

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA EKOLOGIE



Vliv zaniklých farem na chemické složení půd a na
vegetaci na Islandu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: prof. RNDr. Michal Hejcman, Ph.D. et Ph.D.

Konzultant: doc. PhDr. Ladislav Šmejda, Ph.D.

Bakalant: Jiří Vašák

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Vašák

Aplikovaná ekologie

Název práce

Vliv zaniklých farem na chemické složení půd a na vegetaci na Islandu

Název anglicky

Effect of abandoned farms on chemical composition of soils and on vegetation on Iceland

Cíle práce

Cílem práce je zjistit, jaké jak jsou odlišné půdy a vegetace na zaniklých farmách na Islandu od okolních pozemků.

Metodika

Student si vybere několik zaniklých farem v okolí vulkánu Hekla a provede zde měření prvkového složení půd v různých vzdálenostech od identifikovaných farem.

Poté provede porovnání půd v okolí farem s přirozeným pozadím a zjistí, jak velké je naboření archeologických půd indikátory lidské aktivity (fosfor, síra, vápník, draslík, hořčík, zinek a měď) a jak se toto naboření liší mezi různými farmami opuštěnými v různých obdobích. Dále na farmách a v jejich okolí provede vegetační snímkování a analýzu chemického složení vegetace.

Doporučený rozsah práce

do 30 stran

Klíčová slova

fosfor, vápník, zinek, zaniklé farmy, Island

Doporučené zdroje informací

Hejcman M., Karlík P., Ondráček J., Klír T. (2013): Short-term medieval settlement activities irreversibly changed forest soils and vegetation in Central Europe. *Ecosystems* 16, 652-663.

Hejcman M., Ondráček J., Smrž Z. (2011): Ancient waste pits with wood ash irreversibly increase crop production in Central Europe. *Plant and Soil* 339: 341–350.

Hejcman M., Součková K., Gojda M. (2013): Prehistoric settlement activities changed soil pH, nutrient availability, and growth of contemporary crops in Central Europe. *Plant and Soil* 369: 131–140.

Hejcman M., Součková K., Kristuf P., Peška J. (2013): What questions can be answered by chemical analysis of recent and paleosols from the Bell Beaker barrow (2500 – 2200 BC) in Central Moravia, the Czech Republic? *Quaternary International* 316: 179–189.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. RNDr. Michal Hejcman, Ph.D. et Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ekologie

Konzultant

PhDr. Ladislav Šmejda, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

doc. Ing. Jiří Vojar, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Michala Hejcmana, Ph.D. et Ph.D., a že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne

.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval prof. RNDr. Michalu Hejcmanovi, Ph.D. et Ph.D. jednak za jeho vstřícnost při vedení této práce, poskytnutou metodickou pomoc, a především za nenahraditelnou možnost zpracování zajímavého tématu na Islandu.

Velice rád bych poděkoval Mgr. Pavle Waldhauserové a celé její rodině za ochotu, vstřícnost a neocenitelnou všeobecnou pomoc při všech mých stážích na Islandu.

Dále bych rád poděkoval celému vědeckému týmu prof. RNDr. Michala Hejcmana, Ph.D. et Ph.D. Human Adaptability Studies, zejména konzultantovi této bakalářské práce doc. PhDr. Ladislavu Šmejdovi, Ph.D., Islandské zemědělské univerzitě za poskytnutí cenných rad a prostoru pro vlastní realizaci, České zemědělské univerzitě a její Fakultě životního prostředí za stipendijní výpomoc při mých stážích a v neposlední řadě své rodině za podporu a trpělivost při celém studiu.

Abstrakt

Lidská aktivita může významně působit na severské ekosystémy. Tato práce se zabývá vybranými faktory, ovlivňujícími islandské půdy, a zkoumá vliv zaniklých farem na chemické složení půd, který se následně projevuje rozdílnými vegetačními příznaky. Pro tyto účely bylo vybráno 7 zaniklých Islandských farem a v červnu roku 2017 byly na nich odebrány vzorky pro stanovení celkového a rostlinám dostupného obsahu prvků. V porovnání s jejich nejbližším okolím (kontroly) byl na místech zaniklých farem detekován signifikantně vyšší obsah P, S, K a Zn. Naopak významně vyšší koncentrace prvků Ca, Ti, Ni a Zr v porovnání s farmami byla změřena na kontrolách v jejich okolí. Největší rozdíly mezi farmami a jejich okolím byly zjištěny v koncentracích rostlinám dostupného draslíku. Dále bylo zjištěno prvkové složení rostlinné biomasy, kde byl obsah N, P, K, Cd, ADF a NDF mnohem vyšší na farmách, a naopak obsah Ca, Fe, Zn a Mn byl signifikantně vyšší v kontrolách. Jako poslední část výzkumu bylo provedeno vegetační snímkování. Druhová skladba byla na farmách signifikantně chudší než na kontrolách, avšak celkový pokryv cévnatými rostlinami byl na farmách výrazně vyšší a dominovaly zde travní druhy. Oproti tomu pokryvnost mechorostů a bylin byla na farmách významně nižší. Zelená barva vegetace v místech opuštěných farem je velice kontrastní v porovnání se žlutou barvou vegetace v místech kontrol. Z této práce i z řady publikovaných studií vyplývá, že lidská činnost může být vzhledem k rozdílným akumulacím antropogenních prvků v půdě rozpoznána v krajině i po tisíce let po ukončení osídlení daného místa a díky vegetačním příznakům je dnes možné tato archeologická místa snadno a rychle identifikovat.

Klíčová slova: fosfor, vápník, zinek, zaniklé farmy, Island

Abstract

Human settlement is connected with changes in Nordic ecosystems. This bachelor thesis indicates several factors that have impact on soils in Iceland and studies the effect of abandoned farms on chemical composition of soils and variability of vegetation growth called cropmarks. For these purposes, seven abandoned farms on Iceland were selected and elements used by plants as well as total content of elements were measured in June 2017. Significantly higher content of Phosphorus, Sulfur, Potassium and Zinc was detected in locations of farms in comparison with off-site controls. Relatively lower concentration of Calcium, Titanium, Nickel and Zirconium was identified on the farms in comparison with the controls. The biggest difference between the farms and their controls was detected for the content of plant available potassium. According to the plant biomass chemical properties, significantly higher content of Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Cadmium, acid and neutro detergent fibre was measured on the farm sites. On the other hand, much lower content of Calcium, Iron, Zinc and Manganese was detected in biomass on farms in comparison with controls. Recorded composition of plant species was relatively lower on farms than in controls, but total coverage of vascular plants was much higher on farms, dominated mostly by graminoid plants. On the other hand, cover of bryophytes and herbs was significantly lower on farms than in controls. Green colour of vegetation on farms highly contrasted with yellow colour of plant biomass in controls. In conclusion, higher accumulation of anthropogenic elements in archaeological sites can be recorded due to the human activities even thousands years after their abandonment and these sites can be detected today through specific vegetation properties (vegetation marks, cropmarks).

Key words: phosphorus, calcium, zinc, abandoned farms, Iceland

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce	2
3	Literární rešerše.....	3
3.1	Signály archeologických půd.....	3
3.2	Půdy na Islandu	5
3.3	Eroze	5
3.3.1	Vliv vegetace.....	6
3.3.2	Vliv klimatu	7
3.3.3	Vliv vulkanické činnosti.....	8
4	Metodika.....	10
4.1	Studovaná lokalita	10
4.1.1	Brekkur	10
4.1.2	Dagverðarnes.....	11
4.1.3	Kastalabrekka	11
4.1.4	Kot.....	12
4.1.5	Steinkross (new)	12
4.1.6	Steinkross (old)	13
4.1.7	Valshóll	13
4.2	Sběr a zpracování dat.....	16
4.2.1	Sběr dat.....	16
4.2.2	Vegetační snímkování.....	17
4.2.3	Zpracování dat	17
4.3	Statistická analýza.....	18

5	Výsledky.....	19
5.1	Celková koncentrace prvků v horní vrstvě půdy.....	19
5.1.1	Fosfor.....	21
5.1.2	Síra.....	21
5.1.3	Draslík.....	22
5.1.4	Zinek.....	23
5.2	Rostlinám dostupný obsah prvků v horních 10 cm vrstvách půdy.....	24
5.3	Prvkové složení rostlinné biomasy.....	26
5.4	Vegetační snímkování.....	28
6	Diskuze.....	32
7	Závěr.....	34
8	Zdroje.....	35
9	Přílohy.....	39

1 Úvod

Přibývá důkazů, že lidská aktivita, zejména kolonizace a následné zemědělství, může být spojena s nezvratnou změnou ekosystémů. Tato změna se projevuje mimo jiné antropogenní akumulací určitých chemických prvků (fosfor, draslík, vápník, hořčík, železo, zinek, měď, stroncium a rubidium) v půdě a v sedimentech (Entwistle et al., 2000; Holliday, 2004). Vysoké akumulace těchto prvků mohou být detekovány přímo na místech starých lidských obydlí (Milek et al., 2013) a v jejich nejbližším okolí, ať už se jedná o přilehlé zahrady či pole. V důsledku dlouhodobé akumulace odpadů jako byl popel nebo hnůj, můžeme zvýšený obsah některých prvků indikovat stovky i tisíce let po opuštění osad či farem (Entwistle et al., 1998). Ukazuje se, že toto obohacení můžeme prokázat dokonce více než 2000 let po ukončení aktivit spojených s osídlením, např. biblických měst v Izraeli (Itkin et al., 2018; Šmejda et al., 2018).

Island je vzhledem k hojné vulkanické činnosti velice zajímavým místem pro studování chemických signálů, zejména díky časté depozici tefry (obecný termín pro vzduchem unášený vulkanický materiál). Tak vznikají typické islandské půdy s velkou schopností fixace fosforu, označované jako Andosoly (Arnalds, 2015). Otázka, kterou se zabývá tato práce, a která zatím nebyla podrobně studována zní, zda zaniklé farmy na Islandu mohou být detekovány díky akumulaci antropogenních prvků v půdě, rozdílným pokryvem rostlinných druhů a zlepšením jejich nutričních hodnot (jejich dostupná výživa), které se pak na vegetaci projeví tmavší zelenou barvou v porovnání s okolím. Pro studium této otázky jsme vybrali sedm opuštěných farem v údolí Pjorsaldallur na jihu Islandu. Toto údolí bylo pro náš výzkum vhodné díky vysoké početnosti opuštěných farem z různých období. Diskontinuitu osídlení tohoto údolí zapříčinily časté vulkanické erupce jedné z nejaktivnějších islandských sopek Hekly, četná zemětřesení a písečné bouře.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak se liší půdy a vegetace na zaniklých farmách na Islandu od okolních pozemků na základě nabožení prvků v těchto půdách a v rostlinné biomase rostoucí na těchto půdách, a prostřednictvím vegetačního snímání.

Dílčím cílem této práce bylo ukázat různé faktory, které ovlivňují archeologické Islandské půdy.

3 Literární rešerše

3.1 Signály archeologických půd

Z různých ekosystémů a z oblastí s odlišnými klimatickými podmínkami přicházejí důkazy o akumulaci antropogenních prvků (P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Sr a Rb) v místech destrukcí budov a jejich blízkosti (Šmejda et al., 2018). V Evropě jsou například záznamy o zřetelné variabilitě rostlin, co do druhů, tak do velikosti, a o zvýšených výnosech na orných půdách v intravilánu opuštěných pravěkých (Hejcman et al. 2013b) a středověkých osad (Hejcman et al., 2011) i přes pravidelnou orbu. V poslední době se v archeologii využívají letecké snímky, které díky vegetační variabilitě odhalily velice rychle mnoho archeologických lokalit po celém světě (Hejcman a Smrž, 2010). Tato variabilita ve velikosti vegetace a jejich nutričních hodnot ve spojení s lidskou aktivitou je následkem přechodí antropogenní přeměny půd a archeologové tyto signály patrné na rostlinách nazývají vegetačními či porostovými příznaky (anglicky cropmarks, Masini et al., 2018). Pozitivní vegetační příznaky jsou tvořeny vitálnějšími rostlinami kořenícími v půdě obohacené na živiny (místo, kam se dříve hromadil nějaký organický materiál, např. odpad ve formě zbytků jídla, kompost atd.). Tyto rostliny vytvářejí díky lepší výživě v porovnání s rostlinami v okolí vyšší a hustší porost a tato místa je pro to možné dobře identifikovat (Šmejda, 2009). Oproti tomu negativní vegetační příznaky jsou tvořeny rostlinami, které trpí nedostatkem živin či vody, a proto nedosahují takové výšky a vitálnosti, jako vegetace okolo (místo, kde se pod povrchem nachází např. kamenný základ nějaké zaniklé budovy) (Šmejda, 2009).

