

## Jde Šumava ve stopách Krušných hor? Srovnání vlivu acidifikace

### Does the Bohemian Forest region follow the Ore Mountains? A comparison of acidification impact

Zbyněk Hrkal<sup>1,\*</sup> & Zdeněk Zelinka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, CZ-12843 Praha 2, Česká republika

<sup>2</sup>Vodní zdroje, a.s., Komunardů 309/6, CZ-17000 Praha 7, Česká republika

\*hrkal@natur.cuni.cz

#### Abstract

The objective of this paper is to characterize methods and results of regional investigation of vulnerability of shallow near surface aquifer and areal impact of acid atmospheric deposition in the zone of the Bohemian Forest (Šumava Mts.). Regional assessment of groundwater acidification in this area was done using maps of vulnerability and pollution load in the GIS. The applicability of single subsidiary data and reliability of resulting maps of vulnerability were tested and confronted with the results of long-term monitoring of groundwater quality. Effects of various factors influencing the degree of groundwater acidification were studied during this investigation. The concentration of  $\text{HCO}_3^-$  was used as a testing parameter. Effects of altitude, local morphology and geology and character of vegetation and soil cover, were also considered. Large investments directed in implementation of the so-called desulphurisation projects turned out to have been very successful. Lower concentrations of sulphur in acid atmospheric deposition have shown prolonged trends. From the other hand the Bohemian Forest region showed increased concentrations of nitrogen in atmospheric deposition. This increase is obviously due to progressing intensity of car traffic.

*Key words:* atmospheric deposition, groundwater acidification, vulnerability assessment

#### Úvod

Šumava je nejširší veřejností považována za symbol nejčistší části naší republiky, jednu z posledních rozsáhlých oblastí nenarušené přírody. Jako pravý protiklad bývá označována oblast Krušných hor, území dlouhodobě devastované acidifikací. Snad každý si vybaví desítky hektarů mrtvého lesa ve vrcholových partiích Krušných hor, důsledku kyselé atmosférické depozice. Jaká je však současná situace? Je na tom opravdu Šumava tak dobře? A jaký má dopad ekologická politika v Podkrušnohoří, zaměřená na odsíření místních elektráren? Odpovědi na tyto otázky hledal z hlediska hydrogeologie tříletý projekt LOWRGREP 5, rámcového programu EU. Hlavním cílem tohoto projektu bylo podat podklady pro optimalizaci lidské činnosti v horských oblastech Evropské unie z hlediska ochrany podzemních a povrchových vod. Prostředkem k dosažení tohoto cíle bylo srovnání studia hydrogeologických poměrů vybraných oblastí Španělska, Německa, Francie a České republiky. V rámci dlouhodobého monitoringu jakosti povrchových a podzemních vod Šumavy a Krušných hor byla sledována odolnost místního prostředí vůči acidifikaci a intenzita dopadu tohoto jevu na životní prostředí v širším slova smyslu. Výsledky monitoringu se staly základem mapového zpracování paralelně běžícího projektu VaV/510/4/98 „Omezování plošného znečištění povrchových

a podzemních vod v České republice“. Dosažené výsledky naznačují, že výše uvedené představy v současné době již zdaleka neodpovídají aktuálnímu stavu.

V prostoru současného Národního parku Šumava, ani v jeho okolí se nikdy v historii neobjevily plošné projevy acidifikace ve formě masového odumírání lesních porostů, jak je známe z Krušných hor, Jizerských hor či Krkonoš. V těsné blízkosti Šumavy se totiž nevyskytují takové zdroje znečištění jako jsou tepelné elektrárny, těžký či chemický průmysl. Převládající směry větrů jsou od západojihozápadu a tak zdroje kyselé atmosférické depozice z prostoru tzv. „černého trojúhelníku“ v severních Čechách, Polsku a na území bývalé NDR se na Šumavě nemohly projevit. Specifickým rysem kyselé atmosférické depozice je však její regionální charakter, který se projevuje na značné vzdálenosti. Na acidifikaci Skandinávie se proto podílely nejen zmíněné zdroje znečištění z tzv. černého trojúhelníku, ale i např. provoz tepelných elektráren v Anglii. Je tedy zřejmé, že ani Šumava, přestože v jejím blízkosti nejsou žádné významnější zdroje znečištění, nemusí být dokonale chráněna od regionálních dopadů atmosférické depozice. Negativní dopad mohou mít, či v minulosti měly, zdroje znečištění v německém Porúří, ležícím sice ve vzdálenost několika stovek kilometrů, ale ve směru převládajících větrů.

O tom, že i Šumava nebyla postupující acidifikací ušetřena dokládaly výsledky řady studií v oblasti místních jezer (VESELÝ 1994, SCHAUMBURG 2000). Nejstarší věrohodné analýzy z roku 1936 (JÍROVEC & JÍROVCOVÁ 1937) ukazovaly prakticky neutrální reakci (pH 6,9–7,0) velmi nízké koncentrace síranů a obsahy dusičnanů pod mezí detekce. Od šedesátých let minulého století začal stoupat vliv kyselé atmosférické depozice, který vyvrcholil v osmdesátých letech. V té době se hodnota pH klesla pod 4,5 a koncentrace hliníku byly  $\sim 1 \text{ mg.l}^{-1}$  (VESELÝ et al. 1998). Další důkazy acidifikace oblasti Šumavy přinesly výsledky z experimentálních malých povodí sítě GEOMON Na Lizu a Spálenec (FOTTOVÁ & SKOŘEPOVÁ 1998, FOTTOVÁ et al. 2001, FOTTOVÁ 2002). Jak vyplývá z dat z Tab. 1, úroveň atmosférické depozice na obou



**Obr. 1.** Situace malých povodí Geomon.

**Fig. 1.** Situation of the Geomon network of small catchment.

**Tabulka 1.** Odolnost jednotlivých povodí sítě GEOMON (FOTTOVA et al. 2000) vůči acidifikaci vyjádřená jako poměr pH srážek a pH odtoku, průměrná data z roku 1998 (HRKAL et al. 2002, upraveno).

