

POLOMY NA ŠUMAVĚ ZPŮSOBENÉ ORKÁNEM KYRILL A SPOLUÚČAST RELIÉFU NA POŠKOZENÍ LESA

JAROMÍR KOLEJKA *, MARTIN KLIMÁNEK **, TOMÁŠ MIKITA **,
JAROSLAV SVOBODA ***

Jaromír Kolejka, Martin Klimánek, Tomáš Mikita, Jaroslav Svoboda: The windthrows in Šumava Mts. caused by the Kyrill windstorm and terrain participation in forest damage. Geomorphologia Slovaca et Bohemica 10, 2010, 2, 4 figs., 2 tabs., 24 refs.

The Kyrill windstorm of hurricane-force has affected vast areas of the Šumava Mts. during the night of January 18th 2007. On both sides of the state border it totally or partly damaged dozens of square kilometers of the forest in all zones of the Šumava National Park and the Bayerischer Wald National Park. The research project's aim was to use the commonly used geoinformation technologies (GIT) and geodata to identify levels of impact of windthrow factors, mainly with regard to their application in predicting imminent risks. The research hypothesis presumes that the incidence of windthrows, the amount of harm done and the cost of alleviating it are in close relationship with natural factors of the area and especially terrain features of the landscape. The geostatistical analysis has identified that the individual terrain features – sea elevation, slope, aspect, terrain curvature and terrain wind vulnerability derived from DEM – compared with the general (at the closest meteorostations) wind direction provided less reliable results. Much better results were given by the comparative analysis of local wind directions modeled separately and mentioned terrain features. Very applicable results are based on the integrated physical and forest canopy features where terrain parameters play relatively additional role.

Key words: windthrow, GIS analysis, digital terrain model, terrain analysis, Šumava Mts.

ÚVOD

Lesní polomy, čili vyvrácení nebo polámání stromů bouřlivými větry, více-méně patří k standardním událostem, které souvisejí s existencí lesních porostů. Vzhledem k tomu, že lesy jsou důležitým faktorem hospodářství, a to přímo jako produkční plochy, či zprostředkovaně přes další environmentální, estetické či rekreační funkce, žádá vyspělá společnost se nevyhne řešení takových událostí. Rostoucí zájem odborné i laické veřejnosti o problematiku přírodních a společenských rizik, a tedy i polomů, je jedním z projevů péče o uchování a zlepšení kvality života.

Polomy jsou výsledkem komplexních procesů mezi přírodními a antropogenními faktory. Jejich vznik je ovlivněn množstvím faktorů klimatických, topografických, fyzikálních, biologických a do značné míry také faktory antropogenními (RUEL 1995). Člověk ovlivňuje stabilitu lesních porostů nejen přímo prostřednictvím hospodářských zásahů při pěstování lesa, ale i nepřímo např. vlivem exhalátů z průmyslu, dopravy a pod. Větrné polomy jsou společně s kůrovcem a případně sněhem

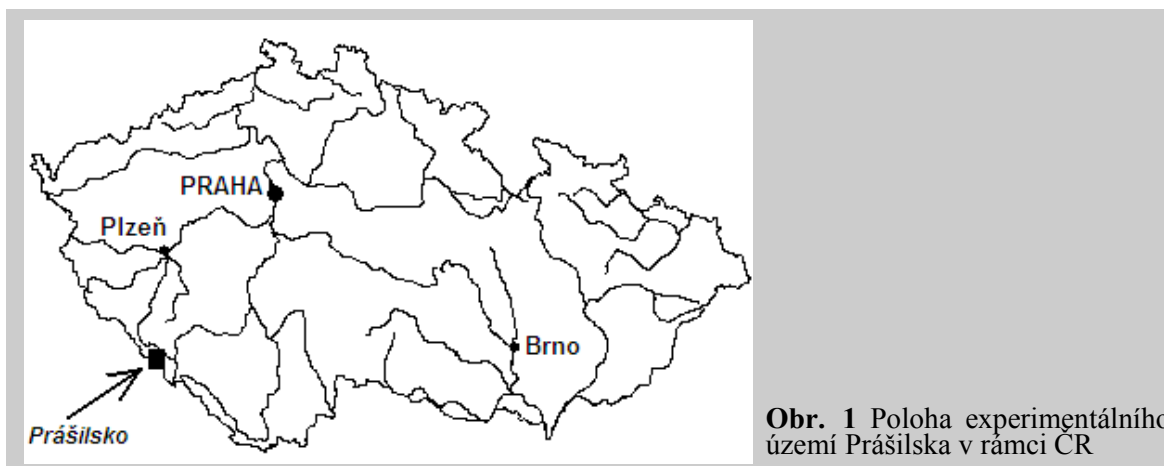
a námrazou jedním z nejčastějších faktorů, které ovlivňují lesní porosty na území střední Evropy. S rozvojem informačních a komunikačních technologií vzrůstají možnosti monitoringu a predikce větrných kalamit. Vždy je však nutné si uvědomit, že predikce ohrožení lesních porostů větrem je náročným procesem se značnými nároky na znalosti v řadě vědních oborů počínaje meteorologií a klimatologií, přes hospodářskou úpravu lesů a statistiku a geografickými informačními systémy konče. Vzhledem k množství faktorů, jež ovlivňují chování větru a jeho dopady na lesní porosty, budou proto tyto predikce pravděpodobně vždy zatíženy určitými nepřesnostmi.

V noci z 18. na 19. ledna 2007 postihl velké části Šumavy v JZ části ČR orkán Kyrill. Vznikl v důsledku zformování tlakové výše nad jím Evropy a tlakové níže nad Skandinávií. Vlivem velkého tlakového gradientu (rozdílu tlaku) mezi těmito oblastmi vznikl velmi silný vítr západního proudění s obrovskými dopady jak na lesní porosty, tak na lidská obydlí a infrastrukturu obcí a měst takřka v celé střední Evropě. Orkán dosahoval v nárazech rychlosti až 170 km.h^{-1} , většinou však okolo 130 km.h^{-1} . Na území Šumavy byla zaznamenána nejvyšší

* Ústav geoniky Akademie věd ČR, Ostrava, pobočka Brno, Drobného 28, 602 00 Brno, Czech Republic, e-mail: kolejka@geonika.cz,

** Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1/1665, 613 00 Brno, Czech Republic, e-mail: klimanek@mendelu.cz, tomas@mikita.cz,

*** Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha Boční 1401/2, 141 00 Praha 4, Czech Republic, e-mail: svoboda@ufa.cas.cz



Obr. 1 Poloha experimentálního území Prášílska v rámci ČR

rychlost na meteorologické stanici na Churáňově 176 km.h⁻¹. Po obou stranách státní česko-německé hranice úplně nebo částečně poškodil desítky km² lesních porostů ve všech zónách Národního parku Šumava a Národního parku Bayerischer Wald. Škody způsobené orkámem Kyrill dosáhly na české Šumavě celkové výše okolo 700 tisíc m³ poškozené dřevní hmoty (ústní sdělení pracovníků Správy NP a CHKO Šumava).

Pro analýzu porostů v prostoru působení orkánu Kyrill v prostoru západní Šumavy bylo vybráno vzorové testovací území Prášílsko (obr. 1) s rozlohou kolem 70 km².

Bořivé větry, které způsobují škody na lesních porostech, se vyskytují se stále kratší periodicitou. Větry s nárazovou rychlostí kolem 110 km.h⁻¹ se vyskytují na Šumavě až pětkrát do roka. Nedávná pohroma v podobě orkánu Kyrill byla už pátá v průběhu posledních 25 let. Ještě silnější větry vykazují periodicitu kolem 30 let. V roce 2008 se polomy ve stejném území vyskytly znovu, naštěstí v daleko menším rozsahu. Od druhé poloviny 19. století je šumavským polomům věnována značná pozornost vedena snahou o minimalizaci škod na lesních porostech (ŠEVĚTÍNSKÝ 1895, JELÍNEK 1985). Vítr je tak velmi významným fenoménem ovlivňujícím přírodu a ekonomiku Šumavy, stejně jako dalších evropských pohorí a boreální lesní zóny.

Pro reprezentativní testovací území Prášílsko byly postupně shromažďovány nezbytné podkladové materiály a geoinformace z veřejně dostupných zdrojů, především z databází Správy národního parku a CHKO Šumava či MŽP ČR, tedy takové informace, které jsou standardně k dispozici na území ČR obecně, a v chráněných územích obzvláště.

