

Digitální modely terénu (4)

Datové reprezentace a analýzy

Ing. Martin KLIMÁNEK, Ph.D.

411 Ústav geoinformačních technologií

Lesnická a dřevařská fakulta,

Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně



Datové reprezentace

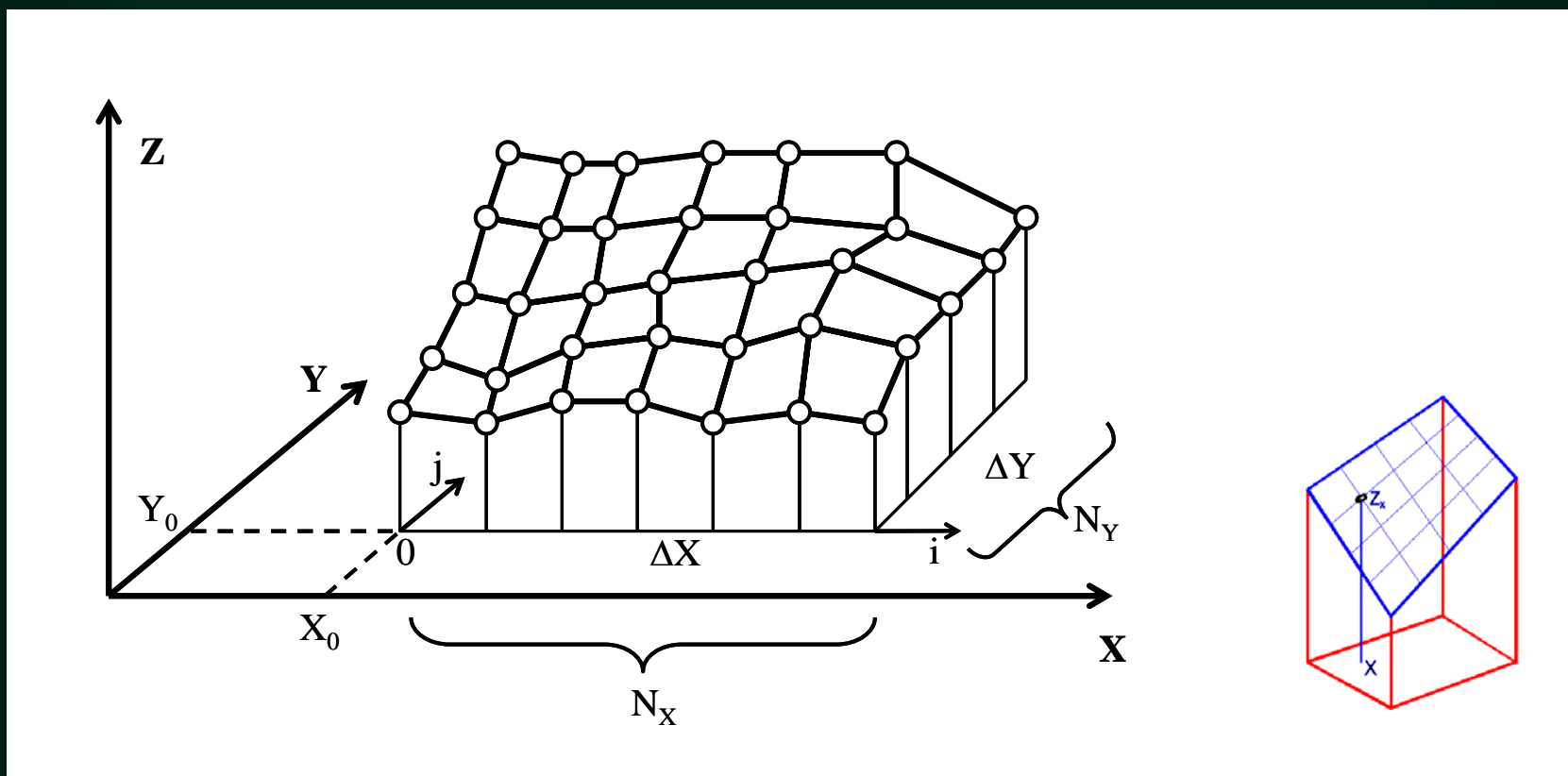
Techniky terénního modelování mohou být klasifikovány podle několika kritérií:

- **datová struktura** – základní a nejčastější rozdělení je na popis povrchu pomocí rastrových modelů s různým typem pixelů nebo faset, anebo popis pomocí triangulační sítě,
- **matematický model** – obvyklé je rozdělení podle způsobů popisu povrchu mezi fasetami, v podstatě se jedná o způsob interpolace hodnot povrchu,
- **způsob generování modelu** – základní rozdělení vychází z předpokladu automatického generování hodnot (při možnosti nastavení parametrů, případně filtrování hodnot) nebo možnosti poloautomatického zpracování se zásahem operátora (vkládání povinných spojnic apod.); tyto procedury pak mohou mít lokální nebo globální charakter.

1 Rastrový model

Rastrový model je chápán ve dvou variantách (Kraus 2000):

- První považuje buňku (pixel) za plošku (fasetu) uzavřenou čtyřmi body rastrové sítě, z nichž každý může mít jinou výšku (grid), a výsledný model je tak tvořen zborcenými čtyřúhelníky.
- Druhá pokládá buňku (pixel) za objekt reprezentující pravoúhlou plošku integrálně a přiřazená hodnota reprezentuje atribut výšky pro celou plochu buňky (pixelu) – tato varianta se používá v rastrově orientovaných GIS nejčastěji.



Obr.1: Geometrie rastrových modelů typu zborcených čtyřúhelníků (Kraus 2000).

Terén je reprezentován 2D maticí atributových hodnot $Z_{i,j}$ z $N_x \times N_y$ prvků. Transformace mezi indexy matice (i, j) , $\{i, j\} \in N_0$ a rovinnými souřadnicemi (X, Y) je vyjádřena posunem na osách:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + \Delta X \cdot i \\ Y &= Y_0 + \Delta Y \cdot j \end{aligned} \quad (1)$$

Uvnitř rastrové sítě je terénní povrch popsán bilineární polynomiální funkcí v závislosti na X a Y . Výška Z daného bodu o rovinných souřadnicích (X, Y) může být vypočtena ze vztahu:

$$Z = a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot t + a_3 \cdot s \cdot t \quad (2)$$

Ve vztazích (3) jsou (i, j) minimální indexy rohových bodů rastrové sítě o souřadnicích (X, Y) a (s, t) jsou rovinné souřadnice daného bodu v rastrových jednotkách lokálního souřadného systému s počátkem v rastrovém prvku (i, j) :

$$\begin{aligned} s &= \frac{X - X_0}{\Delta X} - i \\ t &= \frac{Y - Y_0}{\Delta Y} - j \end{aligned} \quad (3)$$

Koeficienty a_k bilineární funkce se počítají z rohových bodů rastrové sítě (4):

$$a_0 = Z_{i,j}$$

$$a_1 = Z_{i+1,j} - Z_{i,j}$$

$$a_2 = Z_{i,j+1} - Z_{i,j}$$

$$a_3 = Z_{i+1,j+1} + Z_{i,j} - Z_{i+1,j} - Z_{i,j+1}$$

(4)

Nejčastější metody pro výpočet výšky v tomto typu rastrového DMT jsou:

Prostorová aproximace metodou konečných prvků

Tato metoda vychází ze vztahů (1) až (4). Pro každý měřený bod P je určena výška Z_p v rovnici (2) podle koeficientů a_k s rastrovou výškou $Z(i,j)$, které jsou spočteny z metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců má totiž požadovaný vyhlazovací efekt, ale za předpokladu nulové křivosti mezi body rastru. Pokud není možné (nebo je nežádoucí) tento předpoklad splnit, je nutné zavést do modelu další rovnice, zvláště v případě pravidelného rastru s nedostatkem měřených bodů (Ebner and Reiß 1978).

Lineární predikce

Výšky jsou počítány na základě lineární predikce s předpokladem vyhlazování terénu na základě korelací – stupeň korelace (vyhlazení) je tedy popsán kovariantní funkcí, která řídí tento proces (Wild 1983).

Problémem obou těchto metod je zobrazování terénních singularit typu ostrých hran, zlomů, teras, apod., právě pro jejich princip vyhlazování. Tyto případy se pak řeší zavedením zlomových linií spojujících vstupní body na těchto singularitách, kde neprobíhají výpočty uvedených metod (vyhlazování povrchu) nebo zavedením hybridního modelu, kde jsou tyto linie povinnými hranami triangulace (Kraus 2000).

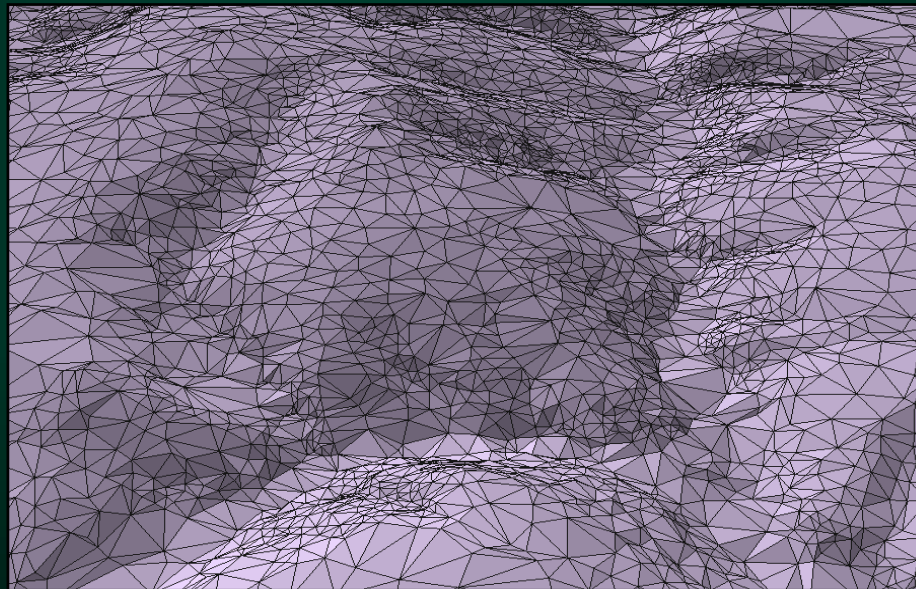
2 Polyedrický model

- Elementárními ploškami polyedrického modelu jsou trojúhelníky, které k sobě přiléhají a tvoří tak mnohostěn, přimykající se k terénu.
- Vrcholy mnohostěnu jsou body na terénní ploše, interpolace plochy se obvykle provádí lineárně po trojúhelnících.
- Tento přístup, označovaný jako triangulace či nepravidelná trojúhelníková síť, v originále **Triangulated Irregular Network (TIN)***, je v současné době u vektorově orientovaných GIS nejrozšířenější.

* Počátky této metody se datují do 70. let 20. století, kdy prof. Thomas Poiker (*Simon Fraser University*) inicioval založení skupiny zabývající se touto problematikou. Původní název byl „*Independent Data of Irregularly Oriented Terrain*“ (IDIOT), protože však někteří oslovení vědci měli výhrady k této zkratce, byla přejmenována na TIN. Zanedlouho potom Randolph Franklin publikoval počítačový algoritmus na vytváření povrchů za využití TIN struktury nazvaný TIN 73 (Thurston 2003).

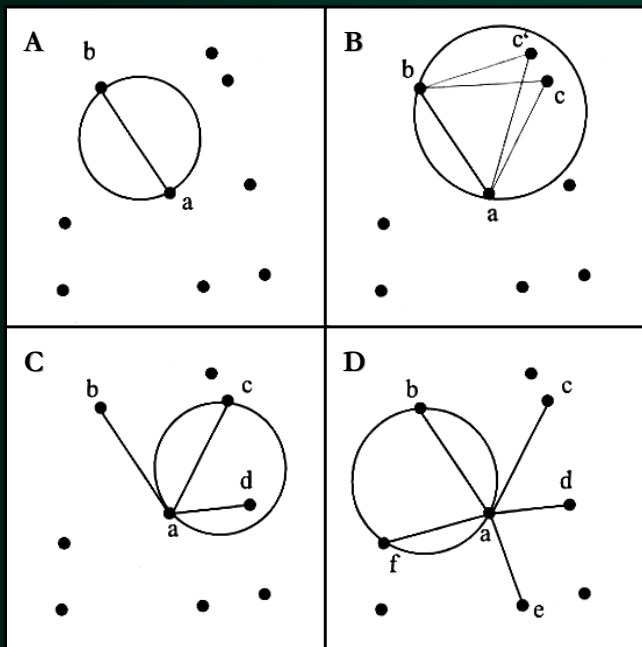
Terén je v tomto případě reprezentován trojúhelníky, čili sadou vrcholů (vertices, vertex), hran (edges) a plošek (faces). Vstupní zdrojová data jsou vyjádřena X , Y a Z souřadnicemi vrcholů, každá hrana tak spojuje 2 vrcholy a rozděluje 2 plošky, každá trojúhelníkovitá ploška je potom ohraničena 3 hranami a je považována za rovinný útvar (Kraus 2000).

