

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Leona Suchomelová

**Využití stereografických metod
při hodnocení stability skalních masivů**
**The use of stereographic methods
for evaluation of stability of rock masses**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Drozd, CSc.

Praha, 2013

NÁZEV PRÁCE

Využití stereografických metod při hodnocení stability skalních masivů

ABSTRAKT

Práce předkládá použití stereografických metod pro příklady z mechaniky hornin. Vysvětluje stereografické principy, použití Wulfových sítí, předkládá řešení dále využitých geometrických úloh konstrukčně i pomocí Wulfových sítí a vysvětluje použití stereografické metody při řešení stability skalních svahů. Práce může posloužit jako skriptum pro studenty Inženýrské geologie pro předmět Mechanika hornin. Praktická část práce obsahuje měření diskontinuit na zářezu dálnice D1 blízko obce Lensedly a vyšetřuje výskyt nestabilních klínových bloků.

TITLE

The use of stereographic methods for evaluation of stability of rock masses

ABSTRACT

The work demonstrates the use of stereographic methods for examples of rock mechanics. It explains stereographic principles, use of Wulf's nets, presents solutions of geometric problems using construction and Wulf's nets and it explains the use of stereographic methods for solving stability of rock slopes. The work can serve as a textbook for students of engineering geology on subject of Rock mechanics. Practical part includes measurements of discontinuities on the highway D1 near Lensedly and investigates the occurrence of unstable wedge blocks.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15. 8. 2013

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. K. Drozdovi, CSc. za čas, který mi věnoval v četných konzultacích i při opravách textu, za zapůjčení svých materiálů, stěžejních pro tuto práci, i doporučení dalších a za pomoc při řešení jednotlivých problémů práce. Dále děkuji Ředitelství silnic a dálnic za poskytnutí archivních materiálů.

OBSAH

1.	Úvod	1
2.	Metodika práce	1
3.	Použitá označení	2
4.	Úvod do projekcí a promítání	3
4.1.	Princip stereografických projekcí	3
4.2.	Využití stereografických projekcí	5
4.3.	Stereografická Wulfova síť v pólové a rovníkové projekci a další možnosti promítání	7
4.4.	Podnět zavedení stereografických metod – přehrada Malpasset	9
5.	Princip zobrazení lineárních a plošných prvků a těles ve stereografické projekci	13
5.1.	Lineární prvek	13
5.2.	Plošný prvek	19
5.3.	Rotační kužel	24
6.	Základní úlohy	28
6.1.	Rovina určená dvěma lineárními prvky	28
6.2.	Průsečnice dvou plošných prvků	31
6.3.	Obecná rovina	34
6.4.	Stanovení úhlu mezi dvěma různoběžkami	37
6.5.	Stanovení úhlu mezi přímkou a rovinou	40
6.6.	Stanovení výslednice vektorů	43
7.	Stabilita skalních stěn	48
7.1.	Předpoklady řešení	48
7.2.	Stabilita na planární ploše diskontinuity	49
7.3.	Stabilita na planární ploše diskontinuity – Rothovo řešení	50
7.4.	Stabilita na planární ploše diskontinuity – pouze gravitační zatížení	51
7.5.	Stabilita svahu při zatížení více silami	55
7.6.	Stabilita svahu v případě dvou ploch nespojitosti – stabilita čtyřstěnu	58
7.7.	Stabilita svahu při zadání orientace normál místo orientace spádnic	62
7.8.	Příklad řešení stability svahů jámového lomu podle autorů Hoeka E. a Bray J.	66
8.	Stabilitní řešení s využitím teorie klíčových bloků	68
9.	Aplikace stereografické metody – zářez dálnice D1 u obce Lensedly	69
9.1.	Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – údaje z geofondu	71
9.2.	Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace z propagační publikace Ředitelství dálnic	71
9.3.	Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace od doc. Ing. K. Drozda CSc.	71
9.4.	Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace o sanaci z archivu Ředitelství silnic a dálnic	78
9.5.	Měření orientace diskontinuit v zářezu u Lensedel	79
9.6.	Stabilitní analýza pro pravý svah zářezu	82
9.7.	Stabilitní analýza pro levý svah zářezu	85
9.8.	Fotografická dokumentace	87
10.	Závěr	95
11.	Použitá literatura	96
12.	Seznam příloh	97

1. Úvod

Hlavním přínosem této diplomové práce je ucelené zpracování stereografických metod, použitelných pro příklady z mechaniky hornin. Jsou zde vysvětleny základní stereografické principy a využití. Jednoznačně jsou popsána řešení jednoduchých geometrických úloh, které jsou řešeny konstrukčně i pomocí paletky. Dále jsou rozebrány různé příklady umožňující posouzení stability skalních svahů. Vybrané kapitoly práce mohou posloužit jako skriptum pro studenty Inženýrské geologie pro předmět Mechanika Hornin.

Důvodem pro vypracování této práce je nedostatek literatury v tomto oboru. V anglickém jazyce jsou k dispozici učebnice *The use of stereographic projection in structural geology* (Phillips, 1971), *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers* (Lisle, Leyshon, 2004), v těchto publikacích však nejsou uvedeny konstrukční řešení a nejsou zde řešeny některé složitější stabilitní úlohy. V českém jazyce byly vypracovány základy stereografické projekce i řešené stabilitní úlohy doc. Ing. K. Drozdem, CSc. (*Základy stereografické projekce, Metody řešení stability skalních svahů a další*).

Druhou, praktickou částí této práce je výzkum výskytu nestabilních klínových bloků v zářezu na dálnici D1 blízko obce Lensedly (Lensedelský zářez). Tento zářez, jako nejhlubší na českých silnicích, byl dokončen v roce 1977, později bylo nutné provést sanaci ocelovými sítěmi.

2. Metodika práce

První částí práce je rešerše uvedené literatury, zvláště materiálů od doc. Ing. K. Drozda, CSc., dále učebnic a odborných článků. Pro psaní textových částí jsem použila program Microsoft Office Word. Protože bylo v práci nutné vytvořit velké množství vysvětlujících obrázků, vybírala jsem pečlivě vhodný software, nejvýhodnější se ukázal geometrický program geogebra 4.2, splnil veškeré nároky a práce s ním je velmi přesná a rychlá. V práci jsem použila velký počet obrázků a fotografií, které mně ztěžovaly stránkování práce bez nutnosti použití "hluchých" míst. Snahou bylo vždy přednostně umístit obrázek i fotografii k předchozímu souvisejícímu textu.

Druhou, praktickou částí této práce je výzkum výskytu nestabilních klínových bloků v dálničním zářezu u Lensedel. Pro měření diskontinuit a směru svahu na místě jsem použila geologický kompas. Při měření směrů a sklonů diskontinuit mi práci ztěžovala provedená sanace ocelovou sítí a tedy velká část diskontinuit byla těžce přístupná. Provedla jsem 98 měření na diskontinuitách na pravé straně zářezu.

Pro zapsání a organizaci výsledků měření jsem použila Microsoft Office Excel, pro zpracování výsledků měření jsem použila program openstereo 0.1.2. a pro dílčí úpravy jsem použila program geogebra. Pro vykreslení spádníc diskontinuit a vykreslení oblouků velkých kružnic diskontinuit a rovin svahu v programu openstereo byla použita úhlojevná Wulfova síť, pro statistické zpracování diskontinuit byla použita plochojevná Lambertova (Schmidtova) síť.

3. Použité označení

Pojem	značení	příklad
Průmětna / rovina průmětny / zobrazovací rovina		π
Základní (řídící) kružnice - průsečík zobrazovací koule s rovinou průmětny π		k
Střed základní (řídící) kružnice		S
Severní směr		0°
Východní směr		90°
Jižní směr		180°
Západní směr		270°
Lineární prvek	velké písmeno	A
Bod, který je projekcí lineárního prvku	velké písmeno	A
Inverzní bod – bod, který je projekcí lineárního prvku z opačné polokoule než promítáme	velké písmeno s čarou	A'
Azimut		μ
Sklon		ν
Určení lineárního prvku	(azimut/sklon), A(μ/ν)	A(120° / 50°)
sklopené zobrazení lineárního prvku A	velké písmeno v závorce	(A)
Azimutová rovina lineárního prvku A	malé řecké písmeno s indexem určujícím lineární prvek	α_A
Rovina	řecké malé písmeno	α
Spádnice	písmeno D s indexem příslušné roviny	D$_{\alpha}$
Normála	písmeno N s indexem příslušné roviny	N$_{\alpha}$
Oblouky velkých kružnic	označení příslušné velké kružnice	k$_{\alpha}$
Oblouky malých kružnic	označení příslušné malé kružnice	k$_A$
Úhel	\sphericalangle bod na prvním rameni, vrchol, bod na druhém rameni	\sphericalangleASB
Úhel	řecké malé písmeno	α
Úsečka	dva body určující úsečku s čarou nad nimi	\overline{AB}
Přímka	dva body určující přímku s obousměrnou šipkou nad nimi	\overleftrightarrow{AB}
Polopřímka	dva body určující polopřímku s jednosměrnou šipkou nad nimi	\overrightarrow{AB}
Označení objektů ležících na povrchu zobrazovací koule	označení objektu s indexem s velkým písmenem K	A$_K$
Vrcholy sférických dvojúhelníků a čtyřúhelníků vymežujících bezpečnostní oblasti	velká písmena	O, P, K, L

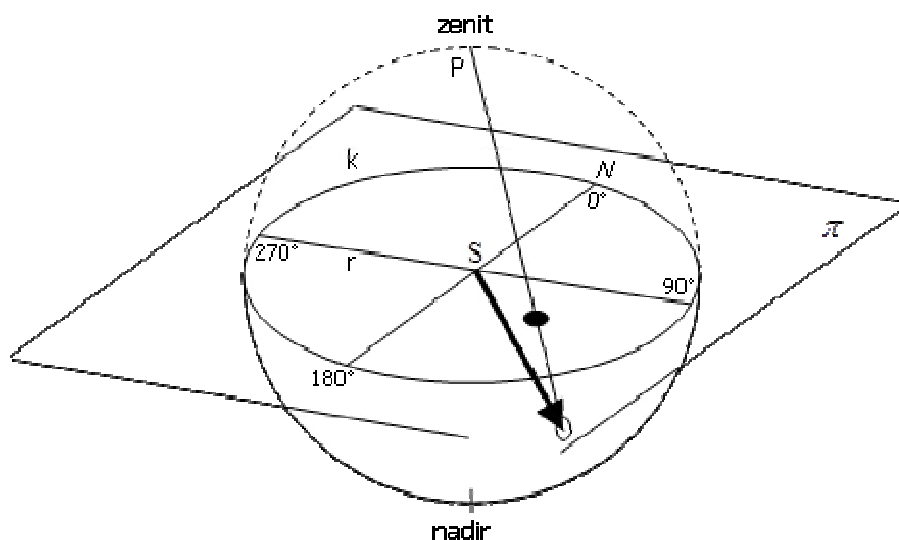
4. Úvod do projekcí a promítání

4.1. Princip stereografických projekcí

Stereografická metoda promítá objekty umístěné na povrchu zobrazovací koule do roviny průmětny π , která prochází středem této koule. Středem promítání je bod **P** – pól, který je umístěn na povrchu zobrazovací koule, obvykle v zenitu nebo nadiru vzhledem k horizontální rovině π (Drozd, 1974).

Prvky středového promítání z pólu **P** na rovinu průmětny jsou určeny (Obr. 4.1):

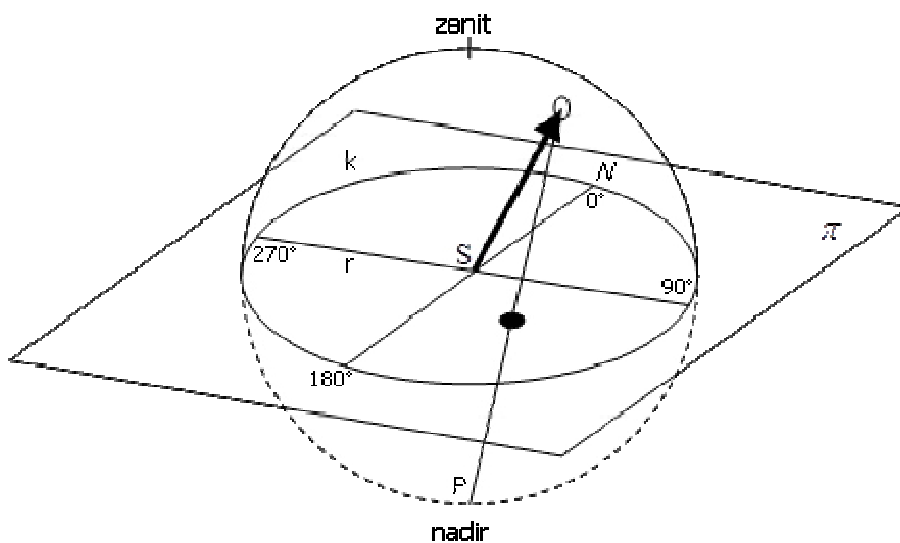
- základní (řídící) kružnicí **k** o poloměru **r**, kružnice **k** je průsečnice zobrazovací koule s rovinou průmětny π .
- středem **S** základní kružnice **k**, který je totožný se středem zobrazovací koule.
- směrovou orientací základní kružnice vzhledem ke světovým stranám vystupňovanou v úhlové míře **0°** až **360°**.



Obr. 4.1 Promítání na spodní polokouli

Projekční rovina π dělí projekční kouli na dvě polokoule. Promítané objekty ležící na opačné polokouli než je pól **P** se promítají svazkem promítacích paprsků do roviny průmětny do kruhu omezeného kružnicí **k**. Promítané objekty ležící na stejně polokouli jako je pól **P** se promítají svazkem promítacích paprsků do roviny průmětny mimo kruh omezený kružnicí **k**.

Rozlišuje se promítání na vrchní a na spodní polokouli podle umístění pólu. Promítají-li se objekty ze spodní polokoule, nazýváme toto promítání "na spodní polokouli" a pól **P** je v zenitu (Obr. 4.1). Promítají-li se objekty z vrchní polokoule, nazýváme toto promítání "na vrchní polokouli" a pól **P** je v nadiru (Obr. 4.2).



Obr. 4.2 Promítání na vrchní polokouli

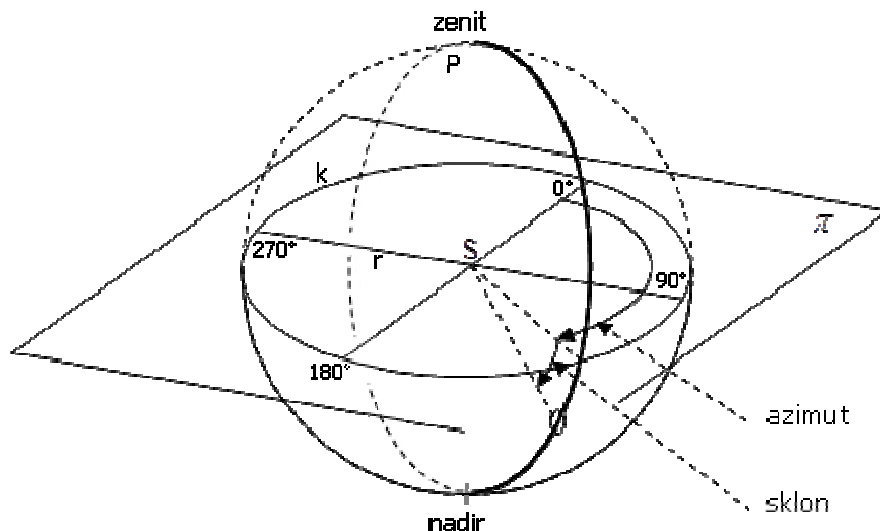
4.2. Využití stereografických projekcí

Stereografické metody umožňují zobrazení trojrozměrných prvků na dvojrozměrnou plochu, je tedy možné zjistit a vypočítat vzájemné vztahy mezi promítanými objekty, které jsou lineární, plošné, nebo jde o prostorová tělesa.

Mezi lineární prvky patří lineace – paralelní uspořádání minerálních zrn, orientace fosilií, vráslová osa, dále vektory vnějších či vnitřních sil, směr proudění podzemní vody, průsečíky dvou rovinných prvků apod.

Lineární prvky jsou určeny (Drozd, 1974, popis na obr. 4.3):

- azimutem – směrem průmětu lineárního prvku do projekční roviny π ,
- sklonem – odklonem lineárního prvku od projekční roviny π .



Obr. 4.3 Určení lineárního prvku (čárkovaně) – azimut a sklon

Pomocí plošných prvků je možné zobrazit jakékoli rovinné plochy, například diskontinuity, foliace, roviny svahů, základové spáry objektů, čelní nebo zadní stěny zárubních či opěrných zdí.

Plošné prvky jsou určeny stopou a sklonem dané roviny nebo spádníci nebo normálou dané roviny (Drozd, 1974):

- stopa je průsečnice roviny plošného prvku s projekční rovinou π a sklon je úhel, který svírá plošný prvek s projekční rovinou
- spádnice má zadání shodné jako lineární prvek, kde sklon je sklon plošného prvku
- normála má zadání shodné jako lineární prvek, kde azimut a sklon je azimut a sklon kolmice k plošnému prvku

Prostorová tělesa, které jsou využitelná při řešení uvedených úloh, jsou kužele a klín.

Plášť rotačního kužele představuje hranici, na které jsou všechny přímky procházející vrcholem kužele (povrchové přímky kužele) odkloněné právě o daný úhel od osy kužele. V oblasti uvnitř resp. vně kužele jsou všechny přímky procházející vrcholem kužele odkloněné o menší resp. větší úhel než daný úhel od osy kužele.

Využití kužele v mechanice hornin je hlavně pro určení stability bloku horniny ležícího na diskontinuitě, jejíž úhel vnitřního tření odpovídá právě úhlu mezi povrchovou přímkou kužele a jeho osou a osa kužele je normála plochy této diskontinuity, takový kužel nazýváme bezpečnostní kužel. Stabilita je zajištěna pokud výslednice sil, která působí na blok horniny (může to být jen gravitace, nebo je přidán účinek stabilizačních prvků) svírá s normálou diskontinuity úhel menší než je úhel vnitřního tření. Pokud je tento úhel větší než úhel vnitřního tření, blok ležící na diskontinuitě není stabilní. Protože kužel vymezuje oblast, kde je úhel odklonu přímek uvnitř kužele menší než úhel

vnitřního tření, je stabilita zajištěna pokud je výslednice sil uvnitř kužele, pokud je výslednice sil vně kužele stabilita zajištěna není (Drozd, 1974).

Pokud se úhel tření nemění v závislosti na směru možného pohybu, kužel je rotační. Pokud se úhel tření mění na sledované ploše v závislosti na směru možného pohybu, jedná se o nesouměrné kuželovité těleso a průmět tohoto tělesa je nutné řešit postupně, jako průmět lineárních prvků odchýlených od průmětu normály o různý úhel tření.

Rotační kužel je v projekční kouli umístěn vždy svým vrcholem ve středu projekční koule **S** a je určen:

- osou rotace - přímkou, která je zadána jako lineární prvek, tedy azimutem a sklonem,
- úhlem, který svírají povrchové přímky kužele s osou rotace kužele.

Průmět tělesa – klínu (čtyřboký jehlan) – se využívá při posouzení stability podél dvou ploch, odkloněných vzájemně o známý úhel. Osou klínu je rovina γ procházející normálami obou sledovaných ploch. Normálou roviny γ je průsečnice posuzovaných diskontinuit. Jestliže výslednice vnějších sil je odkloněna od roviny γ o úhel menší než je úhel tření ϕ je případ stabilní, v případě že je výslednice vnějších sil odkloněna od roviny γ o úhel větší než je úhel tření ϕ je případ nestabilní. Hranicí krajního odklonu od roviny γ jsou dvě roviny odkloněné od normál diskontinuit právě o úhel tření ϕ . Klín je rovinně souměrný podle roviny γ v případě, že úhly tření jsou na obou diskontinuitách stejné a nesouměrný v případě, že úhly vnitřního tření jsou na diskontinuitách různé (Drozd, 1974).

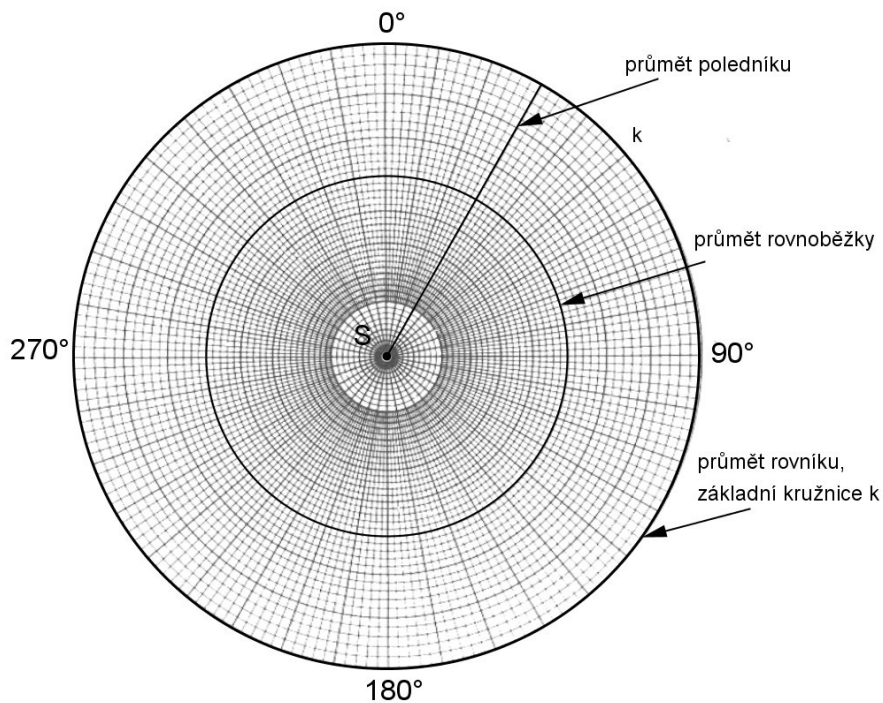
Ve stereografické projekci se klín promítá jako sférický čtyřúhelník, jeho stěny tvoří roviny, které se promítají jako oblouky velkých kružnic. Je určen:

- normálami dvou vyšetřovaných diskontinuit,
- úhly vnitřního tření na obou diskontinuitách.

4.3. Stereografická Wulfova síť v pólové a rovníkové projekci a další možnosti promítání

Stereografická síť umožňuje podstatné zjednodušení řešení úloh řešených ve stereografické projekci. Pomocí stereografických sítí je možné narýsovat přesný stereogram. Rýsuje se na průsvitku podloženou potřebnou sítí, využívá se otáčení kolem středového bodu **S** kružnice narýsované na průsvitce, který souhlasí se středovým bodem na stereografické síti.

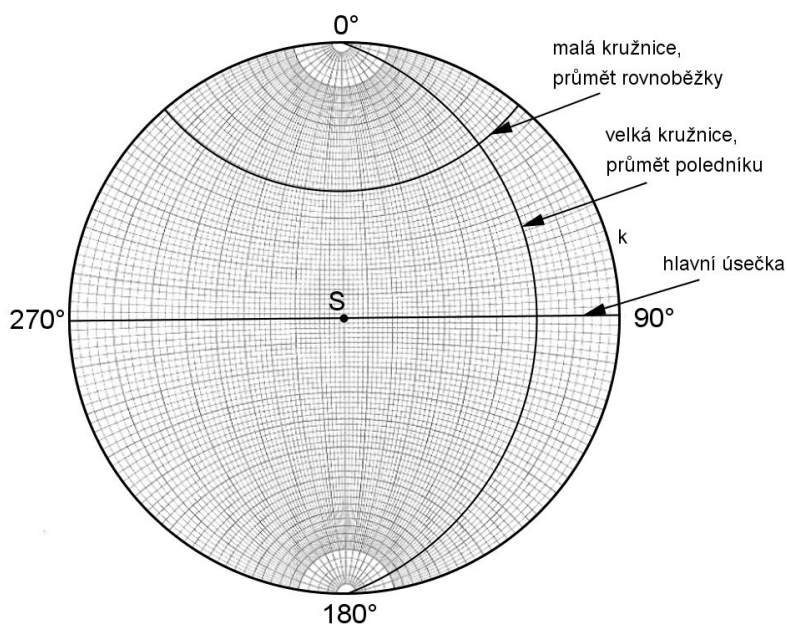
Na Wulfově síti v pólové projekci jsou stopy rovin poledníků paprscitě pravidelně rozprostřeny kolem středu **S** vystupňované v úhlové míře v rozmezí **0°** až **360°** a roviny rovnoběžek, které horizontálně sečou projekční kouli, se promítají jako malé soustředné kružnice kolem středu **S** vystupňované v úhlové míře v rozmezí **0°** až **90°**. Promítací rovina je umístěna v rovníkové rovině, takže kružnice představující rovník je totožná se základní kružnicí **k** (Obr. 4.4). Střed promítání je v případě promítání na spodní polokouli v místě severního pólu, v zenitu, nebo při promítání na horní polokouli v místě jižního pólu, v nadiru. Stereografická síť v pólové projekci je vyobrazena také v příloze 1 (Drozd, 1974).



Obr. 4.4 Stereografická Wulfova síť v pólové projekci

U Wulfovy sítě v rovníkové projekci prochází promítací rovina rovinou jednoho poledníku tak, že severní pól je nahoře, jižní pól dole. Pro představu si můžeme zvolit vertikální rovinu, procházející poledníkem $0^\circ - 180^\circ$ natočenou o 90° do vodorovné průmětny, kolem osy sever-jih. Poledníky se v daném případě promítají jako oblouky velkých kružnic, rovnoběžky se promítají jako oblouky malých kružnic se středy těchto kružnic v ose sever-jih (Obr. 4.5).

Síť v rovníkové projekci je tedy složená z velkých kružnic, které představují poledníky. Dále síť zobrazuje malé kružnice, které představují rovnoběžky. Pomocí dílkování malých kružnic na velkých je možné spočítat úhly v každé rovině. Poledník, který prochází zenitem a nadirem a ležící v rovině kolmé na promítací rovinu, se promítá jako úsečka (nebo jako velká kružnice o nekonečném poloměru) a nazývá se hlavní úsečka (Obr. 4.5). Stereografická síť v rovníkové projekci je vyobrazena v příloze 2 (Drozd, 1974).



Obr. 4.5 Stereografická Wulfova síť v rovníkové projekci

V příložených paletkách (přílohy č. 1 a 2) jsou oblouky velkých a malých kružnic i průměty rovin v pólové projekci vystupňovány po 2° , se zvýrazněním po 10° .

Pro stabilitní úlohy, které jsou v práci rozvedeny, byla využita stereografická metoda v úhlojevné projekci s promítáním na spodní polokouli. Výhodou stereografické metody v úhlojevné projekce oproti plochojevné projekci je to, že v úhlojevné projekci se všechny řezy projekční koule promítají jako kružnice nebo oblouky velkých kružnic. U plochojevné projekce se řezy sférickou koule promítají jako ovály a konstrukční řešení jsou složitější. Pro plochojevnou projekci byly také sestaveny paletky v pólové a rovníkové projekci (Lambertova/Schmidtova síť - přílohy č. 4 a 5) a lze tak také úspěšně řešit uvedené příklady, tuto síť je vhodné využívat pro statistické zpracování.

Pro úlohy, které lze řešit jen pro horní nebo spodní polokouli lze použít řešení s pomocí paletek. Pro kombinované úlohy, například pro určení výslednice vektorů vnějších sil s orientací na spodní i horní část sférické koule, pro práci vně základní kružnici **k** paletky většinou nejsou k dispozici a je nutné použít konstrukční řešení, tato možnost je výhodou úhlojevné projekce.

Mezi další sítě patří např. síť úhlojevná Boldyrevova, dále rovnoplochá síť, která je vhodná pro statistické zpracování a Postelova síť s ekvidistantním dělením, která umožňuje pomocí dvou typů průsvitek řešit stabilitní příklady (Pavlík, 1981). Tyto sítě promítají roviny do bodů jejich tečného dotyku s projekční koule, nezobrazují je jako velké oblouky kružnic a znesnadňují tím prostorovou představivost hotového diagramu.

4.4. Podnět zavedení stereografických metod – přehrada Malpasset

Klenbová přehrada Malpasset, poblíž města Fréjus, ve Francii, se zřítila 2.12. 1959. Neštěstí se stalo národní katastrofou, část města Fréjus bylo zaplaveno a zničeno a přes 400 lidí zemřelo. Z oficiální zprávy ani z výpovědí expertů, kteří se problémem zabývali, nebylo možné po několik let objasnit příčinu katastrofy a kvůli neobjasnitelné katastrofě se dokonce začalo pochybovat o bezpečnosti podobných klenbových přehrad. Zřícení bylo podnětem pro vypracování studie, kde byly poprvé použity stereografické metody. Na obr. 4.6 je fotografie zřícené přehrady, je vidět vylomení v betonu hráze na pravém břehu.



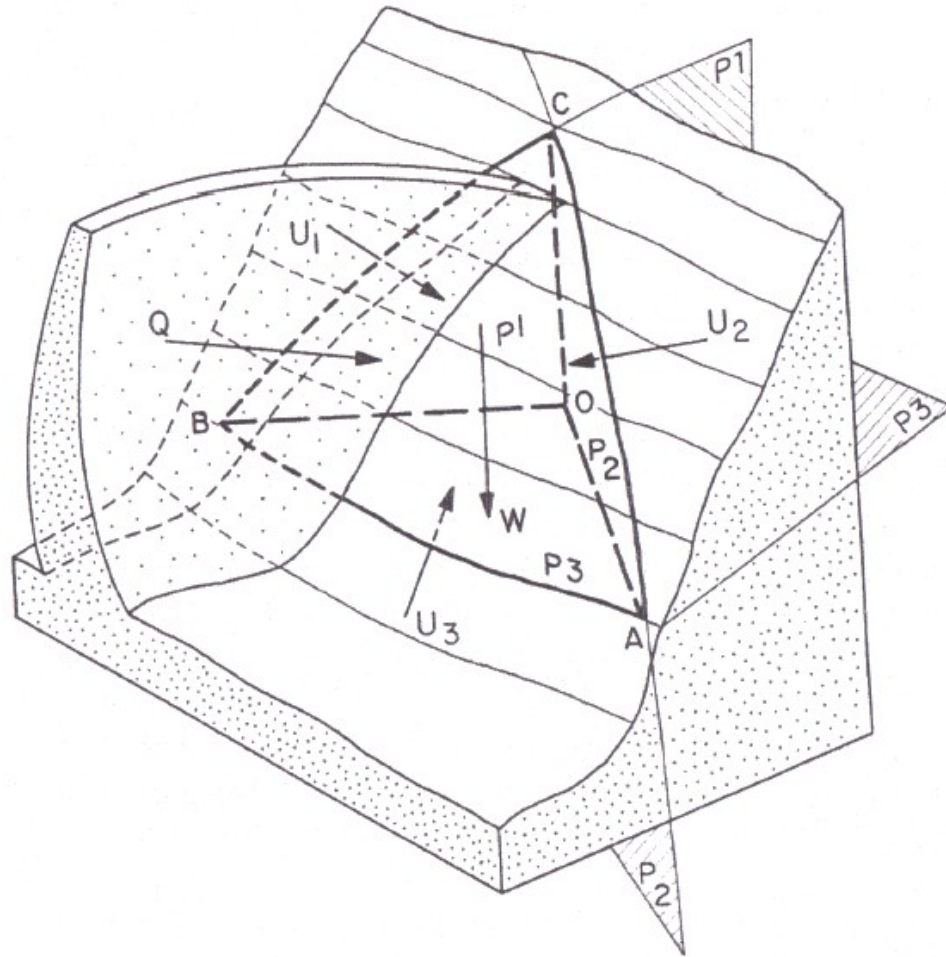
Obr. 4.6 Zřícení přehrady Malpasset - vylomení v betonu hráze na pravém břehu (archiv K. Drozd)

Zřícení přehrady Malpasset pravděpodobně zapříčinil pomalý vývoj koncentrace napětí. Protože masiv nebyl rozpukán, u paty přehrady vznikly tahová napětí a pomalu narůstaly hlouběji do masivu. Koncentrace tlakových napětí stlačila rozpukané ruly pod přehradou a způsobila, že se staly nepropustné. Naopak masiv pod patou přehrady a nad ní proti proudu se kvůli působícím tahovým napětím stal velmi propustným (Jaeger, 1972). Těmito tlaky došlo k vysunutí čtyřstěnu z horniny (fotografie na obr. 4.7), což spustilo destrukci přehrady.



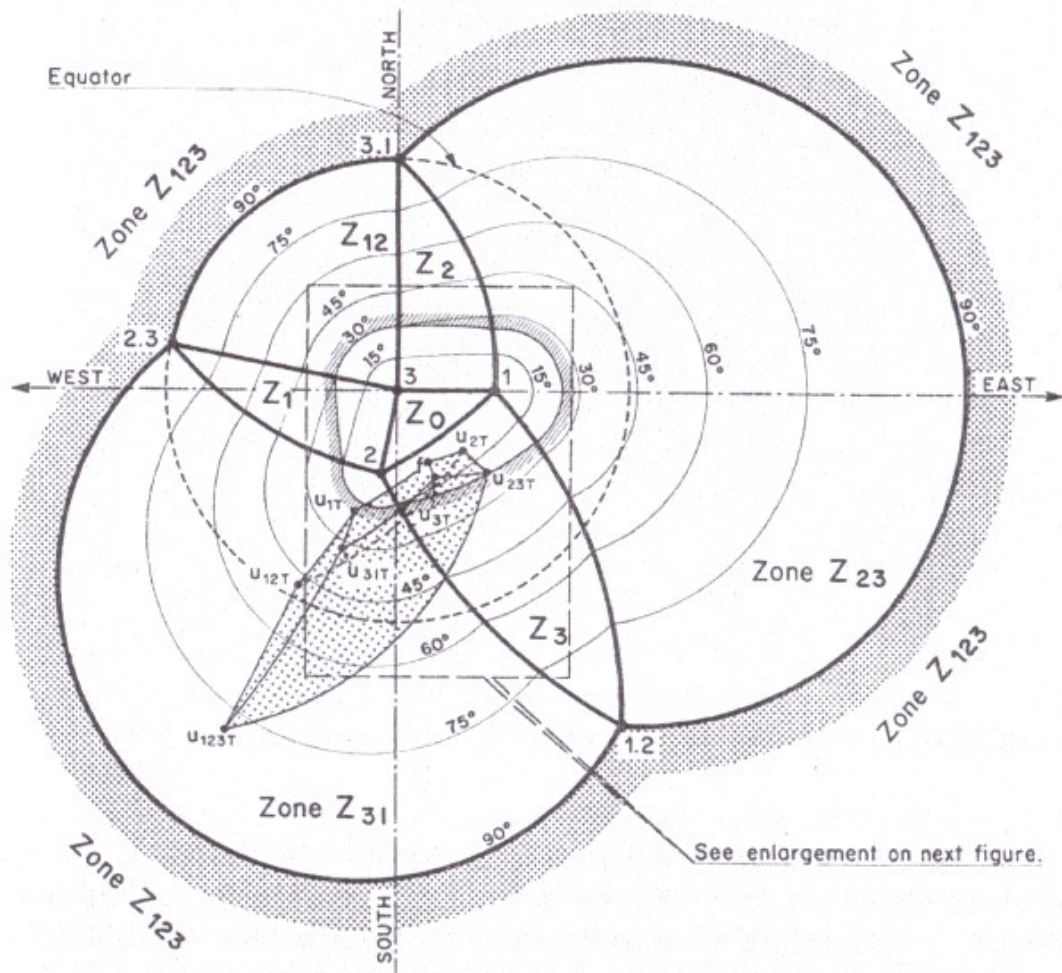
Obr. 4.7 Zřícení přehrady Malpasset – čtyřstěn v hornině na levém břehu (archiv K. Drozd)

Obecný čtyřstěn **OABC** je na obr. 4.8, kde jeho stěny tvoří diskontinuity - roviny **P1**, **P2**, **P3** a rovina svahu. **W** je tíha čtyřstěnu, **Q** představuje proměnlivý boční tlak klenbové přehrady, který závisí na výšce hladiny vody v přehradě. **U₁**, **U₂**, **U₃** jsou vztahové síly působící na odpovídající roviny, které opět závisí na výšce hladiny v přehradě (Londe et al., 1970).



Obr. 4.8 Čtyřstěn pro hodnocení stability klenbové přehrady, označení vysvětleno v textu (Londe et al., 1970)

Pro čtyřstěn vysunutý z břehu přehrady Malpasset byl sestrojen bezpečnostní sférický mnohoúhelník (Obr. 4.9). Body **1**, **2** a **3** jsou průměty os bezpečnostních kuželů a normály ploch **P1**, **P2**, **P3** (rovina **P3** je svislá a bod **3** je tedy ve středu základní kružnice, která je vyznačena čárkovaně). Bezpečnostní kužele jsou vykresleny pro úhly vnitřního tření **15°**, **30°** (zvýrazněno v obr. 4.9), **45°**, **60°**, **75°**, **90°**. Vyšrafovaná oblast je oblast, ve které se pohyboval průmět výslednice vnějších sil, tedy i proměnlivých vztlaků na tři dané diskontinuity v závislosti na plnění nádrže. Jakmile výslednice vnějších sil překročila sférickou oblast vymezenou zvoleným úhlem tření **30°**, případ se stal nestabilní (Londe et al., 1970).