Stejně schéma můžeme dnes sledovat v lesním porostu, a to díky detekci změn ve výživě rostlin nebo druhové variabilitě rostlin v lesním podrostu v rozdílných částech římských venkovských sídel a jejich dřívějších polí (Dupouey et al., 2002) nebo v opuštěných středověkých osadách (Hejcman et al., 2013a). Další důkaz můžeme vidět v travních společenstvech. Na místech, která obsahují dávnou depozici popela z biomasy, můžeme pozorovat opět změnu druhové diverzity, variabilitu ve velikosti rostlin a jejich rozdílnou barvu oproti místům okolních porostů (Semelová et al. 2008). Výsledné koncentrace prvků se liší dokonce i v půdách a v druhové variabilitě rostlin v závislosti na jednotlivých částech středověkých osad (zda se jedná např. o náměstí, samotné stavení, příjezdovou cestu či zahradu), ale i na jednotlivých částech samotného obydlí

(zda se jedná např. o obytný či skladovací prostor nebo prostor pro ustájení zvířat), kde můžeme pozorovat přímý vliv a dopad lidské aktivity, a to nezřídka i 500 let po zániku osady (Hejcman et al., 2013a). Ze satelitních snímků pořízených nad Grónskem, lze identifikovat podle změněné druhové skladby vegetace a její barvy pravěké skládky kuchyňského odpadu, obsahující zvířecí kosti a další odpad. Na místě skládky vegetace vykazuje tmavě zelenou barvu, což je v porovnání s okolní méně úrodnou půdou jasný důkaz o různém prvkovém složení a dostupnějších živinách (Fenger-Nielsen et al., 2019).

3.2 Půdy na Islandu

Hlavní metodou pro splnění cílů této práce bylo odebrání vzorků z Islandských půd, proto je důležité si zde představit jejich základní zástupce a typy. Obecně můžeme Islandské půdy rozdělit do několika kategorií (Arnalds, 2004). Existují dvě hlavní skupiny, a sice pouštní půdy a půdy pod vegetací. Půdy pod vegetací se dále dělí na Andosoly, jemné propustné bazické půdy vulkanického původu, které jsou nejmladší a vzhledem k časté vulkanické aktivitě na Islandu dominují, a Histosoly, které jsou organického původu a hromadí se nad nepropustnou vrstvou, tudíž v oblasti mokřadů. V Andosolech se hromadí fosfor a tento typ půdy pokrývá 1 % povrchu země (Arnalds, 2015). Vitrisoly jsou pouštní půdy, charakteristické nízkým obsahem organického uhlíku (<1 %) a nejvíce podléhají erozi (Arnalds, 2008).

Vyskytují se zde i další typy půd, např. Kryosoly, jako permafrost ve vyšších nadmořských výškách, nebo v některých částech Islandu blízko pobřeží půdy s vysokým obsahem vápníku, ale v porovnání s Andosoly, Histosoly a Vitrisoly, je jejich podíl podstatně menší (Arnalds, 2008).

3.3 Eroze

Island je příklad velmi křehkého severského ekosystému, kde má pastva hospodářských zvířat v kombinaci s místním klimatem a vulkanickou půdou extrémně náchylnou k erozi (příloha 7) za následek degradaci půdy a vegetace (Arnalds, 1987).

Zřetelné stopy po větrné erozi můžeme na Islandu najít téměř všude. Drsné klima a nedostatek vegetačního pokryvu vede k odtržení půdy a jejího následného odnosu, hlavně převládajícími silnými východními větry (příloha 2). Důvodů, proč je zde eroze v tak hojné míře, existuje mnoho. Jedním z hlavních je obecně změna pokryvu a využití krajiny. Osídlení Islandu, které se datuje k roku 874, je spojeno s nástupem zemědělství a chovem hospodářských zvířat (Dugmore et al., 2005). Místní ekosystém se historicky vyvíjel bez přítomnosti větších herbivorů, což mělo u vegetace za následek absenci obraných mechanismů proti spásáčům (Bryant a Kuropat, 1980; Hejcman et al., 2016). To je zásadní rozdíl oproti evropské kontinentální vegetaci, která byla na pastvu savců adaptována vyvinutými obrannými mechanismy ve formě sekundárních metabolitů, např. taninů (Hejcman et al., 2016).

Eroze zde degradaci půd způsobuje velice rychle a je snaha ji co nejvíce omezit. Velký vliv má vypouštění obrovských počtů ovcí do volného prostoru ve vegetačním období, kvůli čemuž je trvale poškozována raná sukcese a šance na obnovu přirozených travních i lesních porostů se stává téměř nulová. Osvěta místních obyvatel (především starších) je v této oblasti složitá, jelikož vyhánění ovcí do hor během letních měsíců má dlouholetou tradici. Zmenšující se poptávka po ovčím masu má však ve výsledku pozitivní vliv. Napomáhá tomu i oplocování potenciálně atraktivních míst pro pastvu pro ovce, což často zachraňuje raná sukcesní stádia. Někdy je kontrast mezi spásanou, extrémně degradovanou krajinou a krajinou za plotem značný (příloha 9).

V následujících podkapitolách se rozebírají další vážné důvody, které vzniku eroze v tak výrazné míře napomáhají.

3.3.1 Vliv vegetace

V době osídlení Islandu bylo okolo 65 % povrchu pokryto vegetací (Thorsteinsson et al., 1971; Arnalds, 1987). Její kořenový systém výrazně snižuje odnos půdy větrem, zejména v lesních porostech (příloha 6). Přirozené březové lesy (*Betula pubescens*) na počátku osídlení pokrývaly v nižších nadmořských výškách mezi 18–35 % země, což se od té doby drasticky změnilo. Březové porosty pokrývaly ve 20. století jen 1 % země (Sigurdsson et al., 2014). Zavedení farmářských aktivit jako je zemědělství, pastva a kácení lesních porostů mělo za následek zničení téměř veškerých Islandských lesů a snížení regeneračních schopností rostlinných společenstev. To vyvolalo vážné environmentální změny jako je téměř absolutní absence lesů, což se projevilo značným rozšířením půdní eroze (Gísladóttir et al., 2011; Sigurdsson et al., 2014).

Dalšími významnými dřevinami jsou vrby (*Salix* spp.), které spolu s jinými trpasličími keři dominují a ovlivňují prostředí v nadmořských výškách nad 350 m nad mořem (Sigurdsson et al., 2014). Travní společenstva potom dominují ve vlhčích oblastech bez přítomnosti dřevin (Einarsson, 1961; Sigurdsson et al., 2014).

Početnost těchto dvou hlavních dřevin, ze kterých se převážně skládají přirozené Islandské lesy, poklesla po kolonizaci země Norskými osadníky v 9. století (McGovern et al., 2007; Hejzman et al., 2016). Tento pokles byl přisuzován změnám ve způsobu využívání krajiny: kácení porostů, pastva hospodářských zvířat, sběr dříví potřebné pro

domácí účely (vaření, topení) vč. výroby dřevěného uhlí (Church et al., 2007; Hejzman et al., 2016) a zesílil na konci 13. století díky zhoršení klimatu a intenzivnější vulkanické činnosti (Ogilvie and Jónsson, 2000; Sigurmundsson et al., 2014)

Island má ze všech Evropských zemí nejmenší pokryv vegetace a sice méně než 45 % z celkové rozlohy země (celková rozloha Islandu je 103 000 km²). Vřesoviště zde zabírají plochu o velikosti 25 000 km² a vegetaci se na tomto biotopu daří nejlépe, zároveň snášejí dlouhodobou pastvu. Mokřady pak zaujímají 8 000 km² a pouště více než 40 000 km² (Arnalds, 2015).

Významnou roli zde hraje také lupina nutkajská (*Lupinus nootkatensis*). Její silný kořenový systém (příloha 5 c) schopný fixovat dusík snižuje v kombinaci s extrémně invazivním chováním (Příloha 5 a + b) erozi půdy obecně a zároveň obohacuje degradovanou půdu o organickou hmotu. Tímto mechanismem umožňuje nástup dalších sukcesních stádií. V místních poměrech má lupina pozitivní i negativní vliv. Na Islandu kolonizovala neúrodné půdy v podobě lávových polí, polí se silnou vrstvou sedimentů vulkanického popela, sutě a erodované lokality. Zároveň však kolonizovala místa jako okolí řek a mokřady, kde utlačuje ostatní společenstva, např. trpasličí keře či druhy trav (Magnússon et al., 2018).

3.3.2 Vliv klimatu

Podnebí na Islandu je v nížinách (do 400 m n. m.) chladné a v horských oblastech (od 400 do 1000 m n. m.) arktické. Srážky se pohybují ve výšinách v průměru mezi 600 mm a 1500 mm (nad ledovci i více než 4000 mm), v nížinách potom do 600 mm za rok. Mnoho srážek padá ve formě sněhu, převážně na horách v severní části Islandu, naopak v jižní části země je zimní tání sněhu běžné. Oceánské klima přítomné hlavně v severních částech ostrova se značí častým střídáním zamrzním a táním ledu, což ovlivňuje vlastnosti povrchu a půdy (Arnalds, 2008).

Je zřejmé, že má Island rozsáhlé neúrodné plochy ve formě pouští. Prachové bouře jsou dalším ovlivňujícím faktorem a jsou velmi časté (příloha 8). Dlouhodobý monitoring prachových bouří na různých Islandských pouštích v letech 1949–2011 ukázal, že prachových dní v tomto časovém horizontu bylo 1033, což činí 16.4 prachových dní každý rok, s nejčastějším výskytem v letních měsících (Waldhauserová

et al. 2013). Ukázalo se, že početnost a vážnost místních prachových bouří je srovnatelná s největšími pouštními oblastmi na světě (Waldhauserová et al. 2013). Můžeme tedy konstatovat, že v kombinaci s vlhkým a studeným klimatem jsou Islandské pouště nejrozsáhlejšími vulkanoklastickými (různě veliké úlomkové sedimenty ve formě vulkanického skla vyvržené při sopečné erupci) pouštěmi na světě (Arnalds, 2008). Ačkoli srážky tu jsou hojné, na mnoha místech pouštní půdy i přesto snadno vysychají (Arnalds, 2015).

Po staletí se Islandané větrné erozi bránili stavěním tzv. větrolamů (příloha 3), které měly mít stejný efekt v zabraňování odnosu půdy jako vegetace. Kamenná zeď vysoká 40 cm a více se stavěla kolmo k návětrné straně v délce 100–200 m. Účinnost těchto větrolamů však byla mnohdy mizivá (převzato z Islandského muzea Visitor centre Sagnagardur dne 23. 6. 2017)

3.3.3 Vliv vulkanické činnosti

Islandské vulkány se většinou nacházejí v oblastech pohoří. Oproti místům s relativně rovným povrchem se zde častěji vyskytuje prudký vítr s vyšší rychlostí, proto se pravděpodobnost výskytu větrné eroze v blízkém okolí vulkánů zvyšuje (Arnalds et al., 2013). Vulkanická erupce může svým nánosem tefry pohřbit rozsáhlá území a vytvořit tak široké areály s nestabilním povrchem, čímž zásadně narušuje místní ekosystémy (del Moral a Grishin, 1999; Arnalds et al., 2013). Zároveň vzhledem k nízké hustotě tefry se zvyšuje možnost jejího odnosu, následného transportu a sedimentace (Wilson et al., 2011). Obzvláště po nedávné erupci sopky Eyjafjallajökull (2010) se těmto prachovým částicím vulkanického původu začala na Islandu věnovat pozornost (Arnalds, 2010; Thorsteinsson, 2012). Tato erupce probíhající od března do května 2010 vyprodukovala 0.27 km³ tefry s tím, že polovina tohoto materiálu se uložila ve formě sedimentů přímo na Islandu (Guðmundsson et al., 2012). Zatímco odolnější ekosystémy, jako jsou lesy, se stabilizovaly bez vážnějších následků, v areálech s rozptýlenou vegetací způsobil vulkanický popel vážné škody, (Arnalds et al., 2013).

Vulkanické erupce pod ledovci způsobují velmi rozsáhlé povodně, díky kterým se následně vulkanický materiál dostává do krajiny. Tato depozice patří k hlavním zdrojům distribuce prachového materiálu po Islandu (Arnalds, 2010; Arnalds et al., 2013).