V některých případech však nejsou z hlediska přesnosti rovinné trojúhelníky dostačujícím řešením a jejich povrch může být modelován pomocí specifických algoritmů jako jsou například **Bezierův plát** (Pfeifer and Pottmann 1996) nebo **Coonsova plocha**.



Obr.2: Geometrie vektorových modelů typu TIN.

Nejdůležitější fází pro tento model je samotný typ triangulace, která se týká pouze rovinných souřadnic vstupních bodů. Nejčastěji používaným kritériem je tzv. **Delaunayho podmínka**, tedy, že vnitřek kruhu opsaného libovolnému z trojúhelníků sítě neobsahuje žádný další (čtvrtý) bod sítě (Preparata and Shamos 1990). Toto kritérium je zároveň ekvivalentní pro maximalizaci velikostí všech úhlů v trojúhelníku (Heitzinger 1996).



Postup triangulace znázorňuje obrázek 3 (Raper 1993). K danému bodu b najdeme nejbližšího souseda a , tzv. Thiessenovy sousedy (A). Rozšíříme hledací kružnici procházející přes tyto body tak, aby do ní padly další body (B). Vybereme z nich ten, u kterého úhel ke spojnici východiskových bodů ab je větší, tedy c (C). Pokračujeme v hledání do té doby, až v kružnici opět najdeme bod b (D).

Obr.3: Postup triangulace

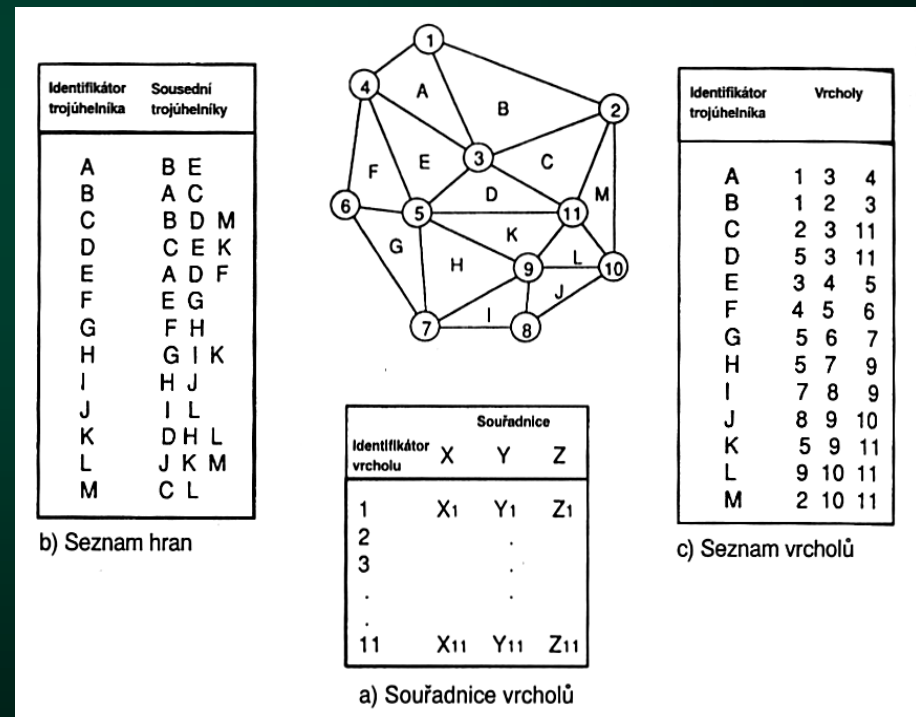
TIN struktura bývá nejčastěji uložena ve dvou typech:

Ukládají se jednotlivé trojúhelníky jako polygony s příslušnými atributy

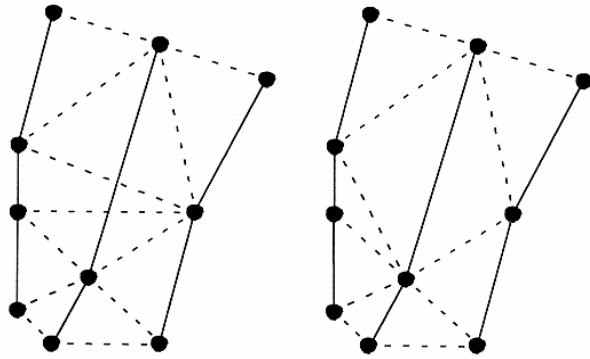
V tomto případě se registruje jednoznačný identifikátor každého trojúhelníka, souřadnice (x , y , z) pro každý vrchol a identifikátory trojúhelníků sousedních (je to vlastně stejný způsob registrace jako v případě plošných objektů u datových struktur s úplnou topologií).

Ukládají se jednotlivé body spolu s informacemi o jejich sousedech

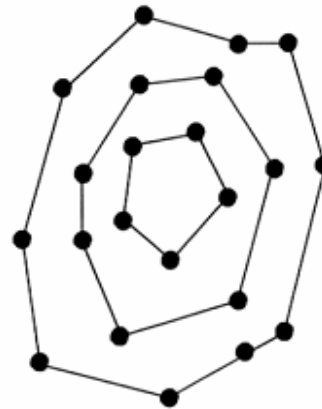
V tomto případě se registruje identifikátor každého vrcholu spolu se svými souřadnicemi (x , y , z) a identifikátory vrcholů sousedních (ve směru nebo proti směru hodinových ručiček).



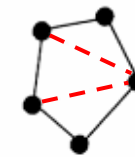
Obr.4: Uložení TIN



Unconstrained (left) and constrained (right) Delaunay triangulations. Solid lines represent isolines.

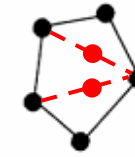


a



B/T Edges

b



Critical Points

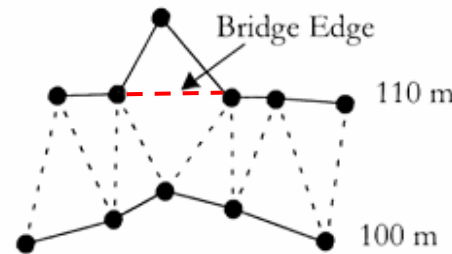
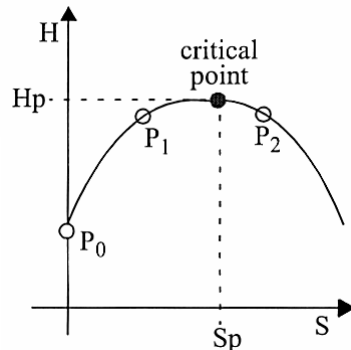
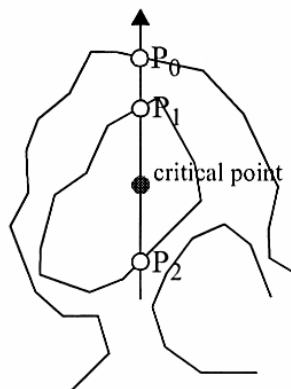
c



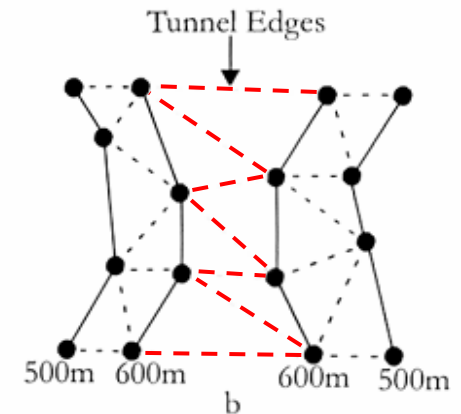
Re-Triangulation

d

a: Contours at the top of a hill; b: triangulation of highest contour, with B/T edges identified; c: placement of critical points on B/T edges;



a



b

a: Contours at a stream; b: contours at a "saddle" feature. Contours are shown with solid lines, constrained triangle edges with dashed lines. B/T edges are shown in red.

Možností, jak udělat tuto reprezentaci nezávislou na orientaci souřadného systému, je rozšířit triangulaci do 3D prostoru (zahrnutím normál trojúhelníků, které mohou být součástí vstupních dat nebo se získávají v předzpracování lokální aproximací tangenciálními řezy).

Kromě Delaunayho podmínky je potom druhým kritériem maximalizace úhlu mezi přilehlými trojúhelníky, tzn. minimalizace úhlu mezi normálami. V současné době probíhají experimenty kombinující rastrové modely zejména s 3D triangulací (Pfeifer 2002).

Pro zobrazování singularit terénu je nezbytné, aby tyto prvky terénu byly vyjádřeny hranami trojúhelníků, na kterých aproximace povrchu nebude probíhat a to i v případě, že takto generovaná triangulace není z hlediska Delaunayho kritéria optimální (Halmer et al. 1996).

3 Plátový model

- Plátový model má mnoho rysů společných s modelem polyedrickým. Terén je opět rozdělen na menší plošky, které však nemusí být pouze rovinné, mohou být i jistým způsobem zakřivené. Nejčastěji se používají plochy popsatelné polynomickými funkcemi, které na sebe při hraničních liniích navazují natolik hladce, aby byla zaručena spojitost derivací do jistého, předem daného řádu.
- Tvorba plátového modelu ze vstupních dat postupuje v několika krocích. Prvním krokem je triangulace, tedy pospojování vstupního seznamu bodů do trojúhelníkové sítě. Výsledkem triangulace je terénní model popsáný vhodnou datovou strukturou. Součástí tvorby modelu může být i optimalizace jednotlivých plátů. Při ní jsou některé zbytečné hrany trojúhelníkové sítě vypuštěny a model je pak tvořen i čtyřúhelníky, či ještě složitějšími mnohoúhelníky. Při provádění těchto operací vzniká z trojúhelníkové sítě obecný plátový model, který se skládá z obecných n -úhelníků. Vždy však bývá zachován vztah (5), nazývaný Eulerův:

$$V + F - E = 2 \quad (5)$$

kde V je počet vrcholů, E je počet hran a F je počet ploch. Tento vzorec ovšem předpokládá započítání okolí trojúhelníkové sítě, které se reprezentuje jednou plochou nebo musí být síť uzavřená a popisovat tak uzavřené prostorové těleso ze všech stran (Mayer 1995).

Srovnání datových reprezentací DMT

	Rastrové modely	Triangulace
Aproximace povrchu	Velmi variabilní (závisí na typu zvoleného algoritmu prostorové interpolace dat).	Obtížně modifikovatelná (vstupní data se stávají vrcholy trojúhelníků jejichž plochy jsou nejčastěji považovány za rovinné).
Geomorfologie	Nutné zavedení zlomových linií je relativně obtížné – definováním oblastí bez aproximace povrchu nebo zavedením hybridního modelu.	Nutné zavedení zlomových linií je relativně jednoduché – definováním zlomových linií jako povinných hran trojúhelníkové sítě.
Vstupní data	Omezení vyplývající z maticové struktury modelu, obvyklé dilema mezi velikostí gridu (pixelu) odrážející se ve velikosti dat a přesnosti. Ideální pro extrémní objemy pravidelně uspořádaných dat (laserové skenování).	Relativně neomezené parametry, závislé pouze na kvalitě trojúhelníkové sítě vzhledem k rozmístění (hustotě) vstupních dat.
Použitelnost	Omezení vyplývající z 2,5D reprezentace. Velké množství relativně jednoduchých algoritmů pro mnoho aplikací.	Struktura modelu je svou podstatou jednodušší. Algoritmy pro aplikace jsou však složitější vzhledem k výpočtům v topologickém modelu.

Analýzy DMT

Interpretací (analýzou) modelů terénu je možné získat řadu cenných informací ve formě atributů, vztahujících se k povrchu reálného terénu.