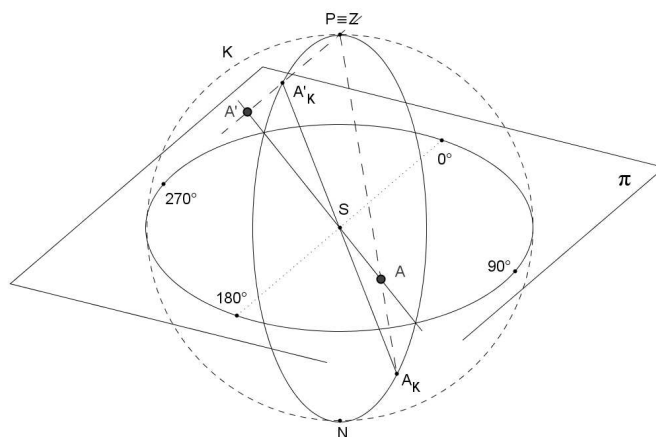
Obr. 4.9 Bezpečnostní sférický mnohoúhelník pro zhodnocení stability ohroženého čtyřstěnu přehrady Malpasset (Londe et al., 1970)

5. Princip zobrazení lineárních a plošných prvků a těles ve stereografické projekci

5.1. Lineární prvek

5.1.1. Princip zobrazení lineárního prvku na spodní polokouli s pólem v zenitu

Princip zobrazení lineárního prvku na spodní polokouli v několika krocích (obr. 5.1):



Obr. 5.1

- Přenesení lineárního prvku při zachování orientace (azimutu a sklonu) do středu projekční koule S . Myšlená přímka, která takto vznikne, prochází bodem S a protíná projekční kouli v bodech A_K a A'_K . Bod A_K je na opačné polokouli než je pól, tedy na spodní polokouli, protože promítáme přes zenit Z . Bod A'_K je na stejné polokouli jako pól P , v tomto případě na vrchní.
- Přímka spojující zenit Z a bod A_K vytváří bod A v místě, kde tato přímka protíná projekční rovinu π .
- Bod A v projekční rovině je stereografickým průmětem daného lineárního prvku. Stereografickou projekcí lineárních prvků jsou tedy body.
- Na průsečíku přímky, která prochází bodem A a středem S projekční koule s přímkou, která spojuje zenit Z a bod A'_K leží bod A' . Bod A' se označuje jako inverzní bod k bodu A .

Promítání lineárních prvků na vrchní polokouli je obdobné. Průsečík myšlené přímky lineárního prvku a projekční koule je bod A_K a je na vrchní polokouli. Pól promítání P je v nadiru N , bod A je tedy průsečíkem projekční roviny a přímky spojující bod A_K a nadir N .

5.1.2. Zobrazení lineárního prvku ve stereografické projekci na spodní polokouli z pólu v zenitu

a) Zadání

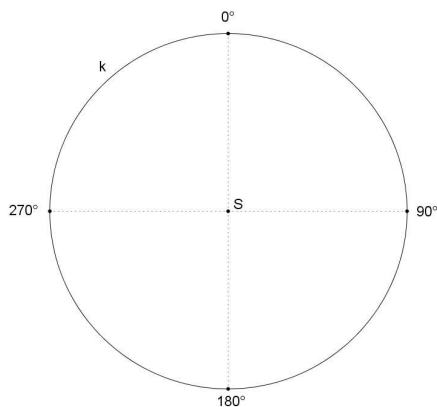
Lineární prvek **A** je zadán $\mathbf{A}(120^\circ / 30^\circ)$, tedy svým azimutem $\mu = 120^\circ$ a sklonem $\nu = 30^\circ$.

Lineární prvek **A** budeme chápat jako úsečku mezi body povrchu projekční koule \mathbf{A}_K a \mathbf{A}_K' procházející středem **S** koule **K**.

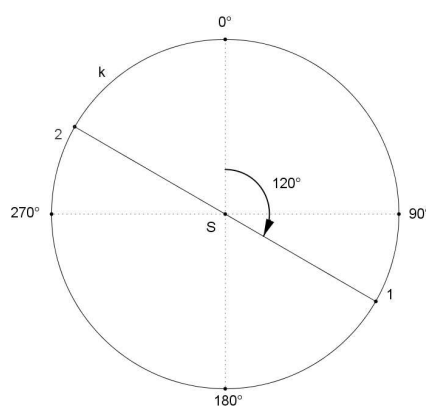
b) Konstrukční řešení

Rýsujeme v zobrazovací rovině π .

1. Narýsujeme základní kružnici **k** se středem **S**.
2. Na kružnici **k** vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček (Obr 5.2).
3. Narýsujeme přímku $\overline{\mathbf{12}}$ procházející středem **S** pod orientovaným úhlem 120° , bod **1** leží na kružnici **k** pod orientovaným úhlem 120° , bod **2** leží na kružnici **k** pod orientovaným úhlem $300^\circ (= 120^\circ + 180^\circ)$ a je inverzní k bodu **1** (Obr 5.3).



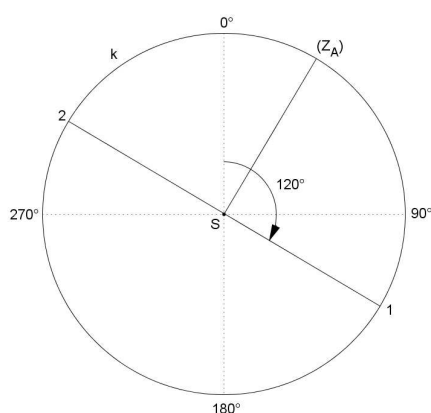
Obr. 5.2



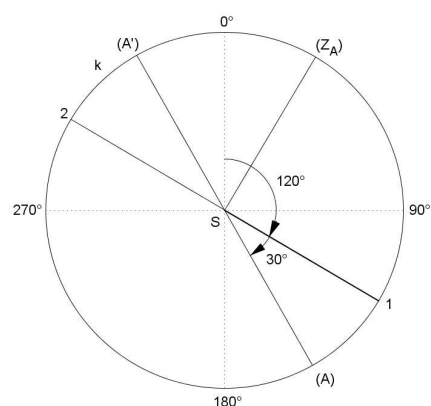
Obr. 5.3

4. Rovina určená přímkou $\overline{\mathbf{12}}$ a kolmá k zobrazovací rovině π je vertikální azimutová rovina α_A příslušná k lineárnímu prvku **A**.
5. Ve vertikální azimutové rovině α_A příslušné k lineárnímu prvku **A** leží kružnice k_A , která má střed v bodě **S** a obsahuje tři body a to **Z** (zenit) a body **1** a **2**.

6. Po otočení azimutové roviny α_A o 90° na jednu či druhou stranu podél úsečky $\overline{12}$ bude projekční bod Z (zenit) sklopen do roviny průmětny π do bodu (Z_A) . Tento sklopený bod (Z_A) bude zobrazený jako průsečík kružnice k a kolmice k přímce $\overline{12}$ z bodu S (Obr 5.4).
7. Nyní je azimutová rovina α_A sklopená a je shodná se zobrazovací rovinou π , tedy kružnice k a k_A splynou. Orientace na azimutové kružnici k_A je $(Z_A) - 0^\circ$, bod $1 - 90^\circ$ a bod $2 - 270^\circ$.
8. Podle orientace azimutové kružnice zobrazíme na kružnici k bod (A) (sklopené zobrazení lineárního prvku A) tak, aby orientovaný úhel $1S(A)$ byl 30° . Pod orientovaným úhlem $210^\circ (= 30^\circ + 180^\circ)$ zobrazíme na kružnici k bod (A') jako inverzní bod k bodu (A) (Obr 5.5).

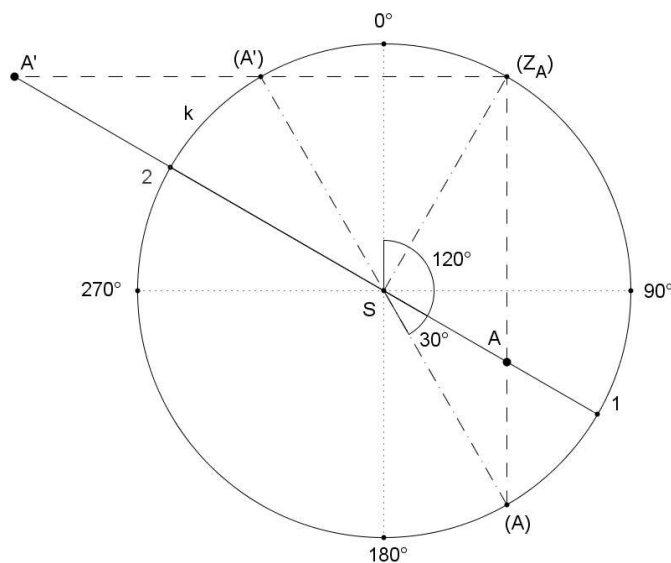


Obr. 5.4



Obr. 5.5

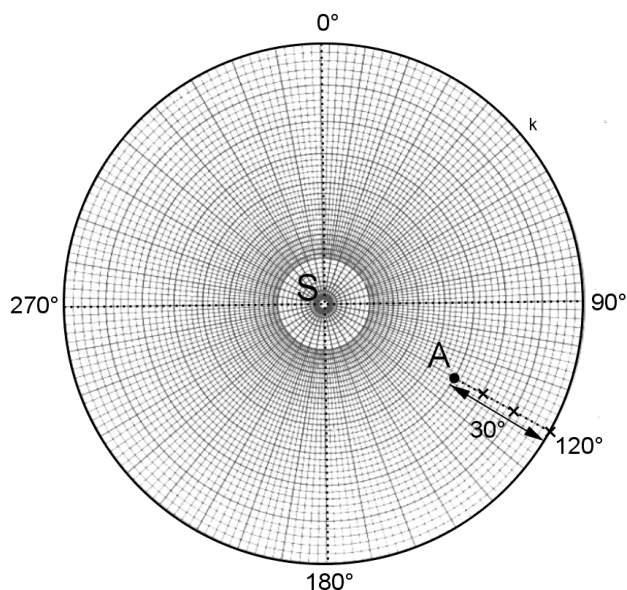
9. V nesklopené azimutové rovině spojnice bodu Z a bodu A_k protíná zobrazovací rovinu v bodě A , ve kterém je výsledek zobrazení lineárního prvku A ve stereografické projekci.
10. Po sklopení azimutové roviny je průsečík A v zobrazovací rovině průsečíkem přímky $\overline{12}$ a úsečky $\overline{(Z_A)(A)}$. Tento průsečík si označíme písmenem A . Podobně pro inverzní bod (A') bude průsečík přímky $\overline{12}$ a přímky $\overline{(Z_A)(A')}$ zobrazení lineárního prvku A do inverzního bodu A' . Inverzní bod A' leží vně základní kružnice k (Obr. 5.6).



Obr. 5.6

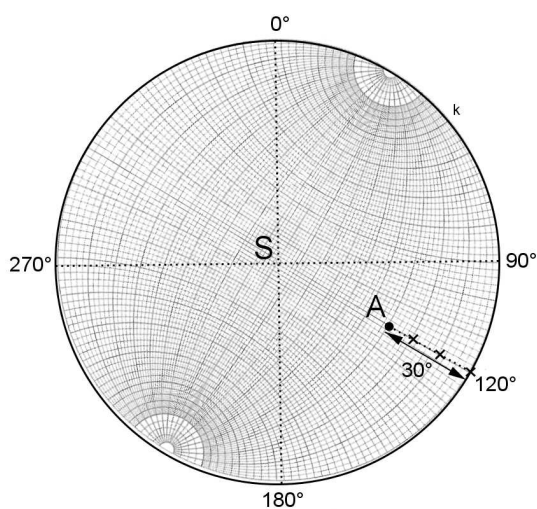
c) Řešení pomocí Wulfových sítí

Přes Wulfovou síť v pólové projekci položíme průsvitku, narýsujeme střed a obvodovou kružnici shodnou s Wulfovou sítí, označíme si orientaci pomocí severního bodu – 0° . Azimut 120° lineárního prvku **A** najdeme na obvodu Wulfovy sítě a označíme. Sklon 30° odpočítáme z průmětu vystupňovaných kružnic, délky počítáme od obvodu (zvýrazněné kružnice značí desítky), zde označíme bod **A**, který je stereografickou projekcí lineárního prvku **A** (Obr. 5.7).



Obr. 5.7

Druhou možností je použití sítě v rovníkové projekci. Na obvodu sítě označíme azimut 120° , poté otočíme síť tak, aby hlavní úsečka splýnula s pomyslnou přímkou spojující střed a označený azimut a odpočítáním dílků sklonu 30° na hlavní úsečce od obvodu sítě najdeme bod **A** (Obr. 5.8). Tím je určena stereografická projekce lineárního prvku **A**. Tento postup je výjimečný, není-li k dispozici paletka v pólové projekci.



Obr. 5.8

Pomocí paletek nelze určit inverzní bod **A'** vně kružnice **k** v projekční rovině.

5.1.3. Určení azimutu a sklonu lineárního prvku z daného zobrazení průmětu - inverzní operace k zobrazení lineárního prvku

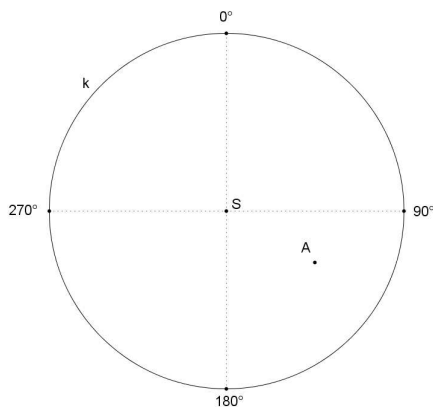
Tato úloha je inverzní operace k zobrazení lineárního prvku. Pro řešitelnost úlohy je nutné mít zadané: Základní kružnici k , pól zobrazení a průmět zobrazení lineárního prvku A .

a) Zadání

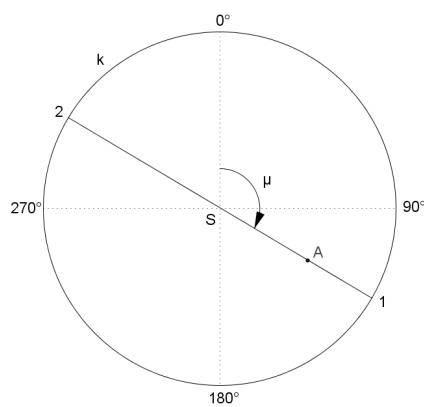
Je dána základní kružnice k , bod A a pól zobrazení je v Zenitu Z (Obr 5.9). Úlohou je nalézt azimut μ a sklon v lineárního prvku A .

b) Konstrukční řešení

1. Body 1 a 2 jsou průsečíky základní kružnice k a přímky \overline{SA} .
2. Azimut μ je úhel mezi úsečkami $\overline{0^\circ S}$ a \overline{SA} .
3. Úsečka $\overline{12}$ určuje průsečnici vertikální azimutové roviny α_A s rovinou průmětny π (Obr 5.10).



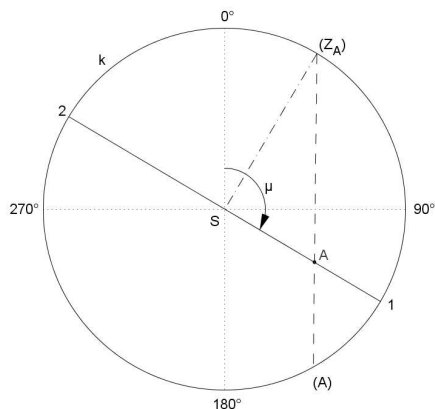
Obr. 5.9



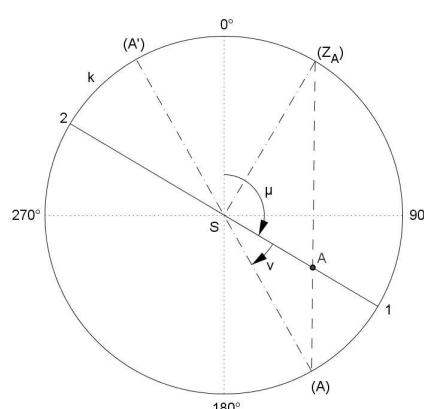
Obr. 5.10

4. Průsečík kolmice k úsečce $\overline{12}$ ze středu S a kružnice k určuje bod (Z_A) jako zobrazení Zenitu Z z azimutové roviny α_A do zobrazovací roviny π . Vertikální rovinu α_A obsahující body $1, 2$, střed promítací koule S , zenit Z a bod A sklopíme na jednu nebo druhou stranu. Průsečík přímky dané body $(Z_A), A$ a kružnice k určuje sklopený bod (A) . Bod (A) je zobrazení lineárního prvku A z azimutové roviny α_A do zobrazovací roviny π (Obr 5.11)

5. Sestrojíme přímku $\overline{(A)S}$. Hledaný úhel sklonu v je úhel mezi úsečkami $\overline{1S}$ a $\overline{S(A)}$ (Obr 5.12).

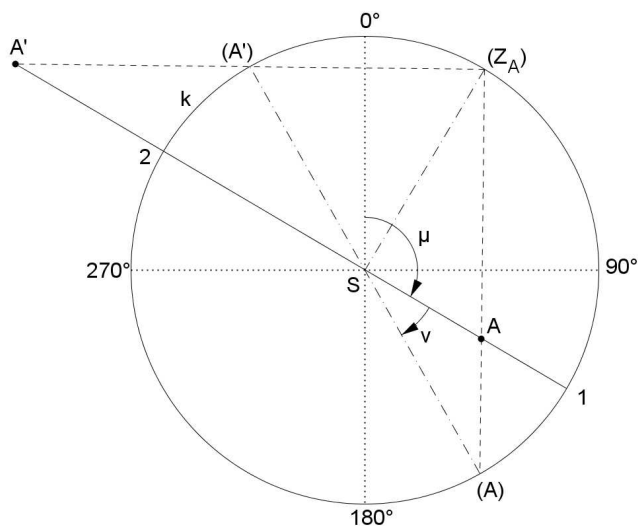


Obr. 5.11



Obr. 5.12

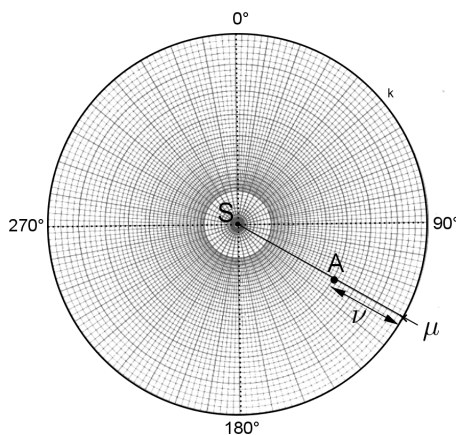
6. U některých úloh je účelné zobrazit i polohu inverzního bodu A' . Přímka $(A)S$ protíná kružnici k v sklopeném bodě (A') , bod (A') je zobrazení inverzního bodu lineárního prvku A z azimutové roviny α_A do zobrazovací roviny π . Průsečík přímky 12 a přímky $(Z_A)(A')$ je zobrazení inverzního prvku - bodu A' k lineárnímu prvku - bodu A . Inverzní prvek - bod A' leží vně kružnice k (Obr 5.13).



Obr. 5.13

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

1. Přes Wulfovou síť v pólové projekci položíme průsvitku se zadaným bodem A a základní kružnici k tak, aby severní směr 0° na narýsované základní kružnici k a střed S odpovídal severnímu směru 0° na Wulfově síti a středu sítě.
2. Narýsujeme polopřímku s počátkem v bodě S procházející bodem A a v místě, kde protne kružnici k odečteme na obvodu Wulfovy sítě azimut μ , μ je tedy úhel mezi úsečkou SO° a průmětem vertikální roviny, obsahující lineární prvek A .
3. Odpočítáním dílků průmětů vystupňovaných rovnoběžek mezi bodem A a obvodem základní kružnice k zjistíme sklon ν (Obr 5.14).
4. Při použití paletky s Wulfovou sítí nelze stanovit inverzní bod.



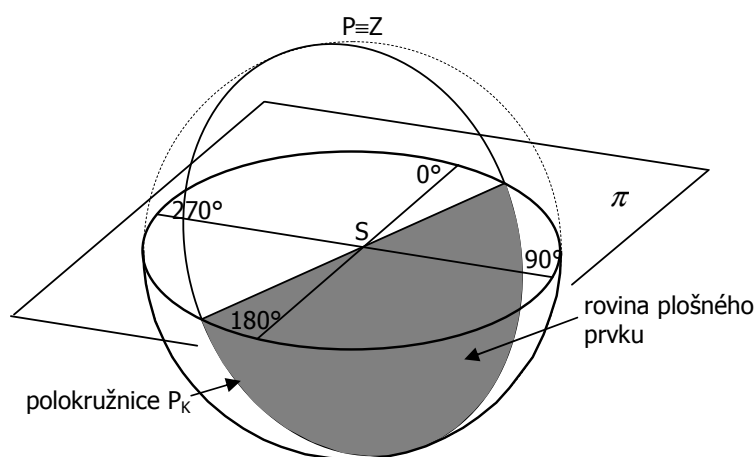
Obr. 5.14

5.2. Plošný prvek

5.2.1. Princip zobrazení plošného prvku na spodní polokouli s pólem v Zenitu

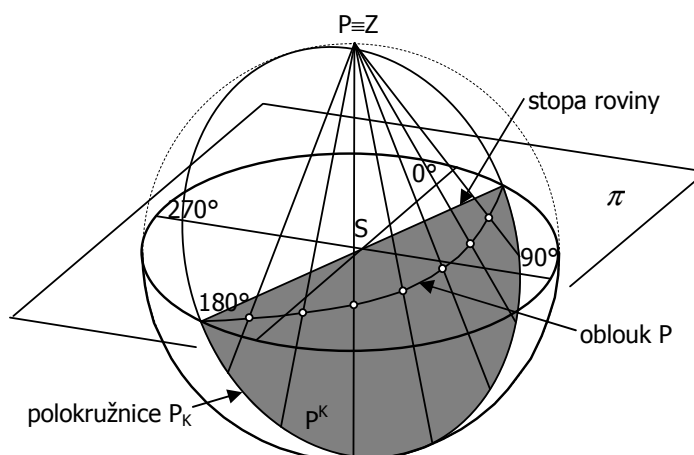
Podobným principem jako lineární prvky jsou zobrazeny plošné prvky na spodní polokouli na obr. 5.15:

- a) Přenesení roviny do centra projekční koule S tak, aby rovina plošného prvku protínala střed projekční koule S . Rovina plošného prvku tedy protíná projekční kouli v kružnici. Pro projekci na spodní polokouli uvažujeme pouze tu část kružnice, polokružnici P_K , která je na spodní polokouli (Obr 5.15).



Obr. 5.15

- b) Přímky spojující body polokružnice P_K se zenitem Z protínají projekční rovinu tak, že tyto průsečíky vytváří na projekční rovině oblouk (přímek, a tedy i průsečíků je nekonečně mnoho, obrázek ukazuje pro názornost jen některé, přímky vytvářejí v prostoru kosý kužel). Úsečka, která je tvořena průtuhem roviny plošného prvku a projekční roviny, prochází tedy středem S , se nazývá stopa roviny (Obr 5.16).



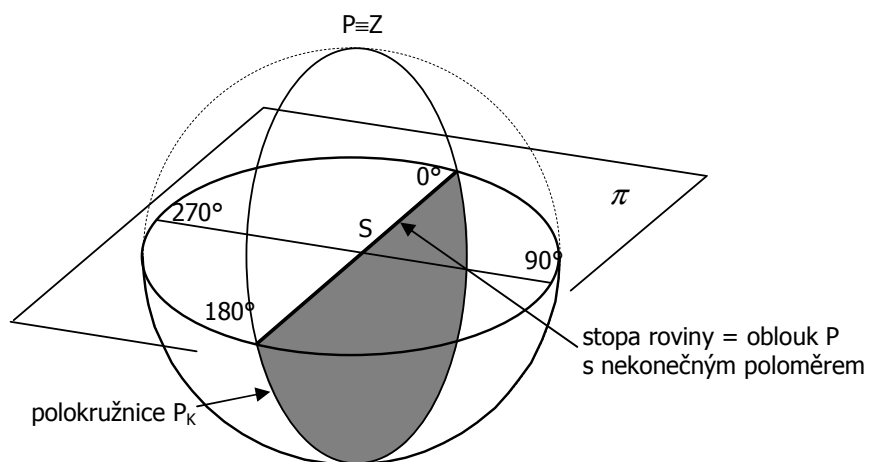
Obr. 5.16

- c) Oblouk P na projekční rovině je stereografickým průmětem daného plošného prvku. Stereografickou projekcí plošných prvků jsou tedy oblouky s názvem oblouky velkých kružnic.

Promítání plošných prvků na vrchní polokouli je obdobné. Z dané roviny uvažujeme pouze polokružnici, která je na vrchní polokouli. Střed promítání je v nadiru **N**, oblouk **P** tedy vytváří průsečíky projekční roviny a přímek spojujících body na oblouku **P** a nadir **N**.

Speciální případy:

Vertikální roviny, které jsou kolmé na rovinu projekce, tvoří protnutím projekční koule polokružnice **P**, které procházejí opačným pólem projekční koule než je pól promítání. Jejich projekce na projekční rovinu tedy není oblouk, ale úsečka, tedy vlastně oblouk velké kružnice o nekonečném poloměru (Obr 5.17).



Obr. 5.17

5.2.2. Zobrazení plošného prvku ve stereografické projekci na spodní polokouli z pólu v zenitu

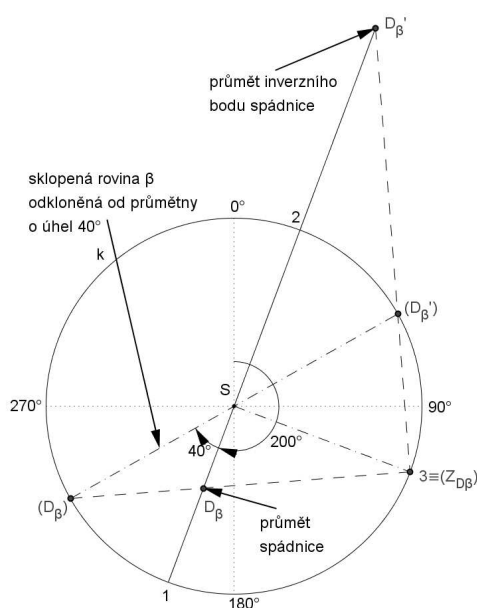
a) Zadání

Rovina $\beta(200^\circ / 40^\circ)$ je určena azimutem a sklonem spádnice $D_\beta(200^\circ / 40^\circ)$, tedy lineárním prvkem, který budeme chápat jako úsečku mezi body na povrchu projekční koule $D_{\beta K}$ a $D_{\beta K'}$ procházející středem S .

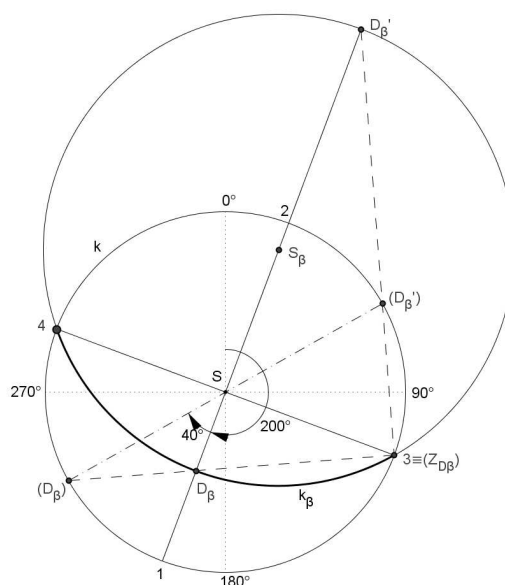
b) Konstrukční řešení

Rýsuje v zobrazovací rovině π . Řešení je zprvu obdobné jako při zobrazování lineárního prvku.

1. Narýsuje základní kružnici k se středem S .
2. Na kružnici k vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
3. Zobrazíme spádnici roviny β , $D_\beta(200^\circ / 40^\circ)$ ve stereografické projekci jako lineární prvek podle bodů 3 až 9 předchozího postupu v 5.1.1. Vznikne bod D_β na průsečíku přímky dané body 1 a 2 a úsečky dané body (D_β) a (Z_{D_β}) a inverzní bod $D_{\beta'}$ na průsečíku dané body 1 a 2 a přímky dané body $(D_{\beta'})$ a (Z_{D_β}) . Body (D_β) , $(D_{\beta'})$ a (Z_{D_β}) jsou pomocné sklopené body odpovídající bodům D_β , $D_{\beta'}$ a zenitu. Bod D_β a inverzní bod $D_{\beta'}$ je zobrazení lineárního prvku dané spádnice (Obr. 5.18).
4. Úsečka $\overline{D_\beta D_{\beta'}}$ představuje průměr tak zvané velké kružnice k_β , bod S_β je střed této úsečky a je středem velké kružnice k_β . Průsečíky kružnice k a kružnice k_β jsou body 3 a 4 . Bod 3 je totožný s bodem sklopeného zenitu (Z_{D_β}) . Úsečka $\overline{34}$ je průsečnice roviny β se zobrazovací rovinou π a nazývá se stopa roviny β . Zvýrazněný oblouk velké kružnice k_β mezi body 3 a 4 obsahující bod D_β představuje zobrazení průniku roviny β s polokoulí projekční koule (Obr 5.19).

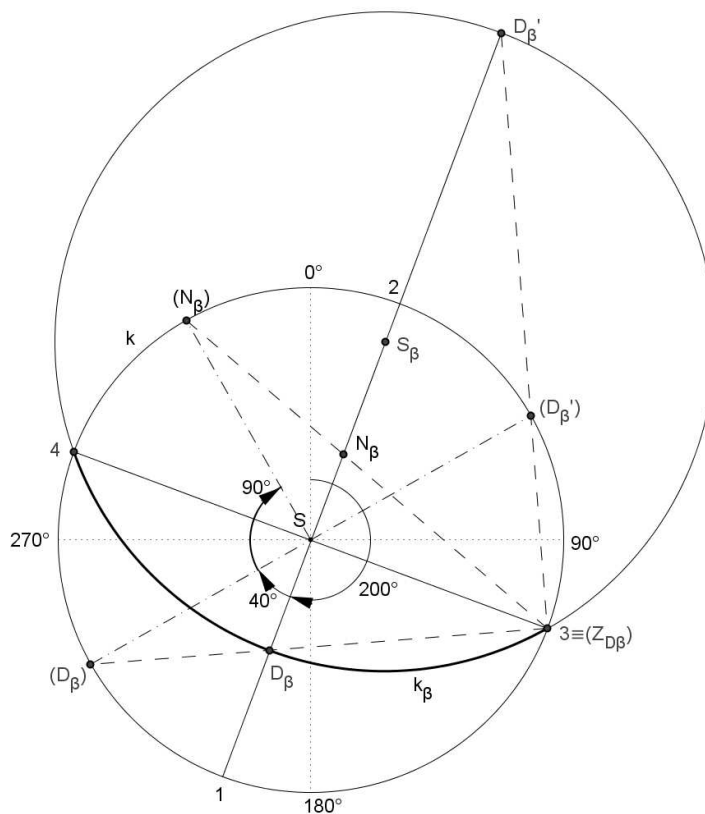


Obr. 5.18



Obr. 5.19

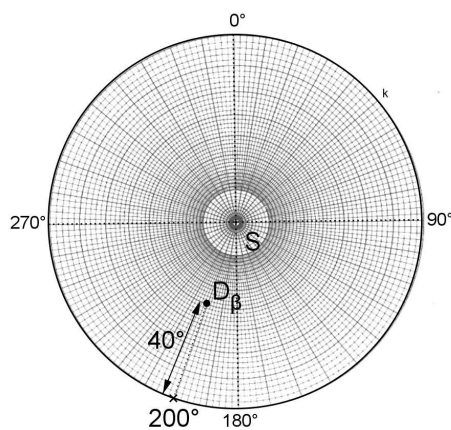
5. Úlohu doplňujeme o stanovení průmětu normály ke zvolené rovině se spádnicí $D_\beta(200^\circ / 40^\circ)$. V prostoru leží normála k rovině β v azimutové rovině α_{D_β} a je kolmá na spádnici D_β . Po otočení azimutové roviny α_{D_β} o 90° podle přímky $\overline{12}$ do zobrazovací roviny π leží sklopený pomocný bod normály (N_β) na obvodu kružnice k . Úsečka $\overline{(N_\beta)S}$ je kolmá na sklopený průmět spádnice, úsečku $\overline{(D_\beta)(D_\beta')}$.
6. Průsečík přímky dané sklopeným bodem normály (N_β) se sklopeným zenitem (Z_{D_β}) a přímky dané průmětem spádnice D_β a D_β' , dostaneme průmět kolmice k rovině β v bodě N_β . Tím je vyřešena úloha průmětu spádnice D_β , průmětu roviny β formou zvýrazněného oblouku velké kružnice k_β a průmětu normály N_β k dané rovině β (Obr 5.20).



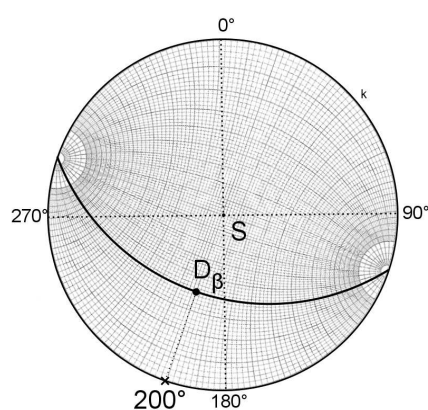
Obr. 5.20

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

Přes paletku s Wulfovou sítí v pólové projekci položíme průsvitku a narýsujeme střed **S** a obvodovou kružnici shodně s paletkou Wulfovy sítě, označíme si orientaci pomocí severního bodu 0° . Azimut 200° roviny β najdeme na obvodu sítě a označíme. Od obvodu sítě odpočítáme sklon 40° , zde označíme bod **D_β** (značí spádnicí dané roviny, je možné ji nalézt i pomocí sítě v rovníkové projekci - viz lineární prvek 5.1.2.c). Zobrazení bodu **D_β** je na obrázku 5.21. Nyní vyměníme Wulfovou síť v pólové projekci za Wulfovou síť v rovníkové projekci a natočíme průsvitku tak, aby bod **D_β** byl na hlavní úsečce sítě a zároveň aby střed **S** odpovídal středu sítě, kružnice na průsvitce tedy bude odpovídat obvodové kružnici Wulfovy sítě. Překreslíme oblouk velké kružnice na síti, kterému odpovídá bod **D_β** tak, jak je vyobrazeno na obrázku 5.22. Tento oblouk velké kružnice je stereografickou projekcí plošného prvku, roviny $\beta(200^\circ / 40^\circ)$. Bod **D_β** je stereografickou projekcí spádnicí k této rovině.



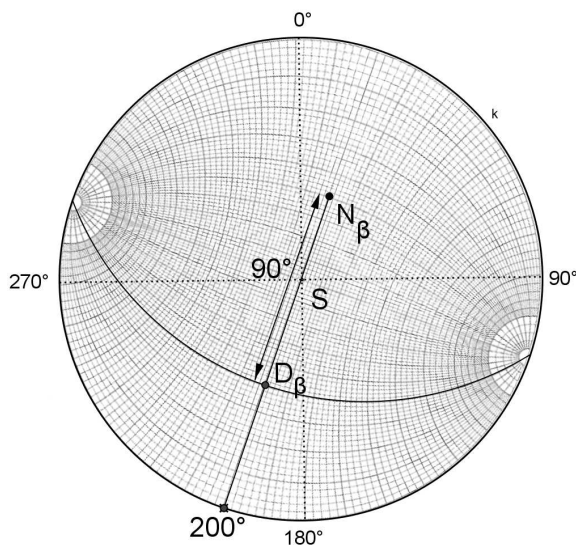
Obr. 5.21



Obr. 5.22

Zobrazení průmětu normály k rovině $\beta(200^\circ / 40^\circ)$:

Průmět normály **N_β** k rovině β najdeme pomocí sítě v pólové nebo rovníkové projekci odpočítáním úhlu 90° od bodu **D_β**, odečtení dílků v případě sítě v rovníkové projekci se provádí na hlavní úsečce, viz obrázek 5.23.



Obr. 5.23

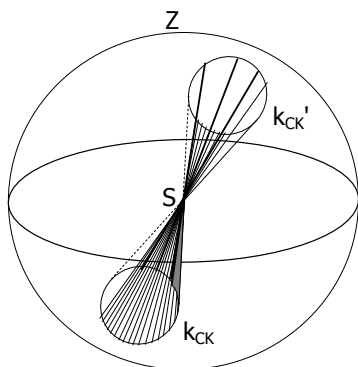
5.3. Rotační kužel

5.3.1. Princip zobrazení kužele na spodní polokouli s pólem v zenitu

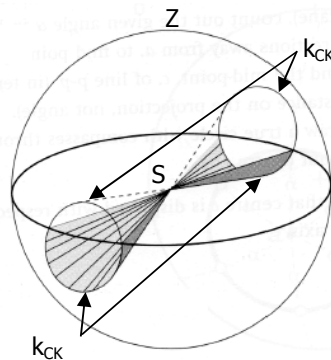
Tato dílčí úloha se využívá při stabilních řešeních na planární ploše nějaké diskontinuity. Jedná se o zobrazení průmětu průniku pláště kužele, jehož vrchol je ve středu zobrazovací koule, s povrchem zobrazovací koule. V úhlojevné projekci je tímto průmětem kružnice, čímž je zvýhodněna úhlojevná projekce oproti jiným projekcím.

Princip zobrazení kužele na spodní polokouli je vyobrazen na obr. 5.24 a 5.25 v několika krocích:

- Přenesení kužele při zachování orientace (azimutu a sklonu osy rotace) jeho vrcholem do středu projekční koule **S**. Středově symetrické dva kužely tedy vytínají na ploše projekční koule dvě kružnice **k_{CK}** a **k_{CK'}**, viz obrázek 5.24.
- Pro projekci na spodní polokouli uvažujeme jen tu kružnici, nebo ty části kružnic, které leží na spodní polokouli projekční koule. Přímkami, které spojují body těchto částí kružnic se zenitem **Z** procházejí přes základní rovinu a vytváří na ní kružnice (tato kružnice může být rozdělena na oblouky pokud kužel zasahuje jednou svojí stranou do spodní i vrchní polokoule, projekce tedy uvažuje ty části na obou stranách kužele, které jsou na spodní polokouli, viz obr. 5.25).