**Table 1.** Resistance of individual catchments within the GEOMON network (FOTTOVA et al. 2000) to acidification expressed as the relationship between pH of the precipitation and pH of the runoff, average data from 1998 (HRKAL et al. 2002, modified).

Povodí / Catchment	Geologie Geology	Průměr pH (srážky) Average pH (precipitation)	Průměr pH (podkorunové srážky) Average pH (throughfall)	Průměr pH (odtok) Average pH (runoff)	pH odtoku – pH podkorunových srážek pH runoff – pH throughfall	pH odtoku – pH srážek pH runoff – pH precipitation	Odolnost vůči acidifikaci Resistance to acidification
Lysina (50° 02' N, 12° 40' E)	granit granite	4,66	4,26	4,14	-0,12	-0,52	Nizká (Low)
Loukov (49° 39' N, 15° 24' E)	granit granite	4,62	4,85	5,14	0,29	0,52	
U dvou louček (50° 13' N, 16° 30' E)	rula gneiss	4,16	4,06	4,8	0,74	0,64	
Uhlířská (50° 49' N, 15° 09' E)	granit granite	4,40	3,8	5,18	1,38	0,78	
Lesní potok (49° 58' N, 14° 46' E)	granit granite	4,49	4,08	5,53	1,45	1,04	Střední (Medium)
Jezeří (Krušné hory) (50° 33' N, 13° 29' E)	ortorula orthogneiss	4,64	3,65	5,76	2,11	1,12	
<b>Spálenec (Šumava)</b> (48° 55' N, 13° 59' E)	<b>rula gneiss</b>	<b>4,81</b>	<b>4,21</b>	<b>6,03</b>	<b>1,82</b>	<b>1,22</b>	
Modrý potok (50° 43' N, 15° 43' E)	svor mica-schist	4,70	4,6	6,28	1,68	1,58	
Červík (49° 27' N, 18° 23' E)	pískovec sandstone	4,54	4,15	6,12	1,97	1,58	
Polomka (49° 47' N, 15° 45' E)	rula gneiss	4,82	4,36	6,66	2,3	1,84	Vysoká (High)
Salačova Lhota (49° 31' N, 14° 59' E)	pararula paragneiss	4,70	4,68	7,05	2,37	2,35	
<b>Na Lizu (Šumava)</b> (49° 04' N, 13° 41' E)	<b>pararula paragneiss</b>	<b>4,45</b>	<b>4,34</b>	<b>6,72</b>	<b>2,38</b>	<b>2,27</b>	
Anenský potok (49° 34' N, 15° 05' E)	pararula paragneiss	4,62	4,16	7,05	2,89	2,43	
Pluhův bor (50° 04' N, 12° 47' E)	serpentinit serpentinite	4,66	4,49	7,33	2,84	2,67	

těchto šumavských povodích rozhodně neodpovídá přírodnímu nenarušenému prostředí. Úroveň acidifikace povrchové vody se v současné době především díky poklesu depozice síry postupně zlepšuje. V období září až října 2000 byla hodnota pH v Čertově jezeře 4,6 a v Černém jezeře dokonce dosáhla úrovně 4,9 (KOPÁČEK et al. 2001). Nicméně rychlost návratu k původnímu chemickému složení neodpovídá dokládanému trendu poklesu atmosférické depozice. Nejen na Šumavě, ale i v Krušných horách však byla jen omezená pozornost věnována stupni acidifikace podzemních vod, které jsou obecně považovány vůči kyselé atmosférické depozici za podstatně odolnější.

## METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Hlavním cílem prací bylo v prostoru Šumavy vyřešit následující úkoly:

1. Jednotnou metodou kartograficky vyjádřit zranitelnosti svrchního kolektoru kyselou atmosférickou depozicí.
2. Ověřit věrohodnost získané mapy zranitelnosti.
3. Kvantifikovat plošný dopad kyselé atmosférické depozice.
4. Srovnat výsledky ze Šumavy se závěry z Krušných hor.

### Metodika sestavení mapy zranitelnosti

Cílem mapy zranitelnosti podzemních vod kyselou atmosférickou depozicí bylo vyjádřit citlivost mělkého přípovrchového kolektoru na změny způsobené kyselou atmosférickou depozicí. Mapa zranitelnosti se snažila pomoci zpracování Geografickým informačním systémem MapInfo a Arcview zohlednit hlavní činitele, které se na acidifikaci místních podzemních vod mohou podílet. Metodicky mapa zranitelnosti Šumavy vycházela ze zkušeností předchozích map, v Jizerských horách (HRKAL & ALINČE 1998, HRKAL 2001) a především v Krušných horách (HRKAL in ROSENDORF et al. 2001).

Mapa zranitelnosti se skládala z 5 informačních vrstev, které vyjadřují jednotlivé faktory, které se mohou různou měrou podílet na výsledné acidifikaci podzemních vod. Pro vzájemnou srovnatelnost výsledků na Šumavě a v Krušných horách byla ve všech případech použita stejná klasifikace rizik (viz. Tab. 2).

**Tabulka 2.** Použitá klasifikace rizik na mapě zranitelnosti.  
**Table 2.** The risk classification used on the vulnerability map.

nadmořská výška (m n.m.) (altitude, m a.s.l.)	litologický typ (lithology)	expoze svahů (slope)	vegetační pokryv (vegetation)	půdy (soils)	stupeň rizika (risk value)
>1000			zdravý smrkový les (healthy spruce forest)		4
1000–800	granit (granite)	návětrné (leeward)	poškozený smrkový les (damaged spruce)	rašelinné půdy (peaty soils)	3
800–600	pararula (paragneiss)		zdravý listnatý les, těžce poškozený smrkový les (healthy deciduous forest, strongly damaged spruce)	podzol (podsoils)	2
<600		závětrné (windward)	louky, mýtiny (grassland, clearings)	hnědá lesní půda (brown forest soils)	1

**Geologie** – polygonová mapa, která vznikla digitalizací geologických map měřítko 1 : 50 000 edice České geologické služby. Ve srovnání s oblastí Krušných hor je převládající litologie Šumavy výrazně monotónnější, kterou bylo možno rozčlenit jen do dvou tříd.