CÍL VÝZKUMU

Přes dlouhodobou tradici lesnického hospodaření v českých zemích patří větrné kalamity

stále k jedněm z nejčastějších a také z nejzávažnějších faktorů působících škody na lesních porostech. Obecné zákonitosti vzniku polomů stejně jako obecné principy lesnického hospodaření vedoucí k eliminaci škod větrem jsou sice široké odborné lesnické veřejnosti dlouhodobě známy (např. směr obnovy proti převažujícímu směru větru, tvorba odluk, rozluk a závor), ale vzhledem ke komplexnímu působení větru a jeho variabilitě, však není toto hospodaření dostatečně optimalizované či vhodně prostorově umístěné. Cílem výzkumu bylo nalézt na základě běžně dostupných zdrojových dat formalizované postupy pro hodnocení pravděpodobnosti poškození lesních porostů větrem za využití geoinformačních technologií. Významnou roli mezi faktory, majícími vliv na vznik polomů, sehrávají také vlastnosti reliéfu. Součástí výzkumu tedy bylo také zjištění, které parametry reliéfu se na vzniku polomových škod podílejí. Výsledky hodnocení byly zpracovány v software ESRI ArcGIS 9.2 do podoby map ohrožení lesních porostů větrem s ohledem na parametry reliéfu. Výzkum v tomto území probíhal v letech 2006 – 2008 v rámci projektu STRiM „Remotely accessed decision support system for transnational environmental risk management“, programu Evropské unie INTERREG IIIB CADSES.

MODELY PRO HODNOCENÍ OHROŽENÍ LESNÍCH POROSTŮ VĚTREM

V průběhu posledních dvou desetiletí byly příčiny vzniku polomů zkoumány řadou autorů (LOHMANDER a HELLES 1987, PELTOLA a KELLOMÄKI 1993, VALINGER a FRIDMAN 1997, KERZENMACHER a GARDINER 1998, GARDINER a QUINE 2000; GARDINER et al. 2000, BYRNE a MITCHELL 2007). Výsledkem většiny studií bylo zjištění, že vznik polomů je nejvíce ovlivněn lesnickým hospodařením – druhovou, věkovou

a prostorovou skladbou lesních dřevin – a také celkovou strukturou krajiny – tj. prostorovým rozmístěním krajinných jednotek s různými vlastnostmi. Důležitou rolí v diferenciaci krajiny hraje reliéf (MINÁR et al. 2009).

V současném lesnickém výzkumu zaměřeném na lesní polomy je možné se setkat s řadou modelů umožňujících analýzu rizika ohrožení lesních porostů větrem.

Modely pro hodnocení ohrožení lesních porostů větrem:

- Mechanické – hodnotí stabilitu na základě poznatků o stabilitě jedince, získaných na základě testování stability stromu vůči ohybu či zlomu
- Empirické – hodnotí stabilitu porostů na základě statistické analýzy přírodních faktorů (např. klima, půda, reliéf, druhová skladba lesa a pod.)
- Mechanicko-empirické – kombinují oba základní principy.

Ačkoliv většina mechanicko-empirických i čistě empirických modelů zohledňuje vliv terénu a porostních charakteristik na vznik polomů, často jsou tyto modely úzce orientovány na danou řešenou lokalitu a vycházejí ze zdrojových dat, jež nejsou obecně dostupná pro lesní porosty na území České republiky (například výška nasazení koruny, rozestup stromů apod.).

Výsledky dosavadních analýz potvrzují empirické zkušenosti o vlivu stanoviště a dřevinné skladby na výši škod. Za jeden z nejdůležitějších faktorů autoři pokládají reliéf povrchu Země (orientace a sklon plochy) (KURKOVÁ et al. 2008).

PŘÍRODNÍ POMĚRY ZÁJMUVÉHO ÚZEMÍ PRÁŠILSKA

Studované testovací území se nachází v západní části NP Šumava v polesí Prášily a Železná. Území je ohraničeno ve vnitrozemí ČR většinou místními komunikacemi, jižní okraj tvoří státní hranice se Spolkovou republikou Německo (Bavorsko).

Po geologické stránce území náleží do české části moldanubika. Západní polovina příhraničního pásma a střed území jsou budované cordierit-biotitickými migmatity s muskovitem až migmatitizovanými pararulami. Jihovýchodním směrem navazuje horninový masív tvořený chlorit-muskovitickými svorovými rulami, místně až svory a fylitovými svory (VEJNAR 1991, PELC a ŠEBESTA ed. 1994). Do vnitrozemí jsou oba metamorfované masívy lemované intruzemi biotitických granodioritů a muskovit-biotitických žul šumavského plutonu. Mladší substráty jsou zastoupené až kvartérní-

mi sedimenty a zvětralinami. V sousedství ledovcového Prášílského jezera a jezera Laka se nacházejí degradové glacienní sedimenty (till) a kamenité až balvanovité svahové sedimenty pleistocenního stáří. Poměrně často se vyskytují zmitostně rozmanité soliflukční sedimenty. Holocenní materiály jsou zastoupené rozmanitými svahovinami, rozsáhlými rašeliništi v údolních polohách a šterkovo-písečnými uloženinami podél vodních toků.

Vrchovinný až hornatinný terén vybraného území představuje pohraniční pásmo Šumavy. Klenbovitě vrcholy tohoto pásma přesahují nadmořskou výšku 1300 metrů v několika kótách (Debrník 1337 m, Ždánidla 1308 m, Poledník 1315 m). K severu se oblý hřbet svažuje do sníženiny okolo řeky Křemelné, protékající společně se soustavou pramenných toků od západu k východu. Zde nadmořské výšky klesají až na 718 m. Sníženina má na mnohých místech takřka rovinatý reliéf s početnými rašeliništi. Ze sníženiny mezi klenbovitě vrcholy zabíhají poměrně hluboká údolí. V údolích Jeleního potoka a Prášílského potoka se v pleistocenu vytvořila menší ledovcová jezera. Svahy vrcholů jsou formované pleistocenním mrazovým zvětráváním a soliflukcí s drobnými skalními útvary (skály, stupně kryoplačných teras a balvanové soliflukční proudy). Údolní dna jsou většinou plochá a potoky doprovázejí neširoké, poměrně členité nivy na podloží písčítých (místně až šterkovitých) uloženin.

Klima této části Šumavy je celkově drsné. Průměrné roční teploty jsou mezi 6 °C v údolních polohách a méně jako 3 °C na nejvyšších kótách. Krajina dostává poměrně značné množství atmosférických srážek. Jejich roční úhrn kolísá od necelých 1000 mm na severovýchodě po více jak 1200 mm na západě a jihu. Bořivé větry, které způsobují škody na lesních porostech, se vyskytují se stále kratší periodicitou.

Z hydrogeografického hlediska je experimentální území položené na hlavním evropském rozvodí, které v severním cípu přechází asi 5 km úsekem českého území a pod kótou Debrník se vrací na území Německa. Pramenné úseky některých pravostranných přítoků Křemelné tak přicházejí z Bavorska. Malé území okolo Železné Rudy (severozápadní výběžek území) se nachází v povodí Dunaje, zbytek v povodí Labe. Zajímavostí jsou ledovcová jezera Laka a Prášílské. Jejich hladiny, v obou případech uměle navýšené přehrazením výtoku už v 19. století, vyplňují mělké pánve na údolních svazích ve výškách okolo 1100 m n. m.

Půdní pokryv reprezentují půdy vázané na rozmanité zvětraliny silikátových krystalických hornin od primitivních litozemí, přes rankery a kambizemě, po kryptopodzoly a podzoly ve vyšších chladnějších a vlhčích polohách. Hojně

jsou rozšířené organozemě a gleje na údolních dnech.

