

10 Počítačom podporované modelovanie lesa

„Všetko, čo si niekto dokáže predstaviť, môže niekto uskutočniť.“

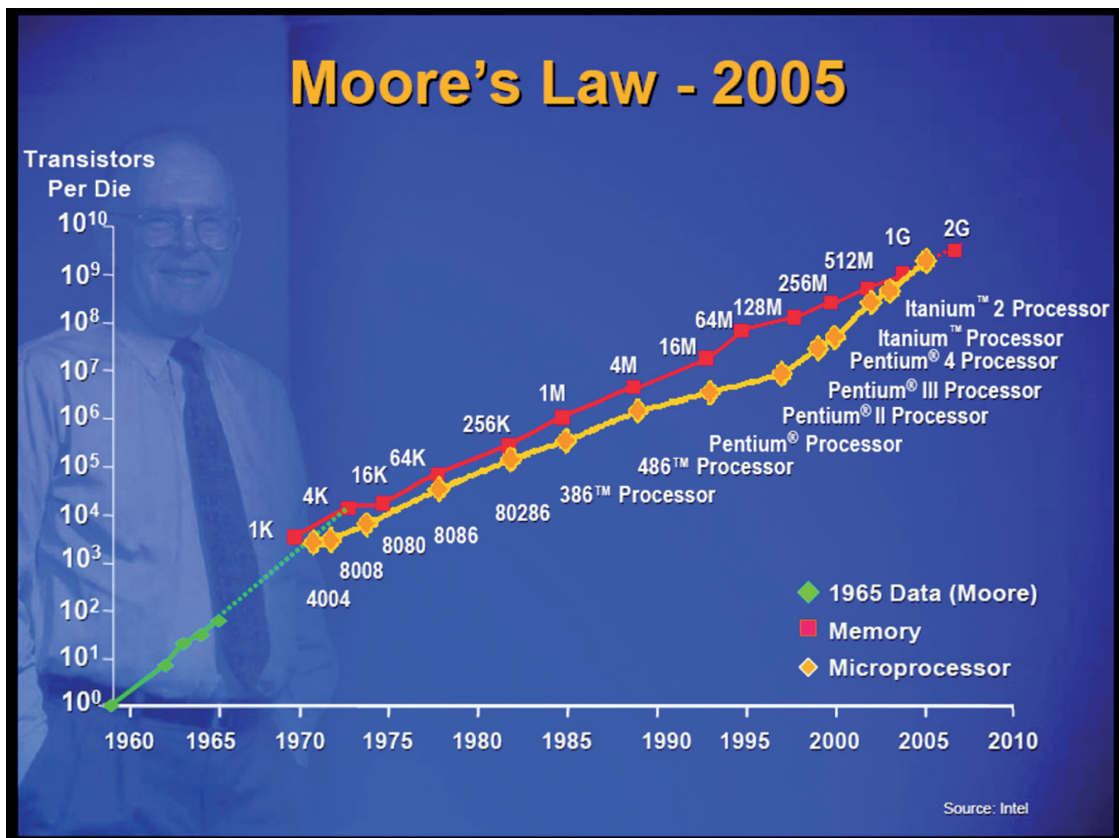
(J. Verne)

Kam smeruje modelovanie lesa?

Prenesme sa na chvíľu do budúcnosti a predstavme si, ako bude vyzerat' modelovanie lesa o päťdesiat rokov. Študent univerzity s lesníckym študijným odborom sa chystá na praktické cvičenie modelovania lesa. Stojí pred veľkoplošným dotykovým panelom, na ktorom sa zobrazuje trojrozmerná mapa lesného podniku. Dotýka sa ovládačov na spodnej časti panela a letecky sa presúva ponad terén pokrytý ortofotomapou na body vyznačené majákom. Vyberá si maják nad výskumnou plochou číslo sedem. Horná časť panela sa prepne na štyri štvorcové sektory, v ktorých sa objavia zábery zo sférických kamier. Postupne si natáča obraz z jednotlivých kamier a prezerá vybraný výskumnú plochu. Aktivuje terestriálne laserové skenovanie plochy. Malé laserové skenery, ktoré sú rozložené v pravidelnej horizontálnej aj vertikálnej priestorovej sieti 5 m x 5 m v rámci plochy lesa 50 m x 50 m sa spustia a začnú skenovanie výskumnej plochy. Okná webových kamier sa nahradia za veľké okno s trojrozmerným modelom porastovej plochy. Okrem skenovania biometrických parametrov stromov sa prevádza aj automatická identifikácia stromov pomocou analýzy morfologetrických znakov a kóry stromov. Využíva sa klasifikácia fotografického obrazu spojená s umelou inteligenciou. Po desiatich minútach má študent k dispozícii kompletný trojrozmerný model lesa. Vzápätí sa aktivujú merania terénnych klimatických staníc s automatizovaným záznamom údajov s prepojením na internet. Prevezmú sa merania z aktuálneho roka. Počítač sa spojí prostredníctvom webovej služby s globálnym klimatickým predpovedným modelom ALADIN. Študent zadáva na veľkoplošnom dotykovom paneli obdobie päťdesiat rokov. Vytvorí sa

časová séria budúcich klimatických údajov. Panel si vyžiada druh prebierkového zásahu a požadovaný cieľ výchovy lesa. Následne oznámi študentovi, že tréning sa môže začať. Študent sa presúva do virtuálnej jaskyne. Vchádza po schodíkoch do kocky s rozmerom 3 m x 3 m x 3 m. Na oči si nasadzuje 3D okuliare, na pravú ruku si umiestňuje dátovú rukavicu a do ľavej ruky uchopí bezdrôtového priestorového pilota. Prechádza sa po virtuálnom modeli lesa. Na všetky steny vôkol neho sa premieta priestorový model lesa, ktorý má vďaka 3D okuliarom reálny trojrozmerný vzhlad. Pomocou dátovej rukavice sa dotýka stromov. Vyberá cieľové a prebierkové jedince tak, aby prebierka splnila podľa jeho názoru požadovaný cieľ. Keď je s vyznačovaním stromov hotový, aktivuje rastový model SIBYLA, ktorý ho teleportuje do ďalšej periódy. Takto pokračuje až do ukončenia časovej série. O zobrazovanie virtuálneho lesa a výpočet rastových prognóz sa stará dvadsať výkonných viacjadrových počítačov zapojených do clusteru a do gridovej siete. Po skončení zhruba hodiny a pol práce sa študent presunie k veľkoplošnému panelu a počítač vyhodnotí prebierkový režim, konečné parametre lesa a požadovaný cieľ výchovy. Pomocou bázy znalostí a umelej inteligencie vyhodnotí skóre študenta.

Uvedený príbeh síce pochádza z fantázie, ale všetky technické a technologické prvky príbehu sú dnes už k dispozícii. Vyžadujú iba ich zdokonalenie, cenové sprístupnenie a vyriešenie niektorých metodologických otázok. Napríklad pri laserovom skenovaní ide o miniaturizáciu skenerov a ich integráciu s inými technológiami, vrátane zdokonalenia presnosti a jednoznačnosti identifikácie objektov a ich biometrických parametrov. Ak zoberieme do úvahy, aký je dnes rýchly pokrok v oblasti technológií a elektroniky, tak je ten-



Obr. 10.1 Moorov zákon je empirické pravidlo, že zložitost integrovaných obvodov sa zdvojnásobuje každých 24 mesiacov, pričom cena ostáva konštantná. Zákon sformuloval v roku 1965 GORDON E. MOORE, budúci spoluzakladateľ firmy Intel (obrázok je prevzatý z verejného zdroja firmy Intel).

to časový horizont dosť reálny. Napríklad, v roku 1997 som mal svoj prvý mobilný telefón. Bol veľký a ťažký, pokrytie signálom bolo len vo väčších mestách a mesačné platby boli dosť vysoké. Dnes po trinástich rokoch vlastním mobil s dotykovým displejom, ktorý obsahuje prehrávač hudby a filmov, GPS navigátor, fotoaparát, kameru, internetové pripojenie kdekoľvek na Slovensku a v Európe spolu s balíkom bežných kancelárskych programov a čo je najzaujímavejšie je telefón menší, ľahší a platby sú lacnejšie. Rozvoj technológie modelovania lesa je úzko spojený s rozvojom výpočtovej techniky. V roku 1965 sformuloval GORDON E. MOORE zákon (obrázok 10.1), ktorý hovorí, že zložitost integrovaných obvodov sa zdvojnásobuje každé dva roky, pričom cena ostáva konštantná. Doterajší rozvoj skutočne sleduje tento trend. Keď JULES VERNE napísal v roku 1865 svoj román *De la terre à la lune, trajet direct en 97 heures 20 minutes* (doslova „Zo zeme na mesiac, priama trasa

za 97 hodín a 20 minút“), svojou víziou predbehol vývoj o 104 rokov. Pri písaní diela vychádzal z dovedajších poznatkov vedeckej komunity, a tak sa jeho predpoveď na vtedajšiu dobu zdá až zarážajúco podobná realite. Dňa 21. júla 1969 o 2:56 UTC, šesť a pol hodiny po pristátí modulu Apollo 11, NEIL ARMSTRONG uskutočnil prvý zostup ľudskej nohy na povrch Mesiaca a predniesol pamätnú vetu: „Je to malý krok pre človeka, ale veľký skok pre ľudstvo“. Naše predstavy sú často ovplyvnené tým, čo už poznáme, a preto sú niektoré vízie často uskutočniteľné.

Čo sa dozvieme v tejto kapitole?

Doteraz sa používajú modely rastu lesa vo forme rastových tabuliek. Ide o tabuľky vývoja základných porastových veličín na základe malej množiny vstupných údajov. Sú väčšinou v podobe kompaktnej publikácie. Moderné modely sú však

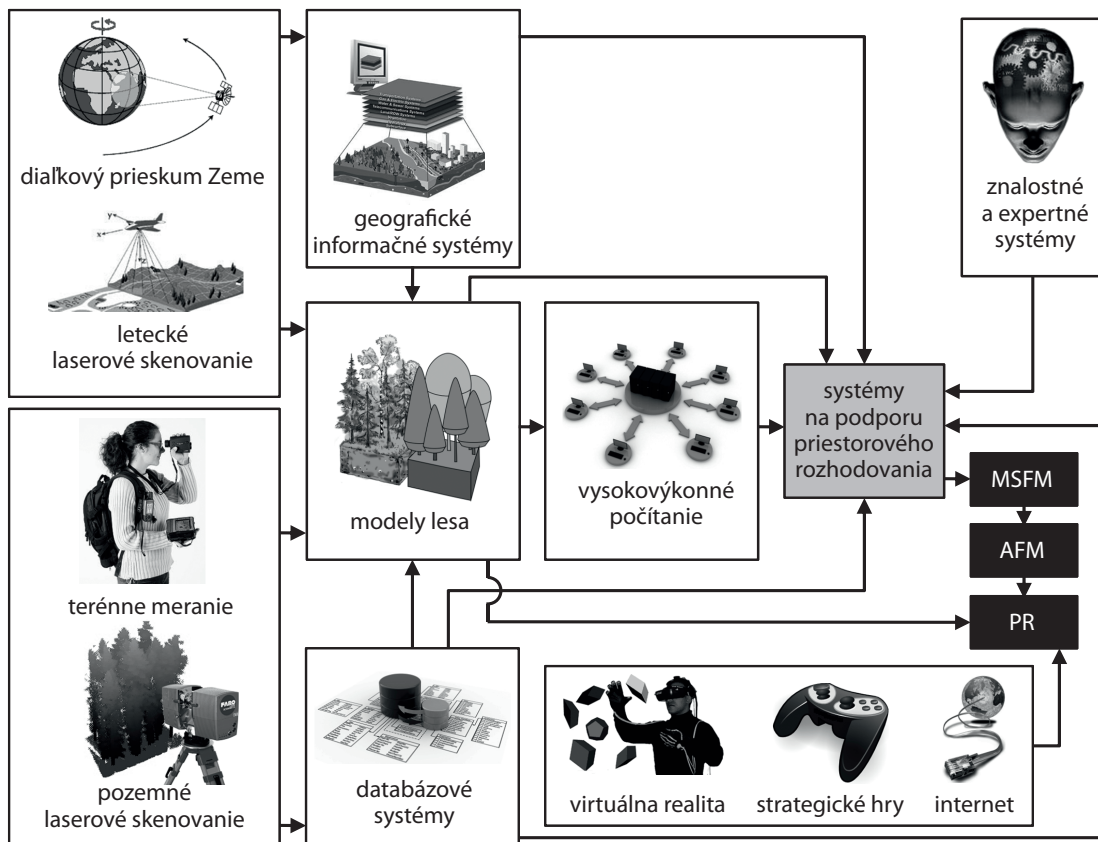
omnoho zložitejšie. Nielenže využívajú väčší rozsah vstupných údajov, ale ide o flexibilnejší súbor vzájomne prepojených zložitých algoritmov, ktoré súčasne produkujú aj veľký rozsah výstupných údajov. Pokiaľ v rastových tabuľkách bolo množstvo variantov vývoja lesa obmedzené, v moderných simulátoroch je počet variantov veľmi veľký, v niektorých prípadoch takmer neobmedzený. Preto v súčasnosti neexistuje simulátor lesného ekosystému, ktorý by nebol realizovaný pomocou výpočtovej techniky. Vývoj rastových modelov je dnes úzko spätý s vývojom softvérových produktov. V posledných rokoch sa v tejto oblasti udomácňuje pojem **počítačom podporované modelovanie lesa**. Skratka je CAFM z anglických slov *Computer Aided Forest Modelling*. Pojem nie je v odbornej literatúre ešte ustálený. Jeho definíciu by sme mohli uviesť nasledujúcim spôsobom:

Definícia 10.1

Počítačom podporované modelovanie lesa je oblasť vedeckej a praktickej činnosti, ktorá sa zaoberá modelovaním lesa pomocou výpočtovej techniky. Jej cieľom je vývoj softvérových produktov slúžiacich na modelovanie lesa ako aj ich praktické použitie a aplikácia vrátane integrovania do komplexnejších informačných systémov. Zaoberá sa zisťovaním stavu lesa, prognózou jeho vývoja a jeho vizualizáciou pomocou počítačov. Služi ako prostriedok pre optimalizáciu, rozhodovanie a odvodzovanie nových súvislostí.

Na obrázku 10.2 sme sa pokúsili znázorniť jednotlivé súčasti počítačom podporovaného modelovania lesa. Na jeho začiatku sú progresívne metódy získavania údajov o lese spojené s využitím **informačno-komunikačných technológií** (IKT). Ide o metódy diaľkového prieskumu Zeme (DPZ), letecké laserové skenovanie, terénne meranie a pozemné laserové skenovanie. Údaje, ktoré sa elektronicky zbierajú, sa ukladajú do **geografických informačných systémov** (GIS) alebo **databázových systémov** (DBS). Takisto sa dajú použiť na priamu konštrukciu, parametrizáciu alebo kalibráciu modelov lesa. Geografické informačné systémy a databázové systémy slúžia ako zdroj údajov pre generovanie východiskovej situácie modelov lesa. Určujú hrúbkovú, výškovú a priestorovú štruktúru lesných porastov vráta-

ne ich geomorfologických a geografických atribútov spolu s klimatickými vplyvmi a vlastnosťami stanovišta. V rámci CAFM sa využívajú aj **znalostné a expertné systémy**. Sústreďujú sa na hľadanie riešení komplexných a zložitých problémov, pričom využívajú znalosti a riešiacie postupy, ktorými disponuje človek. Často využívajú aj prvky umelej inteligencie (angl. AI – *Artificial Intelligence*). Spoločným využitím databázových systémov, geografických informačných systémov, znalostných a expertných systémov a modelov lesa vznikajú **systémy na podporu priestorového rozhodovania** (angl. SDSS – *Spatial Decision Support System*). Vzhľadom na detailnosť, komplexnosť a zložitnosť vstupov, algoritmov a výstupov spolu s množstvom možných variantov, scenárov a prognóz sa modelovanie lesa rieši pomocou **vysokovýkonných počítačových technológií** ako sú metódy cluster computing, grid computing, cloud computing alebo super computing. Tieto prístupy umožňujú mnohonásobne skrátiť čas na produkciu prognóz. Tým, že systémy na podporu priestorového rozhodovania produkujú viacero možností vývoja lesa, snažia sa o ich optimalizáciu a poskytujú strategické informácie pre rozhodovanie a riadenie, sú základom pre funkčne integrované trvalé obhospodarovanie lesa (angl. MSFM – *Multipurpose Sustainable Forest Management*). Takéto obhospodarovanie je základom adaptívneho manažmentu lesa (angl. AFM – *Adaptive Forest Management*), ktoré sa flexibilne prispôbuje konkrétnym podmienkam prostredia a požiadavkám vlastníkov a obhospodarovateľov lesa. Výsledky adaptívneho manažmentu lesa a modelov lesa v spojení s metódami **virtuálnej reality, strategickými hrami a internetom**, sú veľmi efektívnym nástrojom pre styk s verejnosťou (angl. PR – *Public Relation*). Spomínané súčasti a postupy počítačom podporovaného modelovania lesa tvoria základ pre takzvané **precízne lesníctvo** (angl. *Precision Forestry*). Ide o pojem, ktorý sa v lesníctve adaptoval z poľnohospodárstva (pozri ROBERT et al. 1995, RASHER 2001, ZHENG et al. 2009). Definíciu precízneho lesníctva možno nájsť vo viacerých prácach (BARE 2003, SOOD 2005, FOX et al. 2006, TAYLOR et al. 2002 a 2006, WARKOTSCH 2006, ZHENG et al. 2009, TUČEK a KOREŇ 2010). Zjednodušene však možno povedať, že sa sústreďuje na podrobný detail zisťovania stavu lesa (napríklad strom ale-



Obr. 10.2 Počítačom podporované modelovanie lesa (CAFM) s jeho súčasťami. Je založené na využití informačno-komunikačných technológií (IKT). CAFM je základom precízneho lesníctva, ktoré sa sústreďuje na vysokú rozlišovaciu úroveň (podrobný detail), využitie modelov a znalostí spolu s modernými IKT. Precízne lesníctvo smeruje k funkčne integrovanému trvalému obhospodarovaniu lesa (MSFM), ktoré umožňuje adaptívny manažment lesa (AFM). Takisto sa IKT a výsledky AFM využívajú aj na efektívny styk s verejnosťou (PR).

bo jeho orgán) s určením veľkého počtu zisťovaných parametrov. Zisťované údaje sa využívajú pre flexibilné modelovanie, ktoré zohľadňuje zvažovanú stanovištnú, hospodársku, technologickú, ekonomickú a sociálnu situáciu. Smeruje k optimalizácii obhospodarovania lesa a k podpore rozhodovania pre adaptívny manažment lesa. Typickou vlastnosťou precízneho lesníctva je využitie sofistikovaných informačno-komunikačných technológií a vedeckých metód a postupov.

V tejto kapitole sa sústreďujeme na niekoľko základných oblastí, ktoré sa presadzujú v modelovaní lesa alebo sú s ním úzko späté. Budeme sa zaoberať modernými informačno-komunikačnými technológiami zberu údajov pre konštrukciu a naplnenie vstupných údajov modelov lesa. V rámci databázovej technológie sa

budeme zaoberať relačným dátovým modelom lesa. Poukážeme aj na objektový funkčný model lesa, ktorý súvisí s programovaním modelov. Dozvieme sa o možnostiach využitia znalostí v súvislosti so znalostnými a expertnými systémami v modelovaní lesa. Naznačíme, akým spôsobom dokážeme odvodiť nové súvislosti z produkovaných výstupov simulácií na základe dobývania údajov z dátových skladov. Technológiu GIS v modelovaní lesa prezentujeme na príklade geografických analýz. Poskytneme prehľad techník programovania modelov lesa a budeme sa zaoberať aj skrátením strojového času pomocou metód vysokovýkonného počítania. Napokon predstavíme niektoré pokročilé techniky vizualizácie lesa. Vzhľadom na rozsah publikácie sa budeme danými problémami zaoberať len v základných rysoch a princípoch.

10.1 Progresívne metódy získavania údajov o lese

Pokiaľ v starších rastových modeloch, napríklad rastových tabuľkách, bolo potrebné na odvedenie zásoby porastu a predikciu jej vývoja poznať iba druh dreviny, jej percentuálne zastúpenie a strednú výšku, výmeru, vek a zakmenenie porastu, v moderných rastových simulátoroch je počet vstupných údajov omnoho väčší. Napríklad v empirických stromových modeloch závislých na pozíciách stromov je potrebné poznať parametre všetkých stromov na ploche: hrúbky, výšky, parametre korún, súradnice, kvalitu a stav. Údaje sa dajú zväčša odvodiť aj na základe generátorov, ale ich použitím sa znižuje presnosť prognóz. V tejto kapitole sa zameriame na progresívne metódy získavania údajov o lese. Tie dokážu racionalizovať a automatizovať niektoré z nákladných klasických terénnych meraní. Sústredíme sa na najčastejšie využívané progresívne technológie zberu údajov pre modelovanie lesa. Ide o počítačom podporovaný terénny zber údajov, pozemné laserové skenovanie a metódy diaľkového prieskumu Zeme.

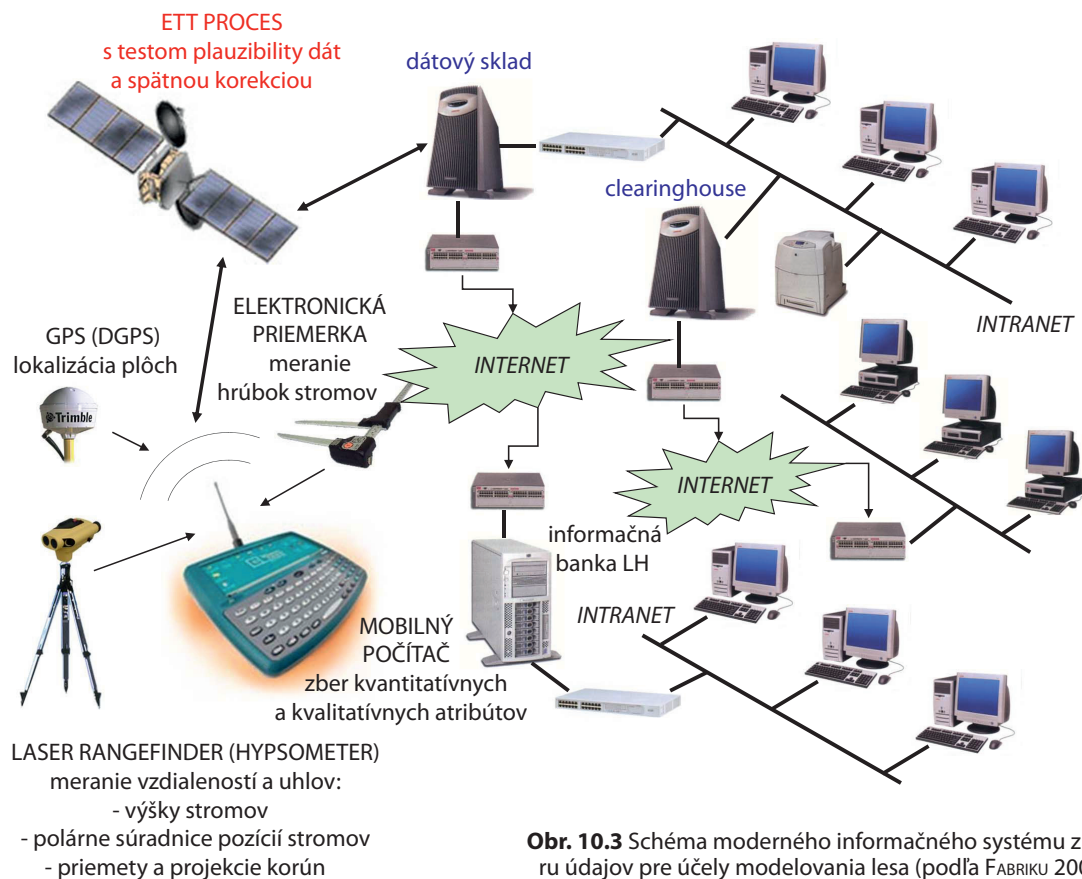
10.1.1 Počítačom podporovaný terénny zber údajov

Počítačom podporovaný terénny zber údajov pre modelovanie lesa môže byť realizovaný poloautomatizovaným alebo plne automatizovaným spôsobom. **Poloautomatizovaný** spôsob využíva klasické meracie pomôcky (pozri kapitolu 3.3.1), ale údaje sa priamo v teréne zaznamenávajú do elektronickej podoby pomocou formulárov v mobilných počítačoch. Systémy redukujú chyby, pretože editovanie údajov „v kancelárii“ odpadáva. Údaje je možné priamo automatizovane spracovať. Tieto systémy však aj naďalej obsahujú zdroje chýb pri optickom odčítavaní na mierkach meracích zariadení a pri vyplňaní elektronickej zápisníkov. Systémy zároveň vyžadujú dokonalejšiu prípravu elektronickej zápisníkov ešte pred samotným terénnym zberom údajov. **Plne automatizovaný** spôsob využíva elektronicke meracie zariadenia (elektronicke priemerky, výškomery a diaľkomery) a mobilné počítače. Systémy môžu pra-

covať buď off-line alebo on-line. Pri **off-line** systémoch sa merané hodnoty zaznamenávajú iba v registračných meracích zariadeniach, napríklad hrúbky stromov v elektronickej registračnej priemerke, a tieto sa do databázy prenášajú (káblovo alebo bezkáblovo) až následne pri kancelárskych prácach. Pri **on-line** systémoch sa využíva priamy bezdrôtový prenos (napríklad pomocou infrared, bluetooth alebo WiFi komunikácie) z elektronickej meracej pomôcky do databázy terénneho počítača.

Zber údajov pre účely modelovania lesa je zväčša viazaný na určitý geografický priestor. Podľa toho rozoznávame zber údajov bez väzby, s nepriamou väzbou a priamou väzbou na geografický informačný systém (pozri kapitolu 10.6). Meranie **bez väzby na GIS** zbiera informácie iba vo forme databázových tabuliek bez akéhokoľvek ďalšieho prepojenia na geografické informačné vrstvy. Meranie **s nepriamou väzbou na GIS** zbiera informácie vo forme databázových tabuliek obsahujúcich identifikátor na geografické objekty, ktoré sa k informačnej vrstve pripoja neskôr. Meranie **s priamou väzbou na GIS** využíva moderné terénne programové balíky, tzv. „Field-GIS“ pre mobilné počítače. Systémy zbierajú GIS údaje priamo v teréne v prepojení na zariadenia globálneho navigačného satelitného systému, napr. GPS alebo na zariadenia merania polohy prostredníctvom uhlov a vzdialeností (elektronicke uhlomery, výškomery a diaľkomery).

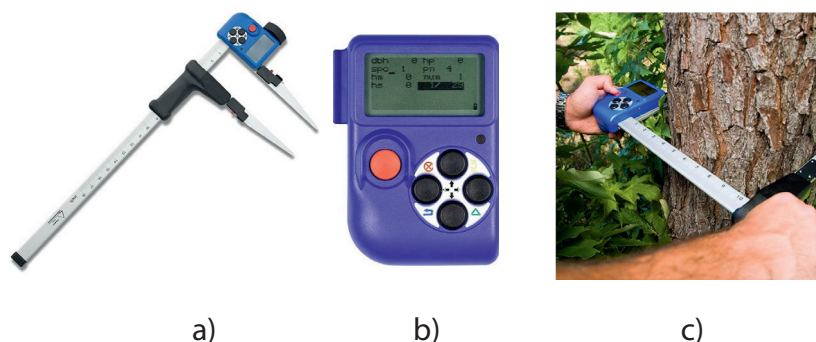
Z hľadiska technológie zberu údajov môžeme meranie rozdeliť na on-line a off-line. **On-line** meranie obsahuje priamu spätnú väzbu. Zbierané údaje sa posielajú priamo na centrálny dátový server, kde sa otestuje ich vierohodnosť (plauzibilita). Nevierohodné údaje je potom možné priamo v teréne opraviť a znovu poslať na dátový server. Na vzdialený prístup k dátovému serveru sa používa najčastejšie internetové prepojenie cez satelit alebo sa využívajú internetové služby prevádzkovateľov mobilných GSM sietí. **Off-line** meranie nemá priamu spätnú väzbu. Je výrazne lacnejšie, ale následná oprava nevierohodných údajov zozbieraných v teréne je buď veľmi drahá (nákladný návrat do terénu), alebo je nemožná (terénne podmienky už nie je možné zopakovať). Podľa druhu komunikácie medzi elektronickými a registračnými zariadeniami možno rozdeliť systémy na **bezdrôtové** (angl. *wireless*) a **drôtové** (angl. *wired*).



Obr. 10.3 Schéma moderného informačného systému zberu údajov pre účely modelovania lesa (podľa FABRIKU 2002).