**Morfologie** – tato vrstva nepřímo vyjadřuje objem vlhké atmosférické kyselé depozice. S přibývajícím nadmořskou výškou obecně vzrůstá množství srážek a tím i vliv vlhké atmosférické depozice na jakost vod. Na druhé straně směrem do údolí současně vzrůstá doba kontaktu podzemní vody s horninovým prostředím. Jako výchozí podklad posloužil matematický model terénu s gridem 25×25 metrů.

**Morfologie – rizika vyplývající z převládajících větrů.** Pro tuto vrstvu byl použit stejný podklad jako v případě analýzy vlivu nadmořské výšky, digitální model terénu. Mapa vyjadřuje návětrné svahy při převládajícím směrech větrů pod azimutem 240°. Na toto území dopadá větší množství prachových částic a vliv suché atmosférické depozice je tedy vyšší než na závětrných partiích.

**Půdy** – jako podklad byla použita digitální mapa půdních typů České geologické služby v měřítku 1 : 100 000. Klasifikace rizik odpovídá metodice použité v Krušných horách.

**Vegetační pokryv** – vegetace významným způsobem ovlivňuje vliv atmosférické depozice na acidifikaci vod. Na holinách a loukách se suchá atmosférická depozice nemá za co zachytit a její významná část je větrem odnášena. Vzrostlý les má však značnou plochu, která suchou depozici zachycuje a ta je poté srážkami smývána do půdy. Na druhé straně nově osázená vegetace je schopna odčerpávat poměrně značné objemy dusíku původem z atmosférické depozice (BORMANN & LIKENS 1970). Podobně jako v Krušných horách tak i na Šumavě se zdravotní stav lesa rychle mění, a vede v krajním případě k odumírání rozsáhlých ploch především smrkových monokultur. Aby se zohlednil i zdravotní stav lesa, byl jako podkladový materiál použita interpretace družicových snímků LANDSAT. K dispozici byly vyjádření typu lesního pokryvu a jeho zdravotního stavu odpovídající v letech 1984, 1992 a 1998 v rastrovém formátu o rozměrech pixelu 50×50 metrů, které poskytla Správa NP Šumava. Rastrový obraz byl převeden do vektorové podoby.

Výsledná mapa zranitelnosti byla sestavena průnikem uvedených pěti dílčích map. Rizika v jednotlivých vrstvách byla sečtena, přičemž byly použity totožné váhové faktory pro všechny použité podklady rovné jedné.

### **Metodika sestavení mapy celkové atmosférické depozice**

Atmosférická depozice se skládá ze dvou základních složek, vlhké a suché. Podobně jako v oblasti Krušných hor i na Šumavě z dlouhodobého hlediska dominuje suchá depozice, skládající se především z drobných prachových částic a aerosolů. Velikost jednotlivých složek atmosférické depozice je na Šumavě sledována od roku druhé poloviny 80. let na experimentálním povodí Na Lizu. V současné době je k dispozici dlouhodobá řada kvantitativních údajů charakterizujících vývoj atmosférické depozice (FOTTOVA et al. 2001) pro regionální hodnocení je však základní nevýhodou skutečnost, že tyto informace jsou vztaženy jen k velmi malé experimentální ploše. Účelem mapy celkové atmosférické depozice bylo pokusit se tyto údaje interpretovat na celé území Šumavy a to ve větším detailu než dosavadní podklady ČHMÚ, které vyjadřují atmosférickou depozici v gridu 5×5 km.

Mapa celkové depozice Šumavy se skládá ze dvou dílčích mapových podkladů, mapy suché depozice a mapy depozice vlhké. V obou těchto mapách byla samostatně vyjadřována depozice síry a celkového dusíku v mol.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>.

Základ pro zpracování mapy vlhké depozice tvoří výsledky matematického modelu terénu. Obecně platným pravidlem je totiž fakt, že nadmořská výška je v úzké závislosti na velikosti srážek. Pro zjednodušení předpokládáme, že koncentrace rozpuštěných složek ve srážkových vodách je konstantní a mění se pouze objem vody, který dopadne na jednotku plochy.

Proto, jestliže známe kvantitativní údaje o vlhké atmosférické depozici v nadmořské výšce odpovídající experimentálnímu povodí, můžeme lineární interpolací zvyšovat nebo snižovat velikost vlhké depozice ve vyšších nebo nižších nadmořských výškách. Pro vzájemnou srovnatelnost se závěry z Krušných hor byly pro zpracování použity data z povodí Na Lizu z roku 1994 (Tab. 3).

Komplikovanější situace je v případě suché atmosférické depozice. Z povodí Na Lizu známe velikosti suché depozice, stanovené jako rozdíl chemismu podkorunových srážek a chemismu srážek na volné ploše. Na rozdíl od Krušných hor však na Šumavě není měřena velikost suché depozice na volné ploše. Specifickým šumavským problémem je absence údajů o depozici pod listnatým lesem, na experimentálním povodí jsou měřeny podkorunové srážky jen pod smrkovým lesem. Podle statistického zpracování zastoupení různých druhů lesa v GIS vrstvě využití krajiny CORINE však listnatý les tvoří v sledované části Šumavy jen okolo 13 % lesního pokryvu. Z tohoto důvodu byla, s vědomím určitého zkresení, pro listnatý les použita hodnota suché depozice smrkového porostu snižená v poměru 1 : 2,3. Tento poměr charakterizoval rozdíl v suché depozici mezi smrkovým a listnatým porostem v Krušných horách.