Potenciální vegetace odpovídá třem lesním vegetačním stupňům. Nejnižší polohy s průměrnými ročními teplotami mezi 4,5 – 5,5 °C a srážkami 900 – 1050 mm/rok v nadmořských výškách 800 – 970 m patří do 6. smrko-bukového stupně, v kterém dominuje buk s významnou příměsí smrku a jedle. Zastoupená je zde též bříza, jeřáb a borovice, na bohatších půdách i javor klen. Střední polohy ve výškách 970 – 1210 m n. m. s teplotami 4,0 – 4,5 °C a srážkami 1050 – 1200 mm/rok zaujímá 7. buko-smrkový lesní vegetační stupeň, kde už výrazně dominuje smrk, zatímco buk a jedle dorůstají jen do podúrovně stromové vrstvy. Rozvoj smrku je už v těchto výškách podporován vysokým podílem horizontálních srážek. Nejvyšší polohy testovacího území s průměrnými ročními teplotami od 2,5 do 4,0 °C a ročními srážkami 1200 – 1500 mm patří do 8. smrkového stupně. Zde dominuje smrk s příměsí jeřábu. Jen v chráněných polohách se objevuje javor klen a jedle; buk jen v zakrslé formě. Porosty jsou přirozeně rozvolněné a velkou část vláhy čerpají z horizontálních srážek. V současnosti jsou porosty značně antropogenně přeměněné preferencí smrku. Jedle a listnáče se vyskytují jen velmi omezeně.

Území je poměrně dobře zpřístupněné hustou sítí zpevněných a nezpevněných veřejných a lesních cest, které jsou mnohdy dědictvím po dlouhodobé přítomnosti vojsk v pohraniční oblasti naší nedávné minulosti. Některé prostory jsou veřejnosti dodnes nepřístupné z důvodu rizika nevybuchlé munice. V nevelké vzdálenosti od státní hranice probíhá průsek, ve kterém byly kdysi umístěny pohraniční ženíjní zátarasy a který místy dosahuje šířky až 20 metrů.

FAKTORY PODÍLEJÍCÍ SE NA VZNIKU POLOMŮ

Přírodní jevy, které obvykle nepodléhají vlivu člověka a projevují se ohromnou ničivou silou, nazýváme přírodními katastrofami (BRYANT 1991) či živelnými pohromami (ALEKSEJEV 1988). Všeobecně se vyznačují velmi rozmanitou dobou trvání, která se může pohybovat od několika minut (např. laviny), hodin (bahenní proudy) či dní (sesuvy) po několik měsíců (např. povodně). Bez ohledu na svoji podstatu, podléhají tyto katastrofy při výskytu (v prostoru a čase) a v průběhu následujícím zákonitostem:

- každý druh rizika je typický pro určité území a polohu, tzn. respektuje konkrétní výběr a hodnotu přírodních a případně také antropogenních faktorů,

- každý druh rizika se opakuje s určitou časovou a prostorovou pravidelností, tzn. že v náchylných lokalitách je možné počítat s výskytem katastrofy, nicméně doba nástupu je vázaná na splnění vícero podmínek,
- výskyt každé katastrofy může být s větší či menší pravděpodobností předpovídaný podle její závislosti na rozsahu, délce trvání, intenzitě geologických či hydro-meteorologických procesů, problémem však zůstává vysoká nejistota předpovědi právě těchto požadovaných procesů.

Podle krajinné složky, ze které vychází impuls k odstartování přírodní pohromy, můžeme rozlišit následující rizika (MAZUR a IVANOV 2004):

- geologicko-geomorfologické – s predispozicí založenou dominantně v litosférické části s reliéfem (např. sesuvy, říčení, laviny, eroze, poklesy, zemětřesení, vulkanismus aj.),
- meteorologicko-klimaticko-hydrologické – iniciované atmosférickými a hydrickými parametry území ze současného či dlouhodobého hlediska (např. povodně, tornáda, sucha, polomy aj.),
- biotické – způsobené „samovývojem“ rostlinného či živočišného druhu, společenstva, řetězce či ekosystému, často však v pozadí ovlivněné biotickými katalyzátory (hmyzí kalamity, přemnožení škůdců, změna biodiverzity, invaze druhů a pod.).

Přestože impuls obvykle vychází z některé z uvedených složek a katalyzátorem pohromy je většinou určitá vlastnost dané krajinné složky nebo proces v ní probíhající, riziko často dosahuje komplexního rázu s důsledky ve všech složkách krajiny. Na vzniku pohromy se podílejí vždy i ostatní složky, třebaže některé jejich parametry pohromy umožňují nebo jí brání. Oslabená obrana proti přírodní pohromě tak může být její podmínkou.

V případě lesních polomů lze předpokládat, že některá území s konkrétními přírodními (a lesohospodářskými) parametry jsou náchylnější k jejich výskytu. V případě Šumavy nakonec tyto původně meteorologické hazardy přecházejí v hazardy biotické, neboť polomy mívají často za následek kůrovcové kalamity. Výzkumná hypotéza předpokládá, že výskyt polomů, množství způsobených škod a náklady na jejich zmírnění podléhají zákonitému spolupůsobení přírodních faktorů území a předchozích lesohospodářských zásahů do krajiny. Je nepochybné, že reliéf, jeho konfigurace a charakter aktivního povrchu hrají rozhodující roli v modifikaci směru a rychlosti větru, a tím i v jeho

bořivé schopnosti, ale v konkrétních místech ani směr větru nemusí odpovídat údajům z meteorologických stanic (KLIMÁNEK et al. 2008).

Chování větru v přízemní vrstvě atmosféry ovlivňuje množství faktorů, z nichž pouze některé je možné exaktně definovat a pomocí nich částečně chování větru modelovat. Základním problémem je tak stanovení faktorů, jež ovlivňují toto chování, a s tím spojené stanovení základních datových zdrojů.

Pro volbu datových zdrojů je zásadní stanovení faktorů majících vliv na změnu směru a rychlosti proudění vzduchu a také na stabilitu lesních porostů a jejich odolnost vůči větru. Základní datovou vrstvou, jež umožnila exaktní zhodnocení vlivu různých faktorů prostředí a charakteru lesních porostů na poškození bořivými větry, byla vrstva lesních polomů poskytnutá Správou NP Šumava. Podle dosavadních průzkumů patří mezi hlavní faktory mající vliv na vznik polomů, kromě četnosti a síly větrných vichřic, především konfigurace reliéfu, celková stabilita lesních porostů daná jejich druhovou, věkovou a prostorovou skladbou a také intenzita hospodářských zásahů provedených v minulosti.

Zpracování datových zdrojů a veškeré následné operace byly provedeny v softwaru ArcGIS 9.2 s nadstavbami Spatial Analyst a 3D Analyst, za použití souřadnicového systému

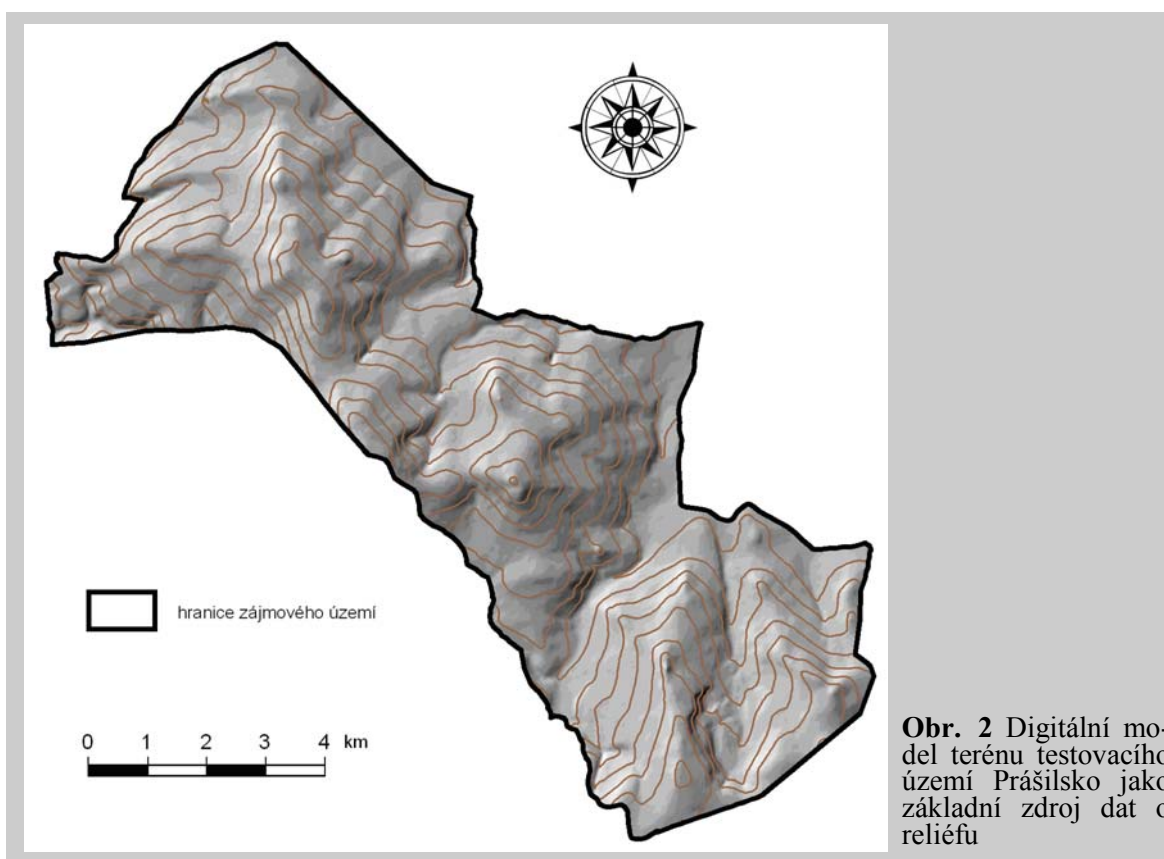
JTSK a výškového systému Baltského po vyrovnání (b. p. v.).