Obr. 5.24

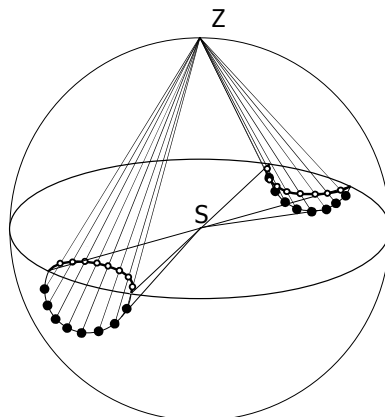


Obr. 5.25

- Kružnice (nebo její části) na základní rovině, která takto vznikne, je stereografickým průmětem daného kužele (Obr. 5.26).

Stereografickou projekcí pláště kužele, jehož průnik s pláštěm projekční koule je kružnice, je v projekční rovině také kružnice, případně její část, oblouk. Tyto kružnice jsou označovány názvem malé kružnice, případně oblouky malých kružnic.

V jiném pojetí lze tyto malé kružnice, případně oblouky malých kružnic představit jako průměty sečných rovin protínajících zobrazovací kouli.



Obr. 5.26

5.3.2. Zobrazení kužele ve stereografické projekci na spodní polokouli z pólu v zenitu

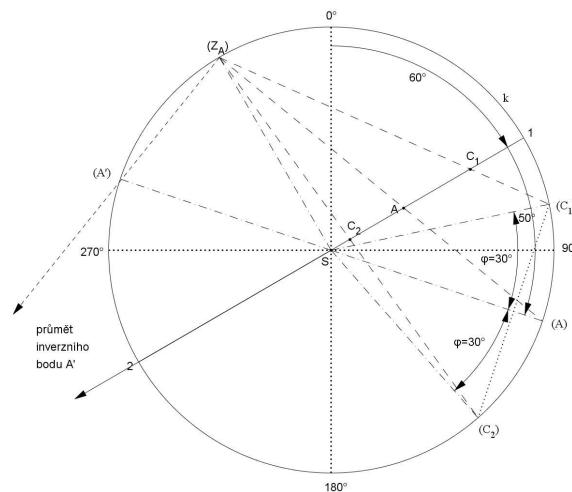
a) Zadání

Kužel je zadán svojí osou: lineárním prvkem $A(60^\circ/50^\circ)$ a úhlem mezi povrchovou přímkou kužele a jeho osou $\varphi = 30^\circ$.

b) Konstrukční řešení

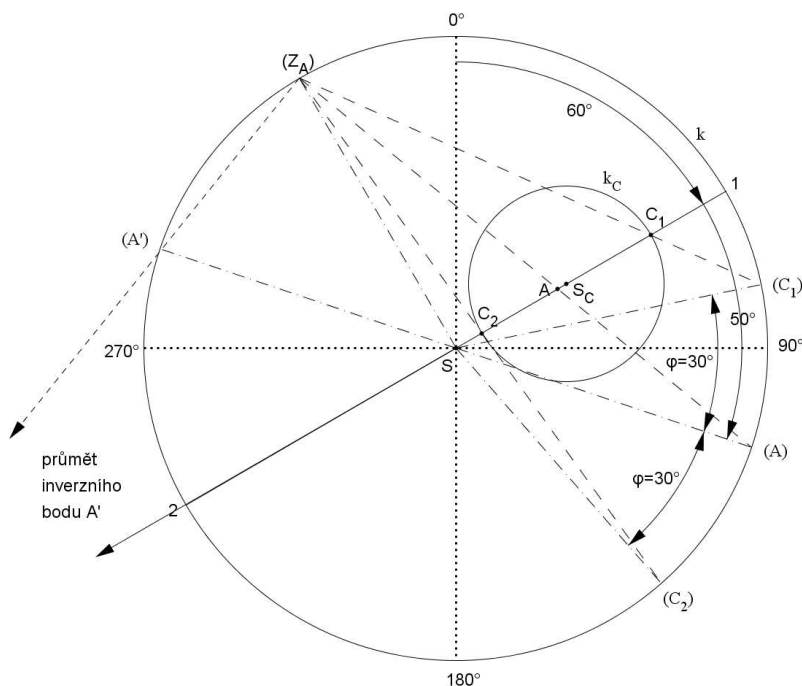
Rýsuje v zobrazovací rovině π .

1. Narýsuje základní kružnici k se středem S .
2. Na kružnici k vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
3. Podle bodů 3-9 v předchozím postupu 5.1.2 zobrazíme osu kužele, lineární prvku $A(60^\circ/50^\circ)$.
4. Sklopením vertikální azimutové roviny α_A podél stopy této roviny, úsečky $\overline{12}$, procházející středem základní kružnice S , na jednu nebo druhou stranu, získáme polohu sklopeného zenitu (Z_A) a sklopený bod (A) , odkloněný od osy otáčení o 50° . Průmět osy kužele, bod A je průsečík úseček $\overline{(Z_A)A}$ a $\overline{12}$ (Obr. 5.27). Lze získat i průmět inverzního sklopeného bodu (A') a jeho průmět A' (nevykreslen).
5. Odklon úhlu vnitřního tření φ od lineárního prvku A určuje kužel s vrcholem ve středu projekční koule S , s osou danou A a s vrcholovým úhlem 2φ . Tedy všechny povrchové přímký kužele prochází středem projekční koule S a jejich sklon k ose kužele je dán právě úhlem vnitřního tření φ .
6. Průnik pláště tohoto kužele s projekční koulí K je kružnice k_{CK} .
7. Dvě povrchové přímký v azimutové rovině příslušné k A (viz 5.1.2, bod 4.) protnou projekční kouli K ve dvou bodech: C_{1K} a C_{2K} , které leží na průměru kružnice k_{CK} (nevykresleno).
8. Body (C_1) a (C_2) jsou sklopené body, vzniknou po otočení vertikální azimutové roviny α_A z bodů C_{1K} a C_{2K} . Body (C_1) a (C_2) leží na základní kružnici k tak, že úhel $\angle(C_1)S(A) = \varphi$ a úhel $\angle(A)S(C_2) = \varphi$ (Obr.4.27). Kružnice k_{CK} se po otočení o 90° jeví jako úsečka procházející body (C_1) a (C_2) (tečkovaně).
9. Podle postupu ve 4.1.2 z bodů C_{K1} a C_{K2} na kouli K sestrojíme odpovídající body C_1, C_2 v rovině průměry π . Bod C_1 leží na průsečíku přímký $\overline{(C_1)Z}$ a stopy $\overline{12}$, bod C_2 leží na průsečíku přímký $\overline{(C_2)Z}$ a stopy $\overline{12}$ (Obr. 5.27).



Obr. 5.27

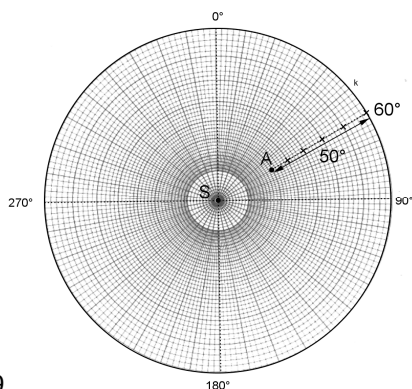
10. Kružnice k_C má střed S_C ve středu úsečky C_1C_2 a její poloměr je polovina délky úsečky C_1C_2 . Platí $S_C \neq A$ a neplatí, pokud je osa kužele vertikální a je zadána lineárním prvkem $(0^\circ / 0^\circ)$ (Obr. 5.28).



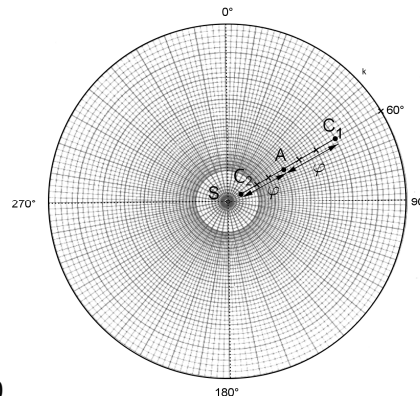
Obr. 5.28

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

- Podobně jako v postupu 5.1.2.c) určíme bod A , který je stereografickou projekcí lineárního prvku $A(60^\circ / 50^\circ)$ (Obr. 5.29).
- Projekce kužele, který určuje odklon úhlu vnitřního tření do základní roviny je kružnice, její poloměr zjistíme odpočítáním úhlu vnitřního tření $\varphi = 30^\circ$ od polohy bodu A oběma směry na přímce, která je určena daným směrem 60° , na dílčích Wulfovy sítě v pólové projekci nebo na hlavní úsečce Wulfovy sítě v rovníkové projekci se středem ve středu sítě. Vzniknou dva body C_1 a C_2 (Obr. 5.30).

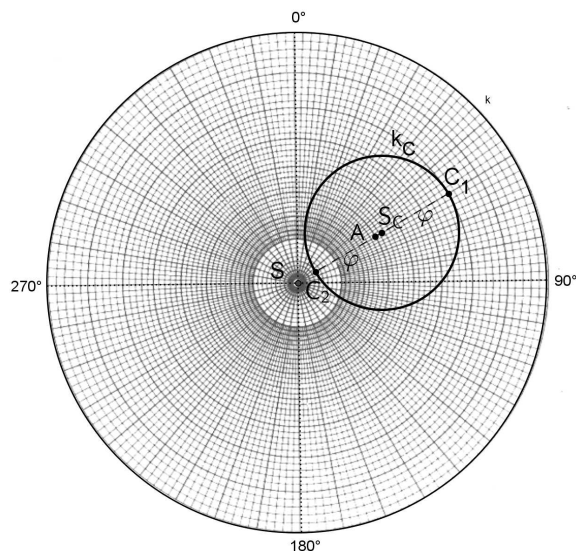


Obr. 5.29



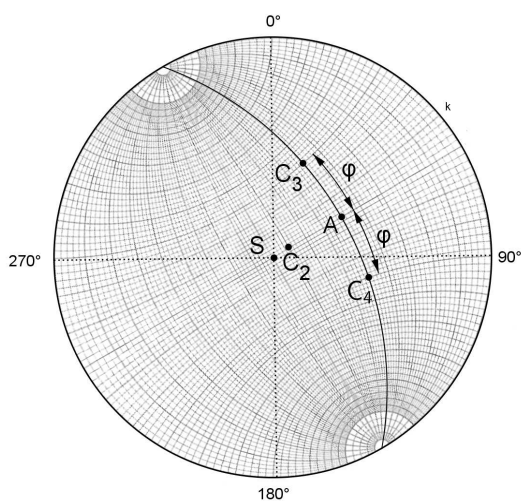
Obr. 5.30

3. Body C_1 a C_2 určují průměr kružnice, ve středu úsečky $\overline{C_1C_2}$ leží střed S_C kružnice k_C . Tedy bod S_C není bod A (Obr. 5.31).

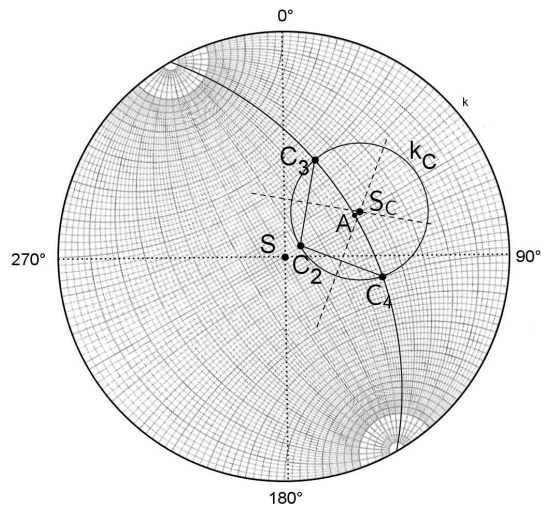


Obr. 5.31

4. Druhou možností je nalezení bodů C_3 a C_4 odpočítáním úhlu vnitřního tření $\varphi = 30^\circ$ od polohy bodu A oběma směry na oblouku velké kružnice, který prochází bodem A . Tento oblouk velké kružnice nalezneme otočením paletky v rovníkové projekci tak, aby bod A ležel na hlavní úsečce a střed paletky odpovídal narýsovanému středu S (Obr. 5.32).
5. V tomto případě body C_3 , C_4 a bod C_2 nalezený předchozím postupem leží na obvodu hledané malé kružnice k_C (není potřeba znát polohu bodu C_1 , využívá se například pokud bod C_1 leží mimo základní kružnici k). Kružnice je tedy určena třemi body C_3 , C_4 a C_2 , její střed S_C je průsečík os dvou úseček daných body C_3 , C_4 , C_2 , na obr. 5.33 jsou to $\overline{C_2C_3}$ a $\overline{C_2C_4}$. Také zde platí že bod S_C není bod A .



Obr. 5.32



Obr. 5.33

6. Základní úlohy

6.1. Rovina určená dvěma lineárními prvky

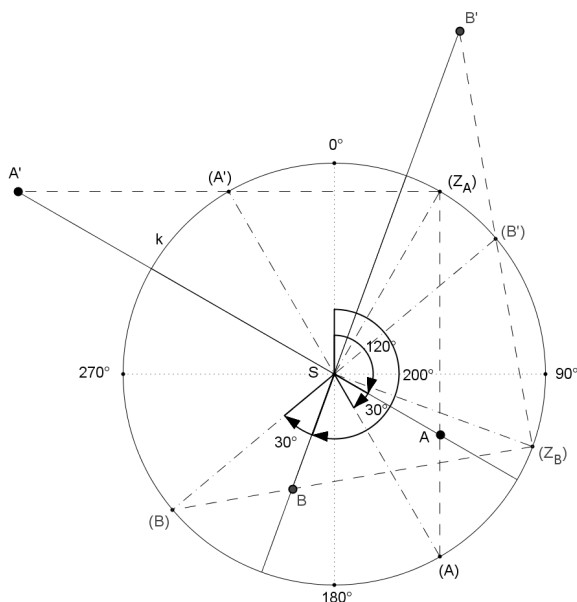
a) Zadání:

Jsou dány dvě různoběžky jako lineární prvky **A(120°/30°)** a **B(200°/30°)**. Cílem je stanovit stereografickou projekci roviny γ procházející prvky **A** a **B** a následně stanovit azimut a sklon spádnice **D γ** roviny γ .

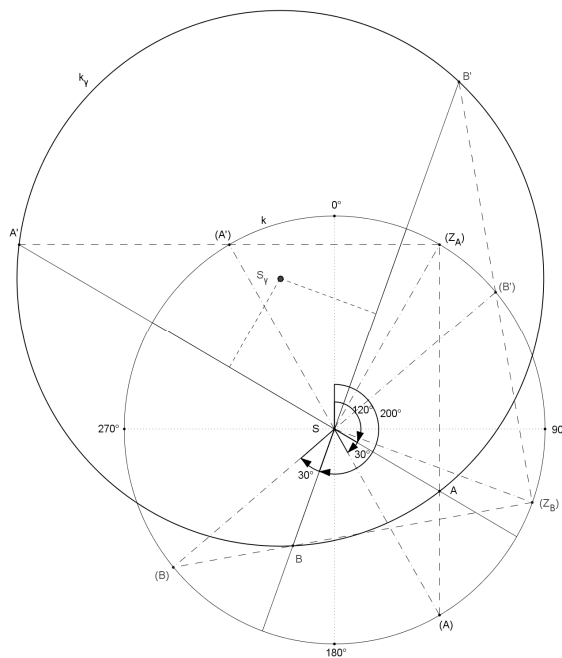
Pól **P** je v zenitu **Z**, promítáme na spodní polokouli.

b) Konstrukční řešení

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici **k** se středem **S**, na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň **0°** je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 10 v předchozím postupu 5.1.2.b) vzniknou sklopené body **(A)**, **(A')**, **(B)**, **(B')** a sklopené zenity **(Z_A)**, **(Z_B)** a body **A**, **B** i jejich inverzní body **A'**, **B'** jako výsledek stereografické projekce daných lineárních prvků **A**, **B** (Obr. 6.1).
3. Střed kružnice **k γ** , která je stereografickou projekcí hledané roviny γ , je bod **S γ** ležící v průsečíku os úseček **AA'**, **BB'** (nebo také os úseček **AB**, **A'B'** nebo **A'B**, **AB'**).
4. Kružnice **k γ** jako zobrazení plošného prvku roviny γ má střed v bodě **S γ** a prochází body **A**, **B**, **A'**, **B'** (Obr. 6.2).

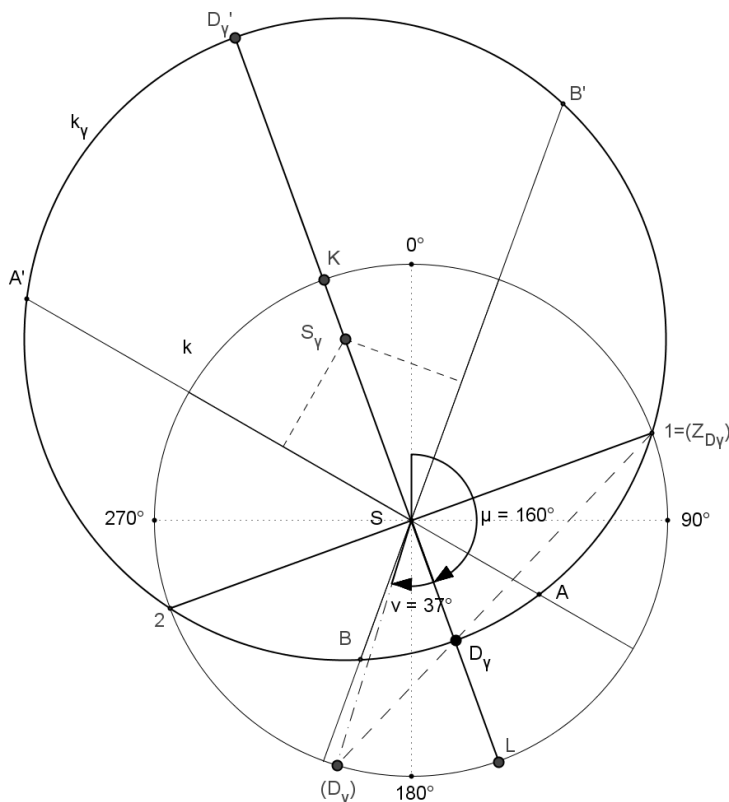


Obr. 6.1



Obr. 6.2

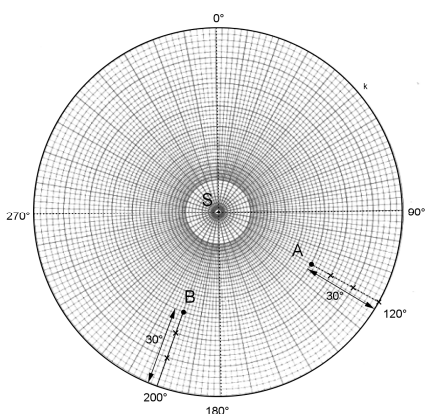
5. Průsečíky kružnice k a k_γ jsou body 1 a 2 , úsečka $\overline{12}$ je stopa roviny γ (Obr. 6.3).
6. Průsečíkem kolmice na úsečku $\overline{12}$ v bodě S a kružnice k_γ jsou body D_γ a D_γ' . Bod D_γ je zobrazením spádnice roviny γ a leží uvnitř kružnice k a bod D_γ' je inverzní bod této spádnice a leží vně kružnice k (Obr. 6.3).
7. Průsečík základní kružnice k a přímky $\overrightarrow{SD_\gamma}$ jsou body L a K , úsečka \overline{LK} je stopa azimutové roviny α_{D_γ} příslušné spádnici D_γ . Na přímce \overline{LK} tedy leží body: spádnice D_γ , inverzní bod spádnice D_γ' , střed S základní kružnice k a střed S_γ kružnice k_γ .
8. Bod (Z_{D_γ}) je zobrazení Zenitu Z , které vznikne po sklopení azimutové roviny α_{D_γ} kolem její stopy \overline{LK} . Bod (Z_{D_γ}) je totožný s bodem 1 .
9. Azimut spádnice μ je dán orientovaným úhlem $\mu = \angle 0^\circ SD_\gamma = \angle 0^\circ SL$.
10. Průsečík přímky $\overrightarrow{(Z_{D_\gamma})D_\gamma}$ s kružnicí k je bod (D_γ) , tj. zobrazení sklopené spádnice D_γ z azimutové roviny do roviny průmětny.
11. Sklon spádnice v je dán orientovaným úhlem $v = \angle D_\gamma S(D_\gamma) = \angle LS(D_\gamma)$.
12. Hledaná rovina γ je určena svojí spádnicí D_γ , tato spádnice je ve zvoleném případě určena azimutem $\mu = 160^\circ$ a sklonem $v = 37^\circ$, tedy $D_\gamma(160^\circ/37^\circ)$ (Obr. 6.3).



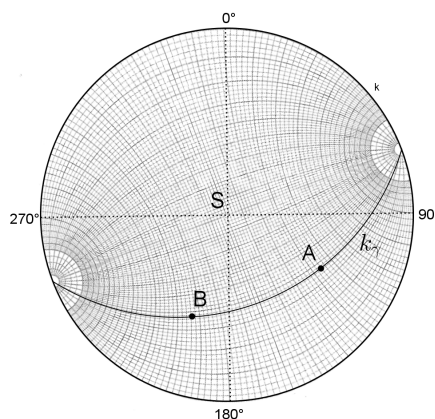
Obr. 6.3

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

1. Pomocí Wulfovy sítě v pólóvé projekci podle postupu v kapitole 5.1.2.c) narýsujeme body **A** a **B**, které jsou stereografickou projekcí lineárních prvků **A(120°/30°)** a **B(200°/30°)** (Obr. 6.4).
2. Wulfovou síť v rovníkové projekci otáčíme vůči průsvitce s narýsovanými body **A** a **B** a kružnicí **k** až najdeme takový oblouk velké kružnice, který prochází body **A** a **B** a zároveň střed Wulfovy sítě **S** odpovídá středu narýsované kružnice **k**. Tento oblouk velké kružnice **k_γ** je stereografická projekce roviny **γ** (Obr. 6.5).

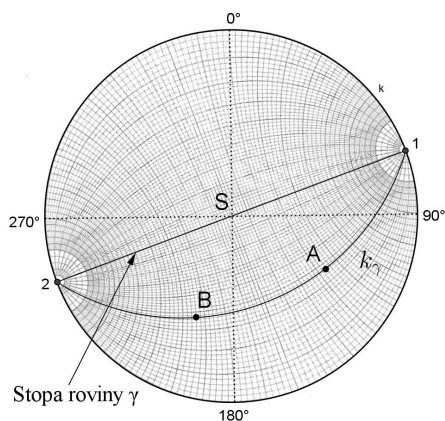


Obr. 6.4

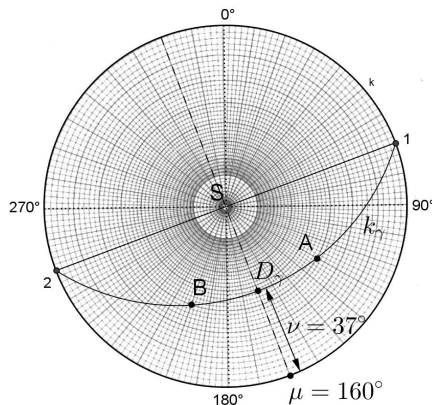


Obr. 6.5

3. Stopa hledané roviny, úsečka $\overline{12}$, je určena průsečíky oblouku velké kružnice roviny **γ** se základní kružnicí **k** (Obr. 6.6).
4. Stereografickou projekcí spádnice **D_γ** je průsečík hlavní úsečky na síti s obloukem velké kružnice **γ**.
5. Azimut a sklon spádnice **D_γ** odečteme na Wulfově síti v pólóvé projekci podle postupu v kapitole 5.1.3.c). Sklon spádnice **D_γ** odečteme z dílků na síti v pólóvé projekci směrem od obvodu do středu. Azimut spádnice je úhel mezi úsečkou $\overline{S0^\circ}$ a průmětem vertikální roviny obsahující spádnicí **D_γ** (Obr. 6.7).



Obr. 6.6



Obr. 6.7

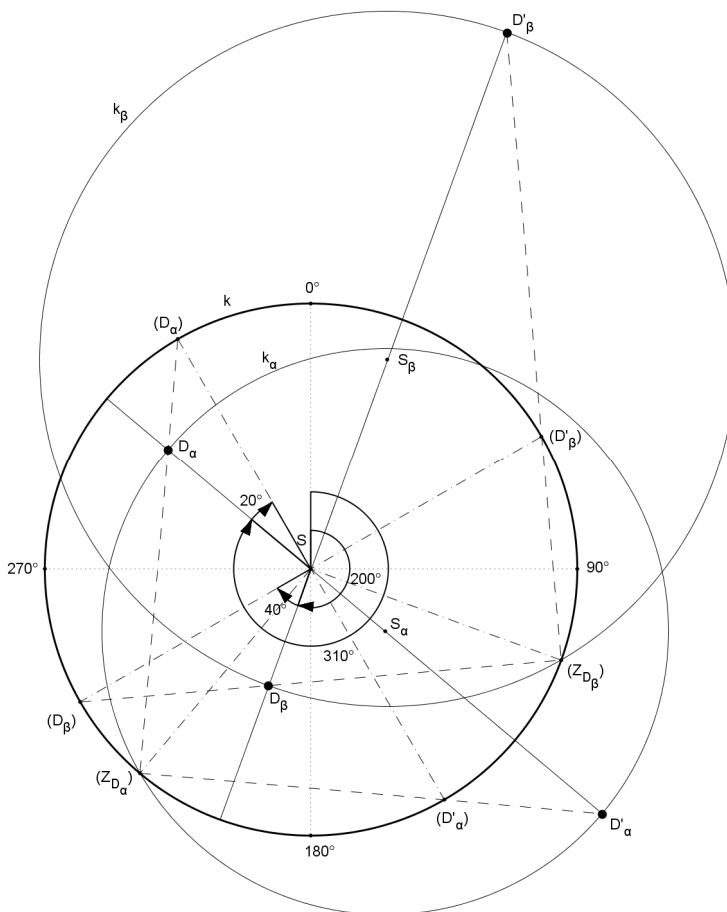
6.2. Průsečnice dvou plošných prvků

a) Zadání:

Jsou dány dvě roviny α a β svými spádovými přímkami $D_\alpha(310^\circ/20^\circ)$ a $D_\beta(200^\circ/40^\circ)$. Stanovte stereografickou projekci jejich průsečnice R s azimutem μ a sklonem ν .

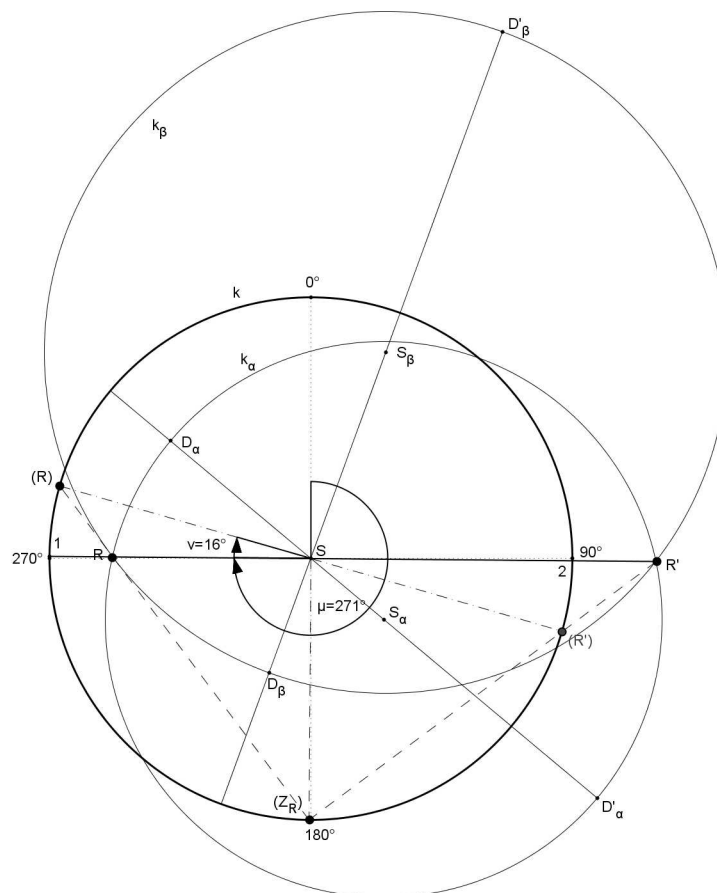
b) Konstrukční řešení

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici k se středem S , na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 10 v předchozím postupu 5.1.2.b) vzniknou sklopené body (D_α) , (D_β) , (D_α') a (D_β') a sklopené zenity (Z_{D_α}) , (Z_{D_β}) a body D_α a D_β i jejich inverzní body D_α' a D_β' jako výsledek stereografické projekce spádnic D_α a D_β . Roviny zobrazíme podle bodů 3 a 4 v postupu 5.2.2.b), vzniknou kružnice k_α a k_β s jejich středy S_α a S_β (Obr. 6.8).



Obr. 6.8

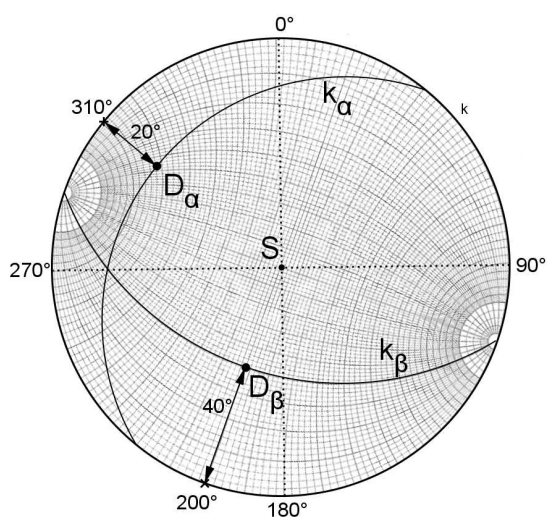
3. Kružnice k_α a k_β se protínají ve dvou bodech R a R' , těmito body je určena průsečnice R těchto rovin. Bod R je zobrazením průsečnice a leží na průsečíku kružnic k_α a k_β uvnitř základní kružnice k , inverzní bod R' leží na průsečíku kružnic k_α a k_β vně základní kružnice k .
4. Vertikální azimutová rovina α_R příslušná k lineárnímu prvku R je určena body R , S a R' , body 1 a 2 jsou průsečíky základní kružnice k a přímky $\overline{RR'}$, úsečka $\overline{12}$ je stopa roviny α_R .
5. Azimut μ roviny α_R a průsečnice R je dán orientovaným úhlem $\mu = \angle 0^\circ SR = \angle 0^\circ S1$.
6. Sklopením azimutové roviny α_R na jednu nebo druhou stranu kolem její stopy $\overline{12}$ určíme polohu sklopeného zenitu (Z_R) , $(Z_R)S \perp \overline{12}$.
7. Průsečík přímky $(Z_R)R$ s kružnicí k je sklopený bod (R) .
8. Sklon v je dán orientovaným úhlem $v = \angle RS(R) = \angle 1S(R)$.
9. Průsečnice R rovin α a β je určena azimutem $\mu = 271^\circ$ (úhel $\angle 0^\circ SR = \angle 0^\circ S1$) a sklonem $v = 16^\circ$ (úhel $\angle RS(R) = \angle 1S(R)$), tedy $R(271^\circ/16^\circ)$ (Obr. 6.9).



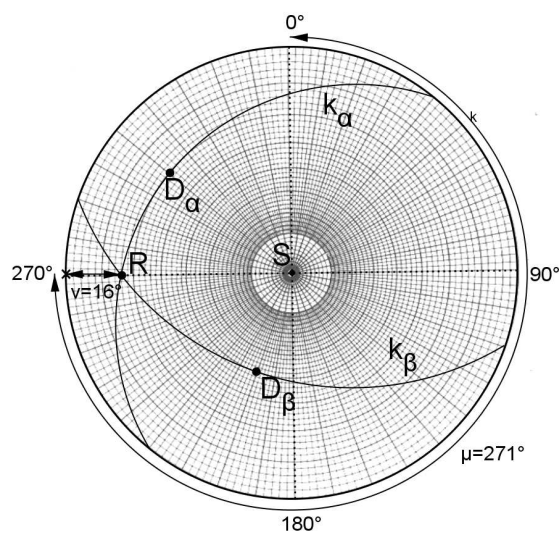
Obr. 6.9

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

1. Roviny zadané svými spádovými přímkami $D_\alpha(310^\circ/20^\circ)$ a $D_\beta(200^\circ/40^\circ)$ zobrazíme jako v 5.2.2.c). Vzniknou dva body D_α a D_β (pro určení projekce spádnic D_α a D_β použijeme paletku v pólové projekci), které jsou stereografickou projekcí spádnic rovin α a β a dva oblouky velkých kružnic k_α a k_β , které určují příslušné roviny α a β (viz obr. 6.10, zde byla pro zobrazení průmětu spádnice D_β vyjíměčně použita paletka v rovníkové projekci, poloha průmětu spádnic D_α a D_β se lépe vykresluje pomocí paletky v pólové projekci).
2. Označíme průsečík oblouků R . Bod R je stereografická projekce průsečnice rovin α a β .
3. Poté přiložíme průsvitku na Wulfovou síť v pólové projekci a podle postupu v kapitole 5.1.3.c) odečteme azimut μ a sklon v průsečnice R . Průsečnice R je určena azimutem $\mu = 271^\circ$ a sklonem $v = 16^\circ$ (Obr. 6.11).



Obr. 6.10



Obr. 6.11

6.3. Obecná rovina

Sečnou obecnou rovinu můžeme chápat jako rovinu, jejímž určujícím prvkem je její normála, která vychází ze středu projekční koule. Všechny roviny kolmé na normálu protínají projekční kouli v kružnicích, jejichž průmětem jsou rovněž kružnice. Vzdálenost těchto rovin od středu projekční koule je určena vrcholovým úhlem průniku pláště kužele s projekční koulí.

Obecná rovina λ neprochází nutně středem S projekční koule K a její průnik s povrchem projekční koule je kružnice $k_{\lambda K}$. Zobrazení takovéto kružnice v projekční rovině nazýváme "malá kružnice" případně "oblouk malé kružnice" a značíme k_{λ} . Tedy:

λ - promítaná sečná rovina

$k_{\lambda K}$ - kružnice, která je průnikem roviny λ s povrchem promítací koule K

$S_{\lambda K}$ - střed kružnice $k_{\lambda K}$

k_{λ} - kružnice, která je projekcí kružnice $k_{\lambda K}$

S_{λ} - střed projekce kružnice $k_{\lambda K}$

Pro konstrukci obecné roviny je třeba zadat:

$A(\mu/v)$ - lineární prvek A , zadaný azimutem μ a sklonem v je přímka kolmá k promítané rovině λ , tedy její normála a prochází středem projekční koule S , průsečík lineárního prvku A a promítané roviny λ je střed projektované kružnice $S_{\lambda K}$.

δ - úhel mezi přímkou - lineárním prvkem A , a přímkou, která prochází středem projekční koule K a bodem na kružnici $k_{\lambda K}$ na povrchu projekční koule a představuje vrcholový úhel. Tento úhel δ je v praktických úlohách úhlem tření φ na dané ploše.

Projekce obecné roviny bude řešena shodně jako příklad zobrazení kužele (5.3.2.) s osou zadanou lineárním prvkem $A(\mu/v)$ a s úhlem mezi povrchovou přímkou a osou δ . V obou případech zobrazení obecné roviny i kužele se zobrazuje kružnice z povrchu projekční koule, protože tato kružnice je průnikem projekční koule s obecnou rovinou v této úloze a v úloze zobrazení kužele je tato kružnice průnikem projekční koule s pláštěm kužele.

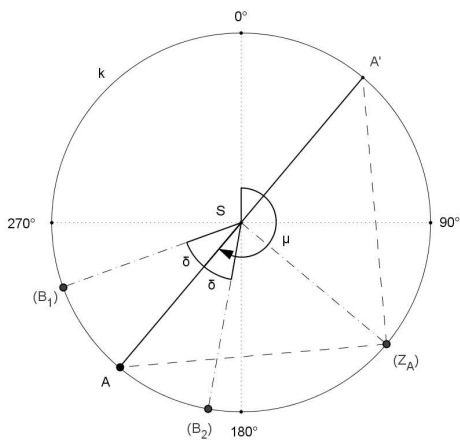
a) Zadání:

Lineární prvek $\mathbf{A}(225^\circ/0^\circ)$, jež představuje normálu k rovině λ , je zadán azimutem $\mu = 225^\circ$ a sklonem $\nu = 0^\circ$ a úhel $\delta = 30^\circ$ představuje vrcholový úhel.

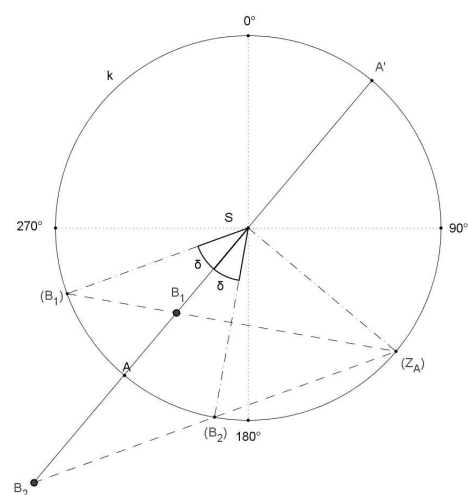
Pól \mathbf{P} je v zenitu \mathbf{Z} , promítáme na spodní polokouli.

b) Konstrukční řešení

1. Rýsuje v zobrazovací rovině π . Narýsuje základní kružnici k se středem \mathbf{S} , na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 10 v předchozím postupu 5.1.2.b) vzniknou sklopené body (\mathbf{A}) , (\mathbf{A}') , a sklopený zenit (\mathbf{Z}_A) a bod \mathbf{A} i jeho inverzní bod \mathbf{A}' jako výsledek stereografické projekce daného lineárního prvku \mathbf{A} . Protože je sklon $\nu = 0^\circ$ tak je bod \mathbf{A} totožný s bodem (\mathbf{A}) a bod \mathbf{A}' totožný s bodem (\mathbf{A}') .
3. Dvě přímky, které procházejí středem \mathbf{S} a protínají $k_{\lambda K}$ na povrchu projekční koule ležící v azimutové rovině příslušné k \mathbf{A} (viz 5.1.2, bod 4.) protnou projekční kouli \mathbf{K} ve dvou bodech: \mathbf{B}_{1K} a \mathbf{B}_{2K} , které leží na průměru kružnice $k_{\lambda K}$ (nevykresleno).
4. Pro body (\mathbf{B}_1) a (\mathbf{B}_2) ležící na základní kružnici k platí: úhel $(\mathbf{B}_1)\mathbf{S}\mathbf{A} = \delta$ a úhel $(\mathbf{B}_2)\mathbf{S}\mathbf{A} = \delta$ (Obr. 6.12).
5. Podle postupu v 5.1.2 z bodů \mathbf{A}_{1K} a \mathbf{A}_{2K} na kouli \mathbf{K} sestrojíme odpovídající body \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 v základní rovině a tedy bod \mathbf{B}_1 leží na průsečíku přímek $(\mathbf{B}_1)(\mathbf{Z}_A)$ a $\mathbf{A}\mathbf{A}'$, bod \mathbf{B}_2 leží na průsečíku přímek $(\mathbf{B}_2)(\mathbf{Z}_A)$ a $\mathbf{A}\mathbf{A}'$ (Obr. 6.13).