Sigurmundsson a další (2014) tvrdí (dle Magnússon and Vídalín, 1918-1921), že výbuch Hekly v roce 1693 způsobil jedno z nejvážnějších poškození lesů v údolí pod vulkánem a zapříčinil masové opouštění farem. Většina lesů byla zničena, což přispělo k rychlejšímu vymýcení zbylých stromů. Další erupce s menším rozsahem byla zaznamenána v roce 1766, načež údolí bylo znovu postihnuto výbuchem sopky Laki v roce 1783 a došlo zde k defoliaci stromů a keřů (Thoroddsen 1916-1917; Sigurmundsson et al., 2014).

Znalosti o vlivech „vulkanických“ faktorů a jejich interakcí na kondici krajiny (jako jsou větrná eroze, čerstvá depozice vulkanického materiálu, jeho transport a obecné větrné podmínky) jsou omezené (Arnalds et al., 2013). Nicméně je patrné, že větrná eroze v kombinaci s unášenými prachovými částicemi způsobila na Islandu v historii rychlé a rozsáhlé škody místních ekosystémů. To bylo zapříčiněno sedimentací vulkanických písčitých materiálů z okolních pouští na zemědělské plochy, původně plně pokryté vegetací (Arnalds a Sigurjonsson, 2001).

4 Metodika

4.1 Studovaná lokalita

V červnu roku 2017 bylo podle různé doby vzniku a zániku (od času kolonizace 874 až po 20. století) vybráno 7 zaniklých farem v okolí vulkánu Hekla v údolí Pjorsaldallur v jihovýchodní části Islandu (cca 60 km od moře a 30 km od nejbližšího města Hella) kolem pozemní místní komunikace (obr. 8). Veškerá data se sbírala přímo na zaniklých farmách a pro kontrolu v jejich nejbližším okolí. Výška studované lokality byla kolem 100 m n. m. Co se místní vegetace týče, největší zastoupení mají travní společenstva, o trochu méně pak mechorosty a přesličky, nejméně byliny. Detailnější informace o druhovém složení a pokryvu místní flóry jsou na základně vegetačních snímků uvedeny v tabulce 7, případně ještě detailněji v příloze 1. Na základě výpisů daňových přiznání jsme byli schopni zjistit alespoň základní informace o farmách, které jsou uvedeny v tabulkách 1, 2 a 3, a které pro tento výzkum stačily.

4.1.1 Brekkur

Nejstarší záznam o farmě Brekkur (lokalizace viz obr. 1 a obr. 8) je dochován z konce 14. století a dle záznamů existovala tato farma 526 let (tabulka 1). Počet obyvatel se v letech 1840-1870 pohyboval od 7 do 11 lidí. Ačkoli byla farma aktivní od roku 1350 do roku 1876, informace o počtu obyvatel byly k dispozici pouze ve výše uvedeném časovém období (tabulka 2). Podobně je to s informacemi o počtu hospodářských zvířat. Počet krav a koní bylo v letech 1841-1870 mezi 2-5 kusy s výjimkou ovcí, jejichž početnost měla v průběhu let rostoucí tendenci (v roce 1841 130 kusů, v roce 1870 310 kusů) (tabulka 3).



Obr. 1. Farma Brekkur vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.2 *Dagverðarnes*

Farma Dagverðarnes (lokality viz obr. 2 a obr. 8) byla osídlena 412 let (od roku 1500 do 1912). V letech 1703-1910 zde žilo v průměru 7 obyvatel, s nejvyšším počtem 15 obyvatel v roce 1870. Tato farma měla ze všech studovaných farem nejpočetnější stádo koní (12 kusů v roce 1880) a nejpočetnější stádo ovcí (750 kusů, též v roce 1880). Počet krav se pohyboval stabilně okolo 4 kusů.



Obr. 2. Farma Dagverðarnes vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.3 *Kastalabrekka*

Farma Kastalabrekka (lokality viz obr. 3 a obr. 8) je ze studovaných farem nejstarší (vznik 900 n. l. – cca 30 let po osídlení Islandu) a zároveň byla nejdéle aktivní (750 let). Nejstarší oficiální záznam (dokument) je však až z roku 1711, což bylo již po jejím opuštění (rok 1650). Proto nejsou žádné záznamy o počtu obyvatel žijících na této farmě a ani jejich hospodářských zvířat.



Obr. 3. Farma Kastalabrekka vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.4 Kot

Farma Kot (lokalizace viz obr. 4 a obr. 8), s nejstarším záznamem z roku 1687, byla aktivní skoro 300 let. Díky tomu, že byla opuštěná až v roce 1981, je ze studovaných farem nejmladší (později vznikla akorát farma Steinkross (new), která je aktivní až od r. 1849, ale zanikla dříve než Kot), a proto jsou na ní naměřené (i viditelné) největší kontrasty mezi ruinami farmy a jejího okolí (viz tabulka 4, 5 a 6). Nejvíce obyvatel farmu obývalo v roce 1835 (12 lidí) a do roku 1910 jejich počet mírně klesal. Pouze na této farmě byl počet krav, ovcí a koní víceméně shodný (od 2 do 7 kusů).



Obr. 4. Farma Kot vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.5 Steinkross (new)

Tato farma byla aktivní pouze 33 let (od roku 1849 do roku 1882). Počet obyvatel byl v těchto letech téměř konstantní – 5 až 7 obyvatel. Počet ovcí se však během těchto pár let stihlo zvýšit z 236 kusů na 600 kusů. Na obr. 5 jsou proto kromě samotné farmy vidět i rozsáhlé oplocené pastviny.



Obr. 5. Farma Steinkross (new) vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.6 *Steinkross (old)*

Z farmy Steinkross (old), resp. farmy Gamli-Steinkross (lokalizace viz obr. 6 a obr. 8), jsou v porovnání s ostatními studovanými farmami dochovány nejstarší záznamy, a sice z roku 1270. Farma byla také dlouho aktivní – 649 let. O počtu obyvatel (od r. 1703 do r. 1845 8, resp. 5 obyvatel) a hospodářských zvířat (v těch samých letech 8, resp. 5 krav a koní, a okolo 225 kusů ovcí) však mnoho záznamů není.



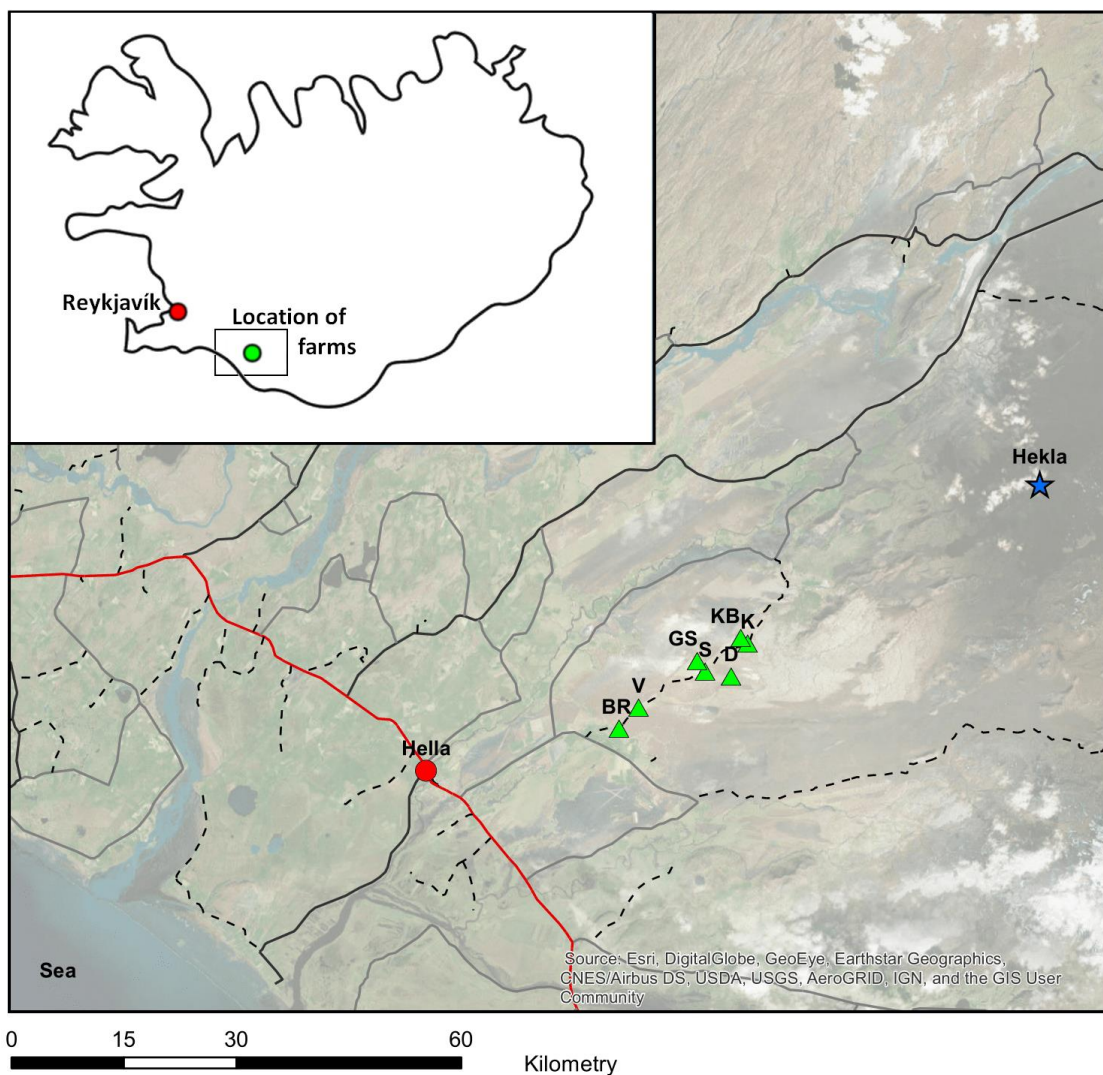
Ob. 6. Farma Steinkross (old) vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)

4.1.7 *Valshóll*

Tato farma (spíše stavba, lokalizace viz obr. 7 a obr. 8) sloužila jako přístřešek pro ovce farmy Gunnarsholt (nelokalizována) v letech 1350-1926 (576 let). Proto v tabulce 2 a 3 chybí hodnoty o počtu obyvatel a počtu a druhu hospodářských zvířat. Nejstarší dochovaný záznam je z roku 1849.



Obr. 7. Farma Valshóll vyobrazená na satelitním snímku. Zdroj: www.map.is, upraveno v programu Malování (Microsoft)



Legenda

Farmy

D - Dagverðarnes
 BR - Brekkur
 GS - Steinkross (old site)
 K - Kot
 KB - Kastalabrekka
 V - Valshóll
 S - Steinkross (new site)

Silnice

— 1. třída
 — 2. třída
 - - - místní
 — hlavní

▲ Farma
 ● Město - Hella
 ★ Sopka - Hekla

Obr. 8. Studovaná lokalita, údolí Pjorsaldalur (Jiří Vašák, CZU (FŽP) 2018/19, Software: Arcgis 10.6, Souřadnicový systém: WGS 1984 Web Mercator, Zdroj dat: Esri imagery, Icelandic roads)

Tabulka 1. Přehled studovaných farem společně s jejich nejstarším psaným záznamem a časem jejich existence. * = přístřešek pro ovce farmy Gunnarsholt.

Název farmy	Zkratka	Nejstarší záznam	Existence
Brekkur	BR	1398	1350-1876
Dagverðarnes	D	Od 16. století	1500-1912
Kastalabrekka	KB	1711	900-1650
Kot	K	1687	1687-1981
Steinkross (new)	S	Od 1849	1849-1882
Steinkross (old)	GS	Od 1270	1200-1849
Valshóll (*)	V	1849	(aktivní) 1350-1926

Tabulka 2. Záznam počtu obyvatel studovaných farem v letech 1703-1910. U prázdných hodnot chybí data.

Název farmy	1703	1816	1835	1840	1845	1850	1855	1860	1870	1880	1890	1901	1910
Brekkur	-	-	-	7	9	8	10	11	9	-	-	-	-
Dagverðarnes	0	0	8	7	8	4	7	8	15	13	12	4	6
Kastalabrekka	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kot	0	5	12	10	11	11	8	8	8	8	6	5	5
Steinkross (new)	0	-	-	-	-	5	7	6	6	7	-	-	-
Steinkross (old)	8	4	7	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-
Valshóll	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 3. Záznam počtu krav, ovcí a koní na studovaných farmách v letech 1711-1910. U prázdných hodnot chybí data.

