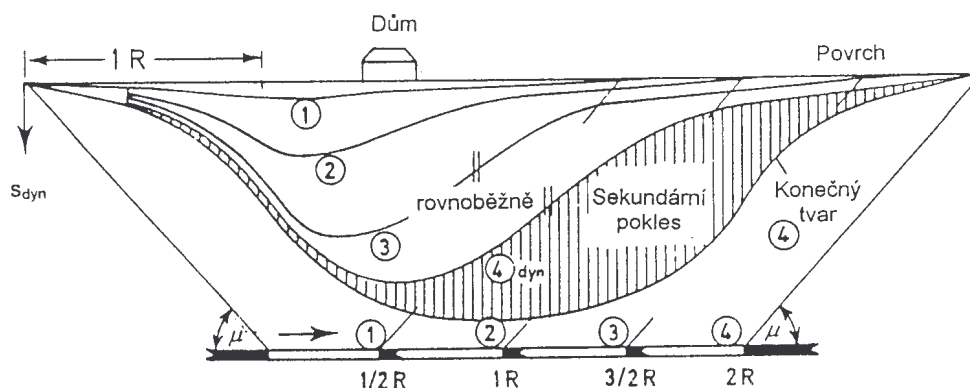
Obrázek 5: Časový průběh poklesů povrchového bodu při různých rychlostech postupu porubní fronty (podle Perze)

Dynamický tvar poklesové kotliny nad stále se pohybující porubní frontou, jak byl uveden na obr. 5, vyneseny graficky pro jednu polohu porubu je na obr. 6.



Obrázek 6: Tvary dynamického svahu poklesové kotliny pro různé rychlosti postupu porubní fronty (podle Perze)

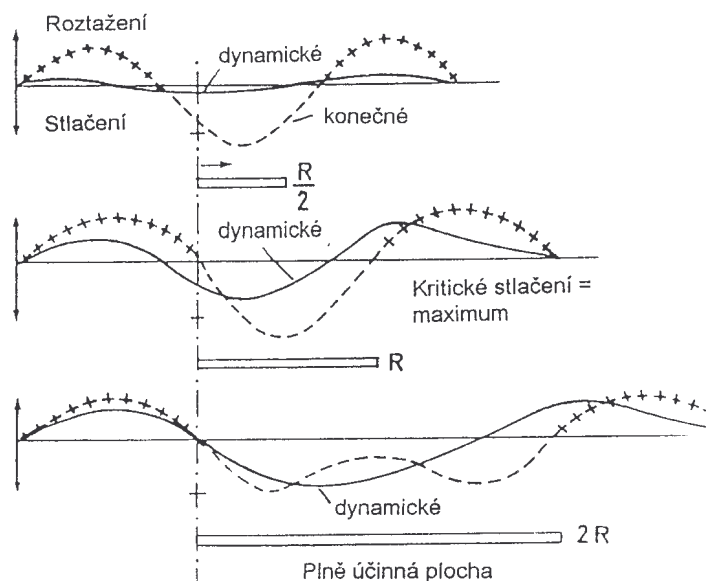
V závislosti na rychlosti postupu porubu se profil dynamickým svahem kotliny s narůstající rychlostí porubu stává plošší, a tím se zmenšují deformace na tomto dynamickém svahu kotliny. Dynamické tvary poklesové kotliny pro více postavení porubu jsou na obr. 7.



Obrázek 7: Poklesy nad porubem, který dosáhl plné účinné plochy pro různá období (podle Kratzsche)

Je vidět, že nejhlubší místo dynamické kotliny se vytváří blíže statickému svahu kotliny a teprve po uklidnění má kotlina souměrný tvar. Rovněž je vidět, že po rozvinutí porubu do vzdálenosti $3/2 R$ se dynamický svah ustálí a dynamické deformace na něm mají konstantní charakter. Teprve sekundární pokles dotvoří svah nad okrajem zastaveného

porubu. Na obr. 8 jsou vykresleny dynamické křivky vodorovného přetvoření pro různě velkou odrubanou plochu.



