

Geografická analýza lokálního výskytu lesních polomů na základě empirického přístupu

Geographical analysis of local occurrence of forest windthrows using empirical approach

Lukáš Krejčí

*Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, České republiky
krejci.lucas@gmail.com*

Abstract

This paper is attempting to describe basic approaches and methods (mechanistic and empirical) of assessing wind damage hazard using widely available GIS software and application of basic statistical methods to assess windthrow risk. The analysis of wind damage risk is carried out in the southwest part of the Bohemian Forest (Šumava) in the region of Prášíly. The statistical method of logistic regression representing empirical approach is used to predict the probability of this hazard. Stepwise method and empirical comparison of alternative models are applied to help in the formulation of model and finding the most appropriate explanatory variables. As a result of the stepwise selection method of independent variables elevation, stand age, wind speed during the storm Kyrill, and soil depth are found to be the most important explanatory variables. Logistic regression formulas are incorporated into GIS and a windthrow hazard map is then derived from the model using raster calculator in ArcGIS Spatial Analyst. The results and the potential for spatial prediction of wind damage using empirical modelling represented by logistic regression are discussed at the end of the paper.

Key words: GIS, windthrow, logistic regression, natural hazard, Bohemian Forest, Šumava

Úvod

Jedním z hlavních škodlivých faktorů působících na lesní porosty je vítr (ENNOS 1997, SCHAETZL et al. 1989), škody způsobené větrem jsou také významným negativním ekologickým faktorem (HALE et al. 2012). Poškození způsobené větrem a následná těžba dřeva není vážným problémem pouze v České republice. Příkladem může být vichřice z ledna roku 2005 v jižním Švédsku, která měla za následek poškození až 70 miliónů m³ dřeva (PELLIKKA & JÄRVENPÄÄ 2003), dále orkán Kyrill, který postihl v lednu 2007 velkou část Evropy, způsobil velké finanční ztráty a vyžádal si 47 lidských životů (BARREDO 2010) nebo například vichřice Emma z března roku 2008, která dosahovala maximální rychlosti větru až 54 m.s⁻¹ (orkán Kyrill dosahoval maximální rychlosti přibližně 60 m.s⁻¹) a zasáhla většinu střeoevropských států (HOLUB et al. 2009).

Největší škody na lesních porostech bývají ve střední Evropě způsobené silnými větry, které se nejčastěji vyskytují v zimním období a jsou způsobeny nízkými tlakovými nížemi, které se formují na severní polokouli ve středních zeměpisných šířkách (USBECK et al. 2009). Tyto vichřice objevující se v zimních měsících ovlivňují lesní porosty přímo jejich narušením, ale také nepřímo tím, že na poškozeném dřevě se vytvářejí podmínky pro nálet kůrovce (MEIER et al. 2006).

Poškození způsobené větrem má za následek nejen přímé finanční ztráty spojené s těžbou narušeného dřeva a sníženou hodnotou polomového dříví (SAVILL 1983, GARDINER 2006), ale také škody nepřímé, mezi které patří zvýšený povrchový odtok, zvýšená náchylnost k erozi půdy, změna proudění vzduchu v přízemní vrstvě, snížená hodnota krajinného potenciálu pro rozvoj cestovního ruchu a mnohé další (KOREŇ 2005). Z ekologického hlediska může být vítr považován za významného činitele, který umožňuje přirozenou regeneraci a zvyšuje diverzitu na lesních stanovištích (QUINE 2000, RUEL & PINEAU 2002).

Cílem studie bylo provést geografickou analýzu lesních území z hlediska výskytu lesních polomů na základě empirického přístupu reprezentovaného statistickou metodou logistické regrese a GIS na modelovém území. Mezi dílčí cíle patřil návrh optimalizované datové struktury obsahující závislé a nezávislé proměnné vstupující do modelu logistické regrese, analýza dosažených výsledků a prezentace výsledků ve formě mapových výstupů reprezentujících pravděpodobnost rizika ohrožení lesních porostů větrem.

Současný stav

Mezi dva základní typy poškození lesních porostů větrem lze považovat vývrát a kmenový zlom (PRAUS 2006). VICENA (2003) dále podrobněji rozlišuje kmenový zlom na vrcholový, korunový a kmenový. Kmenové zlomy se nejčastěji vyskytují v dobře odvodněných lokalitách a u porostů s rozvinutým kořenovým systémem. Větrné vývraty lze naopak očekávat u mělce kořenicích porostů v podmáčených lokalitách (STATHERS et al. 1994).

Faktory ovlivňující pravděpodobnost výskytu větrného poškození v lesních porostech lze rozdělit do 4 skupin. První jsou (1) meteorologické charakteristiky, (2) vlastnosti stanoviště, (3) topografické podmínky a (4) vlastnosti stromu a porostu (QUINE & GARDINER 2007).

Mezi dva nejvíce uznávané faktory patří druh dřeviny a výška porostu (HANEWINKEL et al. 2011). Za další činitele, jež ovlivňují pravděpodobnost výskytu polomů, lze považovat vztah mezi střední tloušťkou porostu a jeho výškou, velikost koruny, hustotu a strukturu porostu, stav kořenového systému (hniloba) a další stanovištní charakteristiky jako orientace ke světovým stranám, sklon, odtokové poměry, půdní typ a další (HANEWINKEL et al. 2011).

Vliv druhu porostu na výši škod způsobených větrem byl v minulosti prokázán v České republice i v zahraničí mnoha autory. Například smrk ztepilý (*Picea abies*), který patří v České republice mezi nejrozšířenější dřeviny, je řazen mezi nejnáchylnější dřeviny k poškození větrem, což bylo v minulosti potvrzeno například VICENOU (1964, 1979, 2004), který analyzoval dopady větrných kalamit na území současného Národního parku Šumava. Vliv porostní skladby na výši škod potvrzují také současné zahraniční studie jako například práce VALINGERA & FRIDMANA (2011) ze Švédska nebo studie ALBRECHTA et al. (2012), která zdůrazňuje náchylnost jehličnatých porostů k poškození větrem. Nicméně STATHERS et al. (1994) tvrdí, že vztah mezi porostní skladbou a větrným poškozením není jednoznačný, jelikož poškození některých druhů porostů silně závisí na stanovištních podmínkách. Podobný názor zastává také NICOLL et al. (2006), který tvrdí, že náchylnost porostu k poškození větrem není vždy silně závislá na druhu porostu, ale je také často významně spojena s hloubkou zakořenění a půdním typem. Pochopení vzájemného vztahu mezi kořenovým systémem a půdou je zásadní ke zlepšení modelování odolnosti kořenového systému a následného vyvrácení stromu (SCHINDLER et al. 2012).

Poškození porostů větrem bývá častější ve zralých porostech než v porostech mladých (LOHMANDER & HELLES 1987, LEKES & DANDUL 2000) a s narůstajícím věkem porostů se obecně zvyšuje náchylnost k poškození větrem. Například v Japonsku existuje u porostů starších 41 let větší riziko poškození větrem než u porostů mladších. Takovéto poškození stromů ve starších porostech je úzce spojeno s jejich strukturou, jako například s výškou, průměrem kmene a velikostí koruny (KUBOYAMA et al. 2003). Ne vždy však poškození stou-

pá přímo úměrně s věkem porostů. RICH et al. (2007) analyzoval přibližně 30 tisíc stromů v Minnesotě v USA (9 druhů dřevin) pomocí statistické metody logistické regrese a zjistil, že poškození bylo nejvyšší ve zralých porostech ve věku okolo 90 let a porosty starší a velmi staré (126 až 200 let) byly poničeny méně. K podobným výsledkům došli i VALINGER & FRIDMAN (2011), kteří analyzovali dopady vichřice z roku 2005, která zasáhla jižní část Švédska.

Mezi další důležité faktory ovlivňující stabilitu stromu patří také vlhkost půdy (USBECK et al. 2010), stíhlostní kvocient nebo předchozí těžební zásahy (MIKITA et al. 2009). Dalším činitelem, který může zvýšit náchylnost lesních porostů k poškození větrem, je hranice porostních skupin mezi skupinami s různou porostní strukturou, jejímž vlivem se podrobně zabývali ZENG et al. (2009). Výskyt porostních okrajů je zdrojem potenciálního větrného poškození a má podstatný význam na složení živočišných druhů v porostu, na mikroklima a také procesy v ekosystému (ZHENH et al. 2005).

Vítr a následné škody významně ovlivňují strukturu a funkčnost lesních ekosystémů a způsobují lesním hospodářům napříč Evropou značné finanční ztráty (PELTOLA et al. 2010). Například během let 1990 a 1999 bylo v celé Evropě poškozeno díky větrným vichřicím v zimním období více než 275 mil. m³ dřeva a škody způsobené silným větrem v lednu roku 2007 a 2009 měly za následek jen ve střední a jižní Evropě přibližně 150 mil. m³ dřeva (PELTOLA et al. 2010).

Vítr patřil i v minulosti k hlavním přírodním škodlivým činitelům lesních porostů v Evropě. Na základě analýzy dostupných dat o poškození lesních porostů v Evropě bylo zjištěno, že během let 1950–2000 bylo průměrně ročně poškozeno přírodními disturbancemi asi 35 mil. m³ dřeva, z toho 53 % bylo vázáno na poškození větrem, 16 % na poškození ohněm, 3 % na poškození sněhem a 5 % zaujímaly ostatní abiotické faktory. Biotické faktory měly za následek 16 % poškození lesa, z toho polovina připadala na škody způsobené kůrovcem (SCHELHAAS et al. 2003).

Výskyt silných větrů nelze lidskými silami ovlivnit, ale jejich dopad však lze pomocí moderních prostředků, například geografických informačních systémů (GIS), nástrojů pro podporu prostorového rozhodování (SDSS) a predikativních modelů do jisté míry snížit. Pomocí výše zmíněných nástrojů je možné efektivně provést geografickou analýzu lesních porostů ve velmi krátkém čase a na základě získaných informací přijmout náležitá opatření ke snížení dopadů extrémních větrných událostí na lesní porosty. Uvedené moderní technologie napomáhají i při řešení dílčích aspektů analýz, modelování a simulací, například při odvození dílčích faktorů z leteckých snímků (KUDĚLKA et al. 2012), optimalizaci výpočetních postupů (MARJANOVIČ et al. 2011) či hodnocení vlivu vyjádření reliéfu na celkové výsledky (TUČEK et al. 2009, SVOBODOVÁ & VOŽENÍLEK 2010).

HISTORIE POLOMŮ A PŘÍSTUPY K HODNOCENÍ RIZIKA

Historie polomů v České republice

Problematika polomů byla podle historických pramenů diskutovanou otázkou již v minulosti. Jedním z prvních odborníků, který se začal zabývat otázkou polomových kalamit a způsobů jak jim předcházet, byl Gustav Vincent. Jeho publikace *Předcházejme polomům* (VINCENT 1943) patří mezi první ucelené práce, které se věnují problematice polomů.

Zkracující se intervaly mezi výskyty větrných kalamit ve druhé polovině 20. století a stále se zvyšující škody vedly k tomu, že se problematikou polomů i jejími příčinami začalo zabývat více odborníků. Za zmínku stojí publikace *Ochrana proti polomům* (VICENA 1964). Na rozdíl od předchozích prací, které se zabývaly především vhodnou volbou dřevin a sta-

noviště, případně opatřeními a výchovnými opatřeními jak předcházet polomům, se VICENA (1964) věnuje příčinám, které polomy způsobují, a zaměřuje se také na vliv a sílu větru.