Na obrázku 10.3 je znázornená schéma ideálneho sofistikovaného systému zberu údajov pre modelovanie lesa (FABRIKA 2002). Systém predstavuje on-line wireless verziu s priamou väzbou na geografický informačný systém s plne automatizovaným on-line zberom údajov. Na zber údajov je použitý moderný terénny počítač s bezdrôtovou komunikáciou vybavený nejakou verziou terénneho softvéru na zber geografických údajov – **Field-GIS**. Mobilný počítač komunikuje s inými zariadeniami pre terénne meranie bezdrôtovým spojením. V systéme je použitá elektronická registračná priemerka s bezdrôtovým prenosom meraných hrúbok stromov, ďalej mapovací GPS systém na lokalizáciu simulačných plôch a laserový diaľkomer pre elektronické meranie vzdialeností, uhlov a azimutu (napríklad meranie výšok stromov, polárnych súradníc stromov, horizontálnych projekcií a vertikálnych profilov korún). Údaje sú okamžite po zbere odosielané na centrálny dátový server prostredníctvom satelitu alebo GSM siete.

Prebieha proces ETT (extrakcia, transformácia, transport). Z nameraných údajov sú vybrané údaje, ktoré tvoria bezprostrednú súčasť dátového skladu (angl. *data warehouse*, pozri kapitolu 10.5), napríklad hrúbka a výška konkrétneho stromu. Z niektorých údajov sú odvodené nové údaje, napríklad z polárnych súradníc stromov a pozície stredy plochy sú prepočítané geografické súradnice stromov. Extrahované a odvodené údaje sú podrobené na dátovom serveri testu vierohodnosti (plauzibility). Napríklad hrúbky a výšky stromov sú porovnané s hrúbkami a výškami z predchádzajúceho merania, alebo nameraná nadmorská výška je porovnaná s údajom z digitálneho modelu reliéfu, prípadne geografická súradnica stredy plochy je porovnaná s hranicami príslušného územia. Ak sú údaje označené za neverohodné (napríklad hrúbka a výška stromu poklesla, diferencia medzi nameranou nadmorskou výškou a výškou z digitálneho modelu reliéfu je významná alebo plocha je mimo hraníc požadovaného územia), tak



Obr. 10.4 Príklad elektronickej registračnej priemerky od švédskej firmy Haglöf: **a)** priemerka Digitech Professional, **b)** registračný počítač s displejom a bluetooth vysielateľom, **c)** meranie hrúbky stromu (obrázky prevzaté z webovej stránky distribútora).



Obr. 10.5 Príklad integrovaného prístroja dialkomer–výškomer–sklonomer–kompas s bluetooth vysielateľom TruePulse 360 od firmy Laser Technology Inc. (obrázok prevzatý z webovej stránky distribútora).

sú vrátené na mobilný počítač a je vyžadovaná ich on-line korekcia. Spolu so systémom testu plauzibility prebieha aj integrácia údajov a ich časové označenie. Po procese transformácie sú napokon údaje premiestnené do dátového skladu. Tento proces nazývame transport (niekedy aj loading). Pre účely vedenia **dátového skladu** je určený samostatný server. Na server sú pripojené X-terminály (resp. pracovné stanice), ktoré slúžia na lokálny prístup k dátovému skladu a na rôzne účely predspracovania údajov (angl. *data preprocessing*) pre odvodzovanie nových informačných vrstiev často potrebných napríklad pre konštrukciu modelov. Komunikácia funguje systémom klient-server v lokálnej sieti Intranet. Princípy spracovania údajov v dátovom sklade budú vysvetlené v kapitole 10.5. Server dátového skladu je zároveň prepojený prostredníctvom siete internet aj na ďalšie lesnícke databanky, napríklad informačnú banku lesného hospodár-

stva. Ďalším komponentom informačného systému môže byť **clearinghouse**. Je tu vyčlenený samostatný server slúžiaci pre účely publikovania údajov a definície pravidiel ich distribúcie podľa svetových (NSDI) a európskych (EGII) noriem. Systém využíva Internet a štandardizované metadáta (údaje o údajoch). Podrobnejšie informácie o clearinghousingu budú uvedené v kapitole 10.5.

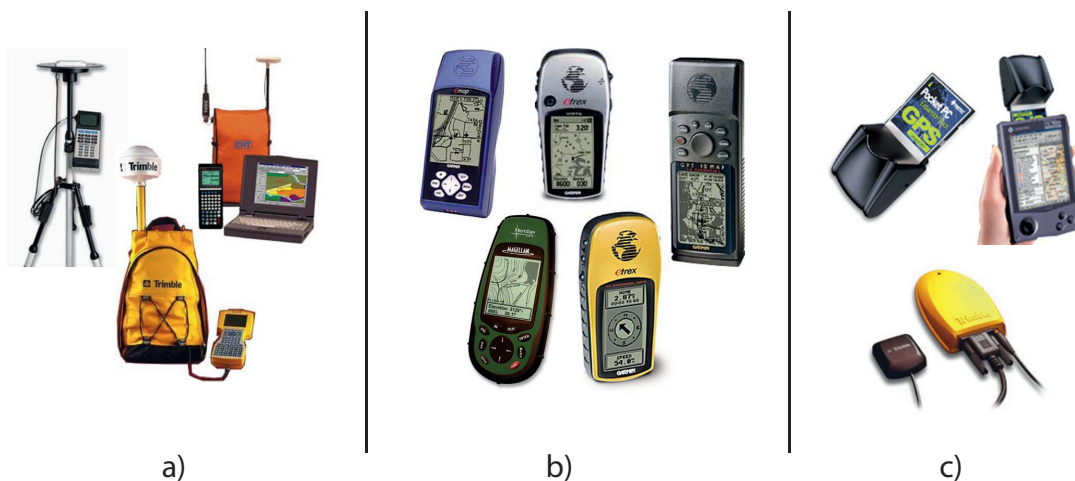
Pre automatizované meranie dendrometrických charakteristík stromov je možné v súčasnosti využiť rozsiahlu paletu meracích zariadení. Do úvahy prichádza predovšetkým meranie hrúbok a výšok stromov, meranie horizontálnych a šikmých vzdialeností a meranie azimutov. Pre meranie hrúbok stromov sú vhodné **elektronické registračné priemerky** (pozri príklad na obrázku 10.4). Priemerky obsahujú automatické registračné zariadenie, vnútornú pamäť pre registráciu meraných hrúbok, softvérové vybavenie pre zadávanie a registráciu ďalších atribútov (napríklad kvalita a poškodenie kmeňa, výška a biosociologické postavenie stromu) a malý displej pre komunikáciu s priemerkou. Priemerky umožňujú prenos nameraných údajov do počítačov pomocou štandardnej komunikácie (káblové pripojenie cez bežné komunikačné rozhrania alebo bezkáblová infrared, bluetooth či WiFi komunikácia). Niektoré priemerky umožňujú okrem prenosu dát až pri kancelárskom spracovaní (off-line), aj priame (on-line) vysielanie meranej hrúbky do mobilného počítača bezdrôtovým spojením. To umožňuje budovať databázu priamo v teréne. Na meranie výšok stromov je možné využiť elektronické výškomery. Ešte výhodnejšie sú však kombinované zariadenia, pre meranie uhlov a vzdialeností. Ide o **laserové dialkomery** (angl. *laser rangefinder* alebo *laser hypsometer*). Umožňujú merať horizontálne a šikmé vzdialenosti a teda



Obr. 10.6 Príklady terénnych počítačov pre zber údajov v modelovaní lesa: **a)** vreckové počítače, **b)** plnohodnotné tablety (obrázky sú prevzaté z webových stránok výrobcov a distribútorov).

merať výšky stromov, výšky nasadenia korún, vertikálne projekcie korún a ich horizontálne priemety. Komunikácia s mobilným počítačom

je pri týchto prístrojoch zväčša samozrejmosťou. Na trhu sú hojne zastúpené (pozri príklady na obrázku 6.1 v kapitole 6.1.1). Na meranie



Obr. 10.7 Zariadenia na určovanie polohy merača v prepojení na terénny počítač: **a)** mapovacie GIS systémy, **b)** vreckové navigácie, **c)** adaptéry k terénnym počítačom (obrázky sú prevzaté z webových stránok výrobcov a distribútorov).



Obr. 10.8 Minimálna zostava na automatizovaný zber údajov pre modelovanie lesa pozostáva z terénneho mobilného počítača, navigačného prístroja a laserového diaľkomera (obrázok prevzatý z *Wikimedia Commons*).

pozícií stromov pomocou polárnych súradníc je okrem vzdialenosti potrebné aj meranie azimutu. **Elektronické kompas (buzoly)** sú na trhu rovnako bohato zastúpené (pozri príklad na obrázku 6.2 v kapitole 6.1.1). Tieto prístroje majú jemnú azimutálnu citlivosť a komunikujú s mobilnými počítačmi. Niektoré z nich sú dokonca priamo integrované s diaľkomermi. Vhodným príkladom je prístroj TruePulse 360 (obrázok 10.5). Súčasťou prístrojov sú aj trojnohé statívy s možnosťou vodorovnej fixácie meraní.

Nevyhnutnou súčasťou plnoautomatizovanej výbavy sú **terénne mobilné počítače**. Keďže pracujú v náročných podmienkach, musia byť odolné voči teplote, vode a otrasom. Preto sa uprednostňujú robustné riešenia (angl. *rugged computers*). V súčasnosti sú najvhodnejšie vreckové počítače (angl. *handheld*) alebo plnohodnotné tablety (angl. *tablet PC*). Uprednostňujú sa riešenia, ktoré obsahujú bezdrôtovú komunikáciu typu infrared, bluetooth alebo WiFi

a takisto riešenia, ktoré obsahujú SIM kartu pre GSM sieť, ktorá zaisťuje možnosť diaľkového prenosu údajov. Na obrázku 10.6 sme znázornili niektoré typy oboch skupín počítačov od firm Husky, Latschbacher (TimbaTec), Trimble, Psion a Armor. Na zaznamenanie polohy merača sa používajú zariadenia niektorého z globálnych navigačných satelitných systémov – GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou). V európskych podmienkach sa najčastejšie využívajú zariadenia amerického systému GPS, ktoré v budúcnosti pravdepodobne nahradí európsky systém Galileo. Vzhľadom na sťažené podmienky v porastovom zápoji sa využívajú menej presné systémy než sú geodetické. Ide o mapovacie GIS systémy, vreckové navigácie alebo adaptéry k terénnym počítačom (obrázok 10.7). **Navigačné prístroje** sa používajú skôr na zaznamenanie polohy vo voľnom teréne mimo porastu. Z tejto polohy sa potom merači navigujú do porastu na základe buzolových meraní pomocou smerov a vzdialeností (takzvané buzolové ťahy).

V súčasnosti existuje viacero súprav určených na terénny zber údajov pre účely inventarizácie lesa. Súpravy sú rovnako vhodné aj pre účely modelovania lesa. V kapitole 6.3 na obrázku 6.1.1 sme uviedli najpoužívanejší variant od firmy IFER s názvom Field-Map (ČERNÝ a BUKŠA 2005), ktorý je zavedený aj do inventarizácie lesov na Slovensku a v Českej republike (ŠMELKO et al. 2006, ÚHÚL ČR 2003). Ako minimálna súprava vhodná pre meranie je kombinácia mobilného počítača (napríklad tabletu) s laserovým diaľkomerom (napríklad TruePulse 360) a vreckového navigačného prístroja. Príklad súpravy uvádzame na obrázku 10.8. Výhoda integrovaných súprav spočíva v dodávanom programovom vybavení. Softvér umožňuje pripraviť potrebný projekt terénneho merania. Zadávajú sa informačné geografické vrstvy, typy meraných plôch, údajové vrstvy a merané atribúty údajových vrstiev. V prepojení na Field-GIS softvér používaný priamo v teréne sa merané údaje zaznamenávajú do databázy spolu s ich vyobrazením na obrazovke terénneho počítača. Výsledkom zberu nie je len digitálna geografická databáza ale aj okamžitá vizuálna kontrola zbieraných údajov. Na obrázku 10.9 uvádzame príklad meranej výskumnej plochy pomocou súpravy Field-Map spolu s jej vyobrazením pomocou programu SVS. Príklad je prevzatý z výskumu VLADOVIČA et al. (2008).



Legenda

Merané plochy

Dreviny

Crataegus calciphila	LP Tilia species
Crataegus calycina	LPM Tilia cordata
Crataegus macrocarpa	LPV Tilia platyphyllos
AG Robinia pseudoacacia	MK Sorbus aria
BETPEN Betula pendula	OS Populus tremula
BK Fagus sylvatica	OV Juglans regia
BO sp. Pinus species	PIRUS Pyrus communis
BOR Pinus sylvestris	PRUN Prunus spinosa
BRK Sorbus torminalis	RAK Salix caprea
BRZ Betula species	ROS sp. Rosa species
BST Ulmus species	ROSA Rosa canina agg.
BTH Ulmus glabra	RUBCAES Rubus caesius
COLUT Colutea arborescens	SAMB sp. Sambucus species
CORYL Corylus avellana	SAMBNIG Sambucus nigra
CR Quercus cerris	SAMBRAC Sambucus racemosa
CRATMON Crataegus monogyna	SM Picea abies
CRATOX Crataegus laevigata	SMC Larix decidua
CRATOX Crataegus oxyacantha	SWID Cornus sanguinea
CRATSP Crataegus species	VIB sp. Viburnum species
CRS Cerasus avium	VIBOPUL Viburnum opulus
DAPHNE Daphne mezereum	VR Salix species
DB Quercus species	
DBL Quercus robur	
DBZ Quercus petraea	
DR Cornus mas	
FRANGUL Frangula alnus	
HB Carpinus betulus	
HR Pyrus pyraister	
JD Abies alba	
JLL Alnus glutinosa	
JRB Sorbus aucuparia	
JS Fraxinus excelsior	
JV sp. Acer species	
JVH Acer pseudoplatanus	
JVM Acer platanoides	
JVP Acer campestre	
KOS Pinus mugo	
LIGUST Ligustrum vulgare	
LMB Pinus cembra	
LON sp. Lonicera species	
LONIG Lonicera nigra	

- peň
- kmeň
- ležanina
- meraná plocha

Obr. 10.9 Výsledok merania plochy pomocou súpravy Field-Map (ČERNÝ a BUKŠA 2005) spolu s vyobrazením plochy pomocou programu SVS (McGAUGHEY 2003). Prevzaté z výskumu VLADOVIČA et al. (2008).

10.1.2 Pozemné laserové skenovanie

Stromy dosahujú v niektorých listnatých a zmiešaných lesoch Európy výšku aj nad 50 m, čo je zhruba 25-násobne viac ako výška, ktorú dosahuje človek. Preto sa stromy ťažko merajú. Pozemná technológia laserového skenovania, ktorá zachytáva trojrozmernú štruktúru lesa má potenciál na preklopenie výškovej diferencie medzi človekom a stromom. Zabezpečuje dosiahnutie informácie efektívnejším spôsobom (hrúbka kmeňa, výška stromu) ako pri klasických postupoch a zároveň zaisťuje kompletne novú informáciu (distribúcia listovej plochy, morfológia kmeňa a vetiev, tvar koruny). Ide o aktívnu technológiu diaľkového prieskumu Zeme. Tenký laserový lúč sa vysiela oproti meranému cieľu a zbiera sa vrátený signál. Používajú sa tri rozdielne metódy na meranie dĺžky lúča: triangulácia, fázový posun a metóda time-of-flight. **Triangulačná metóda** vyžaruje laserový lúč na meraný objekt, pričom využíva senzor na zachytenie polohy bodu na senzore. V závislosti od toho, v akej vzdialenosti dosiahne lúč povrch objektu, objaví sa na rôznych miestach senzora. Laserový

vysielač a senzor sú vzájomne odsunuté, pričom vzdialenosť medzi nimi je známa. Meria sa uhol medzi vysielačom a prijímaným laserovým lúčom, ktorý je určený veľkosťou posunu zachyteného bodu na senzore. Pomocou trigonometrického výpočtu sa určí vzdialenosť k zameranému cieľu (reflektoru). Takéto systémy sú limitované meranou vzdialenosťou od niekoľkých milimetrov po 5 m, ale dosahujú veľmi vysoké rozlíšenie (jemnosť detailu) a presnosť. Na použitie v porastových podmienkach sa využívajú skôr prístroje založené na fázovom posune alebo metóde time-off-flight. Skenery založené na **fázovej metóde** posielajú laserový impulz smerom k meranému cieľu. Laserový impulz je modulovaný známym signálom. Odrazený impulz obsahuje signál zhodný so signálom vysielačom impulzu. Vzhľadom na čas, ktorý absolvuje impulz na dráhe medzi vysielačom a reflektorom, dochádza k fázovému posunu signálu. Fázový posun sa odmeria a vypočíta sa vzdialenosť. Tieto skenery dokážu zachytiť vzdialenosti do približne 60 m s rozlíšením od 3 mm do 6 mm pri meracích frekvenciách od 100 kHz do 150 kHz. Ciele, ktoré sú vo vzdialenosti väčšej ako je maximálna

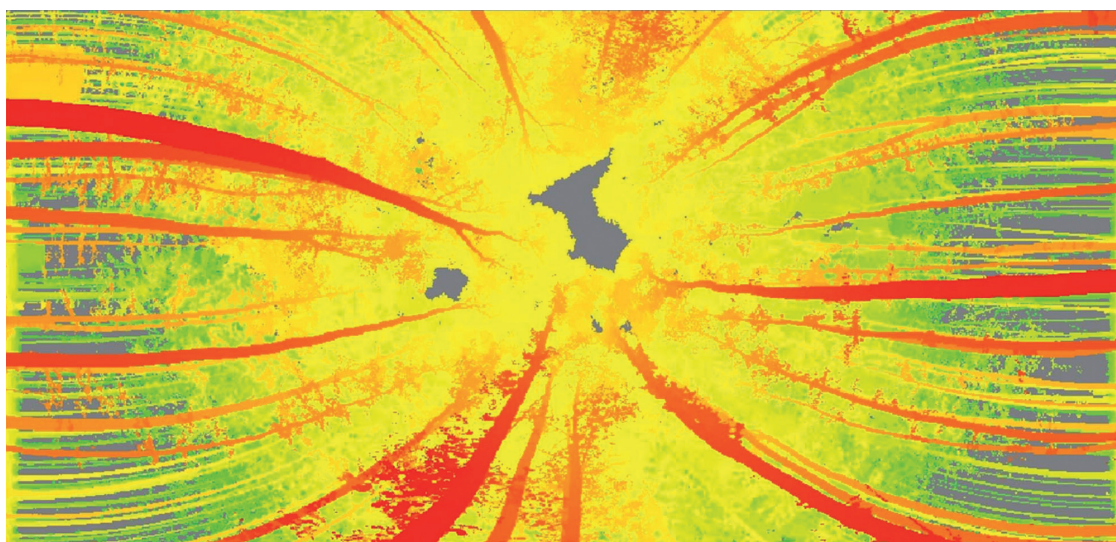


Obr. 10.10 Príklad pozemného laserového skenera (obrázok prevzatý z *Wikimedia Commons*).

vzdialenosť merania, môžu mať rovnaký fázový posun, ako vzdialenosti v blízkosti skenera. Tieto body sú potom nesprávne namapované do bodov v rámci

merateľného rámca vzdialenosti. Existujú filtrovacie algoritmy, ktoré sa snažia vylúčiť tieto merania porovnaním sily spätného signálu, ktorá je omnoho menšia ako sila signálu prislúchajúceho do merateľného rozpätia. Poslednou skupinou sú skenery s metódou **time-off-flight**. Vyšle sa veľmi krátky laserový impulz (okolo 1 nm) na cieľ. Odmeria sa časový odstup t medzi vyslaním a prijatím impulzu do prístroja a na základe konštantnej rýchlosti svetla c sa odmeria príslušná vzdialenosť cieľa: $(c \cdot t)/2$. Presnosť prístrojov závisí od toho ako presne dokážeme merať čas t . Približne 3,3 pikosekundy je čas potrebný na dráhu svetla 1 mm. Rozlíšenie takýchto skenerov je od 0,6 cm do 1,2 cm do frekvencie maximálne 24 kHz, ale dosiahnuteľná vzdialenosť je až 2 km.

Laserový dialkomer dokáže určiť vzdialenosť iba k jednému bodu v rámci pohľadu. Preto prístroje skenujú celý priestor pohľadu a to plynulou zmenou smeru merania. Odtiaľ pochádza názov skener (obrázok 10.10). Zmena smeru sa zabezpečuje zmenou horizontálneho a vertikálneho uhla zámery v konštantných uhlových krokoch. Dosahuje sa rotovaním celého prístroja alebo systémom rotujúcich zrkadiel. Typicky dokážu skenery zachytiť 10 až 100 tisíc bodov každú sekundu. Rotácia prístroja vytvára obraz vo sférických súradniciach (azimutálny a zenitový uhol zámery). Skener je umiestnený do centra obrazu (súradnice $0^\circ, 0^\circ$). Body potom nesú informáciu o dosiahnutej vzdialenosti (obrázok 10.11). Ak skener nemôže



Obr. 10.11 Obraz meraných vzdialeností pomocou pozemného laserového skenera. Obsahuje merané vzdialenosti bodov zmiešaného bukovo–smrekového porastu v nepravých farbách (červená = blízka, zelená = vzdialená, šedá = bez merania). Spracované podľa SEIFERTA (2010).



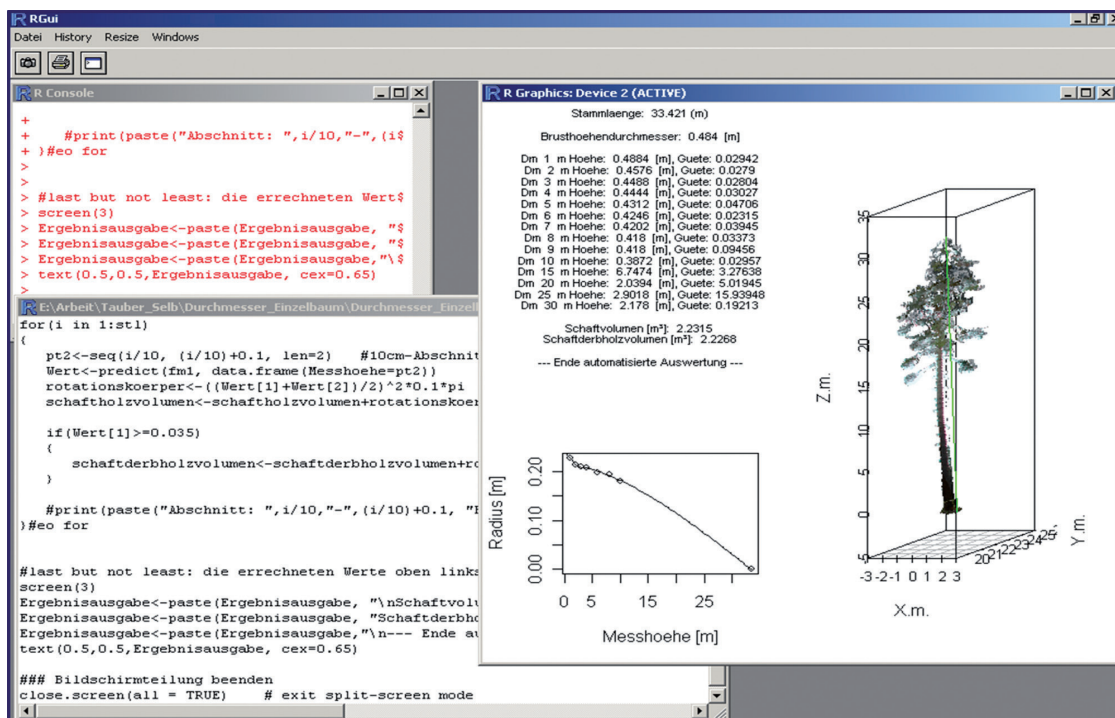
Obr. 10.12 Mračno bodov vytvorené na základe meraní (TOTH 2011) pomocou programu TLS (KOREŇ 2010a).

zachytiť cieľ kvôli prekážke pred cieľom (napríklad kmeň stromu alebo vetvy), vytvára sa tieň s neznámou informáciou za prekážkou. Na redukciu tieňov sa preto používa meranie z viacerých pozícií skenera. Výsledná scéna sa vytvára kombináciou viacerých obrazov, ktoré vzájomne vyplnia chýbajúce medzery (tienie). Polárne súradnice sa transformujú do trojrozmernej karteziánskej sústavy, čím sa vytvorí takzvané **mračno bodov** (obrázok 10.12). Body sa po príslušnej klasifikácii do potrebných kategórií (kmeň stromu, vetvy stromu, asimilačné orgány) použijú na odvodenie potrebných biometrických veličín.

Jednou z dôležitých aplikácií pozemného laserového skenovania je odvodenie **tvary kmeňa**. Urobí sa skenovanie stromu minimálne z dvoch opozitných strán. Následne sa mračná bodov z viacerých skenovaní spoja do jedného a z mračna bodov sa odstráni zemský povrch. Potom sa určí pozícia kmeňa. Používa sa metóda klasifiká-

cie, ktorá vychádza z predpokladu, že najväčšia hustota bodov je na povrchu kmeňa. Ťažisko hustých zhlukov určuje súradnice stromu. Na základe pozície stromu sa izoluje z mračna bodov kompletný strom. Takisto sa odstránia rušivé vetvy pomocou štatistického testu dobrej zhody so základnými geometrickými tvarmi. Výsledkom izolácie kmeňa je kompletný objekt, ktorý pozostáva z jedného alebo viacerých prispôbených telies. Na základe tejto informácie sa odvodí morfológická krivka a objem kmeňa, prípadne sa niekedy extrahujú dĺžky častí kmeňa bez vetiev. Z tvaru kmeňa sa potom odvodí aj jeho výška a hrúbka v prsnej výške (1,3 m). Postup vedie k veľmi detailnému získaniu tvaru a kvality kmeňa ako aj celého porastu (KLEMMT et al. 2009). Na obrázku 10.13 uvádzame príklad softvéru vyvinutého autormi.

Okrem objemu a kvality kmeňa sa dá odvodiť aj zvyšná **biomasa stromu**. Na určenie biomasy koruny sa aplikujú vo všeobecnosti dva prístupy.



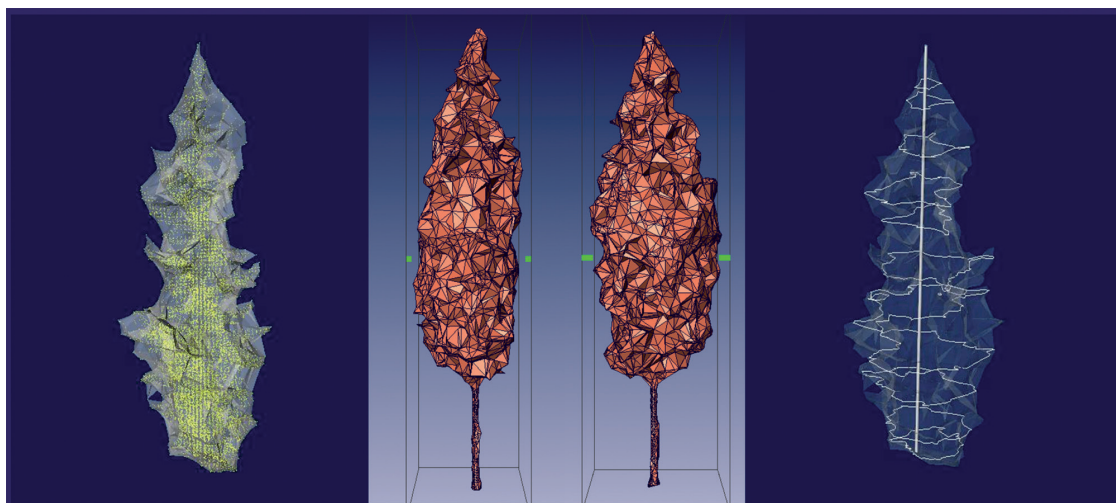
Obr. 10.13 Softvérový nástroj pre automatizované rozpoznanie tvaru kmeňa a výpočet objemu stromu z pozemného laserového skenovania (KLEMMT a TAUBER 2008).

Prvý využíva známu štatistickú závislosť medzi dĺžkou koruny a jej objemom. Z nej sa odvodí počet a dĺžka vetiev. Rozmery koruny a jej objem sa určia z mračna bodov (obrázok 10.14). Hrubšie vetvy sa tiež extrahujú z laserových meraní. Odvodené geometrické parametre sa používajú na štatistický model biomasy ako vstupné premenné modelu. Výsledkom modelu sú hodnoty biomasy pre vetvy a asimilačné orgány v závislosti od pozície vetiev v rámci koruny. Takto sa vyjadří distribúcia biomasy v profile koruny (SEIFERT a SEIFERT 2006). Iný prístup je založený na priamej analýze biomasy koruny pomocou analýzy hustoty bodov. Pre tieto účely sa prevádza rozdelenie koruny na priestorové segmenty (voxle). Pre každý segment sa určí množstvo zachytených bodov. Na základe počtu laserových impulzov, ktoré vstúpili do segmentov, a počtu zachytených bodov sa určí stupeň hustoty segmentov. Na základe tejto hustoty sa potom vyjadria štatistické funkcie biomasy (HENNING a RADTKE 2006, CÔTÉ et al. 2009, HUANG a PRETZSCH 2010).