Obrázek 8: Průběžné hodnoty roztažení a stlačení nad různě velkou vydobytou plochou (podle Perze a Niemczyka)

Je vidět, že nebezpečné kritické stlačení vznikne nad porubem jehož směrná délka je rovná R . Dynamické přetvoření je vždy s výjimkou středu kotliny při vydobytí plné účinné plochy menší než jeho konečná hodnota pro stejný rozsah dobývání. Hodnoty se ještě zmenší s rychlejším postupem porubu, protože se bude vytvářet plošší kotlina. V už podrubaném pohoří a především při podrubání z malých hloubek může však rychlý postup porubu způsobit zvětšení zdánlivých pohybů a tím špičatý tvar poklesové kotliny, tedy větší přetvoření. Zóny bez vodorovného přetvoření nebo „neutrální“ zóny přechodu roztažení na stlačení přibližují se s rostoucí délkou porubu místům průmětu hran porubu na povrch. U dynamických křivek nad postupující porubní frontou se tato zóna pohybuje dále uvnitř, tj. zůstává zpět za postupujícím porubem. Na této vlně leží maximální roztažení např. o $0,15R$, maximální naklonění o $0,3R$ a maximální stlačení o $0,5R$ ($R = 165$ m) za porubní frontou, když porubní fronta postupuje denně v hloubce 200 m o 3 m a když chybí pokryv (Pflaging). Nad statickým bokem porubu je rozdíl mezi dynamickým a konečným přetvořením (roztažením) již po dosažení délky porubu R malý.

I když podle Perze by se měl se zrychlením postupu porubní fronty nad pohybujícím se bokem porubu vytvářet plošší dynamický svah, a tedy měly na něm být i menší deformace, prokázalo se především v Německu, že při postupu porubu 4 - 5 m/den vzniká nad touto hranou strmý svah kotliny. To nastává především při vícenásobném podrubání, kdy pevnost podrubávaného nadloží se natolik sníží, že průhyb bezprostředního nadloží se projeví během velmi krátké doby až na povrchu a dynamický svah se blíží deformacemi konečnému svahu po zastavení dobývání.

2. Prognóza dynamiky poklesové kotliny

Prognózovat dynamiku poklesové kotliny má velký praktický význam, neboť nám umožňuje odpovědět na následující otázky:

- kdy se projeví první nebezpečné projevy poddolování, aby bylo možné provést včas preventivní zabezpečení ovlivněných objektů,
- kdy dojde k odeznění vlivů poddolování, aby se mohly provést generální opravy poškozených objektů,
- kdy dojde k největším nárokům na stabilitu poddolovaných objektů, aby se provádělo měření těchto vlivů na objektech,
- jaké budou přírůstky poklesů, aby v závislosti na čase bylo možné stanovit harmonogram prací pro úpravu kolejí, mostů, nebo regulaci vodních toků.
- jak se budou přemísťovat zóny stlačení a roztažení na povrchu vyvolané poruby, aby se pořadí dobývání porubů mohlo uspořádat tak, aby jejich dobývání mělo co nejmenší škodlivé vlivy.

Při prognóze obvykle vycházíme z konečné hodnoty deformace kterou násobíme příslušným koeficientem podle vzorce:

$$D_t = D_{kon} \cdot z_t \quad (1)$$

kde z_t časový faktor pro dobu t .

Tento časový faktor je funkcí času pro dobu, mezi zahájením dobývání a uklidněním povrchu. Pro uklidněný povrch platí, že $z = 1$.

Pro na obr. 3 znázorněný časový průběh poklesů bodů platí tyto podmínky:

1. Na začátku poklesu daného bodu povrchu je pokles $s = 0$ a čas $t = 0$.
2. Na konci klesání v čase T při uklidnění povrchu je $s = s_{kon}$.
3. Na počátku i na konci je rychlost klesání bodu $v = 0$.
4. V inflexním bodě křivky je zrychlení $\frac{dv}{dt} = 0$.