Název farmy	1711	1841	1850	1860	1870	1880	1890	1901	1910
Brekkur	-	4/130/3	5/211/5	3/265/3	2/310/2	-	-	-	-
Dagverðarnes	0/0/0	4/191/6	3/279/8	2/350/8	5/420/9	2/750/ 12	4/400/8	3/387/7	4/450/6
Kastalabrekka	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kot	0/0/0	4/4/5	5/5/5	4/4/6	3/3/7	3/3/7	5/5/5	2/2/5	4/4/4
Steinkross (new)	0/0/0	-	5/236/7	4/327/7	5/421/8	3/600/5	-	-	-
Steinkross (old)	8/221/8	5/231/5	-	-	-	-	-	-	-
Valshóll	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.2 Sběr a zpracování dat

4.2.1 Sběr dat

Pro studium vlivu zaniklých farem na chemické složení půd a na vegetaci byla na Islandu v červnu roku 2017 sesbírána data archeologických půd a jejich okolí. Vždy se stanovilo jedno či několik ideálních míst pro odběr vzorků přímo v oblasti zaniklé farmy (v tabulkách 4, 5 a 6 uvedeno jako Farm) a v její bezprostřední blízkosti – mimo plochu hnojenou v blízkosti farmy (v tabulkách 4, 5 a 6 uvedeno jako Control).

Vzorek z archeologických půd byl vytvořen na základě odběru dat půdní sondou o průměru 5 cm. Po aplikaci sondy se odebralo 10 cm svrchní vrstvy půdy. Celá tato část je pomocí fotodokumentace zaznamenána v příloze 4. Ve vzorcích byl dále stanoven celkový obsah prvků prostřednictvím přenosného rentgenového spektrometru (energy dispersed X-ray fluorescence (ED-XRF) Delta Professional od značky Olympus InnovX s měřícím módem „Soil Geochem“ - zkráceně jako pXRF). Touto metodou se dá zjistit celkový obsah prvků, nebo jejich přibližný obsah, což se v archeologii běžně využívá. Přístroj je schopný zaznamenat jednotlivé koncentrace prvků z periodické tabulky (Mg-U). Každé měření probíhalo 1 minutu, kdy se prvních 30 s generovaly paprsky o síle 10 kV a zbývajících 30 s paprsky o síle 40 kV (tj. paprsky byly vytvářeny tímto napětím). Výsledná data jsou zapsaná v procentech nebo v ppm (1 % = 10 000 ppm). Kvalita měření byla úspěšně testována společností BAS Rudice s.r.o. (www.bas.cz) na 55 referenčních materiálech (Šmejda et al., 2017). Dále byl ve vzorcích stanoven obsah rostlinám dostupných prvků za použití extrakčního činidla Mehlich III (M3, složení: 0.2M CH₃COOH + 0.25M NH₄NO₃ + 0.013M HNO₃ + 0.015M NH₄F + 0.001M EDTA; použití: 25 cm³ činidla na 2.5 cm³ půdy, Mehlich, 1984). M3 je univerzální postup, který se používá při analýzách obsahu rostlinám dostupných prvků z lesních a zemědělských půd, ale dá se použít i na archeologických půdách (Hejcman et al., 2013c).

Paralelně se sběrem vzorků půdy se odebíralo na stejném místě vždy několik gramů biomasy. Byl kladen důraz na rozmanitost druhů, ze které byl následně vytvořen finální vzorek tak, aby odpovídal druhovým složením snímkané vegetace. Koncentrace prvků v biomase byla určena pomocí mokrého rozkladu (ošetření vzorku před zpopelněním malým množstvím kyseliny) za zvýšeného tlaku. Prášek biomasy (1 gram) byl smíchán se směsí HNO₃ a H₂O₂. Vzniklý popel byl dále rozložen pomocí

„microwave ashing“ (metoda k odstranění těžkých kovů z organického materiálu) device CEM 2000 (CEM, Matthews, NC) a zředěn Lučavkou královskou (směs koncentrované kyseliny dusičné a kyseliny chlorovodíkové používané pro rozpouštění obtížně rozpustných prvků, vzácných kovů). Koncentrace Ca, K, Mg, P, Cu, Fe a Zn byla změřena pomocí ICP-OES (Thermo Jarrell Ash, Trace Scan, Franklin, NJ). Ke zjištění koncentrace N byla biomasa mineralizována v koncentrované (98 %) H₂SO₄. Obsah dusíku byl změřen kalorimetrickou analýzou (metoda k určení obsahu prvků pomocí barevného činidla; SAN plus SYSTEM, Skalar, Breda, The Netherlands; Hejcman et al., 2013b).

4.2.2 Vegetační snímkování

Jednotlivé snímky byly tvořeny systematickým měřením a určováním Islandské vegetace, měly tvar čtverce o velikosti 4 x 4 m a byly vedeny též v místech zaniklých farem a v jejich nejbližším okolí za účelem porovnání. Pro každý snímek byla zaznamenána poloha pomocí GPS přijímače Trimble Nomad z důvodu možného opakování studie.

Při snímkování se odhadovala nejprve pokryvnost a stařina vegetace, poté pokryvnost mechorostů. Následně byl zapsán soupis všech rostlinných druhů a odhad jejich pokryvností (pozn. všechny snímky byly dělány na farmách a kontrolách). Pakliže bylo více odběrů z oblasti jedné zaniklé farmy (farma či kontrola), byl spočítán průměr. Rostlinné druhy byly rozděleny do 3 skupin: trávy, byliny a přesličky, a byly určeny dle Islandské knihy A Guide to the Flowering Plants and Ferns of Iceland (Hördur, 2010).

4.2.3 Zpracování dat

Finální vzorky (z půd a biomasy) byly v místní Islandské instituci (www.land.is) sušičkou vysušeny (příloha 10) na minimum obsahu vody a následně převezeny ke zpracování do české národní akreditované laboratoře, Ekolab Žamberk (www.ekolab.cz). Výsledkem byl soubor dat s obsahem makroprvků (N, P, K, Ca, Mg), mikroprvků (Zn, Cu, Mn) a stopových prvků (Cd, Pb) pro každé měření z terénu. Dále se data lišila dle vzorků z půdy a z biomasy. Data z půdy obsahovala navíc pH vody a mikroprvek Fe, oproti tomu z biomasy obsahovala navíc makroprvek F, N:P poměr, kyselé (ADF) a bazické (NDF) vlákninové frakce.

4.3 Statistická analýza

Data ze vzorků půd, biomasy i vegetačního snímkování byla zapsána a zpracována v programu Excel (Microsoft 2017) a následně upravena tak, že byly spočítány průměry jednotlivých hodnot měření na farmách a kontrolách, načež se dopočítal průměr všech farem a kontrol. Ke všem hodnotám se doplnila a směrodatná odchylka. Dále byla veškerá data podrobena statistické analýze v programu RStudio (RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>). Byly vytvořeny lineární modely, které testovaly vliv lidské činnosti na změnu chemických signálů v půdě, následně projevené vegetačními příznaky na vegetaci. Vzhledem k velkému rozptylu dat a absenci jejich normálního rozdělení u vzorků z půdy a vegetačního snímkování byl použit neparametrický Kruskal-Wallis test. Pro data z biomasy byla provedena ANOVA. Výsledné p-hodnoty se zapsaly a signifikantní hodnoty ($P < 0.05$ u biomasy a vegetačního snímkování, $P < 0.1$ u půdy) byly zvýrazněny tučně. Z výsledného souboru dat ve formátu .xlr byly vytvořeny tabulky a grafy obsažené v této práci.

5 Výsledky

5.1 Celková koncentrace prvků v horní vrstvě půdy

Z celkového počtu detekovaných prvků (24) jsme jich vybrali 14, které byly pro naši studii stěžejní a důležité (tabulka 4). Tyto prvky jsme měřili ve všech vzorcích. V porovnání s kontrolou byl na farmách zaznamenán signifikantně vyšší obsah prvků P, S, K a Zn. Naopak významně vyšší koncentrace prvků Ca, Ti, Ni a Zr v porovnání s farmami byla změřena v kontrolních vzorcích. Obsah Fe a Sr byl s lehce vyšší koncentrací naměřen na kontrolách a rozdílnost se potvrdila až na hladině významnosti ($p < 0.08$). Vliv typu lokality na koncentraci prvků Mn, Cu, As a Rb v půdě prokázán nebyl, stejně tak pH půdy a celkový obsah N (tabulka 5).

Největší rozdíly v obsahu prvků P, S, K a Zn mezi farmami a jejich kontrolami byl zjištěn na farmě Kot, opuštěné v roce 1982.

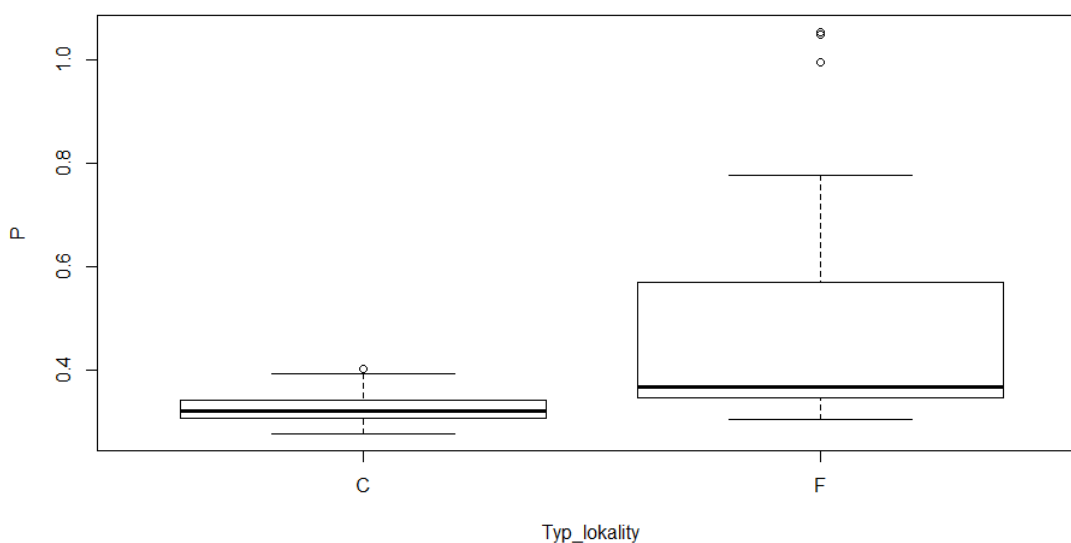
U těchto odebíraných vzorků byl počet měření v terénu stejný (tabulka 5), jako u vzorků rostlinám dostupných prvků (tabulka 6), avšak pro lepší přesnost se pro celkový obsah prvků v půdách měřil každý vzorek 3x (tj. počet měření nám 3x vzrostl).

Tabulka 4. Průměrný obsah (\pm směrodatná odchylka) prvků (měřeno pXRF) P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe (v%) a Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr a Zr (v mg kg⁻¹) v horních 10 cm půdy. Zkratky názvů farem (lokality) jsou v souladu s Tabulkou 1. **Po** – typ vzorkovaného místa přímo na farmách (**F**) anebo mimo farmy, označené jako kontroly (**C**). Horní index udává počet odbíraných vzorků. **Farm** a **Control** – střední hodnota všech farem (**F**) a jejich kontrol (**C**) dohromady. **P-value** (p-hodnota) byla získaná pomocí testu Kruskal-Wallis a signifikantní ($P < 0.05$) a marginálně signifikantní ($P < 0.10$) výsledky jsou zvýrazněny tučně.