V kontraste s tradičnými meracími technikami metódy pozemného laserového skenovania zachy-

távajú naraz viacero susedných stromov. To umožňuje merať nielen vlastnosti jednotlivých stromov ale aj popísať okolité jedince hodnotených stromov. Uvedená vlastnosť sa využíva na popis a analýzu **porastovej štruktúry**. Separovaním okolitých stromov, morfológie ich korún a vzdialeností korún sa môže prevádzať analýza a hodnotenie vzťahu voči podmienkam prostredia, konkurenčným indexom a druhovo špecifickým vlastnostiam. Tvary korún sa dajú extrahovať z mračna bodov a z nich sa stanovujú parametre ako sú priemery korún, kompaktnosť korún a hustota korún. Takisto sa dá určiť smer naklonenia kmeňa stromu alebo asymetria rastu koruny, ktorá hovorí o smere a intenzite konkurenčného tlaku. Priestory medzi korunami stromov sa dajú exaktne merať a umožňujú lepšie pochopenie využitia rastového priestoru. Všetky tieto parametre prispievajú k porozumeniu otázky ako je štruktúrovaný porastový priestor, a ktoré faktory ho ovplyvňujú (KLEMMT et al. 2009).

Počítačom podporované modelovanie lesa sa sústreďuje na metodické a aplikačné problémy pozemného laserového skenovania ako sú: po-



Obr. 10.14 Extrakcia koruny stromu z mračna bodov pozemného laserového skenovania na odvodenie objemu a povrchu koruny, vrátane biomasy vetiev a asimilačných orgánov (SEIFERT a SEIFERT 2006).

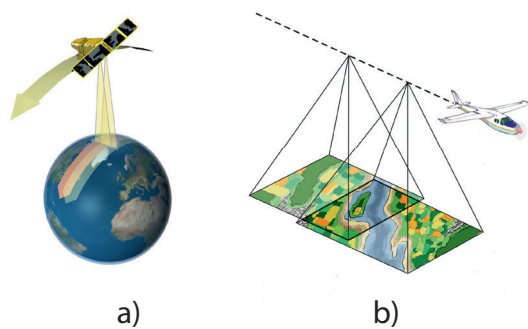
kles presnosti skenovania so vzdialenosťou bodov (presnosť je cca jedna tisícina vzdialenosti), pokles hustoty bodov so vzdialenosťou skenovania (spôsobené uhlovým krokom rotácie), presnosť skenovania v súvislosti s pohybom objektov (napríklad za vetra) a zmenou skenovacích stanovišť, presnosť a úplnosť skenovania s počtom meraných stanovišť, spôsoby klasifikácie bodov a automatickej identifikácie objektov (kvalitatívne atribúty, napríklad druh materiálu alebo dreviny), automatické postupy na odvodenie dendrometrických charakteristík (kvantitatívne atribúty), softvérové riešenie skenovania lesa a podobne. S uvedenou problematikou sa možno stretnúť v príslušnej literatúre (SIMONSE et al. 2003, ASCHOFF et al. 2004, HAALA et al. 2004, HEURICH et al. 2004, HOPKINSON et al. 2004, PFEIFER et al. 2004, SEIFERT a SEIFERT 2006, BIENERT et al. 2007, KIRÁLY a BROLLY 2007, BIENERT a SCHELLER 2008, KLEMMT a TAUBER 2008, KLEMMT a SEIFERT 2009).

10.1.3 Metódy diaľkového prieskumu Zeme

Rozvoj diaľkového prieskumu Zeme (angl. *Remote Sensing*) za posledných 50 rokov dospel k technológiám a postupom, ktoré môžu výrazne prispieť k progresívnemu získavaniu údajov vhodných pre konštrukciu a aplikáciu modelov lesa. Vzhľadom na to, že ide o náročnú a komplexnú problematiku, ktorá vyžaduje znalosť ter-

minológie, princípov a metód, budeme sa ňou v tejto kapitole zaoberať iba rámcovo. Naznačíme predovšetkým postupy, ktoré sú pre modelovanie lesa v súčasnosti najvhodnejšie a teda najčastejšie využívané. Účelom kapitoly nebude ich podrobný popis. Zameriame sa skôr na vysvetlenie základných princípov a významu pre modelovanie lesa. Podrobnejšie vysvetlenie metód diaľkového prieskumu Zeme možno nájsť v príslušných publikáciách (ŽÍHLAVNÍK a SCHEER 2001, WULDER a FRANKLIN 2003, SCHOWENGERDT 2007, LILLESAND et al. 2008).

Pre účely modelovania lesa sa najčastejšie využívajú satelitné alebo letecké snímky. **Satelitné** snímky sa vyhotovujú pomocou družíc. Družice diaľkového prieskumu Zeme využívajú najčastejšie polárnu dráhu, ktorá pretína oba zemské póly. Vzhľadom na rotáciu Zeme okolo osi prechádzajúcej zemskými pólmi, zachytávajú celú Zem postupne v úzkych pásoch (obrázok 10.15a). Raz za určitú periódu tak zaznamenajú celý povrch Zeme. V modelovaní lesa sa využívajú najčastejšie družice Landsat 7 (ETM+), SPOT 5 (HRG, HRS a VEG2), IKONOS, QuickBird, Terra (MODIS a ASTER), RADARSAT (SAR), ERS-2 (SAR), IRS-1D (LISS a WiFS), EO-1 (Hyperion) a OrbView 3. Niektoré z nich sú vyobrazené na obrázku 10.16. **Letecké** snímky sa vyhotovujú pomocou snímkovania povrchu Zeme počas letovej dráhy lietadla (obrázok 10.15b). Družice a lietadlá využívajú na snímanie povrchu Zeme optické kamery (ana-

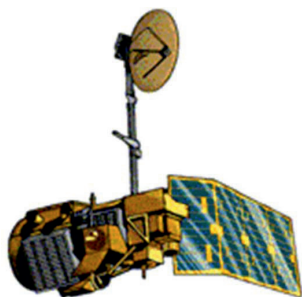


Obr. 10.15 Diaľkový prieskum Zeme: **a)** satelitný, **b)** letecký.

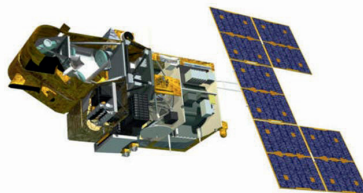
lógové alebo digitálne), skenery alebo radary. Zaznamenávajú informáciu o Zemi vo forme snímania a analýzy odrazených (resp. vysielaných) vln. Využíva sa informácia v rôznych vlnových dĺžkach (frekvenciách). Frekvencie závisia od typu používaných senzorov, pričom sa často zaznamenáva viacero kanálov (frekvenčných rozsahov). Preto rozoznávame napríklad snímky panchromatické (viditeľná časť elektromagnetického spektra), multispektrálne (niekoľko kanálov v optickej časti elektromagnetického spektra), hyperspektrálne

(niekoľko desiatok kanálov v optickej časti elektromagnetického spektra). Zároveň sa veľmi často vyhotovujú dvojice snímok rovnakého územia snímané pod rozličným uhlom, čím sa dosiahne možnosť stereoskopického vyhodnotenia a konštrukcie trojrozmerného obrazu povrchu Zeme. Družice využívajú väčšinou dvojicu senzorov natočených pod rôznym uhlom (obrázok 10.15a). Lietadlá zasa využívajú snímkanie Zeme v prekrytovej zóne. To znamená, že rýchlosť snímania a letu lietadla je zosynchronizovaná tak, aby sa to isté územie zaznamenalo dvakrát pod odlišným uhlom (obrázok 10.15b).

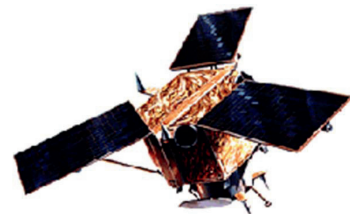
V súčasnom modelovaní leša sa využívajú najčastejšie snímky s vysokou rozlišovacou schopnosťou na odvodenie kvantitatívnych charakteristík jednotlivých stromov, hyperspektrálne snímky na odvodenie niektorých kvalitatívnych charakteristík stromov a letecké laserové skenovanie na zistenie výšok stromov a konštrukciu modelu reliéfu. Snímky s **vysokou rozlišovacou schopnosťou** (od niekoľko centimetrov do niekoľko desiatok centimetrov na pixel) sa využívajú na určenie súradníc stromov, horizontálnej projekcie koruny a priemeru koruny. Používajú sa rôzne metódy klasifikácie



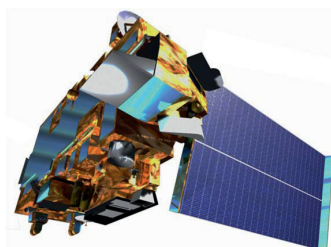
Landsat



SPOT



IKONOS

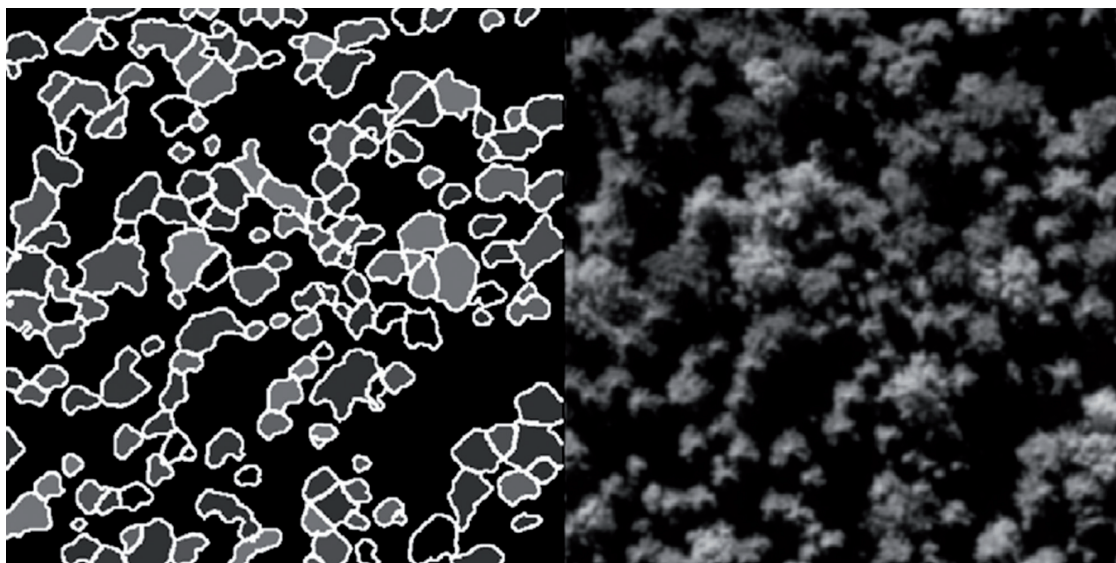


Terra



QuickBird

Obr. 10.16 Typy vybraných družíc využívaných v modelovaní leša.



Obr. 10.17 Príklad identifikácie tvarov korún stromov z leteckej snímky (podľa BRANDTBERGA 2002). Obrázok na ľavej strane ukazuje umiestnenie klasifikovaných segmentov korún stromov, obrázok na pravej strane ukazuje upravenú leteckú snímku podľa Gaussovho filtra ($s_1=1,89$). Ide o zmiešaný les a veľkosť snímky 50 m x 50 m.

obrazu (GOUGEON 1995, DRALLE a RUDEMO 1997, BRANDTBERG 1999, 2002, GITELSON et al. 2002, SUROVÝ et al. 2004, 2005). Základom je väčšinou príprava snímok, aby boli zvýraznené rozdiely medzi vegetáciou a okolím. Využívajú sa metódy preškálovania a filtrovania obrazov, respektíve tvorba vhodných kompozícií z viacerých kanálov. Často sa prevádza aj transformácia obrazov. Jej princíp spočíva v tom, že sa viacero kanálov skombinuje tak, aby bola variabilita vo farebnej hustote jednotlivých pixlov nového obrazu maximálna. To znamená, že sa vyberú také lineárne kombinácie pôvodných kanálov, ktoré zabezpečia maximálnu variabilitu vo farebnej hustote pixlov a teda najlepšie zvýraznenie vegetácie oproti okoliu. Používajú sa napríklad metódy analýzy hlavných komponentov (pozri kapitolu 3.4.7). Potom sa identifikujú hranice korún. Využívajú sa metódy hľadania hraničných línií (tzv. *thresholding*), ktoré oddelujú oblasti s farebnou intenzitou vegetácie od farebnej intenzity okolia. Takisto sa určuje aj umiestnenie kmeňov stromov. V rámci identifikovaných korún stromov sa hľadá napríklad pixel s lokálnym extrémom farebnej hustoty (napríklad najsvetlejší pixel). Geografické súradnice pixla určujú súradnice stromu. Príklad identifikácie tvarov korún stromov z leteckej snímky (BRANDTBERG 2002) je zobrazený na obrázku 10.17. Úspešnosť takejto klasifikácie sa pohybuje od 40% do 90% a to v zá-

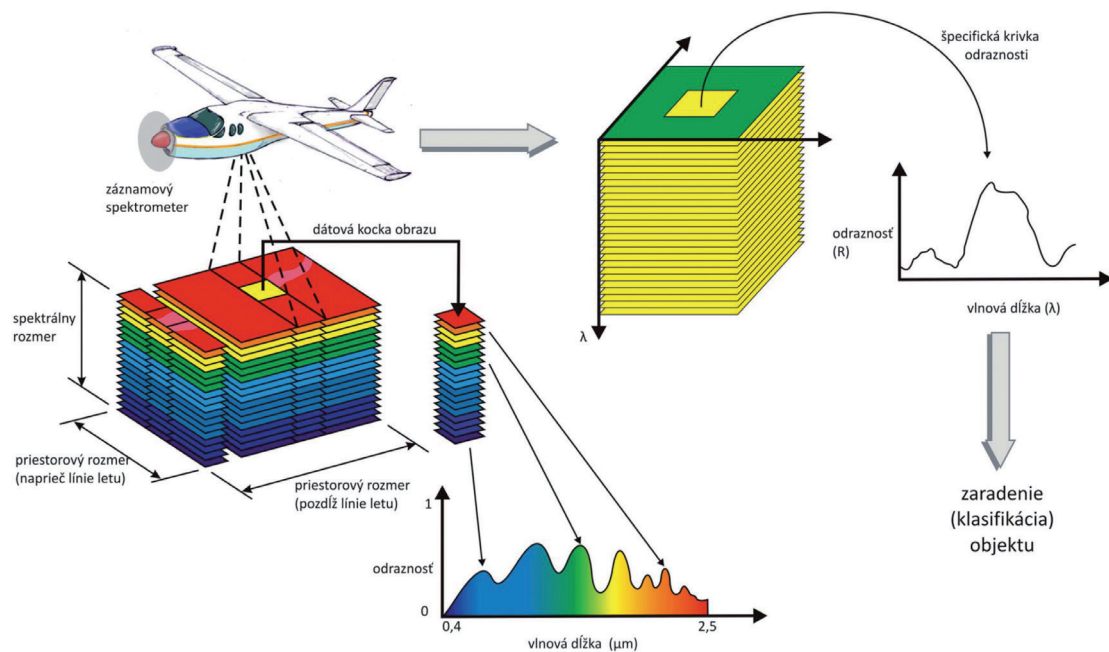
vislosti od charakteru lesného porastu, rozlišovacej schopnosti snímky, kvality snímky a zvolenej metódy. Metódy sú zatiaľ vhodné skôr pre ihličnaté porasty, jednoetážové porasty, staršie porasty a porasty s menšou hustotou. Ak sa snímky s vysokou rozlišovacou schopnosťou získavajú vo forme dvojíc s odlišným uhlom snímania, umožňujú rekonštruovať trojrozmerný obraz povrchu porastov pomocou stereoskopie. Identifikácia súradníc stromov je výrazne zjednodušená, pretože lokálny extrém farebnej hustoty pixla je skombinovaný aj s lokálnym maximom výškovej súradnice pixla. Okrem súradníc stromu sa získa aj jeho výška. Takisto sa ľahšie identifikujú aj predely medzi korunami, pretože hraničné línie korún sú určené aj minimálnymi výškovými súradnicami deliacich pixlov.

Okrem kvantitatívnych charakteristík stromov je potrebné určiť aj niektoré nevyhnutné kvalitatívne charakteristiky, predovšetkým druh dreviny, prípadne zdravotný stav stromu (defoliácia, odumretie) a poškodenie. V tejto oblasti sa ukazuje ako veľmi perspektívna metóda **hyperspektrálneho snímkovania** (ZARCO-TEJADA et al. 2004, BUDDENBAUM et al. 2005, CLARK et al. 2005, SCHLERF et al. 2005, ARCHER a JONES 2006, LUCAS et al. 2008). Pri tejto metóde sa zaznamenávajú desiatky až stovky kanálov. Spektrálne rozlíšenie jedného kanála je do 10 až 20 nm, to znamená, že

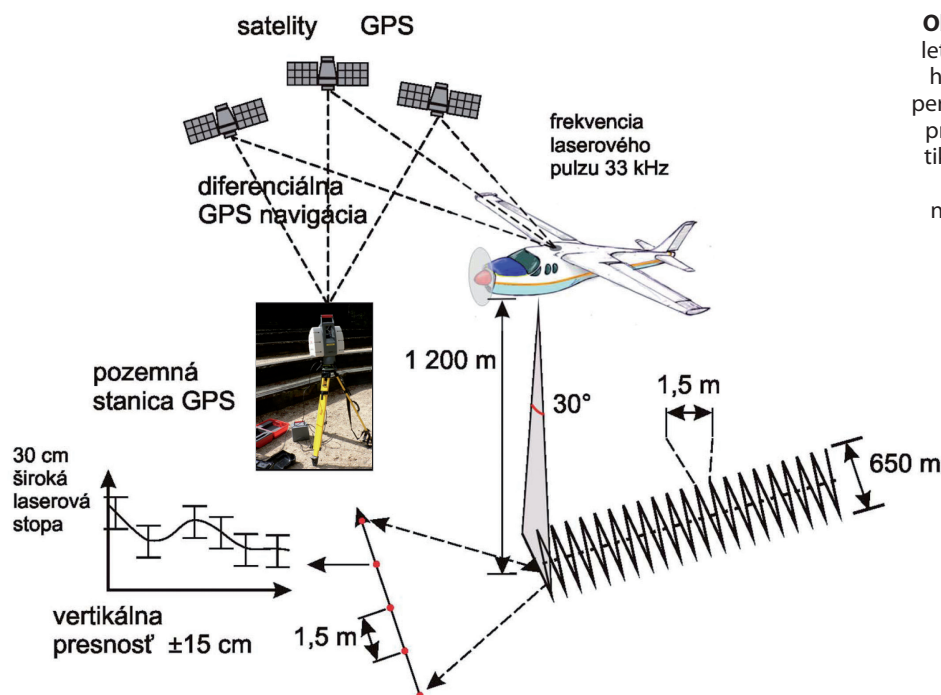
kanály registrujú veľmi úzky frekvenčný rozsah. Princíp metódy je znázornený na obrázku 10.18. Lietadlo pomocou záznamového spektrometra zachytáva odraz zemských objektov v paralelných úzkych frekvenčných spektrách s vysokým počtom kanálov. Získavame trojrozmerné informácie o objektoch zaznamenané počas jedného snímokovania. V horizontálnych smeroch ide o priestorové rozmery. Prvý rozmer je v smere línie letu, druhý rozmer naprieč líniou letu. Rozmery sa zhodujú s pohľadom, ktorý dokáže zaznamenať jediné snímokovanie spektrometra. Vo vertikálnom smere ide o spektrálny rozmer. Ten obsahuje desiatky až stovky úzkych frekvenčných spektier. Informácie sa uskladňujú vo forme dátovej kocky (pozri kapitolu 10.5). Každý obrazový prvok (pixel) je situovaný v dátovej kocke pomocou dvoch priestorových rozmerov. Obsahuje vektor údajov. Rozmer vektora je zhodný s počtom spektier snímaných spektrometrom. Pre každý pixel sa dá zostrojiť krivka odraznosti. Na vodorovnej osi obsahuje vlnovú dĺžku zhodnú so stredom každého frekvenčného pásma a na vertikálnej osi je hodnota odraznosti (0 až 1). Pospájaním odrazností jednotlivých frekvenčných pásiem získame spojitú krivku. Zistilo sa, že rôzne typy terestrického povrchu môžu mať typický tvar krivky odraznosti.

Na základe tvaru kriviek je možné klasifikovať typ zemského povrchu do rôznych kategórií, napríklad druh dreveniny, zdravotný stav (obsah chlorofylu v asimilačných orgánoch), poškodenie a podobne. Pre konštrukciu krivky odraznosti je potrebné uskutočniť atmosférickú korekciu hodnôt odraznosti, pretože hodnoty môžu byť skreslené oblačnosťou a inými atmosférickými javmi.

Klasické jednosnímkové metódy diaľkového prieskumu Zeme sú vhodné na určenie biometrických veličín, ktorých rozmer je kolmý na smer letu (horizontálne miery). Na vertikálne miery, medzi ktoré patrí aj výška stromu alebo nadmorská výška terénu, je potrebné využiť stereoskopické snímokovanie alebo v súčasnosti veľmi perspektívnu metódu **leteckého laserového skenovania** (MAGNUSSEN a BOUDEWYN 1998, HYYPPÄ a INKINEN 1999, DUBAYAH et al. 2000, MEANS et al. 2000, HARDING et al. 2001, PERSSON et al. 2002, POPESCU et al. 2002, HEURICH et al. 2003, LIM et al. 2003, BLASCHKE et al. 2004, CLARK et al. 2004, HOLMGREN a PERSSON 2004, KORPELA 2004, MALTAMO et al. 2005). Princíp skenovania je podobný pozemnému. Pokúsili sme sa ho znázorniť na obrázku 10.19. Pomocou laserového pulzu s frekvenciou 33 kHz sa skenuje priestor pod letovou dráhou lietadla. Pri



Obr. 10.18 Metóda hyperspektrálneho snímokovania ako perspektívny nástroj pre identifikáciu kvalitatívnych atribútov stromov a porastov (druh dreveniny, zdravotný stav, poškodenie a podobne).

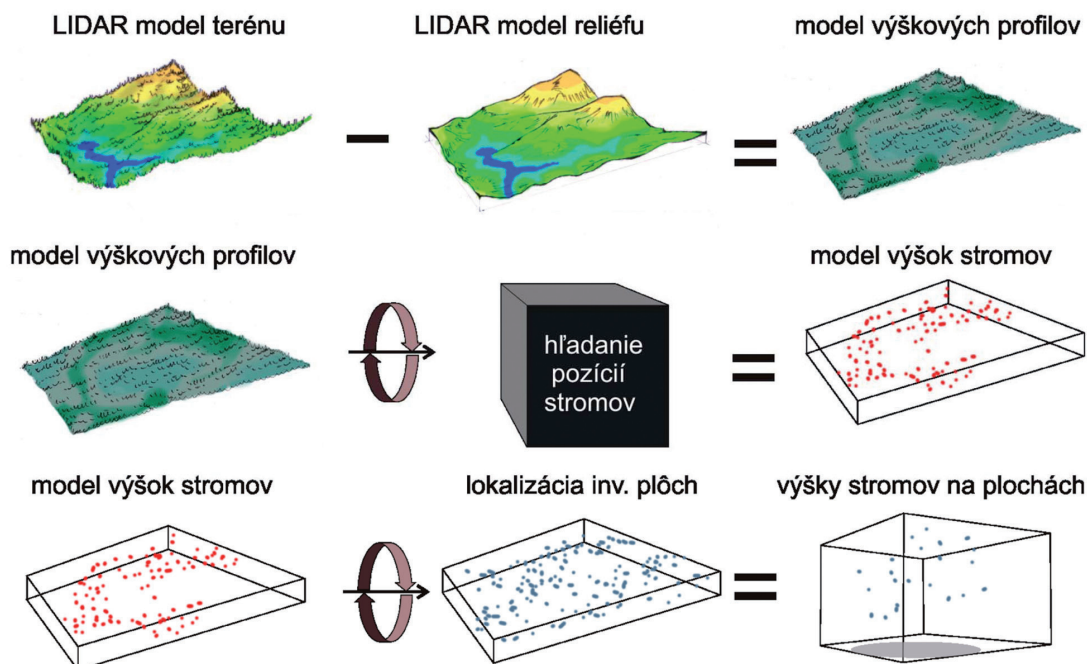


Obr. 10.19 Metóda leteckého laserového skenovania ako perspektívny nástroj pre odvodenie vertikálnych rozmerov (výšky stromov, nadmorské výšky).

tridsaťstupňovom bočnom uhle záberu a výške letu 1,2 km sníma lietadlo 650 m široký pás. Pri frekvencii 33 kHz sa dosahuje hustota bodov vo vzdialenosti 1200 m od lietadla 1,5 m v smere letu aj naprieč smerom letu. Súčasne s meraním vzdialeností snímaných bodov terénu sa zaznamenáva aj poloha týchto bodov pomocou GPS navigácie lietadla. Spresnenie polohy lietadla sa dosahuje synchronizáciou merania s pozemnou GPS stanicou vo forme diferenciálnej navigácie. Pri šírke laserovej stopy 30 cm je vertikálna presnosť skenovania ± 15 cm. Frekvencia laserového skenovania v spojení s rýchlosťou letu určuje hustotu bodov a šírka laserovej stopy vertikálnu presnosť merania. Presnosť GPS merania zasa určuje polohovú presnosť skenovania. Letecké laserové skenovanie sa samozrejme prevádza aj pri iných frekvenciách, výške letu a hustote bodov. To závisí od možností a od voľby. Na obrázku 10.20 je znázornená rámcová metodika na odvodenie výšky stromov. Pomocou leteckého laserového skenovania sa zostrojí model terénu a model reliéfu. Model terénu predstavuje odraz laserových pulzov od povrchu objektov, teda stromov. Model reliéfu vyjadruje odraz pulzov od zemského povrchu bez objektov. Vzniká odfiltrovaním pulzov, ktoré prenikli cez zápoj porastu až na povrch pôdy. Rozdielom modelu terénu a modelu reliéfu získame model výškových

profilov. Výškové profily vyjadrujú vzdialenosti od pôdneho povrchu po povrch vegetácie, ktoré sa menia s polohou. Na modeli výškových profilov sa vyhľadajú pozície stromov a odvodí sa ich výšky. Do modelu výšok stromov sa vložia záujmové simulačné plochy a na týchto plochách sa identifikujú zaujaté stromy aj s výškami.

Častou aplikáciou pre účely odvodenia fenologickej krivky (pozri kapitolu 8.7) je využitie **vegetačných indexov**, pomocou ktorých sa určujú časové body (*timing points*) fenologických fáz. Ide o analýzy diaľkového prieskumu Zeme, ktoré sa často označujú aj za pomerné obrazy (angl. *ratio images*). Analýzy sa uskutočňujú na základe delenia hodnoty intenzity jasu obrazového prvku v jednom pásme spektra hodnotou intenzity jasu obrazového prvku v inom pásme spektra. Často sa využíva poznatok o reflexnej krivke vegetácie v oblasti červeného (*R*) a blízkeho infračerveného (*IR*) pásma. Metóda je založená na vlastnostiach chlorofylu. Chlorofyl vo veľkej miere pohlcuje červené svetlo, ktoré používa na fotosyntézu. Naopak, intenzívne odráža žiarenie v blízkom infračervenom pásme. Plochy pokryté vegetáciou sa vyznačujú špecifickou hodnotou vegetačného indexu, ktorý vznikne pomerom intenzity v pásme blízkeho infračerveného žiarenia ku intenzite v červenom pásme: $VI = IR/R$. Ešte častejšie sa



Obr. 10.20 Rámcová metodika na odvodenie výšky stromov na simulačných plochách pomocou metódy letového laserového skenovania.

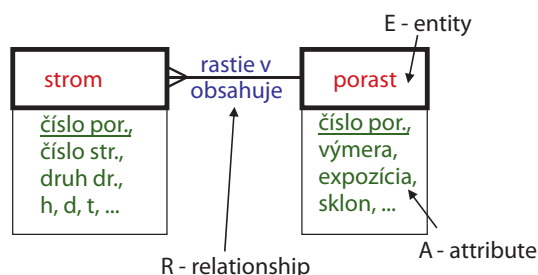
používa normalizovaný vegetačný index: $NVI = (IR - R)/(IR + R)$. Tieto metódy pomáhajú identifikovať napríklad začiatok zalisťovania, plný stav olistenia a opad listov (ZHANG et al. 2003, FISHER a MUSTARD 2007, SOUDAMI et al. 2008, BUCHA et al. 2011).