FAKTORY PROUDĚNÍ VZDUCHU

Rychlost a směr proudění vzduchu patří mezi faktory s jednoznačně největším vlivem na vznik polomu a zároveň s velmi velkou variabilitou v čase a prostoru. Modelování těchto veličin vyžaduje rozsáhlé znalosti chování větru v atmosféře a v přilehlém okolí zemského povrchu. Směr a rychlost větru proto nepatří mezi faktory s obecně dostupnými datovými zdroji. Pro zjištění souvislostí mezi vznikem polomů a směrem a rychlostí větru byly tyto datové vrstvy vytvořeny ve spolupráci s Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR v Praze. Proudění vzduchu v době orkánu Kyriil bylo počítáno pomocí trojrozměrného nestacionárního modelu proudění nad komplexním terénem PIAPBLM (SVOBODA et al. 2008) v území přesahujícím vlastní modelové teritorium i za státní hranici.

FAKTORY RELIÉFU

Mezi základní faktory, jež mají vliv na směr a rychlost větru, zcela neodmyslitelně patří konfigurace reliéfu, především tedy nadmořská výška území, expozice vůči světovým stranám, sklon terénu a jeho zakřivení jak ve vertikál-



Obr. 2 Digitální model terénu testovacího území Prášílsko jako základní zdroj dat o reliéfu

ním, tak v horizontálním směru. Všechny tyto faktory je možné v rámci geoinformačních systémů vyjádřit na podkladě digitálních modelů terénu (DMT). Digitální model terénu představuje interpretaci skutečného terénu určitého území v digitální podobě v různých datových formátech. Pro modelování reliéfu a následně analýzy byl použit digitální model terénu a částečně doplněn o některé výškové objekty (lesní porosty).

Digitální model terénu zájmového území (**obr. 2**) byl vytvořen v software ArcGIS 9.2 za použití nadstavby Spatial Analyst. Pro interpolaci DMT bylo použito nástroje Topo To Raster za použití vstupních dat vrstevnic ZABAGED s intervalem 5 metrů poskytnutých Správou národního parku Šumava. Výsledný rastrový digitální model s velikostí pixelu 10 metrů byl výchozím podkladem pro tvorbu mapy expozice a sklonu svahu a zakřivení reliéfu. Kromě zmíněných vrstev generovaných přímo z vytvořeného rastrového DMT byla za výchozí analytickou vrstvu zvolena také vrstva vzdálenosti od rozvodnice, která byla vytvořena pomocí hydrologických nástrojů nadstavby Spatial Analyst.

Jedním z důležitých faktorů, jež ovlivňují působení větru v určitém místě na zemském povrchu, je také jeho topografická exponovanost. Topografická exponovanost je geomorfometrickou charakteristikou reliéfu a charakterizuje lokalitu z hlediska její chráněnosti okolním reliéfem. Geomorfometrie je obecně vědním oborem, jenž se zabývá topografickou kvantifikací reliéfu na základě digitálních modelů terénu (PIKE et al. 2008). Stupeň topografické exponovanosti lokality je závislý na relativní výšce a vzdálenosti okolního horizontu. Podle RUELÁ (1995) je topografická exponovanost v daném místě rovna součtu všech vertikálních úhlů k horizontu v osmi základních směrech ku světovým stranám. Automatizovaný výpočet tohoto faktoru je možný v prostředí GIS na základě digitálních modelů terénu. Jedním z možných přístupů je výpočet na základě součtu vertikálních úhlů v osmi světových stranách v daném místě vůči zenitu a nadiru (YOKOYAMA et al. 2002). Tato metodika je implementována jakožto nástroj s názvem Morphometric Protection Index (MPI) do Open Source GIS SAGA.

Topografickou exponovanost je však možné modelovat také pomocí stínovaného reliéfu. Výpočet stínovaného reliéfu (hillshade) je nedílnou součástí většiny GIS aplikací, konkrétně byl výpočet prováděn za použití softwaru ESRI ArcGIS 9.2. Pro výpočet stínovaného reliéfu bylo použito nástroje Hillshade nadstavby Spatial Analyst. Tento nástroj vytváří hypotetickou iluminaci reliéfu a na základě nastavení pozice hypotetického zdroje světla kalkuluje míru

osvětlení každého pixelu v závislosti na jeho okolí v hodnotách 0 – 255. Mezi parametry při zadání patří také horizontální úhel směru osvětlení v podobě azimutu k severu a vertikální úhel od vodorovné roviny. Výchozími hodnotami při běžném zpracování stínovaného reliéfu pro prezentaci DMT jsou vertikální úhel 45 stupňů a horizontální úhel 315 stupňů (což odpovídá osvětlení od severozápadu). Algoritmus pro výpočet hodnoty iluminace má následující tvar (ESRI 2009):

$$\text{Hillshade} = 255 * ((\cos Z * \cos S) + (\sin Z * \sin S * \cos (Az - As))),$$

kde Z je zenitový úhel v radiánech, S je sklon svahu v radiánech, Az je azimut v radiánech a As je expozice svahu v radiánech. Pro účely hodnocení vlivu větru je možné zvolit hodnotu 5°, což koresponduje s údaji ze zahraniční literatury (BOOSE et al. 1994).

Stínovaný reliéf vypočtený uvedeným postupem nám vyjadřuje topografickou exponovanost lokality z daného směru. Pro komplexní hodnocení topografické exponovanosti v prostoru je nutné opakovat tento postup minimálně pro 8 směrů ze základních světových stran (S, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ) s následným součtem všech vytvořených stínovaných reliéfů. Vysoké hodnoty výsledného sumárního rastru indikují vysoký stupeň topografické exponovanosti a naopak (MIKITA a KLIMÁNEK 2010). Z porovnání topografické exponovanosti vytvořené na uvedeném postupu s výsledkem modulu MPI softwaru SAGA, bylo dosaženo takřka shodných výsledků (pouze s rozdílným intervalem hodnot). Míru exponovanosti reliéfu vůči větru určitého směru však získáme pouze kombinací údajů o směru větru se stejně orientovaným stínovaným reliéfem.

FAKTORY STANOVIŠTNÍ

Informace o lesním prostředí, zejména o stanovištích lesních porostů, jsou zpracovány v rámci celé ČR do podoby Oblastních plánů rozvoje lesa (dále jen OPRL).