Z uvedených podmínek platí, že je nutné znát přesně konečnou hodnotu poklesu, a celkovou dobu klesání daného bodu. Ostatní hodnoty lze zjistit, z hodnot poklesů zjištěných v období $t = 0$ až T . Esovitý tvar časové křivky lze poměrně dobře vyjádřit exponenciální funkcí.

Z druhé strany však použití konečné hodnoty pro celý porub je výhodné u poklesu, které s časem plynule narůstají, pro ostatní deformační parametry však tato skutečnost je jiná, neboť po dosažení maxima se mohou v průběhu doby zmenšovat (naklonění, posun, křivost) nebo měnit své znaménko (stlačení a roztažení). Je proto správnější uvažovat konečné deformace jednotlivých dílčích odrubaných ploch, kterými lépe vystihneme skutečné dynamické deformace v poklesové kotlině.

Pro řešení této otázky byla odvozená celá řada časových funkcí, z nichž se u nás používají funkce

$$- \text{Čechurova} \quad z = 1 - \frac{1}{2^t} \quad (2)$$

kde t je počet let od ukončení dobývání, platí jen pro jeden typ nadloží.

$$- \text{Knotheho} \quad z = 1 - \exp(-c.t) \quad (3)$$

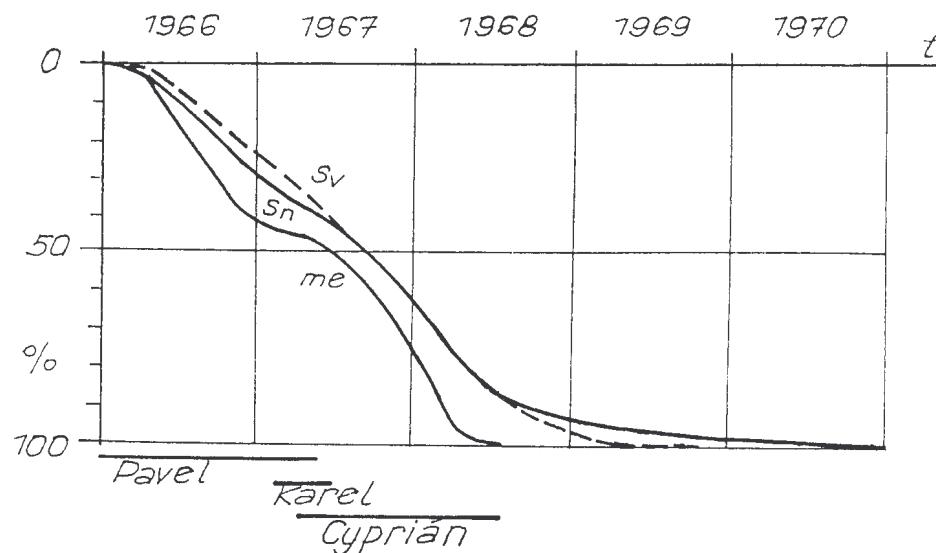
kde t je doba od zastavení porubu a c konstanta vyjadřující pevnost nadložních hornin. Např. pro čas vyjádřeny v rocích platí $c = 0,5$ pro nadloží s převahou pevných a soudržných pískovců a pro velkou hloubku dobývání, $c = 7$ platí pro málo pevné, vrstevnaté nadloží, opakovaně podrubané a malou hloubku dobývání.

Při analýze naměřených výsledku poklesů v prostoru Hrušovské kameniny jsme spolu s prof. Matoušem navrhli časovou funkci

$$z = 1 - \exp\left[-\left(\frac{2,4}{T} \cdot t\right)^2\right] \quad (4)$$

kde T je dvojnásobek doby po kterou se porub pohyboval v rámci plně účinné plochy bodu povrchu a bylo dosaženo 99,6 % konečného poklesu.