Tyto analýzy mohou probíhat ve dvou rovinách:

- vizuální (grafická) interpretace
- čistě kvantitativní analýza

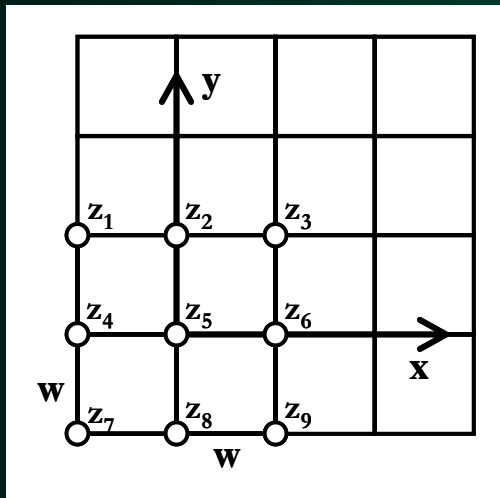
Výstupy mohou být využity v ostatních složkách GIS nebo jsou vstupem do dalších modelů (např. hydrologických nebo erozních).

Analýza geomorfometrických parametrů se obvykle dělí na obecnou geomorfometrii a na specifickou geomorfometrii (Evans 1972).

1 Obecné geomorfometrické analýzy

Výpočty probíhají prostřednictvím operací s okolím za využití výškových údajů z okolních bodů, určených prostřednictvím okna (submatice) 3×3 pixely, které má centrum v uvažovaném bodě. Příslušná nakloněná rovina je definována polynomem (6), který je nejlepší lineární aproximací povrchu určeného body ve stanoveném okolí. Ve skutečnosti tato rovina neprochází všemi body okolí a minimalizuje součet čtverců odchylek mezi uvažovanou rovinou a údaji v každém bodě okolí (Evans 1980).

$$z = \frac{rx^2}{2} + \frac{ty^2}{2} + sxy + px + qy + u \quad (6)$$



Obr.6: Definice 3×3 okna pro morfometrické výpočty v DMT.

Body submatice $(-w, w, z_1)$, $(0, w, z_2)$, (w, w, z_3) , $(-w, 0, z_4)$, $(0, 0, z_5)$, $(w, 0, z_6)$, $(-w, -w, z_7)$, $(0, -w, z_8)$ a $(w, -w, z_9)$ jsou vyjádřeny v rovinných souřadnicích v závislosti na rozměrech pixelu w a s příslušnou výškou z .

Výsledkem je výpočet hodnot koeficientů r , t , s , p a q v uvažovaném bodě $(0, 0, z_5)$ podle rovnic (7) až (11). Posouváním tohoto okna nad DMT se počítají hodnoty pro všechny body modelu s výjimkou hraničních bodů. Tato metoda má obecnou platnost, ale existuje i řada jejích modifikací a odvozených metod.

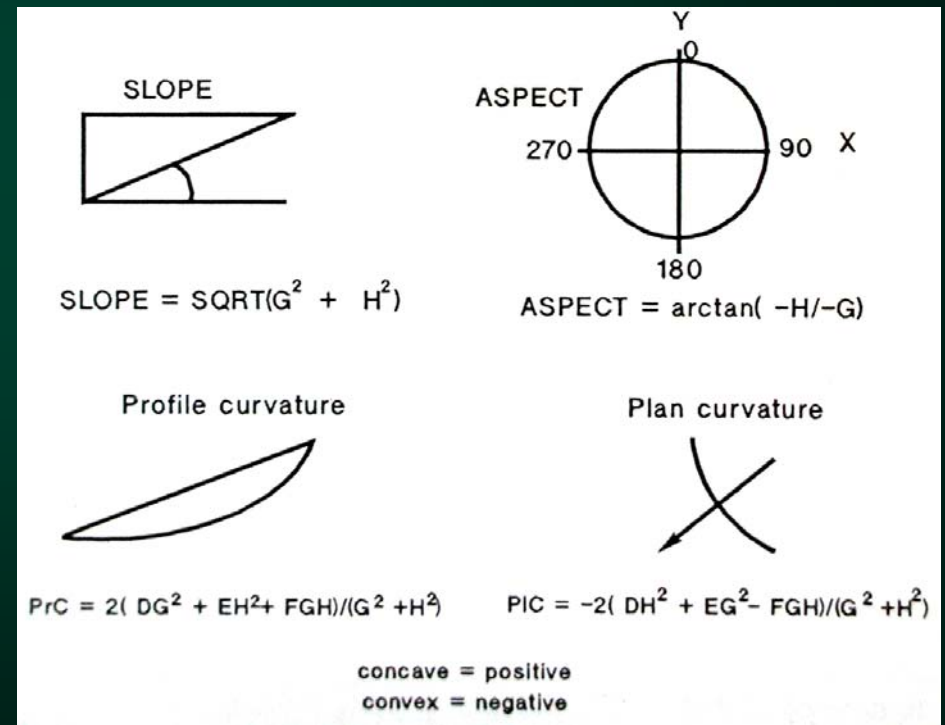
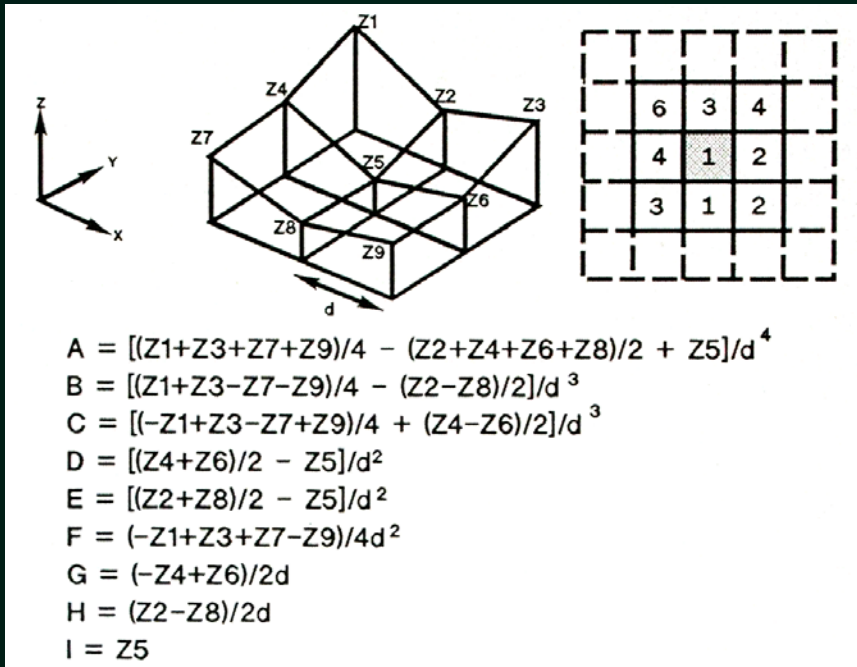
$$r = \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9 - 2(z_2 + z_5 + z_8)}{3w^2} \quad (7)$$

$$t = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2(z_4 + z_5 + z_6)}{3w^2} \quad (8)$$

$$s = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6w} \quad (9)$$

$$p = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6w} \quad (10)$$

$$q = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6w} \quad (11)$$

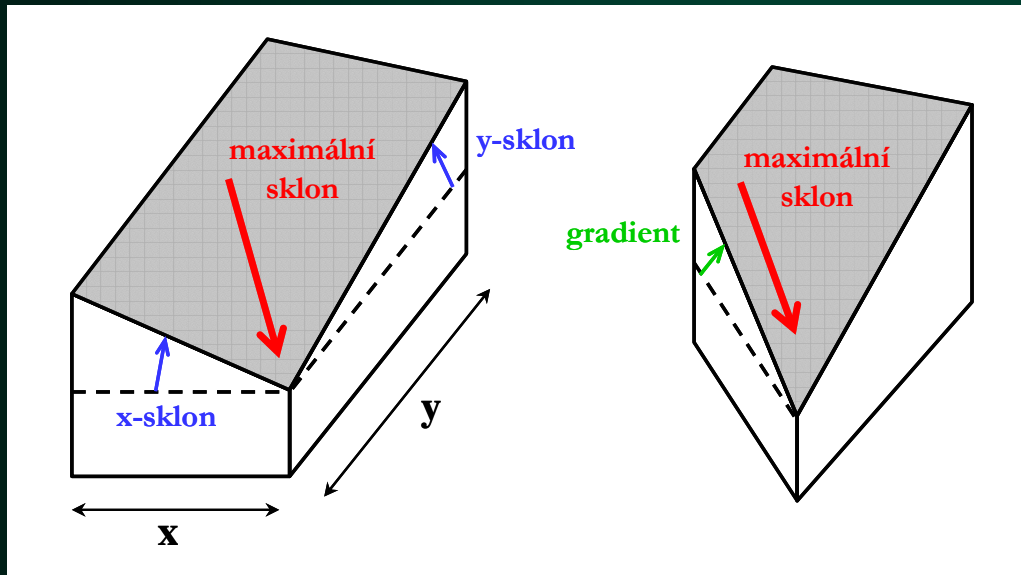


Obr.7: Morfometrické výpočty Zevenbergen-Thornovou metodou. (Burrough and McDonnell 1998)

1.1 Sklonitost

Sklonitost se definuje jako gradient (maximální spád) výšky. Gradient G v definovaném bodě je úhel měřený od horizontály k tečné rovině v tomto bodě. Sklonitost lze počítat jako sklonitost ve směru osy x , sklonitost ve směru osy y a maximální sklonitost G . Zavedením rovnic (6) až (11) lze výpočet gradientu definovat vztahem (12). Sklonitost se obvykle udává se ve stupních nebo v procentech.

$$G = \arctan \sqrt{p^2 + q^2} \quad (12)$$

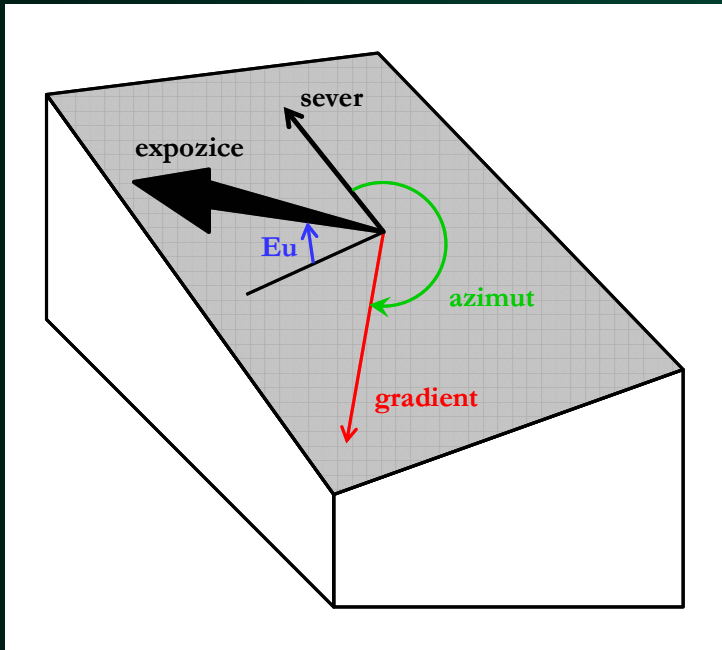


Obr.8: Sklonitost

1.2 Expozice

Expozice se v praxi nejčastěji definuje jako azimut. Azimut θ je horizontální úhel ve stupních, sevřený mezi zeměpisným severem a gradientem (ve smyslu směru pohybu hodinových ručiček). Někdy se používá elevační úhel Eu , což je výškový úhel ve stupních, sevřený horizontálou a přímkou proloženou daným bodem kolmo k povrchu. Zavedením rovnic (6) až (11) lze výpočet expozice definovat vztahem (13).