Pro analýzu polomů byla z dat OPRL využita vrstva mapy typologické, jež popisuje stanoviště na základě typologického průzkumu. Typologický průzkum kategorizuje dané stanoviště podle fytoecologické indikace do typologických jednotek ÚHÚL, tzv. lesních typů (LT), které jsou dále sdružovány do vyšších jednotek souborů lesních typů (SLT). Z hlediska možného využití dat OPRL pro analýzu stanovišť je možné využít především datové vrstvy typologické mapy udávající mimo jiné také charakter podloží a půdní poměry, případně mapy lesních vegetačních stupňů udávajících diferenciaci ekosystémů s ohledem na nadmoř-

Název vrstvy	Zdrojová data
nadmořská výška	digitální model terénu
expozice svahů	digitální model terénu
sklon svahů	digitální model terénu
zakřivení reliéfu	digitální model terénu
vzdálenost od rozvodí	digitální model terénu
topografická exponovanost	digitální model terénu
věk porostů	data LHP
zakmenění	data LHP
přirozenost lesních porostů	data LHP
štíhlostní koeficient	data LHP
zastoupení smrku	data LHP
počet stromů na ha	data LHP
směr větru	DMT doplněný o výškové objekty, model větru PIA-PBLM, data LHP
rychlost větru	DMT doplněný o výškové objekty, model větru PIA-PBLM, data LHP
směr od porostních hran	DMT doplněný o výš. objekty, model větru PIAPBLM, data LHP
vzdálenost od porostních hran	DMT doplněný o výš. objekty, model větru PIAPBLM, data LHP
orientace reliéfu vůči větru (směr x expozice)	DMT doplněný o výškové objekty, model větru PIA-PBLM, data LHP
vlhkost půdy	oblastní plány rozvoje lesa
hloubka půdy	oblastní plány rozvoje lesa
ekologické řady	oblastní plány rozvoje lesa

Tab. 1 Přehled základních vrstev pro analýzu polomů

skou výšku. Převodem jednotek lesních typů, respektive souborů lesních typů, vznikly datové vrstvy vlhkostních poměrů, hloubky půdy a ekologických řad.

FAKTORY LESOHOSPODÁŘSKÉ

Údaje o aktuálním stavu lesních porostů, jejich druhové, věkové i prostorové skladbě jsou v rámci ČR zpracovávány pro jednotlivé lesní hospodářské celky (dále jen LHC) v podobě tzv. lesních hospodářských plánů (LHP). LHP jsou zpracovávány na dobu 10 let a definují základní hospodářská doporučení pro jed-

notlivé lesní porosty v rámci LHC. Za stěžejní pro analýzu polomů byly vybrány údaje o zakmenění porostů, věku porostů, zastoupení dřevin v rámci porostních skupin a také zastoupení, výška a tloušťka u celkově nejzastoupenější dřeviny smrku ztepilého (*Picea abies*). Vrstva počtu stromů na hektar a doplňková vrstva přirozenosti lesních porostů byly odvozeny z lesnických záznamů.

FAKTORY KOMBINOVANÉ

Samotné kategorie směru větru a expozice nevysvětlují dostatečně účinek různého směru

P. č.	Charakteristika reliéfu	Hypotéza o vlivu charakteristiky reliéfu na vznik polomu	Výsledek
1.	modelovaná místní rychlost větru s ohledem na reliéf	s rychlostí místního větru roste velikost poškození lesa	Největší škody nejsou vždy zapříčiněny větrem s největší rychlostí. Nad určitou hodnotu rychlosti již nejsou schopny lesní porosty odolávat vlivu větru. Kombinace ostatních nepříznivých podmínek může způsobit vznik polomu již při relativně velmi nízkých rychlostech větru
2.	modelovaný místní směr větru s ohledem na reliéf	podle údajů z meteostanic přicházel orkán Kyrill od SZ až Z, reliéfem modifikovaný směr způsobí největší škody	Přes celkově největší zastoupení severozápadního směru místního větru, jak v celém zájmovém území, tak v místech polomů, měl největší ničivý efekt vítr západoseverozápadního směru
3.	nadmořská výška	lze předpokládat, že největší poškození lesních porostů bude ve vyšších nadmořských výškách	Z výsledků vyplývá, že se vzrůstající výškou se zvyšuje pravděpodobnost poškození polomy
4.	sklonitost reliéfu	obecně lze předpokládat větší ničivý účinek větru v místech s menším sklonem	Na základě výsledků lze usuzovat na pouze velmi malý vliv sklonu terénu na vznik polomů. Je však patrný klesající trend výskytu polomů se zvyšujícím se sklonem reliéfu
5.	expozice svahů mimo rovin se sklonem do 3°	podle údajů z meteostanic přicházel orkán Kyrill od SZ až Z, dominantní směr ve volné atmosféře se projeví největšími škodami	Z výsledků analýzy vyplývá, že nejvíce byly poškozeny lesní porosty s převládající jižní, jihozápadní až západní expozicí. Na základě porovnání statistických ukazatelů můžeme usuzovat na celkově spíše menší vliv faktoru expozice vůči směru větru ve volné atmosféře na vznik polomů v území
6.	celkové zakřivení reliéfu	nejvíce budou poškozeny lesní porosty v plochých částech reliéfu, ploché vrcholy s mírným konvexním tvarem a plochá široká dna údolí s mírně konkávním tvarem	Průběh spojnice trendu poukazuje na vyšší pravděpodobnost poškození se vzrůstajícím zakřivením reliéfu. Podle výsledků zcela jasně a v souladu s hypotézou stoupá poškození s vyšším konvexním zakřivením reliéfu. Nejvíce jsou proto ohroženy plošiny a vrcholové partie elevací
7.	vzdálenost od rozvodí	se vzdáleností od rozvodí klesá pravděpodobnost poškození porostů větrem	Výsledky analýzy jsou značně ovlivněny výběrem intervalu vzdálenosti a vzhledem k relativně vyrovnanému zastoupení kategorií není možné počítat s přílišným vlivem tohoto faktoru
8.	topografická exponovanost	topografická exponovanost je charakteristikou reliéfu, jež reprezentuje stupeň chráněnosti dané lokality okolním reliéfem, chráněné plochy budou vykazovat nižší poškození větrem	Chráněné plochy jsou prakticky nepoškozené. S exponovaností škody rostou, avšak nejexponovanější plochy byly dotčeny o něco méně, patrně v důsledku dřívějšího poškození a momentální přítomnosti dlouholetých holin či mladého lesa
9.	hloubka půdy a zvětralin	mělké vrstvy znemožňují hluboké zakořenění, což vede k labilitě porostů a vyšším škodám	Výsledek analýzy vlivu hloubky půdy potvrdil pravý opak, pravděpodobnost vzniku polomu je očividně přímo úměrná hloubce půdy. Příčiny je možné hledat v kombinaci se zmíněným zamokřením půdního profilu, kdy u hlubokých půd je nutné očekávat vyšší hladinu podzemní vody znemožňující hlubší zakořenění, v případě silně kamenitých půd zařazených do mělkých dochází často k objetí kamenů kořenovým systémem stromu, a tak ke zvýšení stability kmene
10.	akumulační prostory vláhy	míra zamokření půdního profilu vykazuje přímou úměru s výskytem polomů	Podmáčená a mokrá stanoviště jsou vázána na údolní polohy, které jsou chráněny před působením větru a většinou neumožňují intenzivnější hospodářské využití, proto převládá na těchto stanovištích přirozená dřevinná skladba odolná vůči polomům a zcela logicky byly více postiženy stanoviště svěží a vlhká s mělce kořenícími smrky
11.	orientace reliéfu vůči místnímu směru větru	návětrné svahy s porosty pod nárazy větru budou více poškozeny	Na základě výsledků nedochází na návětrných svazích přímo vystavených větru k výraznějšímu poškození než u porostů na svazích závětrných, což může být dáno různým sklonem terénu, turbulencemi nebo padavými větry na závětrných svazích

Tab. 2 Seznam relevantních faktorů reliéfu na vznik polomů, odhad jejich účinku a výsledky hodnocení

větru při kontaktu s různě orientovaným reliéfem. Kombinací těchto dat proto byla vytvořena vrstva orientace reliéfu vůči směru větru.

Z dosavadních průzkumů vyplývá, že značný vliv na vznik polomů má také přítomnost porostních okrajů či hran. Tyto hrany vznikají buď jakožto důsledek hospodářské činnosti člověka (mýtní těžbou), nebo přirozeně při předchozím poškození porostů větrem, případně také u extrémních částí reliéfu (skalní výchozy). Nezbytnými daty pro analýzu polomů jsou proto také vrstvy směru a vzdálenosti od porostních hran, vytvořené složitějšími postupy z digitálního modelu povrchu s využitím fokálních a hydrologických nástrojů. Doplňkově byl hodnocen také faktor orientace reliéfu vůči směru větru vzniklý kombinací směru větru a expozice.