S rozvojem počítačové techniky, softwarů pro podporu rozhodování, databázových systémů, dálkového průzkumu Země a v neposlední řadě GIS docházelo postupně ke zpřesňování získaných dat a jednoduššímu, efektivnějšímu a rychlejšímu zpracování dat o polomových kalamitách. Příkladem využití výše zmíněných technologií při určení rizika výskytu polomů byla klasifikace rizika polomů WINDAREC vyvinutá na konci devadesátých let 20. století v České republice (LEKEŠ & DANDUL 1999). Jednou z posledních studií zabývajících se problematikou polomů, při kterých byly využity GIS a SDSS, byl projekt geoinformační analýzy polomů na Šumavě (KLIMÁNEK et al. 2008, MIKITA et al. 2009). K hodnocení rizika výskytu polomů použili autoři základní statistické metody, mapovou algebru, vícenásobnou regresi a Multi-Criteria/Multi-Objective Decision Wizard dostupný v softwaru Idrisi. Na základě vyhodnocení vstupních dat došli autoři k závěru, že výši škod ovlivnil především věk porostu, směr větru a druhové zastoupení, do jisté míry měly na škody vliv také další faktory jako například terén, rychlost větru, hloubka půdy a další.

Mezi oblasti nejvíce postihované větrnými kalamitami v České republice patří území Národního parku a CHKO Šumava. Šumavské lesy byly v posledních několika desetiletích zasaženy extrémními kalamitami mnohokrát. Za zmínku stojí hlavně rozsáhlá kalamita z roku 1984, jejíž následky se podařilo zpracovat až v roce 1985 a škody činily více než 350 000 m³ polomové hmoty (NOŽIČKA 2004), dále pak kalamita z roku 2002, která měla za následek 4 mil. m³ v celé České republice, z toho 200 000 m³ v I. a II. zóně Národního parku Šumava (VICENA et al. 2004). Jednou z posledních významných kalamitních událostí, která změnila tvář Šumavy, byl orkán Kyrill, který zasáhl území České republiky v noci 18. ledna 2007 a způsobil jen na Šumavě škody ve výši 853 036 m³ polomové hmoty (ZELENÁ ZPRÁVA 2006).

Základní přístupy

K hodnocení rizika porostů z hlediska výskytu větrných polomů je možné použít tři základní přístupy: empirický, mechanický a založený na pozorování (LANQUAYE 2003). Každý z výše jmenovaných přístupů má své výhody a nedostatky a jeho aplikace pro konkrétní lokalitu vyžaduje určitou znalost základních principů každého z nich. Velmi často používaným přístupem k hodnocení rizika polomů byl v minulosti přístup empirický (ELLING & VERRY 1978, VALINGER & FRIDMAN 1997, MITCHELL et al. 2001, SCOTT & MITCHELL 2005). Ten je však v posledních letech doplňován mechanickými a hybridními modely, které využívají především přístup mechanický nebo kombinují výhody obou z výše zmíněných přístupů (PELTOLA et al. 1999, GARDINER et al. 2008).

Základním principem charakterizujícím empirický přístup je vztah mezi větrným poškozením a vlastnostmi stromů v porostu, vlastnostmi porostu jako celku a vlastnostmi stanoviště (VALINGER & FRIDMAN 1997, LANQUAYE-OPOKU & MITCHELL 2005, SCOTT & MITCHELL 2005). K vytváření empirických modelů je nezbytné poměrně velké množství informací týkajících se studované lokality (vysoké nároky na množství vstupních dat do modelu, MITCHELL et al. 2001). Nevýhodou empirických modelů vytvořených pro konkrétní lokalitu může být také jejich problematické využití v jiných oblastech, než pro které byly primárně vytvořeny. Empirické modely je obecně nevhodnější aplikovat na lesní porosty se složitějším a proměnlivým uspořádáním a skladbou a tam, kde je rozmanitý reliéf a různé typy i druhy půd (MITCHELL et al. 2001, LANQUAYE 2003). Tyto modely využívají velmi často statistických metod, jako je například logistická regrese, k vyjádření závislosti mezi oblastí poškozenou větrným polomem a vlastnostmi této oblasti (SCOTT & MITCHELL 2005).

Modely založené na mechanickém přístupu předpovídají pravděpodobnost poškození lesního porostu na základě kritické rychlosti větru, která způsobí zlomení nebo vyvrácení stromů v porostu, a pravděpodobnosti výskytu těchto větrů ve studované lokalitě (GARDINER et al. 2000). Tyto modely jsou sestavovány na základě informací o mechanických vlastnostech stromů a měly by být kalibrovány na základě terénních průzkumů (QUINE 1995). Mechanické modely se pokoušejí charakterizovat fyzikální proces, který se podílí na vyvrácení stromů nebo zlomení kmene. Výpočet pravděpodobnosti rizika ohrožení porostu poloměm je v mechanických modelech rozdělen do dvou fází. V první fázi je počítána tzv. kritická rychlost větru, která způsobí vyvrácení stromu nebo zlomení kmene. Působící síla závisí na faktorech, jako jsou místní rychlost větru, nárazovitý vítr, pozice stromu v lesním pokryvu, vlastnosti koruny (například velikost, aerodynamika, hmota), vlastnosti kmene (tvar, délka, hmota). Odporové síly stromů závisí na takových faktorech, jako je vlastnost kmene (průměr a pevnost dřeva), morfologie kořenů atd. (GARDINER et al. 2008) Ve druhé fázi je počítána pravděpodobnost výskytu větrů, které překročí kritickou rychlost. Tyto informace je možné získat například z blízkých meteorologických stanic. V případě, že data z meteorologických stanic nejsou dostupná, je možné využít některý z modelů pro výpočet proudění vzduchu (QUINE 2000, GARDINER et al. 2008).

Posledním je přístup založený na pozorování. Jde o metodu časově nejméně náročnou a kvalita hodnocení závisí z velké míry na zkušenostech pozorovatele, který provádí samotné hodnocení. Základním principem je zaznamenávání výskytu faktorů, které mají prokazatelný vliv na zvýšení škod. Sledují se vlastnosti jako například asymetrie stromů, typy kořenů, tvary korun, nahnilé kořeny a další (LANQUAYE 2003).

VYMEZENÍ MODELOVÉHO ÚZEMÍ

Geografická analýza lokálního výskytu lesních polomů byla provedena v oblasti Prášil v jihozápadní části NP Šumava (Obr. 1). Toto modelové území bylo vybráno především z důvodu opakovaného výskytu rozsáhlých polomů, jejichž rozsah způsobuje nejen finanční ztráty spojené s likvidací škod, ale má také negativní vliv na změnu všech krajinných složek.

Vrchovinný až hornatý terén vybraného území představuje pohraniční pásmo Šumavy. Klenbovitě vrcholy tohoto pásma přesahují nadmořskou výšku 1300 metrů v několika kótách. K severu se oblý hřbet svažuje do sníženiny okolo řeky Křemelné protékající od západu k východu. Nadmořské výšky zde klesají až na 718 m. Sníženina má místy takřka rovinnatý reliéf s četnými rašeliništi (DEMEK 1965, MIKITA et al. 2009).

Z klimatického hlediska náleží území do oblasti chladné a podle atlasu podnebí ČR (TOLASZ et al. 2007) jde o oblasti CH4, CH6, CH7. V nejnižších polohách (800–970 m n. m.) se pohybují průměrné roční teploty mezi 4,5–5,5 °C a srážky dosahují 900–1050 mm za rok. Ve výškách 970–1210 m n. m. dosahují teploty 4,0–4,5 °C a roční srážkový úhrn je 1050–1200 mm. V nejvyšších polohách jsou průměrné roční teploty od 2,5 do 4,0 °C a roční srážky přesahují 1200 mm (TOLASZ et al. 2007).

Území je odvodňováno několika menšími toky. Východní část je odvodňována Jezerním potokem a Prášilským potokem, který se vleývá do říčky Křemelné, jejímž soutokem s Vydrou vzniká řeka Otava. Západní část je odvodňována Drozdím potokem, Černým potokem, Sklářským potokem a dalšími bezejmennými potoky. Zájmové území se nachází na hlavním evropském rozvodí, většina území spadá do povodí Labe, v severozápadní části území se nachází malý výběžek náležící do povodí Dunaje. Ve vymezeném území se nacházejí dvě ledovcová jezera: Laka a Prášilské.

Půdní pokryv tvoří 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 rozšířeny organozemě a organozemní gleje na údolních dnech (KOLEJKA et al. 2008).

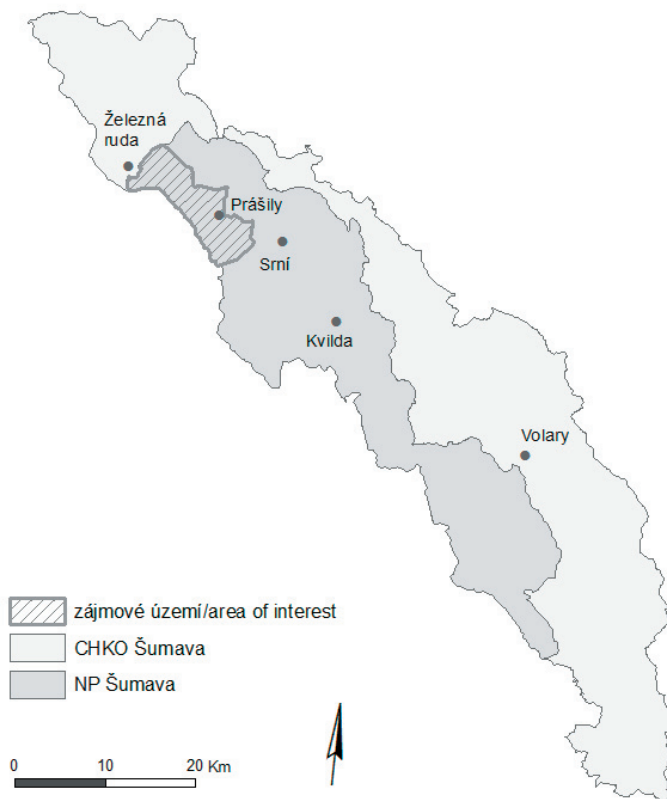
Půdní typy byly v zájmovém území odvozeny z Oblastních plánů rozvoje lesa. Mezi nejčastěji se vyskytující půdní typ patří kryptopodzol typický s 2876 ha, který zaujímá 40 % plochy území. Druhým nejvíce se vyskytujícím se půdním typem je kambizem oligotrofní zaujímající 1286 ha.

METODY GEOGRAFICKÉ ANALÝZY

Metody a postupy použité ve studii zahrnovaly sběr informací a dat, stanovení a konstrukci datové sady závislých a nezávislých (vysvětlujících) proměnných, vytvoření jednotek výběrového souboru a konstrukci databáze, dále byly ve studii použity metody statistické analýzy, GIS a tematické kartografie.

Datové zdroje

K provedení geografické analýzy rizika lesních polomů bylo nutné získat data reprezentující faktory, které mají vliv na výši škod. Jako základní činitele ovlivňující pravděpodobnost výskytu polomů byly zvoleny vlastnosti stanoviště, reliéfu, lesních porostů, směru a rychlosti větru během orkánu Kyrill (Tab. 1).



Obr. 1. Vymezení zájmového území.
Fig. 1. The area of interest.

Tabulka 1. Seznam vstupních proměnných.**Table 1.** List of input variables.