$$\theta = \arctan\left(\frac{q}{p}\right) \quad (13)$$



Obr.9: Expozice

Příklad výpočtu sklonitosti, expozice a azimutu

Z ₁ (20)	Z ₂ (20)	Z ₃ (20)
Z ₄ (20)	Z ₅ (15)	Z ₆ (15)
Z ₇ (15)	Z ₈ (10)	Z ₉ (10)

$$a = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9) / 9 = 16,1$$

$$b = (Z_3 - Z_1 + Z_6 - Z_4 + Z_9 - Z_7) / 6 = -1,7$$

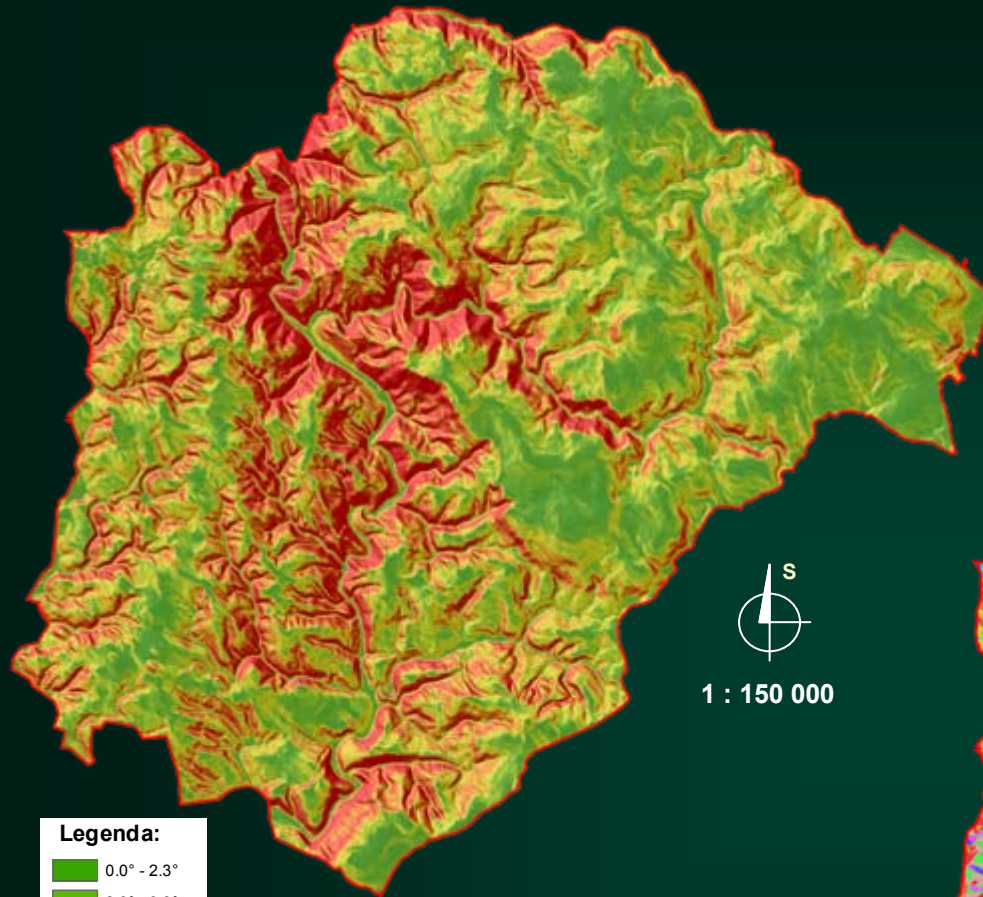
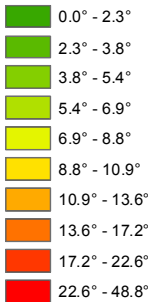
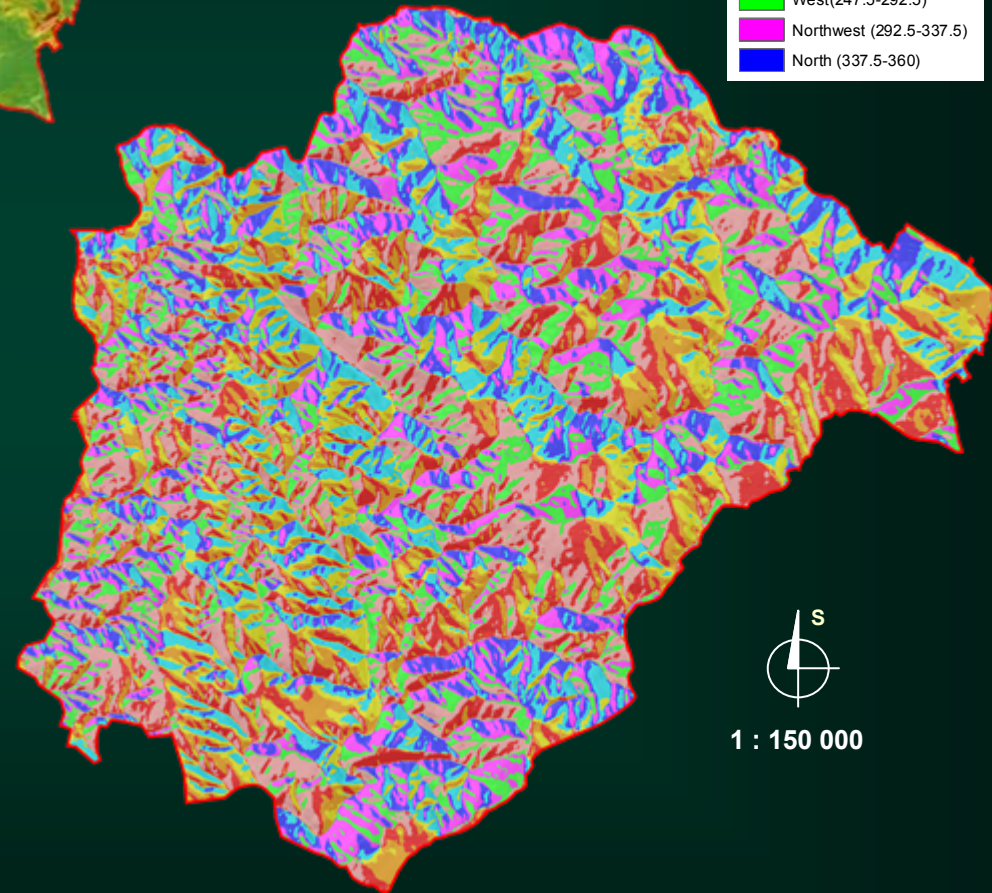
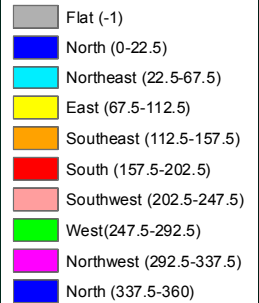
$$c = (Z_1 - Z_7 + Z_2 - Z_8 + Z_3 - Z_9) / 6 = 4,2$$

Hodnota sklonitosti (G) ve středu okna je:

$$G = \sqrt{(b^2 + c^2)} = \sqrt{(-1,7^2 + 4,2^2)} = \sqrt{(2,9 + 17,6)} = \sqrt{20,5} = 4,5$$

Tato hodnota vyjadřuje přírůstek výšky na horizontální jednotku vzdálenosti, ve směru gradientu (nejpříkřejšího svahu). Matematicky je to hodnota $\text{tg}(\alpha)$, ze které můžeme určit příslušný úhel. V případě, že velikost pixelů je např. 10x10 m dostaneme výslednou hodnotu 4,5/10, které odpovídá úhel cca 24,2°.

$$\theta = 90^\circ - \text{tg}^{-1}(c/b) = 90^\circ - \text{tg}^{-1}(4,2/-1,7) = 90^\circ - (-67,96^\circ) = 157,96^\circ$$

**Legenda:****Expozice terénu
ŠLP Křtiny****Legenda:**

1.3 Reflektance

Výpočty sklonu a expozice jsou úzce spjaty s procedurami pro vytváření analytického stínování reliéfu terénu. Kromě obdobných vstupních dat jako pro výpočty (12) a (13) jsou dalšími nezbytnými údaji azimut θ (horizontální úhel zdroje osvětlení) a zenit ψ (vertikální úhel zdroje osvětlení).

Existuje mnoho výpočetních postupů pro stanovení reflektance povrchu, nejčastěji používaným je tzv. Lambertův model, kdy se předpokládá ideální odrazivost paprsků od povrchu, který se potom jeví jako rovnoměrně osvětlen ze všech úhlů pohledu. Složitější modely, jako například tzv. Lommel-Seeligerovo pravidlo, vycházejí z analýzy rozptylu paprsků v závislosti na povrchu a vzdálenosti. Zavedením rovnic (6) až (11) je potom výpočet reflektance R v Lambertově modelu definován vztahem (14).

$$R = \frac{1 - p \cos \theta / \tan \psi - q \sin \theta / \tan \psi}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + (\cos \theta / \tan \psi)^2 + (\sin \theta / \tan \psi)^2}} \quad (14)$$

1.4 Zakřivení

Vedle sklonitosti a expozice se často řadí mezi obecné geomorfometrické analýzy i zakřivení (míra změny křivosti).

Zakřivení se skládá ze dvou komponent (Evans 1980):

- vertikálního zakřivení (profile curvature) k_v (míra změny u gradientu)
- horizontálního zakřivení (plan curvature, tangential curvature) k_h (míra změny u vrstevnic).

Zavedením rovnic (6) až (11) lze výpočet vertikálního zakřivení definovat vztahem (15) a výpočet horizontálního zakřivení vztahem (16).

$$k_v = -\frac{p^2 r + 2 p q s + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}} \quad (15)$$

$$k_h = -\frac{q^2 r - 2 p q s + p^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (16)$$

1.4 Zakřivení

Ve výsledcích potom záporné hodnoty značí konvexní tvary a kladné hodnoty tvary konkávní.

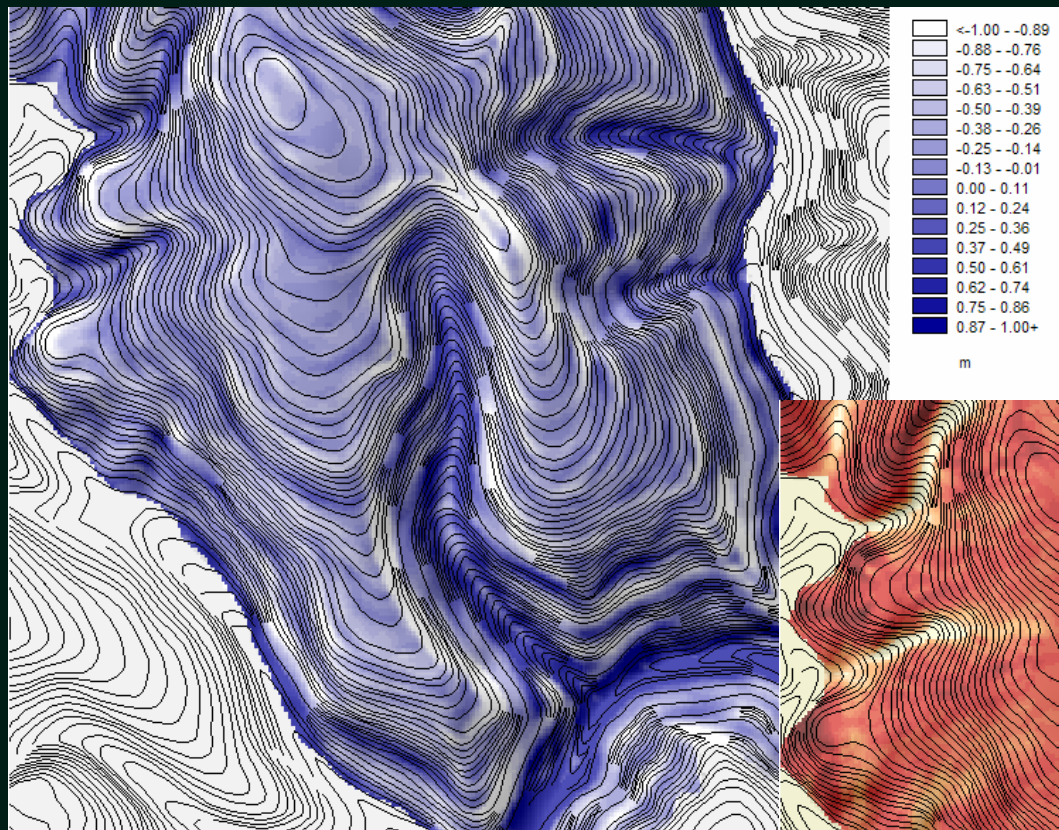
Vzhledem k tomu, že tato charakteristika je reprezentována dvěma hodnotami, tak v praxi často dochází k jejich slučování do jedné komplexní veličiny. Takovouto veličinou potom může být průměrné zakřivení K (17), akumulární zakřivení K_A (18) nebo Gaussovo zakřivení K_G (19).