10.2 Relačný dátový model leša

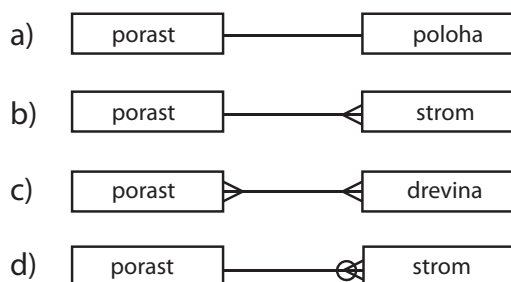
Moderné rastové modely obsahujú veľmi veľké množstvo stavových, exogénnych a intermediárnych premenných. Tieto údaje sa často uchovávajú pre všetky jednotky simulácie a to počas celého priebehu simulácie. Veľkosť dátovej základne si môžeme demonštrovať na príklade stromového empirického modelu závislého na pozíciách stromov. Ak lesný porast obsahuje 1000 stromov na hektár a veľkosť simulačnej plochy je 0,25 ha (50 m x 50 m), tak simulačná plocha obsahuje 250 stromov. O každom strome uchovávame nasledujúce údaje: druh dreveniny, hrúbka a výška stromu, výška nasadenia koruny, priemer koruny, súradnice stromu, kvalita stromu, stav stromu. Ak zanedbáme druh dreveniny a súradnice, ktoré sa nemenia, ide

o 6 stavových premenných. Ak prebieha simulácia 50 rokov a údaje evidujeme každých 5 rokov, potom získame $250 \cdot 6 \cdot (50:5) = 15000$ údajov. Na správu takéhoto rozsahu údajov sa odporúča využívať **databázovú technológiu**. Bližšie informácie o tejto technológii možno nájsť v prácach SCHEBER (1988), POKORNÝ (1992) alebo SALEMI (1993).

Základom optimálneho využitia technológie je voľba vhodnej štruktúry údajov. Hovoríme o naplnení dátového modelu. V súčasnosti sa najviac využíva **relačný dátový model**. Údaje sa integrujú do trojstupňovej štruktúry: entita –



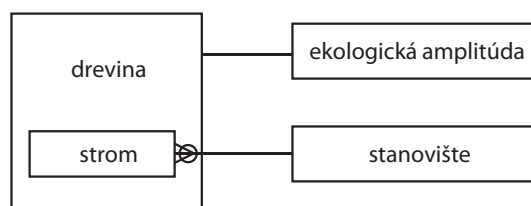
Obr. 10.21 Znázornenie štruktúry a vzájomného prepojenia dvoch tabuliek (porast a strom) pomocou ERA diagramu.



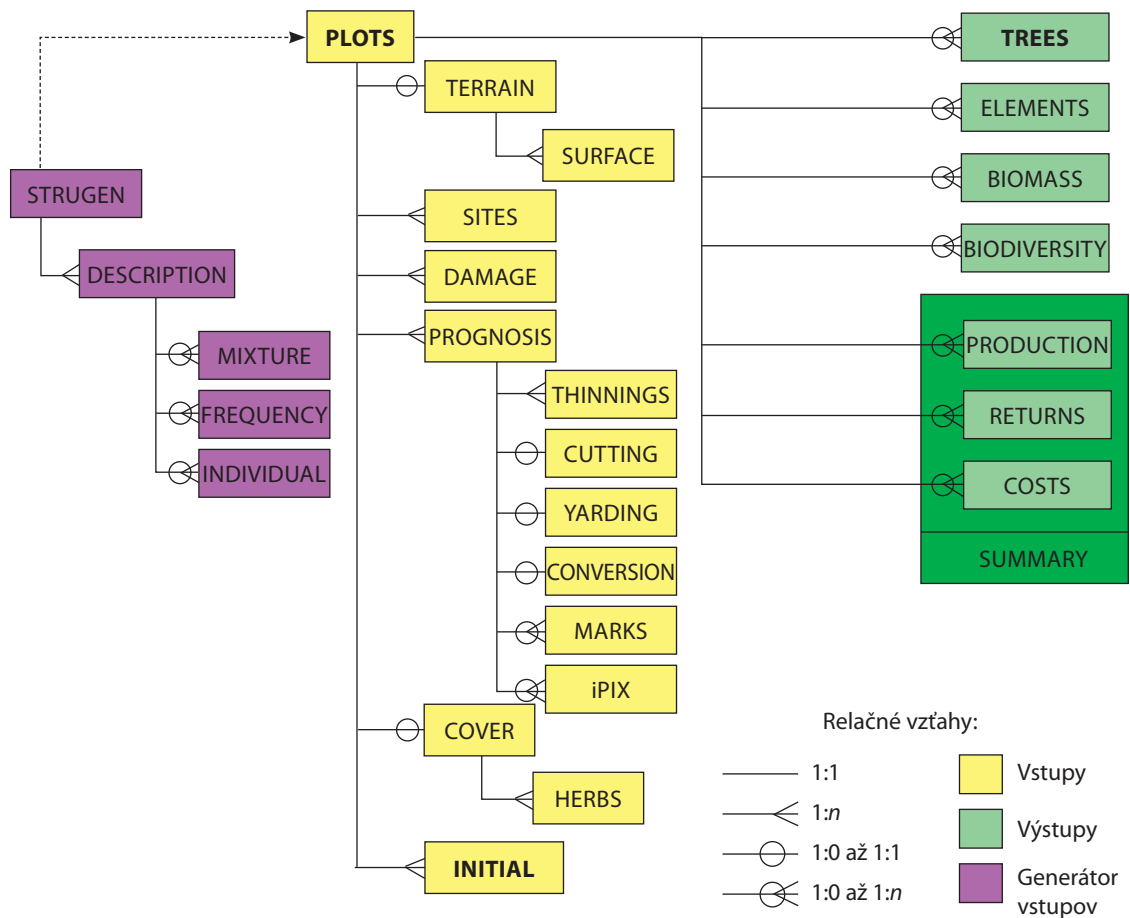
Obr. 10.22 Príklad kardinality vzťahu: **a)** 1:1, **b)** 1:n, **c)** m:n a parciality vzťahu medzi dvoma tabuľkami (**d**).

vzťah – atribút (pozri CHEN 1976). V modeloch lesa by mohlo ísť napríklad o entity: strom a porast. Medzi stromom a porastom je vzťah. Každý strom rastie v nejakom poraste a naopak, porast obsahuje stromy. Entita strom má svoje atribúty: číslo porastu, číslo stromu, druh dreveniny, výška, hrúbka, vek a podobne. Entita porast má tiež svoje atribúty: číslo porastu, výmera, expozícia, sklon a podobne. Ako sme si mohli všimnúť, obe entity majú spoločný atribút – číslo porastu. Ide o atribút, pomocou ktorého sa jednoznačne definuje príslušnosť stromu do porastu. Tomuto atribútu hovoríme kľúč (index). Praktická realizácia relačného databázového modelu spočíva v definícii tabuliek, ktoré združujú informácie o entitách. V našom prípade by sme mali dve tabuľky: porast a strom. Tabuľky obsahujú stĺpce, ktoré sa zhodujú s atribútmi. V riadkoch tabuľky sa zaznamenávajú údaje o jednotlivých jednotkách (konkrétnych stromoch alebo porastoch). V tabuľkách sú zvýraznené niektoré stĺpce, ktoré nazývame kľúče alebo indexy. V našom prípade je to stĺpec číslo porastu, ktorý obsahujú obe tabuľky. Pomocou tohto kľúča možno definovať príslušnosť stromu do porastu a to na základe zhodnej hodnoty atribútu v oboch tabuľkách. Štruktúra tabuliek a vzťahov sa dá znázorniť pomocou **ERA diagramu** (skratka *Entity – Relationship – Attribute*). Príklad je znázornený na obrázku 10.21. Každá tabuľka má svoj názov (porast a strom). Pod názvom sú vymenované názvy atribútov (stĺpcov). Atribúty, ktoré predstavujú kľúče, sú podčiarknuté. Tabuľky sú navzájom prepojené spojovacou líniou. Tá vyjadruje vzťah. Nad čiarou je uvedený názov vzťahu zľava doprava a pod čiarou názov vzťahu sprava doľava. Spravidla sa názvy vzťahov v diagramoch neuvádzajú, pretože implicitne vyplývajú z charakteru tabuliek.

Vzťah medzi tabuľkami môže mať rôzny charakter. Hovoríme o **kardinalite vzťahu**. Vzťah 1:1 (obrázok 10.22a) znamená, že jednému záznamu (riadku) prvej tabuľky prislúcha iba jeden záznam (riadok) tabuľky druhej. Vzťah sa vyjadruje jednoduchou líniou. Môže ísť napríklad o vzťah medzi porastom a jeho polohou (každý lesný porast má iba jednu geografickú polohu). Vzťah 1:n (obrázok 10.22b) znamená, že jednému záznamu prvej tabuľky môže prislúchať viacero záznamov druhej tabuľky. Vzťah sa vyjadruje líniou, ktorá je rozvetvená na príslušnej strane. Môže ísť napríklad o vzťah medzi porastom a stromom (každý porast môže obsahovať viacero stromov). Podobne možno hovoriť aj o vzťahu m:n (obrázok 10.22c). Viacerym záznamom prvej tabuľky prislúcha viacero záznamov druhej tabuľky. Vzťah sa vyjadruje rozvetvením línie na oboch stranách. Môže ísť napríklad o vzťah medzi porastom a dreveninou (jeden porast môže obsahovať viacero druhov drevenín a jeden druh dreveniny sa môže vyskytovať vo viacerých porastoch). Väčšinou sa však vzťah m:n rozkladá na dva vzťahy 1:n. Vzťahy medzi tabuľkami nemusia byť povinné. Hovoríme o **parcialite vzťahu**. Ak nie je vzťah na strane jednej z tabuliek povinný, označuje sa malým krúžkom (obrázok 10.22d). Napríklad vzťah medzi porastom a stromom je 1:n, pričom namiesto n možno dosadiť aj nulu, pretože nie každý porast musí mať stromy, napríklad holina po ťažbe alebo kalamite. Takisto sa medzi tabuľkami môže vyjadriť **generalizácia a špecializácia vzťahov**. Príklad je znázornený na obrázku 10.23. Entita drevina obsahuje podmnožinu strom. Medzi dreveninou a jej ekologickou amplitúdou je vzťah 1:1. To znamená, že každá drevina má svoj špecifický rozsah prijateľných podmienok prostredia na prežitie. Tento vzťah platí aj pre stromy patriace do daného druhu. Ide o generalizáciu vzťahu. Medzi stromom a stanovišťom je vzťah $n:1$. To znamená, že na jednom stanovišti s konkrétnymi podmienkami v rámci ekologickej am-



Obr. 10.23 Význam generalizácie a špecializácie vzťahu medzi tabuľkami.



Obr. 10.24 Príklad relačnej štruktúry databázy rastového modelu SIBYLA (FABRIKA 2005).

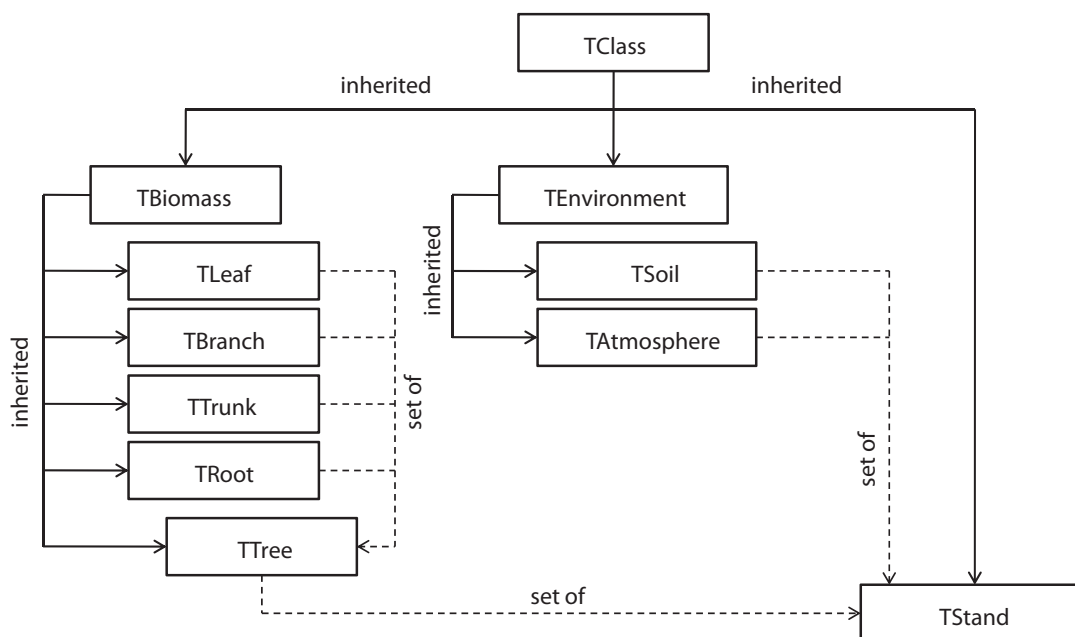
plitúdy rastie viacero stromov (rozvetvenie väzby), alebo sa tam nevyskytuje žiaden strom (symbol krúžku na rozvetvení väzby). Tento vzťah platí iba pre strom (špecializácia vzťahu). Charakter vzťahu vyplýva z naznačenej väzby. Platí, že vzťah entity na inú entitu platí aj pre všetky entity, ktoré sú jej podmnožinou, avšak vzťah medzi podmnožinou entity na inú entitu neplatí pre jej nadmnožinu.

Relačná štruktúra údajov je veľmi efektívna, pretože umožňuje veľmi výkonné a univerzálne operácie pomocou **relačnej algebry**. Relaçná algebra využíva rôzne operácie ako sú zjednotenie, prienik, rozdiel, karteziánsky súčin, projekcia, reštrikcia, spojenie a iné. Do relačnej algebry vstupujú relačné tabuľky. Operácie sú univerzálne a dajú sa vykonávať pre väčšinu fyzických typov databáz (MS Access, DBase, Foxpro, Paradox, Oracle, MS SQL Server, Informix, Sybase, Ingres

a podobne). Univerzálnosť je zaistená **jazykom SQL** (angl. *Structured Query Language*), ktorý je normalizovaný ISO normou (pozri napríklad publikácie POKORNÝ 1994, ŠIMŮNEK 1999). Na obrázku 10.24 uvádzame príklad kompletnej relačnej štruktúry údajov rastového modelu SIBYLA (FABRIKA 2005).

10.3 Objektový funkčný model leša

V moderných rastových modeloch je komplexná nielen štruktúra údajov ale aj samotný algoritmus fungovania modelu. Pokiaľ v klasických rastových tabuľkách išlo iba o systém niekoľkých vzájomne previazaných rovníc, v rastových simulátoroch je to súbor zložitých algoritmov, ktoré sa



Obr. 10.25 Príklad objektového funkčného modelu lesa podľa programového kódu rastového simulátora SIBYLA (FABRIKA 2005).

dajú rozdeliť do určitých skupín podľa charakteru, napríklad mortalita, konkurencia, prebierky, rast a podobne. Tieto algoritmy často fungujú vo viacerých úrovniach modelu v rovnakej alebo pozmenenej podobe. Napríklad mortalita a rast prebieha na úrovni orgánov, jedincov ale aj celých populácií. Aby nedochádzalo k zbytočnému opakovaniu (redundancii) zdrojového kódu na viacerých úrovniach programu, využíva sa často objektový funkčný model lesa. Princíp si vysvetlíme na objektivej štruktúre programového kódu simulátora SIBYLA (FABRIKA 2005). Znázornili sme ju v zjednodušenej podobe na obrázku 10.25.

Konštrukcia programu rastového modelu spočíva v tvorbe tried objektov. **Trieda** definuje typ objektu. Objekty danej triedy majú podobnú štruktúru a chovanie. Napríklad trieda TBiomass vyjadruje akúkoľvek zložku biomasy stromu, či už na úrovni orgánu, súboru orgánov alebo celého jedinca. Triedy obsahujú dátové položky, metódy a vlastnosti. Hovoríme, že tieto sú v triede **zapuzdrené** (angl. *encapsulated*). Dátové položky vyjadrujú stav objektu. Napríklad v triede TBiomass môže ísť o čistú a hrubú primárnu produkciu, alokáciu uhlíka a dusíka v biomase a podobne. Metódy vyjadrujú stav objektu. Napríklad v triede TBiomass to môžu byť Mortality, Competition,

Thinning a Growth. Metóda Mortality určuje zdravotný stav alebo vitalitu zložky biomasy, to znamená, nakoľko v nej prebiehajú aktívne biologické procesy. Metóda Competition zasa vyjadruje veľkosť konkurenčného tlaku okolitej biomasy na zložku biomasy. Metóda Thinning charakterizuje zásah človeka do zložky biomasy, napríklad jej odstránenie alebo redukciu jej časti. Metóda Growth definuje intenzitu rastu zložky biomasy, napríklad jej prírastok. Metódy sú navzájom zviazané, to znamená, že ovplyvňujú stav objektu a ten spätne ovplyvňuje metódy. Pokiaľ dátové položky a metódy sú pre používateľov objektov skryté, vlastnosti (angl. *properties*) sú špecifické rozhrania pre triedy objektov, pomocou ktorých prístupujú užívatelia k dátovým položkám a metódam. Vlastnosti sú verejné a umožňujú napríklad inicializovať stav objektu alebo aktivovať potrebné metódy na zmenu stavu objektov. Nie všetky metódy a dátové položky musia byť totiž pre užívateľov prístupné, zvlášť tie, ktoré slúžia iba ako pomocné funkcie alebo procedúry alebo ako medzivýsledky spracovania, ktoré sa uchovávajú v podobe lokálnych premenných.

Základnou črtou objektov, kvôli ktorej vznikol tento programový prístup, je **dedičnosť** (angl. *inheritance*). Dedičnosť umožňuje definovať

nové triedy objektov, ktoré sú potomkami predkov. Takéto triedy dedia všetky vlastnosti svojich predkov vrátane ich dátových položiek a metód, pričom k nim môžu byť pridané ďalšie dátové položky, metódy a vlastnosti. Napríklad od triedy TBiomass je odvodená trieda TLeaf, TBranch, TTrunk, TRoot a TTree. Potomkovia sú teda špecifickejší zástupcovia všeobecnejších predkov. Pokiaľ TBiomass vyjadrovala akúkoľvek zložku biomasy, tak jej potomkovia špecifikujú jej konkrétny typ: list, vetva, kmeň, koreň alebo celý strom. Všetkých päť typov biomasy obsahuje tie isté dátové položky, metódy a vlastnosti ako ich predok. To znamená, že majú hrubú a čistú primárnu produkciu, alokáciu uhlíka a dusíka a podliehajú procesom mortality, konkurencie, odstránenia alebo rastu. Avšak môžu obsahovať ďalšie zapuzdrené zložky, ktoré špecifikujú daný objekt voči predkovi. Napríklad objekt list obsahuje listovú plochu ako novú dátovú položku a intenzitu asimilácie ako novú metódu. Objektový prístup umožňuje programátorom využívať hotové objekty, ktoré môžu dopĺňať o ďalšie vlastnosti. Zároveň majú možnosť modifikovať aj zdedené metódy a to pomocou vlastnosti nazvanej **polymorfizmus** (angl. *polymorphing*). Takéto metódy musia byť v rodičovskej triede objektu definované ako modifikovateľné. Tento programátorský prístup značne sprehľadňuje programovanie a znižuje redundanciu zdrojového kódu a zároveň sprístupňuje vývoj pre širšiu skupinu vývojárov.

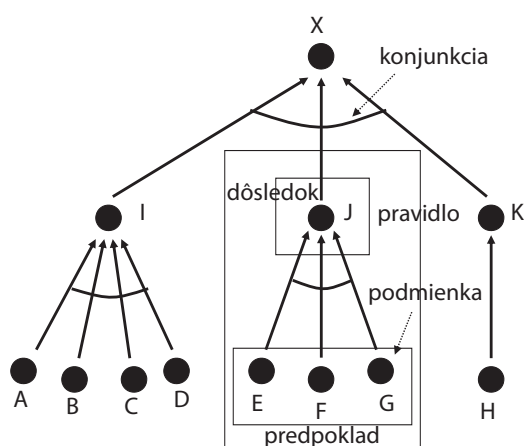
Poslednou typickou črtou tried objektov sú **udalosti** (angl. *events*), ktoré zabezpečujú automatické riadenie metód. Ak nastane špecifická situácia, dochádza k automatickému vyvolaniu príslušnej metódy bez explicitného zásahu programátora. Napríklad ak prekročí respirácia fotosyntetickú asimiláciu, tak dochádza k vyvolaniu metódy Mortalita, ktorá môže spôsobiť za definovaných podmienok zmenu stavu objektu živý na stav mŕtvy.

V našej štruktúre na obrázku 10.25 sú všetky triedy objektov zdedené od svojich predkov spojené plnou líniou so šípkou na strane potomka. Odvodené triedy objektov zároveň môžu obsahovať aj množinu predchádzajúcich tried objektov, čo je znázornené prerušovanou líniou. Napríklad trieda TTree zdedená od triedy TBiomass obsahuje množinu listov, vetiev, kmeňov a koreňov. Tieto triedy takisto odovzdávajú svoje vlastnosti novému objektu, nemôžu však byť priamo modifikované. Podobným spôsobom by sme mohli

definovať všeobecnú triedu TEnvironment, ktorá popisuje polohu objektu v geografickom prostredí a typ prostredia, napríklad zemepisnú šírku a dĺžku, nadmorskú výšku, typ alebo model terénu, typ biómu alebo ekosystému. Triedy TSoil a TAtmosphere popisujú špecifickejšie vlastnosti prostredia, ktoré súvisia so stavom a procesmi v pôde a atmosfére. Napokon trieda TStand vyjadruje množinu skladajúcu sa z tried TSoil, TAtmosphere a TTree. Princíp programovania rastových modelov potom spočíva v inicializácii konkrétnych objektov a obhospodarovaní ich stavu a riadení ich spoločnej existencie. **Objekt** je teda konkrétny výskyt (odborne instanciacia) danej triedy. Pokiaľ trieda TTree popisuje všeobecne typ objektu, tak objekt Tree:TTree už hovorí o konkrétnej existencii. Napríklad, že ide o buk číslo 23, ktorý má konkrétne vlastnosti. Bližšie sa možno s objektovým programovaním oboznámiť v príslušných manuáloch programovacích jazykov (napríklad C++, Object Pascal, Visual Basic, JAVA).

10.4 Znalostný a expertný systém v modelovaní lesa

Moderné rastové simulátory poskytujú nielen veľké množstvo výstupov, ale dokážu predpovedať vývoj lesa aj pri veľkom počte možných variantov: meniace sa klimatické údaje, alternatívne spôsoby obhospodarovania lesa, zmena technológií a ekonomického prostredia a podobne. Kombináciu množstva variantov s množstvom výstupov dostávame často neprehľadnú spleť informácií, na základe ktorej sa veľmi ťažko interpretujú rozdiely a ešte ťažšie sa vyberá optimálny variant. Situáciu sťažuje aj fakt, že niektoré veci sa nedajú jednoznačne matematicky popísať, a že do rozhodovania vstupuje aj určitý stupeň subjektivity založený na intuícii a skúsenosti. Počítačom podporované modelovanie lesa začalo v poslednom období (MOWRER et al. 1997, PUKKALA a MIINA 1997, RAUSCHER 1999, REYNOLDS 1999, VACIK a LEXER 2001, SODTKE et al. 2004, FABRIKA 2006, 2007) implementovať do rozhodovania, na základe výstupov rastových modelov, princípy znalostných a expertných systémov, ktoré tvoria základ komplexných systémov na podporu rozhodovania. **Znalostné a expertné systémy** využívajú princípy **umelej inteligencie** (AI), respektíve algoritmov,



Obr. 10.26 Príklad bázy znalostí na hodnotenie kvality lesného porastu. Báza znalostí je založená na produkčnej sieti, ktorá je znázornená pomocou grafovej konvencie. Jednotlivé pravidlá sa skladajú z predpokladov a dôsledkov. Niektoré predpoklady sú zložené z viacerých podmienok, medzi ktorými je konjunkcia (väzba „A“, resp. „AND“).

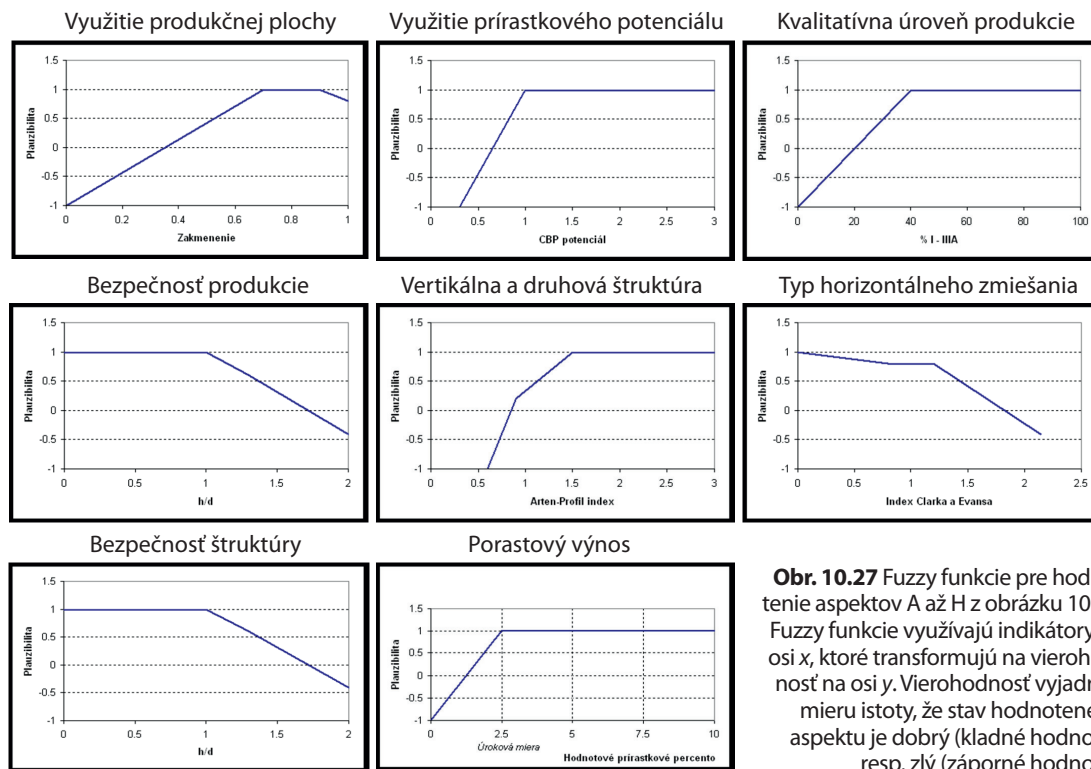
ktoré boli v súvislosti s umelou inteligenciou vytvorené. Základom takýchto systémov je **báza znalostí**, ktorá obsahuje určité penzum vedomostí, ktoré s riešením daného problému súvisí. Vedomosti sú uložené v určitej štruktúrovanej podobe, napríklad v predikátovej logike, produkčných pravidlách, sémantických sieťach, znalostných rámcoch a podobne, tak aby ich vedel využívať mechanizmus slúžiaci na riešenie problému. Hovoríme mu **inferenčný mechanizmus**. Slúži na prehľadávanie bázy znalostí na základe známych faktov súvisiacich s riešeným problémom. Fakty sú uložené v **báze faktov** a sú nezriedka výstupom rastových modelov. Riešenie problémov často využíva neurčitost' a rôzne heuristické postupy. Do algoritmov sú implementované princípy fuzzy logiky alebo skupinovej algebry. Bližšie informácie o problematike možno nájsť v príslušných publikáciách (BONCZEK et al. 1981, ZADEH 1983, ZIMMERMANN 1987, POPPER a KELEMEN 1988, MAUS a KEYES 1991).