Název pole/ Field name	Datový typ/ Data type	Popis/ Description	Průměr/ Average	Min. hodnota/ Min. value	Max. hodnota/ Max. value	Jednotky/ Units
ELEV	číslo/number	nadmořská výška/ altitude	1047	722	1336	m n. m./ m.a.s.l
SKLON	číslo/number	sklon/ slope	9,4	0	29	stupně/ degrees
VEK	číslo/number	věk porostu/ stand age	89	2	223	roky /years
ZAKM	číslo/number	zakmenění porostu/ stand density	8,7	2	10	stup.zakm./ stand dens.
SM_D	číslo/number	střední tloušťka smrku/ stand diameter	25,5	0	66	centimetry/ centimetres
SM_H	číslo/number	střední výška smrku/ stand high	21	0	38	metry/ meters
HLOUB	text	hloubka půdy/ soil depth	no data	no data	no data	no data
VLH	text	vlhkost půdy/ soil moisture	no data	no data	no data	no data
ZAST_SM	číslo/number	zastoupení smrku/ proportion of spruce	85,9	0	100	procenta/ percentage
VITR_K	číslo/number	rychlost větru (Kyrill)/ wind speed	15,6	1	40	m.s ⁻¹

Faktory reliéfu byly ve studii reprezentovány rastrovým digitálním modelem terénu s rozlišením 5 m, z kterého byly následně odvozeny vrstvy sklonu a orientace svahu. Model byl vytvořen v ArcGIS pomocí metody Topo To Raster, která je speciálně navržena pro interpolování digitálního modelu terénu z vrstevnic. Podle WAHBA (1990) se jedná o diskretní spline interpolační metodu, která je založena na modelu deformace nekonečného a nekonečně tenkého kovového plátu. Jako vstupní data byly použity vrstevnice ZABAGED. Faktory stanoviště byly zastoupeny daty Oblastních plánů rozvoje lesa. Z těchto dat, především z typologické mapy, byly odvozeny informace týkající se vlhkostních a půdních poměrů v zájmovém území a údaje o hloubce půd. Data reprezentující faktory lesních porostů byly odvozeny z lesního hospodářského plánu NPŠ LS Železná Ruda (318201/2005–2014) a lesního hospodářského plánu NPŠ LHC Prášily (382203/2007–2016). Jednalo se především o věk a výšku porostu, zakmenění, střední výčetní tloušťka a zastoupení dřevin v rámci porostních skupin. Faktory rychlosti a směru větru byly zastoupeny vrstvou rychlosti a směru větru během orkánu Kyrill. Ty byly vytvořeny ve spolupráci s Ústavem fyziky atmosféry AV ČR v Praze v rámci projektu STRiM „Remotely accessed decision support System for Transnational environmental Risk Management“ programu Evropské unie INTERREG IIIB CADSES zaměřeného na hodnocení environmentálních rizik v příhraničních oblastech. Proudění vzduchu bylo vypočítáno pomocí 3-rozměrného nestacionárního modelu proudění PIAPBLM (SVOBODA et al. 2008) a meteorologická data vstupující do modelu byla naměřena v průběhu orkánu Kyrill v lednu 2007. Výstupem modelu byly ASCII soubory udávající

v pravidelném gridu rychlost větru ve směru osy X a Y. Pro převod do rastrového formátu bylo nutné vypočítat údaje o směru a rychlosti větru použitím základních goniometrických vztahů v pravouhlém trojúhelníku.

Důležitou datovou vrstvou, jež umožnila exaktní zhodnocení vlivu různých činitelů prostředí a charakteru lesních porostů na poškození větrem, byla vrstva lesních polomů poskytnutá Správou NP Šumava. Bezprostředně po orkánu Kyrill bylo firmou Geodis Brno s.r.o. provedeno letecké snímkování, na jehož základě byla přesně detekována místa polomů. Tato vrstva reprezentovala v hodnocení vysvětlovanou proměnnou, tedy absenci/prezenci polomu.

Většina dat použitých k hodnocení byla získána v rámci projektu STRiM, který byl zpracováván na Ústavu geoinformačních technologií Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně. Zdrojem výše uvedených dat byla především Správa Národního parku a Chráněné krajinné oblasti Šumava.

Logistická regrese a její faktory

Geografická analýza lokálního výskytu lesních polomů na základě empirické přístupu byla provedena pomocí metody logistické regrese, která patří mezi jednu z nejpoužívanějších metod k hodnocení pravděpodobnosti výskytu lesních polomů, která byla testována a aplikována mnoha autory (VALINGER & FRIDMAN 1997, JALKANEN & MATILLA 2000, CANHAM et al. 2001, LANQUAYE-OPOKU & MITCHELL 2005, SCOTT & MITCHELL 2005, VALINGER & FRIDMAN 2011).

Logistická regrese se zabývá odhadem nějakého závislého jevu (závislé proměnné) na základě určitých známých skutečností (nezávislých proměnných), které mohou ovlivnit výskyt jevu. V případě logistické regrese je vysvětlovaná (závislá) proměnná binárního typu (např. výskyt polomu ano/ne) a jedním z dílčích cílů této metody je analýza efektů nezávislých, vysvětlovaných proměnných (např. stáří, tloušťka porostu), které mohou být kategoriálního nebo numerického typu. Rovnici logistické regrese je možné vyjádřit jako

$$Y = \frac{e^{g(x)}}{1 + e^{g(x)}} = \frac{1}{1 + e^{-g(x)}}$$

kde $g(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$; β_0, \dots, β_p jsou parametry regresního modelu a x_1, \dots, x_p jsou vysvětlující proměnné (DRAKE 2008).

Aby bylo možné sestavit kvalitní model logistické regrese, bylo nezbytné získat příslušnou datovou sadu vysvětlujících (nezávislých) a závislých proměnných reprezentující faktory, které mají vliv na výši škod. Hlavním zdrojem vysvětlující proměnných byl digitální model terénu, dále data z oblastních plánů rozvoje lesa (hloubka, vlhkost půdy atd.), lesní hospodářské plány studované lokality a údaje o rychlosti a směru větru během orkánu Kyrill.

Poté, co byly získány datové sady, mohla být sestavena tzv. segmentační databáze. V prvním kroku byly pomocí nadstavby ArcGIS vytvořeny jednotky výběrového souboru o velikosti 25×25 m, jejich celkový počet čítal 110 864, po odstranění jednotek bezlesí tvořila databáze 85 142 jednotek. Poté následovalo překrytí jednotlivých vrstev závislých a nezávislých proměnných přes sebe pomocí nástrojů ArcGIS Analyst Tools. Vytvořená databáze obsahovala údaje o závislých a nezávislých proměnných pro každou jednotku (segment o velikosti 25×25 m).

Statistické analýzy

Výpočet parametrů logistické regrese byl proveden ve statistickém softwaru SAS 9.1. Před samotným výpočtem parametrů byly pro všechny nezávislé proměnné vypočítány Pearso-

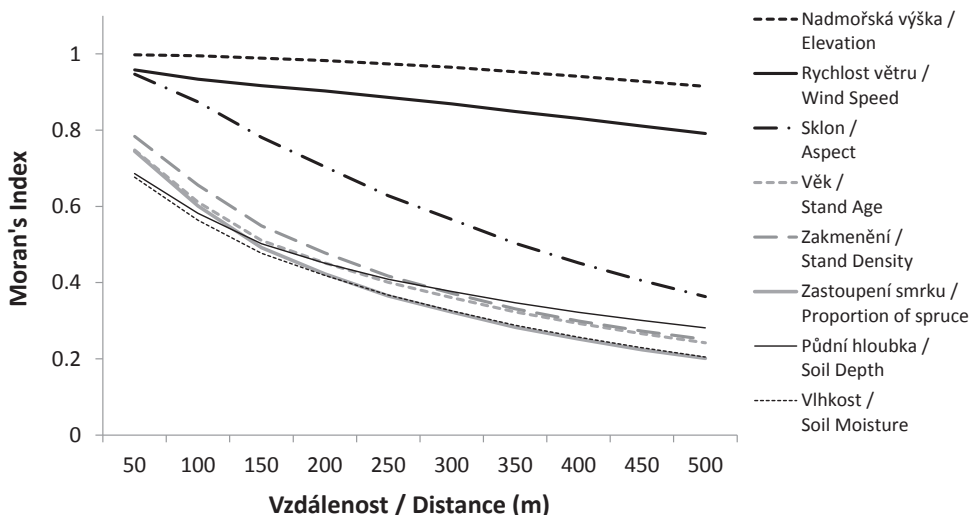
Tabulka 2. Korelační matice nezávislých proměnných.

Table 2. Correlation matrix of independent variables.

	ELEV	SKLON	VEK	ZAKM	SM_D	SM_H	ZAST_SM	VITR_K
ELEV	1,00	0,12	0,16	0,16	-0,06	-0,16	0,26	0,62
SKLON	0,12	1,00	0,15	0,10	0,17	0,17	-0,11	0,11
VEK	0,16	0,15	1,00	-0,33	-0,90	0,83	0,08	0,06
ZAKM	0,16	0,10	-0,33	1,00	-0,22	-0,15	-0,18	-0,07
SM_D	-0,06	0,17	-0,90	-0,22	1,00	0,96	-0,01	-0,08
SM_H	-0,16	0,17	0,83	-0,15	0,96	1,00	-0,07	-0,14
ZAST_SM	0,26	-0,11	0,08	-0,18	-0,01	-0,07	1,00	0,13
VITR_K	0,62	-0,17	0,06	-0,07	-0,08	-0,14	0,13	1,00

novy korelační koeficienty (Tab. 2). V případě vysoké korelace mezi nezávislými proměnnými byla jedna z nich z výpočtu parametrů modelu vyloučena z důvodů multikolinearity. Vysoká míra korelace byla zjištěna mezi proměnnými věk a střední tloušťka smrku, věk a střední výška smrku, střední výška porostu a střední tloušťka porostu. Středně vysoká míra korelace byla detekována mezi nadmořskou výškou a rychlostí větru během orkánu Kyrill, dále pak mezi průměrnou rychlostí v zájmovém území a rychlostí větru během orkánu Kyrill. Výše zmíněná korelace byla do jisté míry očekávána.

Druhým důležitým krokem před výpočtem parametrů modelu logistické regrese bylo vyhodnocení prostorové autokorelace jednotlivých nezávislých proměnných. Výpočet prostorové korelace byl proveden v ArcGIS pomocí Moranova I kritéria a k určení velikosti prostorové autokorelace v závislosti na vzdálenosti mezi jednotlivými body výběrového souboru byl použit nástroj Incremental Spatial Autocorrelation, který je součástí Spatial Statistic Tools. Pro každou nezávislou proměnnou byl vytvořen graf závislosti mezi sérií vzdáleností a hodnotou Z-score určující intenzitu prostorového shlukování a hodnotou Moranova I kritéria (Obr. 2). Vzhledem k velikosti segmentační databáze, velkému počtu jed-



Obr. 2. Hodnoty Moranova Indexu pro nezávislé proměnné v závislosti na vzdálenosti (v metrech).

Fig. 2. Moran's Index values (independent variables) for a series of distances (in meters).

notek a charakteru některých vstupních dat, jejichž hodnoty se významněji lišily až na velké vzdálenosti (nadmořská výška), nedosáhl graf závislosti Z-score a vzdáleností u některých vstupních jednotek vrcholu, který by indikoval vzdálenost, kde jsou procesy prostorového shlukování nejvýraznější. Z grafu Moranova I kritéria (Obr. 2) je však jasně zřetelné, že hodnoty indexu vyjadřující prostorovou korelaci, klesají v závislosti na vzdálenosti pro všechny nezávislé proměnné. Ke snížení vlivu prostorové autokorelace mezi jednotlivými body nezávislé proměnné byl použit nástroj Create Random Points dostupný v ArcGIS. Ten umožňoval vytvořit ze vstupní databáze čítající 85 142 jednotek novou, kde každý bod byl vzdálen od jiného podle předem nastavené vzdálenosti. Na základě výsledků Incremental Spatial Autocorrelation byla jako vhodná vzdálenost, která sníží prostorovou autokorelaci mezi body a zároveň zanechá dostatečný počet bodů vstupujících do logistické regrese, zvolena 250 metrů. Nová databáze čítala 735 jednotek.

Výběr modelu logistické regrese byl proveden v SAS 9.1 pomocí příkazu Statistics/Regression/Logistic Regression, jako typ modelu byl vybrán full model (selection method). Sledovanými faktory, jejichž vliv na výskyt polomů byl analyzován, byly nadmořská výška (ELEV), sklon (SKLON), věk (VEK), zakmenění (ZAKM), hloubka půdy (HLOUB), vlhkost půdy (VLH), zastoupení smrku (ZAST_SM), a rychlost větru během orkánu Kyrill (VITR). Většina nezávislých proměnných vstupujících do modelu byla spojitých, pouze hloubka a vlhkost půdy reprezentovaly nezávislé kategorizované proměnné ordinální. Podle ŘEHÁKOVÉ (2000) platí, že má-li ordinální proměnná dostatečný počet kategorií, lze s ní pracovat jako se spojitou. Vzhledem k dostatečnému počtu kategorií bylo proto s proměnnými hloubka a vlhkost půdy počítáno jako se spojitými (pro textové kategorie vytvořeny numerické zástupné kategorie) a pro každou proměnnou byl získán pouze jeden parametr logistické regrese.