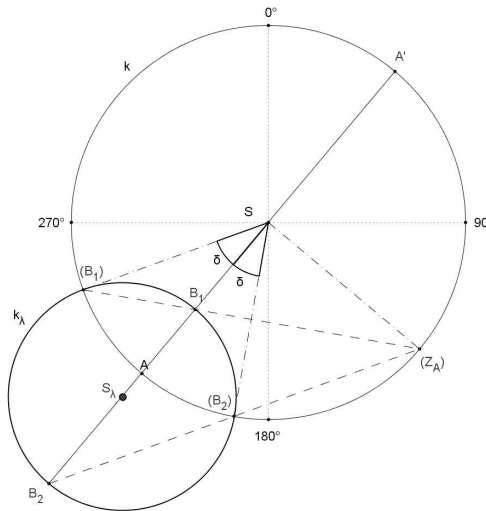


Obr. 6.12



Obr. 6.13

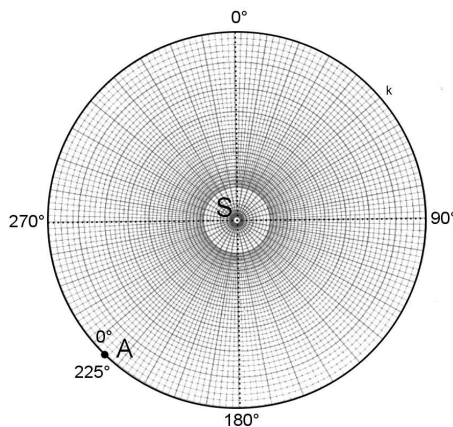
6. Kružnice k_λ má střed S_λ ve středu úsečky $\overline{B_1B_2}$ a její poloměr je polovina délky úsečky $\overline{B_1B_2}$. Obecně platí $S_\lambda \neq A$ (Obr. 6.14). Kružnice k_λ je průmětem hledané sečné roviny. Část kružnice k_λ uvnitř základní kružnice k se nazývá oblouk malé kružnice.



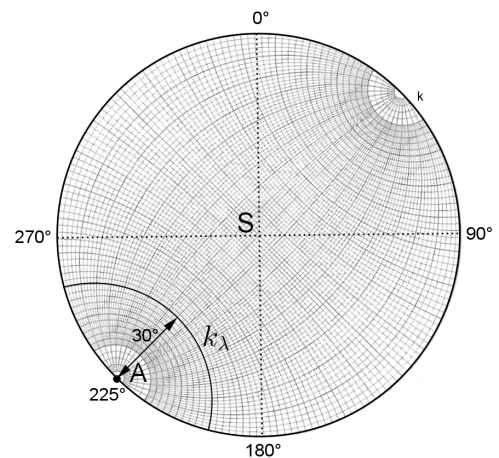
Obr. 6.14

c) Řešení pomocí Wulfových sítí

- Podobně jako v postupu 5.1.2.c) určíme bod A , který je stereografickou projekcí lineárního prvku $A(225^\circ/0^\circ)$ (Obr. 6.15).
- Ve speciálním případě, kde je sklon $v = 0^\circ$ tak jako zde, je možné přímo využít malých kružnic na rovníkové Wulfově síti: pro zadaný úhel $\delta = 30^\circ$ a $A(225^\circ/0^\circ)$, tedy azimut $\mu = 225^\circ$ a sklon $v = 0^\circ$, najdeme projekci roviny λ , kružnici k_λ , přiložením Wulfovy sítě v rovníkové projekci tak, aby narýsovaný bod A ležel na kolmici na hlavní úsečce sítě a na této kolmici nebo na obvodu sítě odpočítáme $\delta = 30^\circ$ (Obr. 6.16). V případě, že neplatí $v = 0^\circ$, je postup stejný jako pro zobrazení kužele, viz 5.3.2.c).



Obr. 6.15



Obr. 6.16

6.4. Stanovení úhlu mezi dvěma různoběžkami

Úkolem je stanovit úhel mezi dvěma danými různoběžkami, z nichž obě mají souhlasný směr, v řešeném příkladě směrem dolů. Úloha je řešitelná i v případech, že jedna různoběžka směřuje dolů a druhá nahoru, pak se u různoběžky směřující nahoru pracuje s jejím inverzním bodem, který rovněž směřuje dolů a hledaný úhel je doplňkem do 180° .

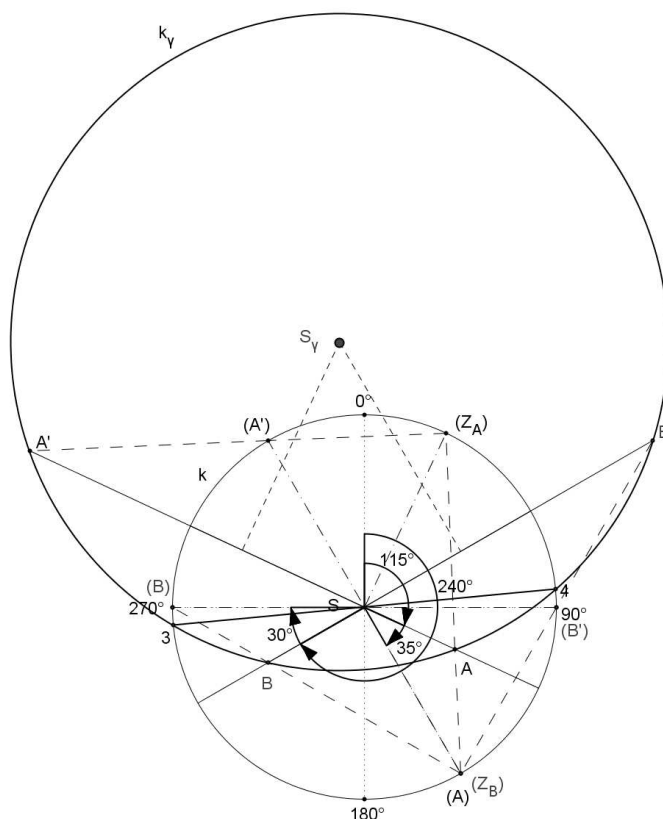
a) Zadání:

Jsou dány dvě různoběžky: Lineární prvky **A**($115^\circ/35^\circ$) a **B**($240^\circ/30^\circ$). Úkolem je stanovit menší z vedlejších úhlů $\xi \leq 90^\circ$, určených těmito dvěma různoběžkami. Tyto různoběžky musejí ležet ve stejné rovině aby úloha měla smysl.

Pól **P** je v zenitu **Z**, promítáme na spodní polokouli.

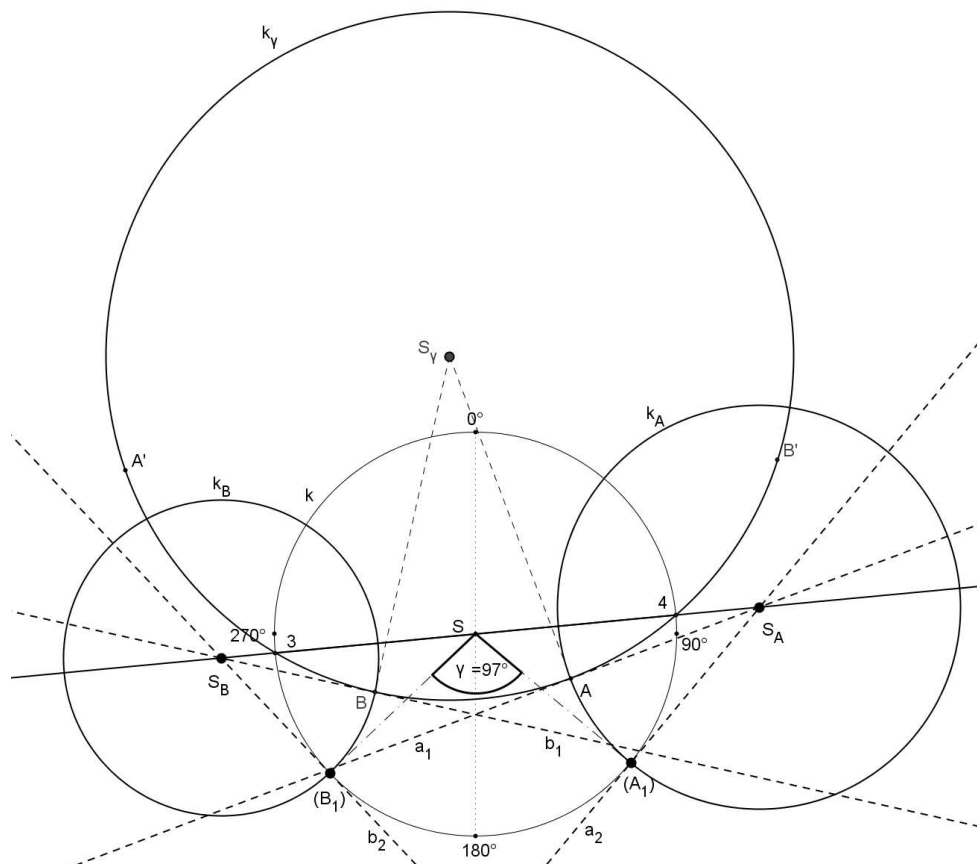
b) Konstrukční řešení:

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici **k** se středem **S**, na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 6 v předchozím postupu 5.1.2. vzniknou body **A** a **B** a dále sklopené body (**A**), (**A'**), (**B**), (**B'**), sklopené zenity (**Z_A**), (**Z_B**) a inverzní body **A'**, **B'** jako výsledek stereografické projekce daných lineárních prvků **A**, **B**.
3. Projekce roviny γ , která obsahuje lineární prvky **A**, **B** (body 5 až 7 v postupu 6.1.), je kružnice **k_γ** se středem **S_γ**, na které leží body **A**, **A'**, **B**, **B'**. Stopa roviny γ je úsečka **34** (Obr. 6.17).



Obr. 6.17

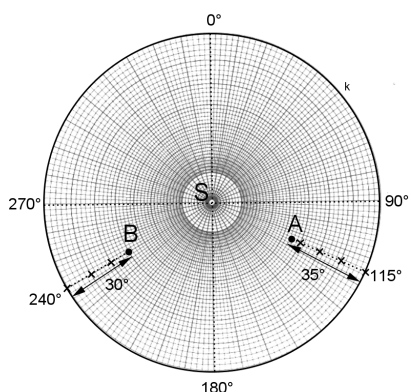
4. V rovině γ leží body A_K a B_K , což jsou průsečíky lineárních prvků A , B s povrchem projekční koule K , a hledaný úhel $\xi = \angle A_K S B_K$, určený lineárními prvky A , B (nevykresleno).
5. Stopu roviny γ , úsečku $\overline{34}$, zvolíme za osu otáčení a body A_K a B_K otočíme z roviny γ do roviny průmětny π .
6. Pomocí středu S_γ kružnice k_γ , která je projekcí plochy γ , sestojíme tečny a_1 a b_1 (na obr. 6.18 vyznačeny čárkovaně) ke kružnici k_γ v bodech A a B . Tečny a_1 a b_1 jsou kolmé k poloměrům $\overline{S_\gamma A}$ a $\overline{S_\gamma B}$.
7. Body S_A a S_B jsou průsečíky tečen a_1 a b_1 a osy otáčení, přímky $\overline{34}$. Body S_A a S_B jsou středy malých kružnic k_A a k_B a $|S_A A|$ a $|S_B B|$ jsou délky jejich poloměrů.
8. Body (A_1) a (B_1) , sklopené průměty bodů A_K a B_K z roviny γ do roviny průmětny π , jsou průsečíky kružnic k_A a k_B s kružnicí k (bližší k bodům A a B - viz obr. 6.18).
9. Pokud jsou známy kružnice otáčení k_A a k_B , pak je možné také najít body (A_1) a (B_1) sestojením tečen a_2 a b_2 (na obr. 5.18 vyznačeny čárkovaně) k základní kružnici k . Body (A_1) a (B_1) jsou průsečíky tečen a_2 a b_2 a kružnice k .
10. Hledaný úhel ξ mezi dvěma lineárními prvky se po sklopení z roviny γ do roviny průmětny π jeví ve skutečné velikosti, je to úhel mezi úsečkami $\overline{S(A_1)}$ a $\overline{S(B_1)}$ s velikostí $\xi = |\angle(A_1)S(B_1)|$ (Obr. 6.18).



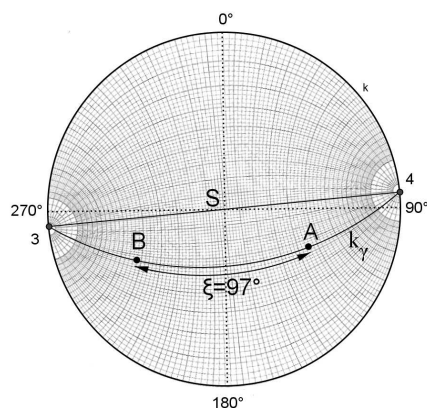
Obr. 6.18

c) Řešení pomocí Wulfových sítí:

1. Pomocí sítě v pólové projekci zobrazíme lineární prvky **A**(115°/35°) a **B**(240°/30°) tak, jak je popsáno v postupu 5.1.2.c) (Obr. 6.19).
2. Projekci roviny γ , která obsahuje lineární prvky **A** a **B**, zobrazíme podobně jako v postupu 6.1.c) pomocí sítě v rovníkové projekci. Paletkou v rovníkové projekci pak natáčíme tak, až některý z oblouků velkých kružnic na paletce prochází body **A** a **B**, tento oblouk velké kružnice překreslíme a označíme k_γ , a také narýsujeme stopu roviny γ , úsečku $\overline{34}$, tím je určena rovina procházející dvěma různoběžkami, lineárními prvky **A** a **B** (Obr. 6.20).
3. Odpočítáním vystupňovaných dílků na oblouku velké kružnice mezi průměty lineárních prvků zjistíme úhel $\xi = 97^\circ$, čímž je úloha vyřešena (Obr. 6.20).



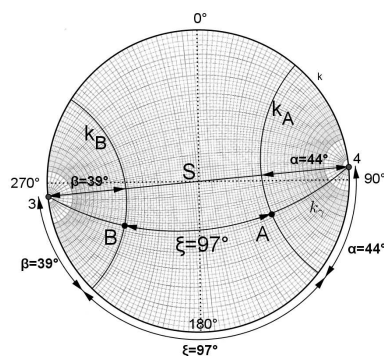
Obr. 6.19



Obr. 6.20

4. Dále je možné využít paletku v rovníkové projekci k osvojení systému sklápění roviny γ do roviny průmětny π . Oproti konstrukčnímu řešení nemusíme hledat sečné roviny sférickou kouli ve kterých sklápíme, protože jsou dány oblouky malých kružnic. Opačným postupem 6.3.c) tedy narýsujeme oblouky malých kružnic k_A a k_B , které jsou stereografickou projekcí obecných rovin (jedná se o roviny, které sečou projekční kouli), procházejících body A_K a B_K (body, které jsou průnikem lineárních prvků **A** a **B** s povrchem projekční koule **K**). Normála na tyto roviny a tedy osa otáčení, je určena stopou roviny γ , úsečkou $\overline{34}$. Pomocí Wulfovy sítě v rovníkové projekci přiložené tak, aby kolmice na hlavní úsečce sítě souhlasila se stopou roviny γ , narýsujeme takové oblouky malých kružnic k_A a k_B , které procházejí body **A** a **B**. Na paletce můžeme odečíst úhel $\alpha = 44^\circ$ pro kružnici k_A a úhel $\beta = 39^\circ$ pro kružnici k_B (Obr. 6.21).
5. Pokud body **A** a **B** leží na stejné polovině roviny γ (rozdělené hlavní úsečkou Wulfovy sítě), je řešením úhel $\xi = |\alpha - \beta|$ (Podle obr. 6.21 se nejedná o náš případ).

6. Neleží-li body **A** a **B** na stejné polovině roviny γ , je řešením úhel $\xi = 97^\circ$. (Pokud bychom hledali menší úhel svíraný neorientovanými různoběžkami, pak je řešením menší z úhlů: úhel $\xi = \alpha + \beta$ nebo jeho doplněk $\xi = 180 - (\alpha + \beta)$. Pro $\alpha = 44^\circ$ a $\beta = 39^\circ$ by při hledání menšího svíraného úhlu byl řešením úhel $\xi = \alpha + \beta = 83^\circ$).



Obr. 6.21

6.5. Stanovení úhlu mezi přímkou a rovinou

a) Zadání

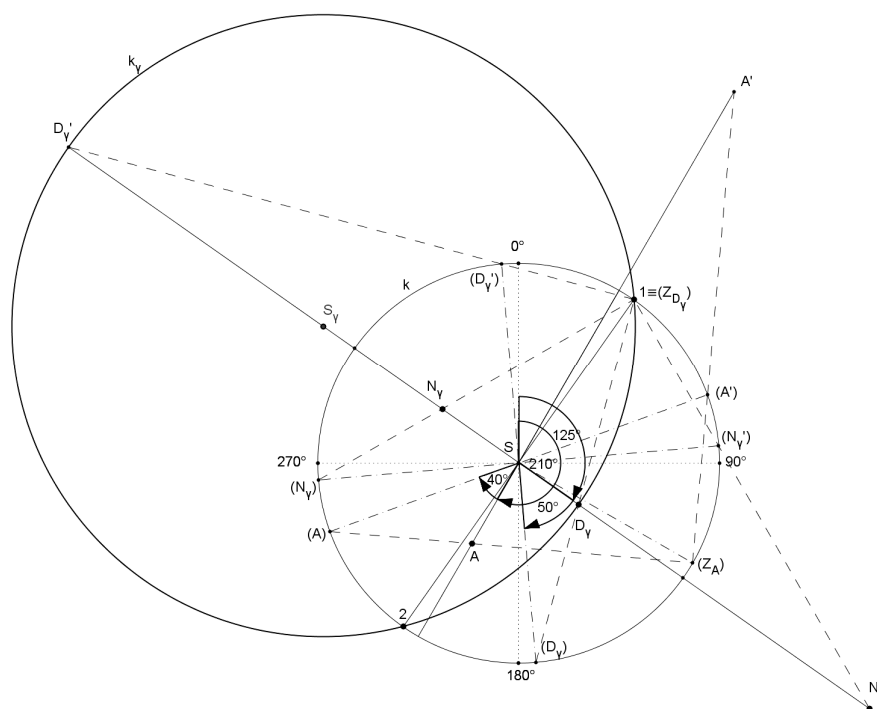
Je dána přímka jako lineární prvek $\mathbf{A}(210^\circ/40^\circ)$ a rovina γ jako plošný prvek. Rovina je zadána spádníci $\mathbf{D}_\gamma(125^\circ/50^\circ)$. Cílem je stanovit nejmenší úhel, který svírá přímka s rovinou.

Nejmenší úhel, který svírá rovina a přímka je právě ten úhel, který leží v rovině (označena ρ) kolmé na danou rovinu γ . Je to tedy úhel, který svírá přímka – lineární prvek \mathbf{A} s průsečnicí dané roviny a roviny k ní kolmé, obsahující lineární prvek \mathbf{A} . Postup řešení je takový, že vyhledáme rovinu, určenou lineárním prvkem \mathbf{A} a lineárním prvkem – normálou \mathbf{N}_γ plošného prvku γ . Tím přecházíme na úlohu 6.4. – stanovení úhlu mezi dvěma lineárními prvky a hledaný úhel ξ je doplňkem do 90° a je svíraný lineárním prvkem \mathbf{A} a průsečnicí rovin γ a ρ .

Pól \mathbf{P} je v zenitu \mathbf{Z} , promítáme na spodní polokouli.

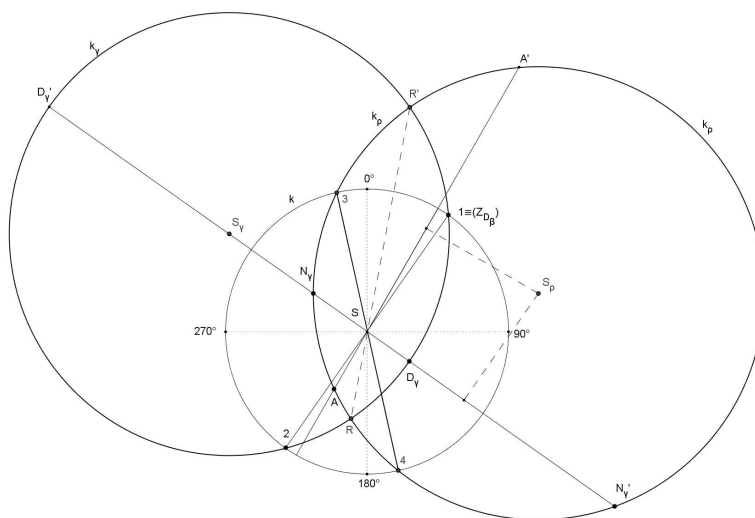
b) Konstrukční řešení

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici k se středem \mathbf{S} , na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 10 postupu 5.1.2.b) zobrazíme lineární prvek \mathbf{A} , vzniknou sklopené body (\mathbf{A}) , (\mathbf{A}') a sklopený zenit $(\mathbf{Z}_\mathbf{A})$, a bod \mathbf{A} i jeho inverzní bod \mathbf{A}' jako výsledek stereografické projekce daného lineárního prvku $\mathbf{A}(210^\circ/40^\circ)$.
3. Podle bodů 3 až 6 postupu 5.2.2.b) zobrazíme spádnici roviny $\mathbf{D}_\gamma(125^\circ/50^\circ)$, vzniknou sklopené body (\mathbf{D}_γ) , (\mathbf{D}_γ') , bod \mathbf{D}_γ , inverzní bod \mathbf{D}_γ' , kružnice k_γ se středem \mathbf{S}_γ jako projekce roviny γ , body $\mathbf{1}$ a $\mathbf{2}$ určující stopu roviny γ , sklopené body (\mathbf{N}_γ) , (\mathbf{N}_γ') a bod \mathbf{N}_γ s inverzním bodem \mathbf{N}_γ' jako zobrazení normály k rovině γ (Obr. 6.22).



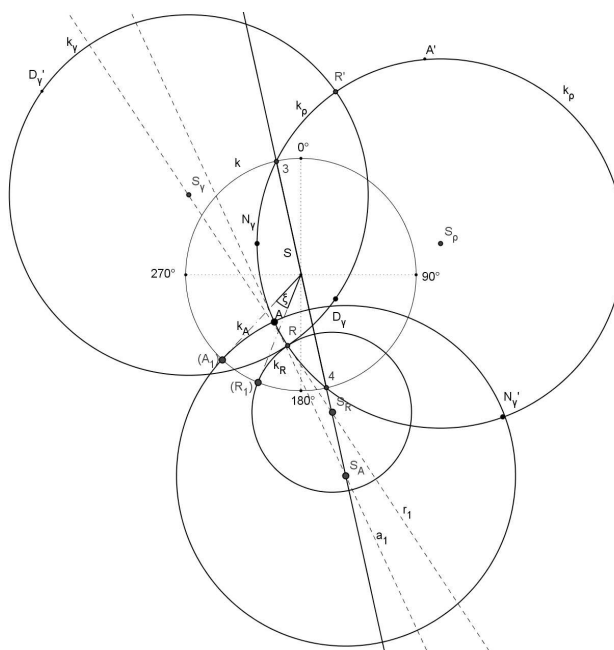
Obr. 6.22

- Uřídíme projekci roviny ρ , obsahující lineární prvek A a kolmou na rovinu γ . Rovina ρ tedy obsahuje lineární prvek A a normálu N_γ roviny γ . Rovina ρ je určena čtyřmi body A , A' , N_γ a N_γ' a v úhlojevné projekci se promítá jako kružnice. Podle bodů 5 a 6 postupu 6.1. najdeme bod S_ρ na průsečíku os úseček $\overline{N_\gamma N_\gamma'}$ a $\overline{AA'}$ a kružnici k_ρ se středem v bodě S_ρ procházející body N_γ , N_γ' , A a A' . Stopa roviny ρ je úsečka $\overline{34}$ (Obr. 6.23).
- Průsečnici rovin γ a ρ sestrojíme podle bodu 3 v postupu 6.2.b), vzniknou body R a R' jako průsečíky kružnic k_γ a k_ρ , které jsou stereografickou projekcí průsečnice rovin γ a ρ (Obr. 6.23).



Obr. 6.23

- Podobně jako v bodech 6 až 9 v postupu 6.4.b) sestrojíme tečny a_1 a r_1 ke kružnici k_ρ procházející body A a R a najdeme body S_A a S_R jako průsečíky tečen a_1 a r_1 s osou otáčení, stopou roviny γ , přímkou $\overline{34}$. Sestrojíme kružnice k_A a k_R se středy S_A a S_R a poloměry $|S_A A|$ a $|S_R R|$. Body (A_1) a (R_1) , sklopené průměty lineárních prvků A a R z roviny γ do roviny průmětny π , jsou průsečíky kružnic k_A a k_R s kružnicí k (bližší k bodům A a R viz obr. 6.24).

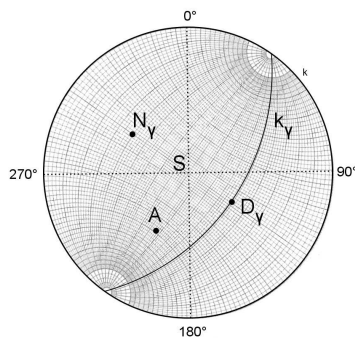


Obr. 6.24

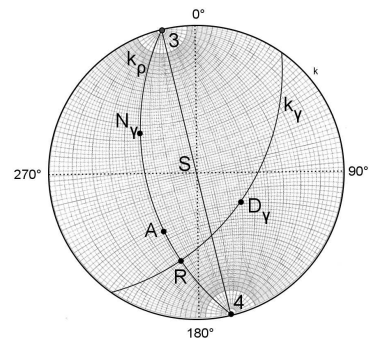
7. Hledaný úhel ξ mezi dvěma lineárními prvky \mathbf{A} a \mathbf{R} se po sklopení z roviny γ do roviny průmětny π jeví ve skutečné velikosti, je to úhel mezi úsečkami $\overline{\mathbf{S}(\mathbf{A}_1)}$ a $\overline{\mathbf{S}(\mathbf{R}_1)}$ s velikostí $\xi = |\angle(\mathbf{A}_1)\mathbf{S}(\mathbf{R}_1)|$.

c) Řešení pomocí stereografických sítí:

1. Pomocí sítě v pólové projekci podle postupu 5.1.2.c) zobrazíme bod \mathbf{A} jako stereografickou projekci lineárního prvku $\mathbf{A}(210^\circ/40^\circ)$.
2. Podle postupu 5.2.2.c) zobrazíme bod \mathbf{D}_γ jako stereografickou projekci spádnice $\mathbf{D}_\gamma(125^\circ/50^\circ)$, oblouk velké kružnice \mathbf{k}_γ jako projekci roviny γ a bod \mathbf{N}_γ jako projekci normály k rovině γ (Obr. 6.25).
3. Podle bodu postupu 6.1.c) zobrazíme rovinu ρ kolmou na rovinu γ . Rovina ρ prochází lineárním prvkem \mathbf{A} a normálou \mathbf{N}_γ . Tím vznikne oblouk velké kružnice \mathbf{k}_ρ procházející body \mathbf{A} a \mathbf{N}_γ jako projekce roviny ρ a její stopou je úsečka $\overline{\mathbf{34}}$.
4. Podle postupu 6.2.c) najdeme bod \mathbf{R} , který je projekcí průsečnice rovin γ a ρ (Obr. 6.26).

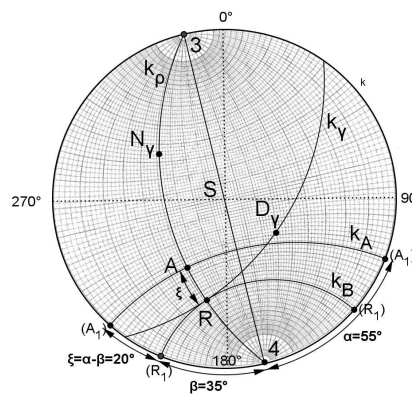


Obr. 6.25



Obr. 6.26

5. Úhel $\xi = 20^\circ$ odečteme přímo na vystupňovaném oblouku velké kružnice \mathbf{k}_ρ mezi body \mathbf{A} a \mathbf{R} . Úhel ξ můžeme také určit otočením roviny ρ do roviny průmětny π pomocí oblouků malých kružnic \mathbf{k}_A a \mathbf{k}_B , procházejících body \mathbf{A} a \mathbf{R} podobně jako v bodě 4 postupu 6.4.c). Osou otáčení je stopa roviny ρ , úsečka $\overline{\mathbf{34}}$. Zjistíme tak úhly α a β . Zde je $\alpha = 55^\circ$, $\beta = 35^\circ$ a $\xi = |\alpha - \beta| = |55^\circ - 35^\circ| = 20^\circ$ jak je vidět na obr. 6.27.



Obr. 6.27

6.6. Stanovení výslednice vektorů

Častým úkolem je nalezení výslednice dvou či více vektorů. V případě, že je potřeba složit více než dva vektory, složíme nejdříve jakékoliv dva a poté skládáme pokaždé novou výslednici s dalším vektorem, nebo je možné skládat výslednice dvou vektorů (skládání vektorů je asociativní a komutativní). V principu se jedná vždy o nalezení roviny určené dvěma lineárními prvky a určení úhlu mezi těmito prvky.

V případě, že ne všechny vektory směřují na stejnou polokouli (a není je tedy možné zobrazit všechny pomocí promítání na spodní nebo vrchní polokouli), pracujeme s inverzními body pro vektory které směřují na druhou polokouli než na tu na kterou promítáme, a tedy s opačnou orientací, což je potřeba zahrnout do výpočtu úhlů, které svírají.

Následující příklad řeší složení dvou vektorů.

a) Zadání:

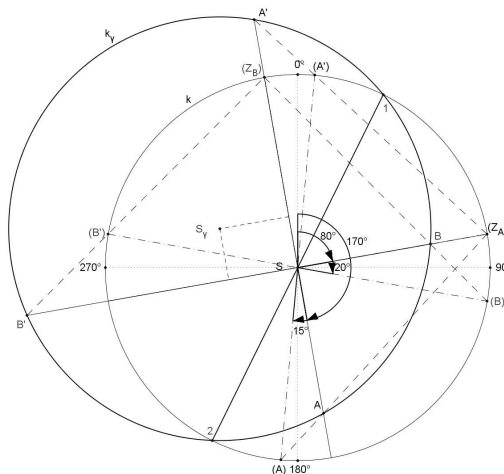
Jsou dány dva vektory **A** a **B**, které jsou určeny lineárními prvky **A(170°/15°)** a **B(80°/20°)** a silou, kterou působí: vektor **A 0,4MN = 40Mp** a vektor **B 0,2MN = 20Mp**. Cílem je stanovit výslednici těchto vektorů, tedy azimut, sklon a velikost síly této výslednice.

Lineární prvky **A** a **B** jsou zadané jako různoběžky, tedy určují rovinu, ve které bude ležet také lineární prvek určující hledanou výslednici.

Pól **P** je v zenitu **Z**, promítáme na spodní polokouli.

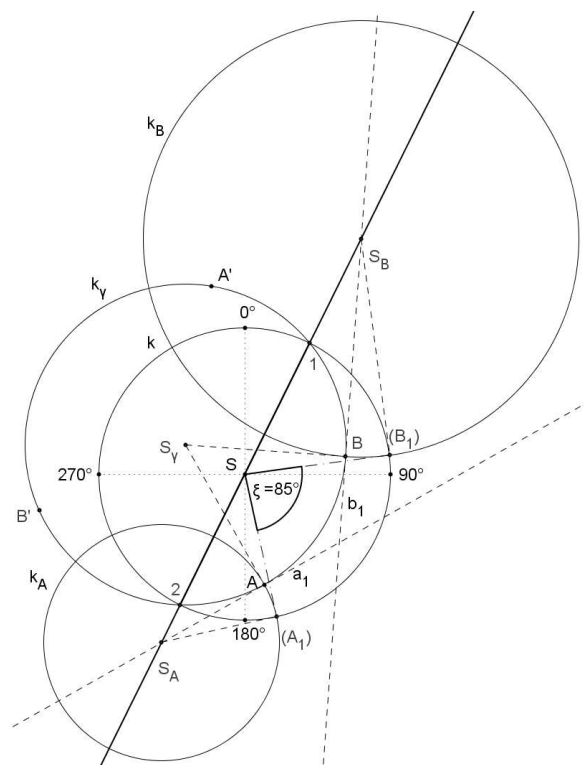
b) Konstrukční řešení:

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici **k** se středem **S**, na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň **0°** je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 10 v předchozím postupu 5.1.2.b) vzniknou sklopené body **(A)**, **(A')**, **(B)**, **(B')** a sklopené zenity **(Z_A)**, **(Z_B)**. Body **A**, **B** i jejich inverzní body **A'**, **B'** jsou výsledkem stereografické projekce daných lineárních prvků **A(170°/15°)**, **B(80°/20°)**.
3. Projekce roviny γ , která obsahuje lineární prvky **A**, **B** (body 5 až 7 v postupu 6.1.b)), je kružnice **k_γ** se středem **S_γ**, na které leží body **A**, **A'**, **B**, **B'**. Stopa roviny γ je úsečka **12** (Obr. 6.28). Čtyřmi body **A**, **A'**, **B**, **B'** je kružnice přesně určena, její střed leží na průsečičce os dvou libovolně zvolených úseček mezi těmito body.



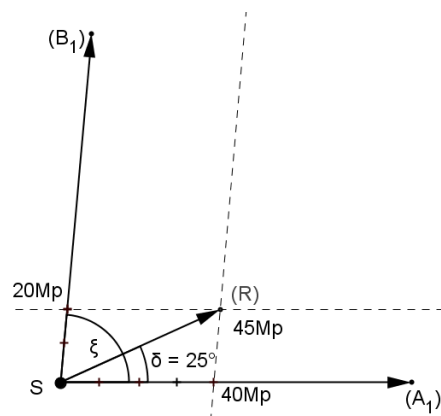
Obr. 6.28

4. Podle postupu 6.4.b) zjistíme velikost úhlu ξ mezi lineárními prvky **A** a **B** v rovině γ tak, že sklopíme rovinu γ s lineárními prvky **A** a **B** do roviny průmětny π , lineární prvky **A** a **B** se zobrazí v rovině průmětny π jako sklopené body **(A₁)** a **(B₁)**. Sestrojením tečen **a₁** a **b₁** ke kružnici **k_γ** procházejících body **A** a **B** najdeme body **S_A** a **S_B**, což jsou průsečíky tečen **a₁** a **b₁** s osou otáčení, stopou roviny γ , přímkou **12**. Sestrojíme kružnice **k_A** a **k_B** se středy **S_A** a **S_B** a poloměry **|S_AA|** a **|S_BB|**. Body **(A₁)** a **(B₁)** jsou průsečíky kružnic **k_A** a **k_B** s kružnicí **k** (bližší k bodům **A** a **B** - viz obr. 6.29). Úhel ξ je úhel mezi úsečkami **S(A₁)** a **S(B₁)** s velikostí $\xi = |\angle(\mathbf{A}_1)\mathbf{S}(\mathbf{B}_1)| = 85^\circ$.