Suchou depozici však ovlivňuje i morfologie. Intenzivnější bude zachycení prachových částic lesem v prostoru exponovaném na převládající větry než v území chráněném. Proto se v prvním kroku zpracování přiřadila hodnota suché depozice příslušným typům vegetačního pokryvu. V další fázi se prostory lesa rozčlenily dle mapy morfologie na dílčí polygony vymezující jejich pozici vůči převládajícím větrům. Zatímco na návětrných svazích byla hodnota suché depozice zvětšena o 1/3, v závětrných oblastech byla naopak o 1/3 snižena. Pro sestavení mapy suché atmosférické depozice byly použity následující hodnoty (Tab. 4 a 5).

Mapa celkové depozice vznikla průnikem polygonů z dílčích map suché a vlhké depozice a sečtením příslušných hodnot.

### Způsob testování věrohodnosti mapy zranitelnosti

Jako testovací prostředek pro ověření vlivu různých faktorů na výslednou zranitelnost prostředí byly použity chemické analýzy monitorovací sítě výše zmíněného projektu EU LOWR-GREP. Dvouleté sledování 49 pramenů na Šumavě a 50 pramenů v Krušných horách v měsíčních intervalech svým plošným rozsahem, detailností analyzovaných složek a četností odběrů představuje velmi cenný podkladový materiál pro regionální zpracování chemismu podzemních vod sledované oblasti. O každém monitorovaném objektu jsou k dispozici všech-

**Tabulka 3.** Použité údaje o vlhké depozici.

**Table 3.** Used data on wet deposition.

nadmořská výška (m n.m.) altitude (m a.s.l.)	průměrné srážky (mm) average precipitation (mm)	depozice síry (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) sulphur deposition (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	depozice dusíku (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) nitrogen deposition (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	poznámka (note)
1100	1113	244	421	interpolovaná hodnota (interpolated value)
900	911	200	345	průměrná hodnota z povodí Na Lizu (mean value from Na Lizu catchment)
700	708	155	295	interpolovaná hodnota (interpolated value)

**Tabulka 4.** Použité údaje o suché depozici dusíku v povodí Na Lizu.  
**Table 4.** Data on dry deposition of nitrogen to the catchment Na Lizu.

vegetační pokryv (vegetation)	depozice na povodí (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) deposition to the catchment (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	přepočtená depozice na (recalculated deposition to)	
		návětrné svahy (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) windward slopes (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	závětrné plochy (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) leeward slopes (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )
jehličnatý les (conifer forest)	484	644	364
listnatý les (deciduous forest)	210	279	158
ostatní území (other area)	139	185	105

**Tabulka 5.** Použité údaje o suché depozici síry v povodí Na Lizu.  
**Table 5.** Data on dry deposition of sulphur to the catchment Na Lizu.

vegetační pokryv (vegetation)	depozice na povodí (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) deposition to the catchment (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	přepočtená depozice na (recalculated deposition to)	
		návětrné svahy (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) windward slopes (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	závětrné plochy (mol.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ) leeward slopes (mol.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )
jehličnatý les (conifer forest)	281	373	211
listnatý les (deciduous forest)	122	162	92
ostatní území (other area)	81	107	61

**Tabulka 6.** Srovnání vybraných složek chemismu podzemních vod Šumavy a Krušných hor (data z monitorovací sítě projektu LOWRGREP).

**Table 6.** Comparison of selected components of groundwater chemistry in the Bohemian Forest and in the Ore Mts. (data taken over from the monitoring grid of the LOWRGREP project).

	pH	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Al	Be	mineralizace (mineralisation)
		mg.l <sup>-1</sup>				μg.l <sup>-1</sup>	
Šumava	6,1	17	11,7	6,8	0,2	0,1	58
Krušné hory	5,8	11	30,2	5,8	0,2	0,8	63

ny základní charakteristiky příslušného infiltračního povodí, které umožňují formulovat názory na některé anomální jevy.

Jako testovací parametry byly v oblasti Šumavy použity parametry, které jsou považovány za nejspolehlivější indikátory acidifikace (GRIMWALL & COLLE 1986) hodnoty pH, dále Ca, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> a HCO<sub>3</sub>. Jak vyplývá z dlouhodobých průměrů měsíčních odběrů z let 2000–2002 (Tab. 6.) i přes velmi podobnou litologii sledovaných povodí je zřejmý vyšší stupeň acidifikace podzemních vod Krušných hor. Tato skutečnost se projevuje nižší hodnotou pH, nižší koncentrací HCO<sub>3</sub> a naopak výrazně vyššími obsahy síranů.

Pro posouzení individuálního vztahu mezi jednotlivými sledovanými faktory, jejichž kombinace vytváří výslednou mapu zranitelnosti a jakostí podzemní vody, byl použit následující postup. Nejprve bylo pomocí matematického modelu terénu generováno povodí každého ze sledovaných pramenů. Poté byla pro každé povodí stanovena dílčí hodnota rizika jednotlivých faktorů ovlivňujících acidifikaci. Tímto postupem bylo proto možno např. určit jaký typ vegetačního pokryvu či jaký typ horniny, či půdní typ převládá v každém z povodí a tak ovlivňuje výsledný chemismus. V dalším kroku byl stanoven stupeň korelace mezi sledovanými složkami chemismu podzemních vod a odpovídajícím stupněm zranitelnosti v jednotlivých použitých vrstvách.

## VÝSLEDKY A DISKUZE

### Testování věrohodnosti mapy zranitelnosti

Úvodem popisu dosažených výsledků je třeba zdůraznit, že výsledné korelační koeficienty vždy vyjadřují funkční vztah mezi dvěma sledovanými parametry: jedním z faktorů ovlivňujícím acidifikaci, vyjádřeným stupněm rizika na jedné straně a alkalitou, případně další sledovanou složkou na straně druhé. Ideální stupeň korelace blízky jedné, by bylo teoreticky možno dosáhnout pouze v případě, kdyby chemické složení podzemní vody bylo výsledkem dopadu jen jednoho dominantního faktoru. Tak tomu však v přírodě není, výsledný chemismus je ovlivňován velmi pestrým souborem činitelů, které často působí ve vzájemném protikladu. Tento jev byl často sledován na posuzovaných povodích, kdy například pozitivní vliv absence lesního pokryvu byl zcela setřen kombinací vlivu svahu terénu a půdního typu. Na hodnoty koeficientu korelace mezi jednotlivými sledovanými parametry je proto nutno se dívat s vědomím těchto skutečností.