Výsledkem logistické regrese byl model (Tab. 3), který obsahoval všechny nezávislé proměnné vstupující do modelu. K hodnocení modelu logistické regrese byla použita informační kritéria dostupná v SAS 9.1. Jednalo se především o Akiakeho kritérium (AIC), které je možné vyjádřit jako $AIC = -2 \log L + 2k$, kde k je počet parametrů v modelu a L je věrohodnostní funkce a hodnota věrohodnostní funkce modelu ($-2 \log L$), která v sobě obsahuje informaci o všech datech obsažených v modelu (nižší hodnota reprezentuje lepší model). Z výsledků modelu bylo jasně patrné, že použití nezávislých proměnných přispělo ke snížení obou sledovaných informačních kritérií (AIC 388; $-2 \log L$ 370). Bližší analýzou výsledků bylo zjištěno, že 4 vysvětlující proměnné (SKLON, ZAKM, VLH a ZAST_SM) nedosáhly prahové úrovně významnosti 0,05 (significance level) a proto byl tento model zamítnut.

Pro výběr nejvhodnějšího modelu logistické regrese byla použita také metoda postupné regrese (stepwise regression), která je implementována v SAS 9.1. Tato metoda umožňuje nalézt nejvhodnější kombinaci vstupních nezávislých proměnných tak, aby co nejlépe vysvětlovala pravděpodobnost výskytu zkoumaného jevu.

Výpočet parametrů logistické regrese pomocí postupné regrese byl spuštěn z modulu Analyst příkazem Statistics/Regression/Logistic Regression, po otevření okna Logistic Regression byly ze seznamu vysvětlujících proměnných vybrány pouze ty, které vstupovaly do analýzy. Jako vysvětlovaná byla zvolena proměnná VYSKYT reprezentující výskyt polomových ploch pro každou jednotku v segmentační databázi (výskyt polomu byl reprezentován hodnotou 1). Nastavení výpočtu metodou postupné regrese bylo provedeno příkazem Model/Selection/Stepwise selection. Jako prahová hodnota úrovně významnosti pro jednotlivé proměnné byla zvolena 0,05. V případě, že byla tato hodnota překročena, procedura postupné regrese automaticky vyloučila danou proměnnou z modelu z důvodu nedostatečné úrovně významnosti. V případě, že byla hladina významnosti nižší než 0,05, byla nulová hypotéza

Tabulka 3. Odhady parametrů modelu (celý model).

Table 3. Model parameter estimates (full model).

Parameter/ Parametr	Estimate/ Odhad	Standard Error/ Směrodatná odchylka	Wald Chi-Square/ Wald Chi-kvadrát	Pr > ChiSq/ Pr > Chi-kvadrát
Intercept	-18,4	2,70	46,7	< 0,0001
ELEV	0,0143	0,0002	46,3	< 0,0001
SKLON	-0,0652	0,0036	3,31	< 0,0689
VEK	0,0181	0,0041	19,4	< 0,0001
ZAKM	0,0396	0,162	0,0599	< 0,8067
HLOUB	0,475	0,142	11,2	< 0,0080
ZAST_SM	-0,0053	0,0066	0,661	< 0,4161
VLH	0,0303	0,134	0,0510	< 0,8213
VITR	-0,119	0,0299	15,8	< 0,0001
Test	Chi-Square/ Chi-kvadrát	Degree of Freedom/ stupeň volnosti	Pr > ChiSq/ Pr > Chi-kvadrát	
LR	162,3	8	< 0,0001	
Score	160,5	8	< 0,0001	
Wald	102,4	8	< 0,0001	
Criterion/ Kritérium	Intercept Only/ Pouze průsečík	Intercept and Covariates/ Průsečík a kovariance		
AIC	534,4	388,1		
SC	538,9	429,2		
-2 Log L	532,4	370,1		

Poznámka: Podrobnější popis zkratk použitých v tabulkách lze nalézt na webových adrese http://www.ats.ucla.edu/stat/sas/output/sas_logit_output.htm

zamítnuta s tím, že informace o nezávislých proměnných umožňuje lepší predikci závislé proměnné, než by byla možná bez této informace.

Výsledkem postupné regrese byly jako nevhodnější vysvětlující proměnné vybrány 4 nezávislé proměnné vstupující do modelu. Jednalo se o ELEV, VEK, HLOUB a VITR (Tab. 4).

Testování statistické významnosti jednotlivých parametrů bylo provedeno u obou modelů pomocí Waldova testu využívajícího poměr maximálně věrohodného odhadu a odhadu směrodatné odchylky (Tab. 3 a Tab. 4).

V rámci hodnocení kvality modelu byla také vytvořena ROC (Receiver Operating Characteristic) křivka pro nevhodnější model logistické regrese, která slouží jako nástroj pro hodnocení a optimalizaci testů a ukazuje vztah mezi specificitou a sensitivitou testu (podíl skutečně pozitivních, správně klasifikováno jako pozitivní, a falešně negativních odhadů v modelu). Výsledný graf vykazoval u nevhodnějšího modelu poměrně velkou plochu pod křivkou (Area Under Curve – AUC), což indikovalo dobrou kvalitu modelu.

Na základě výsledků metody postupné regrese byly vybrány nevhodnější parametry modelu, které následně vstupovaly do geografické analýzy.

Geografická analýza lokálního výskytu lesních polomů a výsledné mapy ohrožení byly vytvořeny pomocí mapové algebry v nadstavbě Spatial Analyst v ESRI ArcGIS 9.2. Rovnice logistické regrese s parametry modelu vypočítanými statistickým softwarem SAS 9.1 byla v mapové algebře vyjádřena jako

Tabulka 4. Odhady parametrů modelu (postupná regrese).
Table 4. Model parameter estimates (stepwise regression).

Parameter/ Parametr	Estimate/ Odhad	Standard Error/ Směrodatná odchylka	Wald Chi-Square/ Wald Chi-kvadrát	Pr > ChiSq/ Pr > Chi-kvadrát
Intercept	-18,6	2,04	83,8	< 0,0001
ELEV	0,0141	0,0020	49,4	< 0,0001
VEK	0,0154	0,0029	27,0	< 0,0001
HLOUB	0,502	0,139	13,0	< 0,0003
VITR	-0,109	0,0285	14,6	< 0,0001
Test	Chi-Square/ Chi-kvadrát	Degree of Freedom/ stupeň volnosti	Pr > ChiSq/ Pr > Chi-kvadrát	
LR	158,4	4	< 0,0001	
Score	154,6	4	< 0,0001	
Wald	102,5	4	< 0,0001	
Criterion/ Kritérium	Intercept Only/ Pouze průsečík	Intercept and Covariates/ Průsečík a kovariance		
AIC	534,4	383,9		
SC	538,9	406,8		
-2 Log L	532,4	373,9		

Poznámka: Podrobnější popis zkratk použitých v tabulkách lze nalézt na webové adrese http://www.ats.ucla.edu/stat/sas/output/sas_logit_output.htm

$$p = \exp(-18,6459 + \text{ELEV} * 0,0141 + \text{VEK} * 0,0154 + \text{HLOUB} * 0,5015 - \text{VITR} * 0,1090) / (1 + \exp(-18,6459 + \text{ELEV} * 0,0141 + \text{VEK} * 0,0154 + \text{HLOUB} * 0,5015 - \text{VITR} * 0,1090)),$$

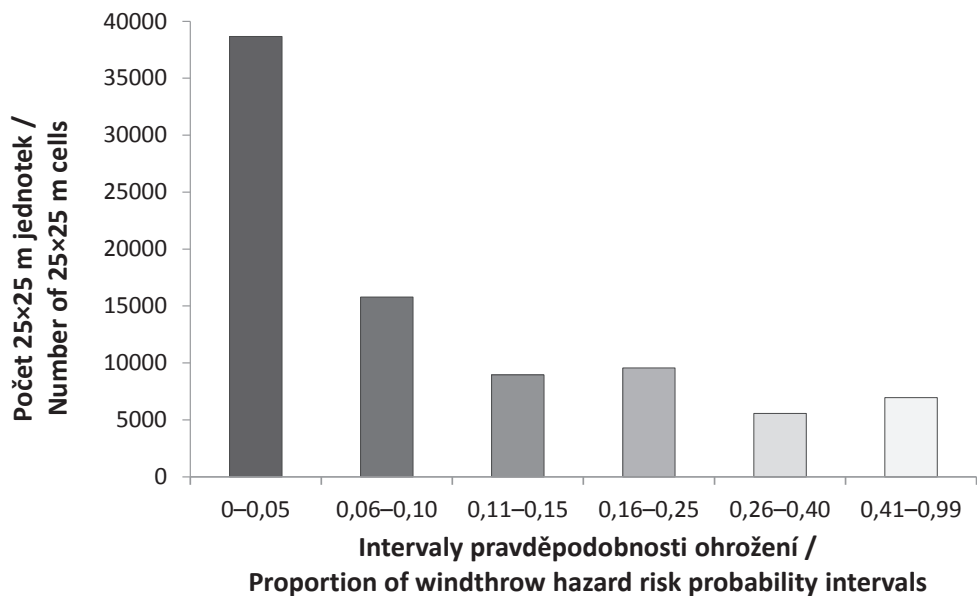
kde p je pravděpodobnost, HLOUB hloubka půdy, ELEV nadmořská výška, VITR rychlost větru během orkánu Kyrill a VEK je stáří porostu.

VÝSLEDKY GEOGRAFICKÉ ANALÝZY

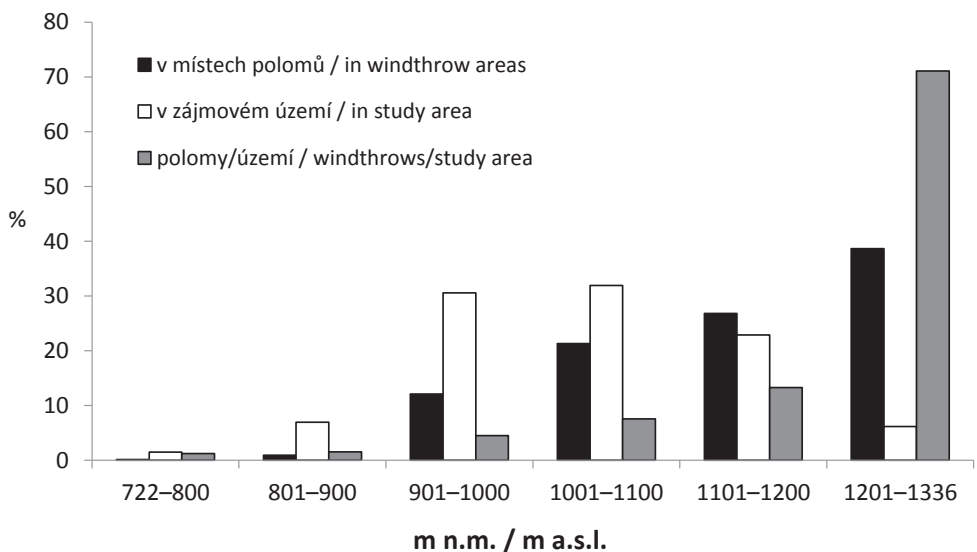
Na základě výsledné mapy ohrožení (Obr. 11) a grafu zastoupení intervalů pravděpodobnosti ohrožení (Obr. 3) je patrné, že více než 42 % území spadalo do intervalů s nejnižšími hodnotami pravděpodobnosti 0 a 0,05. Plochy s mírným až středním rizikem ohrožení, tedy intervaly hodnot pravděpodobnosti 0,06–0,10; 0,11–0,15; 0,16–0,25; 0,26–0,40 zaujímaly přibližně asi 50 % území. Poslední interval s nejvyššími hodnotami pravděpodobnosti výskytu polomů 0,41–0,99 zaujímal přibližně 8 % celkové plochy zájmového území.