Tato rovnice dávala dobré výsledky i ve složitých, ale kvalitativně stejných důlně geologických podmínkách. (Obr. 11)



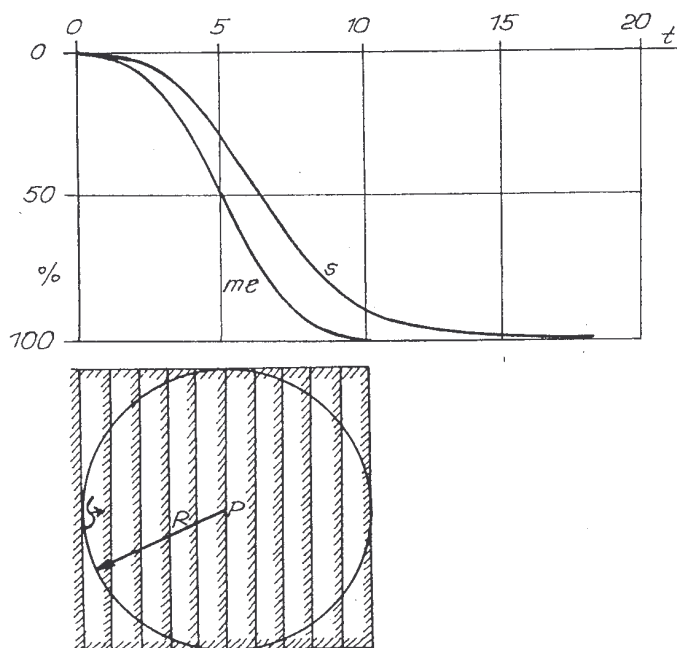
Obrázek 9: Průběh poklesu bodu v ostravské části OKR a teoretický průběh podle funkce Matouš - Schenk

Nevýhodou této funkce byla nutnost stanovit pro každý bod dobu dobývání v jeho plně účinné ploše, což bylo možné při ručním výpočtu prognózy. Proto jsem v roce 1973 navrhl časovou funkci založenou na těchto předpokladech:

– Průběh poklesu bodu obvykle koresponduje s nárůstem konečných poklesů dílčích odrubaných ploch pouze se za nim zpožďuje. To lze vyjádřit funkcí

$$s = s_{kon} \cdot [1 - \exp(-x)] \quad (5)$$

kde x vyjadřuje vztah mezi maximálním poklesem bodu způsobený vyrubáním dílčí plochy a poklesem v libovolném časovém okamžiku, tj. $x = f(\Delta t)$.



Obrázek 10 : Průběh poklesů z dílkčích odrubaných ploch.

- Průběh poklesu bodu je ovlivněn jednak celkovou dobou T mezi zahájením dobývání dílkčí plochy a ukončením jejího vlivu na bod, jednak zpožděním Re mezi začátkem dobývání plochy a prvním pohybem na povrchu. Protože se výraz (6) s rostoucí hodnotou x blíží konečnému poklesu, lze považovat vliv za ukončený, když proběhne 99,33 % konečného poklesu, tj. když $x = 5$.

Na základě těchto předpokladů lze sestavit funkční závislost

$$x = 5 \frac{\Delta t - Re}{T} \quad (6)$$

a spojením vzorců (5) a (6) dostaneme časovou funkci

$$z = 1 - \exp\left(-5 \frac{\Delta t - Re}{T}\right) \quad (7)$$

Na základě výsledků pozorování poklesů lze stanovit celkovou dobu vlivu T i zpoždění prvních projevů od začátku dobývání. Přesnější způsob spočívá ve výpočtu těchto neznámých pomocí zprostředkujících pozorování, kdy konečný pokles dílkčí plochy se určuje na základě teoretického výpočtu pomocí platné rozdělovací funkce vlivů v dané oblasti.

3. Určování parametrů časových funkcí

Jak bylo uvedeno je dynamika vývoje poklesové kotliny ovlivněna řadou parametrů, které je někdy dost složité určit pro stanovení správné prognózy vlivů poddolování. Proto je třeba parametry časových funkcí ověřovat na základě měření in situ na pozorovacích stanicích. Jednu takovou metodu si ukážeme.