HODNOCENÍ ROLE RELIÉFU PŘI VZNIKU POLOMŮ

Průzkum vlivu jednotlivých faktorů (**tab. 2**) na vznik polomů byl nejprve proveden pomocí jednoduchého statistického vyhodnocení jednotlivých datových vrstev v místech polomů. Vzhledem k velkému rozsahu hodnot bylo nutné každou vrstvu nejprve překlasifikovat do předem zvolených kategorií. V rámci každé datové vrstvy bylo provedeno celkové zastoupení kategorií v místech polomů. Toto hodnocení je však značně ovlivněno celkovým výskytem dané kategorie v zájmovém území, což potvrzuje u převážné většiny datových vrstev také obdobné zastoupení v rámci polomů a v rámci zájmového území. Pro odstranění tohoto vlivu bylo zastoupení každé kategorie v polomech poděleno celkovým zastoupením v území a vyjádřeno v procentech. Problém však nastává v případě kategorií s celkově velmi malým zastoupením v rámci zájmového území, které byly značně poškozeny vichřicí. Automaticky pak z výsledků vychází maximální vliv dané kategorie na vznik polomů, což vzhledem k celkovému zastoupení není statisticky prokazatelné. Z tohoto důvodu byly veškeré kategorie v rámci datových vrstev, jejichž zastoupení bylo menší než 1 % v celém zájmovém území, vyřazeny z analýzy.

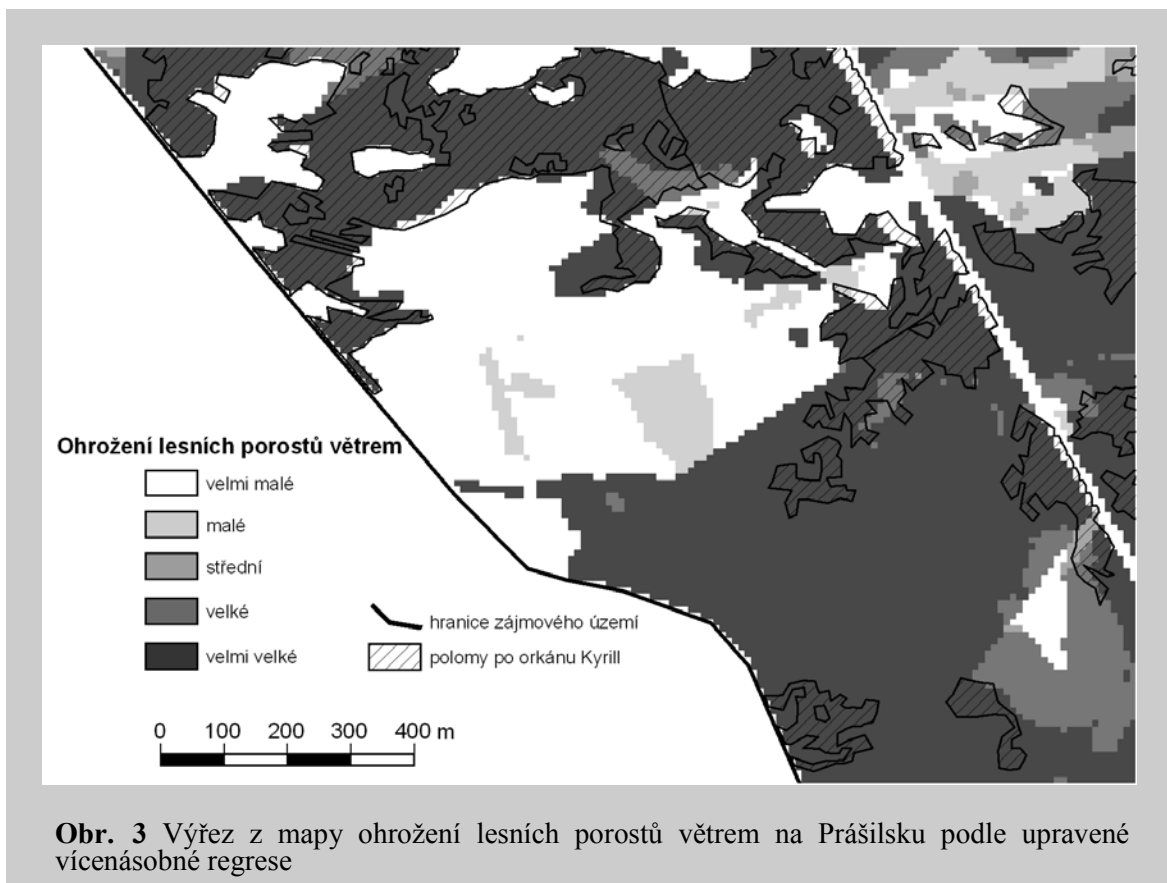
Další výsledky dokládají vliv samotného porostu na míru poškození větrem. Lesní porosty se zastoupením smrku vyšším jak 50 % jsou více náchylné ke vzniku polomu. V případě listnatých stromů je jednak v zimním období celková plocha koruny bez listoví mnohonásobně menší, neposkytuje tak větru dostatečnou oporu pro jeho působení, jednak se enormně neprojevuje vyšší zatížení sněhem a námrazou. Celkově podle trendu pak ohrožení klesá s počtem stromů na hektar. Je patrné, že byly

nejvíce postiženy porosty ve věku 130 let, celkově je možné při poměrném zhodnocení vztaženém k celému území dedukovat vzrůstající trend poškození s věkem. Největší ničivé účinky větru je možné předpokládat ve většině případů při nárazu do porostní stěny orientované čelně vůči směru větru, k největšímu poškození dochází v těsné blízkosti porostních hran první kategorie, tj. u porostních hran s čelní orientací ke směru větru, s menším vlivem u porostních hran s boční orientací a naopak s pouze minimálním vlivem u opačně orientovaných hran. Výsledky hodnocení vzdálenosti plně potvrdily existenci přímé závislosti mezi polomy a vzdáleností od porostních okrajů orientovaných čelně až bočně ku směru větru. Ohrožení klesá nepřímo úměrně se vzdáleností. Nejvíce jsou ohroženy porosty do vzdálenosti 50 až 100 metrů od porostních hran, při větších vzdálenostech ohrožení klesá takřka na minimum.

Z výsledků předběžné analýzy vlivu jednotlivých faktorů není možné jednoznačně určit převažující účinek některého z faktorů, ani faktor s celkově zásadním vlivem na vznik polomů. Výrazný vliv na vznik polomů má podle výsledků vzdálenost od porostních okrajů, věk lesních porostů, zastoupení smrku, počet stromů či zakmenění. Vliv větru na lesní porosty je nutno vnímat komplexně, kdy jeho působení a výsledný dopad jsou závislé na vzájemné kombinaci nejen všech hodnocených faktorů, ale i dalších, které není možno jednoduše v rámci našich obecných datových zdrojů pomocí GIS vyjádřit (např. vznik turbulencí). Dále je nutné připomenout, že v případě lesních porostů není možné naprosto vyloučit jejich poškození, je pouze možné definovat pravděpodobnost poškození v závislosti na kombinaci zvolených faktorů.

KOMPLEXNÍ HODNOCENÍ OHROŽENÍ LESNÍCH POROSTŮ

Jednoduché celkové zhodnocení ohrožení lesních porostů větrem je možné získat pomocí mapové algebry aritmetickým součtem všech faktorů. Kategorie jednotlivých faktorů byly pro tento účel reklasifikovány do 5 – ti třídní stupnice na základě jejich procentuálního zastoupení v polomech ve škále 1 – malé zastoupení tzn. malý vliv kategorie na vznik polomu, 5 – vysoké zastoupení tzn. velký vliv. Jednoduchým součtem všech reklasifikovaných rastrů byla získána výsledná sumární mapa. Ačkoliv výsledky ohrožení lesních porostů podle provedeného postupu dosahují relativně dobré kvality v porovnání se skutečnými polomy, je možné jednoznačně říci, že vliv jednotlivých faktorů je různý. Některé faktory tak mohou větší měrou působit na vznik polomů, některé naopak jen velmi málo či vůbec.