Prezentované výsledky (Tab. 7) prokázaly, že ze všech sledovaných testovacích parametrů jsou to koncentrace  $\text{HCO}_3^-$ , které jsou nejspolehlivějším indikátorem acidifikace. Alkalita měla ve většině případů s faktory ovlivňujícími acidifikaci nejtěsnější vztah. Zajímavým poznatkem je poměrně vysoká korelace mezi obsahy berylia a celkovým rizikem, který by mohl svádět k závěru, že se jedná o další důkaz acidifikace. Beryllium je totiž velmi citlivé na vyplavování do roztoku v kyselém prostředí. V Krkonoších a v Krušných horách byl prokázán velmi těsný vztah mezi pH, alkalitou a koncentracemi Al a Be (HRKAL & FOTTOVÁ 1999). V případě Šumavy však bude zřejmě nutno hledat jiné vysvětlení. K vyplavování berylia dochází až při poklesu pH blízkým hodnotám 4, což je případ jen ojedinělý. Jediným faktorem, který zvýšené obsahy berylia ovlivňuje (Tab. 7) je místní geologie, konkrétně pararuly. Důvodem proto zřejmě budou geochemické rozdíly metamorfítů Šumavy a Krušných hor.

Ze srovnání vlivu jednotlivých faktorů ovlivňujících acidifikaci šumavských podzemních vod (Tab. 8) vyplývá, že nejvýznamnější úlohu hraje charakter vegetačního pokryvu a půd. Geologie, s ohledem na svůj monotónní charakter, příliš velký vliv nemá. Jako druhý nejméně významný faktor můžeme na Šumavě považovat expozici svahů na převládající směr větrů.

Ze srovnání výsledků z Krušných hor a ze Šumavy je zřejmé, že přes některé odlišné trendy vztah mezi celkovým rizikem a alkalitou zůstává víceméně obdobný. Tato skutečnost vede k závěru, že použitý model mapy zranitelnosti kyselou atmosférickou depozicí podává důvěryhodné výsledky.

Odlišné podmínky v obou srovnávaných regionech však způsobují, že jednotlivé dílčí faktory se na celkovém riziku podílejí různou měrou. Zatímco nejvýznamnějším faktorem v Krušných horách byl charakter půd a morfologie, na Šumavě se vcelku rovným dílem podílejí na výsledné zranitelnosti charakter vegetačního, tedy především lesního pokryvu, charakter půd a nadmořská výška.



**Tabulka 7.** Vztah mezi sledovanými indikátory acidifikace a rizikovými faktory na Šumavě.  
**Table 7.** The relationship between acidification indicators and risk factors in the Bohemian Forest.

	pH	Ca	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Be	Al
Svahy (slope)	-0,12	-0,26	-0,14	-0,18	-0,35	0,21	0,12
Nadmořská výška (altitude)	-0,31	-0,43	-0,56	-0,19	-0,44	-0,01	0,21
Geologie (geology)	-0,56	-0,13	0,10	-0,02	-0,25	0,57	0,09
Vegetace (vegetation)	-0,50	-0,61	-0,51	-0,43	-0,69	0,37	0,08
Půdy (soil)	0,0	-0,40	0,10	-0,40	-0,7	0,2	0,1
Celkem (total)	-0,56	-0,61	-0,47	-0,37	-0,73	0,44	0,18

**Tabulka 8.** Srovnání vlivu různých faktorů na HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (vyjádřeným koeficientem korelace) v Krušných horách a na Šumavě.

**Table 8.** Comparison of impacts of different factors on HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (expressed by correlation coefficients) in the Ore Mountains and in the Bohemian Forest.

Krušné hory	typ rizika (type of risk)					Celkové riziko (aggregate risk)
	Svahy (slope)	Vegetace (vegetation)	Nadm. výška (altitude)	Půdy (soil)	Geologie (geology)	
Období (period)						
1955–1969	-0,57	-0,37	0,01	-0,47	-0,27	-0,78
2000–2002	-0,56	-0,23	0,01	-0,46	-0,41	-0,77