Jak je dobře viditelné z mapy ohrožení, intervaly s nejvyššími hodnotami pravděpodobnosti výskytu větrných polomů se překrývají s polomovými plochami způsobenými orkánem Kyrill (Obr. 10 a Obr. 11), což do jisté míry potvrzuje správnost použitých postupů a modelu.

Pro účely hodnocení výsledků získaných pomocí metody logistické regrese bylo vytvořeno testovací území o rozloze přibližně 3 km² nacházející se jihozápadně od vrcholu Polom, které bylo vyjmuto ze všech předchozích analýz (parametry logistické regrese nebyly počítány z bodů nacházejících se v daném území). Testovací území čítalo 3112 jednotek, kde každá jednotka reprezentovala plochu 25×25 m. Statistickou analýzou bylo zjištěno, že více než polovina (55 %) zájmové plochy testovacího území spadala do kategorií s mírným rizikem ohrožení (0–0,05; 0,06–0,10; 0,11–0,15; 0,16–0,25), interval středního rizika ohrožení



Obr. 3. Zastoupení intervalů pravděpodobnosti ohrožení lesních porostů větrem na území Prášílska.
Fig. 3. Proportion of windthrow hazard risk probability intervals in the region of Prášíly.



Obr. 4. Zastoupení kategorií nadmořské výšky na území Prášílska.
Fig. 4. Proportion of altitude intervals in the region of Prášíly.

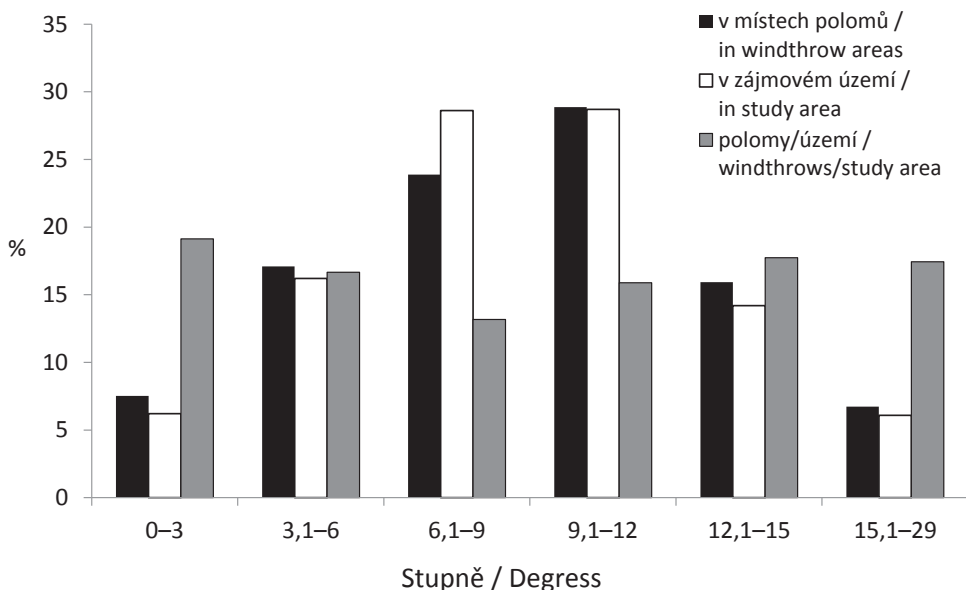
(0,26–0,40) zaujímal 21 % a poslední interval s nejvyššími hodnotami pravděpodobnosti (0,41–0,99) zaujímal zbylých 24 % zájmové plochy území.

Výsledné hodnoty pravděpodobnosti rizika ohrožení byly následně porovnány s polomovými plochami v testovacím území, které byly způsobené orkáнем Kyrill. Na základě srovnání byla zjištěna poměrně slušná shoda především u intervalů s nejvyššími a středními hodnotami rizika 0,26–0,40 a 0,41–0,99, kdy se celých 75 % polomů způsobených orkáнем Kyrill nacházelo v těchto kategoriích. Zbylých 23 % polomových ploch se nacházelo v kategoriích 0,11–0,15 a 0,16–0,25 a pouze 2 % polomových ploch byly zařazeny do kategorií 0–0,05 a 0,06–0,10.

Podle výsledků postupné regrese byly jako nejvhodnější vysvětlující proměnné vybrány nadmořská výška (ELEV), věk (VEK), hloubka půdy (HLOUB) a rychlost větru během orkánu Kyrill (VITR) (Tab. 4).

Nadmořská výška patřila podle Wald testu (Tab. 4) k statisticky nejvýznamnějším parametrům ovlivňujícím pravděpodobnost výskytu polomů (Wald Chi-Square 49,43) a byla u ní patrná korelace s rychlostí větru během orkánu Kyrill. Nárůst polomových škod s nadmořskou výškou byl zřejmý i z Obr. 4. Statistickým rozbohem bylo zjištěno, že nejvíce polomových ploch (38,6 %) se nacházelo v porostech s nadmořskou výškou 1201–1336, tedy v nejvýše položených lokalitách.

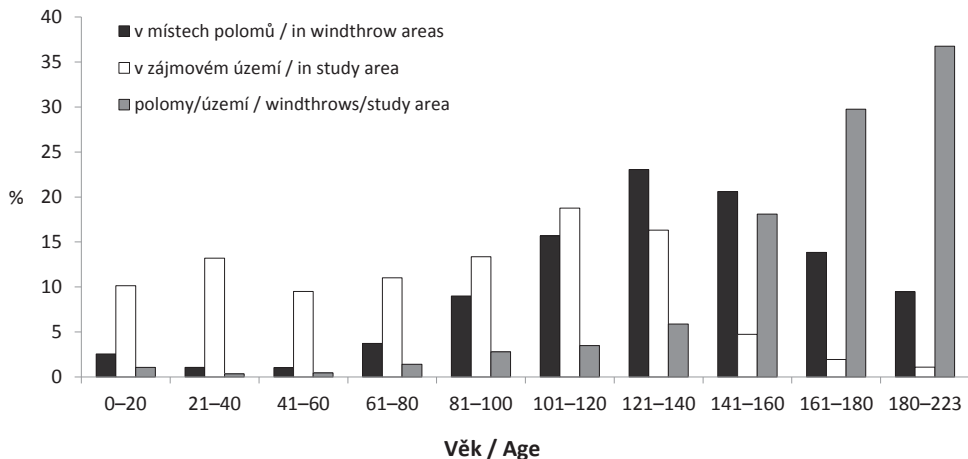
Statisticky významnou proměnnou mající vliv na výši polomových škod byl věk porostu, který úzce koreloval s porostní výškou a střední tloušťkou porostu. Vliv věku na vznik polomových škod byl do jisté míry očekáván a byl také potvrzen statistickým rozbohem (Obr. 6). Nejvíce byla v zájmovém území zastoupena věková kategorie 101–120 let, která zaujímal 18,7 % plochy zájmového území, následovaná kategorií 121–140 let (16,3 %). Největší procento poškozených ploch se nacházelo v porostech nad 100 let stáří a to v kategoriích 121–140 let (23 %), dále v kategorii 141–160 let (20 %). Kategorie 101–120 a 161–180 let zaujímal přibližně stejné procento zastoupení poškozených ploch (15 %).



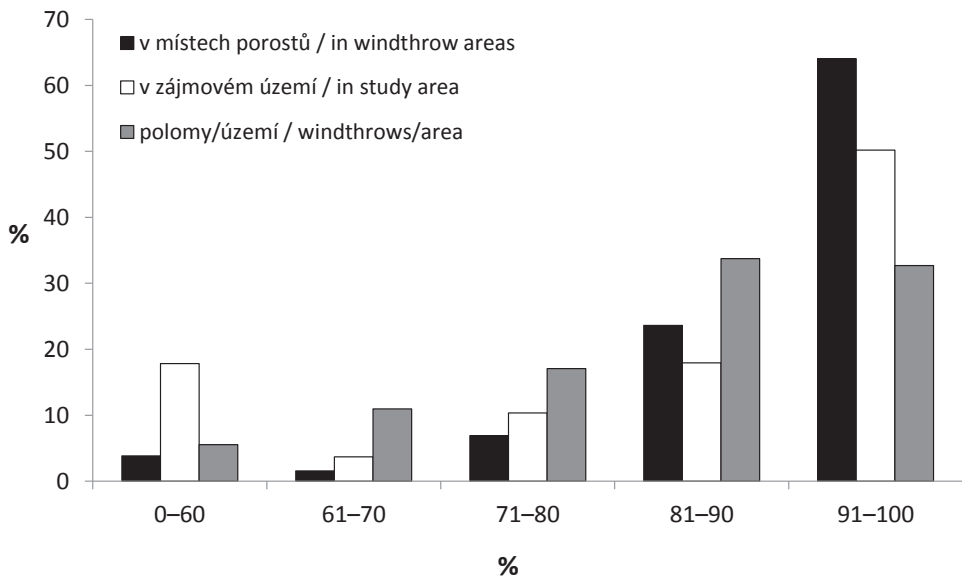
Obr. 5. Zastoupení kategorií sklonu povrchu na území Prášílska.

Fig. 5. Proportion of slope intervals in the region of Prášílska.

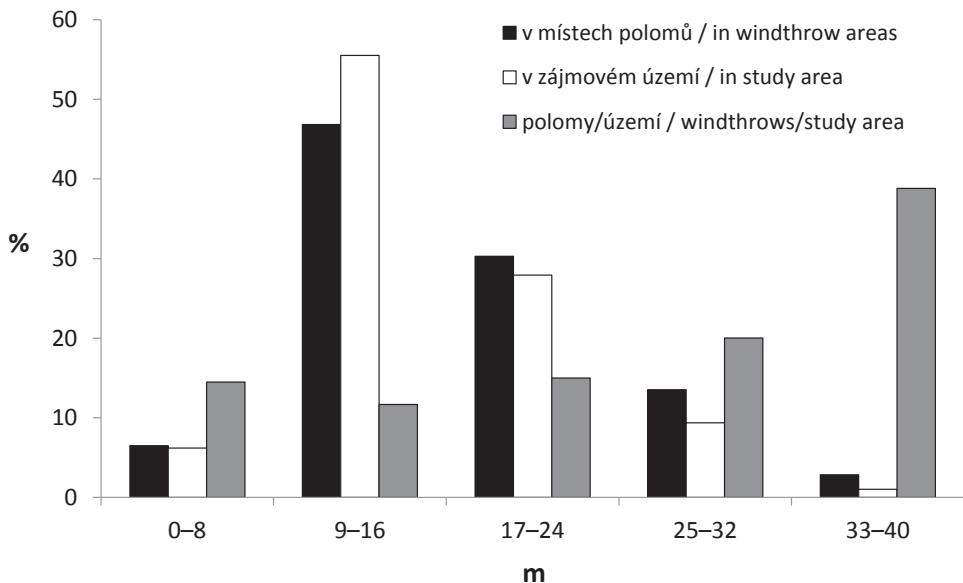
Za statisticky poměrně významný faktor zvyšující pravděpodobnost výskytu polomů, lze také považovat hloubku půdy (Wald Chi-Square 13,0), která byla také použita v rovnici logistické regrese. Přestože byla proměnná reprezentující zastoupení smrku v porostu z modelu vyloučena z důvodu nedosažení hladiny významnosti, statistickou analýzou bylo zjištěno, že více než 64 % polomových ploch se nacházelo na lesních územích s 91 % a vyšším zastoupením smrku a škody, klesaly úměrně se zastoupením smrku v porostu (Obr. 7).