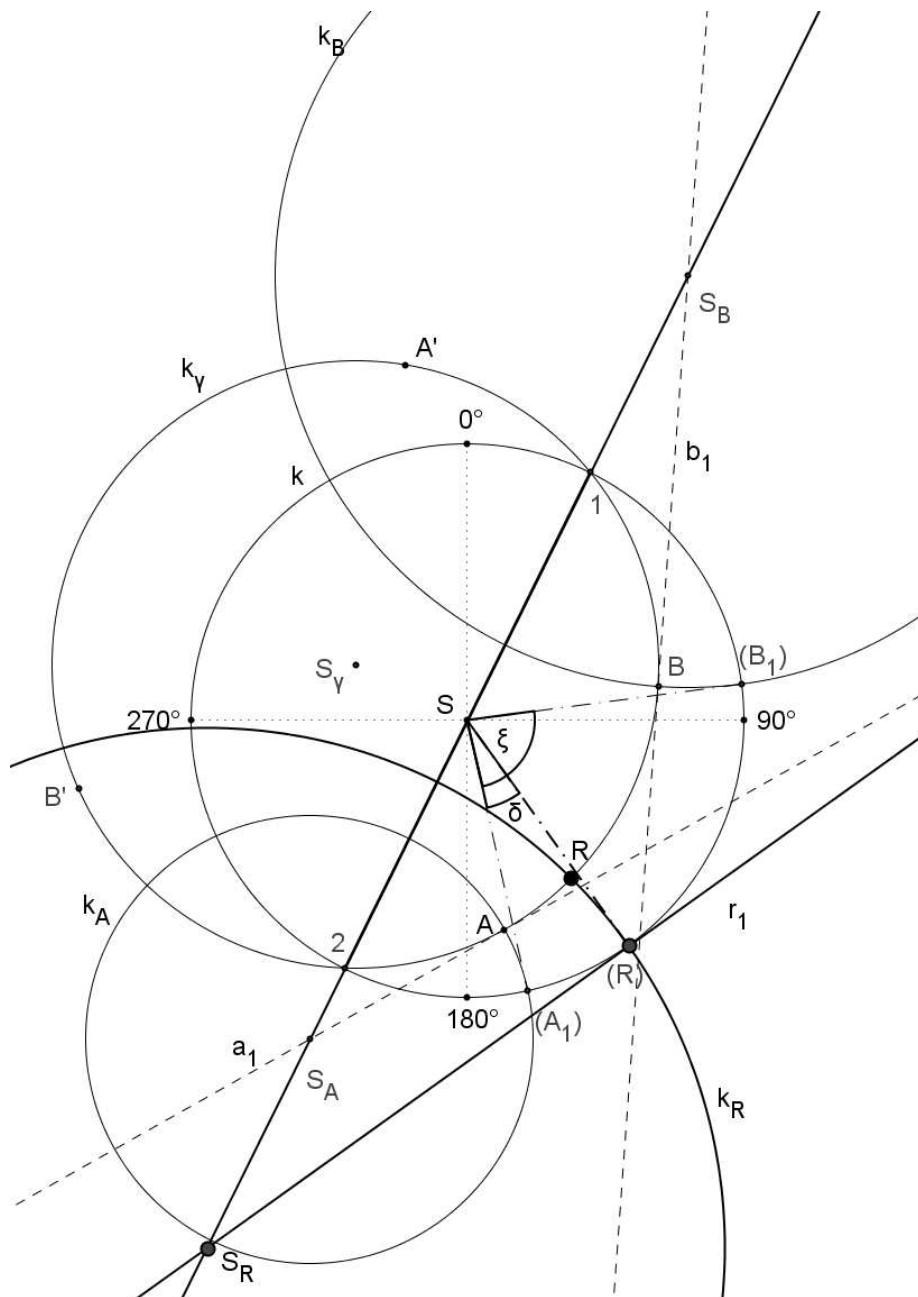
Obr. 6.29

5. Sestrojíme složkový obrazec pro vektory **(A₁)** a **(B₁)**, které mezi sebou svírají úhel ξ . Složkový obrazec je možné rýsovat přímo v obr. 6.29 nebo mimo, viz obr. 6.30. Vynesením poměru sil na vektory **(A₁)** a **(B₁)** určíme jejich výslednici **(R)**, úhel $\delta = |\angle(\mathbf{A}_1)\mathbf{S}(\mathbf{R})|$ (nebo $|\angle(\mathbf{B}_1)\mathbf{S}(\mathbf{R})|$) a velikost výslednice **(R)**, což je délka úsečky **|S(R)|** vzhledem k délce vektorů **(A₁)** a **(B₁)**. Zde je úhel $\delta = 25^\circ$ a velikost vektoru **(R)** je **45Mp** (Obr. 6.30).



Obr. 6.30

6. Vynesením úhlu $\delta = |\angle(\mathbf{A}_1)\mathbf{S}(\mathbf{R})| = 25^\circ$ do základní kružnice k narýsujeme výslednici (\mathbf{R}) a zpětným postupem sklopíme výslednici (\mathbf{R}) z roviny průmětny π do roviny γ . Sestrojíme tečnu r_1 ke kružnici k v bodě (\mathbf{R}) . Bod S_R je průsečík tečny r_1 s osou otáčení, přímkou $\overline{12}$. Sestrojíme kružnici k_R se středem S_R a poloměrem $|S_R(\mathbf{R})|$. Průsečík kružnice k a kružnice k_R je bod \mathbf{R} . Výsledkem je bod \mathbf{R} , stereografická projekce výslednice vektorů \mathbf{A} a \mathbf{B} (Obr. 6.31).

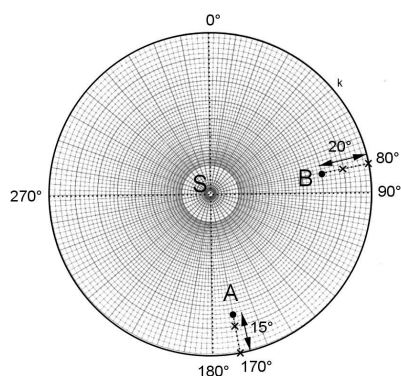


Obr. 6.31

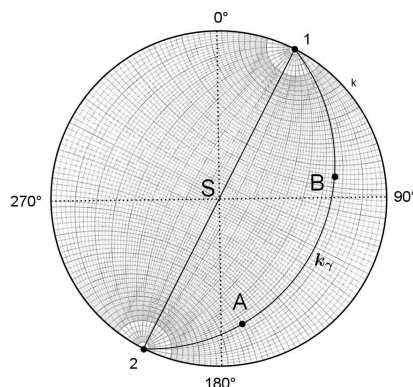
7. Podle postupu 5.1.3.b) zjistíme azimut a sklon výslednice \mathbf{R} , výsledkem je azimut 147° , sklon 21° . Výslednice vektorů \mathbf{A} a \mathbf{B} je dána lineárním prvkem $\mathbf{R}(147^\circ/21^\circ)$ a velikost je $45M_p$.

c) Řešení pomocí Wulfových sítí:

1. Orientace vektorů **A** a **B** je dána lineárními prvky **A(170°/15°)** a **B(80°/20°)**, které zobrazíme pomocí sítě v pólové projekci tak, jak je popsáno v postupu 5.1.2.c) (Obr. 6.32), vzniknou dva body **A** a **B**.
2. Pomocí sítě v rovníkové projekci podle postupu 6.1.c) zobrazíme oblouk velké kružnice k_γ , který je projekcí roviny γ , která obsahuje lineární prvky **A** a **B**, a narýsujeme stopu roviny γ , úsečku **12** (Obr. 6.33).

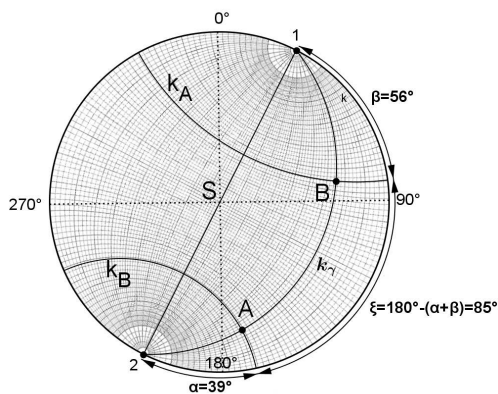


Obr. 6.32



Obr. 6.33

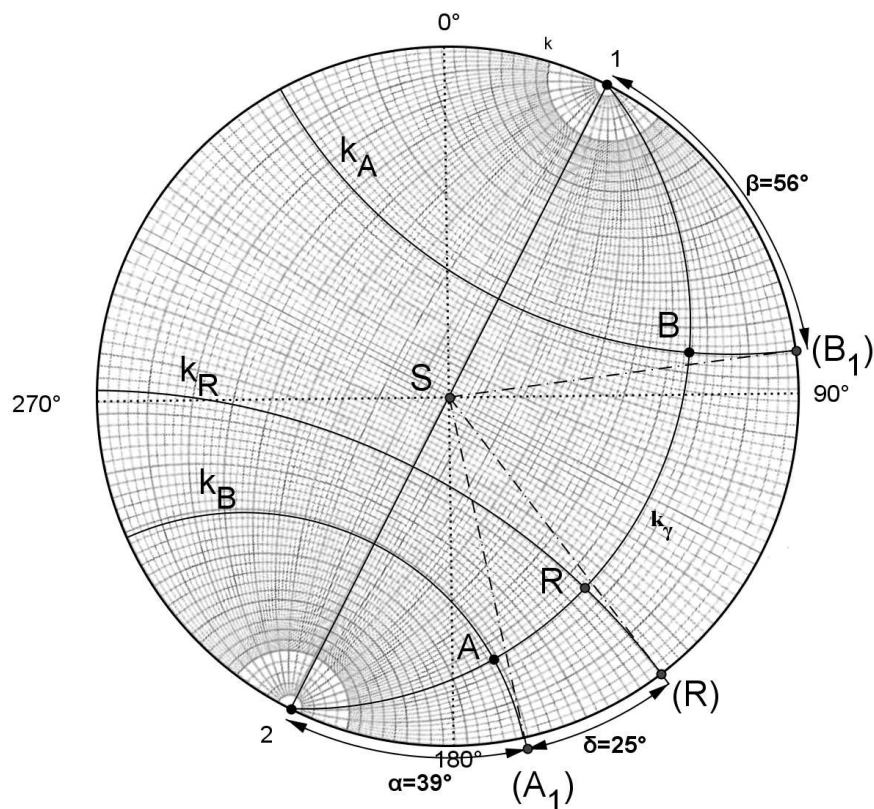
3. Body **A** a **B** proložíme oblouky malých kružnic k_A a k_B tak jako v bodě 4 postupu 6.4.c) a zjistíme také úhel ξ , který svírají lineární prvky **A** a **B**. Na paletce v rovníkové projekci můžeme přímo odečíst úhel $\alpha = 44^\circ$ pro kružnici k_A a úhel $\beta = 39^\circ$ pro kružnici k_B a úhel $\xi = 85^\circ$ mezi body **A** a **B** (Obr. 6.34).



Obr. 6.34

4. Stejně jako v předchozím postupu 6.6.b) v bodě 5. vytvoříme složkový obrazec (Obr. 6.30), vyneseme poměry vektorů (**A₁**) a (**B₁**) a narýsujeme výslednici (**R**). Dále zjistíme úhel, který svírá výslednice (**R**) s jedním z vektorů (**A₁**) a (**B₁**), tedy například úhel $\delta = \angle(\mathbf{A})\mathbf{S}(\mathbf{R}) = 25^\circ$. Ze složkového obrazce také odečteme velikost vektoru (**R**), která je **45Mp**.

5. Úhel $\delta = \angle(\mathbf{A})\mathbf{S}(\mathbf{R}) = 25^\circ$ vyneseme zpět do základní kružnice k například odpočítáním na obvodu kružnice k , viz obr. 6.35 (obr. 6.35 ukazuje také vektory (\mathbf{A}_1) , (\mathbf{B}_1) a (\mathbf{R}) sklopené z roviny γ do roviny průmětny π). Tím je dán oblouk malé kružnice k_R . Průsečík oblouku velké kružnice k_γ a oblouku malé kružnice k_R je bod \mathbf{R} , který je stereografickou projekcí výslednice vektorů \mathbf{A} a \mathbf{B} , jeho azimut zjistíme pomocí paletky v pólové projekci podle postupu 5.1.3.c), výsledek je 147° , sklon 21° , tedy je dán lineárním prvkem $\mathbf{R}(147^\circ / 21^\circ)$ a velikost je 45Mp .



Obr. 6.35

7. Stabilita skalních stěn

7.1. Předpoklady řešení

Pomocí stereografických metod lze stabilitu skalního masivu vůči volným plochám (povrchu svahů, stěnám podzemních výrubů) řešit dvěma hlavními způsoby a výběr vhodného řešení závisí na charakteru zadání. Tato řešení je možné použít pokud platí tyto čtyři předpoklady (Drozd, 2013):

1. Skalní masiv je rozdělen daným prostorovým systémem diskontinuit, tedy ploch, na kterých za určitých podmínek dojde k sesunutí části masivu a horninové elementy mezi diskontinuitami jsou dokonale tuhé a při posunu sebe ani své okolí nedeformují, nemůže se v nich vytvořit nová diskontinuita a nemůže v nich proudit voda. Na horninové elementy může kromě vnějších sil působit také hydrostatický tlak a vztlak a síly vycházející ze zrychlení při seismických účincích.
2. Diskontinuity jsou planární, průběžné a jejich orientace v prostoru je určena azimutem a sklonem spádnice.
3. Jsou známy pevnostní charakteristiky na daných diskontinuitách (úhel tření vrcholový a reziduální a počáteční pevnost) a to pro očekávané směry posuvu. Na velikosti pevnostních charakteristik se podílí drsnost, rozevření, výplň, propustnost a povrchová pevnost horninového elementu na protilehlých plochách nespojitosti.
4. Všechny vnější síly působící na quasihomogenní celek horninového masivu (např. gravitace, síly kotev, vztlak, seismické účinky) lze soustředit do těžiště hodnoceného celku a lze tedy určit výslednici vnějších sil. Prozatím nebyla stereografická metoda využita v případech, kde na quasihomogenní celek působila nějaká síla excentricky a tedy zatížila hodnocený celek masivu momentovou silou, kterou by se na planární ploše diskontinuity vyvolil rotační posuv.

Pokud se některá z výše uvedených podmínek výrazněji mění, je nutno posuzovaný prostor horninového masivu vyčlenit do quasihomogenních celků a v každém celku danou úlohu řešit zvlášť.

Sesuvy, které je možné řešit stereografickými metodami jsou:

1. sesuv podle planární plochy,
2. vysunutí bloku ve tvaru čtyřstěnu, odděleného dvěma diskontinuitami ve směru jejich průsečnice.

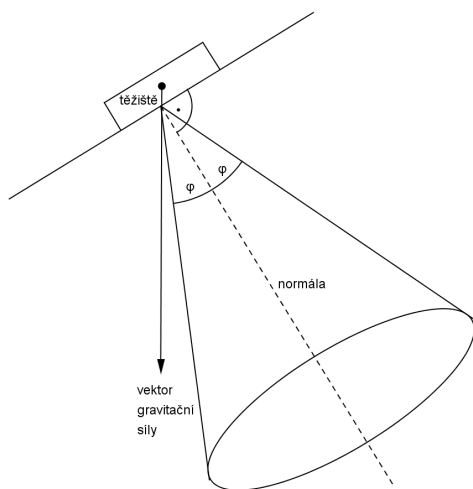
Zda bude sesuv probíhat podle planární plochy závisí také na četnosti diskontinuit. Při velké hustotě diskontinuit může být smyková plocha zakřivená a dojde pak k typu sesuvu podle rotační plochy, což nelze řešit stereografickými metodami. V případě, že může dojít k sesuvu podél lomených ploch, řešení stereografickými metodami je možné ale úloha se řeší pro rozdílné quasihomogenní celky (Drozd, 1976).

7.2. Stabilita na planární ploše diskontinuity

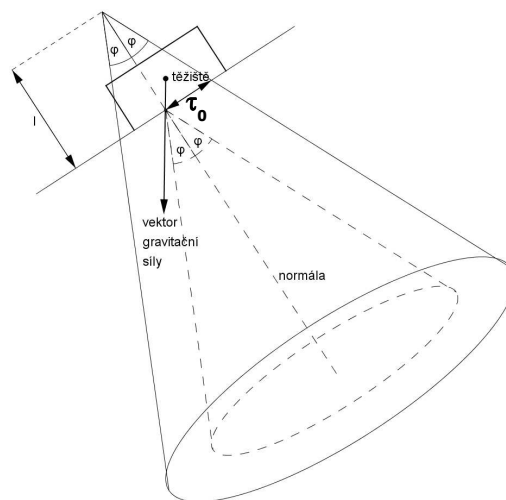
Je dán určitý počet diskontinuit, jejichž směr a sklon je známý. Také je známý úhel vnitřního tření, o kterém se předpokládá, že je na všech diskontinuitách a ve všech směrech možného posuvu stejný. Na vyšetřovanou část masivu působí pouze gravitační síla.

Pokud má systém diskontinuit stejný směr jako navrhovaný svah, je možné tuto úlohu zjednodušit podmínkou: úhel sklonu spádnice diskontinuit musí být menší než úhel tření. Pak je vertikální vektor gravitační síly uvnitř bezpečnostního kužele a případ je stabilní. V případě, že sklon posuzované roviny je větší než úhel tření φ , pak vektor gravitace vychází vně bezpečnostního kužele a případ je nestabilní, viz obr. 7.1. Tato koncepce umožňuje pak určit směr, sklon a velikost vektoru kotev tak, aby výslednice vektoru gravitace a vektoru kotevní síly se posunula dovnitř bezpečnostního kužele.

V uvedeném případě (Obr. 7.1) se zanedbává počáteční pevnost τ_0 . Chceme-li zavést do řešení také vliv počáteční pevnosti, lze posunout vrchol bezpečnostního kužele ve směru jeho osy o délku $l = \tau_0 \cdot \cot \varphi$ nad rovinu diskontinuity. Na obr. 7.2 je řešení s počáteční pevností a při stejném úhlu tření na posuzované diskontinuitě a při menší velikosti vektoru gravitační síly je případ stabilní.



Obr. 7.1 Bezpečnostní kužel: gravitační síla směřuje vně kužele a těleso není stabilní.



Obr. 7.2 Bezpečnostní kužel s využitím počáteční pevnosti τ_0 . Těleso je v tomto případě při menší velikosti vektoru gravitační síly stabilní

U svahů tvořených zeminami se ve stavebních výkresech uvádí návrhový sklon svahu v úhlech, nebo tangencích úhlů. U svahů tvořených skalními horninami s konkrétními diskontinuitami je nutné respektovat lokální sklon konkrétní diskontinuity na místě a nesnažit se za každou cenu dodržet nějaký striktně předem předepsaný sklon. Ve stavebních výkresech je proto vhodné uvádět navržený bezpečný sklon jen orientačně (Drozd, 1976).

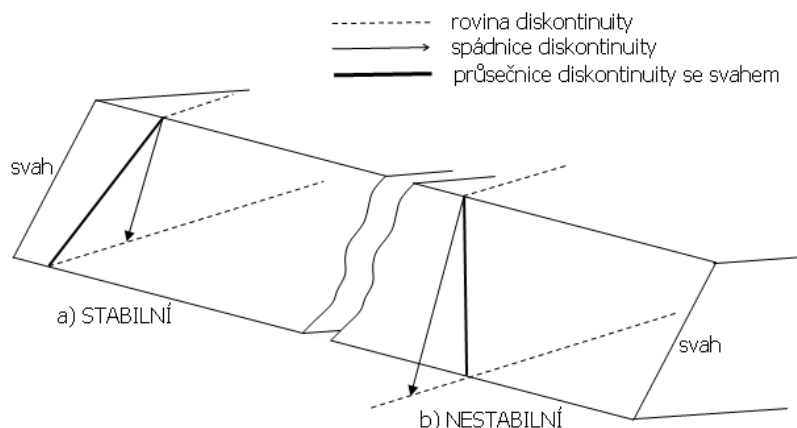
7.3. Určení bezpečného sklonu svahu – Rothovo řešení

Toto řešení podle českého geologa RNDr. Zdenka Rotha umožňuje jednoduchým posouzením zjistit mez stability skalního svahu:

Svah v masivu pevné horniny je vzhledem k určité diskontinuitě právě na mezi stability, protíná-li stěna svahu tuto diskontinuitu v její spádové přímce (Roth, 1954). Tedy pokud průsečnice stěny svahu a diskontinuity spádnicí diskontinuity splynou, je tento sklon svahu právě na mezi stability. Podle vztahu průsečnice svahu a diskontinuity se spádnicí této diskontinuity lze stabilitu hodnotit takto:

Pokud bude spádnicí diskontinuity pod průsečnicí stěny svahu a diskontinuity, je stabilita pro tuto diskontinuitu zajištěna, viz obr. 7.3 a).

Pokud bude spádnicí diskontinuity nad průsečnicí stěny svahu a diskontinuity, stabilita svahu není zajištěna, viz obr. 7.3 b).



Obr. 7.3 Stabilita určená pomocí vzájemné polohy průsečnice svahu s diskontinuitou a spádnicí diskontinuity

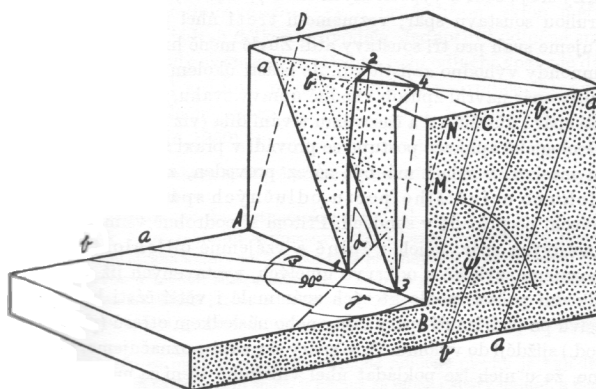
Bezpečný sklon svahu lze také vypočítat vztahem (Roth 1954)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \gamma}, \text{ kde (zobrazení úhlů je na obr. 7.4):}$$

ψ - hledaný bezpečný sklon svahu

α - sklon posuzovaného systému diskontinuit

β - úhel mezi azimutem svahu a azimutem posuzovaného systému diskontinuit, $\gamma = 90^\circ - \beta$



Obr. 7.4 Výpočet bezpečného sklonu svahu (Roth 1954)

7.4. Stabilita na planární ploše – pouze gravitační zatížení

Pomocí tohoto řešení je možné zjistit bezpečný sklon svahu, za předpokladu, že quasihomogenní celky jsou zatíženy jen gravitační silou. Tento příklad lze řešit i v případě, že systémy diskontinuit nemají stejný azimut jako navrhovaný svah. V tomto případě je třeba zadat diskontinuity pomocí jejich spádnic (nebo přepočítat orientace normál na orientace spádnic).

a) Zadání

Působí jen gravitační síla. Vektor síly je tedy $\mathbf{F} (0^\circ / 90^\circ)$. Velikost zatížení zde teoreticky nerozhoduje.

Příklad bude pro názornost řešen pro 5 systémů diskontinuit souhlasného směru (řešení je možné použít pro libovolné známé systémy diskontinuit s libovolným azimutem spádnice svahu), přičemž dvě roviny mají sklon opačný než je sklon navrhovaného svahu a tři roviny mají sklon směřující souhlasně.

Navrhovaný svah, který představuje rovina γ , má sklon k jihu, je orientován $90^\circ - 270^\circ$ a jeho sklon je předběžně určen $\chi = 55^\circ$, svah má tedy spádnici $\mathbf{D}_\gamma (180^\circ / 55^\circ)$.

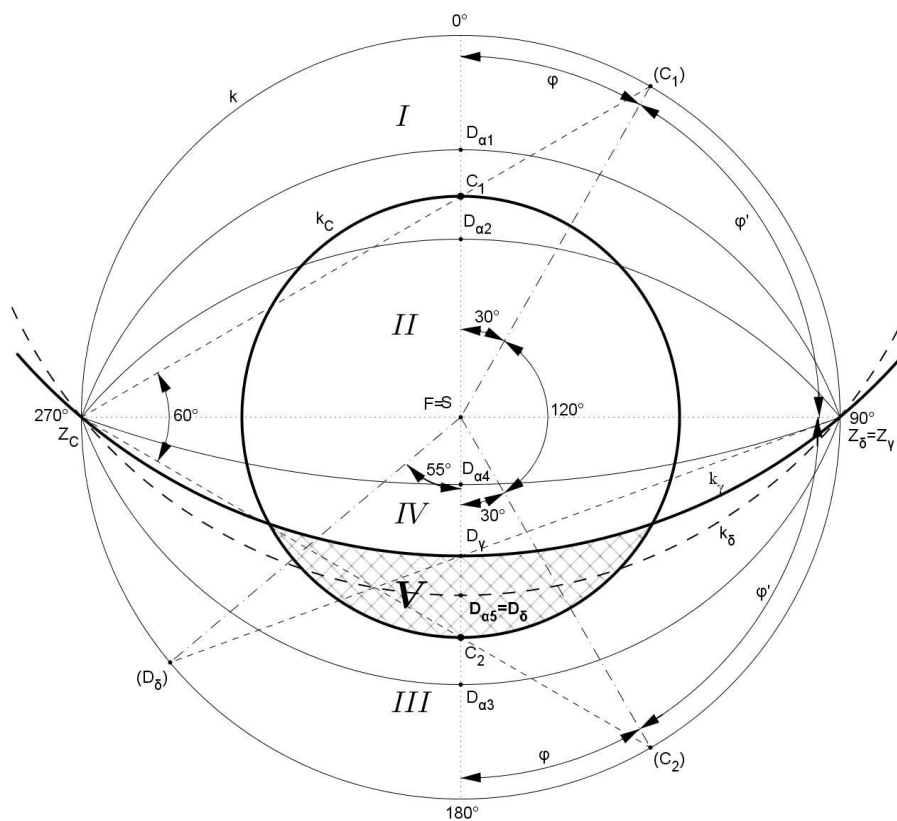
Jsou dány tyto systémy diskontinuit, určené plošnými prvky: roviny $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ a α_5 svými odpovídajícími spádovými přímkami $\mathbf{D}_{\alpha_1} (0^\circ / 20^\circ)$, $\mathbf{D}_{\alpha_2} (0^\circ / 40^\circ)$, $\mathbf{D}_{\alpha_3} (180^\circ / 20^\circ)$, $\mathbf{D}_{\alpha_4} (180^\circ / 70^\circ)$, $\mathbf{D}_{\alpha_5} (180^\circ / 40^\circ)$.

V příkladě byl zvolen jednotný úhel vnitřního tření na všech pěti systémech diskontinuit. Úhel vnitřního tření $\varphi = 30^\circ$ odpovídá úhlu, který svírají povrchové přímky kužele a základní rovina. Kužel tedy bude mít osu $(0^\circ / 90^\circ)$ a úhel mezi povrchovou přímkou a osou $\varphi' = 90^\circ - \varphi = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$.

Použita je úhlojevná projekce, promítání na spodní polokouli a pól je v Zenitu.

b) Konstrukční řešení

1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici k se středem S , na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3-10 v předchozím postupu 5.1.2.b) zobrazíme vektor síly F ($0^\circ/90^\circ$) jako lineární prvek. Protože nepůsobí jiná síla než gravitace, projekce vektoru F je bod F , který je totožný s polohou bodu S .
3. Podle bodů 3-5 v předchozím postupu 5.2.2.b) zobrazíme spádnici roviny svahu D_γ ($180^\circ/55^\circ$). Vznikne tak: spádnice D_γ , kružnice k_γ , pomocné body (D_γ) , (Z_γ) a oblouk velké kružnice k_γ .
4. Podle stejného postupu také zobrazíme spádnice diskontinuit: $D_{\alpha 1}$, $D_{\alpha 2}$, $D_{\alpha 3}$, $D_{\alpha 4}$, $D_{\alpha 5}$ (pomocné sklopené body a kružnice rovin α_1 až α_5 nejsou kvůli přehlednosti na obrázku vykresleny, pro toto řešení využijeme pouze spádnice těchto rovin).
5. Podle bodů 3-9 v předchozím postupu 5.3.2 zobrazíme stereografickou projekci kužele, kružnici k_C . Osa kužele je ($0^\circ/90^\circ$) a úhel $\varphi' = 60^\circ$, vrcholový úhel je tedy $2\varphi' = 120^\circ$. Vzniknou pomocné body C_1 , C_2 , (C_1) , (C_2) a (Z_C) (Obr. 7.5).

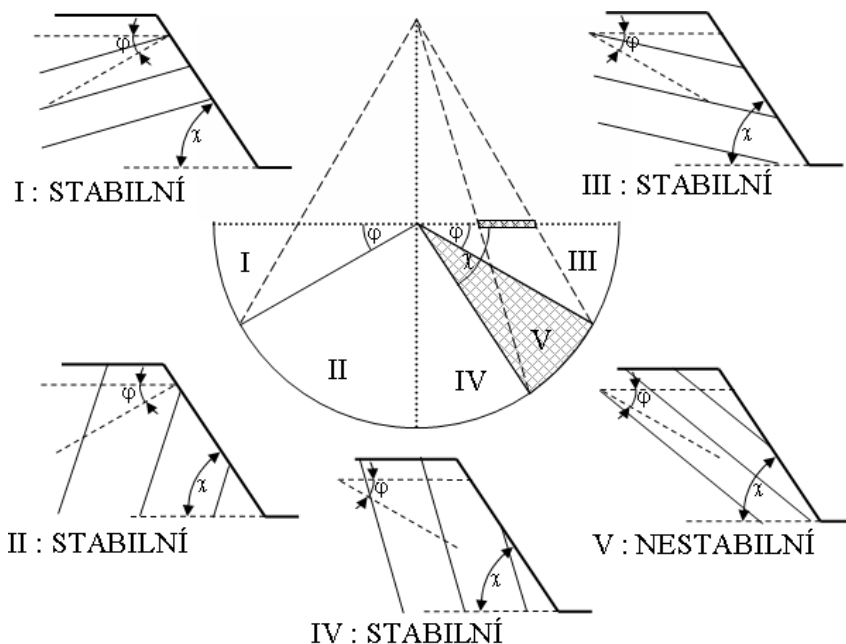


Obr. 7.5

c) Vyhodnocení stability:

Nákres je rozdělen na pět oblastí označených I až V, kde je stabilita odlišná a různě zajištěna (Drozd, 1981), grafické znázornění je na obr. 7.6, uvažuje se stabilita na libovolné diskontinuitě v oblasti, úhel sklonu její spádnice je označen δ a sklon svahu je χ :

- | | | |
|-----|---|--|
| I | $\delta < \varphi$
Stabilní | Oblast I je na horní polovině v kružnici k , tedy v půlkruhu ohraničeném 0° , 90° , 270° a zároveň je zespodu ohraničena kružnicí k_C , je vně této kružnice.
Stabilita na diskontinuitách v této oblasti je zajištěna, protože: <ul style="list-style-type: none"> ▪ jejich spádnice zapadají do svahu, ▪ stabilita je zajištěna úhlem vnitřního tření, protože je sklon svahu menší. |
| II | $\delta > \varphi$
Stabilní | Oblast II je na vrchní polovině v kružnici k , tedy v půlkruhu ohraničeném 0° , 90° , 270° , také je ohraničena kružnicí k_C , ale je uvnitř této kružnice.
Stabilita na diskontinuitách v této oblasti je zajištěna, protože jejich spádnice zapadají do svahu. |
| III | $\delta < \varphi$
Stabilní | Oblast III je na dolní polovině v kružnici k , tedy v půlkruhu ohraničeném 90° , 180° , 270° , také je ohraničena kružnicí k_C , a je vně této kružnice.
Stabilita na diskontinuitách v této oblasti je zajištěna, protože opět úhel vnitřního tření je větší než úhel sklonu spádnic diskontinuit. |
| IV | $\delta > \varphi$
Stabilní | Oblast IV je na spodní polovině v kružnici k , tedy v půlkruhu ohraničeném 90° , 180° , 270° a zespodu je ohraničena obloukem velké kružnice k_γ .
Stabilita na diskontinuitách v této oblasti je zajištěna – úhel sklonu spádnic diskontinuit je větší než navrhovaný sklon svahu, blok horniny, které diskontinuity oddělují je tedy opřeny o podloží. |
| V | Nestabilní
$\delta > \varphi$
$\delta < \chi$ | Oblast V je na spodní polovině v kružnici k , tedy v půlkruhu ohraničeném 90° , 180° , 270° a svrchu je ohraničena obloukem velké kružnice k_γ a zespodu kružnicí k_C . Tato část je vyznačena šrafovou.
Stabilita na diskontinuitách v této oblasti není zajištěna. Úhel sklonu spádnic diskontinuit je větší než úhel vnitřního tření a zároveň menší než je sklon svahu.
V této oblasti nesmí ležet žádná projekce spádnice diskontinuity, ani projekce průsečnice dvou diskontinuit. Pokud je tato podmínka splněna, je navrhovaný svah stabilní. |

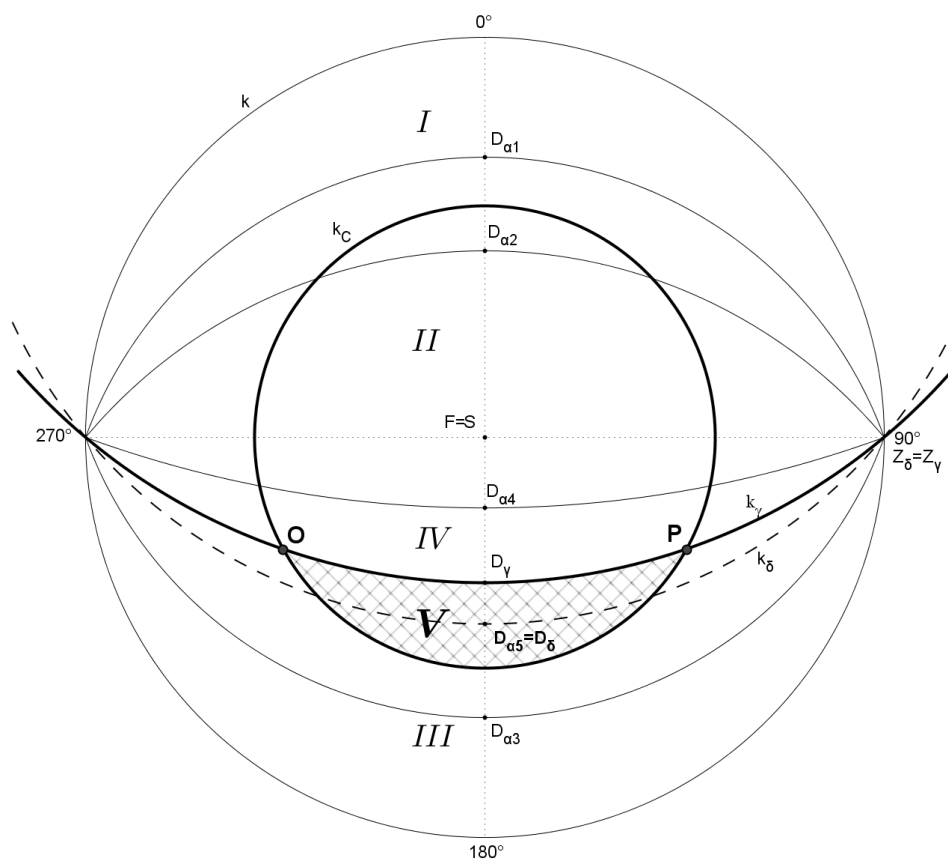


Obr. 7.6 Grafické znázornění stabilitních možností vztahu orientace diskontinuit vůči orientaci svahu

Pro určení bezpečného sklonu svahu při řešení využívající průměty spádnic platí podmínka:

Stabilita skalního svahu se zvoleným sklonem svahu je zajištěna, pokud v **průmětu sférického dvojúhelníku o vrcholech OP** (vyšrafovaná oblast V na obr. 7.7) se **nevyskytuje žádný průmět spádnice** nějaké diskontinuity ani žádný **průmět průsečnice** dvojice nějakých diskontinuit. Tím je vyloučen planární posun na dané diskontinuitě a také posun tělesa ve tvaru čtyřstěnu (klín) ve směru průsečnice.

Ve zvoleném příkladu je ve sférickém dvojúhelníku **OP** v oblasti V, projekce spádnice **D_{α_5}** diskontinuity **α_5** , proto by byl navrhovaný svah nestabilní. Je tedy nutné zmenšit sklon svahu a svah navrhnout alespoň se stejným sklonem jako má spádnice **D_{α_5}** . Na obr. 7.7 je čárkovaně vyznačen oblouk velké kružnice **k_δ** , který je projekcí hledaného svahu o bezpečném sklonu **40°** se svojí spádnicí **D_δ** , jejíž projekce je totožná jako spádnice **D_{α_5}** diskontinuity **α_5** .



Obr. 7.7 Určení bezpečného sklonu svahu – zadány spádnice diskontinuit

7.5. Stabilita svahu při zatížení více silami

Je dán určitý počet systémů diskontinuit, jejichž sklon a směr je známý.

Také je známý úhel vnitřního tření na těchto diskontinuitách, který nemusí být na všech diskontinuitách stejný a nemusí být stejný ve všech směrech.

Na svah působí kromě gravitační síly i další síly (např. síla kotev), přičemž velikost gravitační síly i dalších sil jsou známy a lze je složit do jediné výslednice. Zde se předpokládá, že všechny vnější síly lze složit do těžiště hodnoceného quasihomogenního celku, t.j. že celek není zatížen momentem sil (celkovou výslednicí všech sil lze vyjádřit a zobrazit ve stereografické projekci, postup pro skládání vektorů ve stereografické projekci uveden v příkladu 6.6).

Úhel vnitřního tření představuje odklon povrchové přímky kužele od jeho osy. Osou kužele je v tomto případě normála diskontinuity.

Tyto úlohy tedy zjišťují, zda se průmět výslednice vnějších sil nachází uvnitř nebo vně průmětu pláště bezpečnostního kužele. V případech, že průmět výslednice vnějších sil je uvnitř průmětu pláště bezpečnostního kužele, je posuzovaný quasihomogenní celek ve stabilní poloze. V případech, že průmět výslednice vnějších sil je vně průmětu pláště bezpečnostního kužele je quasihomogenní celek v nestabilní poloze. V tomto případě lze přidáním dodatečných vnějších sil (např. kotev) posunout průmět výslednice dovnitř průmětu pláště bezpečnostního kužele, aby se celek stal stabilní.

Úhlová vzdálenost průmětu výslednice od průmětu osy kužele, tedy od průmětu normály posuzované plochy nespojitosti - úhel δ (je ho možné zjistit pomocí příkladu stanovení úhlu mezi dvěma různoběžkami v postupu 6.4.), může posloužit k vyhodnocení stupně stability

$$S = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{tg}\delta} \quad (\text{Drozd, 1982}).$$

a) Zadání

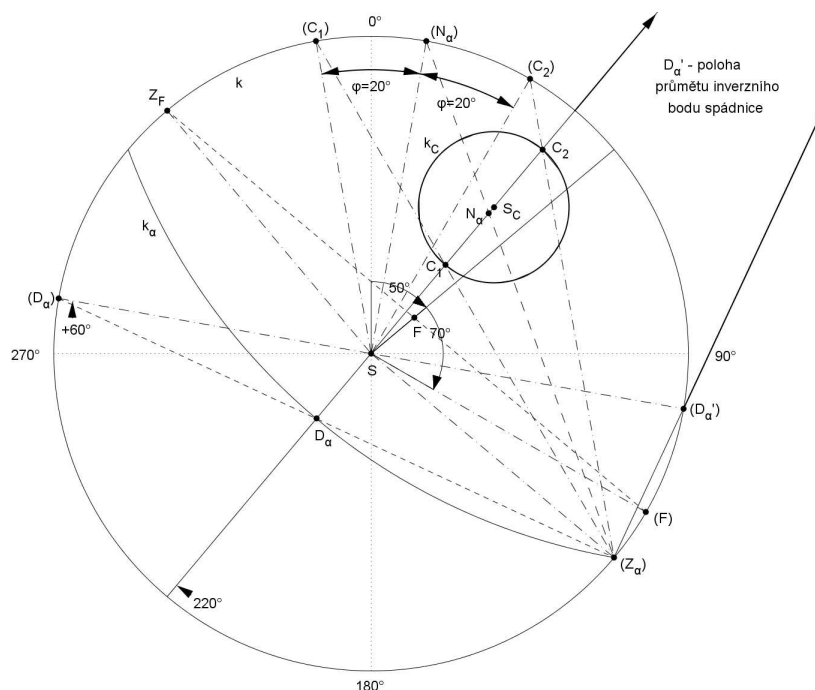
Diskontinuita je dána plošným prvkem, rovinou α se svojí spádovou přímkou D_α ($220^\circ / 60^\circ$).