Farm	Po	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Zr
BR	F12	0.34±0.017	0.08±0.015	0.39±0.014	4.01±0.16	1.91±0.03	0.18±0.008	9.90±0.11	41.1±5.60	95.1±7.39	171±7.1	9.0±1.95	23.3±2.59	286±9.5	326±7.5
BR	C3	0.40±0.005	0.11±0.006	0.38±0.002	3.67±0.01	1.71±0.01	0.17±0.004	9.33±0.01	42.7±2.87	90.0±4.08	160±2.6	8.7±1.25	23.3±0.47	250±1.4	319±0.8
D	F6	0.36±0.012	0.10±0.009	0.40±0.002	4.28±0.04	1.79±0.03	0.18±0.007	9.65±0.09	37.2±4.74	91.2±5.64	165±4.6	5.5±2.69	22.0±1.29	276±2.8	311±5.1
D	C9	0.34±0.014	0.10±0.007	0.37±0.008	3.93±0.23	1.74±0.02	0.19±0.023	9.44±0.13	35.4±10.01	89.1±6.56	165±8.3	7.6±2.87	23.6±1.64	251±11.8	313±4.5
KB	F3	0.38±0.013	0.14±0.004	0.41±0.003	3.53±0.04	1.49±0.02	0.15±0.005	8.62±0.05	17.0±7.07	82.7±12.47	163±4.9	10.0±0.82	23.3±1.25	233±0.5	312±2.2
KB	C3	0.34±0.002	0.12±0.003	0.37±0.012	4.33±0.03	1.77±0.03	0.17±0.003	9.55±0.05	36.0±2.16	92.0±5.10	161±6.3	7.3±1.24	21.7±0.94	267±2.6	324±5.4
K	F12	0.75±0.176	0.17±0.030	0.44±0.047	3.86±0.36	1.43±0.12	0.17±0.031	8.09±0.58	17.5±8.24	88.7±4.82	256±7.0	20.6±14.15	23.1±1.98	242±6.8	270±26.5
K	C6	0.33±0.011	0.10±0.013	0.38±0.013	4.35±0.20	1.87±0.09	0.17±0.008	9.30±0.19	30.0±9.22	81.7±9.16	163±11	7.8±2.67	24.3±0.94	290±3.5	349±5.2
S	F6	0.40±0.023	0.14±0.015	0.33±0.029	3.94±0.25	1.72±0.03	0.17±0.007	9.11±0.09	23.3±8.52	88.7±7.50	173±11	7.0±2.08	21.0±0.58	243±3.1	286±9.6
S	C6	0.29±0.010	0.11±0.019	0.33±0.015	4.08±0.20	1.85±0.05	0.16±0.008	9.68±0.09	37.8±12.40	101.7±6.99	162±5.4	7.3±2.13	21.3±1.37	252±5.9	294±5.4
GS	F3	0.35±0.013	0.13±0.003	0.38±0.007	3.65±0.05	1.71±0.03	0.17±0.001	9.20±0.05	31.3±15.92	87.0±7.26	158±5.7	5.3±1.70	24.0±0.82	244±1.4	307±3.3
GS	C3	0.31±0.005	0.08±0.006	0.42±0.005	4.18±0.03	1.81±0.01	0.18±0.002	9.61±0.07	45.3±7.41	81.7±3.68	162±2.4	10.0±1.63	22.3±0.94	296±0.8	337±0.5
V	F3	0.34±0.014	0.11±0.009	0.46±0.004	3.67±0.02	1.54±0.02	0.16±0.005	8.67±0.04	33.7±4.64	81.3±7.54	173±7.3	8.3±1.70	23.0±1.41	244±2.6	324±4.1
V	C3	0.29±0.007	0.08±0.003	0.43±0.003	3.85±0.04	1.72±0.02	0.18±0.003	9.43±0.04	39.0±4.55	93.3±9.53	168±4.5	9.0±1.63	23.3±0.94	265±2.4	340±3.3
Farm	F45	0.46±0.195	0.13±0.040	0.40±0.047	3.91±0.30	1.67±0.20	0.17±0.020	9.06±0.78	29.0±12.53	89.7±8.18	192±5.3	11.1±9.54	22.8±2.03	258±21.2	302±27.2
Control	C33	0.33±0.031	0.10±0.017	0.38±0.031	4.06±0.28	1.79±0.08	0.18±0.018	9.47±0.18	36.8±9.91	90.1±9.72	163±7.6	8.0±2.41	23.0±1.62	265±18.7	322±19.2
P-value		<0.001	0.003	0.010	0.050	0.016	0.393	0.077	0.005	0.828	<0.001	0.219	0.414	0.059	<0.001

5.1.1 Fosfor

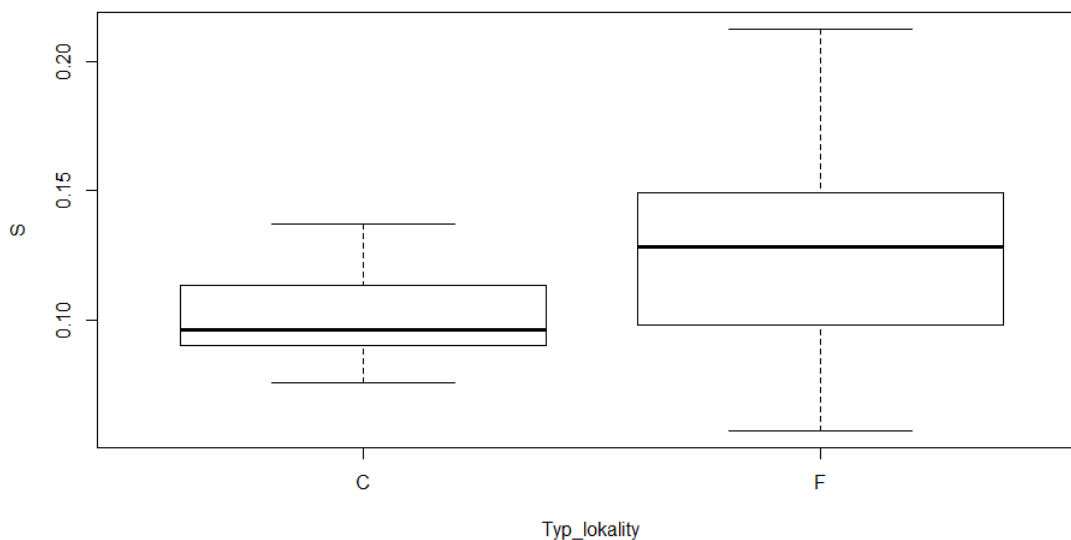
Fosfor je považován jako jeden z hlavních antropogenních prvků. Z tohoto důvodu se jeho výsledkům věnujeme ve větších detailech. S výjimkou farmy Brekkur byl jeho celkový obsah vyšší na opuštěných farmách, v porovnání s okolní krajinou. Jeho průměrná akumulace na farmách byla 0.46, respektive 0.33 % na přiléhajících kontrolách (obr. 9, tabulka 4). Průměrný rozsah obsahu fosforu byla od 0.29 do 0.75 %.



Obr. 9. Znárodněná závislost obsahu fosforu (P v %) v půdě na typu lokality (C – kontrola, F – farma). Zároveň je zde zobrazen rozptyl dat na jednotlivých typech lokality.

5.1.2 Síra

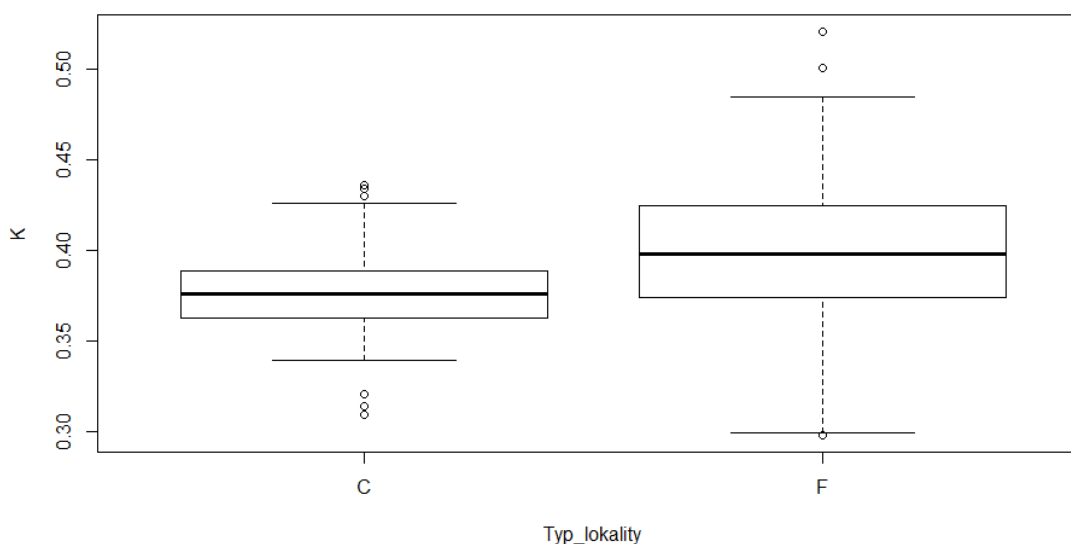
S výjimkou farmy Brekkur, kde byl celkový obsah síry vyšší na kontrolách, byla oproti kontrolám její koncentrace vyšší na farmách. Na základě naměřených hodnot na farmě Dagverðarnes, nebyl prokázán rozdíl v obsahu S mezi farmou a kontrolou (obr. 10, tabulka 4). Průměrná akumulace rozsahu S byla od 0.13 do 0.10 %.



Obr. 10. Znázorněná závislost obsahu síry (S v %) v půdě na typu lokality (C – kontrola, F – farma). Zároveň je zde zobrazen rozptyl dat na jednotlivých typech lokality.

5.1.3 Draslík

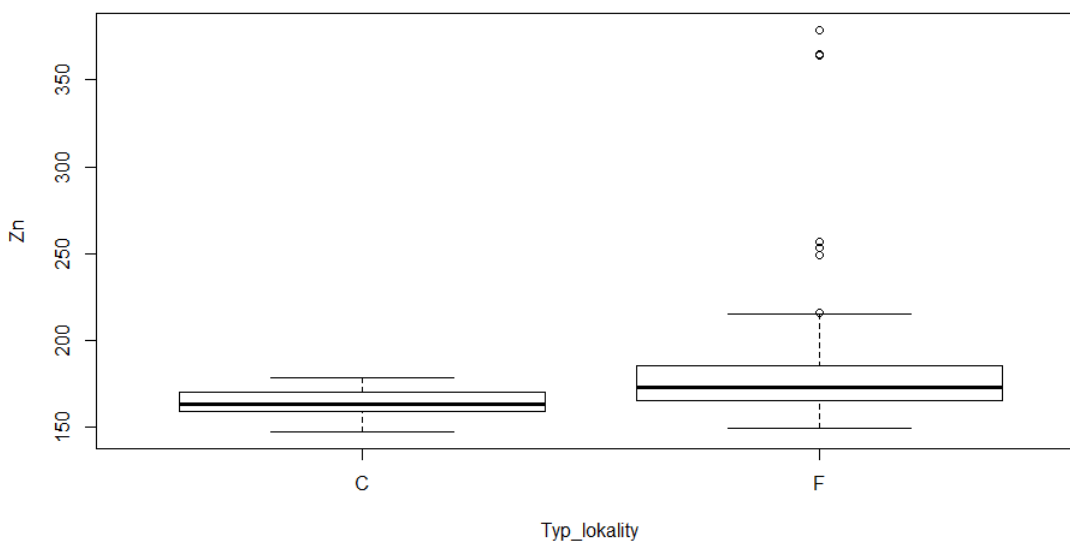
S výjimkou farem New a Old Steinkross byl obsah K vyšší na farmách než na kontrolách. Průměrná hodnota nakumulovaného draslíku byla na farmách 0.40 % a na kontrolách 0.38 % (obr. 11, tabulka 4).



Obr. 11. Znázorněná závislost obsahu draslíku (K v %) v půdě na typu lokality (C – kontrola, F – farma). Zároveň je zde zobrazen rozptyl dat na jednotlivých typech lokality.

5.1.4 Zinek

Podobné schéma, jako rozložení obsahu P, S a K můžeme pozorovat i u zinku. S výjimkou farmy Dagverðarnes, kde rozdíly zjištěny nebyly, a farmy Old Steinkross, kde obsah Zn byl vyšší na kontrolách, byl jeho celkový obsah signifikantně vyšší na opuštěných farmách než na kontrolách. Průměrný obsah Z byl na farmách 192 mg kg⁻¹, respektive 163 mg kg⁻¹ na kontrolách (obr. 12, tabulka 4).



Obr. 12. Znázorněná závislost obsahu zinku (Zn v mg kg⁻¹) v půdě na typu lokality (C – kontrola, F – farma). Zároveň je zde zobrazen rozptyl dat na jednotlivých typech lokality.

5.2 Rostlinám dostupný obsah prvků v horních 10 cm vrstvách půdy

V porovnání s kontrolami byl obsah rostlinám dostupného K vyšší na farmách (tabulka 5.). Přijatelně prokazatelné rozdíly byly v obsahu P, Fe, Zn a Pb na opuštěných farmách oproti kontrolám a naopak, na kontrolách byl vyšší obsah Cd. Největší rozdíly mezi farmami a kontrolami byly naměřeny na farmě Kot.

Vyšší obsah byl také naměřen u rostlinám dostupných prvků Ca, Mg, Cu a Mn na farmách, ačkoliv u těchto prvků signifikantní vliv prokázán nebyl.

Celkový počet měřených míst na farmách bylo 12 a kontrol 8, pH půdy se pohybovalo v průměrném rozmezí 5.65 – 6.24.