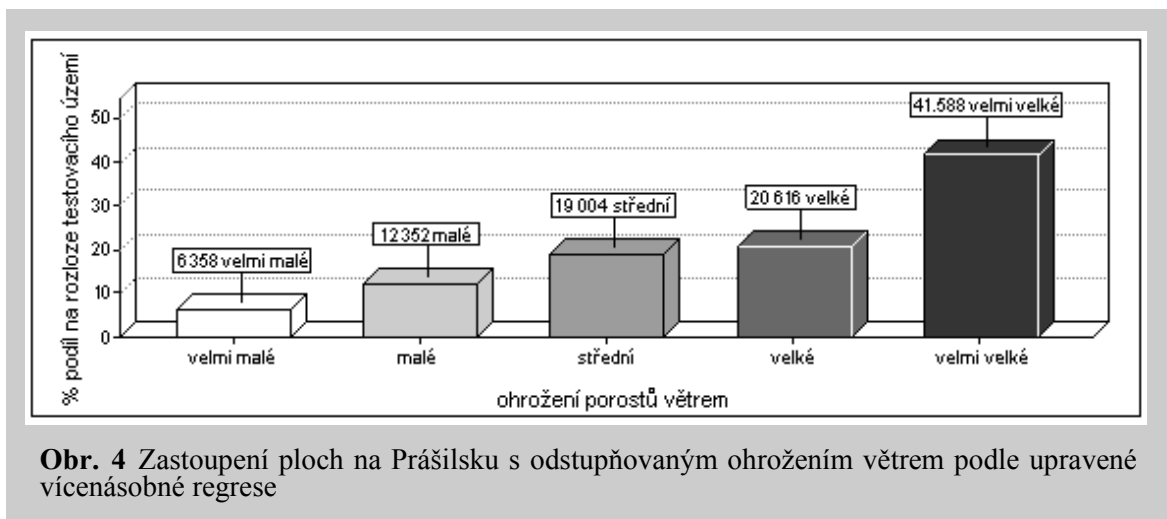
Obr. 3 Výřez z mapy ohrožení lesních porostů větrem na Prášílsku podle upravené vícenásobné regrese

Vliv zvolených kategorií byl rovněž posouzen pomocí vícenásobné regrese v programu STATISTIKA 8. Při zahrnutí všech hodnotených faktorů do regresní rovnice jsou výsledky do jisté míry ovlivněny jejich vzájemnou korelací. K největším závislostem mezi faktory dochází u expozice a orientace svahů vůči větru, mezi rychlostí větru a nadmořskou výškou, hloubkou půdy a přirozeností, věkem a počtem stromů a věkem a štíhlostním koeficientem.

Pro zjednodušení modelu ohrožení byly z regresní rovnice vyřazeny všechny faktory

s nízkou hladinou spolehlivosti, kam se dostaly zejména charakteristiky reliéfu. Tyto faktory vykazují v souvislosti s počtem pixelů jen velmi malou statistickou významnost. Po vyřazení faktorů s nízkou hladinou spolehlivosti byla získána následující rovnice (1) a areály s odstupňovanou mírou ohrožení větrem vyjádřeny v mapě (**obr. 3**):

$$\text{Ohrožení lesních porostů} = 2,114 * \text{EDAF} + 4,151 * \text{EUDIS} + 2,824 * \text{SM} + 2,656 * \text{STK} + 2,604 * \text{VEK} - 5,306 * \text{VLH} + 2,426 * \text{ZAKM}, \quad (1)$$



Obr. 4 Zastoupení ploch na Prášílsku s odstupňovaným ohrožením větrem podle upravené vícenásobné regrese

kde je:	
EDAF	edafické kategorie sloučené do ekologických řad
EUDIS	Euklidovské vzdálenosti od porostních okrajů
SM	zastoupení smrku
STK	štíhlostní koeficient
VEK	věkové stupně
VLH	vlhkost půdy
ZAKM	zakmenění porostů.

Výsledky dokazují, že rozhodující většina polomů nastala v potenciálně nejohroženějších lokalitách (**obr. 4**). Z výsledků vícenásobné regrese rovněž vyplývá, že největší vliv na vznik polomů má vlhkost půdy, následovaná vzdáleností od porostních okrajů, s menším vlivem zastoupení smrku, štíhlostního koeficientu, zakmenění, věku a ekologických řad. Faktory reliéfu v komplexu celkového vlivu prostředí a porostů tak ustoupily do pozadí.

KOMENTÁŘ VÝSLEDKŮ A MOŽNOSTI PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Výsledky výše popsaných postupů potvrzují jisté možnosti predikce ohrožení lesních porostů větrem za pomoci statistických metod s využitím geografických informačních systémů. Ačkoliv se pravděpodobně výsledky analýzy faktorů na jiném lesním území budou mírně lišit, přesto je možné alespoň pro území Šumavy potvrdit správnost zvolených postupů a dát tak základ pro obecný metodický postup hodnocení rizika poškození větrem.

Hlavními přínosy komplexního empirického přístupu k dané problematice jsou konkrétní výsledky statistického vyhodnocení vlivu zvolených faktorů na vznik polomů, jež nebyly v rámci tak rozsáhlého území a zároveň v tak podrobném měřítku na území ČR do nedávné doby provedeny. Tyto výstupy tak v některých případech potvrzují a v některých případech naopak zavrhuji obecně daná lesnická klišé.

Při volbě datových zdrojů byl kladen důraz na jejich obecnou dostupnost, zvažovanou však ve smyslu možnosti jejich pořízení (tzn., že skutečně existují pro celou ČR), nikoliv však ve smyslu okamžité dostupnosti. Ověření vytvořené metodiky na jiném lesním území v ČR znemožňovala právě okamžitá dostupnost dat.

Jakožto největší problém pro plošné uplatnění komplexního hodnocení ohrožení větrem se jeví především nedostatek údajů o směru a rychlosti větru. V případě této práce byly využity informace modelu PIAPBLM, jenž nená-

leží mezi obecně dostupné datové soubory. Jak je však patrné z výsledků statistického hodnocení tohoto faktoru, mezi rychlostí větru a rozsahem škod platí takřka přímá úměra, z dat o směru větru naopak vyplývá, že v rámci zkoumaného území i přes značnou členitost reliéfu celkově nedochází k procentuelně příliš významným změnám směru větru. Výsledky vícenásobné regrese potvrzují tuto domněnku, neboť faktory rychlosti i směru větru vykazují jen velmi malou hladinu významnosti. Málo významná se jeví také orientace směru větru ku expozici svahu, nicméně podle statistického vyhodnocení tohoto faktoru celkově příliš nestoupá ohrožení na návětrných svazích. Pro obecnou predikci vzniku polomů je proto možné definovat pouze jedinou rychlost a směr větru (např. podle převažujícího směru větru v území a maxima rychlosti z údajů nejbližších meteorologických stanic).

Je obecně známo, že konfigurace reliéfu významně ovlivňuje proudění větru a je nutné počítat s větším poškozením v hřebenových polohách, ve vyšších nadmořských výškách, s vyšší topografickou exponovaností. Nicméně z výsledků komplexního hodnocení pomocí vícenásobné regrese vyplývá, že tento vliv nehraje globálně až tak velkou roli. Výrazněji se však reliéf území projevuje nepřímo, neboť vertikální členitost se výrazně podílí na výškové diferenciaci lesních porostů, jejíž následkem může být vznik porostních okrajů.

Jak statistické hodnocení v místech polomů, tak výsledky vícenásobné regrese, potvrdily stěžejní vliv vzdálenosti od porostních hran na vznik polomů. Nevhodně orientované porostní okraje je proto možné označit za jednu z hlavních příčin vzniku polomů. Výsledky vícenásobné regrese jsou však značně ovlivněny jak volbou území, tak zvolenou metodou (použita pouze vícenásobná lineární regrese) a spíše naznačují možnosti přístupu k řešení daného problému. Dalšími možnými postupy by bylo použití logistické regrese, diskriminační analýzy či klasifikace maximalní pravděpodobnosti.

Přirozenost lesních porostů je dlouhodobě spojována s jejich stabilitou, výsledky provedených analýz však tyto domněnky zcela nepotvrzují. Důvody je nutné hledat v možných nedostatecích převodu druhové skladby do podoby strukturovaných porostních typů, výsledky však mohou být také ovlivněny volbou zájmového území s přirozeně vysokým zastoupením smrku. Při analýze území se zastoupením nižších vegetačních stupňů by pravděpodobně tento faktor uplatnil větší vliv na vznik polomů. Přirozenost lesních porostů nehraje v případě zájmového území nikterak zásadní roli na ohrožení větrem, mnohem více stabilitu, danou příslušností dřevinné skladby ke stanovišti, ovlivňují jeho edafické vlastnosti.