V ďalšom texte ukážeme princíp znalostných systémov použitých v prepojení na rastový model pomocou algoritmu implementovaného v modeli SIBYLA (FABRIKA 2006, 2007). Zadanie našej úlohy by znelo nasledovne: ohodnoňte komplexnú kvalitu porastu vzhľadom na kritérium produkcie, štruktúry a ekonomických výnosov, ak dosiahol

porast po rastovej simulácii nasledujúce parametre: zakmenenie 0,8; prírastok $17 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, podiel sortimentov kvality I až IIIA 35%, stredná hrúbka 35 cm, stredná výška 25 m, Arten-profil index 1,2; agregáčny index Clarka a Evansa 1,05; hodnotová produkcia $49790 \text{ Eur} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a hodnotový prírastok $1660 \text{ Eur} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Výstupom z rastovej simulácie hovoríme báza faktov. Na riešenie problému využijeme bázu znalostí, ktorá je zobrazená na obrázku 10.26. Ide o grafické prevedenie produkčnej siete. Obsahuje listové vrcholy A, B, C, D, E, F, G a H, medziuzly I, J a K a koreňový vrchol X. Pokúsime sa túto bázu znalostí vyjadriť slovné. Základom riešenia problému je hodnotenie troch kritérií formuláciou **produkčného pravidla**: Porast je kvalitný (X), ak je dobrá jeho naturálna produkcia (I, kritérium 1), ak je dobrá aj štruktúra lesa (J, kritérium 2) a ak je dobrý aj výnos z lesa (K, kritérium 3). Kritériá I až K budeme hodnotiť pomocou rôznych aspektov na základe ďalších pravidiel. Druhé pravidlo hovorí, že naturálna produkcia je dobrá (I), ak je dobré využitie produkčnej plochy (A), ak je zároveň dobré využitie prírastkového potenciálu (B), ak je súčasne dobrá kvalitatívna úroveň produkcie (C) a ak je zaistená aj bezpečnosť produkcie (D). Tretie pravidlo stanovuje, že štruktúra lesa je dobrá (J), ak je dobrá vertikálna a druhová štruktúra (E), ak je takisto vhodný typ horizontálneho zmiešania (F) a ak je zaistená aj bezpečnosť štruktúry (G). Štvrté pravidlo špecifikuje, že výnos z lesa je dobrý (K), ak je dobrý hektárový porastový výnos (H). Skúsme teraz produkčné pravidlá zapísať symbolickým algoritmom:

$$\begin{aligned} R_1: & A \wedge B \wedge D \rightarrow I \\ R_2: & E \wedge F \wedge G \rightarrow J \\ R_3: & H \rightarrow K \\ R_4: & I \wedge J \wedge K \rightarrow X \end{aligned}$$

Symbol \wedge vyjadruje väzbu konjunkcie „a“ („AND“). Na väzbu disjunkcie „alebo“ („OR“) sa používa symbol \vee . Ide o štyri produkčné pravidlá (R_1 až R_4), ktoré na ľavej strane (pred šípkou) obsahujú predpoklad a na pravej strane (za šípkou) obsahujú dôsledok. V troch prípadoch (R_1 , R_2 a R_4) sú predpoklady zložené z viacerých podmienok, medzi ktorými je väzba „AND“. Táto väzba sa označuje oblúkom spájajúcim hrany pravidla v grafe. Jedno pravidlo (R_3) obsahuje iba jednoduchý predpoklad s jednou podmienkou. V našej



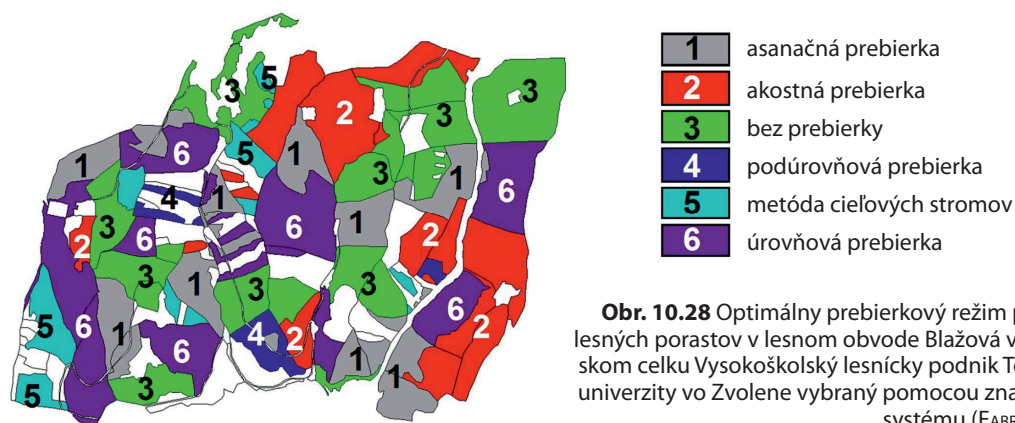
Obr. 10.27 Fuzzy funkcie pre hodnotenie aspektov A až H z obrázku 10.26. Fuzzy funkcie využívajú indikátory na osi x, ktoré transformujú na vierohodnosť na osi y. Vierohodnosť vyjadruje mieru istoty, že stav hodnoteného aspektu je dobrý (kladné hodnoty), resp. zlý (záporné hodnoty).

báze znalostí je vierohodnosť podmienok neurčitá, to znamená, že sa pohybuje od hodnoty -1 po hodnotu +1. Hodnota označuje mieru neistoty. Ak je rovná -1 ide o stopercentne zlý stav. Ak je rovná +1 ide o stopercentne dobrý stav. Hodnota 0 znamená najmenej istý stav (ani zlý, ani dobrý). Čím sa hodnoty viac blížila k -1, resp. +1, tým sme si istejší zlým, resp. dobrým stavom porastu. Keďže podmienky v predpokladoch sú neurčité, sú neurčité aj predpoklady. Vierohodnosť podmienok (p_i) sa transformuje do vierohodnosti predpokladu $P(p_i)$ na základe rovnice (REYNOLDS 1999):

$$P(p_i) = \min(p_i) + [\bar{p}_i - \min(p_i)] \cdot \frac{[\min(p_i) + 1]}{2} \quad (10.1)$$

Riešenie (inferencia) bázy znalostí spočíva v určení vierohodnosti podmienok (p_i) a ich transformácii do vierohodnosti predpokladov a dôsledkov, až po vierohodnosť konečného koreňového uzla X. Na odvodenie vierohodnosti podmienok sa používa v našej báze znalostí 7 fuzzy funkcií. Sú zobrazené na obrázku 10.27. Funkcie obsahujú na osi x indikátory jednotlivých aspektov. Ide o zakmenenie, potenciál celkového bežného prírastku, percento sortimentov I-III A, štihlость-

ný koeficient h/d, Arten-Profil index, agregáčny index Clarka a Evansa a hodnotové prírastkové percento. Indikátory sa určia na základe bázy faktorov vyprodukovanej rastovým simulátorom. Báza faktorov je doplnená o prírastkovú normu zistenú na základe rastových tabuliek ($20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) a úrokovú mieru v banke (2,5%). Potenciál celkového bežného prírastku sa určí porovnaním prírastku porastu a normy: $17:20=0,85$. Štihlостьný koeficient sa dopočíta na základe podielu strednej výšky a strednej hrúbky porastu: $25:35=0,714$. Hodnotové prírastkové percento sa odvodí na základe hodnotového prírastku a hodnotovej produkcie: $1660:49790 \cdot 100=3,33\%$. Použitím fuzzy funkcií (obrázok 10.27) dostaneme vierohodnosti podmienok na osi y: A=100%, B=56,9%, C=75%, D=100%, E=60%, F=80%, G=100% a H=100%. Použitím vzorca 10.1 sa dopracujeme ku vierohodnostiam medziľahlých uzlov: I=77%, J=76% a K=100%. Tieto vierohodnosti hovoria, že národná produkcia je na 77% dobrá, štruktúra leša je na 76% dobrá a výnosy z leša sú na 100% dobré. Finálnym výpočtom podľa vzorca 10.1 sa dopracujeme k celkovej kvalite porastu: X=83%. To znamená, že náš porast je na 83% dobrý.



Ob. 10.28 Optimálny prebierkový režim pre súbor lesných porastov v lesnom obvode Blažová v užívateľskom celku Vysokoškolský lesnícky podnik Technickej univerzity vo Zvolene vybraný pomocou znalostného systému (FABRIKA 2007).

Metodika založená na princípoch hodnotenia kvality porastu pomocou bázy znalostí umožňuje riešiť aj také problémy, ktoré využívajú neúplné a neisté fakty a pravidlá. Pomocou nej možno zohľadňovať aj navzájom protirečivé kritériá (napríklad ekonomika a ekológia). Ak vyhodnotíme kvalitu porastu pred simuláciou $[P(1)]$ a po simulácii $[P(2)]$ pomocou vzťahu 10.1, môžeme vypočítať zmenu kvality porastu pomocou rovnice:

$$P(\text{dif})\% = [P(2) - P(1)] \cdot 50 \quad (10.2)$$

Výsledok hovorí, o koľko percent sa zlepšil alebo zhoršil pôvodný stav. Týmto spôsobom sa dajú uskutočniť simulácie pre rozdielne scenáre alebo varianty, napríklad zmenené klimatické údaje alebo odlišné režimy obhospodarovania lesa, a vybrať optimálny scenár alebo variant. Na obrázku 10.28 uvádzame príklad výberu optimálneho prebierkového režimu v súbore lesných porastov (FABRIKA 2007).

10.5 Dátový sklad a clearinghouse v modelovaní lesa

Veľký rozsah produkovaných výstupných údajov z rastových modelov favorizuje okrem znalostných systémov aj využitie dátových skladov. Ide o technológiu informatiky, ktorá sa výrazne udomácnila v hospodárskej praxi bez ohľadu na odbor, a ktorá výrazne poznamenala aj vývoj rôznych komerčných produktov. Princíp tejto technológie a jej potenciál v modelovaní lesa vysvetlíme v tejto kapitole.

Dátový sklad (angl. *data warehouse*) možno definovať ako podnikovo štruktúrovaný depozitár údajov použitých na získavanie informácií a podporu rozhodovania (CHUA a GREEN 1999). Údaje v dátovom sklade musia spĺňať niekoľko základných vlastností. Sú subjektovo orientované. Zapisujú sa podľa predmetu záujmu a nie podľa aplikácie, v ktorej boli vytvorené. Sú integrované. Údaje týkajúce sa konkrétneho predmetu sa do dátového skladu ukladajú len raz. Sú časovo variabilné. Ukladajú sa do dátového skladu ako séria snímok, z ktorých každá reprezentuje určitý časový úsek. A napokon sú nemenné. V dátovom sklade sa zvyčajne nemenia a neodstraňujú, len sa v pravidelných intervaloch pridávajú nové. Údaje získavané pri modelovaní lesa spĺňajú všetky uvedené vlastnosti. Sú orientované podľa predmetu záujmu, napríklad údaje o scenároch exogénnych premenných (klimatické a pôdne charakteristiky), údaje o konceptoch hospodárenia (druhy a sila prebierok), údaje o štruktúre (štruktúralne indexy plôch), údaje o produkcii (produkčné parametre stromov) a podobne. Nie je podstatné v akom dátovom formáte a akým rastovým modelom boli zozbierané. Zároveň sa údaje o konkrétnom predmete ukladajú iba raz. Napríklad simulačná plocha nemôže mať odlišné geografické umiestnenie alebo východiskový stav stromu nemôže mať odlišné parametre hrúbky a výšky. Zároveň sú údaje striktné časovo viazané, pretože samotná povaha modelovania lesa je vo vyjadrení aktuálneho stavu a modelovaní zmien v čase. Rovnako platí aj podmienka nemennosti údajov. Údaje sa po preverení vierohodnosti výstupov modelu uložia do databanky v čase ich produkcie a nie je možné ich späťne meniť alebo modifikovať. Vyjadrujú určitý

stav, ktorý sa môže zmeniť až ďalšou simuláciou. Ďalšou dôležitou vlastnosťou údajov v dátovom sklade je prechod od relačnej štruktúry (pozri kapitolu 10.2) k multidimenzionálnym databázam (obrázok 10.29). Výstupy z rastových modelov lesa sa zväčša zbierajú ako tabuľky atribútov. Napríklad údaje o produkcii sa ukladajú do relačnej tabuľky, kde každý stĺpec vyjadruje nejaký atribút (napríklad hrúbka, výška a parametre koruny) a každý riadok sa vzťahuje na jeden konkrétny strom. V rámci procesu ETT (skratka zo slov extrakcia, transformácia, transport) sa údaje pretransformujú a transportujú do dátového skladu tak, aby bolo možné vytvoriť multidimenzionálne dátové štruktúry. Napríklad modelované výstupy sa vzťahujú na scenár (vývoj klimatických charakteristík) a koncept (druh a sila prebierok). Samozrejme táto viacrozmerná dátová štruktúra nie je samoučelná, ale poskytuje veľmi silný technologický aparát pre správu a analýzu databáz. Takýto prístup umožňuje potom odkrývať nové súvislosti, ktoré by pri klasickom prístupe boli omnoho viac skryté a teda ťažšie dostupné. V lepšom prípade by bolo potrebné na ich odhalenie vynaložiť omnoho viac úsilia a nákladov, v horšom prípade by to nebolo vôbec možné. Proces odhalovania súvislostí v dátovom sklade prebieha v niekoľkých krokoch.

Predspracovanie údajov (angl. *data preprocessing*) tvorí veľmi významný prípravný prvok pre analýzu v dátovom sklade. Slúži na tvorbu nových údajov odvodením zo známych údajov a rastových modelov a ich prípravu pre účely analýz. Úspešne zvládnutá prípravná časť tvorí predpoklad úspechu navrhnutého dátového skladu. Príprava údajov by mala prebiehať interaktívnym vstupom užívateľov dátového skladu v prepojení na dátové zdroje (inventarizácia lesa) a externé modely (modely lesa).

OLAP – online analytické procesy predstavujú budovanie multidimenzionálnych databáz (tzv. OLAP kociek), ktoré poskytujú dimenzionálny rámec pre podporu rozhodovania. OLAP je zároveň predpoklad pre ďalšie dolovanie údajov (angl. *data mining*) v dátovom sklade. Pri tvorbe viacrozmerných databáz sa vychádza z definície tabuliek dimenzií a tabuliek faktov. **Tabuľky dimenzií** sú relačné tabuľky definujúce rozmer sledovaných údajov. Môže ísť o tabuľku priestoru, ktorá definuje hierarchickú úroveň, napríklad ekosystém, populácia (porast), simulačná plocha a jedinec (strom), na ktorú sa modelovanie a simulácia

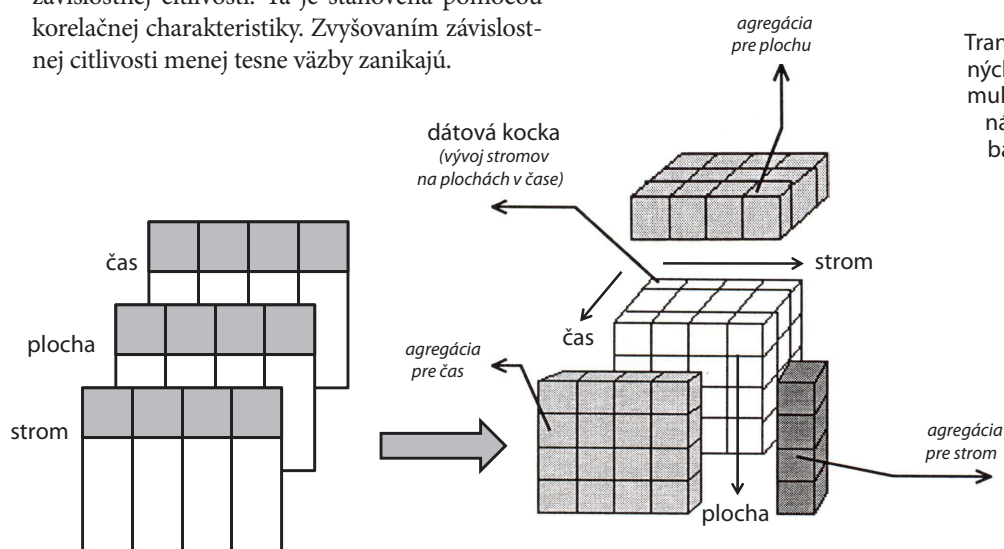
vzťahuje, alebo tabuľku času, ktorá definuje periódu (desaťročná alebo päťročná), rok, mesiac, deň a hodinu simulácie. **Tabuľky faktov** vystupujú ako relačné tabuľky popisujúce jednotlivé objekty záujmu. V modelovaní lesa môže ísť napríklad o tabuľky scenárov (vývoj exogénnych klimatických charakteristík), tabuľky konceptov (aplikované druhy a sily prebierok v stanovených časových intervaloch), tabuľky štruktúry (štruktúrne indexy simulačných plôch) a tabuľky produkcie (biometrické veličiny stromov). Tabuľky faktov môžu byť pôvodné (napríklad tabuľa popisujúca stavové veličiny stromov z meraní a simulácií) alebo odvodené prostredníctvom predspracovania dát (napríklad tabuľa odvodených sekundárnych alebo terciálnych stavových veličín). Tabuľky dimenzií a tabuľky faktov sú navzájom relačne previazané (obrázok 10.30). Tvorba uvedených tabuliek je zabezpečená procesom ETT pri transporte dát do dátového skladu a procesom predspracovania dát. Z takto pripravenej relačnej dátovej štruktúry sú generované OLAP databázy (dátové kocky), ktoré sú archivované do dátového skladu. Tvorba týchto viacrozmerných databáz je prevedená prostredníctvom OLAP Serveru. OLAP servery sú súčasťou moderných databázových serverov (napríklad Microsoft SQL Server alebo Oracle). Okrem archivácie výsledkov OLAP, servery poskytujú aj prehľady výsledkov vo forme **kontingenčných tabuliek**. Pri OLAP analýzach je možné vytvárať aj viacero multidimenzionálnych pohľadov a to podľa účelu ďalšieho dolovania dát. Napríklad jedna OLAP kocka môže byť vytvorená pre stromové charakteristiky (rozmer strom) v jednotlivých periódach prognózy (rozmer čas), pri rozličných spôsoboch obhospodarovania (rozmer koncept). Iná OLAP kocka môže byť vytvorená pre výsledky jednotlivých prognóz (rozmer scenár), pre jednotlivé typy ekosystémov (rozmer priestor), v jednotlivých periódach prognózy (rozmer čas). OLAP servery zároveň umožňujú agregovať alebo spodrobňovať úroveň dimenzie systémom zvaným **drill up** alebo **drill down**. Takto sa môže napríklad pri rozbere výsledkov prognózy prechádzať z úrovne porovnávania jednotlivých typov ekosystémov na porovnanie jednotlivých simulačných plôch a opačne.

Dolovanie údajov slúži na „vydolovanie“ súvislostí a predpovedanie budúceho trendu z multidimenzionálnych databáz. Proces prebieha v nasledujúcich krokoch:

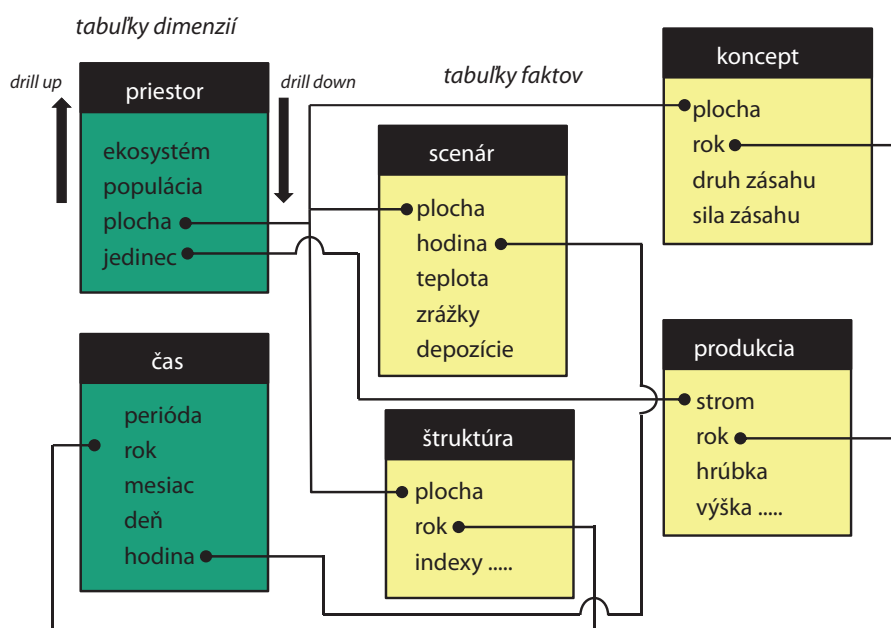
1. Výber OLAP kocky: Pred začiatkom procesu dolovania dát je potrebné vybrať OLAP databázu, na ktorej chceme proces previesť.
2. Výber analytického algoritmu: Po výbere OLAP kocky je potrebné špecifikovať analytický algoritmus. V súčasnosti väčšina OLAP serverov obsahuje možnosť „clusteringu“ a tvorby „decision trees“. „Clustering“ (viacrozmerné zhlukové diagramy) slúžia na odhaľovanie zhlukov dát vo viacrozmerných priestoroch. „Decision Trees“ (nevyvážené rozpadavé stromy) slúžia na odhaľovanie závislostí ako podklady pre predikciu.
3. Definícia použitých atribútov: Po výbere algoritmu musíme špecifikovať, ktoré atribúty použijeme pre dolovanie dát. Napríklad predpokladajme, že chceme predpovedať vývoj produkcie lesov. Zvolíme napríklad algoritmus „Decision Trees“. Teraz musíme určiť, ktoré atribúty budú vstupné a ktoré predikovatelné. Za vstupné zvolíme tie, pri ktorých predpokladáme, že ovplyvňujú produkciu, napríklad druh dreveniny, stanovište, vek, konkurenčné postavenie a podobne. Za predikovatelný zvolíme atribút hektárová zásoba.
4. Výsledné diagramy: OLAP server vygeneruje výsledné stromové diagramy. Tie kategorizujú produkciu podľa vstupných atribútov (úrovní) a to farebným odtieňom. Čím je odtieň sýtejší, tým je produkcia úrovne zvoleného atribútu väčšia.
5. Prehľadávač siete závislostí (angl. *Dependency Network Browser*): Znázorňuje závislosti medzi vstupnými a predikovatelnými atribútmi. Pomocou regulačnej lišty môžeme stanoviť prah závislostnej citlivosti. Tá je stanovená pomocou korelačnej charakteristiky. Zvyšovaním závislostnej citlivosti menej tesne väzby zanikajú.
6. Predikčný algoritmus: Na záver dolovania dát sa stanoví predikčný algoritmus a určí sa jeho presnosť na základe porovnania skutočnosti a predikcie. Predikčný algoritmus je možné potom využiť pre ďalšie účely. Výhodou postupu je, že je stanovený aj rámec presnosti.

Problematika dátových skladov a špecializovanejších dátových trhov je veľmi obsiahla a náročná. Spadá pod oblasť dobývania znalostí z databáz (angl. KDD – *Knowledge Discovery in Databases*). Ide o netriviálne získavanie implicitných, predtým neznámych a potenciálne užitočných informácií. Problematika je založená na využití informatiky, umelej inteligencie a štatistických metód. V prípade bližšieho záujmu preto odporúčame publikácie MITCHELL (1997), BERKA (2003), HAN et al. (2011) a WITTEN et al. (2011).

Vzhľadom na progresívne sa budujúce dátové sklady v rôznych oblastiach ľudskej činnosti dochádza k pokusom o štandardizáciu a sprehľadnenie obsahu údajových zdrojov. Medzi prvé počiny v oblasti štandardizácie údajov a budovaných dátových skladov patrí štandardizácia v oblasti geografických informácií. Tieto informácie sú produkované a archivované prostredníctvom geografických informačných systémov. Systémami GIS sa budeme zaoberať v nasledujúcej kapitole. Počiatky tejto štandardizácie siahajú do roku 1994, keď prezident USA Bill Clinton vydal vykonávací predpis „Coordinating Geographic Data Acquisition and Access. The National Spatial Data



Obr. 10.29 Transport relačných údajov do multidimenzionálnych databáz dátových skladov.



Obr. 10.30
Príklad multi-dimenzionálnej databázy vytvorenej prepojením tabuliek dimenzií a tabuliek faktov v rámci dátového skladu modelovania lesa.

Infrastructure“ (JEC Conference, The Hague, 1995). Vykonávací predpis zriadil NSDI (National Spatial Data Infrastructure), zastrešujúcu zákony, predpisy, štandardy, organizácie a dáta, ktoré zabezpečujú širokú dostupnosť vysoko kvalitných geografických dát a technológií. Pod NSDI boli vytvorené rôzne programy ako napríklad NSDI Data Clearinghouse, Geospatial Data Standards, Framework Data, NSDI Partnership. Ako reakcia na NSDI vznikla v Európe EGII (European Geographic Information Infrastructure). EGII bola založená dokumentom „The GI 2000 Discussion Document. Toward a European Geographic Information Framework“ v roku 1995. Táto iniciatíva vznikla vďaka EUROGI (European Umbrella Organisation for Geographical Information). EGII plní rovnaké funkcie ako NSDI, ale v európskych podmienkach. Americká a európska iniciatíva NSDI a EGII vydáva normy pre štandardizáciu geografických metadát. Úlohou **metadát** je popísať geografické databázy podľa jednotných predpisov bez ohľadu na zdroj a miesto ich vzniku. Následne vydal Európsky parlament 14. marca 2007 smernicu Inspire, ktorou zriaďuje infraštruktúru pre priestorové informácie v Európskom spoločenstve. Zaoberá sa problémami súvisiacimi s dostupnosťou, kvalitou, organizáciou, prístupnosťou a zdieľaním priestorových informácií, na ktoré sa svojim charakterom často vzťahujú aj výstupy rastových modelov lesa.

Zároveň vznikajú centrá pre clearinghouse. **Clearinghouse** má za úlohu využiť štandardizované metadáta a internet pre uľahčenie vyhľadávania a prístupu ku geografickým dátam. Zodpovedá za dokumenty o geografických dátach a za dodržanie metadátových štandardov a zabezpečuje ich transfer do internetu. Množstvo softvérových nástrojov podporuje vyhľadávanie a prístup k metadátam. Týmto spôsobom môžu byť získané, kontrované a analyzované informácie o existujúcich geografických údajoch ešte pred ich samotným získaním (resp. nákupom). Tento prístup sprehľadňuje informačný trh a šetrí investície. Ako bezprostredná reakcia na tento trend vznikajú aj centrá pre Clearinghouse údajov z **inventarizácie lesov**. Príkladom je zriadenie tzv. „Forest Inventory and Analysis Data Base Retrieval System“. Systém bol založený organizáciou USDA Forest Service a slúži ako centrum pre získanie a analýzu údajov inventarizácie lesov USA. Sprístupňuje inventarizačné metadáta širokej verejnosti prostredníctvom premyslenej webovej aplikácie. Podobné centrá pre clearinghouse vznikajú aj v krajinách EÚ. Tieto centrá tvoria často aj zdroj inventarizačných údajov pre účely modelovania lesa. V súvislosti s modelovaním lesa dochádza taktiež k štandardizácii. Úsilie sa sústreďuje skôr na zjednotenie popisu rastových simulačtorov. S toto témou sa stretneme v kapitole 10.7. Modely totiž pracujú na rôznej priestorovej a časovej úrovni, pričom využívajú rôznu škálu vstupných

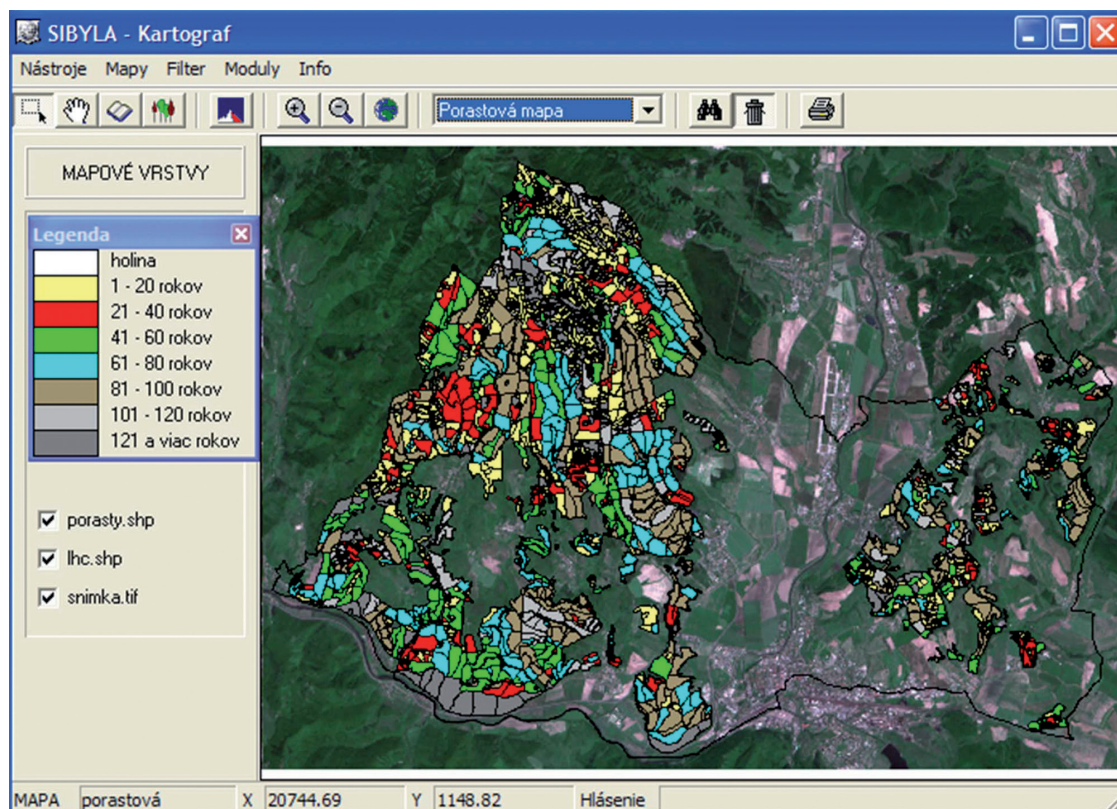
údajov a produkujú iný rozsah výstupných údajov. To všetko sťažuje prehľad a interpretáciu výsledkov ako aj integráciu do dátových skladov. Ako vhodný príklad pre clearinghouse v **modelovaní lesa** možno uviesť portál IEFC.NET.