$$K = (k_v + k_h)/2 \quad (17)$$

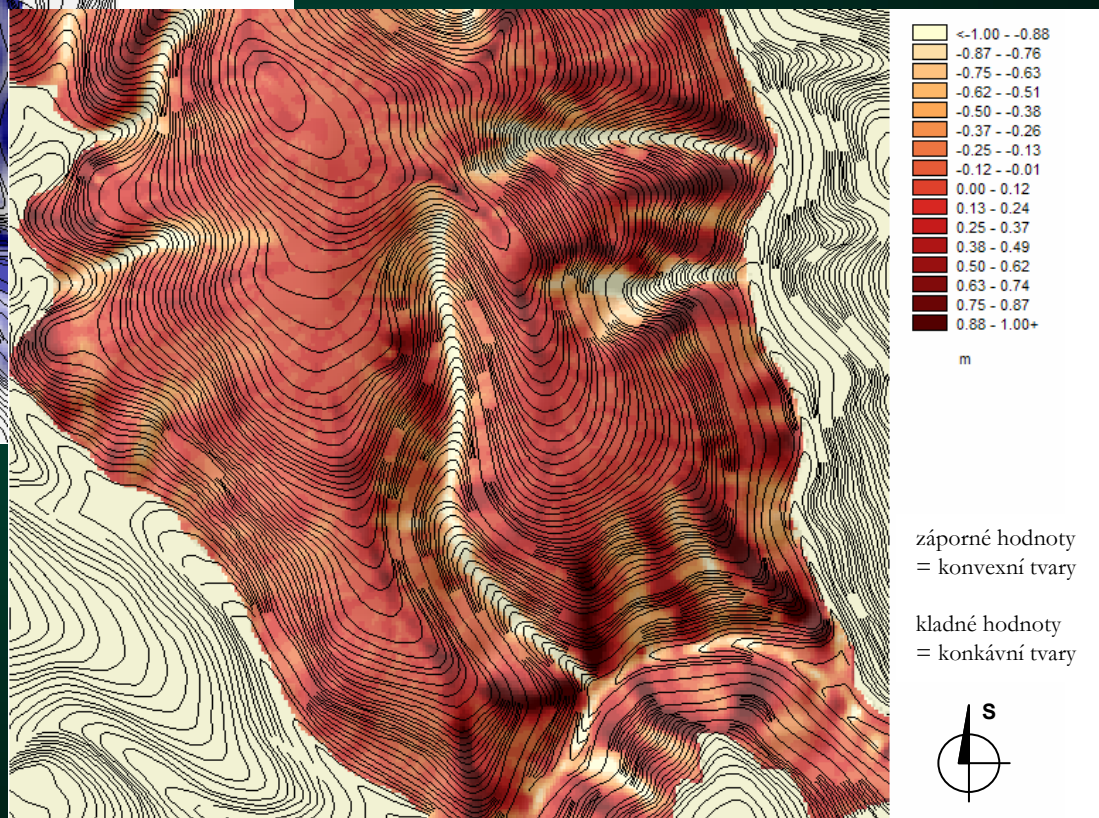
$$K_A = k_v \cdot k_h \quad (18)$$

$$K_G = \frac{rt - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2} \quad (19)$$

1.4 Zakřivení



Obr.12: Vertikální (profilové) zakřivení



Obr.13: Horizontální (planární) zakřivení

2 Specifické geomorfometrické analýzy

Specifická geomorfometrie je především zaměřena na analýzu terénních prvků souvisejících s hydrologií:

- směry odtoku,
- lokální povodí,
- akumulovaný odtok,

(v závislosti na určování terénních tvarů pomocí údajů obecné geomorfometrie).

Z oblasti inženýrských aplikací je důležitá také analýza viditelnosti (dohlednosti) (v závislosti na navazujících modelech šíření a proudění).

2.1 Tvary terénu

Terénní prvky lze rozdělit (obdobně jako entity v prostoru) na:

- bodové prvky (vrcholy, prohlubně, sedla),
- liniové prvky (hřebeny, údolí),
- plošné prvky (svahy, plošiny).

Principem je tedy určení požadovaných objektů na základě jejich charakteristik a závislostí v reálném terénu pomocí algoritmů založených na analýze okolí (pomocí pohybujícího se okna).

Celá technologie se skládá ze dvou postupů: nejprve se musí upravit (vyhladit) DMT tak, aby v následující fázi matematické klasifikace nedocházelo k chybným závěrům (Herrington and Pellegrini 2000).

2.1 Tvary terénu

Úprava DMT se nejčastěji provádí snížením textury pomocí filtrování (lowpass filtering) oknem o velikosti 3×3 pixely (nebo jiného lichého rozměru). S výhodou lze využít i Fourierovu transformaci, která převede prostorová data na prostorovou frekvenční oblast (hodnoty pixelů jsou reprezentovány funkcemi sinus a kosinus, kdy velikost a poloha pixelu je vyjádřena frekvencí a hodnota pixelu amplitudou).

Většina programů k tomuto účelu používá tzv. rychlou Fourierovu transformaci (FFT), jejíž podmínkou však je, aby rozměry vstupního rastru byly násobkem dvou (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, atd.), protože není možné vyřešit prvky s kratší vlnovou délkou než je dvojnásobek rozlišení pixelu (tzv. Nyquistova frekvence).

Výsledkem jsou tři výstupy – reálná složka číselných hodnot původního rastru, imaginární složka a tzv. power spectrum (Fourierovo spektrum) – právě poslední výstup je vhodný pro vizuální analýzu a pro následné sestavení filtru – nízké frekvence jsou uprostřed a vysoké na okrajích (Pellegrini 1995).

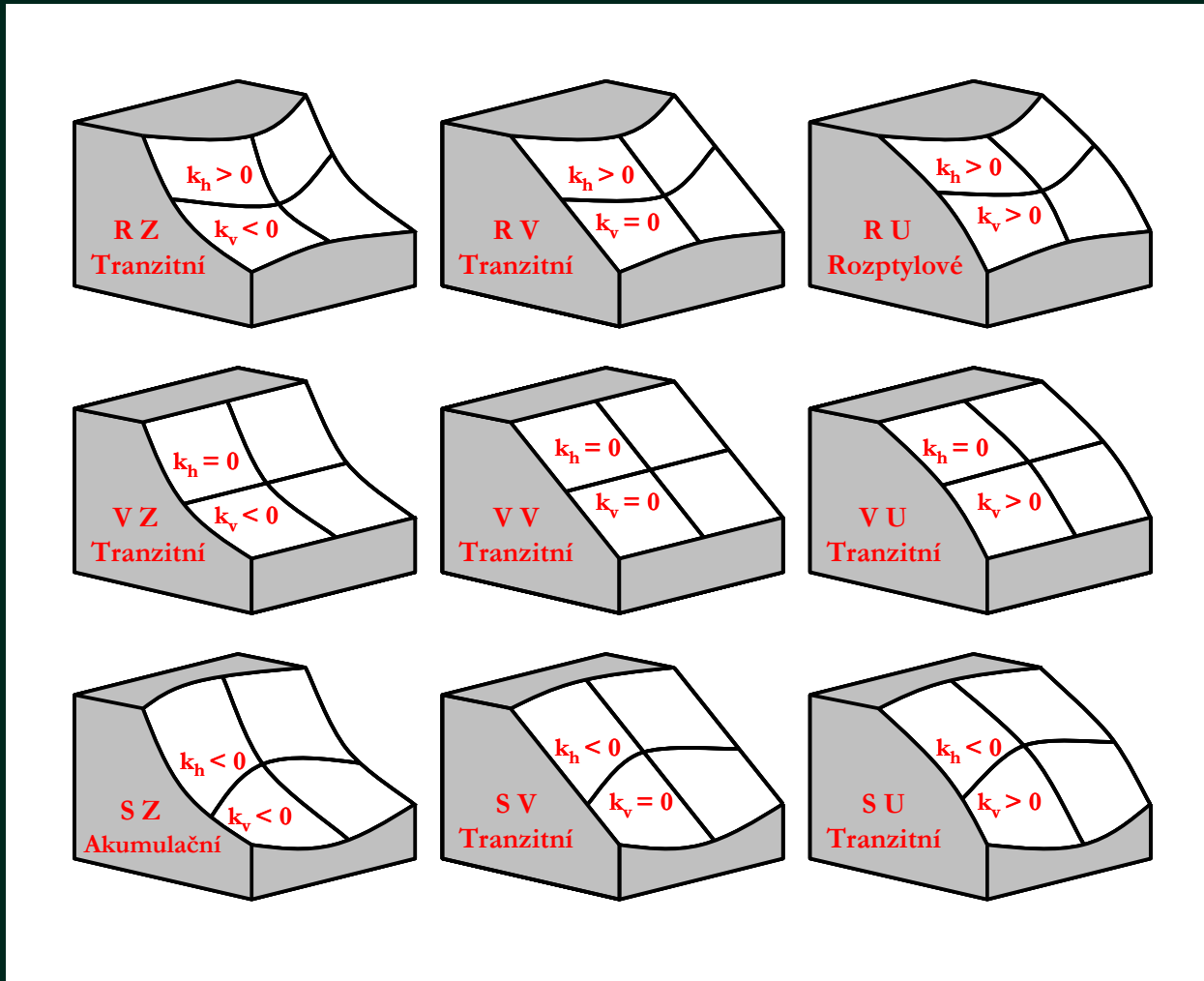
2.1 Tvary terénu

Princip matematické klasifikace je založen na algoritmu rozpoznávání terénních tvarů v závislosti na kontinuálních změnách sklonu, expozice a na horizontálním i vertikálním zakřivení. Tyto charakteristiky jsou počítány algoritmem na základě Zevenbergen-Thornovy metody a porovnávány se sadou heuristických tabulek, obsahujících informace o přiřazení jednotlivých terénních tvarů (Herrington and Pellegrini 2000).

V jednodušších případech je možné (např. z hlediska transportu materiálů a parametrů odtoku), vylišovat v terénu pouze akumulární, tranzitní a rozptylové zóny, ovlivňující i rychlost a rozložení (zpomalením **Z**, urychlením **U**, soustředěním **S**, rozptýlením **R** nebo vyrovnaním **V**) odtoku (Krcho 1990) na základě horizontálního zakřivení k_h a vertikálního zakřivení k_v .

Vhodnou podporou terénních klasifikací mohou být různé texturální analýzy, jako například klasifikace dimenzí ve smyslu Eukleidovské geometrie (linie = 1, plocha = 2, prostor = 3), vylišování hran podle orientace terénu ke světovým stranám nebo index fragmentace terénu v kombinaci s vhodnou velikostí filtrovacího okna.

2.1 Tvary terénu



Obr.14: Ovlivnění odtoku a tranzitní, akumulární a rozptylové zóny v závislosti na zakřivení terénu.

2.2 Odtok

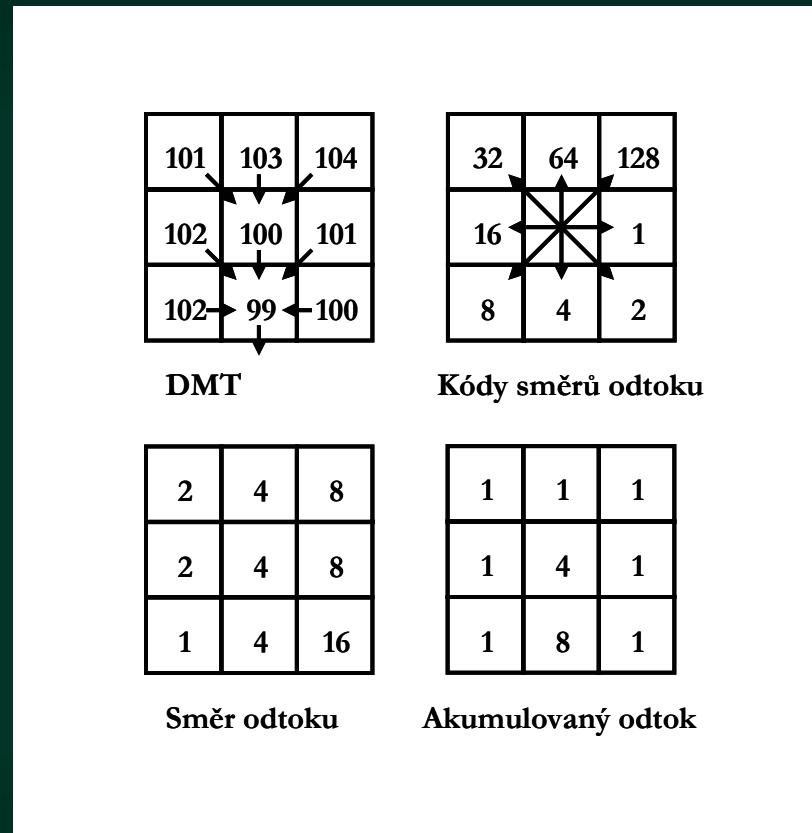
Výpočet kvalitativních (směr) a kvantitativních (množství) charakteristik odtoku patří k základním hydrologickým charakteristikám zjišťovaným z DMT.