Tabulka 5. Průměrný obsah (\pm směrodatná odchylka) prvků N (v g kg⁻¹) a rostlinám dostupných prvků (Mehlich 3) Ca, K, Fe, Mg, P, Cu, Mn, Zn, Cd a Pb (v mg kg⁻¹) a pH v 10 cm horní vrstvy půdy. Zkratky názvů farem (lokality) jsou v souladu s Tabulkou 1. **Po** – typ vzorkovaného místa přímo na farmách (**F**) anebo mimo farmy, označené jako kontroly (**C**). Horní index udává počet odbíraných vzorků. **Farm a Control** – střední hodnota všech farem (F) a jejich kontrol (C) dohromady. **P-value** (p-hodnota) byla získaná pomocí testu Kruskal-Wallis a signifikantní (P < 0.05) a marginálně signifikantní (P < 0.10) výsledky jsou zvýrazněny tučně.

Farm	Po	pH/H2O	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Cd	Pb
BR	F4	6.12±0.07	2.30±0.36	1.49±0.19	245.0±35.5	1120.3±127.7	273.8±34.1	467.3±5.8	5.89±0.94	1.80±0.21	15.18±2.66	0.20±0.05	0.79±0.12
	C1	6.06	3.38	1.12	154.0	1384.0	358.0	418.0	5.31	2.17	19.10	0.21	0.70
D	F2	6.13±0.01	2.72±0.12	2.07±0.57	217.5±21.5	1070.0±80.0	294.5±42.5	435.5±3.5	7.91±1.50	1.73±0.06	28.65±2.05	0.13±0.04	0.70±0.13
	C3	6.24±0.11	3.09±0.58	1.78±0.16	151.3±13.2	1204.0±122.18	372.0±59.4	420.7±14.1	7.19±0.50	1.98±0.26	36.37±5.15	0.23±0.02	0.63±0.11
KB	F1	5.89	5.87	2.53	286.0	1754.0	518.0	363.0	10.10	1.84	26.10	0.18	0.83
	C1	6.10	3.65	1.20	174.0	1500.0	410.0	363.0	7.80	1.93	20.40	0.22	0.74
K	F4	5.65±0.2	6.38±1.22	39.23±23.18	395.0±174.2	1579.3±439.3	481.0±111.8	441.8±48.6	50.60±20.25	2.03±0.22	48.65±6.90	0.19±0.02	1.02±0.13
	C2	5.82±0.08	2.88±0.65	2.40±0.75	130.5±30.5	923.0±138.0	276.5±41.5	416.5±35.5	6.13±2.00	1.70±0.04	39.70±10.30	0.24±0.05	0.81±0.06
GS	F1	5.94	3.72	2.52	238.0	1551.0	447.0	401.0	8.46	1.71	32.00	0.22	0.66
	C1	6.11	2.24	1.14	149.0	1082.0	321.0	436.0	4.43	1.31	21.60	0.15	0.73
Farm	F12	5.93±0.25	4.14±1.98	14.34±22.11	293.3±126.9	1353.6±368.8	381.1±123.3	439.3±40.9	21.69±23.59	1.86±0.22	30.89±14.46	0.18±0.04	0.84±0.17
	C8	6.08±0.18	3.04±0.61	1.70±0.65	149.0±21.6	1178.0±215.1	344.8±61.8	414.0±28.2	6.42±1.49	1.84±0.30	31.20±10.44	0.22±0.04	0.71±0.10
P-value		0.375	0.396	0.089	0.001	0.537	0.787	0.089	0.076	1	0.877	0.096	0.077

5.3 Prvkové složení rostlinné biomasy

Obsah N, P, K, Cd, ADF a NDF byl signifikantně vyšší na farmách v porovnání s kontrolami, a naopak obsah prvků Ca, Fe, Zn a Mn byl signifikantně vyšší v kontrolách (tabulka 6). Poměr N:P byl v biomase významně nižší na farmách, stejně tak byl na hranici významnosti ($p = 0.05$) změřen na farmách nižší obsah Mg.

Zde byl celkový počet měřených míst na farmách 13 a na kontrolách 11. Rozdílnosti mezi farmami a kontrolami zde vycházely signifikantněji než u předchozích měření, jelikož jsme do této analýzy zahrnuly navíc farmu Steinkross (old) a Valshóll. Proto byl rozptyl menší, tudíž se data přiblížila k normálnímu rozdělení a síla testu vzrostla.

Tabulka 6. Průměrný obsah (\pm směrodatná odchylka) analyzovaných prvků, kyselých (ADF) a bazických (NDF) frakcí vláknin v biomase. Zkratky názvů farem (lokality) jsou v souladu s Tabulkou 1. **Po** – typ vzorkovaného místa přímo na farmách (**F**) anebo mimo farmy, označené jako kontroly (**C**). Horní index udává počet odebíraných vzorků. **Farm a Control** – střední hodnota všech farem (**F**) a jejich kontrol (**C**) dohromady. **P-value** (p-hodnota) byla získaná pomocí jednostranné ANOVY a signifikantní ($P < 0.05$) výsledky jsou zvýrazněny tučně. N, P, K, Ca a Mg jsou uvedeny v g kg⁻¹, Fe, Zn, Cu, Mn, Cd a Pb jsou uvedeny v mg kg⁻¹, ADF a NDF v %.

Farm	Po	N	P	N:P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Cd	Pb	ADF	NDF
BR	F2	31.95±6.72	4.55±1.75	7.57±1.44	27.25±7.15	4.05±1.85	2.30±1.20	86.2±7.6	40.8±17.2	6.32±0.83	26.3±3.5	0.27±0.26	0.11±0.001	28.7±0.9	44.6±9.0
	C1	22.67	2.90	7.82	17.90	4.20	2.10	121.0	39.8	5.78	32.0	0.06	0.11	26.6	47.0
D	F2	27.43±1.61	3.85±0.05	7.12±0.33	22.90±0.50	5.40±0.30	2.65±0.25	107.5±5.5	51.6±3.0	6.19±0.31	23.0±1.6	0.23±0.06	0.11	27.1±1.5	44.2±2.7
	C3	25.77±4.41	2.90±0.22	8.82±0.96	16.53±1.27	5.20±0.28	2.67±0.26	169.0±36.5	69.0±9.8	7.39±1.34	75.8±7.9	0.09±0.005	0.13±0.03	25.9±0.4	40.8±3.8
KB	F1	27.46	3.10	8.86	19.60	5.50	2.40	103.0	54.4	6.47	41.3	0.12	0.11	25.3	45.2
	C1	24.61	2.90	8.49	17.90	3.90	2.10	106.0	66.8	8.42	73.0	0.07	0.11	26.9	46.1
K	F4	24.20±4.81	3.23±0.55	7.52±0.98	22.08±3.23	3.53±1.47	1.98±0.54	97.1±17.7	47.4±8.3	6.89±0.55	27.6±1.6	0.08±0.08	0.11±0.0004	31.5±2.7	53.7±5.9
	C2	26.46±0.39	2.95±0.05	8.97±0.28	17.80±0.50	5.00	2.80±0.10	109.0±2.0	54.8±3.4	5.77±0.38	40.1±4.0	0.04±0.01	0.11	26.7±0.3	44.4±1.1
S	F2	26.32±0.54	3.00	8.77±0.18	22.55±0.45	6.85±0.55	2.70±0.10	90.0±0.1	44.0±0.1	7.13±0.29	29.0±0.3	0.12±0.02	0.11	27.0±0.2	38.6±0.5
	C2	25.94±0.36	3.10±0.10	8.37±0.15	18.20±0.50	6.00±0.40	2.70±0.20	120.5±4.5	64.9±0.1	6.54±0.55	49.2±10.1	0.12±0.06	0.11	28.1±0.1	43.5±0.7
GS	F1	29.65	4.70	6.31	29.60	7.20	3.30	121.0	45.5	7.41	23.7	0.35	0.11	26.5	37.8
	C1	27.73	3.20	8.67	18.70	5.60	2.80	131.0	44.6	6.20	25.7	0.06	0.11	23.6	38.6
V	F1	31.90	3.90	8.18	27.20	7.10	3.10	120.0	62.1	7.75	40.6	0.36	0.11	27.5	34.6
	C1	31.95	3.50	9.13	18.30	6.10	3.20	117.0	72.3	6.38	41.9	0.04	0.11	22.9	35.2
Farm	F13	27.48±4.79	3.65±0.96	7.72±1.07	23.85±4.37	5.12±1.82	2.46±0.71	100.0±15.2	48.0±10.0	6.80±0.67	29.7±5.3	0.18±0.15	0.11±0.0005	28.5±2.7	45.2±8.1
	C11	26.28±3.16	3.03±0.22	8.66±0.63	17.67±1.04	5.22±0.71	2.65±0.34	131.0±30.9	60.9±11.7	6.69±1.12	52.6±19.2	0.07±0.04	0.11±0.02	26.1±1.6	42.3±3.9
P-value		0.006	0.032	0.047	0.0002	0.008	0.051	0.012	0.041	0.950	0.004	0.016	0.560	<0.001	0.001

5.4 Vegetační snímkování

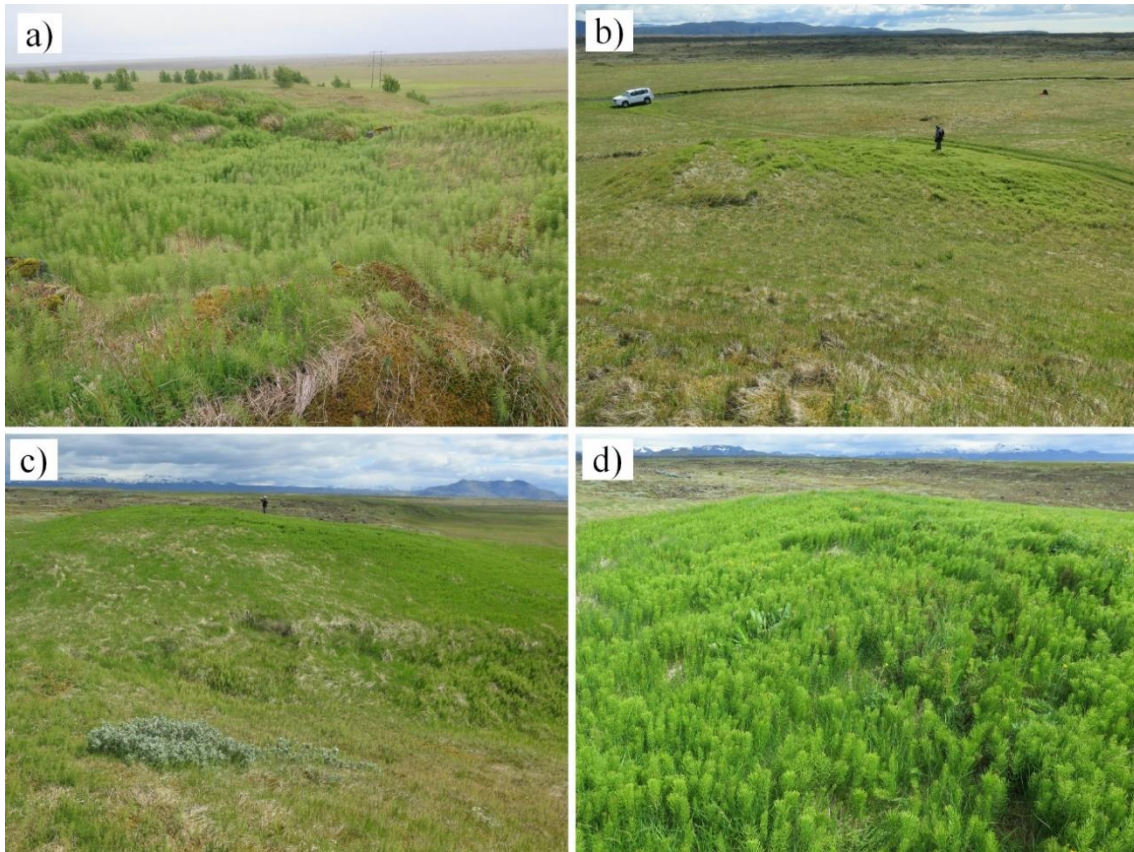
V celkovém počtu 35 vegetačních snímků jsme zaznamenali 28 druhů vyšších rostlin. Druhovú skladbu na 16 m² byla na farmách signifikantně chudší než na kontrolách. Celkový pokryv cévnatými rostlinami byl výrazně vyšší na farmách (78 %) oproti kontrolám (38 %). Na obrázcích 13 a 14 můžeme pozorovat zřetelné rozdíly mezi farmami a kontrolami. Na fotografiích je zelená barva vegetace v místech opuštěných farem velice kontrastní v porovnání se žlutou barvou vegetace, která je zřetelná v místech kontrol. Na druhé straně, pokryv mechorostů na farmách (13 %) byl signifikantně nižší než na kontrolách (82 %), stejně tak u bylin, jejichž pokryv na farmách byl výrazně nižší a sice 6 %, oproti kontrolám (22 %). Rostliny, které byly zaznamenány pouze na kontrolách, a nikdy na farmách, byly *Cerastium alpinum*, *Empetrum nigrum*, and *Salix herbacea*. Druhy jako *Potentilla anserina*, *Rumex acetosa*, *Ranunculus acris* and *Taraxacum officinale* byly naopak přítomny pouze na farmách. Celkový pokryv místních trav byl marginálně signifikantní na farmách (40 %) než na kontrolách (18 %). Na základě statistické analýzy jsou *Agrostis stolonifera* a *Poa pratensis* typickými travami opuštěných farem. Dále byl zjištěn větší pokryv introdukované *Alopecurus pratensis* na farmě Kot (obr. 13 f) a *Elytrigia repens* na farmě Brekkur (tabulka 8, obr. 13 a). Oba tyto druhy trav se na kontrolách nikde nevyskytovaly. Oproti tomu se *Festuca viviparia* nikdy neobjevila na farmě, ale pouze na kontrole. *Festuca rubra* byla zaznamenána na farmách i kontrolách, avšak její pokryv byl podstatně vyšší na kontrolách. Přesličky dominovaly na farmách, jejich hlavními zástupci byly *Equisetum pratense* a *Equisetum arvense* (tabulka 7), a na kontrolách se nevyskytovaly téměř vůbec. Jejich pokryv byl 37 % na farmách a 1 % na kontrolách. Průměrný pokryv zaznamenaných rostlinných druhů na jednotlivých farmách a jejich okolí je zaznamenán v příloze 1.