10.6 Geografický informačný systém v modelovaní lesa

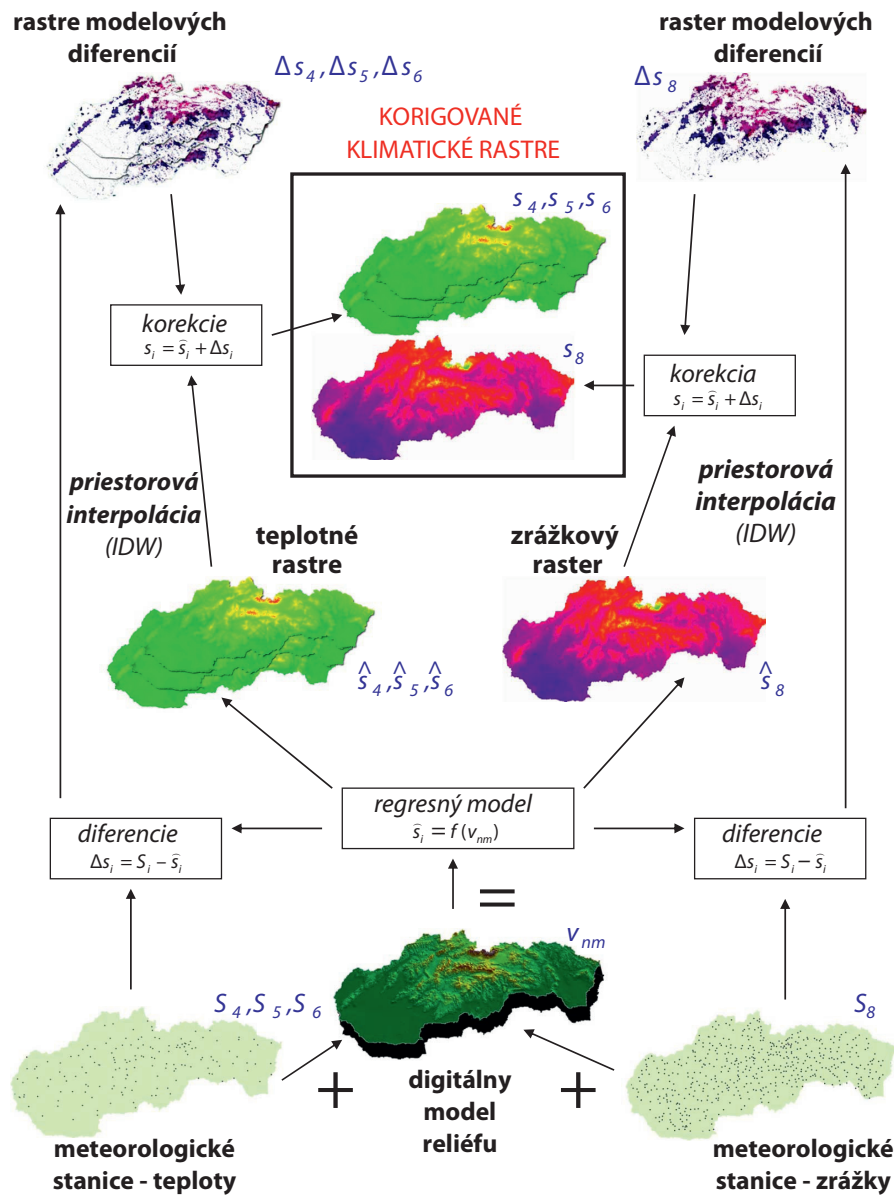
Rast stromov a porastov je ovplyvnený zemepisnou polohou (zemepisná šírka a dĺžka, nadmorská výška) a charakterom terénu (sklon, expozícia, premenlivosť). Kvôli týmto vlastnostiam sa na modelovanie lesa hodí ďalšia informačná technológia, ktorá sa zaoberá geografickými informačnými systémami, v skratke GIS. Ide o systémy, ktoré slúžia na získavanie, ukladanie, upravovanie, obhospodarovanie, analyzovanie a zobrazovanie všetkých foriem geo-

grafických údajov. Údaje môžu vystupovať vo vektorevej, rastrovej či databázovej podobe, alebo môže ísť o modely povrchu. Geografické informačné systémy využívajú veľmi rozsiahlu množinu nástrojov. Z mnohých spomenieme dopyty na geografickú databázu, analýzy priestorových vzťahov, mapovú algebru, vzdialenostné analýzy, analýzy sietí, analýzy obrazov, analýzy digitálnych modelov povrchu alebo geoštatistické analýzy. Ide o zložitú a širokú problematiku, o ktorej sa možno dočítať v príslušných publikáciách (BILL a FRITSCH 1991, MAGUIRE et al. 1991, TUČEK 1998, HLÁSNY 2007). V tejto kapitole sa zameriame iba na tie črty a vlastnosti GIS, ktoré sú vhodné aj v modelovaní lesa.

Obhospodarovanie lesa je vždy viazané na geografický priestor. Lesné porasty sú umiestnené do konkrétnej geografickej polohy. Ich poloha často limituje hospodárske postupy. Tie sú ovplyvňované charakterom terénnych a gravitačných pomerov, sprístupnením porastov, klimatickými



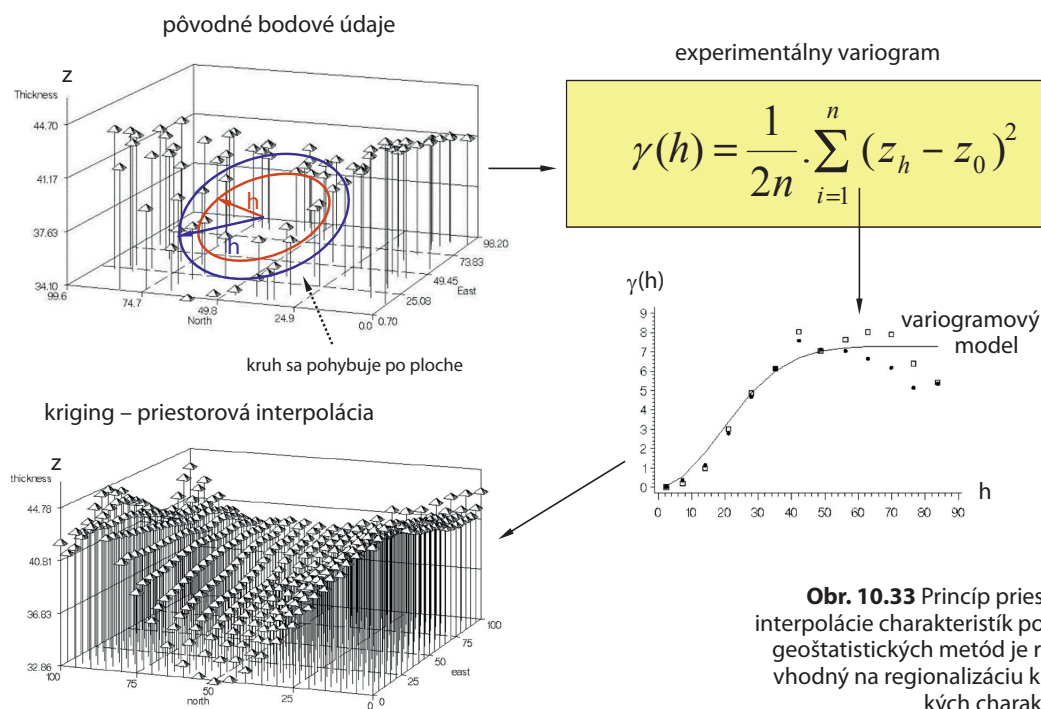
Obr. 10.31 Modul Kartograf z programového riešenia rastového simulátora SIBYLA (FABRIKA 2005). Ide o komponent s vlastnosťami geografického informačného systému. Na nástrojovej lište (ikona so stromčekmi) a v hlavnom menu (položka „Moduly“) obsahuje možnosť spustenia rastovej simulácie pre vybraný lesný porast alebo skupinu porastov.



Obr. 10.32 Regionalizácia klimatických charakteristík pomocou nástrojov GIS pre účely klimatických vstupov do rastového simulátora SIBYLA (FABRIKA et al. 2005).

a pôdnymi vlastnosťami vyplývajúcimi z ich lokalizácie, ako aj stavom susedných porastov. A tak sú zámery spojiť rastové modely s geografickými informačnými systémami iba logickým dôsledkom (FABRIKA 2006, 2007, SUROVÝ et al. 2007). Najčastejšie ide o spojenie rastových simulátorov s GIS na báze **vektorových údajov**. Takýto informačný systém obsahuje mapu lesných porastov. Hranice lesných porastov sú definované vektorovými polygónmi. Každý polygón obsahuje identifikátor plochy. V databáze GIS sú obsiahnuté záznamy, ktoré sa viažu na jednotlivé plochy.

Veľmi často ide o výsledky inventarizácie lesa s informáciami o drevinách, ich zastúpení, stredných charakteristikách, zásobe a podobne. Na základe týchto údajov sú pripravené vstupné informácie pre rastový simulátor, napríklad vygenerované údaje jednotlivých stromov (pozri kapitolu 6.10). Rastový simulátor je napojený na databázu, pričom simulačné plochy obsahujú vzorku každého lesného porastu a majú identifikátor zhodný s príslušným lesným porastom. V prostredí geografického informačného systému sa potom prevádza výber lesných porastov. Je možné vybrať skupinu

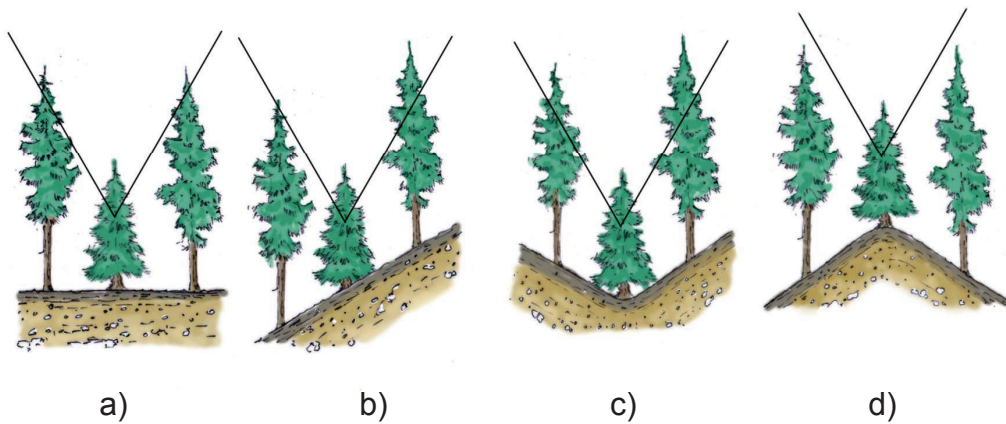


Obr. 10.33 Princíp priestorovej interpolácie charakteristík pomocou geoštatistických metód je rovnako vhodný na regionalizáciu klimatických charakteristík.

lesných porastov na základe zvolených atribútov (resp. ich kombinácie), napríklad pomocou jazyka SQL. Skupina porastov sa dá vybrať aj priamo viacnásobným výberom porastov z mapy na obrazovke počítača. Dá sa zvoliť aj jediný porast kliknutím na požadovaný polygón. Pre takto vybrané porasty sa potom spustia rastové simulácie, buď priamo cez definovanú položku menu alebo cez tlačidlo na nástrojovej lište (obrázok 10.31), alebo nepriamo spustením rastového simulátora z disku počítača. Po ukončení rastovej simulácie sa výsledky integrujú do databázy prepojenej s polygónmi porastov. Takto sa dajú produkovať tematické mapy vývoja zvolených charakteristík v čase a prevádzať následné analýzy.

Okrem priameho prepojenia rastových modelov s GIS sa táto technológia využíva aj na rôzne analýzy, ktoré súvisia s prípravou vstupných údajov pre rastové simulácie. Často ide o využitie **rastrových údajov**. Vhodným príkladom je regionalizácia klimatických charakteristík. Metódu si demonštrujeme pomocou postupu využitého v modeli SIBYLA (FABRIKA et al. 2005). Postup je znázornený na obrázku 10.32. Vstupom do regionalizácie sú bodové údaje merania zrážok a teplôt na meteorologických staniách Slovenska (522 staníc pre zrážky a 175 staníc pre teploty). Regionalizácia slúži pre odvode-

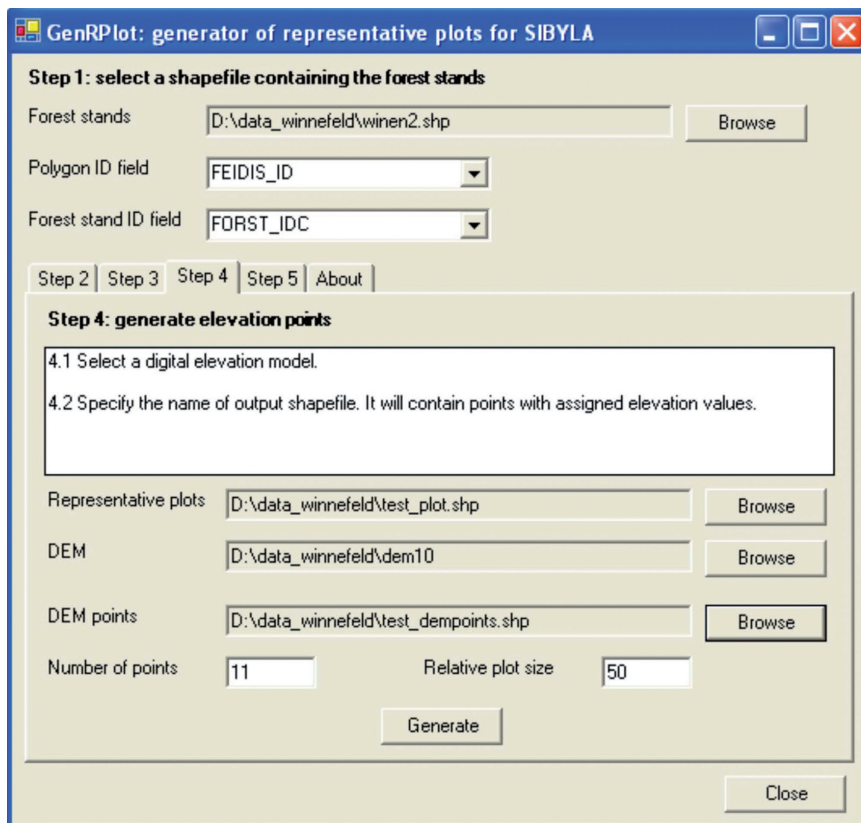
nie nasledujúcich klimatických premenných: počet dní v roku s priemernou dennou teplotou vyššou ako 10 °C (S_4), ročná teplotná amplitúda, to znamená rozdiel medzi maximálnou priemernou mesačnou teplotou a minimálnou priemernou mesačnou teplotou (S_5), priemerná teplota v mesiacoch apríl až september (S_6) a priemerný úhrn zrážok za mesiace apríl až september (S_8). Zároveň máme k dispozícii digitálny model reliéfu Slovenska. Ide o rastrový model, to znamená, že Slovensko je rozdelené na pravidelnú sieť pixlov so zvolenou veľkosťou (90 m x 90 m) a v každom pixli máme údaj o priemernej nadmorskej výške. Urobíme regresný model medzi nadmorskou výškou a hľadanou klimatickou charakteristikou ($S_4 - S_5, S_8$). Na model použijeme údaje z meteorologických staníc, pre ktoré poznáme nadmorskú výšku ako aj skutočnú klimatickú charakteristiku. Je známe, že so zväčšovaním nadmorskej výšky sa menia aj klimatické údaje, napríklad klesajú teploty a stúpajú zrážky. Pomocou odvodených regresných modelov a modelu reliéfu Slovenska odvodíme klimatické rastre pre všetky pixle Slovenska. Vzhľadom na to, že pre meteorologické stanice máme údaje skutočné, ale aj údaje odvodené z regresného modelu, môžeme vypočítať ich diferencie. Získame diferencie pre všetky meteorologické stanice. Diferencie pokrývajú len



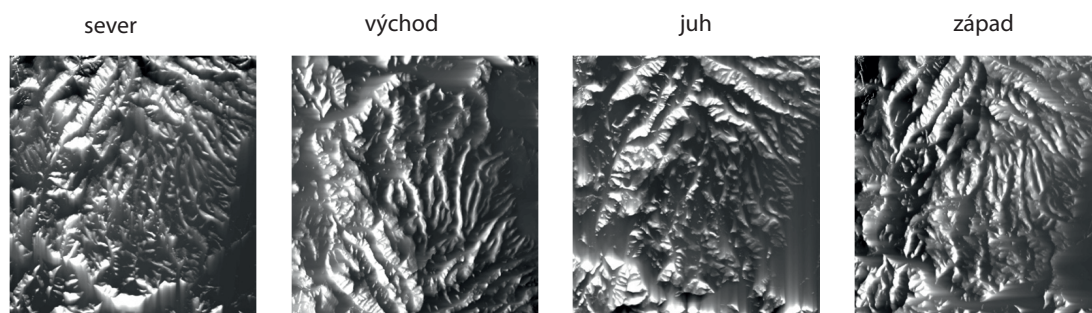
Obr. 10.34 Vplyv pôdneho reliéfu na modelovanie konkurencie stromov. Pri hodnotení konkurencie stromu pri tých istých dendrometrických parametroch (hrúbky a výšky stromov, parametre korún a pozície stromov) dochádza k rôznemu konkurenčnému tlaku v závislosti od charakteru terénu: **a)** stromy na rovine, **b)** stromy na rovnomernom svahu, **c)** stromy v údolnom teréne, **d)** stromy v hrebeňovom teréne.

tie pixle Slovenska, na ktorých sa vyskytujú meteorologické stanice. Preto prevedieme priestorovú interpoláciu diferencií na všetky pixle Slovenska. Väčšina softvérových GIS prostredí obsahuje niekoľko nástrojov na takúto interpoláciu. Stačí zvoliť

vhodný spôsob. V tomto prípade ide o interpoláciu spomedzi hodnôt šiestich najbližších staníc ku každému pixlu metódou IDW (*Inverted Distance Weighted*). Získame rastre diferencií pokrývajúce všetky pixle Slovenska. Pôvodné klimatické rastre



Obr. 10.35 Modul GenRPlot (KOREN 2007) na automatické odvodenie modelu reliéfu simulačných plôch lesných porastov pre modelovanie ich vývoja pomocou modelu SIBYLA.



Obr. 10.36 Príklad štyroch z ôsmich rastrových vrstiev pre odvodenie prevýšenia horizontu (KOREŇ 2010b). Rastre zobrazujú štyri svetové strany: sever, východ, juh a západ. Na základe polohy pixla simulačnej plochy sa určia hľadané prevýšenia. Prevýšenia sú archivované v hodnotách pixlov. Rastre slúžia na modelovanie priameho slnečného žiarenia pre zjemnenie rastových simulácií v modeli SIBYLA.

odvodené regresnou analýzou korigujeme rastrom diferencií. Korekciu urobíme súčtom rastrov (metóda mapovej algebry). Dostaneme korigované klimatické rastre pre všetky štyri modelované klimatické charakteristiky. Tieto rastre zachovávajú hodnoty merané na meteorologických stanicích a zároveň určujú aj hodnoty pre body mimo meteorologických stanic, ktoré zohľadňujú nadmorskú výšku ako aj priestorovú variabilitu. Stačí zvoliť pixel, na ktorom sa vyskytuje simulačná plocha, a na základe jeho polohy určíme všetky vstupné hodnoty do rastovej simulácie.

Pre účely priestorovej interpolácie sa využívajú aj metódy **geoštatistiky** (pozri UPTON a FINGELTON 1989, KÖHL a GERTNER 1992, WACKERNAGEL 1998, SCHEER 2002). Vychádzajú z princípu zobrazeného na obrázku 10.33. Princíp hovorí, že body ležiace blízko seba majú menšiu variabilitu hodnôt a väčšiu autokoreláciu ako body vzdialenejšie. Pre každý známy bod územia (napríklad meteorologickú stanicu) zvolíme smer hodnotenia variability, alebo hodnotíme variabilitu bez ohľadu na smer. Postupne zväčšujeme vzdialenosť. V jednotlivých vzdialenostných pásmach od každého známeho bodu určujeme diferencie hodnôt. Na základe diferencií vypočítame ich variabilitu. Tým získame experimentálny variogram. Na osi x obsahuje vzdialenosti a na osi y variabilitu v danej vzdialenosti. Experimentálny variogram vyrovnáme variogramovým modelom. Pomocou variogramového modelu uskutočníme priestorovú interpoláciu nazývanú *kriging* pre všetky pixle rastra.

V modelovaní lesa sa často využívajú aj **modely povrchu**. Môžu vystupovať vo forme vektorovej

(napríklad modely TIN – *Triangulated Irregular Network*) alebo rastovej. Ukážeme si príklad využitia oboch druhov. V prvom prípade ide o definovanie modelu reliéfu, ktorý slúži pre určenie vzájomnej polohy stromov a teda ich konkurenčných vzťahov. Model reliéfu popisuje povrch pôdneho povrchu, na ktorom sú umiestnené stromy. Reliéf zohráva významnú úlohu pri stanovení sily konkurenčného tlaku. Význam sklonu a charakteru terénu v modelovaní konkurenčných vzťahov možno demonštrovať na obrázku 10.34. Aj napriek tomu, že majú stromy úplne rovnaké parametre (hrúbky, výšky, veľkosť a tvar korún, vzájomné pozície), mení sa konkurenčný tlak na prostredný strom. Zvyšuje sa v smere od polohy na hrebeni, cez polohu na rovine, polohu na rovnomernom svahu, až po polohu v údolí. Kľúčovým problémom pre zohľadnenie týchto javov je modelovanie reliéfu. Simulačné plochy predstavujú zväčša iba určité reprezentatívne časti lesných porastov a tak konštrukcia reliéfu naráža na metodické problémy (PAPAJ 2004). Jednou z možností je náhodný výber časti terénu v rámci porastu s veľkosťou simulačnej plochy alebo umiestnenie tejto časti do ťažiska porastu. Objektívnejším postupom je zostrojenie opísaného alebo vpísaného útvaru (napríklad štvorca alebo obdĺžnika) do plochy porastu, vyrezanie tejto časti reliéfu a jeho zmenšenie na veľkosť simulačnej plochy vrátane zachovania pomerov sklonu. Dobrým príkladom na využitie charakteru terénu pre modelovanie konkurenčných vzťahov je model SIBYLA (FABRIKA 2005). Na modelovanie reliéfu využíva štvorcový plátový model (pozri kapitolu 9.4.2). Plátový model je formovaný na základe pravidelnej siete bodov s odvodenou nadmorskou výškou.

Využívajú sa nástroje geografického informačného systému ArcGIS, na základe ktorých bol vytvorený modul GenRPlot (KOREŇ 2007, obrázok 10.35).

Využitie rastrového modelu povrchu si demonštrujeme na druhom prípade, v ktorom ide o odvodenie horizontu pre modelovanie slnečného žiarenia (pozri kapitolu 8.1.1 a obrázok 8.3). Model bol odvodený pre účely procesného zjemnenia rastrového simulátora SIBYLA, konkrétne pre modelovanie veľkosti slnečného žiarenia (FABRIKA a MERGANIČ 2010). Na základe digitálneho modelu reliéfu celého Slovenska v sieti 90 m x 90 m, boli v prostredí ArcGIS (KOREŇ 2010b) odvodené uhly prevýšenia horizontu v smere od stredu obrazového prvku (pixela) gridu na 8 svetových strán (sever, severovýchod, východ, juhovýchod, juh, juhozápad, západ a severozápad). Uhly prevýšenia boli určené na základe modelovania dotyčnice k terénu v určenom smere. Výsledkom analýzy je osem rastrových vrstiev (jedna pre jednu svetovú stranu), kde každý pixel (90 m x 90 m) obsahuje prevýšenie horizontu. Príklad rastrových vrstiev je zobrazený na obrázku 10.36. Na základe zemepisnej súradnice polohy vybraného porastu sa potom z rastrovej vrstvy vyberie príslušný pixel a odčítajú sa prevýšenia (uhly) horizontu pre všetkých osem smerov. Pomocou kubických splajnov (pozri algoritmus v kapitole 6.1.2) sa potom odvodí spojitý model horizontu pre každý azimut.

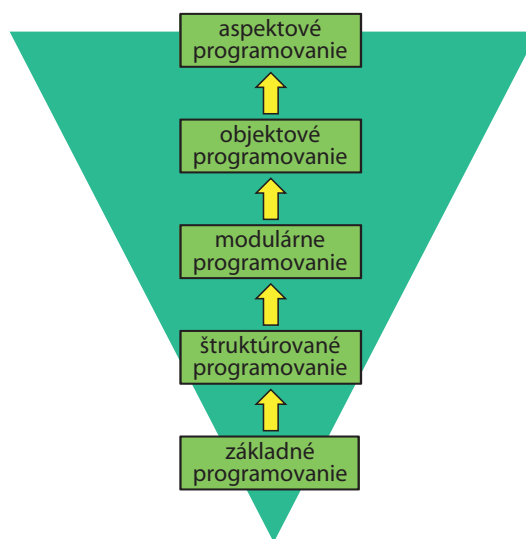
10.7 Programovanie modelov lesa

Súčasnú rastové modely sú príliš zložité na to, aby mohli existovať ako bežné tabuľky alebo súbor rovníc, ktorý by sa dal riešiť pomocou vreckových kalkulačiek. Vznikajú špecializované počítačové programy, ktoré majú prispôbené užívateľské prostredie a funkcionality. Vývoj týchto produktov je kľúčovou oblasťou počítačom podporovaného modelovania lesa. V rámci vývoja softvéru ide o veľmi náročnú prácu, ktorá vyžaduje využívanie komplikovaných algoritmov a techník. Okrem zložitých matematických postupov sa využívajú aj pokročilé funkcie databázovej technológie, technológie GIS a počítačovej grafiky. V prípade využitia virtuálnej reality ide o programovanie, ktorého náročnosť sa dá prirovnať k vývoju počítačových hier. V tejto kapitole sa dotkneme niektorých problémov súvisiacich s programovaním modelov lesa.

Vývoj softvéru simulátorov lesa sa riadi určitým postupom, zvlášť ak ide o systematický cieľový vývoj. Na začiatku vývoja sa pripravujú samotné algoritmy a ich vzájomná následnosť. Veľmi často sa pritom využívajú prostredia **matematických balíkov**, v ktorých sa dajú jednotlivé algoritmy vyskúšať. Predovšetkým sa skúšajú reakcie algoritmov na vstupy a celkové chovanie modelu. Do úvahy prichádzajú programy ako sú Matlab, Mathcad alebo Mathematica. Po preverení algoritmov sa pripravuje dátový a funkčný model simulátora lesa. **Dátový model** zahŕňa štruktúru vstupných a výstupných údajov. Obsahuje databázové tabuľky a väzby medzi nimi. Na úrovni tabuliek definuje jednotlivé položky (atribúty) a ich typy (domény). Definuje kľúčové položky (indexy), ktoré slúžia na identifikáciu, vyhľadávanie a triedenie záznamov ako aj vzájomné prepájanie tabuliek. Na dokumentáciu dátového modelu sa využívajú rôzne diagramové techniky, napríklad ERD, E-R, ERA alebo ELH diagramy. Popis diagramových techník možno nájsť v publikáciách CHEN (1976), RUSSEV et al. (1993) a FABRIKA (2008). Dátový model teda združuje exogénne, intermediárne a stavové premenné, prípadne aj systémové parametre modelu (pozri kapitolu 5.1.1). **Funkčný model** sa zameriava na samotný matematický postup modelovania lesa vrátane prepojenia na dátový model a interakciu s užívateľom pomocou užívateľského prostredia. Na dokumentáciu funkčného modelu sa takisto využívajú vhodné diagramové techniky, napríklad vývojové diagramy, štruktúrne diagramy, diagramy HIPO, DFD alebo diagramy Yourdona a Constantinea. Popis diagramových techník možno nájsť v príslušných normách (STN 369030) alebo publikáciách VOLKER a SCHWILL (1986), RUSSEV et al. (1993), DE MARCO (1978), YOURDON a CONSTANTINE (1979), FABRIKA (2008). Vývojové diagramy sme použili napríklad na obrázku 2.38 v kapitole 2.2.5 a na obrázkoch 6.108 a 6.109 v kapitole 6.10.