Úhel vnitřního tření na diskontinuitě α je $\varphi = 30^\circ$ o kterém se v této úloze předpokládá, že je pro všechny směry možného posuvu stejný.

Výsledná působící síla je dána lineárním prvkem F ($50^\circ / 70^\circ$).

b) Konstrukční řešení

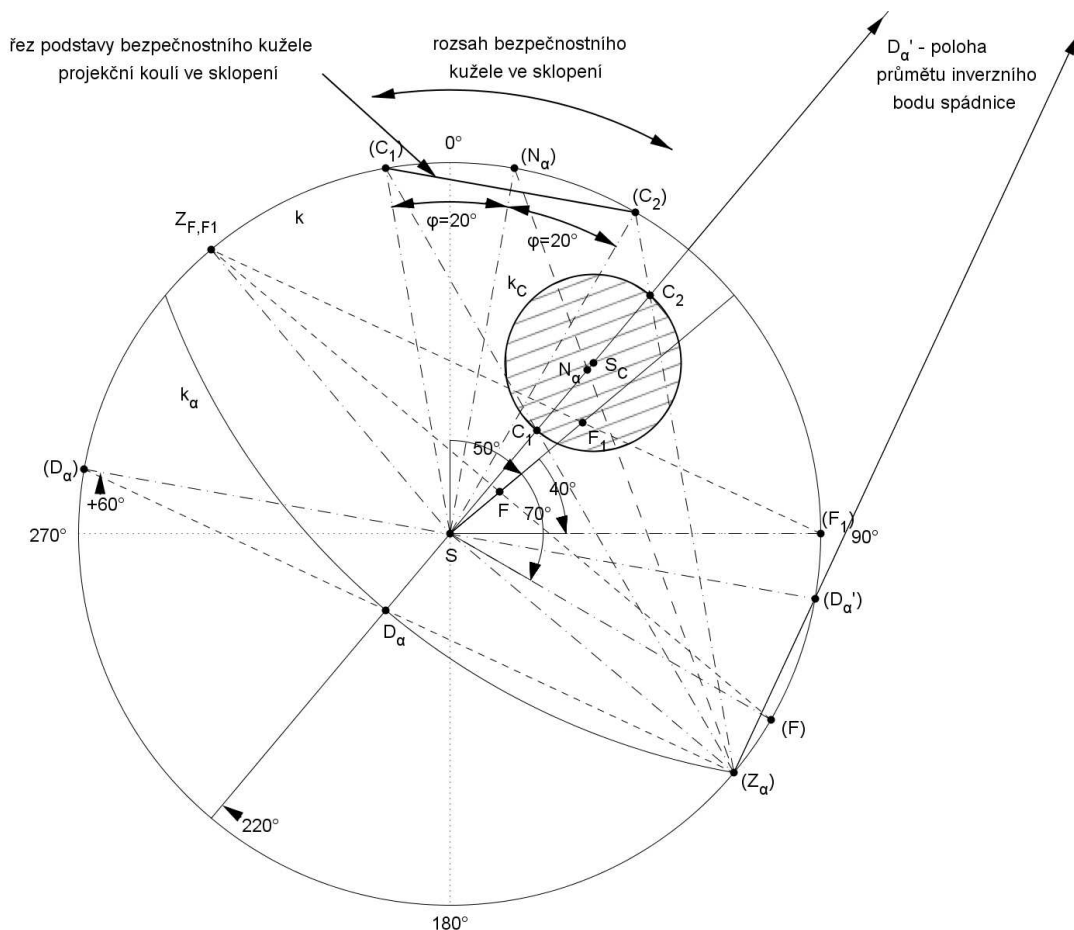
1. Rýsujeme v zobrazovací rovině π . Narýsujeme základní kružnici k se středem S , na které vytvoříme orientaci v úhlech, nultý stupeň 0° je orientován k severu a kladný směr je ve směru hodinových ručiček.
2. Podle bodů 3 až 5 v předchozím postupu 5.2.2 zobrazíme průmět spádnice roviny D_α ($220^\circ / 60^\circ$) a průmět normály N_α k rovině α . Vznikne tak: průmět spádnice D_α , průmět inverzního bodu D_α' , průmět normály N_α , kružnice k_α se středem S_α (mimo zobrazovací plochu) a pomocné sklopené body (D_α) , (D_α') , (Z_α) , (N_α) (Obr. 7.8).
3. Odklon úhlu vnitřního tření φ od normály N_α určuje bezpečnostní kužel s vrcholem ve středu projekční koule S , s osou danou průmětem normály N_α a s vrcholovým úhlem 2φ . Tedy všechny povrchové přímky kužele procházejí středem projekční koule S a jejich sklon k ose kužele je dán právě úhlem vnitřního tření φ . Podle bodů 4 až 9 postupu 5.3.2. sestrojíme kružnici k_C se středem S_C ve středu úsečky C_1C_2 , její poloměr je polovina úsečky C_1C_2 , využity tak byly pomocné body (C_1) a (C_2) ve sklopení. Kružnice k_C je projekcí pláště bezpečnostního kužele s osou danou normálou N_α a úhlem mezi povrchovou přímkou a osou $\varphi = 30^\circ$.
4. Podle postupu 5.1.2. zobrazíme průmět výslednice sil jako lineární prvek F ($50^\circ / 70^\circ$) (Obr. 7.8).



Obr. 7.8

c) Vyhodnocení stability:

Z obr. 7.9 plyne, že výslednice vnějších sil, určená projekcí bodem F , leží vně průmětu bezpečnostního kužele (mimo vyšrafovanou oblast ohraničenou kružnicí k_C) a proto je případ nestabilní. Aby bylo dosaženo stability, musí ležet projekce výslednice sil uvnitř projekce bezpečnostního kužele. Výslednici sil je tedy nutné změnit tak, aby se bod F posunul dovnitř plochy vymezené kružnicí k_C (tedy například do bodu $F_1(50/40)$).



Obr. 7.9 Sestrojení bezpečnostního kužele – vyšrafovaná oblast

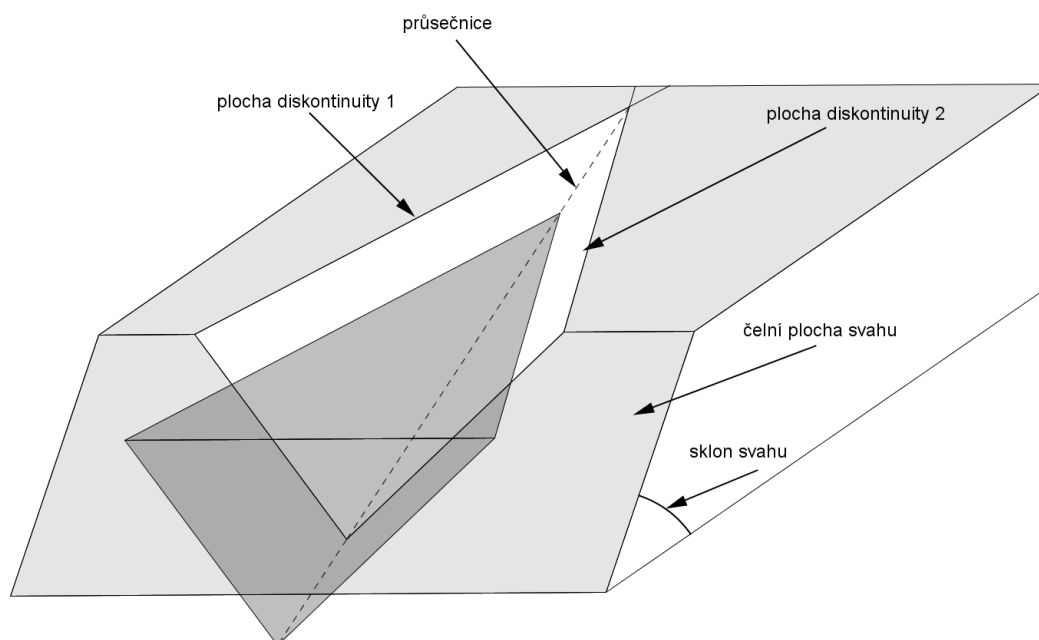
Abychom mohli vyjádřit stupeň nestability pro bod F , museli bychom body F a N_α proložit rovinu, tuto rovinu sklopit a pak vyšetřit úhlové vzdálenosti (stanovení úhlu mezi dvěma různoběžkami, podle příkladu 6.4.). V obr. 7.9 tento postup již není uveden.

7.6. Stabilita svahu v případě dvou ploch nespojitosti - stabilita čtyřstěnu

Dvě různě ukloněné plošné diskontinuity mohou ve svahu vytínat čtyřstěn, viz obr. 7.10. Tyto dvě diskontinuity se protínají v průsečnici, která může být v mírnějším sklonu než je spádnice svahu. V závislosti na orientaci výslednice vnějších sil mohou nastat čtyři případy nestability bloku ve tvaru čtyřstěnu (Drozd, 2013):

1. K posunu může dojít jen na ploše 1 a blok ztratí kontakt s plochou 2. Stabilitu zde zajišťuje tření jen na ploše 1.
2. K posunu může dojít jen na ploše 2 a blok ztratí kontakt s plochou 1. Stabilitu zde zajišťuje tření jen na ploše 2.
3. K posunutí může dojít ve směru průsečnice směrem nahoru nebo dolů. Stabilitu zde zajišťují obě plochy nespojitosti pro směr pohybu nahoru nebo dolů.
4. Blok může teoreticky vypadnout ze svahu směrem nahoru bez kontaktu s diskontinuitami. Takový případ by mohl nastat kdyby pod blokem vybuchla výbušnina, např. při komorovém odstřelu pod blokem.

V případě, že by blok ve tvaru čtyřstěnu byl zatížen i momentem nějaké vnější síly (výslednice vnějších sil by nebyly v těžišti čtyřstěnu), pak v případech 1 a 2 by mohl nastat i rotační posuv na diskontinuitách 1 nebo 2 (příklad řešení stability pro takový případ s využitím stereografických metod dosud nebyl nikde publikován).



Obr. 7.10 Čtyřstěn vytvořený čtyřmi plochami: diskontinuitami 1 a 2, čelní plochou svahu a původním terénem

Dále uvedené řešení zjišťuje způsob zajištění stability pokud existují dva systémy diskontinuit na kterých je možný posuv. Úhel vnitřního tření může být na diskontinuitách odlišný, ale stejný ve všech směrech možného posuvu. Tyto diskontinuity tedy vytvářejí spolu s rovinou svahu čtyřřstěn – klín, který může být nestabilní vzhledem k poloze výslednice vnějších sil. Úkolem je zjistit azimut a sklon výslednice sil tak, aby byla stabilita zajištěna na obou diskontinuitách a i pro čtyřřstěn, který spolu s rovinou svahu vytvářejí. Orientace výslednice se tedy bude skládat z gravitační síly a případného zajištění svahu – například z vektoru kotevnicích sil (Drozd, 1976).

Tento příklad je zde řešen pouze pomocí paletek.

a) Zadání

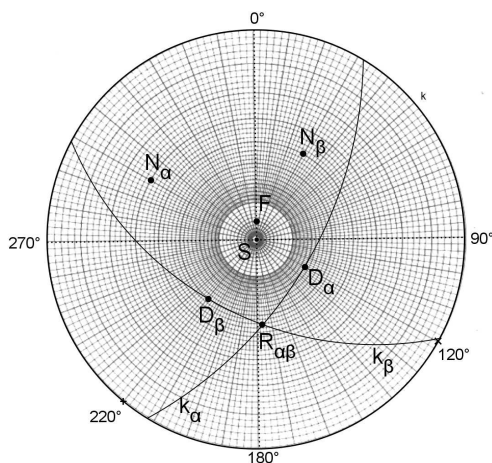
Jsou dány tyto dva systémy diskontinuit, určené plošnými prvky: rovina α určená svojí spádnicí $\mathbf{D}_\alpha(120^\circ/60^\circ)$ a rovina β určená svojí spádnicí $\mathbf{D}_\beta(220^\circ/50^\circ)$. Úhel tření je na diskontinuitách ve všech směrech možného posuvu stejný, na rovině α je $\varphi_\alpha = 30^\circ$ a na rovině β je $\varphi_\beta = 20^\circ$.

Použita je úhlojevná projekce, promítání na spodní polokouli a pól je v Zenitu Z.

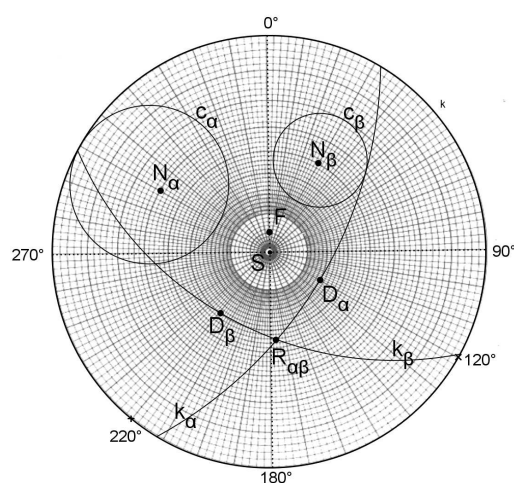
Výsledná působící síla je dána lineárním prvkem $\mathbf{F}(0^\circ/80^\circ)$.

b) Řešení pomocí Wulfových sítí

1. Podle předchozích postupů 5.1.2.c) a 5.2.2.c) pomocí paletky v pólové projekci zobrazíme body \mathbf{D}_α a \mathbf{D}_β představující projekci spádnic rovin α a β , body \mathbf{N}_α a \mathbf{N}_β představující projekci normál rovin α a β a výslednici sil \mathbf{F} . Pomocí paletky v rovníkové projekci nakreslíme oblouky velkých kružnic \mathbf{k}_α a \mathbf{k}_β představující projekci rovin α a β (Obr. 7.11).
2. Průsečík oblouků velkých kružnic \mathbf{k}_α a \mathbf{k}_β označíme jako bod $\mathbf{R}_{\alpha\beta}$, který je projekcí průsečnice rovin α a β (postup 6.2.c)), viz obr. 7.11.
3. Pomocí Wulfovy sítě v pólové projekci zobrazíme podle postupu 5.3.2.c) kružnice \mathbf{c}_α a \mathbf{c}_β s odpovídajícími úhly vnitřního tření $\varphi_\alpha = 30^\circ$ a $\varphi_\beta = 20^\circ$, které jsou projekcí bezpečnostních kuželů rovin α a β (Obr. 7.12).



Obr. 7.11



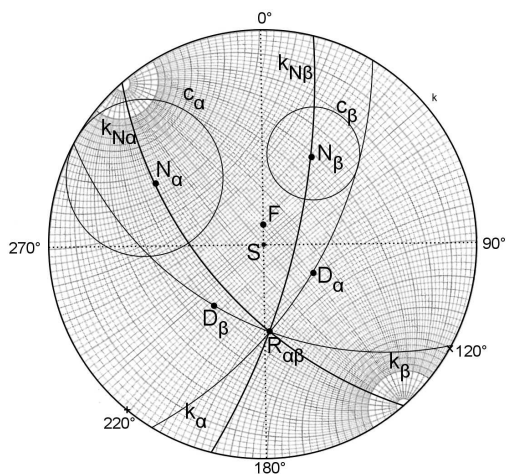
Obr. 7.12

4. Pomocí Wulfovy sítě v rovníkové projekci podle postupu 6.1.c) zobrazíme oblouky velkých kružnic (Obr. 7.13):

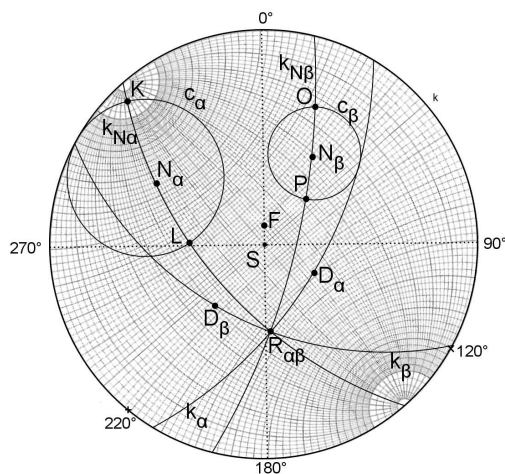
$k_{N\alpha}$ představující projekci roviny, která je dána průsečnicí rovin α a β a normálou k rovině α , prochází tedy body $R_{\alpha\beta}$ a N_α ,

$k_{N\beta}$ představující projekci roviny, která je dána průsečnicí rovin α a β a normálou k rovině β , prochází tedy body $R_{\alpha\beta}$ a N_β .

5. Průsečíky malé kružnice c_α s obloukem velké kružnice $k_{N\alpha}$ označíme body K a L a průsečíky malé kružnice c_β s obloukem velké kružnice $k_{N\beta}$ označíme body O a P (Obr. 7.14).

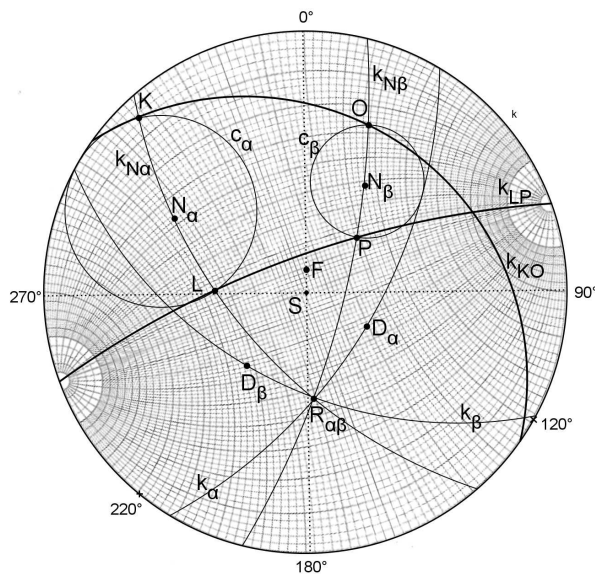


Obr. 7.13



Obr. 7.14

6. Pomocí Wulfovy sítě v rovníkové projekci podle postupu 6.1.c) zobrazíme oblouk velké kružnice k_{KO} procházející body K a O a oblouk velké kružnice k_{LP} procházející body L a P (Obr. 7.15).



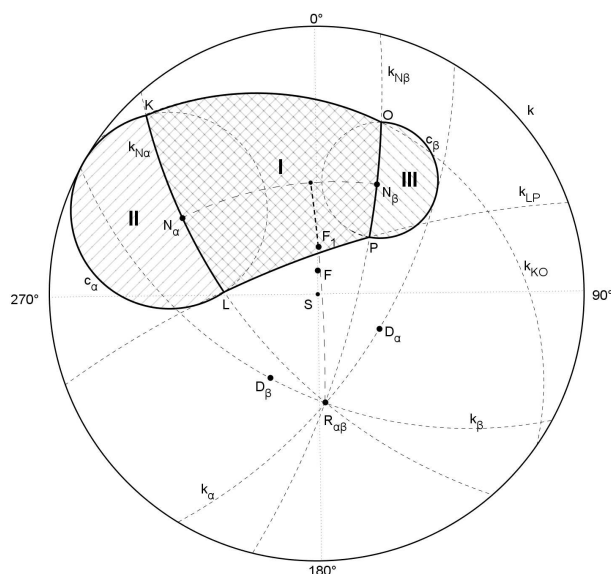
Obr. 7.15 Stanovení stability klínu – sférický čtyřúhelník

c) Vyhodnocení stability

Výše uvedenými postupy jsme vymezili průměty oblastí I, II a III, které souhrnně lze považovat za stabilní, v případech že se výslednice vnějších sil promítne dovnitř těchto oblastí (Obr. 7.16).

Pro polohu bodu **F**, který je stereografickou projekcí výslednice sil vůči narýsovaným bezpečnostním obrazcům, se dají vymezit čtyři případy pro které je stabilita čtyřstěnu různá (Drozd, 1976), viz obr. 7.16:

1. Pokud bod **F** leží uvnitř sférického čtyřúhelníka s vrcholy **K**, **L**, **P** a **O** (oblast I) omezeného oblouky velkých kružnic $k_{N\alpha}$, $k_{N\beta}$, k_{KO} a k_{LP} , čtyřstěn je stabilní v důsledku tření na obou diskontinuitách.
2. Pokud bod **F** leží uvnitř kružnice c_α , ale vně sférického čtyřúhelníka **KLPO** (oblast II), je tedy ohraničen obloukem kružnice c_α a obloukem velké kružnice $k_{N\alpha}$, je čtyřstěn stabilní v důsledku tření pouze na diskontinuitě α .
3. Pokud bod **F** leží uvnitř kružnice c_β ale vně sférického čtyřúhelníka **KLPO** (oblast III), je tedy ohraničen obloukem kružnice c_β a obloukem velké kružnice $k_{N\beta}$, je čtyřstěn stabilní v důsledku tření pouze na diskontinuitě β .
4. Pokud bod **F** leží vně sférického čtyřúhelníka **KLPO**, kružnice c_α i kružnice c_β , čtyřstěn není stabilní a k posuvu by v daném případě došlo ve směru průsečnice $R_{\alpha\beta}$.



Obr. 7.16 Stanovení stability klínu – sférický čtyřúhelník

Jak je vidět na obr. 7.16, bod **F** leží vně sférického čtyřúhelníka **KLPO** a tedy není zajištěna stabilita. Je třeba změnit výslednici vnějších sil tak, aby její průmět byl uvnitř oblasti I, sférického čtyřúhelníka **KLPO**, jako např. bod F_1 ($0^\circ/70^\circ$).

Stupeň stability nebo nestability je možno stanovit z úhlových vzdáleností mezi body F_1 a obloukem velké kružnice, procházející průměty normál N_α a N_β (Obr. 7.16). Úhlové vzdálenosti se měří v rovině, která prochází průmětem výslednice vnějších sil F_1 a průmětem průsečnice $R_{\alpha\beta}$ (úhlové vzdálenosti se odečtou na oblouku velké kružnice pomocí paletky v rovníkové projekci, v obr. 7.16 je tato úhlová vzdálenost vyznačena čárkovaně výrazně).

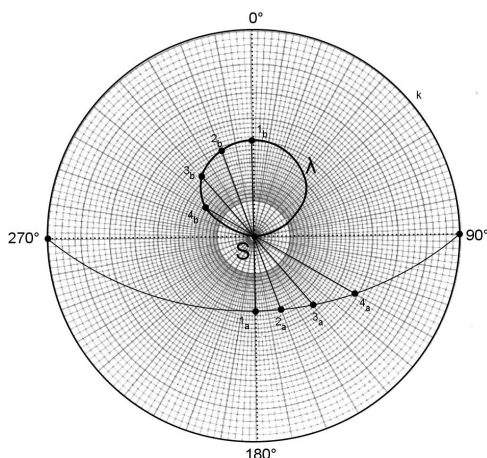
V případě, že průmět výslednice vnějších sil leží uvnitř oblasti II a III nebo mimo, stupeň stability nebo nestability se určí pomocí paletky v rovníkové projekci a to pro rovinu procházející bodem **F** a průmětem normály N_α nebo N_β .

7.7. Stabilita svahu při zadání orientace normál místo orientace spádnic

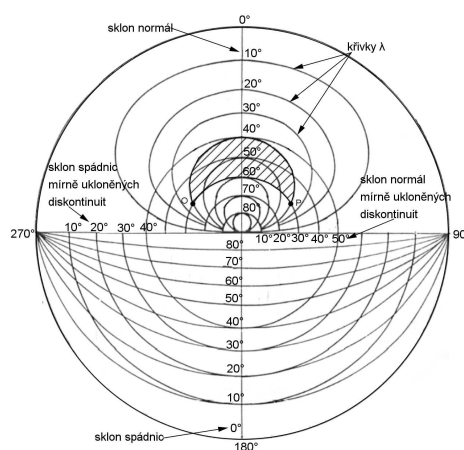
V principu se jedná o stanovení bezpečnostního sférického dvojúhelníku pro polohu průmětu normál (obr. 7.18) podobně jako byl stanoven bezpečnostní sférický dvojúhelník s vrcholy **OP** (obr. 7.7) v kapitole 7.4 pro polohy průmětu spádnic. Je tedy třeba mít systémy diskontinuit zadané jejich normálami nebo přepočítat orientaci spádnic na orientaci normál. Toto řešení pomocí průmětu normál je vhodné využít v případech, že diskontinuity jsou strmé, nebo dokonce vertikální.

Pro toto řešení je nutné využít výše uvednou podmínku podle RNDr. Z. Rotha pro mezní stabilitu a vyjádřit ji křivkami λ . Křivky λ jsou vytvořeny propojením projekce normál takových diskontinuit, které protínají rovinu posuzovaného svahu právě ve své spádnici a tedy projekce jejich spádnic leží na oblouku velké kružnice, který je projekcí roviny svahu (Na obr. 7.17 je vidět princip vykreslení křivek λ : na úsečkách 1_a1_b , 2_a2_b , 3_a3_b , 4_a4_b procházejících středem **S** je úhlová vzdálenost vždy 90°).

Na obr. 7.18 a v příloze č. 3 je paletka s křivkami λ pro různé navrhované sklony svahů po 10° a pro úhly vnitřního tření na diskontinuitách v rozsahu 10° až 50° (Drozd, 1981). Na obr. 7.18 je také jako příklad vyšrafován bezpečnostní sférický dvojúhelník s vrcholy **OP** pro krajní polohu normál se sklonem 40° (při sklonu spádnice svahu 50°), při úhlu tření $\phi = 30^\circ$.



Obr. 7.17 Definice křivek λ



Obr. 7.18 Paletka pro rýsování křivek λ (upraveno podle Drozd, 1981)

a) Zadání

Působí jen gravitační síla. Vektor síly je tedy **F (0°/90°)**.

Příklad bude pro názornost řešen pro 5 systémů diskontinuit (řešení je možné použít pro libovolné známé systémy diskontinuit i s libovolným azimutem spádnice svahu). Zde byly zvoleny systémy diskontinuit určené plošnými prvky: roviny α_1 , α_2 , α_3 , α_4 a α_5 zadané svými odpovídajícími normálami **$N_{\alpha_1}(180^\circ/40^\circ)$** , **$N_{\alpha_2}(0^\circ/30^\circ)$** , **$N_{\alpha_3}(0^\circ/80^\circ)$** , **$N_{\alpha_4}(280^\circ/30^\circ)$** , **$N_{\alpha_5}(0^\circ/45^\circ)$** .

Navrhovaný svah, který představuje rovina γ , má sklon k jihu, je orientován $90^\circ-270^\circ$ a jeho sklon je předběžně určen $\chi = 50^\circ$, svah má tedy spádnici **$D_\gamma(180^\circ/50^\circ)$** . Normála navrženého svahu je určena **$N_\gamma(0^\circ/40^\circ)$** .

V příkladu byl zvolen jednotný úhel vnitřního tření na všech pěti systémech diskontinuit $\phi = 30^\circ$.

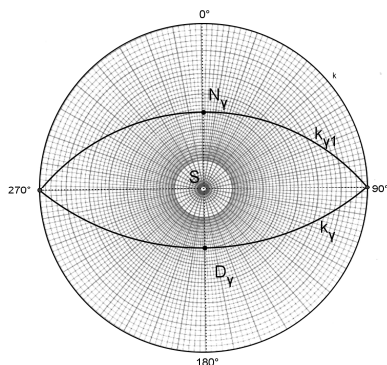
Použita je úhlojevná projekce, promítání je na spodní polokouli a pól je v Zenitu.

b) Řešení pomocí Wulfových sítí

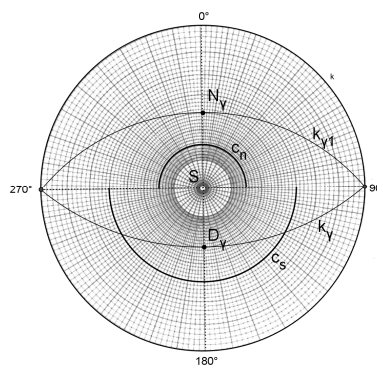
- Podle postupu 5.2.2.c) zobrazíme bod D_γ představující projekci spádnice roviny navrhovaného svahu γ , oblouk velké kružnice k_γ představující projekci roviny γ a bod N_γ představující projekci normály roviny γ . Zobrazíme také rovinu γ_1 procházející projekcí normály, bodem N_γ , která je kolmá k rovině γ . Projekce roviny γ_1 představuje oblouk velké kružnice k_{γ_1} (Obr. 7.19).
- Podle postupu 5.3.2.c) narýsujeme kružnice c_s a c_n které představují bezpečnostní kužely pro úhel tření $\varphi = 30^\circ$ (na obr. 7.20 jsou pro přehlednost zobrazeny jen poloviny těchto kružnic):

Kružnici c_s , která představuje bezpečnostní kužel pro spádnic tak jako v předchozím příkladě 7.4., vrcholový úhel kužele je $2\varphi' = 120^\circ$ (φ' je doplněk do 90° : $\varphi' = 90^\circ - \varphi = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$) a osa kužele je svislá přímka procházející bodem S , tedy $(0^\circ/90^\circ)$.

Kružnici c_n , která představuje bezpečnostní kužel pro normály k diskontinuitám, vrcholový úhel kužele je tedy $2\varphi = 60^\circ$ a osa kužele je také svislá přímka $(0^\circ/90^\circ)$ procházející bodem S .

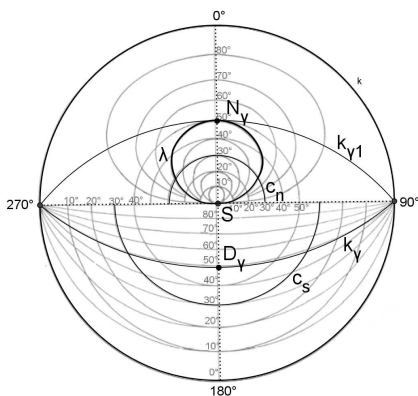


Obr. 7.19

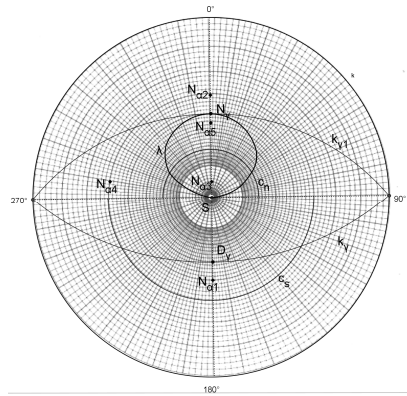


Obr. 7.20

- Narýsujeme křivku λ pomocí paletky (příloha č. 3), pro sklon svahu $\chi = 50^\circ$ (Obr. 7.21), nebo pomocí její definice uvedené výše (Obr. 7.17): propojením bodů, které jsou projekcí normál rovin, jejichž spádnic se promítají do bodů na oblouku velké kružnice k_γ .
- Podle postupu 5.1.2.c) a úvodního zadání narýsujeme projekce normál diskontinuit, body $N_{\alpha 1}$, $N_{\alpha 2}$, $N_{\alpha 3}$, $N_{\alpha 4}$ a $N_{\alpha 5}$ (Obr. 7.22).



Obr. 7.21

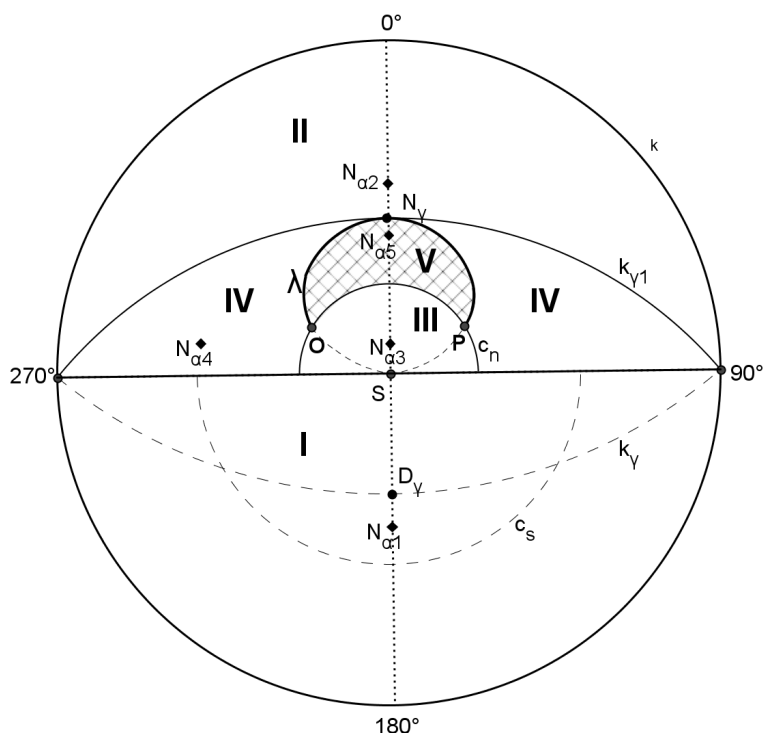


Obr. 7.22

c) Vyhodnocení stability:

Na obr. 7.23 je vyšrafován bezpečnostní sférický dvojúhelník pro normály diskontinuit s vrcholy **OP**, je omezen křivkou λ a polokružnicí c_n pro zvolený mezní úhel tření $\varphi = 30^\circ$. Náčrt je rozdělen na pět oblastí (Drozd, 1981):

- | | | |
|-----|------------|---|
| I | Stabilní | Oblast I obsahuje celý spodní půlkruh ohraničený kružnicí k a úsečkou $90^\circ - 270^\circ$.
Stabilita pro projekce normál diskontinuit vyskytujících se v této oblasti je zajištěna, protože jejich spádnice zapadají do svahu. |
| II | Stabilní | Oblast II je na vrchní polovině v kružnici k , ohraničená kružnicí k a obloukem velké kružnice k_{γ1} procházejícím normálou N_γ .
Stabilita pro projekce normál diskontinuit v této oblasti je zajištěna, úhel sklonu spádnice diskontinuit je větší než navrhovaný sklon svahu, blok horniny, které diskontinuity oddělují je tedy opřený o podloží. |
| III | Stabilní | Oblast III je na vrchní polovině v kružnici k , ohraničená polokružnicí c_n a částí úsečky $90^\circ - 270^\circ$.
Stabilita pro projekce normál diskontinuit v této oblasti je zajištěna, protože úhel vnitřního tření je větší nebo rovný úhlu sklonu spádnice diskontinuit. |
| IV | Stabilní | Oblast IV je na vrchní polovině v kružnici k , ohraničená částí úsečky $90^\circ - 270^\circ$, obloukem velké kružnice k_{γ1} , křivkou a částí polokružnice c_n .
Stabilita pro projekce normál diskontinuit v této oblasti je zajištěna, protože diskontinuity probíhají kose ke směru roviny dané navrhovaným svahem a jejich spádnice jsou strmější než spádnice svahu. |
| V | Nestabilní | Oblast V je na vrchní polovině v kružnici k , ohraničená křivkou λ a částí polokružnice c_n .
Stabilita pro projekce normál diskontinuit v této oblasti není zajištěna. Úhel sklonu spádnice diskontinuit je větší než úhel vnitřního tření a zároveň menší než je sklon svahu.
V této oblasti nesmí ležet žádná projekce normály diskontinuity. Nesmí zde ležet ani projekce spádnice roviny, která je normálou roviny jejíž spádnice je průsečnice dvou diskontinuit. Pokud je tato podmínka splněna, je navrhovaný svah stabilní. |



Obr. 7.23 Určení bezpečného sklonu svahu – zadány normály diskontinuit

Pro určení bezpečného sklonu svahu při řešení využívající průměty normál platí podmínka:

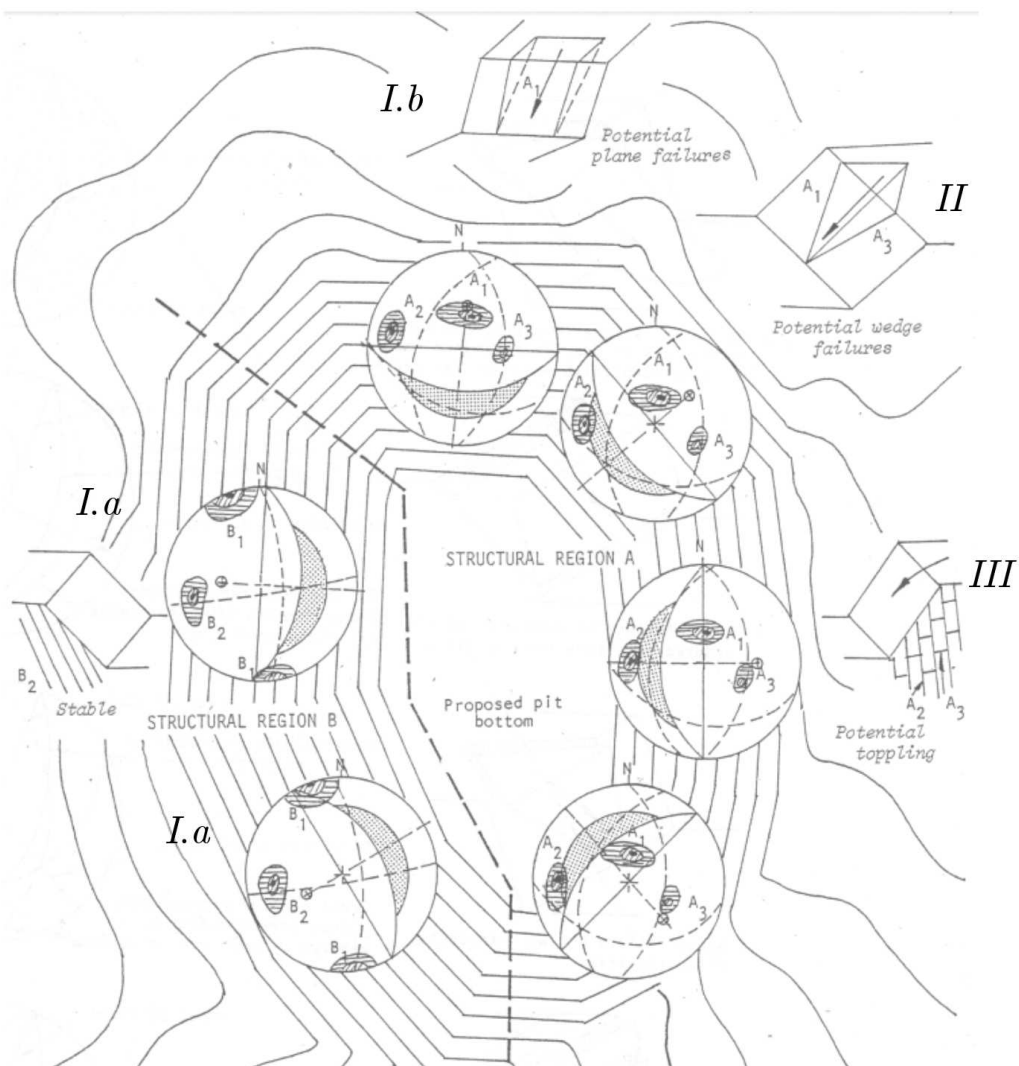
Stabilita skalního svahu se zvoleným sklonem svahu je zajištěna, pokud v **průmětu rizikového sférického dvouúhelníku o vrcholech OP** vytvořeném pomocí křivek λ (vyšrafovaná oblast V na obr. 7.23) se **nevyskytuje žádný průmět normály** nějaké diskontinuity ani žádný **průmět spádnice roviny**, která je **normálou** roviny, jejíž **spádnice** je **průsečnicí** dvojice nějakých diskontinuit. Tím je podobně jako v příkladě se zadanými spádnicemi (7.4) vyloučen planární posun na dané diskontinuitě a také posun tělesa ve tvaru čtyřstěnu (klín), které může vzniknout posunem na dvou diskontinuitách, které i v případě že jsou samy o sobě stabilní může být umožněn posun ve směru jejich průsečnice pokud tato průsečnice je normálou roviny, jejíž průmět spádnice je v rizikové oblasti V (průsečnice dvojice diskontinuit je v podstatě normálou rovinné plochy, určené normálami oné dvojice diskontinuit, tedy plochy určené dvěma různoběžkami).