Z lesohospodářských faktorů vykazuje největší vliv na vznik polomů zastoupení smrku, společně s věkem, štíhlostním koeficientem a zakmeněním. Náhylnost smrkových porostů k vývrátům či zlomům je dlouhodobě známa a výsledky tuto vlastnost zcela potvrzují. Stejně tak je nutné počítat s větším ohrožením u porostů vyššího věku a také při snížení zakmenění. Na první pohled v protikladu k teoretickým předpokladům mohou být výsledky zastoupení kategorií štíhlostního koeficientu v místech polomů, kdy s vyššími hodnotami částečně klesá ohrožení polomy. Pokročilá analýza pomocí vícenásobné regrese však tyto předpoklady potvrzuje, podle regresní rovnice vzrůstá ohrožení s hodnotou štíhlostního koeficientu.

ZÁVĚR

Silné větry jsou v současné době jedním z faktorů, jež působí největší škody na lesních porostech. Pod vlivem klimatické změny je nutné v blízké i vzdálenější budoucnosti počítat s častějším opakováním výskytu větrů s vysokou rychlostí, což dokládají i nedávné události z dalších regionů Evropy. Vliv globálních klimatických změn, ať již ovlivněných činností člověka, či způsobených přirozenými výkyvy klimatu v posledních letech, je možné počítat bez jakýchkoliv hlubších poznatků a dlouhodobějších pozorování. Vývoj klimatu v posledních letech s krátkým a zároveň velmi teplým jarem, horkým létem s nerovnoměrnou distribucí srážek a s častým výskytem přívalových dešťů doprovázených silnými větry a v neposlední řadě teplé zimy střídané krátkými obdobími s vydatným sněžením a opět silnými větry, nejenže negativně působí na člověka a lesní ekosystémy přímo, například vlivem silných větrů a vznikem požárů v období sucha, ale také nepřímo dlouhodobě ovlivňuje zdravotní stav, oslabuje stromy vůči škůdcům a snižuje tak celkovou stabilitu stromů i celých porostů vůči vnějším činitelům.

Morfologický účinek větru se neomezuje jen na přímé přemísťování zvětralin a sedimentů. Jestliže objem uvolněné zeminy při vývratu jediného smrku dosahuje cca 1 m³, k dalšímu transportu na různé vzdálenosti je tak k dispozici při vývratech řádově desítek tisíc stromů v jediném polesí značné množství hmoty. Ačkoliv většina materiálu patrně zůstane v blízkosti místa vývratu a zásadně se bude podílet na formování poměrně členitého mikroreliefu, významná část bude svahovými procesy transportována i na velké vzdálenosti, pokud se neuloží v některé z vodních nádrží v povodí. Svahy postižené polomy však vykazují vyšší vodní retenční schopnost, což v kombinaci s odnoso-

vými procesy a vlastním konstrukčním účinkem vyvráceného kořene (a kmene) vytváří zásadně odlišné podmínky pro vývoj reliéfu území, než se běžně předpokládá. Vzhledem k tomu, že polomy jsou standardní součástí životního cyklu lesů mírného pásu, zejména lesů mělce kořenících dřevin, tedy spíše horských či boreálních smrkových lesů, nutno je zařadit mezi základní projevy morfogenetického účinku větru v mírné klimamorfogenetické zóně, resp. obdobném vertikálním stupni. Oblast morfogenetického účinku větru je však člověkem rozšířena výsadbou smrkových monokultur do teplejšího klimatu jak jižnějších, tak nižších horských a podhorských poloh. Probíhající klimatické změny, obecně nepříznivé pro smrkové porosty v jejich nepřírozených či okrajových stanovištích, však mohou v horizontu obmýtní doby smrkového porostu geografické rozšíření takového reliéfovotvorného účinku větru změnit.

PODĚKOVÁNÍ

"Výsledky demonstrovány v příspěvku vznikly v návaznosti na řešení výzkumného záměru MŠMT ČR č. MSM0021622418 "Dynamická geovizualizace v krizovém managementu" a projektu STRiM „Remotely accessed decision support system for transnational environmental risk management“, programu Evropské unie INTERREG IIIB CADSES."

LITERATURA

- ALEKSEJEV, N. A. (1988). *Stichijnyje javlenija v prirode: projavlenije, effektivnost' zashčity*. Mysl, Moskva, 254 p.
- BOOSE, E.R., FOSTER, D.R., FLUET, M. (1994). Hurricane Impacts to Tropical and Temperate Forest Landscapes. *Ecological Monographs*, 64, 4, 369 – 400.
- BRYANT, E. A. (1991). *Natural Hazards*. Cambridge University Press, Cambridge-New York-Melbourne, 294 p.
- BYRNE, K. E., MITCHELL, S. J. (2007). Overturning resistance of western redcedar and western hemlock in mixed-species stands in coastal British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 5, 931 – 939.
- ESRI (2009). How Hillshade works. < <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index>.

cfm?TopicName=How%20Hillshade%20works>. On-line [December 1st 2010].

GARDINER, B., PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S. (2000). Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, 129, 1, 1 – 23.

GARDINER, B. A., QUINE, C. P. (2000). Management of forests to reduce the risk of abiotic damage — a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management*, 135, 1 – 3, 261 – 277.

JELÍNEK, J. (1985). *Větrná a kůrovcová kalamita na Šumavě z let 1868 až 1878*. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem, 124 p.

KERZENMACHER, T., GARDINER, B. A. (1998). A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to wind. *Trees—Structure and Function*, 12, 6, 385 – 394.

KLIMÁNEK, M., MIKITA, T., KOLEJKA, J. (2008). Geoinformation analysis of factors affecting wind damage in the Šumava National Park. *Journal of Landscape Ecology*, 1, 2, 52 – 66.

KURKOVÁ, M., PACOUREK, P., SOJKA, L., TOMANČÁK, O. (2008). Vyhodnocení následků kalamity Kyrill na lesích ve správě LČR. *Lesnická práce*, 87, 10 – 13.

LOHMANDER, P., HELLES, F. (1987). Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, 1 – 4, 227 – 238.

MAZUR, I. I., IVANOV, O. P. (2004). *Opasnyje prirodnyje processy*. Ekonomika, Moskva, 702 p.

MIKITA, T., KLIMÁNEK, M. (2010). Topographic exposure and its practical applications. *Journal of Landscape Ecology*, 3, 1, 42 – 51.

MINÁR, J., FALŤAN, V., BÁNOVSKÝ, M., DAMANKOŠOVÁ, Z., KOŽUCH, M. (2009). Influence of site conditions on the windstorm impact: A case study of the High Tatras foothills in 2004. *Landform Analysis*, 10, 95 – 101.

PELC, Z., ŠEBESTA, J. (1994). *Geologická mapa ČR 22 – 33 Kašperské Hory (1:50 000)*. Český geologický ústav, Praha.

PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S. (1993). A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand age. *Silva Fennica*, 27, 2, 99 – 111.

PIKE, R. J., EVANS, I. S., HENGL, T. (2008). Geomorphometry: A Brief Guide. In Hengl, T., Reuter, H. I., eds. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Series Developments in Soil Science, 33. Elsevier, 3 – 30.

RUEL, J. – C. (1995). Understanding windthrow: Silvicultural implications. *Forestry Chronicle*, 71, 4, 434 – 445.

SVOBODA, J., MIKITA, T., KOLEJKA, J. (2008). Numerické modelování větru na Šumavě během orkánu Kyrill. In Klimánek, M., ed. *Geoinformační podpora rozhodování v lesích postižených přírodními pohromami*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 41 – 52.

ŠEVĚTÍNSKÝ, J. (1895). *Dějiny lesů v Čechách*. Pisek.

VALINGER, E., FRIDMAN, J. (1997). Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecology and Management*, 97, 3, 215 – 222.

VEJNAR, Z. (1991). *Geologická mapa ČR 21 – 44 Železná Ruda (1:50 000)*. Ústřední ústav geologický, Praha.

YOKOYAMA, R., SHIRASAWA, M., PIKE, R. J. (2002). Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68, 3, 257 – 265.