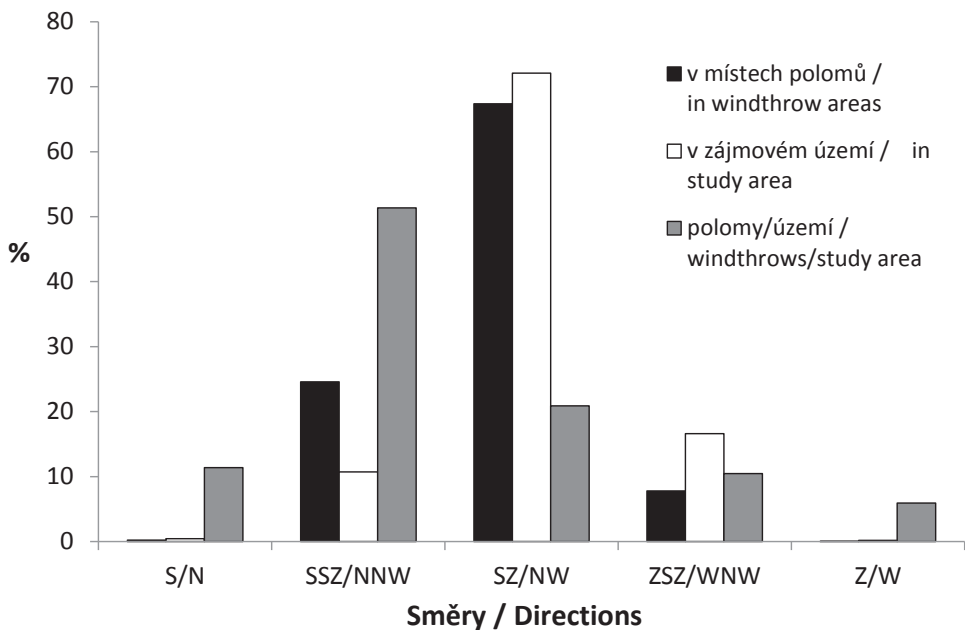
Obr. 6. Zastoupení kategorií věku povrchu na území Prášílska.
Fig. 6. Proportion of stand age intervals in the region of Prášílska.



Obr. 7. Zastoupení kategorií smrku v porostu na území Prášílska.
Fig. 7. Proportion of Norway spruce fractions in the region of Prášílska.

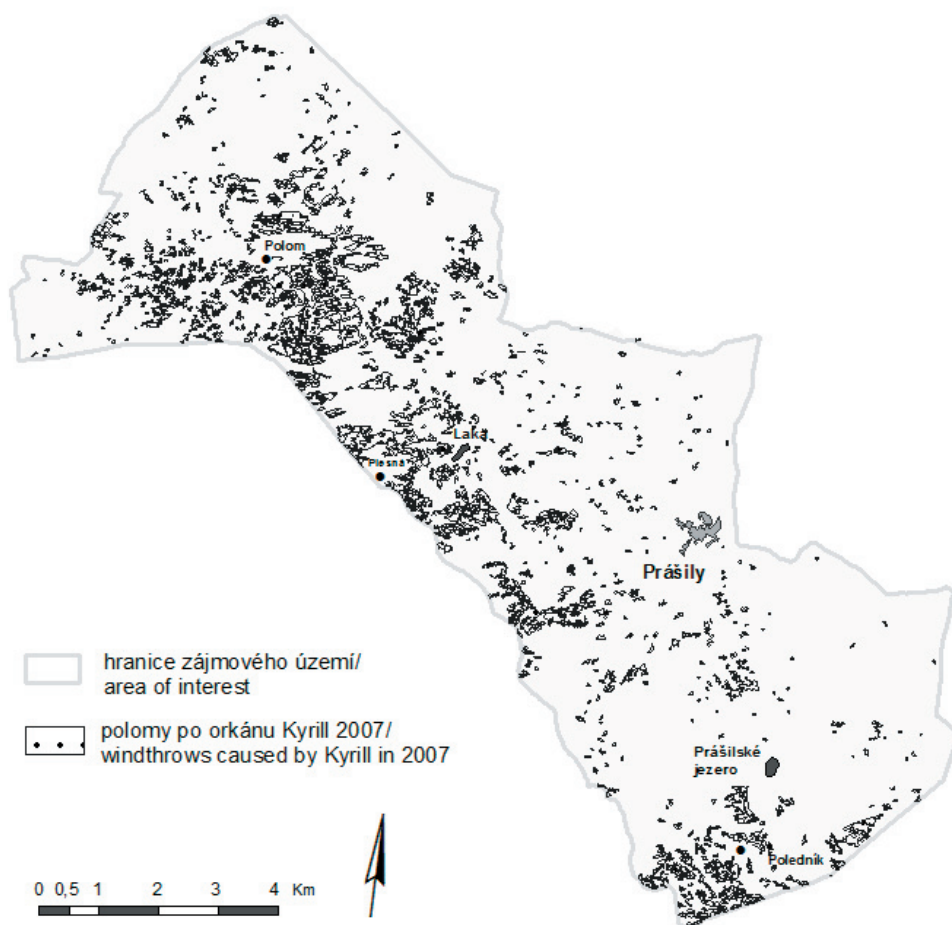


Obr. 8. Zastoupení kategorií rychlosti větru během orkánu Kyrill na území Prášílska.
Fig. 8. Proportion of wind speed intervals during the hurricane Kyrill in the region of Prášíly.



Obr. 9. Zastoupení kategorií směru větru během orkánu Kyrill na území Prášílska.
Fig. 9. Proportion of wind direction intervals during the hurricane Kyrill in the region of Prášíly.

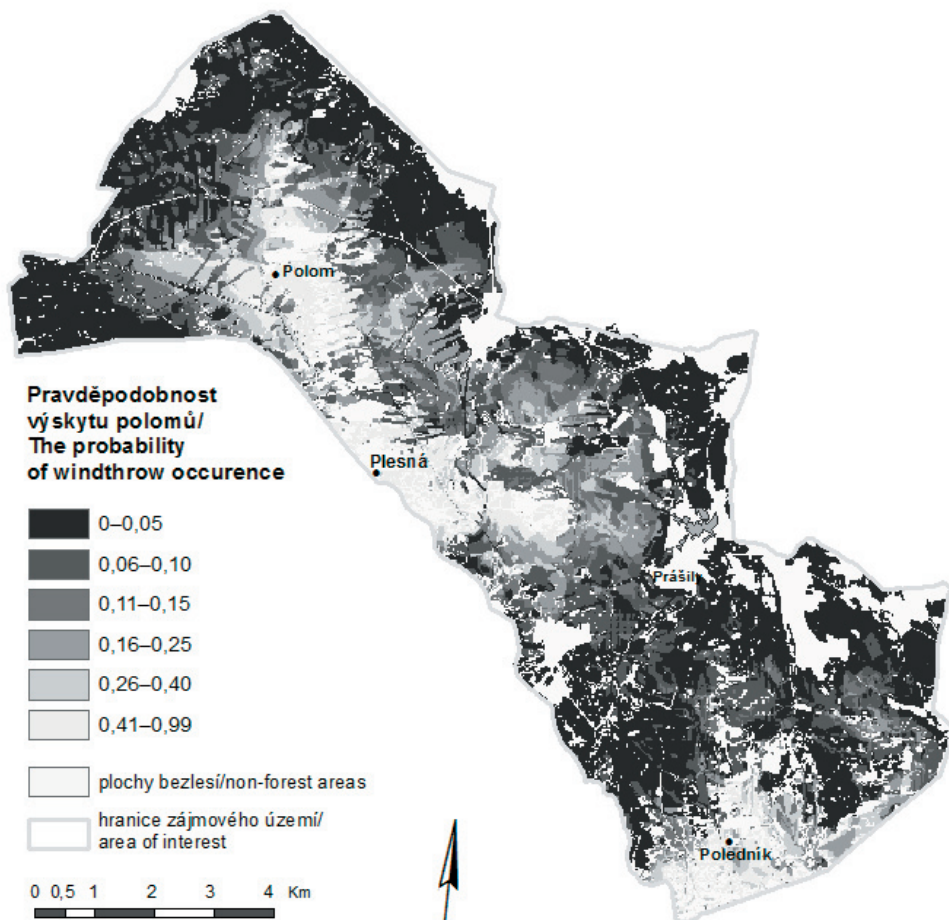
Poslední proměnnou vstupující do geografické analýzy byla rychlost větru během orkánu Kyrill, která byla Wald testem vyhodnocena také jako statisticky významná (Wald Chi-Square 1329). Nejvíce zastoupenou kategorií byla rychlost větru mezi 9 až 16 m.s⁻¹ zaujímající více než polovinu zájmového území (55,5 %). Druhou nejvíce zastoupenou kategorií byla rychlost větru mezi 17–24 m.s⁻¹ tvořící 27,9 % území. Největší zastoupení poškozených ploch se nacházelo v kategorii rychlosti 9–16 m.s⁻¹ (46,8 % území). V kategoriích zastoupení rychlosti větru v místech polomů poměrně ke kategoriím rychlosti větru (polomy/území) měla největší zastoupení kategorie s nejvyšší rychlostí větru 33–40 m.s⁻¹ s 38,8 %. Přestože se většina polomových ploch nacházela v kategoriích s relativně nižšími hodnotami rychlosti větru (17–24 m.s⁻¹), hodnoty v kategoriích polomy/území (podíl procentuálního zastoupení polomových ploch v dané kategorii vůči procentuálnímu zastoupení dané kategorie v zájmovém území za účelem vyjádření relativní škody) jasně prokázaly, že se s rostoucí rychlostí větru docházelo relativně k většímu poškození (Obr. 8).



Obr. 10. Polomové plochy způsobené orkánem Kyrill v roce 2007 na území Prášílska.
Fig. 10. Windthrow areas caused by the hurricane Kyrill in the region of Prášíly in 2007.

Ačkoliv směr větru během orkánu Kyrill nevstupoval do výpočtu pravděpodobnosti výskytu lesních porostů pomocí logistické regrese, byl jasně patrný vliv tohoto faktoru na výši a rozložení škod. Během orkánu Kyrill vanul nejvíce severozápadní vítr, který se vyskytoval na více než 72 % zájmového území a také většina poškozených ploch (67,3%) spadala do této kategorie. Jako druhá byla nejvíce zastoupena kategorie severoseverozápadní s 24,5 %. Další kategorie (severní, západoseverozápadní, západní) zaujímaly celkem méně než 10 % území (Obr. 9).

Mezi méně statisticky významné proměnné přispívající ke vzniku polomů lze na základě Wald testu a statistického rozboru považovat především sklon a vlhkost půdy. Přestože sklon svahu patří mezi významné charakteristiky terénu ovlivňující stabilitu stromů, neměl v případě orkánu na výši škod velký vliv. Statistickým vyhodnocením vrstvy sklonu svahů bylo zjištěno, že většina kategorií sklonu v místech polomů měla přibližně stejné zastoupení po-



Obr. 11. Pravděpodobnost výskytu větrných polomů na území Prášílska. Pro výpočet byly použity nezávislé proměnné nadmořská výška, věk, hloubka půdy a rychlost větru během orkánu Kyrill.

Fig. 11. The probability of windthrows occurrence in the region of Prášíly. Independent variables used for calculation of the probability map were altitude, stand age, soil depth, and wind speed during the hurricane Kyrill.

lomových ploch (Obr. 5) a výjimku tvořily pouze kategorie 6,1–9° a 9,1–12°, které zaujímaly přes 40 % poškozených ploch.

Na základě výsledků získaných pomocí logistické regrese a GIS bylo zjištěno, že pravděpodobnost výskytu polomů se zvyšovala především s vyšší nadmořskou výškou (ELEV) a věkem porostů (VEK). Výši škod také signifikantně ovlivnil směr větru (SMER_K) a půdní hloubka (HLOUB). Výše zmíněné výstupy a výsledky byly do jisté míry očekávány a ve velké míře se shodují se závěry studií, které byly věnovány problematice rizika výskytu větrných polomů.