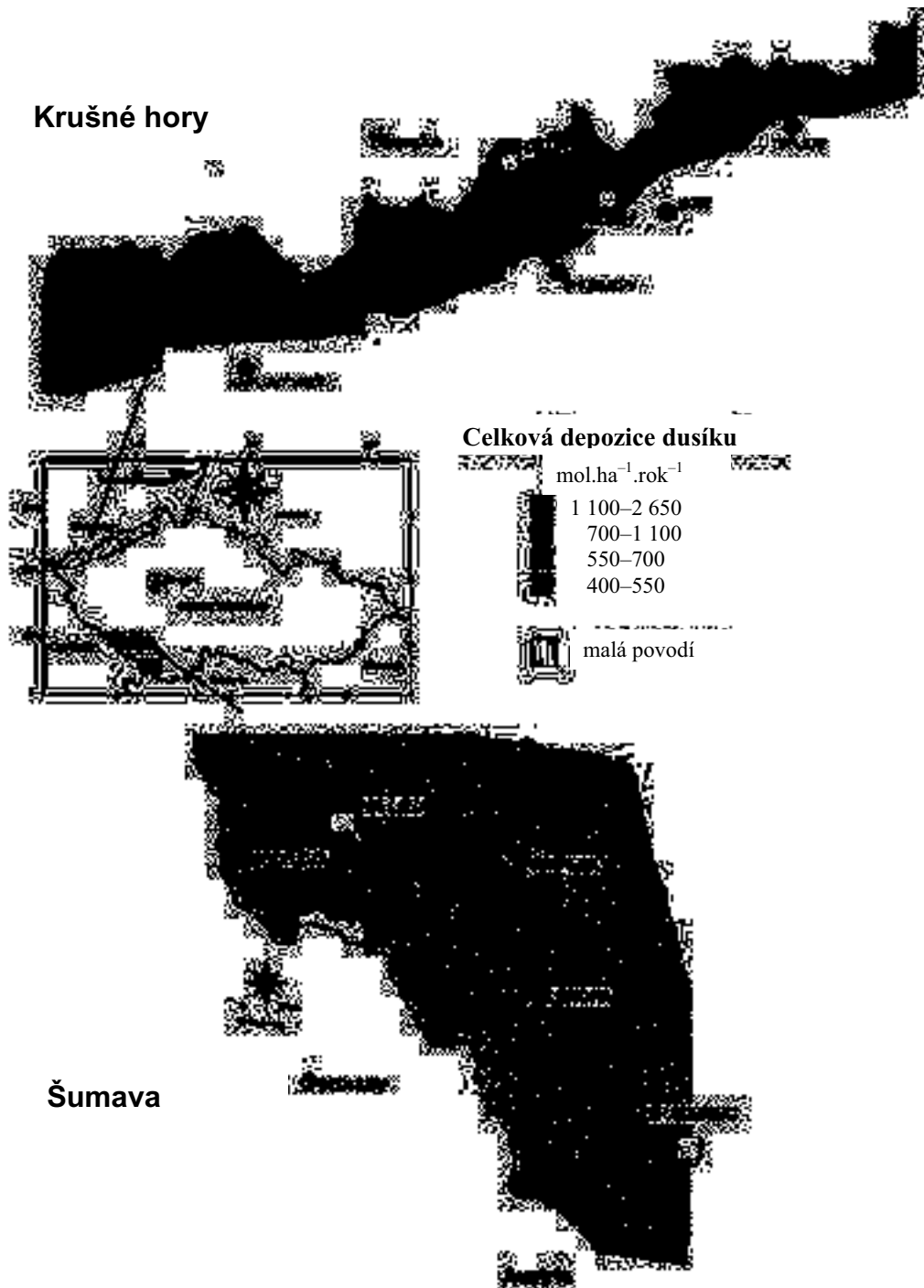
Šumava	typ rizika (type of risk)					Celkové riziko (aggregate risk)
	Svahy (slope)	Vegetace (vegetation)	Nadm. výška (altitude)	Půdy (soil)	Geologie (geology)	
Období (period)						
2000–2002	-0,35	-0,69	-0,44	-0,7	-0,25	-0,73

Důležitým zjištěním je fakt, že stejně jako v Krušných horách žádný ze sledovaných jevů v sledované části Šumavy neovlivňuje zranitelnost mělkého přípovrchového kolektoru rozhodující měrou, ale všechny faktory působí komplexně ve velmi složité vzájemné kombinaci.

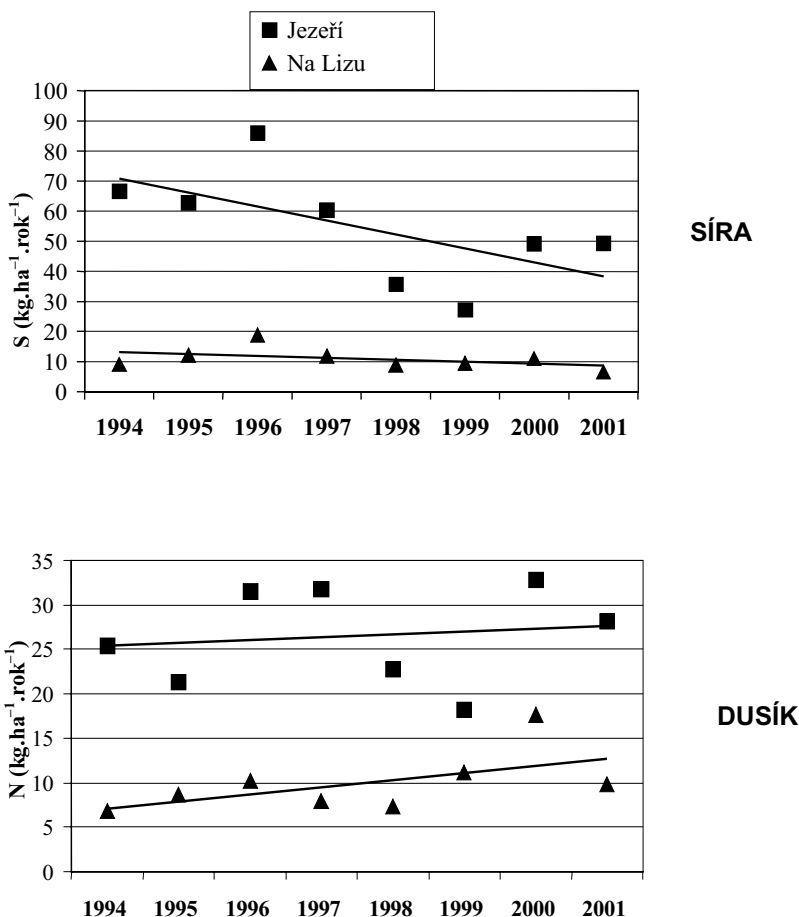
### Výsledky plošné interpolace atmosférické depozice

Mapová prezentace depozice dusíku a síry v prostoru Krušných hor a Šumavy podává zcela nový pohled na plošné zatížení atmosférickou depozicí, který dosavadní grid 5x5 km nebyl schopen postihnout. Z map vyplývají jednak některé odlišnosti mezi jednotlivými srovnávanými regiony, současně se však ukazuje i poměrně značná variabilita depozice i rámci samotných oblastí. Zatímco na Šumavě vychází pro rok 1994 průměrná celková depozice síry 339 mol.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, v Krušných horách je to trojnásobek, 1019 mol.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. V případě celkové depozice dusíku tento rozdíl je výrazně nižší (Obr. 2). Na Šumavě byl průměr celkové depozice v roce 1994 rovný 605 mol.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> a v Krušných horách je jen dvojnásobný, 1324 mol.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Pro Krušné hory byla vypočtena výrazně vyšší celková depozice dusíku v jihozápadní části. Pokud srovnáváme se Šumavou pouze severovýchodní části Krušných hor dostáváme obdobné hodnoty celkové depozice dusíku.