Fyzický vývoj simulátora lesa spočíva v písaní **zdrojového kódu** programu. Ide o zápis programu pomocou symbolických výrazov zvoleného programovacieho jazyka. Buď ide o jazyky interpretačné alebo kompilačné. **Interpretačné** jazyky fungujú na preklade zdrojového kódu do strojového kódu počítača postupne príkaz za príkazom pri každom spustení programu. Sú síce pomalšie, ale zato sú nezávislé na platforme a operačnom systéme počítača. Veľmi obľúbeným bol v minulosti jazyk BASIC a v súčasnosti je to jazyk JAVA. **Kompilačné** jazyky prekladajú zdrojový kód už pri vývoji programu. Sú prelo-

žené do strojového kódu pred samotným spustením programu. Takéto simulátory sú rýchlejšie ale závislé na platforme a operačnom systéme. Medzi obľúbené patria jazyky typu C a PASCAL. Z hľadiska úrovne programovania sa využíva základné, štruktúrované, modulárne, objektové alebo aspektové programovanie. **Základné** programovanie obsahuje jeden programový blok, v ktorom sa nachádza zoznam za sebou nasledujúcich príkazov. Príkazy sa vykonávajú v takej postupnosti, ako sú v programe uvedené a to od začiatku až do konca programu. Výnimkou sú iba príkazy odskoku na definovaný príkaz, ktoré spôsobia, že sa pozícia v programe vráti na tento príkaz a postupnosť krokov pokračuje od tejto pozície. Typickým príkladom takéhoto programovania je jazyk BASIC, ktorý obsahuje príkazy vo forme očíslovaných riadkov a odskoky zabezpečuje príkaz GOTO „číslo riadku“. **Štruktúrované** programovanie delí program na programové bloky, ktoré sú vnorené do hlavného programu. Dokonca je povolené štruktúrovať program na viacerých úrovniach a teda vkladať bloky do blokov. Programové bloky sa oddeľujú vyhradenými syntaktickými jednotkami (príkazmi). Bloky môžu mať rôznu funkciu. Napríklad môžu vyčleňovať časť s definíciami typov a konštánt, či deklaráciami premenných, alebo môžu definovať vykonateľné programové časti. Typickými vykonateľnými blokmi sú procedúry a funkcie. Procedúra je programový blok, ktorý obsahuje samostatne vykonateľnú časť. Nazývame ju podprogram. Procedúra má svoj názov a zoznam vstupných parametrov a funguje potom ako nový príkaz jazyka. Takto môže programátor definovať svoje vlastné príkazy a používať ich (volať) podľa potreby. Funkcia je špeciálnym prípadom procedúry a jej typickou vlastnosťou je, že po jej ukončení vracia hodnotu, ktorej typ je vopred definovaný užívateľom. Vrátená hodnota sa potom môže priamo uložiť do nejakej premennej priradením funkcie. **Modulárne** programovanie je typické tým, že sa vytvárajú samostatné programové jednotky, ktoré môžu vzájomne zdieľať svoj kód. Realizujú sa najčastejšie ako samostatné súbory so zdrojovým kódom. Tieto jednotky väčšinou obsahujú tematicky orientovaný zoznam definovaných typov a konštánt, deklarovaných premenných, procedúr a funkcií. Napríklad to môže byť modul na modelovanie konkurencie alebo modul na modelovanie mortality. Programové moduly potom môžu vzájomne zdieľať svoj kód, to znamená, že z jedného modulu môžeme volať programové bloky iného modulu. **Objektové** programovanie je typické tým, že sa vytvárajú triedy



Obr. 10.37 Evolučný princíp úrovne programovania. Vyššia úroveň programovania obsahuje všetky črty nižších úrovní.

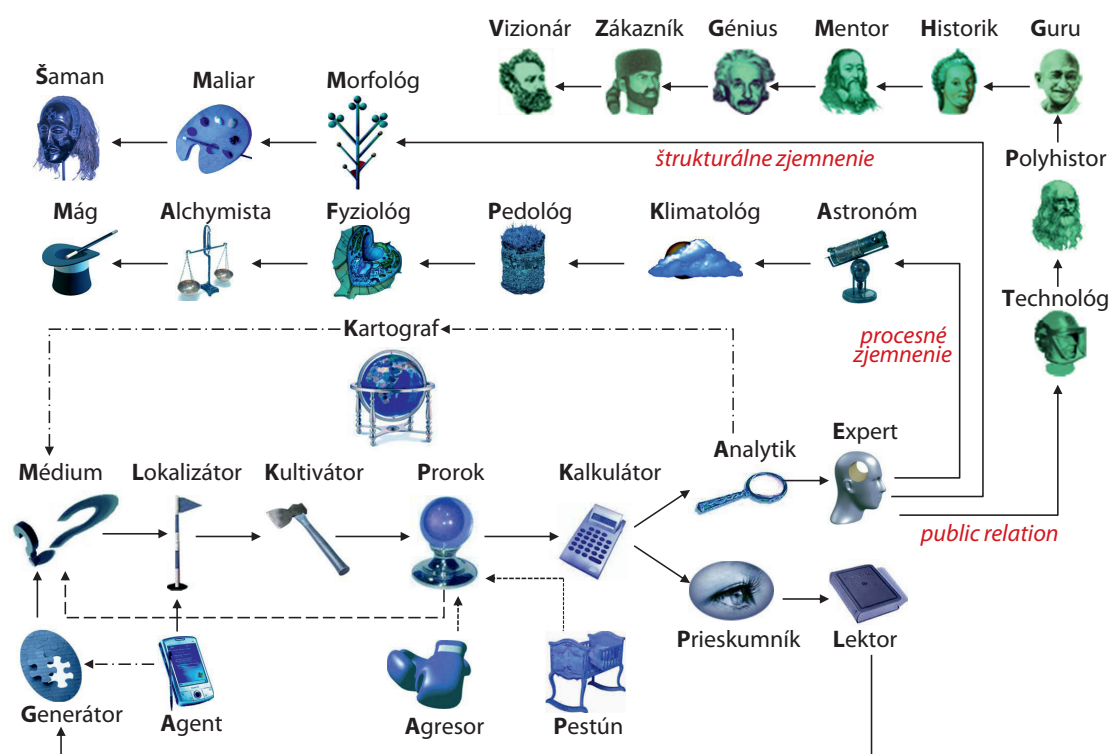
dy objektov, ktoré v sebe zahŕňajú (zapuzdrujú) dáta, metódy a vlastnosti. Tieto triedy majú špeciálne postavenie alebo funkčnosť a definujú množinu všetkých entít, ktoré využívajú toto postavenie alebo majú danú funkčnosť. Triedy potom vytvárajú hierarchický „rodokmeň“, pričom platí, že trieda odvodená od svojho predchodcu dedí všetky jeho vlastnosti. Odvodenej triede hovoríme „potomok“ a predchodcovi „rodič“ alebo „predok“. Potomkovia však môžu aj pozmeniť svoje vlastnosti získané od predka a to modifikáciou, ktorej hovoríme polymorfizmus. V programe sa potom inicializujú objekty (instancie), ktoré znamenajú konkrétny výskyt danej triedy objektov. Jednotlivé objekty reagujú na seba prostredníctvom tzv. udalostí. Je to konkrétna situácia, na ktorú je objekt citlivý. Ak sa takáto situácia vyskytne, objekt sa aktivuje a vykoná svoj určitý programový kód. Udalosťou môže byť napríklad kliknutie kurzorom myši na tlačidlo alebo výber položky z menu programu a podobne. **Aspektové** programovanie sa snaží pomôcť programátorovi vytvoriť takzvané koncerty, teda rozbiť program na jasné časti, ktoré sa čo najmenej prekrývajú svojou funkcionalitou. Zameriava sa na modularizáciu a zapuzdrenie prierezových koncertov. Predchádzajúce programovacie úrovne od procedurálnej až po objektovú sa tiež zameriavali na oddelenie časti kódu do samostatných častí, napríklad procedúry, moduly, triedy a podobne. Niektoré entity sa však veľmi ťaž-

ko oddelujú do samostatných častí. Hovoríme im prierezové koncerty (angl. *crosscutting concerns*), pretože existujú vo viacerých častiach programu. Implementácia aspektového programovania spočíva na zapuzdrení týchto prierezových koncertov predstavením nového konštruktora zvaného aspekt. Aspekt môže pozmeniť chovanie základného kódu neaspectovej časti programu aplikovaním takzvaného dodatočného chovania (angl. *advice*) na prípojné body programu (angl. *pointcut*). Prípojné body môžu pozostávať napríklad zo všetkých referencií na určitú sadu vlastností. Pri jednotlivých úrovniach programovania platí evolučný princíp (obrázok 10.37), to znamená, že vyššia úroveň je rozvinutejšou verziou úrovne nižšej. V konečnom dôsledku teda platí, že evolučne najvyšší jazyk obsahuje v sebe všetky črty od najnižšej úrovne až po danú úroveň.

V súčasnosti sa na uľahčenie rutínnej programátorskej činnosti používajú špecializované softvérové prostredia, ktoré sa nazývajú **RAD nástroje**. Ide o skratku z anglických slov *Rapid Application Development*, čo znamená nástroje na rýchly vývoj aplikácií. Tieto programy obsahujú premyslené užívateľské prostredie, ktoré pomáha vyvíjať softvér jednoduchou a prehľadnou formou. Napríklad pomocou vizuálne orientovaného spôsobu asistuje vývojárovi pri skladaní programu z preddefinovaných **komponentov**. Komponenty podľa potreby modifikuje a dopĺňa o požadovanú funkcionálnosť. Dôležité je, že sa automaticky generuje kostra zdrojového kódu. Do tejto kostry sa potom dopĺňajú typy, premenné, procedúry, funkcie a vlastnosti, respektíve sa pripája vykonávací kód na príslušné udalosti objektov. Takýmto spôsobom sa programovanie stáva široko prístupné aj pre menej skúsených užívateľov a nie je výsadou iba zbehlých programátorov. V súčasnosti sa dokonca v modelovaní lesa ukazuje, že práve vývojári z radu lesnícky orientovaných odborníkov tvoria z hľadiska funkčnosti najlepšie simulátory lesa. Dokonca vzhľadom na zložitosť a komplexnosť problémov prevažujú nad špecializovanými informatikmi. Najlepšia je kombinácia lesnícky orientovaných špecialistov a informatikov vo forme tímovej práce. Z najčastejšie využívaných RAD nástrojov pre vývoj simulátorov lesa spomenieme Visual Basic, Visual C++ a Delphi.

Úroveň programovania a použité RAD nástroje popisujú prístup vývojárov simulátorov k programovaniu a sú pre užívateľov simulátorov často skryté. Z hľadiska užívateľov programov je dôležité, aký charakter majú výsledné simulátory lesa. Bud'

ide o klasické desktopové (tzv. stand-alone) aplikácie, alebo o aplikácie, ktoré sú viazané na sieťové prostredie. **Desktopové** aplikácie sú umiestnené na konkrétnom počítači, pričom všetok softvér je integrovaný do prostredia jeho operačného systému. Spúšťa sa z daného počítača a z daného operačného systému. Softvér je fyzicky inštalovaný v hardvéri počítača a je na ňom závislý (napríklad SILVA, SIBYLA, MOSES, BWINPro, GOTILWA+, Biome-BGC, PICUS, GroIMP a podobne). Sieťovo orientované simulátory lesa môžu využívať hrubých klientov, tenkých klientov alebo nulových klientov. **Hrubý klient** je softvér na počítači (klientovi) v sieťovej architektúre klient-server, ktorý sa spúšťa v rámci operačného systému daného klienta a jeho funkcionálnosť prevažuje na strane klienta. Nazýva sa aj silný klient. Názov pochádza z anglických ekvivalentov *fat*, *thick*, *heavy* alebo *rich client*. Zväčša ide o aplikácie, ktoré využívajú údaje alebo databázy uložené na serveri, pričom samotný klient prevádza operácie s nimi. Typickými príkladmi sú programy na prácu s virtuálnou realitou v rámci vizualizácie lesa ako je napríklad modul Marko Polo 3D Prieskumník na báze komponentu Blaxxon Contact 3D zo simulátora SIBYLA alebo GIS nadstavby pre simuláciu lesa ako je napríklad modul TerraExplorer v rámci modelu SIBYLA (FABRIKA 2007a, b, 2010). Oba moduly využívajú údaje zo servera, to znamená popis virtuálneho lesa alebo geografickú databázu, pričom samotné operácie ako je pohyb vo virtuálnom lese alebo let nad modelom terénu sa prevádza spracovaním na strane klienta. **Tenký klient** je softvér na klientovi v prostredí klient-server, ktorý pre svoju funkcionálnosť potrebuje spracovanie údajov na strane servera. Nazýva sa aj slabý klient. Názov pochádza z anglických ekvivalentov *thin*, *lean* alebo *slim client*. Klient obsahuje vlastný operačný systém, ktorý slúži ako prostredie pre spustenie vhodného rozhrania na komunikáciu so serverom. Typicky ide o internetové prehliadače ako sú Internet Explorer, Mozilla Firefox alebo Opera. V tomto prípade simulátor lesa funguje ako webová aplikácia. Veľmi často sa využívajú webové služby, ktoré sa programujú pomocou jazyka C# (čítaj sí šarp) alebo platformy ASP.NET, PHP či JAVA. Pre prácu s takýmto simulátorom lesa nie je potrebný výkonný počítač. Stačí iba rýchlejšie internetové pripojenie. Modely lesa bežiacie na platforme tenkého klienta sa v súčasnosti iba vyvíjajú. Ich výhodou je, že ich aktualizácia sa prevádza iba na strane servera. Nie je potrebná



Obr. 10.38 Príklad modúlnej výstavby simulátora lesa. Jednotlivé moduly sa špecializujú na vybrané časti procesu simulácie a prognózy vývoja lesa. Príklad pochádza z kompletnej štruktúry softvéru SIBYLA Suite (FABRIKA 2010).

výmena inštalácie na strane klientov. Zaujímavé výsledky dosahuje napríklad vývojový tím z Freisingu, ktorý pripravuje verziu rastového simulátora SILVA ako tenkého klienta. Výsledky zatiaľ neboli publikované. Budúcnosť v modelovaní lesa bude pravdepodobne poznačená aj novou perspektívnou technológiou na báze **nulového klienta**. Koncept sa nazýva aj ultratenký klient. Názov pochádza z anglických ekvivalentov *zero* alebo *ultra-thin client*. Hardvér klienta v tomto prípade nepotrebuje plne funkčný operačný systém. Využíva iba základný jadrový softvér (angl. *kernel*), ktorý inicializuje sieť, obsluhuje sieťový protokol a zabezpečuje zobrazenie výsledkov servera. Hardvér je v tomto prípade minimalizovaný iba na monitor, klávesnicu a centrálnu odľahčenú jednotku.

Sieťové verzie modelov lesa sľubujú širšiu dostupnosť. Tá je buď úplne voľná alebo riadená cez autentifikáciu a autorizáciu. **Autentifikácia** prebieha prostredníctvom prihlásenia do systému na základe mena a hesla. **Autorizácia** rieši priradenie oprávnení, ktoré má užívateľ pri práci s modelom

lesa. Modely na báze aplikácií desktop (stand-alone) sú dostupné na základe vyžiadania od vývojárov modelov alebo stiahnutím z prostredia internetu. Vzhľadom na to, že ide o programy, ktoré často vznikali v rámci rôznych inštitucionálnych výskumov na akademickej pôde a vďaka tomu, že sú orientované zväčša pre užšiu skupinu užívateľov, sú často bezplatne uvoľnené – **freeware**, alebo sa používajú iba za symbolický poplatok po predchádzajúcom odskúšaní softvéru – **shareware**. V tabuľke 10.1 uvádzame zoznam niektorých z nich. Niekedy sa modely šíria aj s ich zdrojovým kódom – **open source**. Vhodným príkladom je simulátor TreeGrOSS (NAGEL 2003). Užívateľia majú slobodu v modifikovaní simulátora. O zmenách by mali informovať hlavného vývojára a takisto by mali verejne sprístupniť zmenený kód pre ďalšie použitie.

Vzhľadom na to, že modelovanie lesa je zložitý problém, ktorý pokrýva celú plejádu procesov, ukazuje sa ako veľmi vhodná **modulárna výstavba** simulátorov lesa. Chod programu riadi riadiaci modul, ktorý spravuje spúšťanie a spoluprácu

medzi jednotlivými modulmi. Komunikácia medzi modulmi je zariadená pomocou zmeny údajov databázy, respektíve pomocou zmeny konfiguračných súborov. Príklad modularnej výstavby demonštrujeme na modeli SIBYLA (FABRIKA 2010). Modularita simulátora je znázornená na obrázku 10.38. Hlavná vetva sa skladá z modulov Agent, Generátor, Médium, Lokalizátor, Kultivátor, Agresor, Pestún, Prorok, Kalkulátor, Prieskumník, Analytik a Lektor. Modul Agent zabezpečuje import údajov z bežne dostupných inventarizačných údajov lesa. Modul Generátor generuje chýbajúce alebo neznáme údaje štruktúry simulačných plôch. Modul Médium spravuje simulačné plochy. Modul Lokalizátor zabezpečuje nastavenie klimatických, pôdných a iných údajov stanovišťa. Modul Kultivátor nastavuje hospodárske režimy, najmä prebievky. Modul Agresor spravuje riziko náhodných ťažieb. Modul Pestún zastrešuje procesy týkajúce sa prirodzeného zmladenia. Modul Prorok je jadrový program uskutočňujúci samotné prognózy vývoja stromov. Modul Kalkulátor kvantifikuje výstupné údaje týkajúce sa produkcie, štruktúry, výnosov a nákladov simulačných plôch. Modul Prieskumník poskytuje výsledky simulácií vo forme tabuliek, grafov a virtuálneho lesa. Modul Analytik produkuje rôzne tabuľky a grafy vývoja lesa. Modul Lektor predstavuje elektronickú príručku modelu a softvéru. Na hlavnú vetvu nadväzuje modul Kartograf a Expert. Kartograf zabezpečuje prepojenie simulácií s geografickým informačným systémom. Modul Expert tvorí rozhranie pre procesné a štruktúrne zjemnenie ako aj pre prácu s verejnosťou (angl. *public relation*). V rámci procesného zjemnenia simulácií ide o moduly Astronóm,

Klimatológ, Pedológ, Fyziológ, Alchymista a Mág. Modul Astronóm generuje pomery slnečného žiarenia. Modul Klimatológ generuje charakteristiky počasia. Modul Pedológ spravuje pôdne pomery a pôdne procesy. Modul Fyziológ kontroluje fyziologické procesy stromov. Modul Alchymista zabezpečuje vzájomnú integráciu všetkých procesov. Modul Mág prevádza konečné procesné zjemnenie výstupov modelu. V rámci štruktúrneho zjemnenia simulácií ide o moduly Morfológ, Maliar a Šaman. Modul Morfológ pripravuje rastové gramatiky stromov. Modul Maliar nastavuje vlastnosti vizualizácie stromov. Modul Šaman produkuje morfológiu stromov. Vetva pre prácu s verejnosťou obsahuje moduly Technológ, Polyhistor, Guru, Historik, Mentor, Génus, Zákazník a Vizionár. Ide o moduly, ktoré prístupnou multimediálnou encyklopedickou formou oboznamujú užívateľov s lesným ekosystémom, jeho modelovaním a obhospodarovaním. Modul Technológ predstavuje drevné a nedrevné produkty lesa. Modul Polyhistor sa zaoberá celospoločenskými funkciami lesa. Modul Guru oslavuje duchovnú hodnotu lesa. Modul Historik sprístupňuje históriu modelovania lesa. Modul Mentor hovorí o lesníckom vzdelávaní. Modul Génus rozoberá princípy a postupy modelovania lesa. Modul Zákazník ponúka príklady využitia modelovania lesa. Modul Vizionár sa zamýšľa nad možnou budúcnosťou modelovania lesa.

V súčasnosti sa modelovanie a vývoj simulátorov lesa rozvíja nebyvalým tempom. Vzniká množstvo modelov a softvérových produktov. Líšia sa v mnohých základných črtách ale aj vo veľkom počte detailov a je veľmi ťažké sa v nich orientovať. Preto sa vo svete a aj v samotnej Európe prejavili snahy sprehľad-

Tab. 10.1 Zoznam niektorých voľne dostupných modelov lesa (freeware a shareware).

názov modelu	typ modelu	link pre download
3-PG	ekofyziologický model „big leaf“	http://www.fsl.orst.edu/~waring/3-PG_Workshops/WorkshopContents.htm
Biome-BGC	ekofyziologický model „big leaf“	http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc
BWINPro	stromový empirický model nezávislý na pozíciách	http://www.nw-fva.de/index.php?id=194
GOTILWA+	ekofyziologický model priemerného stromu	http://www.creaf.uab.es/gotilwa%2B/
GroIMP	stromový funkčno-štruktúrny model	http://wwwuser.gwdg.de/~groimp/grogra.de/software/groimp/index.html
JABOWA III	stromový „gap“ model	http://www.naturestudy.org/services/jabowa/
PnET	ekofyziologický model „big leaf“	http://www.pnet.sr.unh.edu/index.html
SIBYLA	stromový semi-empirický model závislý na pozíciách	http://etools.tuzvo.sk/sibyla/slovensky/model.htm

niť situáciu a štandardizovať popis modelov. V našich podmienkach sa využíva **štandardizácia** vytvorená Nemeckým zväzom výskumných ústavov (DVFF – Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten) z roku 2000, ktorá bola publikovaná kolektívom PRETZSCH et al. (2002). Je vzorom pre tvorbu metadát modelov, ktoré by mali byť súčasťou každého clearinghousu modelovania lesa (pozri kapitolu 10.5). Zavádza určitú normu do popisu modelov. Popis by mal obsahovať informácie o modelovacom prístupe, rozsahu aplikácie, nároky a postupy na parametrizáciu a kalibráciu modelu, zoznam vstupov a výstupov, možnosti usmerňovania simulácie, štruktúru samotného rastového modelu a prídavných algoritmov, údaje o presnosti, správnosti a spoľahlivosti modelu, dokumentáciu softvéru a hardvérovej náročnosti. Bližšie informácie sa nachádzajú v publikáciách PRETZSCH et al. (2002) alebo v kapitole 12.3 monografie PRETZSCH (2009).

10.8 Metódy vysokovýkonného počítania v modelovaní lesa

Rastové modely sú často konštruované pre hierarchickú úroveň stromu resp. orgánu stromu. Takéto modely sú samozrejme omnoho zložitejšie ako klasické porastové modely. Vyžadujú väčší výpočtový výkon a sú náročnejšie na výpočtový čas. Niektoré modely využívajú aj stochastické vlastnosti, čo umožňuje opakovanie simulácie s odlišnými výsledkami. Na základe variabilných výsledkov je potom možné usudzovať o rámcoch presnosti, respektíve prevádzať štatistické testy rozdielov medzi rôznymi variantmi (pozri kapitolu 3.5). Ak napríklad pre rovnaké východiskové údaje vygenerujeme desaťkrát štruktúru simulačnej plochy pomocou generátora súradníc stromov a na nej prevedieme desaťkrát simuláciu vývoja lesa, ktorá má stochastické vlastnosti, získame sto rôznych variantov. Ak máme takýchto porastov napríklad dvadsať, aby sme zachytili viacero typov lesa, a máme napríklad dva odlišné scenáre vývoja klimatických charakteristík a päť odlišných spôsobov obhospodarovania lesa (prebierkových režimov), získame dokopy dvadsaťtisíc výsledných variantov. Ak simulácia pre jeden variant trvá približne jednu minútu, dopracujeme sa k výslednému času

dvadsaťtisíc minút, čo je trinásť dní, dvadsaťjeden hodín a dvadsať minút. Pre takéto účely sa využívajú techniky vysokovýkonného počítania. V tejto kapitole sa budeme zaoberať ich využitím. Ide o veľmi širokú problematiku a preto sa dotkneme iba jej princípov. Viac informácií o problematike sa nachádza v príslušnej literatúre (DOWD 1993, QUINN 1994, KUMAR 2002, BERMAN et al. 2003).

Na urýchlenie rozsiahlych simulácií vývoja lesa možno dnes využiť nasledujúce technológie: super počítanie, clusterové počítanie, gridové počítanie a cloudové počítanie. Základom ich využitia je vhodná architektúra simulátora lesa, ktorá umožňuje rozdelenie procesov na menšie časti a následné **paralelné spracovanie** procesov. Veľmi výhodná je takzvaná **batch**, respektíve **command line** architektúra. Ide o rozdelenie procesu simulácie do viacerých modulov, ktoré medzi sebou komunikujú pomocou databázových súborov alebo konfiguračných externých súborov. Princíp demonštrujeme na modeli SIBYLA s modulárnou výstavbou rozobranou v predchádzajúcej kapitole. Podmienkou je, aby sa všetky nastavenia simulácie, ktoré sa za normálnych okolností robia interaktívne cez dialógové menu modulov, dali urobiť aj cez nastavenia v konfiguračných súboroch (napr. súbor „run.ini“). Všetky vstupy a výstupy simulácie sa ukladajú do externej databázy. Napríklad v tabuľke STRUGEN v databázovej štruktúre z obrázku 10.24 nastavíme položku „filter“ na hodnotu 1 pre tie porasty (položka „stand“), pre ktoré chceme uskutočniť generovanie štruktúry. V položke „repeatStructure“ nastavíme hodnotu na 10, čím zabezpečíme desaťnásobné opakovanie štruktúry. V konfiguračnom súbore „run.ini“ špecifikujeme cestu k databázovému súboru a nastavíme nasledujúce parametre:

```
Calculate=True
Close=True
Object=All
Age=True
Storey=False
PeriodNumber=10
PeriodLength=5
NewTables=False
```

Parametre hovoria o tom, že po aktivovaní modulu Generátor sa má automaticky spustiť generovanie štruktúry (Calculate=True) a po skončení generovania sa má program ukončiť (Close=True). Generovanie sa prevedie pre všetky odfiltrované

plochy (Object=All). Pri generovaní stromov sa zachová zadaný vek (Age=True) a plocha sa nebude člení na etáže (Storey=False). Generovanie sa pripraví pre 10 periód simulácie (PeriodNumber=10) s periódou dlhou 5 rokov (PeriodLength=5). Údaje stanovišťa a prebierok sa nebudú nanovo generovať, ale sa prevezmú pripravené údaje v tabuľkách SITES, PROGNOSIS a THINNINGS (NewTables=False). Po tejto príprave sa spustí modul Generátor. Po vygenerovaní štruktúry plôch sa vytvoria príslušné databázové tabuľky (napríklad PLOTS a INITIAL). V tabuľke PLOTS sa zároveň nastaví položka „filter“ na hodnotu 1 pre generované plochy. Potom môžeme pripraviť samotnú simuláciu pre modul Prorok. V konfiguračnom súbore „run.ini“ nastavíme nasledujúce parametre:

```
Calculate=True
Close=True
Mortality=True
Residual=True
EdgeEffect=True
repeatPrognosis=10
```

Opäť sme nastavili automatické spustenie simulácie (Calculate=True) a uzavretie programu po skončení simulácie (Close=True). Aktivovali sme mortalitný model (Mortality=True), stochastickú zložku hrúbkového a výškového prírastku (Residual=True) a korekciu okrajových efektov (EdgeEffect=True). Zadáli sme počet opakovaní prognózy (repeatPrognose=10). Potom stačí spustiť modul Prorok. Po simulácii sú všetky výsledky jednotlivých stromov uložené v príslušných tabuľkách databázy (napríklad TREES a ELEMENTS). Podobným spôsobom možno následne spustiť aj modul Kalkulátor, ktorý vyprodukuje sumárne tabuľky výsledkov (napríklad tabuľky PRODUCTION, BIOMASS, BIODIVERSITY, COSTS a RETURNS). Príprava databázy, konfiguračného súboru a volanie modulov sa dá zabezpečiť externe pomocou špeciálneho programu alebo z iného softvérového prostredia pomocou makrojazyka. Dôležité je, aby sa moduly spúšťali sériovo, to znamená, že každý modul čaká na ukončenie predchádzajúceho. Od takejto štruktúry softvéru je už iba krôčik k vysokovýkonnému počítaniu. Najjednoduchší spôsob je rozdelenie databázy na



Obr. 10.39 Superpočítač Blue Gene/P z Národného laboratória v Argonne (obrázok prevzatý z *Wikimedia Commons*).

viacero častí, napríklad na jednotlivé plochy alebo malé súbory plôch a tieto simulácie spustiť naraz na viacerých počítačoch. Výsledné databázy sa potom spoja do jednej, kde sa prevedie samotná analýza výsledkov alebo sa integrujú do dátového skladu. Podobný postup na skrátenie času simulácie bol použitý aj pri analýze budúcnosti lesov v Beskydoch a v strednej Európe v podmienkach klimatickej zmeny pomocou rastového simulátora SIBYLA (HLÁSNY et al. 2010 a 2011).