K určitému časovému okamžiku od zahájení dobývání se vykope celá řada dílkčích ploch, jejichž počátky dobývání jsou časově posunuty. Je-li provedena řada měření poklesů

od počátku dobývání až do úplného doznění vlivů, lze v těchto okamžicích určit teoretické hodnoty celkových poklesů s_{kon} jednotlivých ploch podle vzorce

$$s_{kon} = m \cdot a \cdot e \quad (8)$$

kde m je dobývaná mocnost, a koeficient dobývání a e účinnost vydobyté plochy. Jestliže za dílčí plochy považujeme odrubané plochy mezi okamžiky měření lze pro jednotlivé časové okamžiky měření určit poklesy jako

$$\begin{aligned} s_{t_1} &= s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_1 - t_0 - Re}{T}\right) \right] \\ s_{t_2} &= s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_2 - t_0 - Re}{T}\right) \right] + s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_2 - t_1 - Re}{T}\right) \right] \\ s_{t_i} &= s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_0 - Re}{T}\right) \right] + s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_1 - Re}{T}\right) \right] + \dots + \\ &+ s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_k - Re}{T}\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

V těchto rovnicích jsou neznámé hodnoty T a Re . Aby se mohly vypočítat nejpravděpodobnější hodnoty, je třeba vytvořit rovnice oprav, rozdíl mezi teoretickými hodnotami poklesů a naměřenými hodnotami poklesů s' .

$$\begin{aligned} v_{s_i} &= s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_0 - Re}{T}\right) \right] + s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_1 - Re}{T}\right) \right] + \dots + \\ &+ s_{kon} \left[1 - \exp\left(-5 \frac{t_i - t_k - Re}{T}\right) \right] - s'_{t_i} \end{aligned} \quad (10)$$

Protože rovnice oprav nejsou lineární, převedeme je na lineární rozvojem podle Taylora s použitím takových přibližných hodnot pro neznámé T a Re , aby stačilo pro vyhovující řešení použít první člen rozvoje. Rovnice oprav pak dostanou tvar

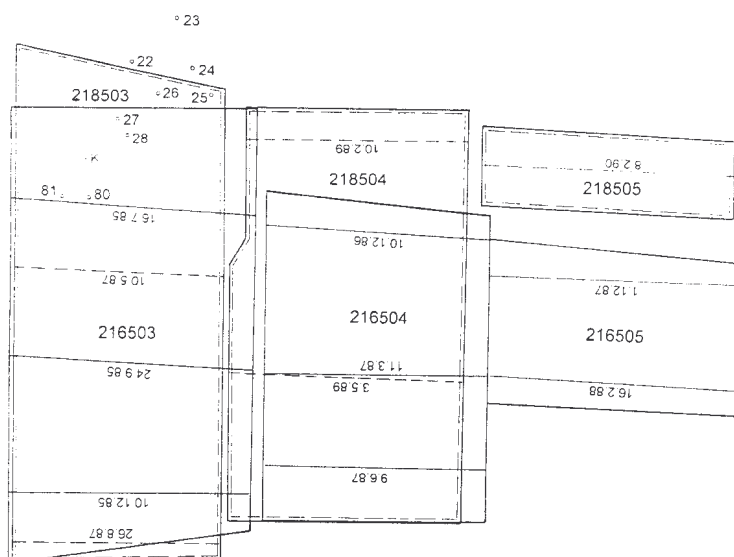
$$v_{s_i} = \frac{\delta f}{\delta Re} \cdot dRe + \frac{\delta f}{\delta T} \cdot dT + f(Re_0, T_0) - s'_{t_i} \quad (11)$$

Protože se řada úkonů opakuje a mění se pouze vstupní hodnoty, lze nejpravděpodobnější hodnoty získat postupnou iterací, až změny neznámých klesnou pod zadanou mez. (Program CASFAK)

Metoda předpokládá:

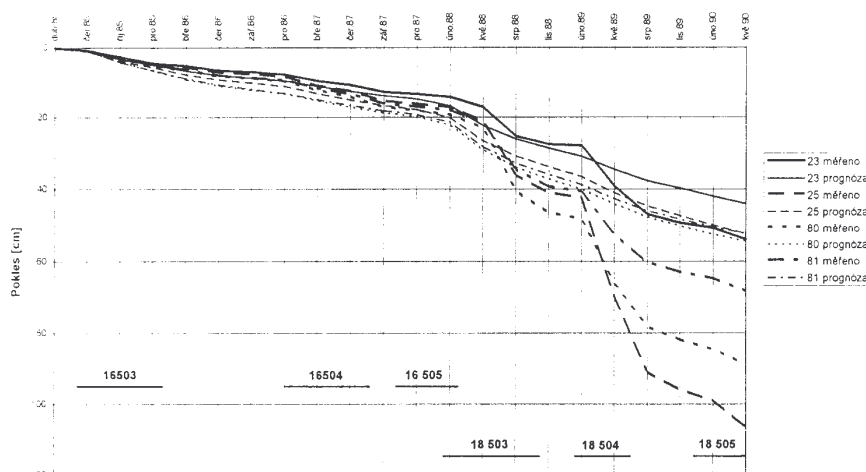
1. Dobrou znalost vydobyté mocnosti m dílčí plochy, koeficientu dobývání a a součinitele účinnosti e , tj. rozdělovací funkce vlivů.
2. Ukončení poklesů nebo alespoň jejich podstatné doznívání.
3. Dostatečnou četnost měření poklesů, především v době intenzivního klesání, přičemž není nutný stejný časový interval měření. Z měření odvozené jednotkové plochy by neměly být příliš velké, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků.

Jako příklad verifikace parametrů jak časové funkce, tak i rozdělovací funkce vlivu chci na závěr předvést při analýze dobývání dvou slojí v účinné vzdálenosti Lázní Darkov. Pro sledování vlivů poddolování byly do terénu v prostoru lázní osazeny pevné body, které byly pozorovány v intervalu čtvrt roku. Pro odvození časové funkce bylo vybráno 14 bodů, jednotlivé poruby byly rozděleny na elementární plochy v souladu s datem měření. Předem je třeba říci, že se jednalo o území, které nebylo dosud poddolováno, kde mocnost pokryvu roste směrem k severovýchodu a je 2 až 3 krát větší než mocnost karbonského nadloží. Dobývána na zával byla sloj č. 16 o průměrné mocnosti 148 cm a sloj č. 18 o mocnosti 210 cm.



Obrázek 11: Situace porubů a některých povrchových bodů pozorovací stanice Lázně Darkov

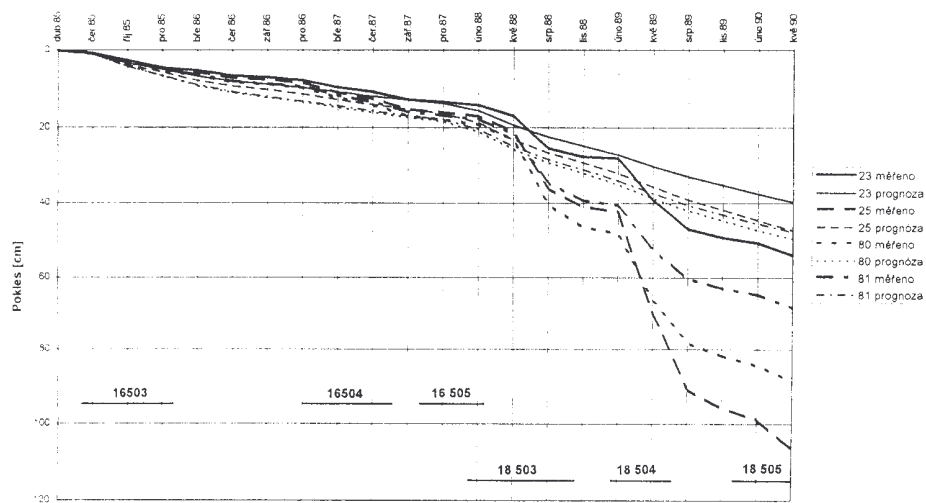
Na základě poklesů vyvolaných při dobývání porubu 16 503 bylo zjištěno Kovandou a Borovcem zmenšení průměrného mezního úhlu vlivu na 39° . Po vyrubání porubu došlo k uklidnění poklesů během roční přestávky dobývání.