Tabulka 7. Průměrná druhová bohatost cévnatých rostlin, jejich celkový pokryv (v %), stařina, mechový pokryv, a jednotlivé pokryvy (v %) dílčích rostlinných druhů na farmách a kontrolách, rozdělené do třech skupin: trávy, byliny a přesličky. Zkratky názvů farem (lokalit) jsou v souladu s Tabulkou 1. **Po** – typ vzorkovaného místa přímo na farmách (**F**) anebo mimo farmy, označené jako kontroly (**C**).

Farm	F¹⁸	C¹⁷	P -value
Druhová bohatost na 1m²	9	9	
Celková pokryvnost	77.8±18.16	37.7±6.85	<0.001
Stařina	36.4±21.23	35.7±19.16	0.368
Mechorosty	12.5±16.60	81.8±8.75	<0.001
<i>Agrostis capillaris</i>	12.0±12.66	1.8±4.72	0.006
<i>Agrostis stolonifera</i>	0.9±3.17	0.01±0.04	0.226
<i>Alopecurus pratensis</i>	6.6±41.59	0.0	0.057
<i>Carex bigelowii</i>	0.1±0.25	1.7±3.49	<0.001
<i>Deschapsia cespitosa</i>	0.2±0.47	0.0	0.182
<i>Elytrigia repens</i>	7.6±39.20	0.0	0.239
<i>Festuca rubra agg.</i>	3.4±3.07	7.0±13.27	0.701
<i>Festuca vivipara</i>	0.0	7.1±4.01	<0.001
<i>Luzula multiflora</i>	0.0	0.3±0.05	0.019
<i>Poa anua</i>	0.1±1.30	0.004±0.04	0.648
<i>Poa pratensis</i>	9.3±10.52	0.4±1.17	<0.001
Trávy	40.1±112.29	17.9±26.35	0.085
<i>Achillea millefolium</i>	0.01±0.05	0.0	0.317
<i>Alchemilla filicaulis</i>	0.01±0.05	0.0	0.317
<i>Cerastium alpinum</i>	0.01±0.04	0.07±0.43	0.850
<i>Empetrum nigrum</i>	0.0	2.6±10.76	0.007
<i>Galium boreale</i>	4.0±8.66	15.5±7.92	<0.001
<i>Galium normanii</i>	0.0	0.02±0.04	0.114
<i>Galium verum</i>	0.6±1.42	3.2±3.00	0.002
<i>Potentilla anserina</i>	0.4±1.41	0.01±0.05	1
<i>Potentilla crantzii</i>	0.01±0.04	0.1±0.19	0.273
<i>Ranunculus acris</i>	0.7±1.27	0.0	<0.001
<i>Rumex acetosa</i>	0.2±0.44	0.0	<0.001
<i>Salix herbacea</i>	0.0	0.7±5.00	0.317
<i>Taraxacum officinale</i>	0.1±0.27	0.01±0.05	0.811
<i>Thalictrum alpinum</i>	0.0	0.01±0.05	0.317
Byliny	6.0±13.66	22.2±27.54	0.009
<i>Equisetum arvense</i>	22.1±29.29	0.1±0.24	<0.001
<i>Equisetum pratense</i>	14.3±18.71	0.9±1.88	0.010
<i>Equisetum variegatum</i>	0.0	0.01	0.083
Přesličky	36.7±48.00	1.0±2.12	0.003



Obr. 13. Sběr vzorků půd a biomasy. (a) Farma Brekkur s dominující *Equisetum arvense*. (b) Okolí (kontrola) farmy Brekkur s dominancí mechů a trav. (c) Zbytky farmy Dagverðarnes v pozadí (zelená) a její kontroly v popředí (žlutá). (d) *Equisetum arvense* jako dominující druh na farmě Dagverðarnes. (e) Stále detekovatelná farma Kastalabrekka, i přes její opuštění v r. 1650 (na obr. zelenější barva znázorňuje samotnou farmu v porovnání s okolím). (f) Introdukovaná produktivní rostlina *Alopecurus pratensis* zaznamenaná v těsné blízkosti ruin farmy Kot. Zelená barva na farmě je kontrastní se žlutou barvou v pozadí charakterizující travní společenství.



Obr. 14. (a) Ruiny farmy Steinkross (new site) zvýrazněné díky dominující *Equisetum arvense* (zelená). (b) Farma Valshóll s dominující *Equisetum pratense* (zelená). (c) Tmavě zelená barva indikuje bývalou farmu Steinkross (old site) oproti okolí (žlutá). (d) Zbytky farmy Steinkross (old site) s dominující *Equisetum arvense*.

6 Diskuze

Hlavní otázka, kterou se zabývá tato práce, zní, zda a jak dlouho je díky akumulaci antropogenních prvků v půdách možno prokázat dřívější lidskou aktivitu, a zda je možné díky naakumulování těchto prvků v půdě rozpoznat jednotlivá archeologická místa, resp. důkazy o lidské aktivitě, které se projevují vegetačními příznaky.

Odebraná půda na zaniklých farmách indikuje vyšší obsah P, což je jeden z hlavních antropogenních prvků (Mikolaczyk et al., 2015). Dále byl prokázán signifikantně vyšší obsah K na místech opuštěných farem s hojnou depozicí tefry, což se shoduje s podobnými pracemi, které se prováděly na různých archeologických místech střední Evropy, a které ovlivňující nynější lesy (Hejcman et al., 2013a), nebo na místech biblických měst v Izraeli (Šmejda et al., 2017). Podobné schéma můžeme pozorovat i u síry a zinku.

Odebraná biomasa na zaniklých farmách indikuje vyšší obsah N, P a K, což znamená, že vegetace má na těchto místech lepší výživu a farmy mohou být na první pohled lehce detekovány vzhledem k projevům různých barev rostlin (v kontrastu se žlutohnědým okolím tmavě zelená barva indikuje zaniklou farmu). Opuštěné farmy proto mohou být lehce určitelné z leteckých či satelitních snímků v podobě pozitivních vegetačních příznaků (mohutnější vzrůst vyšších rostlin a hustší pokryv v porovnání s okolím). V mnoha aspektech jsou naše archeologické lokality podobné lokalitám v mnoha dalších zemích, od Grónska (Fenger-Nielsen et al., 2019) až po další Evropské země (Hejcman et al., 2013b), kde byly nalezeny podobné situace v podobě pozitivních vegetačních příznaků v travních porostech či na orných půdách. Většinou se tmavě zelená barva vegetace spojuje s vysokým obsahem N, naopak světle zelená či žlutá barva indikuje jeho deficit. Farmy mohou být díky všem těmto aspektům identifikovány dokonce několik stovek až tisíců let po jejich opuštění (Entwistle et al., 1998).

Hlavní zprávou této práce tedy je ukázat, že zaniklé farmy na Islandu mohou být identifikovány díky akumulaci určitých antropogenních prvků v půdě a také díky rozdílnému zastoupení rostlinných druhů v místech destrukcí budov v porovnání s nejbližším okolím. Další neméně důležitou zprávou této studie je, že zaniklé farmy

mohou být určitelné, opět ve formě pozitivních příznaků, dokonce i za stavu, kdy jsou pokryty vrstvami tefry z vulkanických erupcí, které proběhly po jejich opuštění.

Interakce faktorů jako je lidská činnost, ať ve formě zemědělství či pastvy hospodářských zvířat, nestálost počasí a vulkanická aktivita, způsobila od dob osídlení Islandu vážný úbytek vegetace, degradaci půdy a dalekosáhlou erozi (Arnalds, 1987). Pro aplikaci jakéhokoli managementu je důležité brát všechny tyto faktory v potaz. Zároveň je dobré si uvědomit, že zemědělská činnost a pastva hospodářských zvířat je pouze jedním ze signifikantních faktorů, který můžeme ovlivnit. Proto by se v následujících podobných studiích měla eroze a její ovlivňování archeologických lokalit brát v potaz.

V poslední době vzrůstá také znepokojení v souvislosti s vlivem klimatické změny na zachování archeologických nalezišť (Colette, 2007). Vlhké a studené klima přispívá v severských oblastech k mimořádné konzervaci archeologických míst a materiálů, které jsou důležité pro pochopení historických a ekologických dějin daného území (Hollesen et al., 2018). Hollesen et al. (2018) mimo jiné dále uvádí, že archeologická naleziště mizí pod rozšiřující se vegetací. Na druhou stranu, pokud jsou tyto lokality značně erodované, mohou zůstat pro archeologii trvale znehodnocené. Proto vzhledem ke klimatické změně se ekologická valence rostlin rozšiřuje (tj. v arktických oblastech se potenciálně mohou uchytit a rozšířit některé druhy) a díky následným vegetačním příznakům se mohou dosud nenalezené archeologické lokality objevit.

Tyto zprávy nám potvrzují, že je možné s použitím vhodných satelitních či leteckých snímků díky výše uvedeným botanickým a chemickým metodám identifikovat archeologická místa různého typu i po několika staletích, a je zřejmé, že se tento vliv zdá být nezávislý na zeměpisné šířce (tj. důkazy přicházejí z různých zemí světa). Vzhledem k této nezávislosti a dlouhotrvající retenci antropogenních prvků v půdách je možné studovat „lidský dopad“ (anglicky human impact) na ekosystém téměř kdekoli.

7 Závěr

Cílem studie chemických signálů archeologických půd na Islandu bylo zjistit koncentrace antropogenních prvků (P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Sr a Rb) a rostlinám dostupný obsah prvků v oblasti zaniklých farem a jejich blízkosti, stejně tak zjistit v těchto místech prvkové složení rostlinné biomasy a provést vegetační snímkování, kde se zjišťovala celková pokryvnost stanoviště, druhová bohatost, pokryvnost mechorostů a stařiny, a dílčí pokryvnosti rostlinných druhů. Účelem této studie bylo na základě nasbíraných dat a následné statistické analýzy posoudit, zda se lidská aktivita dá identifikovat díky různému nabožení antropogenních prvků v půdách, což se následně projevuje na vitalitě rostlin, jejímu druhovému složení a následnému kontrastu rostlin v krajině prostřednictvím vegetačních příznaků.

Odběr půdních vzorků a biomasy byl proveden na 7 zaniklých Islandských farmách a jejich okolí posloužilo jako kontrola. Na těchto farmách a kontrolách bylo dále provedeno vegetační snímkování.

Dílčím cílem této studie bylo naznačit hlavní faktory (lidská aktivita, větrná eroze, vliv klimatu, vegetace a vulkanické činnosti), které ovlivňují vlastnosti Islandských půd, a zároveň poukázat na jejich provázanost.