Budúcnosť simulácií spočíva v tom, že sa ešte lepšie integrujú do technológií a postupov vysokovýkonného počítania. Technológie teraz stručne predstavíme. Vysokovýkonné počítanie má skratku HPC (angl. *high-performance computing*). Integruje administráciu systémov a paralelné programovanie do multidisciplinárnej oblasti, ktorá kombinuje digitálnu elektroniku, architektúru počítačov, systémový softvér, programovacie jazyky, algoritmy a počítačové techniky. V súčasnosti sa technológie HPC presúvajú zo superpočítania do clusterového, gridového, prípadne cloudového počítania. **Superpočítanie** využíva superpočítače. Superpočítače predstavujú špičku v súčasnej kapacite spracovania údajov, predovšetkým v rýchlosti výpočtov. Využívajú sa na riešenie úloh, ktoré vyžadujú časovo náročné výpočty ako sú napríklad úlohy z oblasti kvantovej fyziky, predpovedania počasia, klimatického výskumu, molekulárneho modelovania a fyzikálnych simulácií. V súčasnosti sú vyrábané komerčné produkty firiem Cray, IBM, Hewlett-Packard a iných. Najvýkonnejšie superpočítače dnes využívajú stovky až tisícky procesorov (CPU) serverovej triedy ako sú napríklad PowerPC, Opteron, Xeon a koprocesory ako napríklad NVIDIA Tesla GPUs, AMD GPUs, IBM Cell, FPGAs a podobne. Na obrázku 10.39 uvádzame príklad superpočítača s názvom Blue Gene/P z Národného laboratória v Argonne. **Clusterové počítanie** je založené na skupine voľne spojených počítačov, ktoré spolu úzko spolupracujú, takže v niektorých ohľadoch sa dá povedať, že ide o jeden robustný počítač. Clustery sú zložené z viacerých samostatných (stand-alone) počítačov vzájomne prepojených prostredníctvom počítačovej siete. Najtypickejším prípadom clusteru je Beowulf cluster, ktorý je zložený z viacerých identických komerčných počítačov prepojených pomocou lokálnej siete Ethernet na báze protokolu TCP/IP (obrázok 10.40). Počítače sú umiestnené v špeciálnych regáloch (angl. *rack*) a sú situované



Obr. 10.40 Cluster typu Beowulf zložený z viacerých identických komerčných počítačov prepojených v lokálnej sieti (obrázok prevzatý z Wikimedia Commons).

do špeciálne pripravených klimatizovaných miestností so zníženou prašnosťou. **Gridové počítanie** je vysoko distribuovanou formou paralelného spracovania údajov. Je založené na využití počítačov komunikujúcich cez internet, ktoré pracujú na spoločnom probléme. Väčšina aplikácií gridového počítania využíva middleware. Ide o softvér, ktorý je umiestnený medzi operačným systémom a aplikáciami. Služi na spravovanie a riadenie sieťových zdrojov a štandardizáciu softverového rozhrania. Najbežnejšou architektúrou middleware je architektúra BOINC (*Berkley Open Infrastructure for Network Computing*). Grid softvér často využíva šetriace režimy zdieľaných počítačov, aby boli výpočty prevádzané v čase nevyužitého hardvéru. Mnoho aplikácií založených na gridovej architektúre vzniklo zo známych akademických projektov. Medzi najznámejšie patria SETI@home a Folding@home. Projekt SETI@home je distribuovaný projekt využívajúci počítače pripojené do siete internet pomocou infraštruktúry BOINC. Je prevádzkovaný univerzitou v Berkeley v Kalifornii v Spojených štátoch amerických. Projekt je zame-

raný na hľadanie inteligentného mimozemského života vo vesmíre prostredníctvom analýzy vzoriek signálov z najväčšieho rádioteleskopu na svete v Arecibo. Vďaka svojmu zameraniu patrí tento projekt medzi najpopulárnejšie v rámci infraštruktúry BOINC. V septembri 2001 využíval už viac ako 3 milióny počítačov. Projekt Folding@home bol založený na výpočtovo náročné simulácie skladania proteínov a inej molekulárnej dynamiky pre účely zdokonalenia chemických metód. Vznikol 1. októbra 2000. V súčasnosti je riadený chemickou skupinou na Standfordskej univerzite pod vedením profesora Vijay Pande. V auguste 2009 dosiahla táto gridová sieť zapojenie 350 000 počítačov. **Cloudové počítanie** predstavuje model vývoja a používania počítačových technológií založený na internete. Možno ho tiež charakterizovať ako poskytovanie služieb alebo programov uložených na serveroch na internete s tým, že používa-

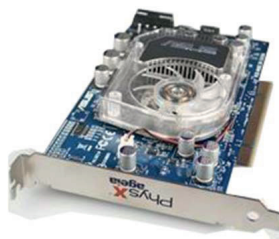
telia k nim môžu pristupovať napríklad pomocou webového prehliadača alebo klienta danej aplikácie a používať prakticky odkiaľkoľvek. Používatelia neplatia (za predpokladu, že je služba platená) za vlastný softvér, ale za jeho použitie. Ponuka aplikácií sa pohybuje od kancelárskych aplikácií, cez systémy pre distribuované výpočty, až po operačné systémy prevádzkované v prehliadačoch, ako je napríklad eyeOS, Cloud alebo iCloud. Cloudové počítanie môže byť takisto zdrojom pre využitie zdieľaného výpočtu v distribuovanej sieti. Ide o rozšírenú formu gridovej technológie.

10.9 Pokročilé techniky vizualizácie lesa

V kapitole 9 sme sa zaoberali technikami vizualizácie lesa. Zobrazenie výsledkov rastových



grafický akcelerátor



akcelerátor fyzikálnych procesov



viackanálová zvuková karta



sústava reproduktorov alebo slúchadlá



veľkoplošná obrazovka alebo dátový projektor



Obr. 10.41
Štandardný hardvér pre vizualizáciu lesa vo virtuálnej realite.



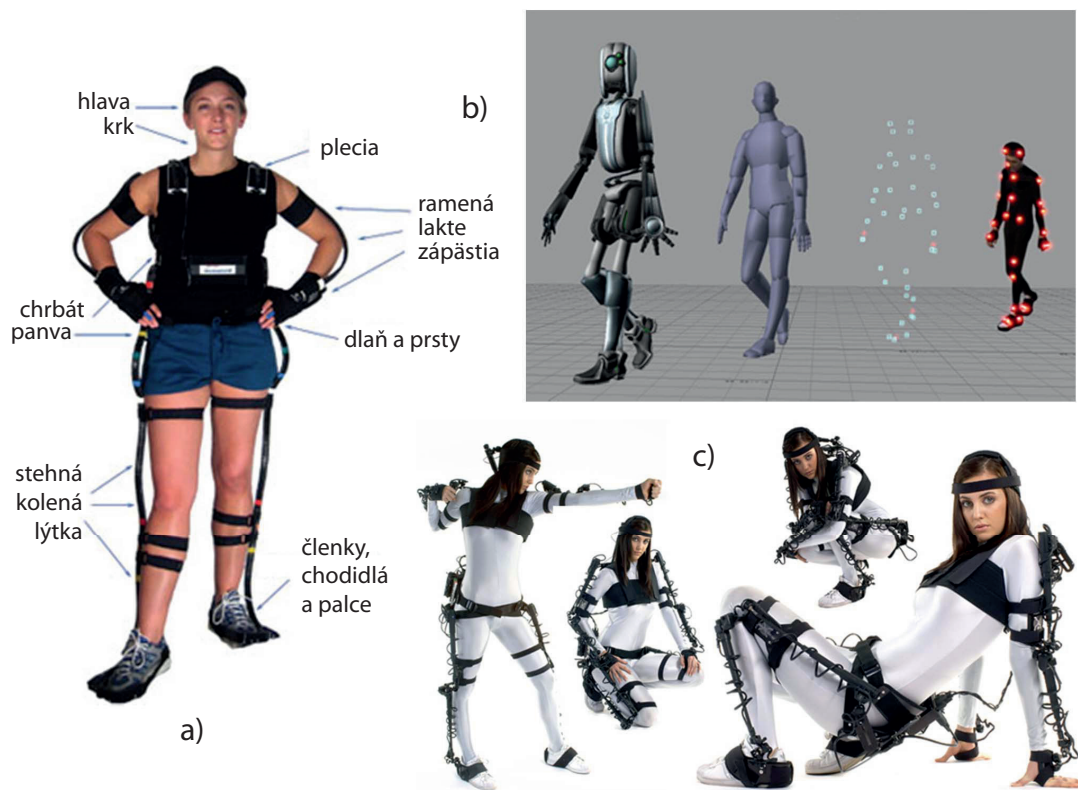
Obr. 10.42 Stanica Vision od firmy Elumens zobrazuje obraz na veľkoplošnej parabolickej obrazovke, čím mu dáva výrazný imerzívny charakter (obrázok prevzatý z webovej stránky Elumens).

prognóz lesa prostredníctvom vizualizácie lesa alebo pomocou virtuálneho lesa výrazne obohacuje predstavu o charaktere výsledného lesa a zároveň umocňuje zážitok a dáva nové možnosti. Rozvoj počítačových technológií sa výrazne odzrkadľuje aj v rozvoji počítačovej grafiky a dnes hlavne v rozvoji 3D technológií na báze stereoskopie. Vizualizáciu lesa podporuje výkonný hardvér. Virtuálny les sa dnes dá zobraziť už aj na bežnej výpočtovej technike. Rýchlosť spracovania a kvalitu vnemu zabezpečuje príslušný **hardvér** (obrázok 10.41). Ide o výkonnú grafickú kartu (akcelerátor), napríklad typu nVidia GeForce alebo ATI Radeon,

prípadne aj akcelerátor fyzikálnych procesov, zvukovú kartu, optimálne s režimom 5.1 kanálov (Dolby Digital alebo DTS) so sústavou reproduktorov alebo Dolby Digital slúchadlami a veľkoplošnú obrazovku (LCD, plazmovú alebo LED) či dátový projektor. O plné využitie hardvéru sa dnes stará špecializovaný univerzálny **softvér**. Plynulé zobrazenie trojrozmernej grafiky a prácu s multimédiami má na starosti programová knižnica typu API (*Application Programming Interface*). Typickou API knižnicou je OpenGL (*Open Graphics Library*) alebo DirectX. **OpenGL** je priemyselný štandard špecifikujúci viacplatformové rozhranie k akcelerovaným grafickým kartám respektíve celým grafickým subsystémom. Slúži na



Obr. 10.43 Dátová rukavica zabezpečuje interakciu užívateľa virtuálneho sveta s objektmi virtuálneho sveta. Umožňuje dotyk a jednoduchú manipuláciu s objektmi.

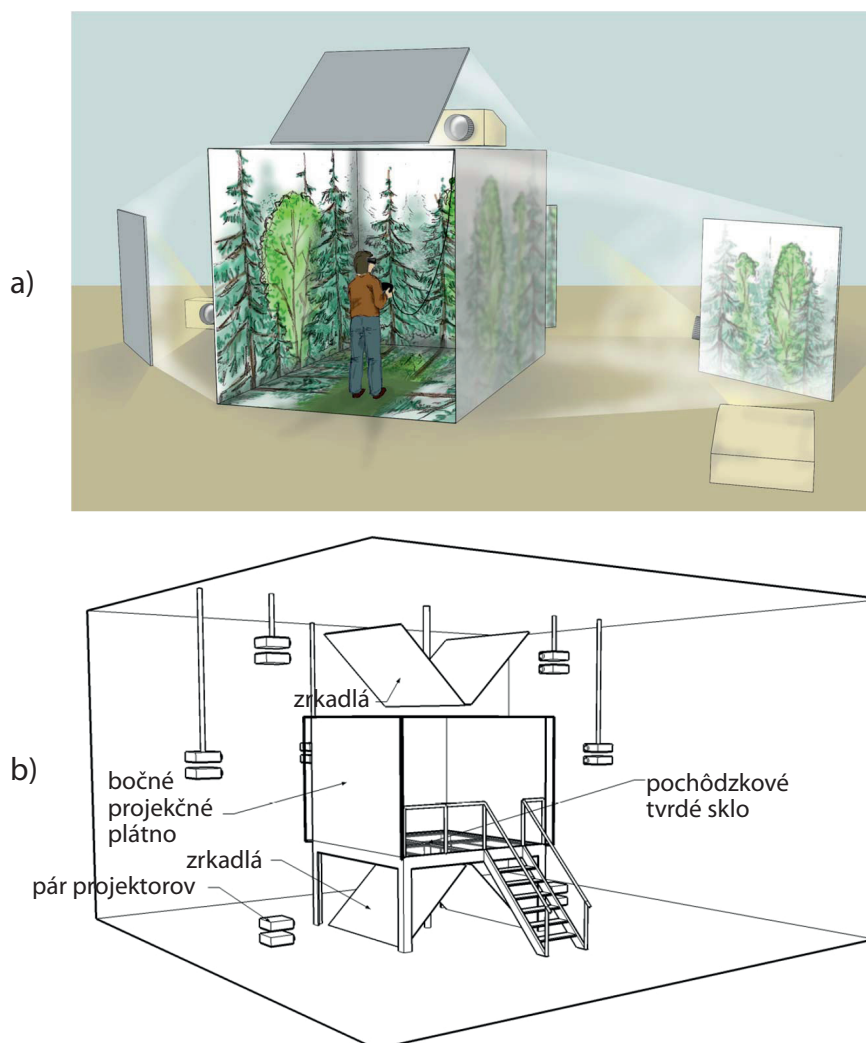


Obr. 10.44 Technológia Motion Capture umožňuje prenos komplexného pohybu užívateľa do prostredia virtuálneho sveta: **a)** umiestnenie senzorov na kľúčových bodoch užívateľa, **b)** princíp optického snímania pohybu, **c)** mechanické snímanie pohybu (obrázky sú prevzaté z webových stránok výrobcov a dodávateľov systémov).

tvorbu aplikácií pracujúcich predovšetkým s trojrozmernou počítačovou grafikou prekresľovanou v reálnom čase. Používa sa pri tvorbe počítačových hier, CAD programov, aplikácií virtuálnej reality alebo pre vedecko-technické vizualizácie. **DirectX** je zbierka programovacích rozhraní pre multimediálne aplikácie (obzvlášť počítačové hry) bežiacie iba na platforme Microsoft Windows. Na rozdiel od OpenGL však pokrýva takmer celú multimediálnu oblasť, nielen trojrozmernú grafiku (Direct3D), ale napríklad aj prácu s dvojrozmernou vektorovou grafikou (Direct2D) a rastrovou grafikou (DirectDraw), prehrávanie soundtrackov (DirectMusic), prácu s priestorovým zvukovým záznamom (DirectSound), komunikáciu cez lokálnu alebo globálnu počítačovú sieť na plynulé zdieľanie multimédií (DirectPlay) a podobne. Okrem týchto bežných API knižníc existujú aj ďalšie doplnujúce nástroje, napríklad knižnice SDK (*Software Development Kit*). Medzi najznámejšie patria **PhysX** na prácu s fyzikálnymi efektmi alebo

Euphoria na animáciu pohybov na báze bežných fyzikálnych vlastností a anatómie organizmu (kostra, svaly a nervový systém).

Pre dosiahnutie imerzívnej úrovne virtuálnej reality (pozri kapitolu 9.7.1) sa dnes využívajú hardvérové systémy na zlepšenie zrakového vne- mu a systémy na snímanie pohybu pre interakciu s virtuálnym svetom. **Zlepšenie zrakového vne- mu** sa dá dosiahnuť napríklad použitím veľkých parabolických monitorov (obrázok 10.42) alebo dnes už klasickej stereoskopie pomocou 3D okuliarov alebo prílb pre virtuálnu realitu (pozri kapitolu 9.6.2). **Snímanie pohybu** sa dá zabezpečiť napríklad pomocou jednoduchej dátovej rukavice (obrázok 10.43) alebo pomocou systémov typu Motion Capture, ktoré obsahujú magnetické, optické alebo mechanické snímače na tele užívateľa prenášajúce jeho pohyby do virtuálneho sveta (obrázok 10.44). Medzi najdokonalejšie systémy pre interaktívny a imerzívny pohyb vo virtuálnom svete patria virtuálne jaskyne a virtuálne gule.

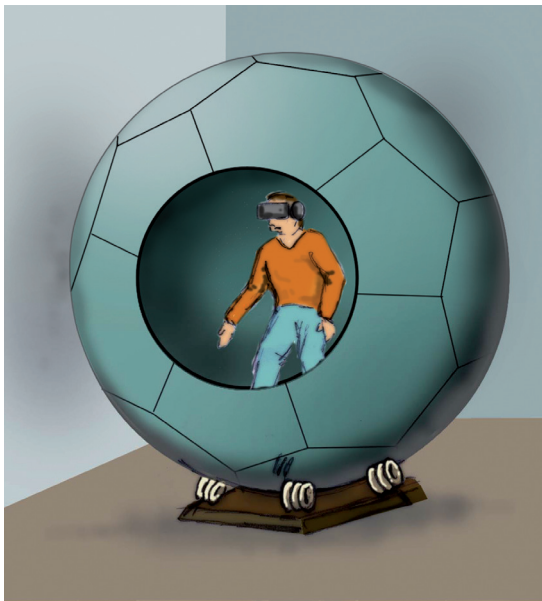


Obr. 10.45
Virtuálna jaskyňa ako zariadenie na interaktívny a imerzívny pohyb vo virtuálnom lese: **a)** princíp spätnej projekcie pomocou systému projektorov a zrkadiel, **b)** projekt virtuálnej jaskyne budovanej Technickou univerzitou vo Zvolene od firmy Slovakia Supercomputers Košice.

Virtuálna jaskyňa (tzv. Cave system) predstavuje systém typu „surround–screen“ a „surround–sound“. Ide o systém založený na kubickej projekcii na steny veľkej kocky. Užívateľ sa nachádza v jej vnútri. Na očiach má 3D okuliare a v rukách drží zariadenie na ovládanie pohybu (napríklad space pilot, resp. game pad). Na vnútorné steny kocky sa premieta stereoskopický obraz. Obraz sa prenáša najčastejšie pomocou spätnej projekcie zo súboru projektorov a zrkadiel (obrázok 10.45). V priestore kocky je zároveň umiestnených aj viacero reproduktorov, ktoré zabezpečujú priestorový zvukový vnem. **Virtuálna guľa** je zariadenie, ktoré sa snaží aktívne prenášať pohyb užívateľa (chôdzu, resp. beh) do prostredia virtuálneho sveta. Človek je uzavretý do priestoru veľkej gule. Tá je zafixovaná na jednom mieste pomocou systému rotačných

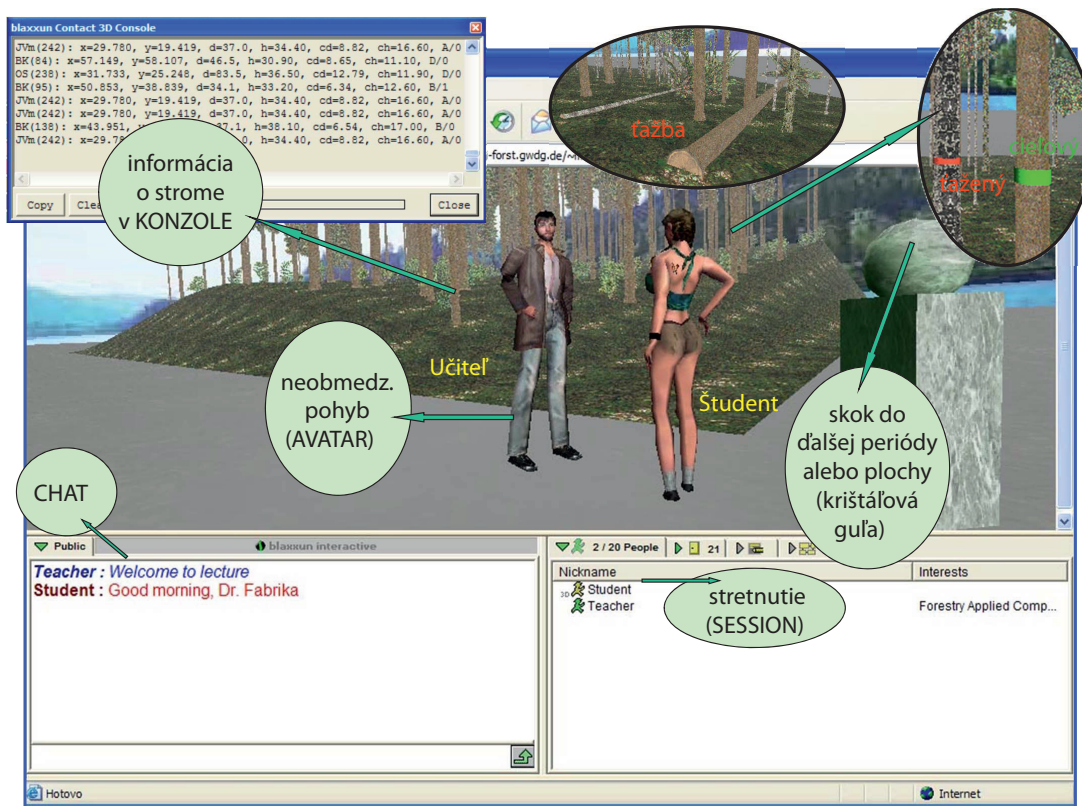
snímačov. Osoba chodí alebo beží v jej vnútri, čím otáča (valí) guľu po rotačných snímačoch. Snímače kontrolujú pohyb užívateľa vo vnútri gule (obrázok 10.46). Trojrozmerný obraz sa realizuje prostredníctvom prilby pre virtuálnu realitu.

Spojením technológie virtuálnej jaskyne alebo virtuálnej gule s dátovou rukavicou (alebo iným systémom Motion Capture) a rastovým simulátorom sa dajú vytvoriť sofistikované **trenažéry lesa** (FABRIKA 2007a). Užívateľ pomocou dátovej rukavice vyznačuje stromy do prebierky a rastový simulátor zabezpečuje skok užívateľa (teleportovanie) do budúcnosti lesa. Takto môže okamžite vnímať silnú zážitkovú formou reakciu lesa na vykonané prebierkové zásahy. Systém umožňuje užívateľovi analyzovať dôsledky dlhodobého ovplyvnenia lesných ekosystémov hospodárom,



Obr. 10.46 Virtuálna guľa slúži na aktívny prenos pohybu užívateľa (chôdze alebo behu) do prostredia virtuálneho sveta. Trojrozmerné zobrazenie je zabezpečené prostredníctvom prilby pre virtuálnu realitu.

a to všetko v reálnom čase. Môže teda slúžiť ako učebná pomôcka pre tréning uskutočňovania rôznych hospodárskych opatrení pri výchove lesa a následné hodnotenie ich vplyvu na štruktúru, produkciu a ekologickú stabilitu lesa. Keďže v lesníckej praxi takáto spätná väzba neexistuje (cyklus vývoja lesného porastu je cca 100 rokov), javí sa tento nástroj ako priekopnícka forma vzdelávania študentov lesníctva. Výhoda spočíva aj v tom, že sa študent nemusí obávať experimentovať s porastom, pretože po úplnom narušení štruktúry a stability porastu má možnosť sa opäť vrátiť k východiskovému stavu, čo sa v skutočnej prírode nedá. Proces tréningu nápadne pripomína štýl počítačovej hry dokonca aj v tom prípade, ak sa využije iba personálny počítač s modelom virtuálneho lesa a rastovým simulátorom bez virtuálnej jaskyne alebo virtuálnej guľe. Toto je v súčasnosti najjednoduchšia, najlacnejšia a teda aj najdostupnejšia forma tréningu lesa. Virtuálny les sa môže dokonca aj **zdieľať** v prostredí internetu so študentmi z celého sveta, ktorí môžu on-line diskutovať medzi sebou a učiteľom o výsledkoch jednotlivých



Obr. 10.47 Zdieľanie virtuálneho lesa v prostredí internetového prehliadača.

zásahov do lesného ekosystému (FABRIKA 2007b a 2010). Výsledky rastových simulácií prevedené aplikačným serverom sa uložia na webový server ako séria virtuálnych porastov, napríklad vo formáte VRML. Klienti (študenti a učiteľ) sa prihlásia pomocou webového prehliadača na server pre zdieľanie virtuálnych svetov a vyberú si virtuálny les, v ktorom sa chcú spoločne ocitnúť. Server

zaobstaráva pripojenie do virtuálneho lesa vo forme „sessions“, neobmedzený pohyb po virtuálnom lese pomocou Avatarov a vzájomne sledovanie tohto pohybu. Pohyb je spravidla animovaný. Užívatelia navzájom vidia všetkých Avatarov a môžu spoločne komunikovať pomocou chatu (prípadne hlasu) a rôznych gest svojho Avatara. Príklad je zobrazený na obrázku 10.47.

Súhrn

V súčasnosti sa na zber údajov pre modelovanie lesa používajú progresívne metódy. **Počítačom podporovaný terénny zber údajov** využíva rôzne elektronické registračné prístroje (obr. 10.4), laserové diaľkomery, elektronické kompas a terénne počítače (obr. 10.6), ktoré obsahujú špeciálny Field-GIS softvér. Na navigáciu sa používajú navigačné prístroje (obr. 10.7), ktoré využívajú globálne navigačné satelitné systémy. Kombináciou tejto techniky (obr. 10.8) sa dajú automatizovane získať mnohé dendrometrické údaje o lese (obr. 10.9). **Pozemné laserové skenovanie** (obr. 10.10) dokáže zaznamenávať mračno bodov (obr. 10.12), ktoré obsahuje priestorové súradnice (prípadne atribúty) jednotlivých objektov lesného ekosystému (obr. 10.11). Zachytáva celý okolitý priestor v určitej hustote a na základe neho sa dá odvodiť tvar kmeňov (obr. 10.13), biomasa stromov (obr. 10.14), respektíve porastová štruktúra. Metódy diaľkového prieskumu Zeme umožňujú pomocou leteckých a satelitných snímok (obr. 10.15) odvodiť niektoré charakteristiky stromov a porastov vhodné pre modelovanie lesa. Pomocou snímok s **vysokou rozlišovacou schopnosťou** dokážeme odvodiť tvary korún (obr. 10.17) a pozície stromov. **Hyperspektrálne snímkovanie** (obr. 10.18) napomáha odvodiť niektoré kvalitatívne atribúty stromov a porastov. **Letecké laserové skenovanie** (obr. 10.19) umožňuje odvodiť modely povrchov a výšky stromov (obr. 10.20). Metóda **vegetačných indexov** napomáha odvodiť niektoré dôležité časové body pre modelovanie fenologickej krivky. Rozsiahle vstupné údaje a výsledky rastových simulácií sa archivujú pomocou databázových systémov. Využíva sa často **relačný databázový model**, ktorý sa dá znázorniť prostredníctvom **ERA diagramov** (obr. 10.21). Diagramy popisujú kardinalitu, parcialitu, generalizáciu a špecializáciu vzťahov medzi tabuľkami (obr. 10.22 a 10.23). Operácie s tabuľkami sa robia na základe **relačnej algebry** a jazyka **SQL**. Počítačové programy simulátorov lesa často využívajú **objektový funkčný model** (obr. 10.25). Model využíva **triedy**, ktoré obsahujú zapuzdrené dátové položky, metódy a vlastnosti. Triedy sú

dedičné, ich zložky sú polymorfické a sú riadené udalosťami. Triedy figurujú v modeloch na základe ich aktivácie cez **objekty**. Na riešenie komplikovaných problémov, ktoré súvisia s modelmi lesa, nemajú jednoznačný algoritmus, obsahujú prvky neistoty a sú zložené na skúsenostiach a intuícii, sa využívajú **znalostné** alebo **expertné systémy**. Sú založené na **báze znalostí**, ktorá často využíva **produkčné pravidlá** (obr. 10.26). Prvky neistoty sa riešia cez **fuzzy funkcie** (obr. 10.27). Postupy môžu slúžiť napríklad na výber optimálneho variantu pre obhospodarovanie lesa na základe výsledkov rastových simulácií (obr. 10.28). Veľké množstvo produkovaných údajov z rastových simulácií sa môže archivovať prostredníctvom **dátových skladov**. Dátové sklady využívajú multidimenzionálne štruktúry (obr. 10.29) nazývané **OLAP kocky** (dátové kocky). Umožňujú pomocou technológie **dolovania údajov** odvodiť nové súvislosti. Multidimenzionálne databázy obsahujú vzájomne prepojené tabuľky dimenzií a tabuľky faktov (obr. 10.30). Na uľahčenie vyhľadávania a prístupu k údajom sa využívajú centrá pre **clearinghouse**. Modelovanie lesa je viazané na geografický priestor. Využívajú sa metódy **geografických informačných systémov**, ktoré slúžia napríklad na tvorbu systémov simulácií prepojených s mapami (obr. 10.31), na regionalizáciu vstupných charakteristík pre modelovanie lesa (obr. 10.32 a 10.33), modelovanie vplyvu terénu na rast stromov (obr. 10.34), modelovanie prevýšenia horizontu na zistenie množstva priameho slnečného žiarenia (obr. 10.36) a iné. **Programovanie** modelov lesa je kľúčovým problémom pri vývoji simulátorov lesa. Využívajú sa interpretačné alebo kompilačné jazyky, základné, štruktúrované, modálne, objektové alebo aspektové programovanie (obr. 10.37) a rôzne RAD nástroje. Aplikácie môžu fungovať ako stand-alone, hrubý klient, tenký klient alebo nulový klient. Môžu byť komerčné, voľne dostupné (tab. 10.1) alebo typu „open source“. Veľmi často sa využíva modálna výstavba softvéru (obr. 10.38). Vzhľadom na algoritmickú a časovú náročnosť modelov lesa sa využívajú metódy **vysokovýkonného počítania**. Softvér má často architektúru vhodnú pre paralelné spracovanie a využíva sa tech-

nológia **superpočítačov** (obr. 10.39), **clusterov** (obr. 10.40), **gridových** alebo **cloudových** sietí. Na grafické zobrazenie a virtuálnu realitu lesa sa využíva výkonný hardvér (obr. 10.41) a štandardizovaný softvér (OpenGL, DirectX, PhysX, Euphoria). Pre dosiahnutie imerzívnej úrovne virtuálnej reality sa používajú napríklad parab-

lické monitory (obr. 10.42), stereoskopické systémy, 3D okuliare a prilby, dátové rukavice alebo magnetické, optické, či mechanické systémy snímania pohybu (Motion Capture, obr. 10.44). Využívajú sa **virtuálne jaskyne** (obr. 10.45) alebo **virtuálne gule** (obr. 10.46). Virtuálny les sa dá zdieľať v prostredí internetu (obr. 10.47).