Obrázek 12: Skutečné poklesy a jejich prognóza na základě dobývání porubu 16 503

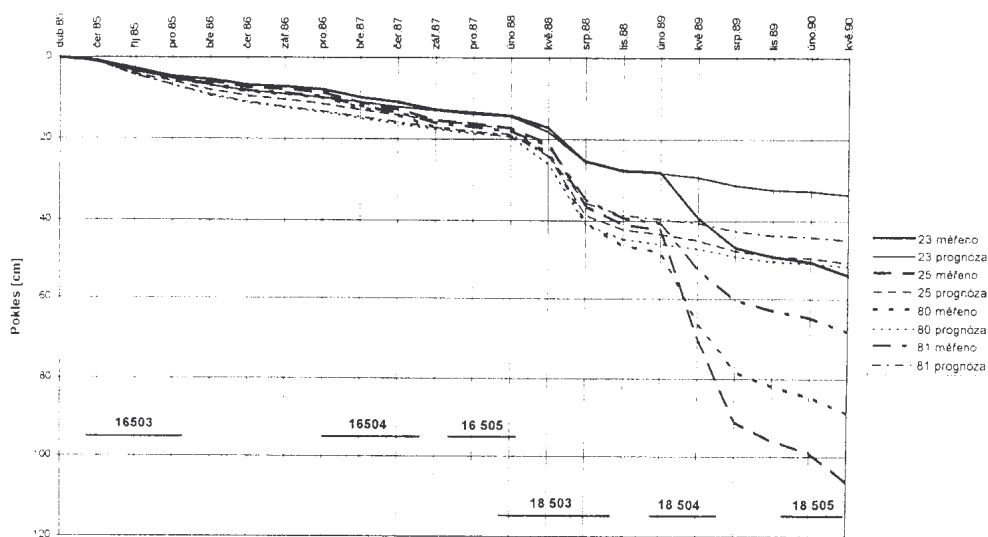
Na konci této přestávky odvozené byly odvozeny parametry $T = 38$ měsíců, $Re = -0,6$ měsíce. Na základě těchto parametrů byla prognóza při dobývání dalších porubů ve sloji č. 16 větší proti skutečnosti o 2 - 3 cm.

K markantní změně došlo po zahájení dobývání sloje č. 18 porubem 18 503, kdy rozdíly mezi prognózou a skutečností především v přímo podrubané části povrchu se zvětšily až na několik decimetrů. Proto byly odvozeny z dobývání všech porubů ve sloji č. 16 nové parametry $T = 68$ měsíců a $Re = -1,2$ měsíce.