Algoritmy, které jsou pro tento účel k dispozici, mohou mít dvě základní varianty, neboť předpokládají 4 (stranová souvislost pixelů) nebo 8 možností odtoku (stranová a diagonální souvislost pixelů). Současně dostupné systémy prakticky vždy uvažují 8 směrů odtoku a to zejména v souvislosti s orientací ke světovým stranám.

Směr pohybu se obvykle označuje číslicí. Většinou se začíná na nejhořejší pozici s postupem ve směru pohybu hodinových ručiček. V případě, že už žádná sousední buňka neobsahuje nižší hodnotu, představuje tato buňka propad (kanalizační prvek) a obdrží kód 0. Tyto kódy a začátek číslování se však v rámci jednotlivých algoritmů mohou lišit.

Odvodňovací síť lze stanovit, připojíme-li ke kódům směrů odtoku příslušné směrové šipky; nula na konci pole šipek pak představuje kanalizační prvek, sloužící k odvodnění území.

2.2 Odtok



Obr.15: Směr odtoku a akumulovaný odtok na základě DMT (Peucker and Douglas 1975).

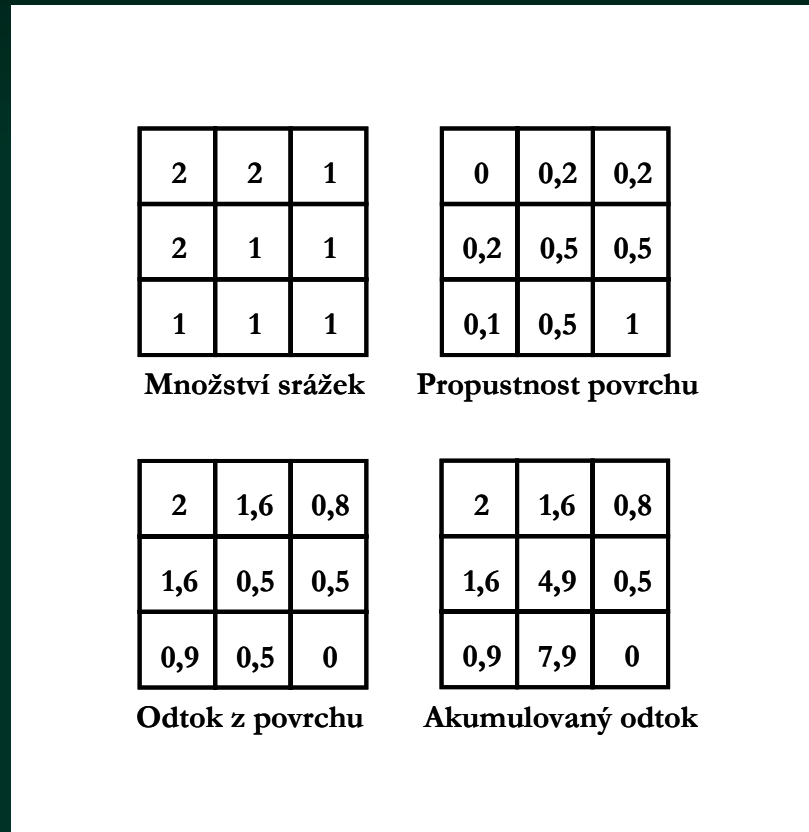
2.2 Odtok

Reálný ekosystém se však z hydrologického hlediska chová poněkud složitěji. Při přesnějším modelování tohoto procesu je tedy nutné uvažovat také množství dopadajících dešťových srážek a jejich vsakování do půdy, resp. propustnost podložních vrstev.

Tyto charakteristiky potom umožňují zpřesnit odhad reálné hodnoty akumulovaného odtoku z určitého území. Dalším parametrem může být i prahová hodnota, vymežující akumulaci fázi odtoku a po jejímž dosažení začíná vlastní odvodňovací etapa (případně stanovení množství vody, které bude již působit erozní škody).

DMT často obsahuje řadu stejných hodnot nebo hodnot, jejichž výška je lokálně vyšší než předcházející ve směru spádu; tzv. bezodtoké deprese (pits). V takových případech nemůže odtok pokračovat a proudit z jedné buňky do jiné nebo dochází k přerušení odtoku a chybnému stanovení akumulované odtokové charakteristiky. Problém se řeší tak, že tok vody pokračuje ve směru lokálního spádu, který se zjišťuje pomocí většího pracovního okna a lokální deprese se odstraňují specifickými algoritmy – zaplavené deprese se překonávají zvyšováním jejich hladiny, až se dosáhne buňky, která svou výškou odtok vody umožní (Sedgewick 1992).

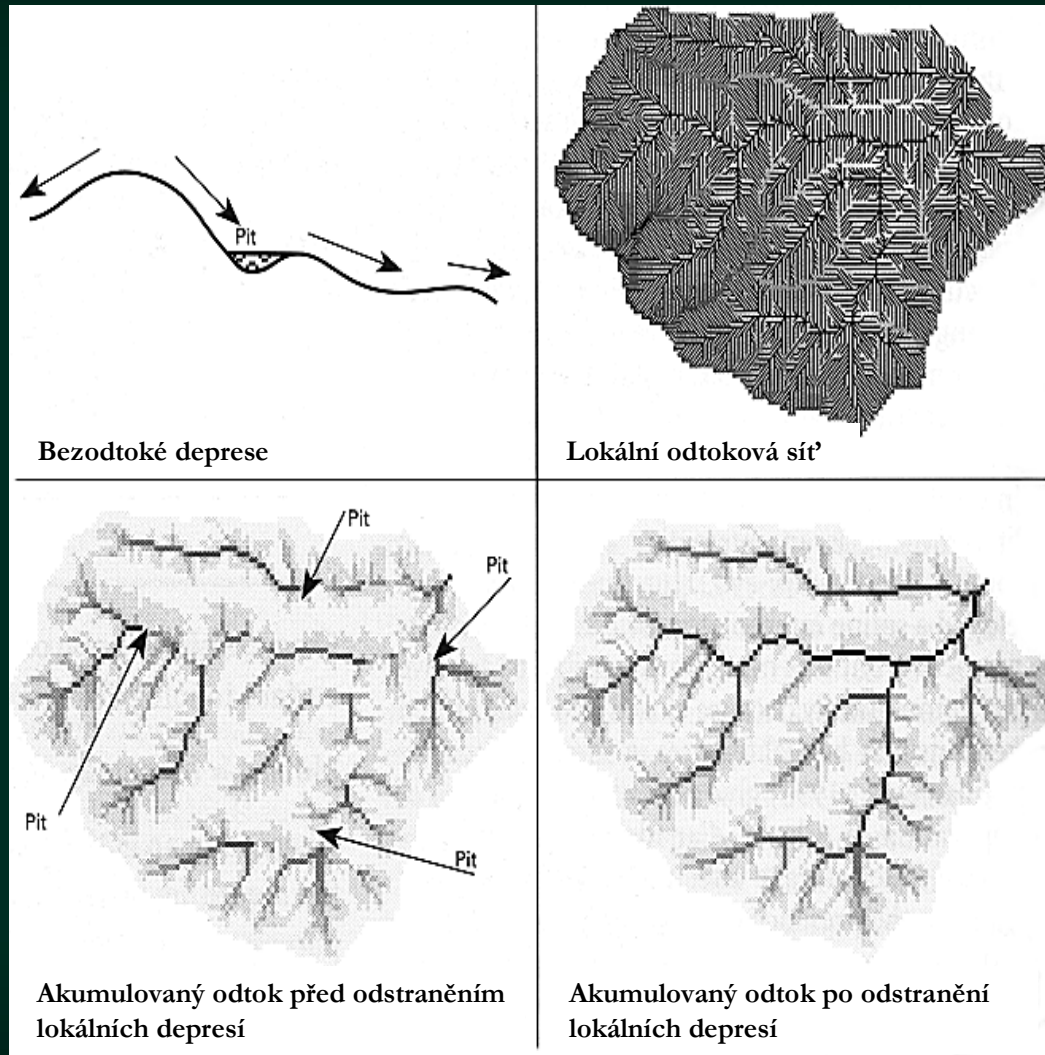
2.2 Odtok



Obr.16: Akumulovaný odtok na základě množství srážek S
a propustnosti povrchu P (Jenson and Domingue 1988)

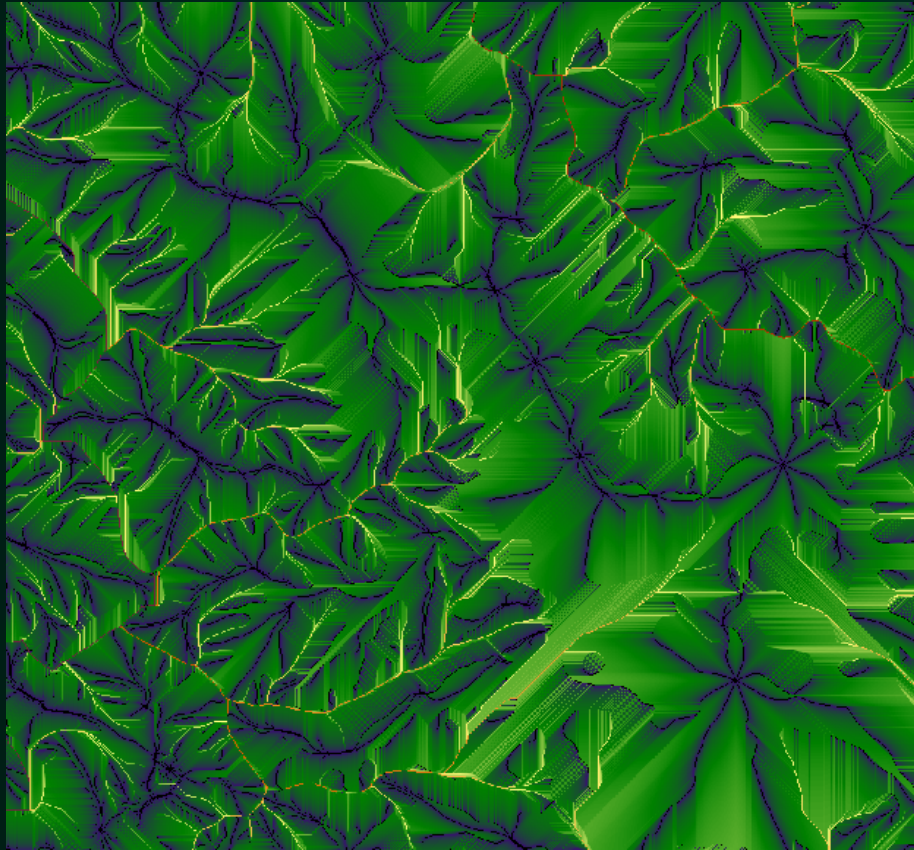
(odtok z povrchu O je definován vztahem $O = S*(1-P)$ a směr je dán z DMT v obr.15)