Jak je vidět na obr. 7.23, normály N_{α_1} , N_{α_2} , N_{α_3} a N_{α_4} patří do oblastí I až IV a odpovídající diskontinuity α_1 , α_2 , α_3 a α_4 jsou stabilní. Projekce normály diskontinuity α_5 , bod N_{α_5} leží v oblasti V a stabilita na diskontinuitě α_5 při daném sklonu svahu $\chi = 50^\circ$ není zajištěna, je třeba sklon svahu zmenšit na sklon $90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$, což odpovídá právě sklonu spádnice diskontinuity jejíž normála má sklon 45° .

7.8. Příklad řešení stability svahů jámového lomu podle autorů Hoeka E. a Braye J.

V řešení je použita metoda podle kapitoly 7.4 a týká se hypotetického jámového lomu se zvolenými systémy diskontinuit. Autoři Hoek a Braye rozdělili hypotetický jámový lom do dvou quasihomogenních celků v důsledku rozdílné orientace diskontinuit (lom je rozdělen přerušovanou čarou, viz obr. 7.24).

Pro jednotlivé části jámového lomu s navrhovaným sklonem svahů použili stereografické řešení s vyznačením rizikových sférických dvojúhelníků (vyšrafované plochy), ve kterých by se neměly vyskytovat a) průměty spádnic a b) průměty průsečnic.



Obr. 7.24 Příklad řešení stability pro svahy jámového lomu (úprava Hoec, Bray, 1977)

Autoři definovali jednotlivé systémy diskontinuit jejich normálami s označením A_1 , A_2 , A_3 a B_1 , B_2 , B_3 a přerušovanou čarou oblouky velkých kružnic – průměty stěžejních diskontinuit (obr. 7.24 z předchozí strany). Jsou uvedeny příklady stabilitních řešení:

1. S rizikem sesuvu podél spádové přímky nepříznivě orientované diskontinuity pro spádovou přímku, která je strmější než je navržený sklon svahu a tudíž je daný úsek lomu stabilní (případ I.a)
2. S rizikem sesuvu podél spádové přímky nepříznivě orientované diskontinuity pro spádovou přímku, která je méně nakloněná než je navržený sklon svahu, ale více nakloněná než zvolený úhel tření na dané diskontinuitě a tudíž je daný úsek lomu nestabilní (případ I.b)
3. S rizikem sesuvu podél průsečnice dvou nepříznivě orientovaných systémů diskontinuit. Průmět průsečnice vychází do plochy sférického dvouúhelníku a tudíž je svah o navrženém sklonu nestabilní (případ II)
4. Navíc autoři uvedli i případ nestability svahu v důsledku nepříznivě ukloněných diskontinuit a to v důsledku překlápění (případ III)

Na obr. 7.24 jsou označeny:

A_1 normály téměř horizontálně ukloněných diskontinuit ve východní části lomu,

A_2 , A_3 normály strměji ukloněných diskontinuit ve východní části lomu,

B_1 normály téměř svisle ukloněných ploch v západní části lomu,

B_2 , B_3 normály strmě ukloněných ploch v západní části lomu.

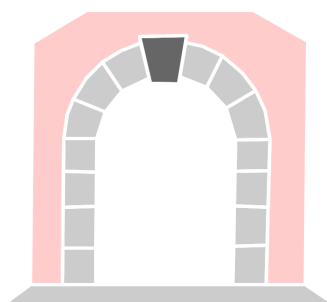
Autoři Hoek a Braye ve svém příkladu hornocení stability či nestability vycházeli z orientace normál. Výhodnější by byla řešení pomocí orientace spádových přímek, jak je uvedena v kapitole 7.4. V případě, že se vychází z orientace normál, by bylo vhodnější vycházet z příkladu v kapitole 7.7 při použití šablony pro kritický sférický dvojúhelník (viz obr. 7.18).

8. Stabilitní řešení s využitím teorie klíčových bloků

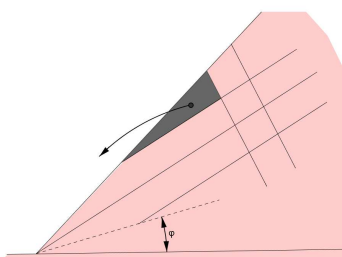
V roce 1984 doplnil prof. R. E. Goodman z Kalifornské univerzity v Berkeley metodu stabilitních řešení skalních svahů pomocí stereografických metod o tak zvanou teorii klíčových bloků (Key Block Theory). Vycházel z poznatku, že ve skalním svahu či ve stěně nějakého skalního masivu se může vyskytnout nějaký blok, který v důsledku nepříznivé orientace několika diskontinuit může z odkryvu vypadnout jako první a teprve po vypadnutí tohoto bloku následuje vypadávání a tedy nestabilita dalších bloků za ním (příklad takového bloku je na obr. 8.2 a 8.3). Obráceně pak, podaří-li se zajistit stabilitu tohoto jediného bloku, například kotvením, nebo v případech, že již takový blok vypadl a kotvenou betonovou plochou je nahražen, je zajištěna stabilita svahu nebo skalní stěny v celku. Prof. R. E. Goodman přirovnává tento klíčový blok k vrcholovému klenáku u kleneb (Obr. 8.1), který je rozhodující pro stabilitu klenby, a v případech, že tento klenák je výrazně porušen nebo vypadne, zřítí se celá klenba či klenbový oblouk.

Pomocí stereografických metod je možno takové klíčové bloky při dané orientaci diskontinuit ve volné stěně skalního svahu nebo ve stěnách a stropě podzemních výrubů nalézt.

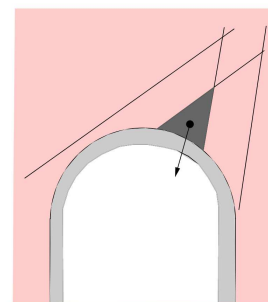
Kdyby se například ještě před výrubem takové nestabilní čtyřstěny nebo vícečetné kotvily pomocí nepředpínaných tyčových kotev, v řadě případů by stabilita některých skalních svahů byla zajištěna. V podstatě je tato metoda bez ohledu na teorii již dnes využívána v tunelovém stavitelství, když čelní stěna tunelu ještě před výrubem je kotvena systémem nepředpínaných kotev (v případě skalního svahu u Lensedel - viz kapitola 9., se mohl dodržet původní navržený sklon svahu 3:1 tak, že nestabilní čtyřstěny, které z boku svahu po jeho otevření vyjžděly, mohly být předem přikotveny soustavou nepředpínaných tyčových kotev).



Obr. 8.1 Klenák v klenbě



Obr. 8.2 Příklad klíčového bloku ve skalním svahu



Obr. 8.3 Příklad klíčového bloku v tunelu

9. Aplikace stereografické metody – zářez dálnice D1 u obce Lensedly

Na základě doporučení mého zadavatele diplomové práce doc. Ing. K. Drozda CSc., zde předkládám výsledky podrobné geotechnické dokumentace odkryvů skalního svahu v pravém jihozápadním svahu dálničního zářezu D1 u obce Lensedly. Panoramatická fotografie pravé strany dálničního zářezu je na obr. 9.1.



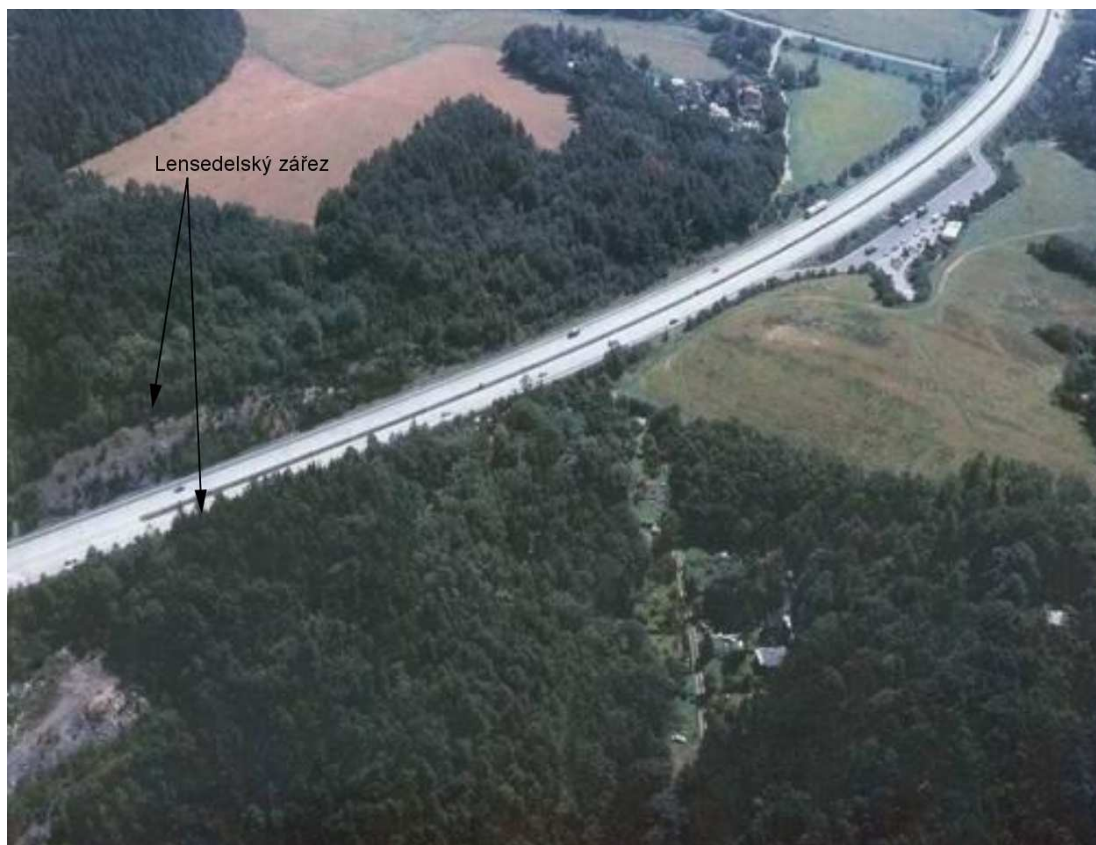
Obr. 9.1 Panoramatická fotografie pravé strany zářezu dálnice D1 u Lensedel (foto: Ředitelství silnic a dálnic, 2004).

Výsledky dokumentace diskontinuit jsem pak využila ke zhodnocení stability svahu s využitím stereografických metod. Vzhledem k tomu, že skalní masiv v zářezu je zatížen pouze gravitačními silami (vliv seismických účinků od dopravy je minimální a na horninové bloky nepůsobí vztlak podzemní vody), byla pro zhodnocení stability použita metoda pro určení bezpečného sklonu svahu pro zadané spádnice dle kapitoly 7.4.

Podkladem pro geotechnické zhodnocení byly informace ze zpráv z Geofondu a některé údaje z propagační publikace Ředitelství dálnic: Praha-Brno-Bratislava a také z archivu Ředitelství silnic a dálnic.

Řadu technických informací jsem získala přímo od doc. Ing. K. Drozda CSc., který byl přizván v závěru poněkud nezdařené realizace skalního zářezu u Lensedel v letech 1973 a 1974 do technického týmu odpovědných pracovníků jako poradce. Přímo o realizaci skalních zářezů u Lensedel, vzhledem k odchylnostem od původního projektu, nemohla být v dané době vydána řádná zpráva. Prováděcí projekt pro dálniční zářez u Lensedel se mi od Ředitelství silnic a dálnic získat nepodařilo.

Výstavba části dálnice Mirošovice-Lensedly probíhala již v letech 1939-41 a 1946-48. Po přerušení byla výstavba obnovena až v r. 1969. U Lensedel se trasa původně rozestavěné dálnice od dnešní D1 několik desítek až stovek metrů odkláněla. Oproti dnešní situaci původní zářez neměl být tak hluboký, když byla stavba znova započata byl starý zářez zasypan vytěženým kamením z nového zářezu. Nový zářez je až 38 m hluboký a je nejhlubší na českých dálnicích (letecký snímek na obr. 9.2). Tento úsek dálnice byl dostavěn v červenci 1977 (<http://www.dalnice.com>). V roce 2004 zde byla provedena sanace firmou SG – Geotechnika, a.s, svah byl zabezpečen ocelovými sítěmi a ploty.



Obr. 9.2 Letecký snímek dálnice D1 od severozápadu, směrem do Brna (90. léta 20.stol.). Zleva dálnice vychází z lensedelského zářezu. V levém dolním rohu je vidět část zasypané rokle, kam se vozilo vytěžené kamení. Vpravo nahoře jednostranná odpočívka u Hvězdonic (úprava <http://www.dalnice.com>).

9.1. Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – údaje z geofondu

Geologický průzkum pro zářez byl proveden v roce 1975 firmou Stavební geologie. Zářez se nachází ve skalním masivu magmatických a metamorfovaných hornin. Charakterem se horniny podobají horninám jílovského pásma, jsou však součástí paleozoického metamorfovaného ostrova veděradsko-zvánovického. Je zde převážně zastoupeno drobně zrnité amfibolické gabro, které je na některých místech proniknuté intruzemi granodioritových až dioritových porfyrů. Tím došlo k silnému tektonickému porušení okolních hornin. V některých místech masivu granodioritový porfyr prolнул rozdrčeným amfibolickým gabrem a částečně je asimiloval. V důsledku vysokých teplot a také přínosu dalších látek došlo v blízkosti intruzí k částečné přeměně okolní horniny. V kontaktní aureole se místy vyskytují erlány. V jiných místech je hornina hydrotermálně přeměněna (Bodlák, Muehldorf, 1975).

Celý masiv byl silně dynamicky postižen, je prostoupen hustou sítí různě orientovaných puklin. V intenzitě tektonického porušení masivu jsou velké rozdíly i na malých úsecích. Silněji jsou postiženy starší horniny – gabra (Bodlák, Muehldorf, 1975).

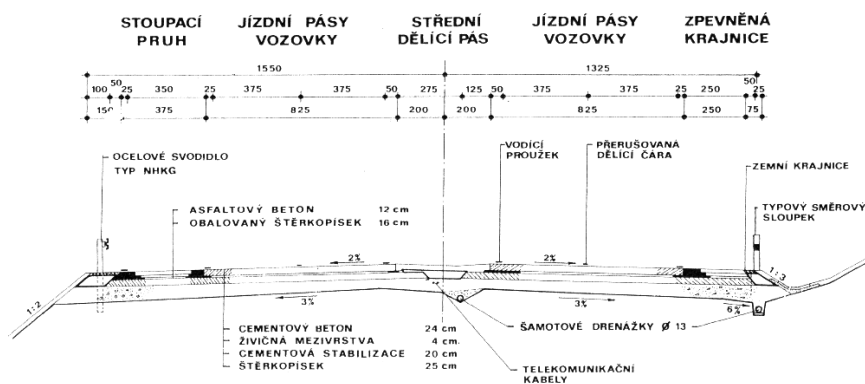
9.2. Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace z propagační publikace Ředitelství dálnic

Při stavbě 005 Mirošovice-Šternov byl realizován největší skalní zářez o objemu přes 500 tisíc m³. Byl vyhlouben na 26. km dálnice u obce Lensedly. Zářez dosahuje hloubky 38m. K dosažení předepsaného sklonu skalních svahů použito tzv. presplitových odstřelů. Navržený systém prokázal jeho velké přednosti a tak se podařilo splnit stanovenou lhůtu výstavby i přes určité problémy v projektové přípravě (Ředitelství dálnic, 1980).

9.3. Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace od doc. Ing. K. Drozda CSc.

Při rozhodování o návrhovém bezpečném sklonu obou svahů v zářezu se vycházelo jen z údaje, že skalní svahy budou tvořit magmatické a metamorfované horniny, pro něž se zvolil údajně bezpečný sklon svahu 3:1, tedy cca 70°. Žádné průzkumné práce, kterými by byla ověřena orientace existujících diskontinuit nebyly provedeny. Od předepsaného odvodňovacího rigolu dálnice (vzorový řez dálnice je uveden na obr. 9.3), měl vystupovat svah přerušovaný lavičkami šířky cca 2.0 m až do povrchových rozvolněných partií skalního masivu a pokryvných útvarů, kde sklon svahu měl být snížen až na 30° (uvedené údaje jsou orientační). Přestože v roce 1973 doc. Ing. K. Drozd, CSc. jako přízvaný expert s ohledem na rizika sesouvajících se horninových bloků podél průsečnic doporučil přijatelný sklon pravého svahu 57°, tento sklon nebyl dodržen a zářez se hloubil se sklonem 70°.

Vzorový příčný řez D 26,5



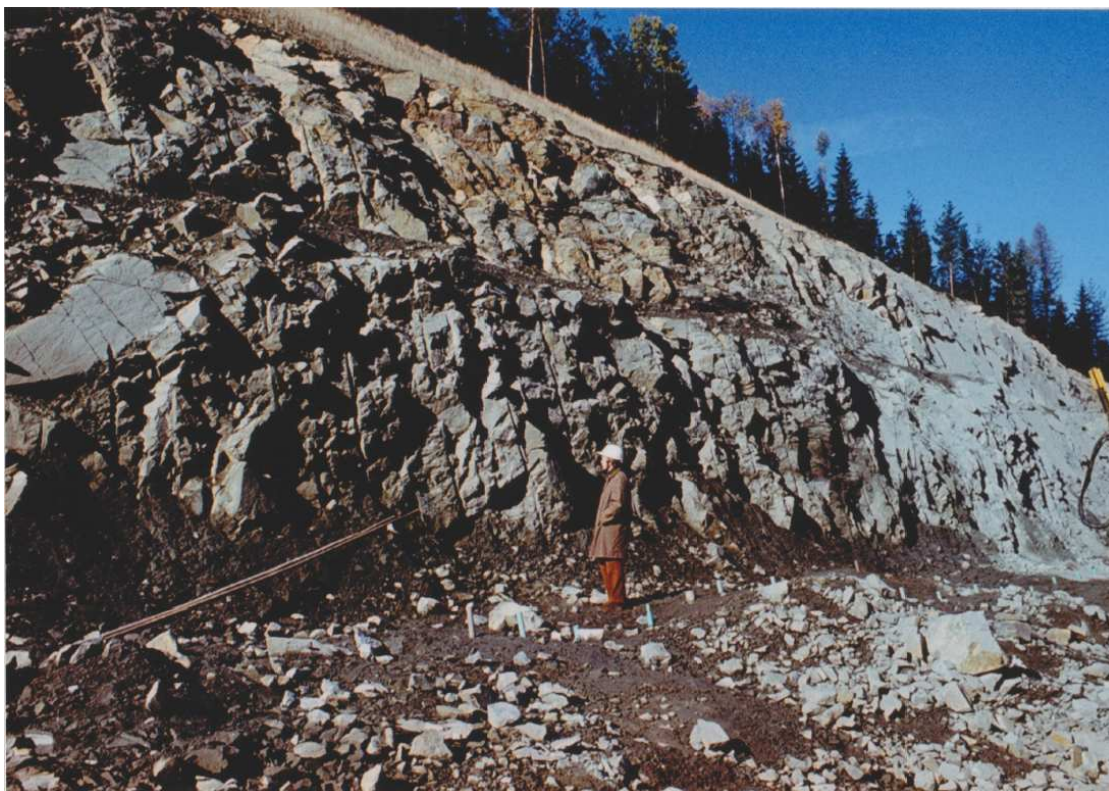
Obr. 9.3 Vzorový řez dálnice (Ředitelství dálnic, 1980).

Uvažovalo se se třemi úrovněmi laviček cca po 8,0 m výšky svahu (nedokonalý pokus o lavičky viz obr. 9.4). Na lavičkách měly být posazeny betonové prefabrikáty ve tvaru L (1 m výška ramene, 2 m šířka ramena, šířka prefabrikátu byla cca 1,5 m), které měly zabránit případným lokálním pádům menších kamenů ze svahu a měly umožnit lehčí sběr a podélný odvoz napadané kamenné sutě. V závěru hloubení masivu bylo na stavbu dovezeno několik desítek těchto prefabrikátů, které však nikdy nebyly použity.



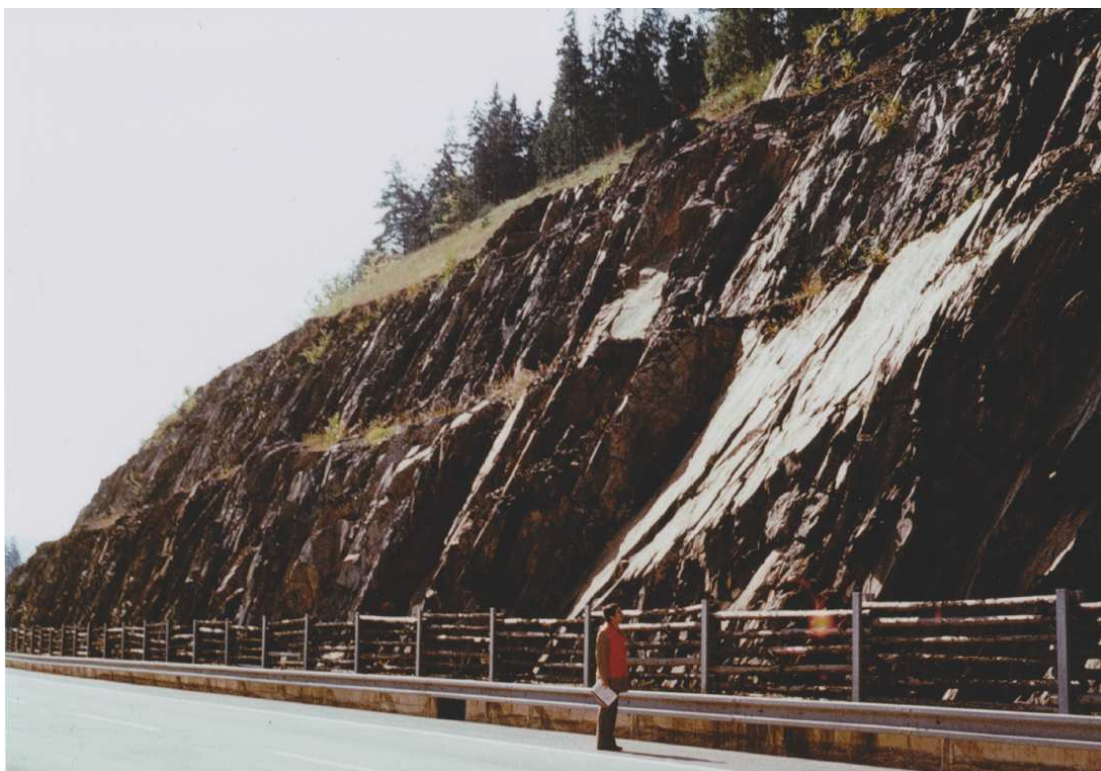
Obr. 9.4 Celkový pohled na pravý svah zářezu dálnice jen s náznaky nedokonalých laviček a s úpravou patní zídky se zábranami proti pádu kamenů na vozovku (foto a text K. Drozd, 1974).

Pro rozpojování hornin skalního masivu byly použity clonové odstřely s využitím presplitové techniky pro úpravu svahů, s níž nebyly tehdy ještě větší zkušenosti (Obr 9.5). Při hloubení etáží se brzy ukázalo, že návrhový sklon svahu 70° se v pravém svahu zářezu nedařilo dodržet a že horninové bloky padaly podél mírně ukloněných spádnic podříznutých diskontinuit případně podél průsečnic dvou systémů nepříznivě ukloněných diskontinuit.



Obr. 9.5 Pohled na levý svah dálničního zářezu z úrovně předposlední etáže. Vyznačeny jsou kolíky pro vrty pro presplitové odstřely (u nohou stojící osoby). Při pravém kraji je vrtačka s náklonem lafety 70° pro presplitové vrty. Na svahu jsou zřejmé již nedostatky, vyplývající z chybného návrhového sklonu svahu v horninách skalního masivu a chyby při realizaci úpravy svahu pomocí presplitové techniky odstřelu – rozteč presplitových vrtů byla příliš velká (foto a text K. Drozd, 1974).

Vzhledem k předem zvoleným a realizovaným úpravám v horních partiích svahů a také s ohledem pro zábor pozemků pro zářez, jedinou alternativou pro dokončení zářezu bylo zrušení laviček ve svahu a stavební změny u krajnic dálnice při patě svahu. Zrušena byla šířka krajnice a u paty svahu byla postavena nízká betonová zídka se speciálním zabezpečením proti pádu horninových bloků. Proti samovolnému pádu horninových bloků na dálnici byla použita nízká dřevěná stěna sestávající z dvojice U profilů, zabetonovaných do nízké zídky, mezi které se pak střídavě vkládala dřevěná kulatina (Obr. 9.6).

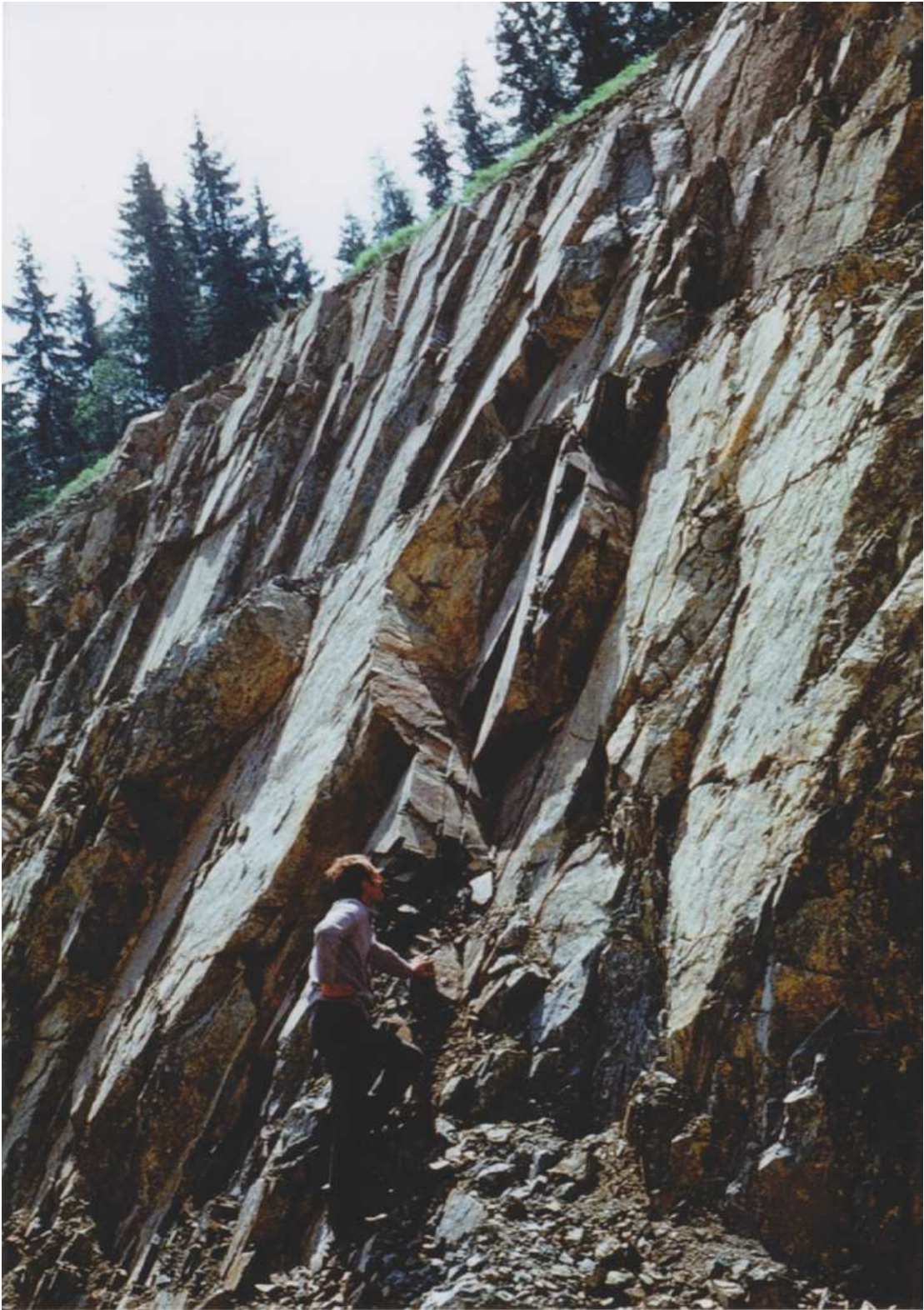


Obr. 9.6 Detailní pohled na pravý svah zářezu dálnice s úpravou u paty svahu pomocí zídky a odnímatelné střídavě vsazené kulatiny. Na fotografii je zřetelná nestabilita čtyřstěnnů podél dvou systémů diskontinuit (foto a text K. Drozd, 1974).

Na obr. 9.7 je fotografie hloubení poslední etáže zářezu a na obr. 9.8 je detailnější pohled na jeden z nepříznivě orientovaných systémů diskontinuit.



Obr. 9.7 Hloubení třetího a posledního hloubkového pásma zářezu nad niveletou dálnice pomocí clonových odstřelů (foto a text K. Drozd, 1974).



Obr. 9.8 Nepříznivý sklon spádnic hlavního systému diskontinuit je určujícím faktorem pro návrhový sklon svahu zářezu (foto a text K. Drozd, 1974).

Až později (neznámo ve kterém roce) se pro úpravu ochranné dřevěné zábrany místo kulatiny použily vodorovné ocelové pažnice (Obr. 9.9). Chybně zvolený návrhový sklon svahu se týkal pravého svahu - svahu ve sklonu k severovýchodu, u levého svahu zářezu – svahu ve sklonu k jihozápadu, žádné potíže nevznikly. Realizované úpravy vedly k nedodržení předepsaných rozměrů dálnice a trvalo určitou dobu jednání než částí úseku v zářezu u Lensedel byla přiznána legalizace dálnice.

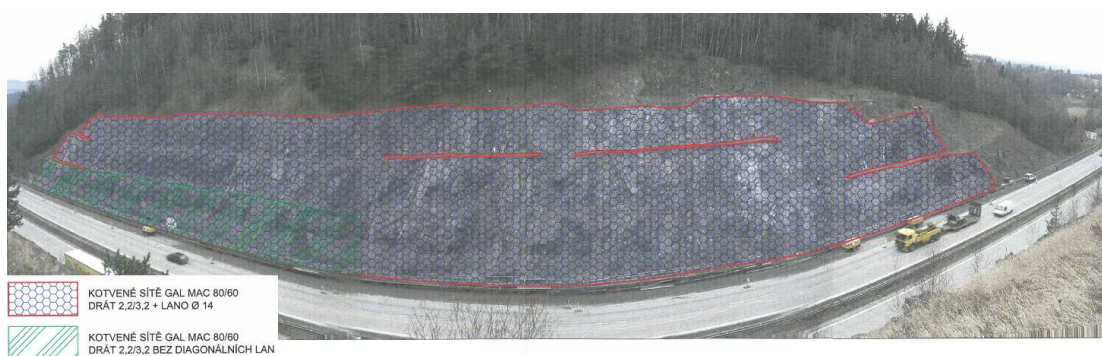


Obr. 9.9 Ocelové pažnice na pravé straně zářezu v současném stavu (05/2013).

V kapitole 9.5. uvádím výsledky podrobné dokumentace diskontinuit, jež jsem na doporučení doc. Ing. K. Drozda CSc. provedla a dále jsem uvedla statistické a geotechnické vyhodnocení zvláště pro pravý svah na obr. 9.13, 9.14 a 9.15 a zvláště pro levý svah na obr. 9.16 a 9.17 s využitím stereografické metody dle kapitoly 7.4. se závěrečným doporučením návrhových sklonů pro případ budoucího rozšíření dálnice o další jízdní pruhy.

9.4. Stavba zářezu na dálnici D1 u Lensedel – informace o sanaci z archivu Ředitelství silnic a dálnic

V roce 2004 byla na Lensedelském zářezu provedena sanace firmou SG – Geotechnika, a.s. Akumulační prostor za ochranným plotem byl místy zaplněn spadaným kamenivem, hrozil spad skalních bloků až na vozovku dálnice. Bylo zde provedeno čištění porostu, skalní povrch byl očištěn od rozvolněných, zvětralých nebo labilních částí. Skalní masiv byl sanován položenými ocelovými sítěmi, svorníky (cca 1 svorník na 4m² sítě, délka zakotvení min. cca 1,5m) a diagonálními lany, viz obr. 9.10. Dále byl na severní straně pravého svahu prodloužen ochranný svodidlový plot (SG-Geotechnika, 2002).



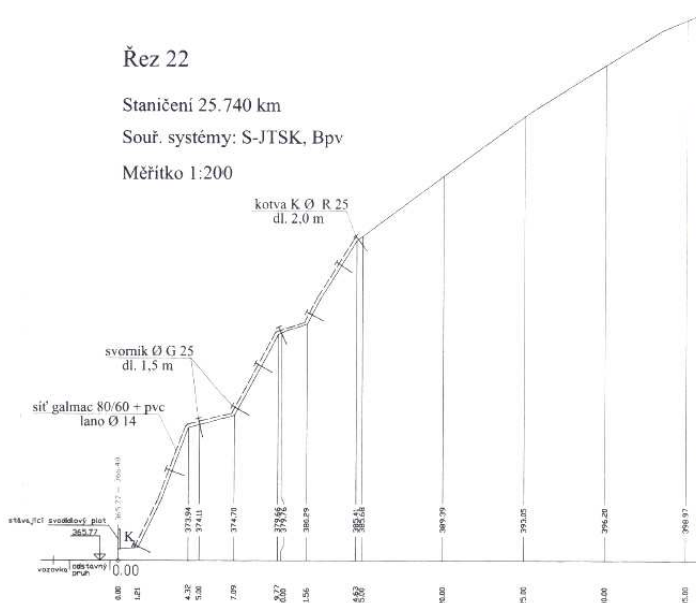
Obr. 9.10 Položení ocelových sítí a diagonálních lan na pravé straně svahu (úprava SG-Geotechnika, 2002).

9.5. Měření orientace diskontinuit v zářezu u Lensedel

Západní část zářezu, na které bylo provedeno měření, je dlouhá 280m a jeho výška dosahuje v nejvyšším místě 38m. Zářez probíhá v mírném oblouku, ve staničení podle záznamů 27,520 (nyní 25,520) má orientaci **135° – 315°** a ve staničení 27,800 (nyní 25,820) orientaci **148° – 328°**.

V současné době má pravý svah zářezu generelní sklon včetně náznaku laviček přibližně **53°**, v partiích mezi lavičkami **48°** až **69°**. V následující tabulce jsou sklony svahu pravého zářezu z roku 2004 podle vytvořených příčných řezů při provádění sanace (SG-Geotechnika, 2002, vybraný řez 22 je uveden na obr. 9.11).