Obrázek 13: Skutečné poklesy a jejich prognóza na základě dobývání sloje č. 16

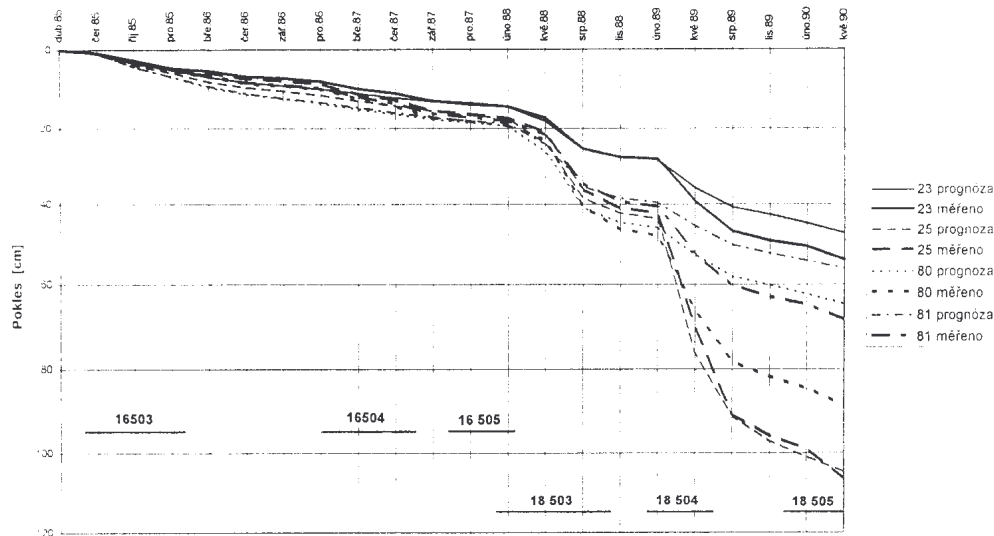
Protože ani tyto parametry neměly podstatný vliv na zmenšení rozdílu mezi prognózou a skutečností spíše je zvětšily, bylo třeba hledat vysvětlení ve změně funkce vlivů, tj. v jiném rozdělení účinnosti. Navrhl jsem tzv. složenou funkci vlivu, o které jsem měl svoji habilitační přednášku. Na základě vypočtené nové funkce vlivu pro porub 18 503 byl odvozeny nové parametry i pro časovou funkci $T = 10$ měsíců a $Re = 2,4$ měsíce.



Obrázek 14: Skutečné poklesy a jejich prognóza na základě dobývání porubu 18 503

Při dobývání následujících porubů v 18. sloji však opět podstatně nesouhlasily naměřené poklesy z prognózou vypočtenou podle složené funkce vlivu. Aby prognózované poklesy odpovídaly naměřeným, musel být zaveden koeficient dobývání $a = 8,5$. To signalizovalo aktivaci podrubaných stařin při dobývání těchto dvou porubů, jež lze velmi těžce kvantifikovat. Na tomto základě vypočtené nové parametry časové funkce byly $T = 15,4$ měsíce, $Re = 0$ měsíců. I když nebylo dosaženo dobré shody mezi naměřenými a prognózními

poklesy je kvalitativní průběh v pořádku a je tedy chyba ve špatně stanovených parametrech rozdělovací funkce vlivů.



Obrázek 15: Skutečné poklesy a jejich prognóza na základě dobývání porubů 18 504 a 18 505

Tímto příkladem jsem chtěl poukázat na složitost stanovení prognózy jak konečných deformací v poklesové kotlině, tak i jejich dynamického průběhu, neboť rychle se měnící především pevnostní charakteristika nadloží velmi ztěžuje stanovení prognózy. Z druhé strany stále větší množství pozorování prováděných pro verifikaci parametrů rozdělovacích a časových funkcí umožňuje stále lépe prognózovat deformace v poklesové kotlině.

Příklad také ukazuje, jak velký vliv má jak na konečnou, tak i na dynamickou prognózu pevnost podrubávaného nadloží a jak se změnou jeho geomechanických a reologických vlastností podstatně liší doba trvání pohybu mezi pevným a více násobně podrubaným nadložím, kdy se v tomto případě zkrátila doba vlivů z 5,5 na 1,25 roků.

Literatura

KRATZSCH, H. *Bergschadenkunde*. ISBN 3-00-001661-9, Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum 1997

NESET, K. *Vlivy poddolování*. SNTL Praha 1984

SCHENK, J. *Časový faktor důležitý prvek při zkoumání dynamiky vývoje poklesové kotliny*, ISBN 80-7078-507-1. VŠB-TU Ostrava 1998,

SCHENK, J. Dosavadní výsledky pozorování vlivů dobývání porubů 40501 a 40502 na závodě 9. Květen Dolu Darkov na povrch. In *sborník Metoda komora-pilíř a proplavování závalu v uhelném hornictví*. VŠB-TU Ostrava, Institut hornického inženýrství, Ostrava 1998, s. 95-107.

SCHENK, J. *Metody zpřesňování prognózy vlivů dobývání slojí na povrch*, Habilitační práce, VŠB Ostrava 1990,