## Krušné hory



**Obr. 2.** Srovnání celkové depozice dusíku v roce 1994 v Krušných horách a na Šumavě.  
**Fig. 2.** Comparison of total nitrogen deposition in Ore Mts. and Bohemian Forest (year 1994).



**Obr. 3.** Srovnání vývoje depozice síry a dusíku v podkorunových srážkách v Krušných horách (povodí Jezeří) a na Šumavě (povodí Na Lizu) za období 1994 až 2001 (FOTTOVÁ 2002).

**Fig. 3.** Comparison of sulphur and nitrogen throughfall in the Ore Mts. (Jezeří catchment) and in the Bohemian Forest (Na Lizu catchment) between 1994 and 2001 (FOTTOVÁ 2002).

Depozice síry pochází především ze spalování nekvalitního hnědého uhlí v oblasti tzv. „Černého trojúhelníku“ území bývalé NDR, Podkrušnohoří a přilehlé části Polska s vysokou koncentrací těžkého a chemického průmyslu. Přes intenzivní proces odsíření místních elektráren zůstává atmosférická depozice síry stále víceméně lokalizována na oblast Krušných hor. Komplikovanější situace je v případě dusíku. Intenzita působení zemědělské činnosti, jednoho z významných zdrojů emisí  $\text{NO}_3$ , ve střední Evropě klesá. KOPÁČEK et al. 2001 dokládá na stanicích Svratouch, Košetice a Hradec Králové Českého hydrometeorologického ústavu poklesový trend emisí  $\text{NH}_3$ , který generalizuje na celé území České republiky. Nicméně na druhé straně roste význam dalšího zdroje depozice dusíku, automobilové dopravy.

Uvedené výsledky jsou toho názornou ukázkou. Zatímco síra hraje v prostoru Šumavy víceméně okrajovou úlohu, kyselá atmosférická depozice dusíku je regionálně srovnatelná s některými částmi Krušných hor. Ukázkou vývoje atmosférické depozice v obou srovnáva-

ných regionech podává následující obrázek (Obr. 3). Ze srovnání vývoje koncentrace síry a dusíku v podkorunových srážkách vyplývá zřetelný pokles vlivu síry v oblasti Krušných hor, při víceméně setrvalém stavu v oblasti Šumavy. Koncentrace dusíku však zachovávají v obou oblastech vzestupný trend. Tyto závěry z povodí Na Lizu a Jezeří jsou potvrzeny i daty z bavorského povodí Lehstenbach za období 1988–1996 (MATZNER et al. 2001).

### Testování věrohodnosti mapy atmosférické depozice

Vypovídací schopnost a přesnost interpolovaných dat zobrazených na mapě celkové depozice byla ověřována následujícím postupem:

Jako zdroj vstupních dat pro mapu atmosférické depozice byly použity informace z malého povodí Na Lizu (FOTTOVÁ 2002). Na Šumavě je však sledováno ještě další experimentální povodí, Spálenec (FOTTOVÁ 2002). Pomocí dat z mapy celkové atmosférické depozice Šumavy byly spočítány průměrné hodnoty depozice dusíku a síry na tomto experimentálním povodí. Tyto informace pak byly porovnány se skutečnými naměřenými hodnotami (FOTTOVÁ 2002). Při tomto testu je nutno mít na zřeteli měřítkový efekt. Mapa celkové depozice podává regionální pohled a s ohledem na přesnost použitých podkladů odpovídá přesnosti měřítka cca 1 : 100 000. Informace z tohoto podkladu se přitom snažíme srovnávat s daty v měřítku o řád přesnějším 1 : 10 000. Přesto však totožný metodický postup v případě Krušných hor přinesl až nečekaně dobrou shodu mezi měřenými daty a údaji o celkové depozici odečtené z mapy. Měřená data z krušnohorské experimentální plochy Načetín (ČERNÝ 1995) se od odečtených dat odpovídající malému povodí Jezeří lišila jen okolo 10 % (HRKAL in ROSENDORF 2001). V případě Šumavy byla dosažena obdobná přesnost u depozice síry, kde rozdíl mezi měřenými hodnotami podkorunových srážek na povodí Spálenec a hodnotou odečtenou z mapy celkové depozice byl jen 17 %. Výraznější rozdíl byl však zaznamenán u dusíku. Zatímco skutečná hodnota součtu podkorunových srážek  $\text{N-NO}_3$  a  $\text{N-NH}_4$  byla  $272 \text{ mol} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ , z mapy vycházela hodnota více než dvojnásobná. Při tomto testu si však musíme být vědomi zmíněného problému měřítkového efektu – přenosu regionálně stanovených dat do detailního prostoru malého povodí a dále nepřesnosti vstupních dat do mapy depozice na Šumavě, stanovované z valné části jen formou analogie.