2.2 Odtok

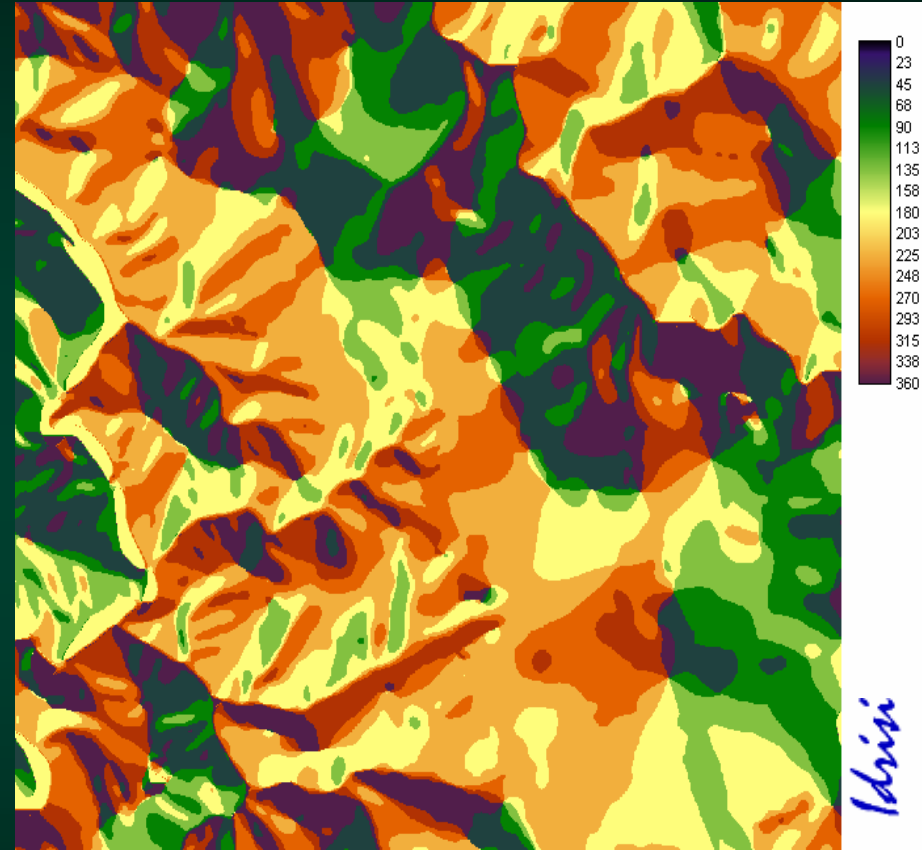


Obr.17: Problematika lokálních bezodtokých depresí (Burrough and McDonnell 1998)

2.2 Odtok



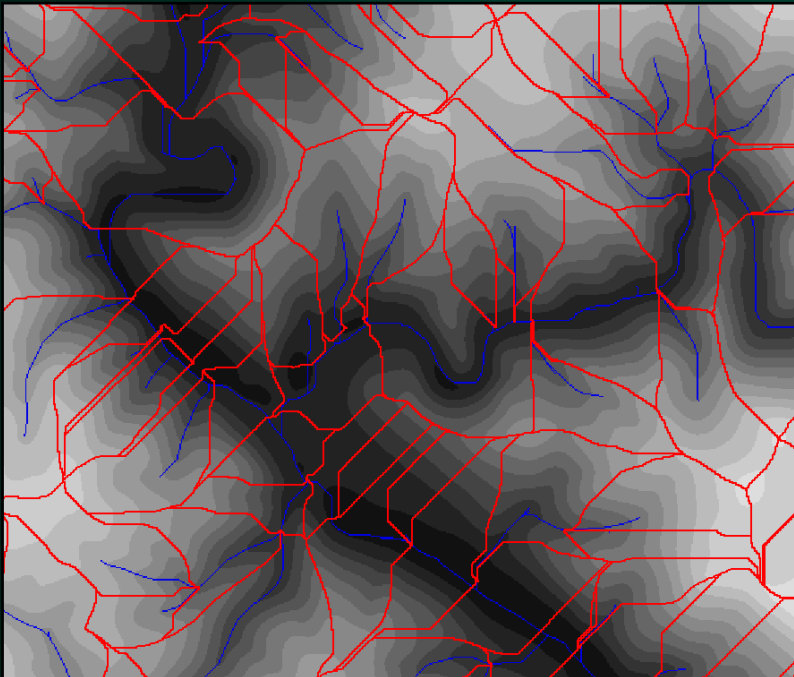
Obr.18: ŠLP Křtiny – akumulovaný odtok
[modul RUNOFF
resp. $\ln(\text{runoff}) + \text{PITREMOVAL}$]



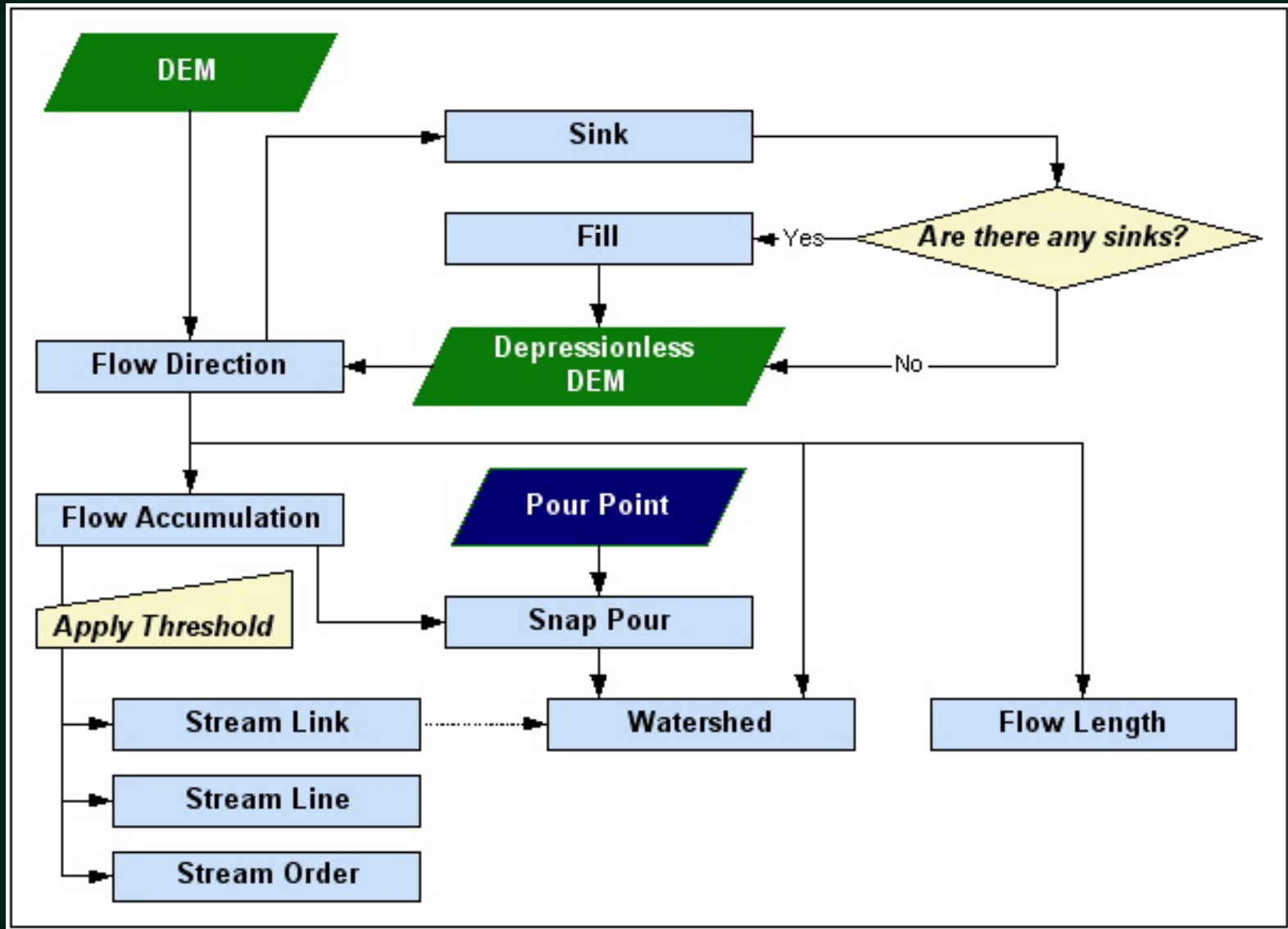
Obr.19: ŠLP Křtiny – směry povrchového
odtoku [modul FLOW + PITREMOVAL]

2.3 Povodí

Povodí je možno definovat jako atribut každého bodu DMT, který identifikuje území ležící v oblasti s přítokem do tohoto bodu. Hranice povodí lze zjistit pomocí různých algoritmů provázaných s odtokovými charakteristikami (směr odtoku a akumulovaný odtok). Tradičně tyto algoritmy pracují s odstraněním lokálních depresí a umožňují zjišťovat povodí na základě zadání jeho minimální výměry nebo zadáním uzavíracího profilu (Jenson and Domingue 1988). V rámci těchto povodí pak lze určovat další charakteristiky, jako jsou například souvislé délky svahů (vhodné pro využití k výpočtům v erozních modelech).



Obr.20: Hranice povodí (červeně) vylišené z DMT na základě jejich minimální výměry, vodní toky (modře)



Obr.21: Schéma hydrologických analýz

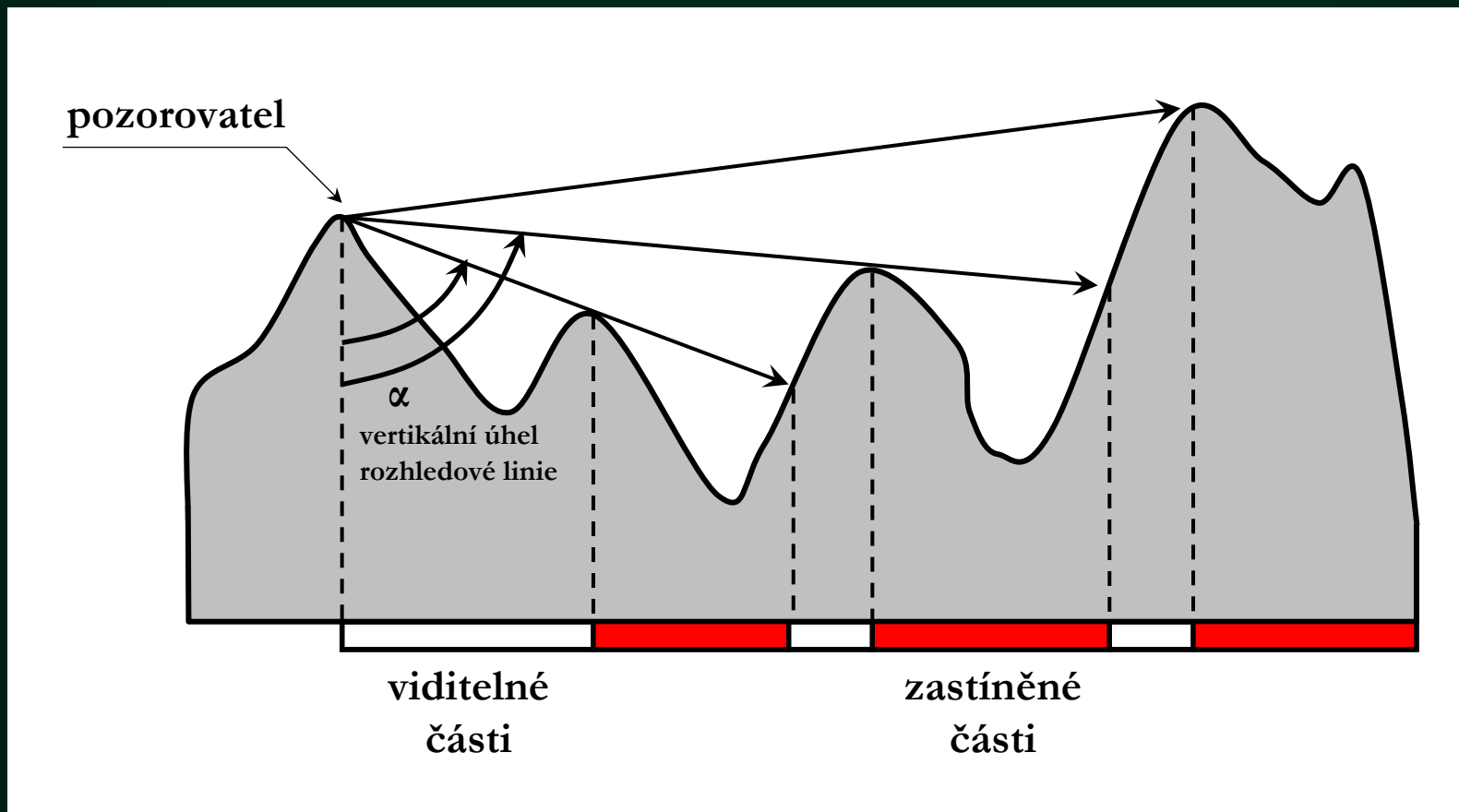
2.4 Viditelnost

Umožňuje zjistit plochy, které jsou ze stanovených míst viditelné (nebo je vidět nelze). Do této analýzy se kromě dat DMT někdy začleňují i další data, jako je výška stromů nebo budov, výška pozorovatele nad terénem, případně dohlednost či horizontální nebo vertikální úhly pohledu. Typem svého algoritmu se modelování viditelnosti řadí ke konektivním procedurám. Výsledkem je nejčastěji booleovský obraz, kde jsou identifikována viditelná místa ze zadaného bodu (hodnota 1) a místa, která viditelná nejsou (hodnota 0). V případě, že bodů rozhledu je více, je také možné hodnotit viditelnost proporcionalně – pixely výsledného obrazu nabývají hodnot 0 až 1 v závislosti na počtu bodů rozhledu a viditelnosti z těchto jednotlivých míst.