DISKUSE

Výskyt polomů nezávisí ve většině případů pouze na výskytu jednoho faktoru, ale často se jedná o interakci několika faktorů dohromady, jako například klimatických podmínek, reliéfu, půdních a porostních charakteristik a další (RUEL 1995, 2000). Přestože nebyly interakce mezi jednotlivými proměnnými v modelu testovány, bylo metodou logistické regrese zjištěno, že na vznik polomů mělo vliv větší množství faktorů, některé více a některé méně.

Na základě jednoduchého statistického vyhodnocení dat a geografické analýzy lokálního výskytu rizika lesních polomů na základě empirického přístupu bylo zjištěno, že škody způsobené orkáнем Kyrill narůstaly v modelovém území s nadmořskou výškou a největší výskyt polomových ploch byl identifikován v nadmořských výškách nad 1200 m n. m. Podobných výsledků dosáhli také HOLUŠA et al. (2010), kteří analyzovali faktory mající vliv na poškození lesních porostů větrem a sněhem v Beskydech. Na základě hodnocení dostupných dat zjistili, že škody způsobené větrem signifikantně korelovaly s nadmořskou výškou, zatímco na škody způsobené sněhem neměla nadmořská výška vliv. Významná korelace škod s nadmořskou výškou je ve shodě se skutečností, že na území České republiky koreluje rychlost větru s rostoucí nadmořskou výškou (HOSTÝNEK & KRÁL 2006). JALKANEN & MATTILA (2000) zjistili, že nadmořská výška měla na výši škod určitý význam, který ale nebyl příliš podstatný, ke stejným závěrům došli například i KLOPCIC et al. (2009).

Dalším činitelem, jenž podstatně ovlivnil výskyt polomů na území NP Šumava po orkánu Kyrill, byl věk porostu. Ten byl identifikován jako statisticky významný na základě jednoduchých statistických analýz a také pomocí Wald testu. U věku porostu byla také zjištěna vysoká korelace se střední výčetní tloušťkou a výškou porostu. Vliv věku porostu na výši škod potvrzuje například LOHMANDER & HELLES (1987), kteří došli k závěru, že narůstající věk porostů zvyšuje jejich náchylnost k větrnému poškození a při srovnání jehličnatých porostů s listnatými, jsou jehličnaté porosty mnohem náchylnější k větrnému poškození od mladého věku a s narůstajícím věkem se zvyšuje i riziko (SAVILL et al. 1997). Tyto závěry jsou také ve shodě s výsledky studie KLOPCICE et al. (2009), který zjistil, že výskyt škod způsobených větrem je mnohem pravděpodobnější ve starších porostech, což potvrzují také JALKANEN & MATTILA (2000) a RUEL (2000).

Dalším faktorem, který zvyšuje náchylnost porostů k větrným škodám, je jejich výška a s rostoucí výškou porostů se zvyšuje také pravděpodobnost vzniku poškození (KÖNIG 1995, DOBBERTIN 2002). S rostoucí výškou porostů se také zvyšovala pravděpodobnost výskytu škod způsobených orkáнем Kyrill, kde škody v lesních porostech rostly až do výšky 25 metrů, menší podíl škod (asi o 3 % nižší) byl zaznamenán v porostech s výškou mezi 25,1 až 30 metrů. Nejvyšší stromy (30,1–38 metrů) měly procentuálně nižší zastoupení polomových škod, ale jejich celkové zastoupení v zájmovém území bylo také velmi nízké. S výškou a stářím porostu korelovala také střední tloušťka porostu a na základě statistické analýzy bylo zjištěno, že výskyt škod způsobených větrem narůstal se zvyšující se tloušťkou porostu.

Mezi další proměnné, které mohou do jisté míry ovlivnit náchylnost porostu vůči větru, patří půdní typ (KRAMER et al. 2001), půdní pH (MAYER et al. 2005), vlhkost půdy (SCHAETZL et al. 1989), případně půdní hloubka (STATHERS et al. 1994). Podle SCHAETZL et al. (1989) stromy rostoucí na vlhkých, oglejených nebo organických půdách jsou náchylnější k vyvrácení než ty rostoucí na dobře odvodňovaných půdách. Na základě statistického hodnocení porostního stanoviště nebyl zjištěn žádný významný vliv půdní vlhkosti na výši polomu. Další hodnocenou stanovištní proměnou byla hloubka půdy, která byla na rozdíl od půdní vlhkosti vyhodnocena logistickou regresí jako statisticky významná. Zajímavým zjištěním také bylo, že výše škod způsobených orkáнем Kyrill narůstala se zvyšující se hloubkou půdy, přestože by se dal očekávat opak. Základním statistickým vyhodnocením bylo zjištěno, že většina zájmového území se nachází na středně hlubokých až hlubokých půdách (více než 85 %) a mělké a velmi mělké půdy jsou zastoupeny pouze nepatrně (přibližně 15 % území). Velké plošné zastoupení středně hlubokých a hlubokých půd v zájmovém území a fakt, že velká většina poškozených porostů orkáнем Kyrill se nacházela právě v těchto lokalitách, mohlo být jedním z důvodů dosažení daného výsledku.

Změna přirozené druhové skladby v posledních dvou stoletích, způsobená především výsadbou smrkových monokultur za účelem větší produkce dřeva a následně většího zisku, vedla ke snížení odolnosti našich lesů proti kalamitám, proti kterým by byly lesy přirozené druhové skladby odolnější (ZELENÁ ZPRÁVA 2007). Zastoupení smrku v porostu mělo také podstatný vliv na výši škod způsobených orkáнем Kyrill. Nejvíce poškozených stromů (více než 60 % všech škod) se nacházelo v porostech se zastoupením smrku větším než 91 % a s klesajícím procentuálním zastoupením smrku v porostu se také snižovalo množství porostů poškozených větrem. ALBRECHT et al. (2012) zjistil na základě dlouhé řady pozorování charakteristik lesních porostů v jihozápadním Německu, že poškození větrem bylo nejvíce pozorováno v porostech, kde dominoval smrk ztepilý (*Picea abies*, 47 %) a douglaska (*Pseudotsuga menziesii*, 21 %). Pouze 11 % škod se nacházelo v porostech, kde rostly listnaté dřeviny (9 % buk, 2 % dub). Vlivem zastoupení smrku v porostech na odolnost vůči větru se podrobně zabýval VALINGER & FRIDMAN (2011), který zjistil, že narůstající zastoupení smrku ztepilého v porostech zvyšuje pravděpodobnost výskytu větrného poškození. Pokud je v porostu, kde dominuje smrk ztepilý, zastoupení listnatých dřevin 25–30 %, klesá pravděpodobnost rizika větrného poškození přibližně o 50 % oproti porostu, kde by se nacházel pouze smrk. Výše popsané poznatky zmiňují i starší studie (NYKÄNEN et al. 1997). ZENG et al. (2009) došel k závěru, že porosty, kde dominuje smrk ztepilý (*P. abies*), jsou ve Finsku jen o něco málo náchylnější než porosty s dominancí jedle. KŁOPCIC et al. (2009) například vliv zastoupení smrku nehodnotil vůbec, jelikož tato nezávislá proměnná úzce korelovala s jinými proměnnými.

Posledním studovaným faktorem byl vítr a jeho nejdůležitější charakteristika rychlost. Na základě informací o rychlosti větru a vzniku polomů v letech 1984–2002 bylo zjištěno, že rychlost větru nad $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je kritická ($100,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) a porosty této rychlosti již neodolají. Rychlosti nad $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nedokáže odolat ani stabilní porost. Vždy, když byla překročena rychlost $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, škody přesahovaly minimálně $100\,000 \text{ m}^3$ (VICENA et al. 2004). BAKER (1995) udává, že již rychlost $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ může způsobit selhání stromu, tedy jeho vývrát nebo zlom. QUINE & GARDINER (2000) uvádějí jako kritickou rychlost, která způsobí poškození nestabilních stromů, $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro poškození stabilního porostu je jako prahová hodnota udávána rychlost $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výše zmíněné závěry studií naznačují, že s rostoucí rychlostí větru se zvyšuje pravděpodobnost poškození porostů. Na základě výsledků logistické regrese však bylo zjištěno, že výše škod způsobených orkáнем Kyrill se zvyšovala s klesající rychlostí větru. Podrobnější statistickou analýzou bylo zjištěno (viz předchozí kapitola), že se na většině území vyskytovaly rychlosti větru v rozmezí $9\text{--}16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (55 %), kde se také

nacházelo nejvíce poškozených porostů a plošné zastoupení dalších kategorií klesalo úměrně s narůstající rychlostí větru. Tento fakt měl pravděpodobně za následek negativní vliv rychlosti větru během orkánu Kyrill v modelu logistické regrese. Relativním hodnocením rychlosti větru a škod vůči procentuálnímu zastoupení zájmového území, na kterém se vyskytovaly, však bylo zjištěno, že přestože lokality s nejvyšším zastoupením větru zaujímaly pouze asi 1/3 území nacházela se na nich téměř polovina všech poškozených porostů. Při hodnocení vlivu rychlosti větru během orkánu Kyrill je nutné také vzít v úvahu, že do hodnocení nebyla zahrnuta větrná turbulence, která mohla významně přispět k narušení stability stromů již při nižších rychlostech větru.

ZÁVĚR

Cílem studie bylo provést komplexní geografickou analýzu lesních porostů z hlediska výskytu lesních polomů na základě empirického přístupu reprezentovaného metodou logistické regrese. Mezi dílčí cíle patřilo stanovení průkazných proměnných ovlivňujících výskyt polomů na území Šumavy, srovnání dosažených výsledků s již zjištěnými fakty a prezentace dosažených výsledků ve formě mapových výstupů.

Na základě výsledné mapy pravděpodobnosti výskytu polomů na území Prášílska bylo zjištěno, že se více než 42 % území nachází v intervalech s nejnižším stupněm rizika ohrožení, středně ohroženo je silnými větry přibližně 50 % lesních území a nejrizikovější lesní plochy náchylné vůči polomům zaujímají 8 % celkové plochy území.

Pomocí metody logistické regrese bylo zjištěno, že se pravděpodobnost výskytu polomů zvyšovala především s rostoucí nadmořskou výškou a věkem porostů, které byly vyhodnoceny jako statisticky nejvýznamnější proměnné v modelu. Výše škod byla také podstatně ovlivněna směrem větru během orkánu Kyrill. Jako málo statisticky významné byly naopak vyhodnoceny proměnné sklon, zastoupení smrku v porostu, vlhkost půdy a zakmenění.

Použitím logistické regrese, statistického softwaru SAS a GIS ke geografické analýze výskytu lesních polomů bylo dosaženo poměrně velmi dobré shody mezi dosaženými výsledky a daty reprezentujícími polomové plochy po orkánu Kyrill. Velmi podobných výsledků dosáhli pomocí metody logistické regrese MITCHELL et al. (2001), kdy model logistické regrese správně odhadl riziko poškození polomem na 71–76 % testovaných ploch. Existují však i případy, kdy model neodhadl pravděpodobnost výskytu polomu dobře a podstatně nadhodnotil riziko poškození (FRIDMAN & VALINGER, 1999) nebo měl výsledný model logistické regrese nedostatečnou vysvětlující schopnost z důvodu nízkého počtu pro model významných nezávislých vysvětlujících proměnných (SCHÜTZ et al. 2006).

Za hlavní přínos studie lze mimo dosažených výsledků a stanovení významu faktorů na výši škod považovat také integraci grafické reprezentace výsledků logistické regrese do geografických informačních systémů

V případě aplikace metody logistické regrese by měl být budoucí výzkum zaměřen na testování modelů v dalších lokalitách s důrazem na portabilitu jednotlivých modelů pro další území. Zajímavých výsledků by mohlo být dosaženo testováním dalších metod k hodnocení rizika polomů, jako jsou například neuronové sítě, klasifikační a regresní stromy, případně zobecněné lineární sítě.