Řez č.	Staničení (nový systém)	Průměrný sklon svahu	Sklon 1. etáže	Sklon 2. etáže	Sklon 3. etáže
7	25,588	49°	57°	48°	-
12	25,639	49°	65°	66°	58°
17	25,689	54°	69°	61°	50°
22	25,740	54°	67°	66°	58°
27	25,790	57°	64°	52°	-



Obr. 9.11 Řez 22 na 25,740 km s navržením sanace (úprava SG-Geotechnika, 2002).

a) Výsledky měření spádnic diskontinuit

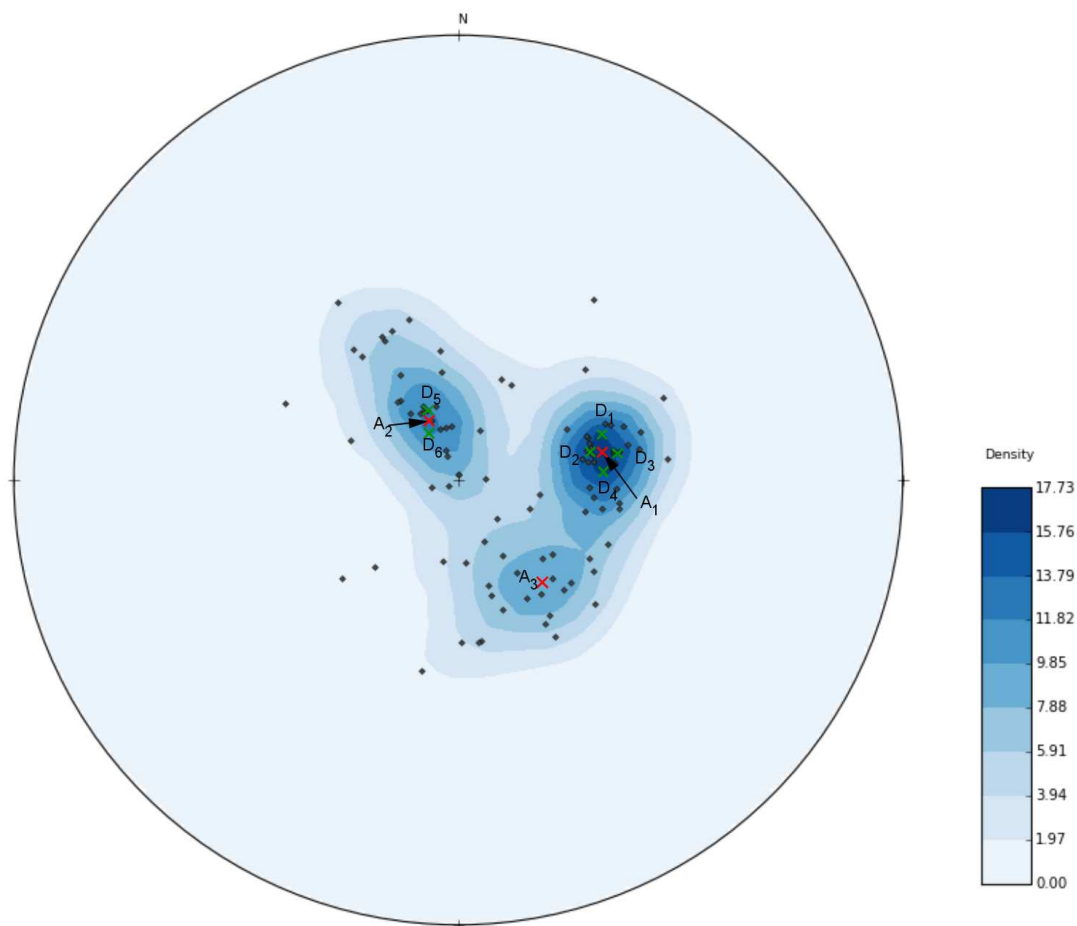
Na diskontinuitách v zářezu v první etáži bylo provedeno 97 měření, v následující tabulce jsou uvedeny naměřené směry a sklony spádnic diskontinuit:

azimut	sklon	azimut	sklon	azimut	sklon	azimut	sklon
359	89	321	59	136	62	80	60
357	89	294	55	135	80	80	56
352	80	290	69	133	69	79	65
352	66	254	85	132	62	79	61
351	70	241	88	132	56	78	58
346	80	230	62	128	68	77	66
343	76	224	68	124	60	76	65
343	59	191	75	121	62	75	55
340	80	191	54	113	60	74	65
336	84	179	60	112	76	72	65
336	78	175	75	104	66	72	58
336	76	173	60	101	63	71	65
336	60	172	60	100	75	70	60
335	85	164	70	100	60	69	61
334	75	164	68	98	60	68	49
332	76	161	65	97	65	65	68
332	61	157	78	93	66	49	59
332	60	150	74	93	61	37	48
331	68	150	65	88	85	29	70
330	76	149	59	84	61	23	80
326	50	148	70	84	51	23	70
324	75	148	56	82	66	22	55
324	72	146	60	82	65		
322	72	144	64	80	67		
322	61	136	65	80	61		

b) Vynesení spádníc diskontinuit z měření v plochojevné Lambertově síti a hustotní analýza

Spádnice diskontinuit byly vyneseny v plochojevné Lambertově síti (Obr. 9.12). Z hustotní analýzy vyplynulo, že většina (17,73%) spádníc se vyskytuje v oblasti ohraničené spádnicemi **D₁(72°/62°)**, **D₂(78°/65°)**, **D₃(80°/61°)**, **D₄(87°/64°)** s průměrnými hodnotami **A₁(80°/63°)**.

Dále také významná část spádníc leží v oblasti mezi **D₅(336°/76°)** a **D₆(331°/80°)** s průměrnými hodnotami **A₂(334°/78°)** a další část v oblasti s průměrnými hodnotami **A₃(139°/66°)**.



Obr. 9.12 Projektce spádníc diskontinuit v Lambertově síti a hustotní analýza

Z analýzy na obr. 9.12 vyplývá, že těžiště systému diskontinuit **D₁** až **D₄** má orientaci spádníc v rozsahu od **72°** do **87°** a sklon od **61°** do **64°**.

Těžiště systému **D₅** a **D₆** má orientaci spádníc v rozsahu od **331°** do **336°** a sklon od **76°** do **80°**.

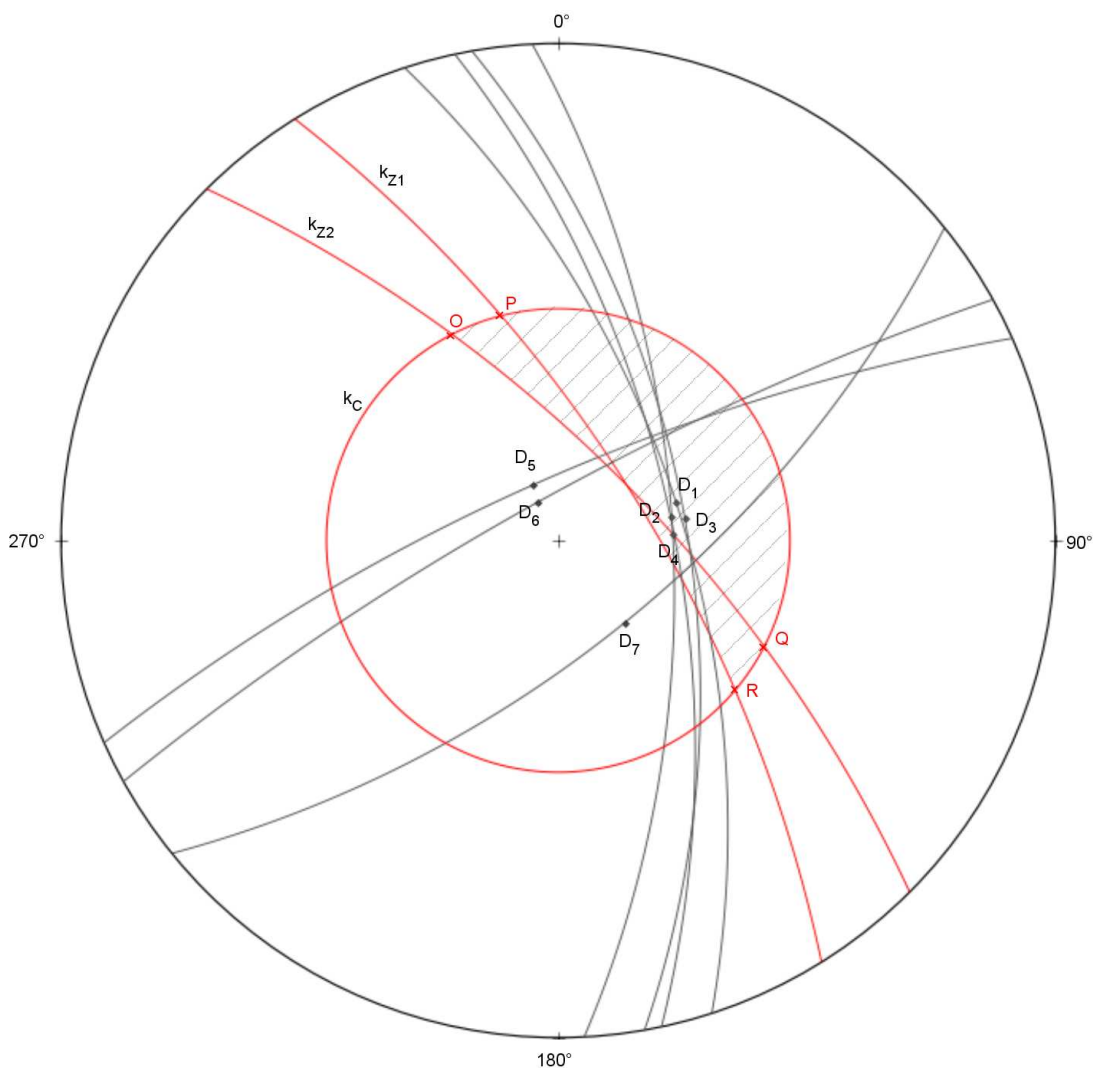
Podružný systém s těžištěm v **A₃** má orientaci spádnice **139°** se sklonem **66°**.

9.6. Stabilitní analýza pro pravý svah zářezu

Na následujícím obrázku 9.13 jsou narýsovány dva oblouky velké kružnice k_{Z1} a k_{Z2} (vyznačené červeně) pro počáteční a konečný směr $135^\circ - 315^\circ$ a $148^\circ - 328^\circ$ pravého svahu zářezu. V řešení byl uvažován původně navrhovaný sklon svahu 70° . Dále je narýsována kružnice představující bezpečnostní kužel pro nejpravděpodobnější úhel tření $\varphi = 40^\circ$ na mírně ukloněných diskontinuitách (vyznačen červeně). Aby byla zajištěna stabilita, nesmí se projekce spádnic ani průsečnic vyskytovat ve projekce sférických dvojúhelníků **OQ** a **PR** (vyšrafovaná oblast).

Na obrázku 9.13 je vidět, že spádnice D_1 , D_2 a D_3 nejsou v bezpečné oblasti nebo jsou na pomezí (tyto diskontinuity mohou být stabilní podle toho jaká je v místě jejich výskytu orientace svahu) a diskontinuity v oblasti ohraničené spádnicemi D_1 až D_4 se protínají s diskontinuitami v oblasti ohraničené spádnicemi D_5 a D_6 a vytvářejí tak klíny, které se mohou vysunout ze svahu.

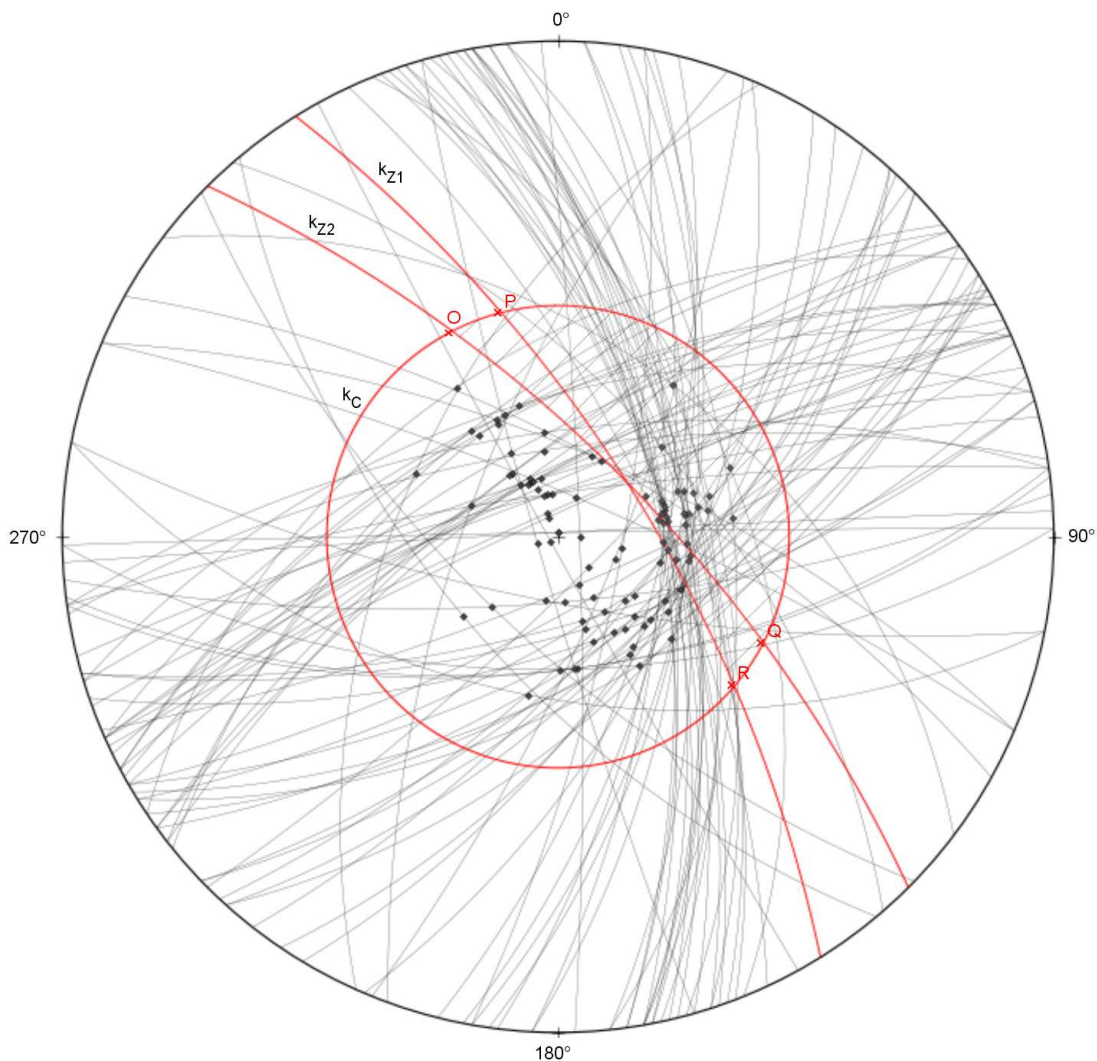
Pro pravý svah zářezu jsou zvlášť na obr. 9.13 uvedeny sklony spádnic těžišť systémů diskontinuit a na obr. 9.14 jsou zvlášť uvedeny průměty všech spádnic a průměty všech průsečnic.



Obr. 9.13 Posouzení stability pro těžiště systémů: bezpečnostní sférické dvojúhelníky **OQ** a **PR** vynesené ve Wulfově síti pro pravý svah zářezu.

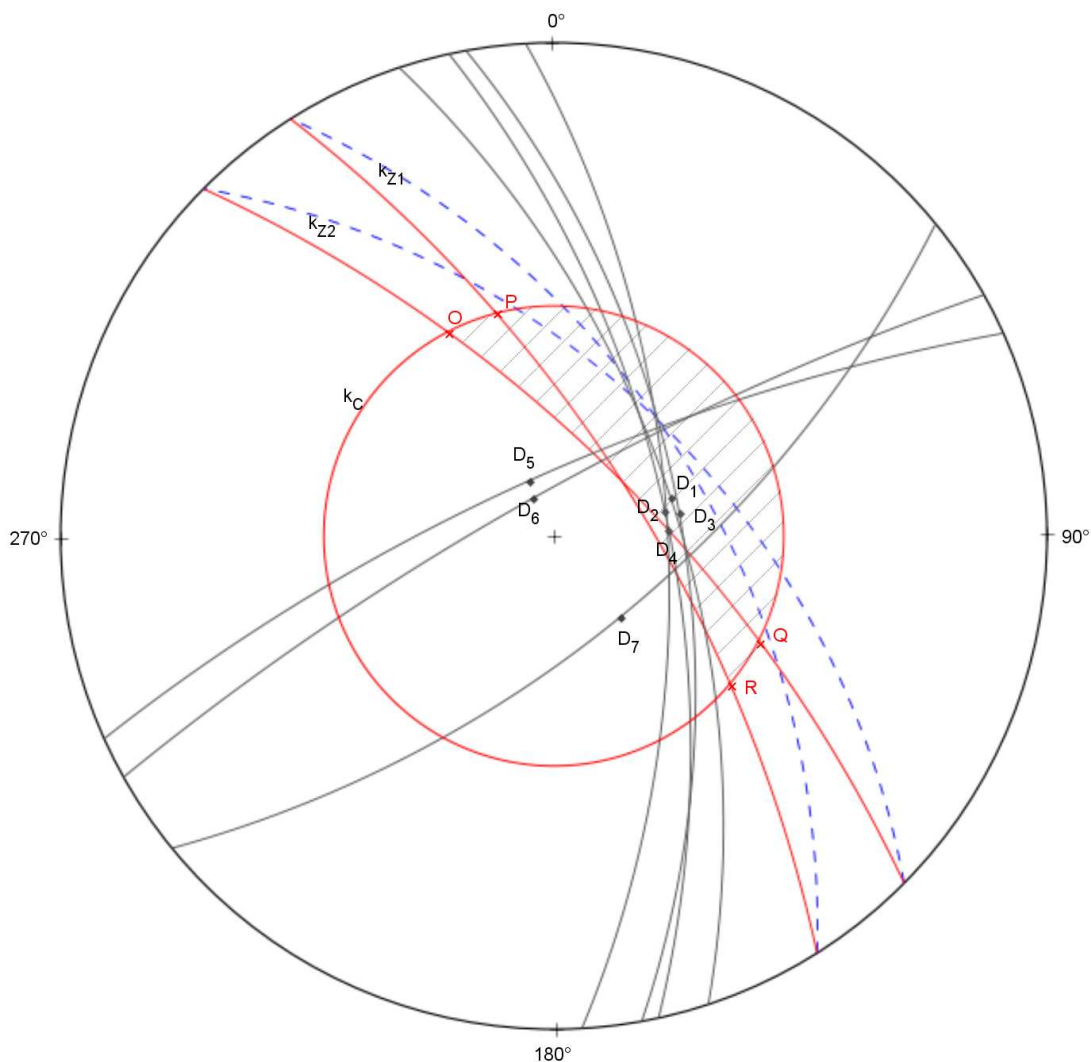
Na následujícím obrázku 9.14 jsou vyneseny všechny oblouky velkých kružnic měřených diskontinuit. Je vidět že projekce některých spádnic jsou v nebezpečné oblasti a hlavně je vidět velké množství projekcí průsečnic diskontinuit, které jsou v nebezpečné oblasti ve sférických dvouúhelnících **OQ** a **PR** a potenciálně vytvářejí nestabilní klíny.

Orientace systémů diskontinuit **D₁** až **D₄** a systému **D₅** a **D₆** spolu s orientací jejich průsečnic byly tím hlavním faktorem, proč pravý svah dálničního zářezu měl potíže s dodržением původně navrhovaného sklonu 70°.



Obr. 9.14 Průměty všech spádnic s oblouky velkých kružnic a průměty všech průsečnic vynesené ve Wulfově síti pro pravý svah zářezu.

S ohledem na systém diskontinuit D_1 až D_4 a systém D_5 a D_6 , které spolu vytvářejí nestabilní klíny, jsem na následující obr. 9.15 vynesla návrhový bezpečný sklon svahu: 55° pro počáteční směr svahu $135^\circ - 315^\circ$ a 56° pro konečný směr svahu $148^\circ - 328^\circ$. Těžiště dvou systémů diskontinuit vytváří průsečnice, které pro tento návrhový sklon jsou v bezpečné oblasti a tedy většina možných klínů bude stabilní a bude nutné zajistit pouze ojedinělé nestabilní klíny. Návrhový sklon pro celý svah je tedy přibližně alespoň 56° .



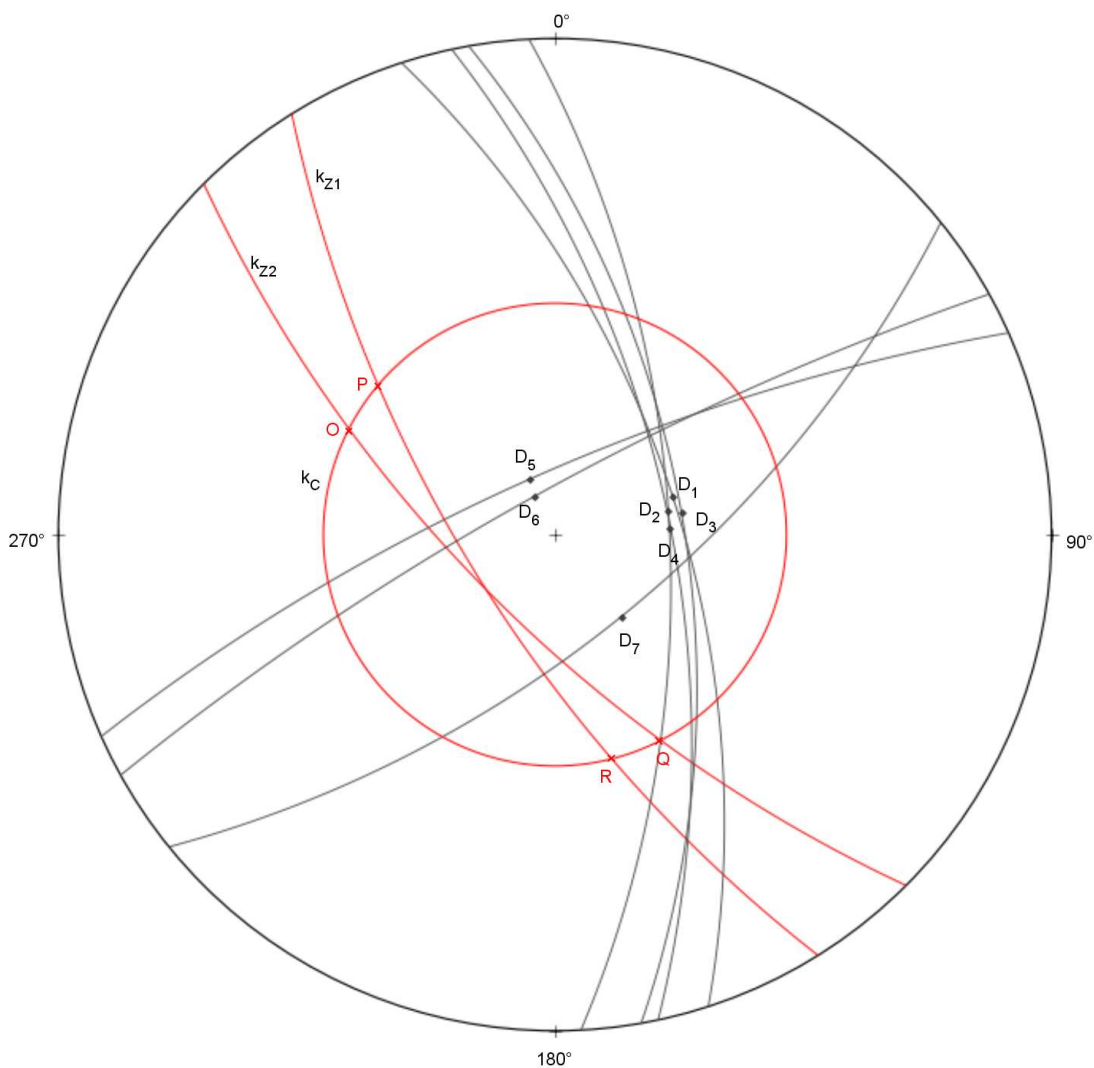
Obr. 9.15 Posouzení stability pro těžiště systémů: návrh bezpečného sklonu svahu 55° a 56° (vyznačeno modře čárkovaně) a bezpečnostní sférické dvojúhelníky OQ a PR pro sklon svahu 70° , vynesené ve Wulfově síti pro pravý svah zářezu.

9.7. Stabilitní analýza pro levý svah zářezu

Na následujícím obrázku 9.16 jsou narýsovány dva oblouky velké kružnice k_{z1} a k_{z2} (vyznačené červeně) pro počáteční a konečný směr $135^\circ - 315^\circ$ a $148^\circ - 328^\circ$ levého svahu zářezu. V řešení byl uvažován také původně navrhovaný sklon svahu 70° . Dále je narýsována kružnice představující bezpečnostní kužel pro nejpravděpodobnější úhel tření $\varphi = 40^\circ$ na mírně ukloněných diskontinuitách (vyznačen červeně). Aby byla zajištěna stabilita, nesmí se projekce spádnic ani průsečnic vyskytovat ve sférických dvouúhelnících **OQ** a **PR**.

Na obrázku 9.16 je vidět, že systémy diskontinuit D_1 až D_4 , D_5 a D_6 i systém s těžištěm v A_3 jsou v bezpečné oblasti, do sférických dvouúhelníků **OQ** a **PR** nezasahuje žádný průmět spádnic systémů diskontinuit ani jejich průsečnice.

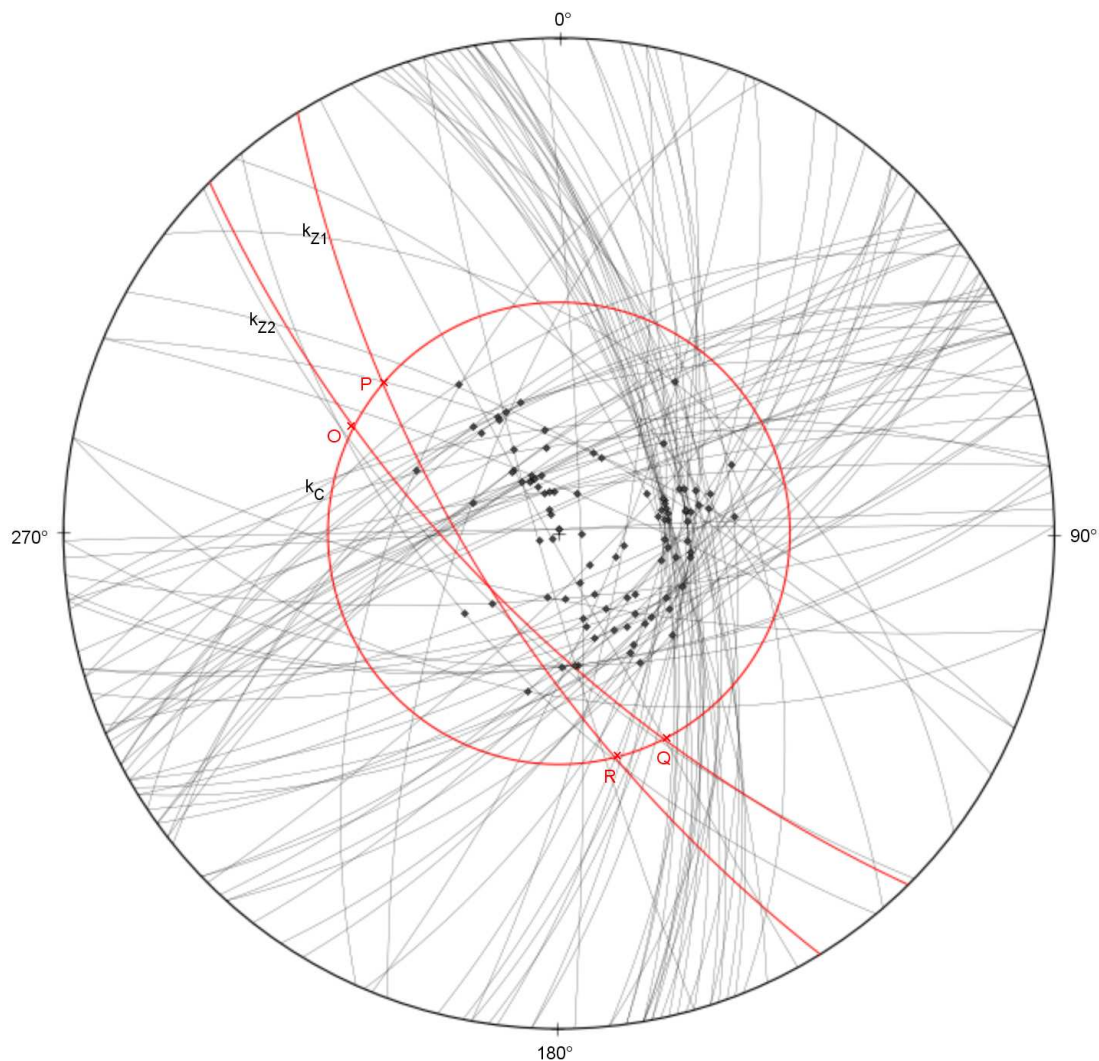
Pro levý svah zářezu jsou zvlášť na obr. 9.16 uvedeny sklony spádnic těžišť systémů diskontinuit a na obr. 9.17 jsou zvlášť uvedeny průměty všech spádnic a průměty všech průsečnic.



Obr. 9.16 Posouzení stability pro těžiště systémů: bezpečnostní sférické dvouúhelníky **OQ** a **PR** vynesené ve Wulfově síti pro levý svah zářezu.

Na následujícím obrázku 9.17 jsou vyneseny všechny oblouky velkých kružnic měřených diskontinuit. Je vidět že průměty šesti spádníc diskontinuit a také několik projekcí průsečnic diskontinuit jsou v nebezpečné oblasti, ve sférických dvouúhelnících **OQ** a **PR**.

Spádnice, na jejichž diskontinuitách je možný posuv i horninové klíny, které se mohou posunout ve směru průsečnic diskontinuit je nejspíš možné jednotlivě zajistit, není jich takové množství jako v případě pravého svahu zářezu a navrhovaný sklon svahu **70°** je zde přiměřený.



Obr. 9.17 Průměty všech spádníc s oblouky velkých kružnic a průměty všech průsečnic vynesené ve Wulfově síti pro levý svah zářezu.

9.8. Fotografická dokumentace



Obr. 9.18 Pohled na Lensedelský zářez směrem od Prahy (na pravo pravý svah zářezu, na levo levý svah zářezu, 05/2013).



Obr. 9.19 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 01, 05/2013).



Obr. 9.20 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 02, 05/2013).



Obr. 9.21 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 03, 05/2013).



Obr. 9.22 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 04, 05/2013).



Obr. 9.23 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 05, 05/2013).



Obr. 9.24 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 06, 05/2013).



Obr. 9.25 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno postupně směrem od Prahy – foto 07, 05/2013).



Obr. 9.26 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno směrem od Brna, 05/2013).



Obr. 9.27 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno směrem od Brna, 05/2013).



Obr. 9.28 Lensedelský zářez – pravý svah (foceno směrem od Prahy, 05/2013).



Obr. 9.29 Lensedelský zářez – detail ochranných ocelových sítí (pravý svah, 05/2013).



Obr. 9.30 Lensedelský zářez – jeden z hlavních systémů diskontinuit (pravý svah, 05/2013).



Obr. 9.31 Lensedelský zářez – pohled na levý svah (05/2013).

10. Závěr

Práce uvádí vysvětlení a využití stereografických metod pro hodnocení stability skalních svahů. Metodicky byly vybrány typické příklady seřazené od jednoduchých ke složitým, přehledně a jednoznačně jsou uvedena řešení jednotlivých úloh a předkládá příklady použitelné pro hodnocení stability skalních svahů a stability stěn i stropů v tunelech či podzemních kavernách, s možnou aplikací pro teorii klíčových bloků. Řešení jsou podána dvojí formou, a to formou konstrukční (řešení jen pomocí trojúhelníků, kružítka a úhloměru) a formou pomocí dvojice paletok Wulfovy sítě (paletky v pólové projekci a rovníkové projekci). Jednodušší a rychlejší řešení pomocí paletok s Wulfovými sítěmi má tu nevýhodu, že lze zvládat úkoly, které probíhají jen v jedné polovině projekční koule. U konstrukční formy lze zvládat obecně úlohy v celém prostoru. Není známo, že by úkoly, zvladatelné pomocí stereografických metod, byly v odborné literatuře někde zpracovány souběžně pro obě formy řešení v širším rozsahu.

V praktické aplikaci stereografické metody na příkladu hornocení stability pravého skalního svahu na dálnici D1 u Lensedel je na výsledných stereogramech (Obr. 9.13, 9.14 a 9.15) vidět četné průsečky oblouků velkých kružnic, které se vyskytují v nebezpečné oblasti – tedy průsečnice, které takto vznikají mají sklon menší než byl původně navrhovaný sklon svahu a tělesa, které diskontinuity vytváří jsou nestabilní. Je třeba zhodnocení na místě, ne všechny možné průsečnice znamenají vytvoření klínu, protože zářez je dlouhý, ale je vidět, že dvojice systémů diskontinuit, které vytvářejí nestabilní klíny, se opakují po celém zářezu (jejich četnost je taková, že nebezpečí sesuvu klínů existuje po celém zářezu). Úhel vnitřního tření na stabilitu nemá vliv, protože vznikající průsečnice dvou nebezpečných systémů diskontinuit mají o 10-20° větší sklon než je předpokládaný úhel vnitřního tření.

11. Použitá literatura

Knihy a články:

- Boyle, W., J., Goodman, R., E., Yow, J., L.: Field Cases using Block Theory, Large Rock Caverns – Proceedings of the international symposium, vol. 2, Helsinki, 1986
- Drozd, K.: Metody řešení stability skalních svahů, výzkumný úkol VÚ-OFTR 072-02, Stavební geologie, Praha, 1976
- Drozd, K.: Příspěvek k řešení stability skalních svahů stereografickými metodami, stavební geologie n.p. Praha, Sborník ČSVTS, Karlovy vary, 1981, strana 120-135
- Drozd, K.: Základy stereografické projekce, VÚ-072 Archiv SG-geotechnika, 1976
- Drozd, K.: Řešení stability skalních svahů za působení dynamických účinků, Sborník: O využití geofyziky v inženýrské geologii, Geofyzika Brno – Řečkovice, 1972
- Drozd, K.: Návrh sklonu svahů a jejich zabezpečení v horninách skalního podkladu, sborník ČSVTS: Zemní práce a hospodaření s půdou na sídlištních stavbách, Most, 1982
- Drozd, K.: Chyby v hodnocení stability skalních svahů pomocí stereografických metod, Symposium: Výpočty stability svahů a jejich zabezpečení, ČTVS – Zakládání staveb Karlovy Vary, 1981
- Drozd, K.: Program výuky předmětu Mechanika skalních hornin na PŘ.F.U.K. v oboru Inženýrské geologie, 2013
- Dvořák, A.: Stabilita svahů za dynamických účinků, Symposium: Výpočty stability svahů a jejich zabezpečení, ČTVS – Zakládání staveb Karlovy Vary, 1981
- Goodman, R., E., Shi, G., H.: Block theory and its application to rock engineering, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1985
- Jaeger, Ch.: Rock Mechanics and engineering, Cambridge, Cambridge University Press, 1972
- Kuchař, K.: Základy kartografie, Praha, Nakl. ČSAV, 1953
- Lisle, R. J., Leyshon, P. R.: Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers, Cambridge, Cambridge University Press, 2004
- Londe, P., Vigier, G., Vormeringer, R.: Stability of rock slopes – graphical methods, Journal Soil Mechanics and Foundation Division Vol 96, SM4, 1970
- Mencl, V.: Mechanika zemin a skalních hornin, Praha, Nakl. ČSAV, 1966
- Paulding, W., B.: Coefficient of friction of natural rock surfaces, Journal Soil Mechanics and Foundation Division Vol 98, SM2, 1970
- Pavlík, J.: Geotechnické způsoby určování stability skalních stěn, Praha, SNTL, 1981
- Phillips, F.C.: The use of stereographic projection in structural geology, London, E. Arnold, 1971
- Roth, Z.: Problémy horského tlaku skalních masivů s hlediska geologie, Praha, Nakl. ČSAV, 1954
- Ředitelství dálnic: Praha-Brno-Bratislava, Praha, Afla Bratislava, 1980
- Záruba, Q., Mencl, V.: Sesuvy a zabezpečování svahů, Praha, Academia, 1969

Dokumentace:

Bodlák, P.; Müelhdorf, J.: Geologická dokumentace dálničního zářezu v úseku km 27,520 - 27,800 u obce Lensedly, Stavební geologie, Praha, 1975, GF P012746

Müelhdorf, J.: Výsledky zkoušek fyzikálních vlastností hornin v dálničním zářezu v úseku km 27,520 - 27,800 u obce Lensedly, Stavební geologie, Praha, 1975, GF P087132

Stavební geologie Geotechnika a.s.: Sanace skalního zářezu (skalního svahu) na D1 Lensedly km 25,539-25,800 Levá strana, 2004, vypracoval ing. J. Sochůrek

Stavební geologie Geotechnika a.s.: Sanace skalního zářezu (skalního svahu) na D1 Lensedly km 25,520-25,800, Technická zpráva, 2002, vypracoval P. Hotový

SUDOP Praha, a.s.: D1 Modernizace – úsek 02 exit 21 Mirošovice – exit 29 Hvězdonice, SO 101 – Dálnice D1 KM 20,854-29,500, 2012, vypracoval ing. Daniel Karfík

SUDOP Praha, a.s.: D1 Modernizace – úsek 02 exit 21 Mirošovice – exit 29 Hvězdonice, SO 101 – část A – průvodní zpráva, 2012, vypracoval ing. Petr Hradil

Internetové zdroje:

Slovík, J.: <http://www.dalnice.com/fotogal/d01>, červenec 2013

12. Seznam příloh

1. Stereografická úhlojevná Wulfova síť v pólové projekci
2. Stereografická úhlojevná Wulfova síť v rovníkové projekci
3. Paletka pro rýsování křivek λ (upraveno podle Drozd, 1981)
4. Stereografická plochojevná Lambertova síť v pólové projekci (úprava Lisle, Leyshon, 2004)
5. Stereografická plochojevná Lambertova síť v rovníkové projekci (úprava Lisle, Leyshon, 2004)