V mnoha GIS je dnes možno se pohybovat v rastru od buňky k buňce nebo v TIN modelu od trojúhelníka k trojúhelníku, a zjišťovat (i na 3D modelu), jak se mění viditelnost okolního terénu v závislosti na poloze výchozího bodu pozorování.

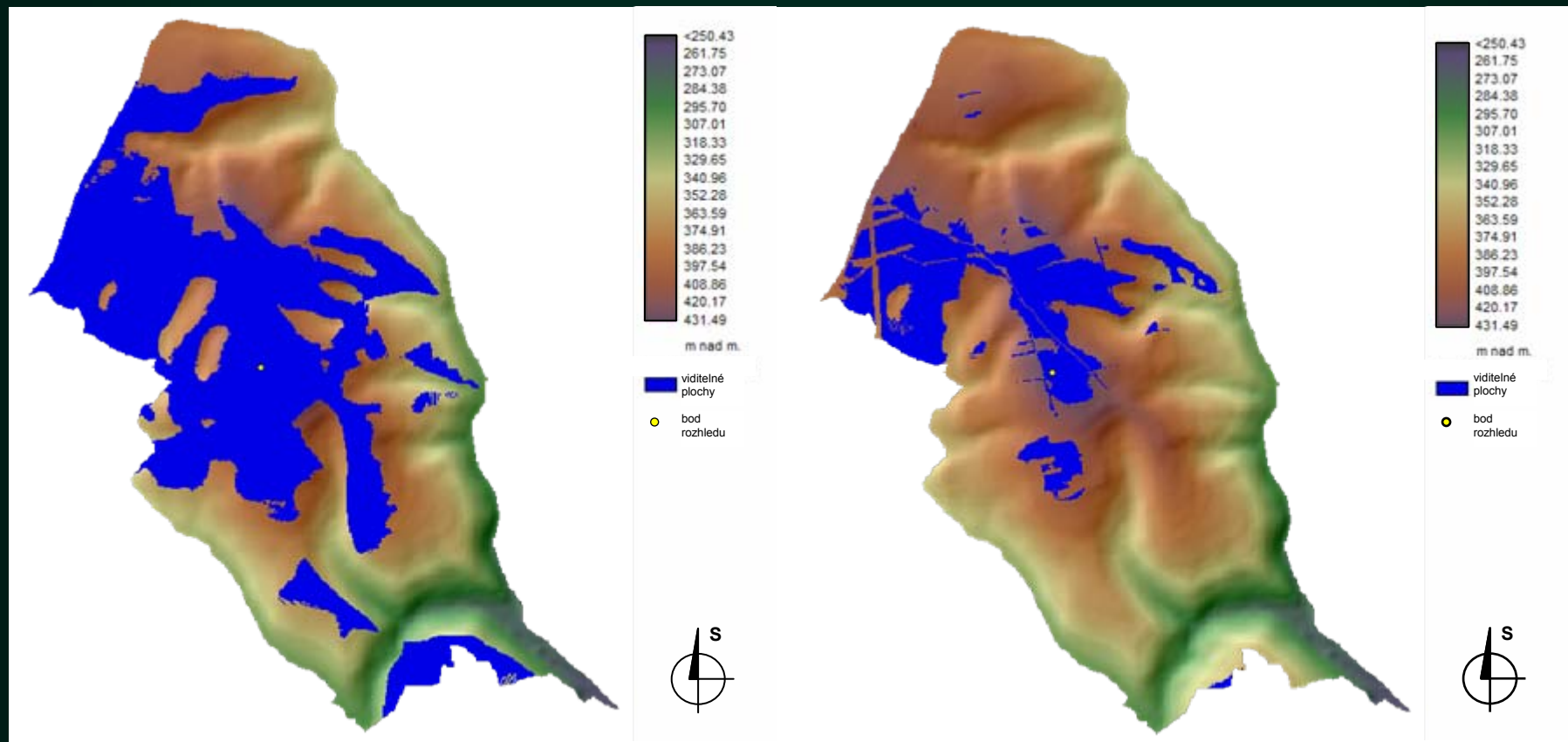
Určování viditelnosti je své podstatě i modelováním osvětlených a zastíněných částí terénu, jen s tím rozdílem, že pozorovací bod se nachází uvnitř modelu (je proto často využíváno k určení doby oslunění v závislosti na denní a roční době).

2.4 Viditelnost



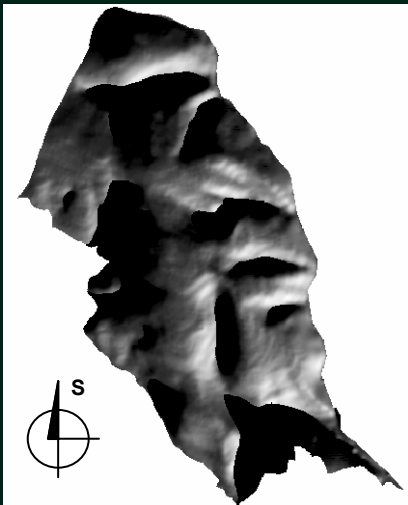
Obr.22: Zjednodušený princip určování viditelnosti v terénu

2.4 Viditelnost

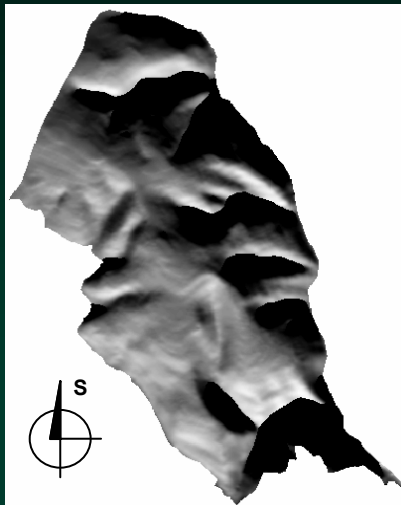


Obr.23: Určování viditelnosti (při výšce pozorovatele 25 m) pouze na základě DMT (vlevo) a viditelné plochy se zohledněním výšky porostů (vpravo)

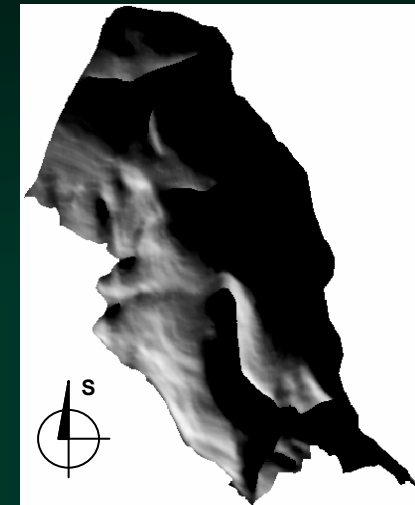
2.4 Viditelnost



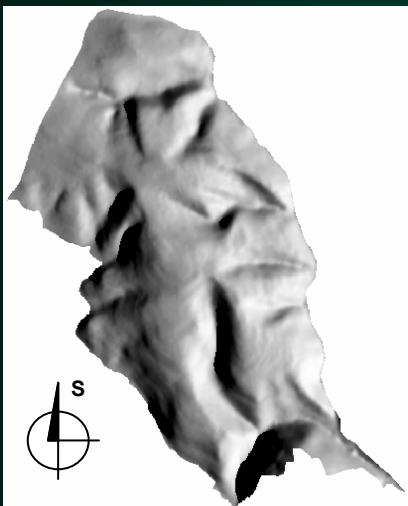
1.1.2005 09:00 (A=139°32', E=8°16')



1.1.2005 12:00 (A=180°40', E=18°16')



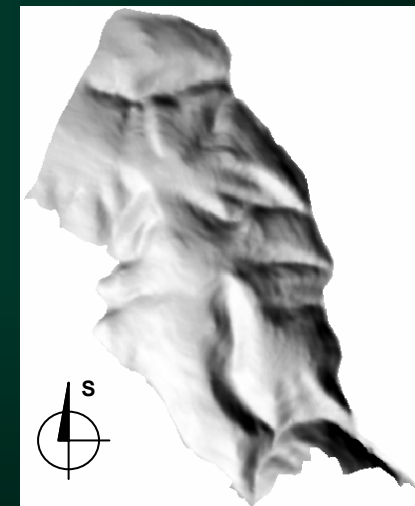
1.1.2005 15:00 (A=221°36', E=7°42')



1.8.2005 09:00 (A=100°55', E=33°21')



1.8.2005 12:00 (A=153°34', E=56°41')



1.8.2005 15:00 (A=228°24', E=50°41')

Obr. 24: Zastínění terénu v závislosti na denní a roční době

Použitá literatura

- Burrough, P.A.** *Principles of GIS for Land Resources Assessment*. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- Burrough, P.A., Mcdonnell, R.A.** *Principles of Geographical Information Systems*. USA, New York: Oxford University Press Inc., 1998. 333 p. ISBN 0-19-823366-3.
- Ebner, H., Reiß, P.** *Height interpolation by the method of finite elements*. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, 1978. p.79-94.
- Evans, I.S.** *General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics*. In: Chorley, R.J. (ed.) *Spatial Analysis and geomorphology*. London, 1972. p. 17-90.
- Evans, I.S.** *An integrated system of terrain analysis for slope mapping*. Zeitschrift für Geomorphologie, 1980. 36: 274-295.
- Halmer, A., Heitzinger, D., Kager, H.** *3D-Surface Modelling with Basic Topologic Elements*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI-B4, p. 407-412, Vienna, Austria, 1996.
- Heitzinger, D.** *3D – Oberflächenmodellierung mit topologischen Grundelementen*. 1996. Diploma thesis, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Herrington, L., Pellegrini, G.** *An Advanced Shape-Of-Country Classifier: Extraction of surface features from DEMs*. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000.
- Jenson, S., Domingue, J.** *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54:11, 1593-1600.
- Kraus, K.** *Photogrammetrie Band 3. Topographische Informationssysteme*. First edition. Köln, Germany: Dümmler Verlag, 2000.

Použitá literatura

- Krcho, J.** *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava, Slovenko: Veda, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1990, s. 261-274.
- Mayer, P.** *Počítačové modelování krajiny*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 1995. 110 s.
- Pellegrini, G.J.** *Terrain Shape Classification of Digital Elevation Models using Eigenvectors and Fourier Transforms*. UMI Dissertation Services, 1995.
- Peucker, T.K., Douglas, D.H.** *Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data*. Computer graphics and image processing, 1975, 4: 375-387.
- Pfeifer, N.** *3D terrain models on the basis of a triangulation*. Geowissenschaftliche Mitteilungen der TU Wien, Heft 65, 2002.
- Pfeifer, N., Pottmann, H.** *Surface models on the basis of a triangular mesh – surface reconstruction*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI, IWG III/IV, p.638-643, Vienna, Austria, 1996.
- Preparata, P., Shamos, M.** *Computational Geometry*. New York: Springer Verlag, 1990.
- Raper, J.F.** *Vývoj k prostorovým multimédiím. Digitální data v informačních systémech*. Vyškov: Antrim, 1993.
- Sedgewick, R.** *Algorithms in C++*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1992.
- Thurston, J.** *Looking Back and Ahead: The Triangulated Irregular Network (TIN)*. GEOinformatics, 2003, vol. 6, no. 7, p. 32-35. ISSN 1387-0858.
- Wild, E.** *Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen*. 1983. PhD thesis, Institute of Photogrammetry, University of Stuttgart.

Děkuji za pozornost.

klimanek@mendelu.cz
<http://mapserver.mendelu.cz>