### ZÁVĚRY

- 1) I přes veškerou snahu o snížení kyselé atmosférické depozice zůstává acidifikace ve střední Evropě významným problémem a dotýká se jak povrchových tak i podzemních vod. Dlouhodobě akumulovaná síra v půdním horizontu výrazně zpomaluje rekonstrukci původního chemického složení vod.
- 2) Odolnost mělkého přìpovrchového kolektoru vůči kyselé atmosférické depozici ovlivňuje na Šumavě nejvíce charakter půd a vegetačního pokryvu. Žádný z dalších sledovaných jevů (litologie horninového prostředí, nadmořská výška, morfologie) neovlivňuje zranitelnost tohoto prostředí rozhodující měrou, všechny faktory však působí komplexně v složité vzájemné kombinaci.
- 3) V oblastech postižených kyselou atmosférickou depozicí situaci zhoršuje přítomnost vzrostlého, především smrkového lesa, který zvyšuje podíl suché atmosférické depozice na depozici celkové. Odstranění smrkových monokultur, jejich nahrazení smíšeným lesem vede k snížení vlivu atmosférické depozice. Jak vyplývá ze zkušeností z Krušných hor, odstranění smrkových monokultur ve vrcholových partiích vedlo ke zlepšení jakosti povrchových i podzemní ch vod. Podobný efekt měla i výsadba smíšených lesů s vyšším podílem listnatých stromů. Nicméně je třeba zdůraznit, že změny ve složení vegetačního pokryvu jsou jen jednou z dílčích pozitivních změn. Hlavním cílem musí být snížení celkové kyselé depozice.

- 4) Zatímco ještě v nedávné minulosti to byla depozice síry, která hrála dominantní úlohu, z výsledků povodí Na Lizu a Jezeří vyplývá vzrůstající vliv depozice dusíku.
- 5) Důkazem, že otázka depozice dusíku se může stát v budoucnu rozhodující problémem acidifikace, je oblast Šumavy. Přestože vlastní území je bez významných zdrojů znečištění, rozsáhlé okolí Modravy je charakteristická stejnou intenzitou depozice dusíku, jako je SV oblast Krušných hor. Odpověď na otázku v titulu toho článku tedy zní ano, s ohledem na regionální dopad vlivu atmosférické depozice skutečně hrozí nebezpečí, že Šumavu může potkat podobný osud jako Krušné hory. Jen s tím rozdílem, že původce depozice bude jiný, vliv těžkého průmyslu a tepelných elektráren může být nahrazen automobilovou dopravou.

## LITERATURA

- BORMANN F.H. & LIKENS G.E., 1970: The nutrient cycles of an ecosystem. *Scientific American* 223: 92–101.
- ČERNÝ J., 1995: Acidification research in the Krušné hory Mts. In: ČERNÝ J. & PÁČES T. (eds) *Acidification in the Black Triangle Region*. 5<sup>th</sup> International Conference on Acidic Deposition, Science and Policy, Czech Geological Survey, Prague, p. 34–51.
- ČERNÝ J. & PÁČES T. (eds), 1995: *Acidification in the Black Triangle Region*. 5<sup>th</sup> International Conference on Acidic Deposition, Science and Policy, Czech Geological Survey, Prague
- FOTTOVÁ D. & SKOŘEPOVÁ I., 1998: Changes in mass element fluxes and their importance for critical loads: GEOMON network, Czech Republic. *Water, Air and Soil Pollution* 105: 365–376.
- FOTTOVÁ D., KRÁM P., HRUŠKA J. & PÁČES T., 2001: Posouzení látkový toků na síti malých povodí GEOMON v České republice – Etapová zpráva. Česká geologická služba, Praha
- FOTTOVÁ D., 2002: Material flow in small acidified catchment. Final report D3 LOWRGREP project EVK1-1999-00040 5<sup>th</sup> Framework program EU.
- FOTTOVÁ D. & SKOŘEPOVÁ I., 1998: Changes in mass elements fluxes and their importance for critical loads: GEOMON network, Czech Republic. *Water, Air, and Soil Pollution*, 105: 365–376.
- GRIMWALL A. & COLLE C.A., 1986: Quality trends of public water supplies in Sweden. *Water Quality Bulletin*, 11(1): 6–11
- HRKAL Z. & FOTTOVÁ D., 1999: Influence des pluies acides à la qualité des eaux de la République tchèque., *Bulletin du BRGM, Hydrogéologie*, 2: 39–45.
- HRKAL Z., BUCHTELE J., TIKKANEN E., KÄPYAHO A. & ŠANTRŮČEK J., 2002: The role of groundwater in the acidification of the hydrosphere – examples from small catchments in the Bohemian Massif. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, 439: 99–105.
- HRKAL Z., 2001: Omezování plošného znečištění povrchových a podzemních vod v ČR. In: ROSENDORF P. et al., Etapová zpráva za rok 2001. VÚV TGM, Praha.
- JIROVEC O. & JIROVCOVÁ M., 1937: Le chimisme des lacs de la Šumava (Forêt Bohême). *Věstník královské české společnosti nauk*, třída II,13: 1–21.
- KOPÁČEK J., VESELÝ J. & STUHLÍK E., 2001: Sulphur and nitrogen fluxes and budget in the Bohemina Forest and Tatra Mountains during the Industrial Revolution (1850–2000). *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(3): 391–405.
- MATZNER E., ALEWELL C., BITTERSÖHL J., LISCHIED G., KAMMERER G., MANDERSCHIED B., MATSCHONAT G., MORITZ K., TENHUNEN J.D. & TOTSCHKE K., 2001: Biogeochemistry of Spruce Forest Catchment of Fichtelgebirge in Response to Changing Atmospheric Deposition. In: Ecosystem Approaches to Landscape Management in Central Europe, TENHUNEN J.D. et al. (eds) *Ecological Studies*, Vol. 147. Springer-Verlag, Berlin.
- SCHAUMBURG J., 2000: Long-term trends in biology and chemistry of the acidified Bavarian Forest lakes. *Silva Gabreta*, 4: 29–40.
- VESELÝ J., 1994: Investigation of nature of the Šumava lakes: a review. *Časopis Národního muzea*, řada přírodovědná, 163: 103–120.
- VESELÝ J., HRUŠKA J., NORTON S.A. & JOHNSON C.E., 1998: Trends in water chemistry of acidified Bohemian lakes from 1984 to 1995: I. Major solutes. *Water Air Soil pollution*, 108: 107–127