LITERATURA

- ALBRECHT A., HANEWINKEL M., BAUHUS J. & KOHNLE U., 2012: How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research*, 131: 229–247.
- BARREDO J.I., 2009: Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,

- CANHAM C.D., PAPAİK M.J. & LATTY E.F., 2001: Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 1–10.
- DEMEK J. (ed.), 1965: *Geomorfologie českých zemí [Geomorphology of the Czech lands]*. ČSAV, Praha, 336 pp. (in Czech).
- DOBBERTIN M., 2002: Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research*, 77: 187–205.
- DRAKE T., 2008: Empirical modeling of windthrow occurrence in streamside buffer. Thesis. Oregon State University, Corvallis, 92 pp.
- ENNOS A.R., 1997: Wind as an ecological factor. *Trends in Ecology & Evolution*, 12: 108–111.
- 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: 261–277.
- HALE S.E., GARDINER B.A., WELLPOTT A., NICOLL B.C. & ACHIM A., 2012: Windloading of trees: influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*, 131: 203–217.
- HANEWINKEL M., HUMMEL S. & ALBRECHT A., 2011: Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. *European Journal of Forest Research*, 130: 329–351.
- HOLUB K., RUŠAJOVÁ J. & MARJAN S., 2009: A comparison of the features of windstorms Kyrill and Emma based on seismological and meteorological observations. *Meteorologische Zeitschrift*, 18: 607–614.
- HOLUŠA J., KRÍSTEK Š. & TROMBIK J., 2010: Stability of spruce forests in the Beskids: an analysis of wind, snow and drought damages. *Beskydy*, 3: 43–54.
- HOSTÝNEK J. & KRÁL J., 2006: Influence orography on design wind speeds in the Czech Republic. In *Proceeding of the Engineering Mechanics 2006*. Svratka: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prague, 1 pp.
- JALKANEN A. & MATILLA U., 2000: Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management*, 135: 315–330.
- KLIMÁNEK M., MIKITA T. & KOLEJKA J., 2008: Geoinformation analysis of factors affecting wind damage in the Šumava National Park. *Journal of Landscape Ecology*, 1: 52–66
- KLOPCIC M., POLJANEC A., GARTNER A. & BONCINA A., 2009: Factors related to natural disturbances in mountain Norway spruce (*Picea abies*) forests in the Julian Alps. *Ecoscience*, 16: 48–57.
- KOLEJKA J., KLIMÁNEK M. & MIKITA T., 2008: Geografická analýza polomů na Šumavě po orkánu Kyrill [Geographical analysis of windthrows in the Bohemian Forest after the hurricane Kyrill]. *Spisy zeměpisného sdružení*, 19: 1–4. (in Czech).
- KOREŇ M., 2005: Vetrová kalamita 19. novembra 2004 – Nové pohľady a konsekvencie [Wind disaster on the 19th November 2004 – New insights and consequences]. *Tatry, XLIV (mimořádné vydání)*, 6–29 pp. (in Slovak).
- KRAMER M.G., HANSEN A.J., TAPER M.L. & KISSINGER E.J., 2001: Abiotic controls on long-term windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in southeast Alaska. *Ecology*, 82: 2749–2768.
- KUBOYAMA H., ZHENG Y. & OKA H., 2003: Study about damage probabilities on major forest climatic risks according to ageclasses. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 85: 191–198. (in Japanese with English summary).
- KUDĚLKA M., HORÁK Z., VOŽENÍLEK V. & SNAŠEL V., 2012: Ortophoto feature extraction and clustering. *Neural Network World*, 22: 103–121.
- LANQUAYE C., 2003: Empirical modelling of windthrow risk using geographic informations systems. The University of British Columbia. The Faculty of Forestry, Department of Forest Sciences, Vancouver, 126 pp.
- LANQUAYE-OPOKU N. & MITCHELL S.J., 2005: Portability of stand-level empirical windthrow risk models. *Forest Ecology and Management*, 216: 134–148.
- LEKEŠ V. & DANDUL I., 1999: Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *Forest Ecology and Management*, 135: 331–344.
- LOHMANDER P. & HELLES F., 1987: Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2: 227–238.
- MARJANOVIĆ M., KOVAČEVIĆ M., BAJAT B. & VOŽENÍLEK V., 2011: Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering Geology*, 123: 225–234.
- MAYER P., BRANG P., DOBBERTIN M., HALLENBARTER D., RENAUD J.-P., WALTHERT L. & ZIMMERMANN S., 2005: Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Annals of Forest Science*, 62: 303–311.
- MEIER F., ENGESSER R., FORSTER B. & ODERMATT B., 2006: *Forstschutz Überblick 2005*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 22 pp.
- MIKITA T., KOLEJKA J. & KLIMÁNEK M., 2009: Pokročilá analýza lesních polomů pomocí GIS [Advanced analysis of windthrows using GIS]. *Sborník příspěvků mezinárodního semináře GIS Ostrava 2009*. VŠB TU Ostrava, Ostrava, 1–8 pp. (in Czech).
- MITCHELL S.J., HAILEMARIAM T. & KULIS Y., 2001: Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Van-

- couver Island, Canada, using stand level information. *Forest Ecology and Management*, 154: 117–130.
- NICOLL B.C., GARDINER B.A., RAYNER B. & PEACE A. J., 2006: Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1871–1883.
- PELLIKKA P. & JÄRVENPÄÄ E., 2003: Forest stand characteristics and wind and snow induced forest damage in boreal forest. In: *Proceedings of the International Conference on Wind Effects on Trees*. University of Karlsruhe, Germany, 8 pp.
- PELTOLA H., KELLOMÄKI S., HASSINEN A. & GRANANDER M., 2000: A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Forest Ecology and Management*, 135: 143–153.
- PELTOLA H., IKONEN V.P., GREGOW H., STRANDMAN H., KILPELÄINEN A., VENÄLÄINEN A. & KELLOMÄKI S., 2010: Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland. *Forest Ecology and Management*, 260: 833–845.
- PRAUS L., 2006: Mechanická stabilita stromů a metody jejího zjišťování [Mechanical stability of trees and methods of its investigations]. *Sborník plošné poškození lesů způsobené povětrnostními vlivy*. Lesnická společnost, Kostelec nad Černými lesy, 33–41 pp. (in Czech).
- QUINE C.P., 2000: Estimation of mean wind climate and probability of strong winds from assessments of relative windiness. *Forestry*, 73: 247–258.
- QUINE C.P., 2001: A preliminary survey of regeneration of Sitka spruce in wind-formed gaps in British planted forests. *Forest Ecology and Management*, 151: 37–42.
- QUINE C.P. & GARDINER B.A., 2007: Understanding how the interaction of wind and trees results in windthrow, stem breakage, and canopy gap formation. In: *Plant disturbance ecology - the process and the response*, JOHNSON E.A. & MIYANISHI K. (eds) Elsevier, Amsterdam, 103–155 pp.
- ŘEHÁKOVÁ B., 2000: Nebojte se logistické regrese [Introducing Logistic regression]. *Sociologický časopis*, 36: 475–492 (in Czech).
- RICH R.L., FRELICH L.E. & REICH P.B., 2007: Wind-throw mortality in the southern boreal forest: effects of species, diameter and stand age. *Journal of Ecology*, 95: 1261–1273.
- RUEL J.C., 2000: Factors influencing windthrow in balsam fir forests: From landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management*, 135: 169–178.
- RUEL J.C. & PINEAU M., 2002: Windthrow as an important process for white spruce regeneration. *The Forestry Chronicle*, 78: 732–738.
- SAVILL P.S., 1983: Silviculture in windy climate. *Forestry Abstracts*, 44: 473–488.
- SAVILL P., EVANS J., AUCLAIR D. & FALCK J., 1997: *Plantation silviculture in Europe*. Oxford University Press, Oxford, New York, Tokyo, 297 pp.
- SCOTT R.E. & MITCHELL S.J., 2005: Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 218: 193–209.
- SCHAETZL R.J., JOHNSON D.L., BURNS S.F. & SMALL T.W., 1989: Tree uprooting: review of terminology, process and environmental implications. *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 1–11.
- SCHELHAAS M.J., NABUURS G.J. & SCHUCK A., 2003: Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9: 1620–1633.
- SCHINDLER D., BAUJUS J. & MAYER H., 2012: Wind effects on trees. *European Journal of Forest Research*, 131: 159–163.
- SCHÜTZ J.P., GÖTZ M., SCHMID W. & MANDALLAZ D., 2006: Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research*, 125: 291–302.
- STATHERS R.J., RORRELSON T.P. & MITCHELL S.J., 1994: *Windthrow Handbook for British Columbia Forests*. Ministry of forests, Victoria B.C., 38 pp.
- SVOBODA J., MIKITA T. & KOLEJKA J., 2008: Numerické modelování větru na Šumavě během orkánu Kyrill [Numerical modelling of wind in the Bohemian Forest during the hurricane Kyrill]. In: *Geoinformační podpora rozhodování v lesích postižených přírodními pohromami [Geoinformation support for decision making in forests affected by natural hazards]*, KLIMÁNEK M. (ed.). Mendelova univerzita, Brno, 41–52.
- SVOBODOVÁ J. & VOŽENÍLEK V., 2010: Relief for models of natural phenomena. In: *Landscape modelling: Geographical space, transformation and future scenarios (urban and landscape perspectives)*, ANDĚL J., BIČÍK I., DOSTÁL P. & SHASNESHIN S. (eds) Springer, Dordrecht, 183–196 pp.
- TOLASZ R., MÍKOVÁ T., VALERIÁNOVÁ A. & VOŽENÍLEK V., 2007: *Atlas podnebí Česka [Climate Atlas of the Czech Republic]*. Univerzita Palackého v Olomouci – ČHMU, Praha, 255 pp. (in Czech).
- TUČEK P., PÁSZTO V. & VOŽENÍLEK V., 2009: Regular use of entropy for studying dissimilar geographical phenomena. *Geografie*, 114: 117–129.
- USBECK T., WOHLGEMUTH T., PFISTER C., VOLZ R., BENISTON M. & DOBBERTIN M., 2009: Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *International Journal of Climatology*, 30: 347–358.

- USBECK T., WOHLGEMUTH T., DOBBERTIN M., PFISTER C., BÜRGI A. & REBETEZ M., 2010: Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 47–55.
- VALINGER E. & FRIDMAN J., 1997: Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecology and Management*, 97: 215–222.
- VALINGER E. & FRIDMAN J., 2011: Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 262: 398–403.
- VICENA I., 1964: *Ochrana lesa proti polomům [Protection of forests against windthrows]*. SZN, Praha, 178 pp. (in Czech).
- VICENA I., KONOPKA J. & PAŘEZ J., 1979: *Ochrana lesa proti polomům [Protection of forests against windthrows]*. SZN, Praha, 89 pp. (in Czech).
- VICENA I., JUHA M. & NOŽIČKA S., 2004: Větrné polomy a vývraty na území NP a CHKO Šumava v roce 2002, jejich příčiny a následky [Windthrows in NP and CHKO Šumava in 2002, reasons and consequences]. *Sborník z konference Aktuality šumavského výzkumu II. Správa NP a CHKO Šumava*, Vimperk, pp. 290–296.
- VICENA I., 2006: Současný stav ochrany lesa proti polomům [Current state of forests protection against windthrows]. *Lesnická práce*, 85: 1–6. (in Czech).
- VINCENT G., 1947: *Předcházíme polomům [Let's prevent windthrows]*. Československá matice lesnická, Písek, 79 pp. (in Czech).
- WAHBA G., 1990: *Spline models for observational data*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, vol. 59. SIAM, Philadelphia, 169 pp.
- ZENG H., PELTOLA H., VAISANEN H., KELLOMAKI S., 2009: The effects of fragmentation on the susceptibility of a boreal forest ecosystem to wind damage. *Forest Ecology and Management*, 257: 1165–1173.
- ZHENG D., CHEN J., LEMOINE J. M., EUSKIRCHEN E. S., 2005: Influences of land- use change and edges on soil respiration in a managed forest landscape, WI, USA. *Forest Ecology and Management*, 215: 169–182.

Received: 10 June 2013
Accepted: 8 October 2013