8 Zdroje

- Arnalds, A. (1987).** Ecosystem disturbance in Iceland. *Arctic and Alpine Research*, 19, 508–513.
- Arnalds, O., Gísladóttir, F. O. & Sigurjónsson, H. (2001).** Sandy deserts of Iceland: an overview. *J. Arid Environ.*, 47, 359–371.
- Arnalds, O. (2004).** Volcanic soils of Iceland. *Catena*, 56(1–3), 3–20.
- Arnalds, O. (2008).** Soils of Iceland. *Jokull*, 56(58), 409–421.
- Arnalds, O. (2010).** Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. *Icel. Agric. Sci.*, 23, 3–21.
- Arnalds, O., Thorarinsdóttir, E.F., Thorsson, J., Waldhauserova, P.D. & Agustsdóttir, A.M. (2013).** An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. *Sci. Rep.*, 3, 1257.
- Arnalds O. (2015).** Andosols—Soils of Volcanic Regions. In: *The Soils of Iceland*. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht.
- Bryant J.P. and Kuropat P.J. (1980).** Selection of winter forage by subarctic browsing vertebrates: the role of plant chemistry. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11, 261–285.
- Colette, A. (2007).** Case studies on climate change and world heritage: 52–63. Paris: UNESCO World Heritage Centre.
- Dagsson-Waldhauserova, P., Arnalds, O., & Olafsson, H. (2013).** Long-term frequency and characteristics of dust storm events in Northeast Iceland (1949–2011). *Atmospheric Environment*, 77, 117–127.
- del Moral, R. & Grishin, S.Y. (1999).** Ecosystems of Disturbed Ground. *Ecosystems of the World: Volcanic disturbances and ecosystem recovery* (ed Walker, L.R.) 137–160 (Elsevier Publ., Amsterdam).
- Dugmore A.J., Church M.J., Buckland P.C., Edwards K.J., Lawson I., McGovern T.H., Panagiotakopulu E., Simpson I.A., Skidmore P. and Svinbjarnardóttir G. (2005).** The Norse landnám on the North Atlantic islands: an environmental impact assessment. *Polar Record*, 41, 21–37
- Dupouey LJ, Dambrine E, Laffite JD, Moares C. (2002).** Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 3, 2978–84.

- Einarsson, Th. (1961).** Pollenanalytische Untersuchungen zur spat - und postglazialen Klimageschichte Islands. Sonder - verdf. Geologische Institut der Universitdt Koln, 6, 52 pp.
- Entwistle, J.A., Abrahams, P.W., Dodgshon, R.A. (1998).** Multi-element analysis of soils from Scottish historical sites. Interpreting land-use history through the physical and geochemical analysis of soil. *J. Archaeol. Sci.*
- Entwistle, J.A., Abrahams, P.W., Dodgshon, R.A. (2000).** The geoarchaeological significance and spatial variability of a range of physical and chemical soil properties from a former habitation site, Isle of Skye. *J. Archaeol. Sci.*, 27, 287–303.
- Fenger-Nielsen R., Hollesen J., Matthiesen H., Andersen EAS., Westergaard-Nielsen A., Harmsen H., Michelsen A., Elberling B. (2019).** Footprints from the past: the influence of past human activities on vegetation and soil across five archaeological sites in Greenland. *Science of the Total Environment*, 654, 895–905.
- Gísladóttir, G., Erlendsson, E., and Rattan, L. (2011).** Soil evidence for historical human induced land degradation in West Iceland. *Appl. Geochemistry*.
- Guðmundsson, M. T. et al. (2012).** Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Sci. Rep.*, 2, 572.
- Hejcman M., Smrž Z. (2010).** Cropmarks in stands of cereals, legumes and winter rape indicate sub-soil archaeological features in the agricultural landscape of Central Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138, 348–354.
- Hejcman M., Ondráček J., Smrž Z. (2011).** Ancient waste pits with wood ash irreversibly increase crop production in Central Europe. *Plant and Soil*, 339, 341–350.
- Hejcman M, Karlík P, Ondráček J, Klír T. (2013a).** Short-term medieval settlement activities irreversibly changed forest soils and vegetation in Central Europe. *Ecosystems*, 16, 652–63.
- Hejcman, M., Součková, K., Gojda, M. (2013b).** Prehistoric settlement activities changed soil pH, nutrient availability, and growth of contemporary crops in Central Europe. *Plant Soil*, 369, 131–140.
- Hejcman, M., Součková, K., Křišťuf, P., Peška, J. (2013c).** What questions can be answered by chemical analysis of recent and paleosols from the Bell Beaker barrow (2500-2200 BC), Central Moravia, Czech Republic? *Quat. Int.*, 316, 179–189.

- Hejcman, M., Hejcmanová, P., Pavlů, V., & Thorhallsdottir, A. G. (2016).** Forage quality of leaf fodder from the main woody species in Iceland and its potential use for livestock in the past and present. *Grass and Forage Science*, 71(4), 649–658.
- Hollesen, J., Callanan, M., Dawson, T., Fenger-Nielsen, R., Friesen, T., Jensen, A., Rockman, M. (2018).** Climate change and the deteriorating archaeological and environmental archives of the Arctic. *Antiquity*, 92(363), 573–586.
- Holliday, V.T. (2004).** *Soils in archaeological research*. Oxford University Press, New York.
- Hördur, K. (2010).** *A Guide to the Flowering Plants and Ferns of Iceland*. Mal Og Menning, Iceland.
- Church M.J., Dugmore A.J., Mairs K.A., Millard A.R., Cook G.T., Sveinbjarnardóttir G., Ascough P.A. and Roucoux K.H. (2007).** Charcoal production during the Norse and early medieval periods in Eyjafjallahreppur, southern Iceland. *Radiocarbon*, 49, 659–672.
- Itkin D., Crouvi O., Morger H.C., Shaanan U., Goldfus H. (2018).** Pedology of archaeological soils in tells of the Judean foothills, Israel. *Catena*, 168, 47–61.
- Magnússon, B., Magnússon, S., Sigurðsson, B.D. (2018).** Long-term effects of the introduced Nootka lupin (*Lupinus nootkatensis*) on vegetation and soils in Iceland. Icelandic Institute of Nature History Report NI-18005, Garðabær, Iceland, 132 p. ISSN 1670-0120. Dostupné <http://utgafa.ni.is/skyrslur/2018/NI-18005.pdf>
- Magnússon, Á., and Vídalín, P. (1918–1921).** *Jarðabók II Árnessýsla*. Hið íslenska fræðafélag, Kaupmannahöfn.
- Masini N., Marzo C., Manzari P., Belmonte A., Sabia C., Lasaponara R. (2018).** On the characterization of temporal and spatial patterns of archaeological crop-marks. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 124–132.
- McGovern T.H., Vesteinsson O., Fririksson A., Church M.J., Lawson I.T., Simpson I.A., Einarsson A., Dugmore A.J., Cook G.T., Perdikaris S., Edwards K.J., Thomson A.M., Adderley W.P., Newton A.J., Lucas G., Edvardsson R., Aldred O. and Dunbar E. (2007).** Landscapes of settlement in northern Iceland: historical ecology of human impact and climate fluctuation on the millennial scale.
- Mehlich, A. (1984).** Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15, 1409–1416.
- Mikołajczyk, Ł., Ilves, K., May, J., Sveinbjarnarson, Ó.G., Milek, K. (2015).** Use of phosphorus mapping in assessing coastal activity zones of an Icelandic multi period site of Vatnsfjörður. *J. Archaeol. Sci.*, 59, 1–9.

- Milek K.B., Roerts H.M. (2013).** Integrated geoarchaeological methods for the determination of site activity areas: a study of a Viking Age house in Reykjavik, Iceland. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1845–1865.
- Ogilvie A.E.J. and Jónsson T. (2000).** ‘Little Ice Age’ research: a perspective from Iceland. *Climatic Change*, 48, 9–52.
- Semelová V, Hejcman M, Pavlů V, Vacek S, Podrázský V. (2008).** The grass garden in the giant Mts. (Czech Republic): residual effect of long-term fertilisation after 62 years. *Agric Ecosyst Environ*, 23, 337–42.
- Sigurdsson F.S., Gísladóttir G. and Óskarsson H. (2014).** Decline of birch woodland in Þjórsárdalur from 1587 to 1938. *Human Ecology*, 42, 577–590.
- Šmejda, L. (2009).** Mapování archeologického potenciálu pomocí leteckých snímků. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- Šmejda, L., Hejcman, M., Horák, J., Shai, I. (2017).** Ancient settlement activities as important sources of nutrients (P, K, S, Zn and Cu) in Eastern Mediterranean ecosystems e the case of biblical Tel Burna, Israel. *Catena*, 156, 62–73.
- Šmejda, L., Hejcman, M., Horák, J., Shai, I. (2018).** Multi-element mapping of anthropogenically modified soils and sediments at the Bronze to Iron Ages site of Tel Burna in the southern Levant. *Quaternary International*, 483, 111–123.
- Thoroddsen, Þ. (1916–1917).** Árferði á Íslandi í þúsund ár. Hið íslenska fræðafélag, Kaupmannahöfn.
- Thorsteinsson, I., Olafsson, G., and Van Dyne, G. M. (1971).** Range resources of Iceland. *Journal of Range Management*, 24, 86–93.
- Thorsteinsson, T., Johannesson, T., Stohl, A. & Kristiansen, N. J. (2012).** High levels of particulate matter in Iceland due to direct ash emissions by the Eyjafjallajökull eruption and resuspension of deposited ash. *J. Geophys. Res.*, 117
- Wilson, T.M., Cole, J.W., Stewart, C., Cronin, S.J. & Johnston, D.M. (2011).** Ash storms: impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *B. Volcanol.*, 73, 223–239.

9 Přílohy

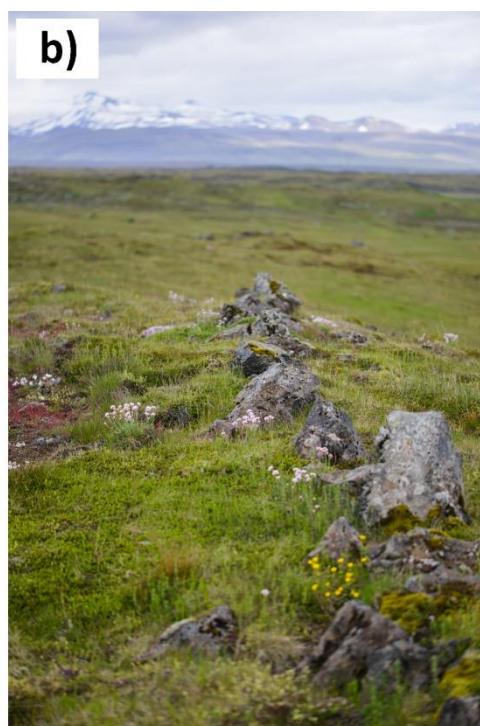
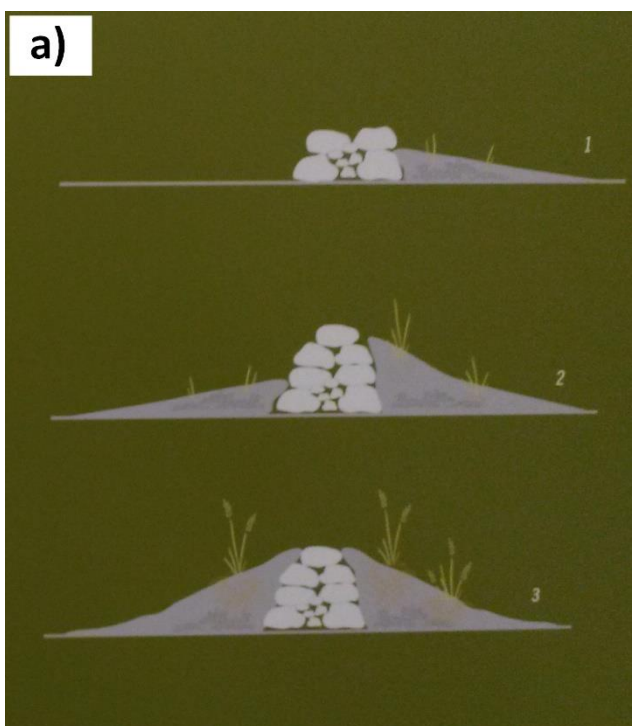
Příloha 1. Celkový pokryv (v %) cévnatými rostlinami, stařina, mechový pokryv, a jednotlivé pokryvy (v %) dílčích rostlinných druhů na jednotlivých farmách a kontrolách, rozdělené do tří skupin: trávy, byliny a přesličky. Zkratky názvů farem (lokalit) jsou v souladu s Tabulkou 1. Po – typ vzorkovaného místa přímo na farmách (F) anebo mimo farmy, označené jako kontroly (C).

Farm Po	BR	BR	D	D	KB	KB	K	K	S	S	GS	GS	V	V
	F ⁴	C ⁴	F ²	C ³	F ²	C ²	F ⁴	C ²	F ²	C ²	F ²	C ²	F ²	C ²
Celková pokravnost	86.3	40.0	80.0	41.7	40.0	40.0	98.5	37.5	67.5	37.5	97.0	30.0	75	37.5
Stařina	17.5	62.5	60.0	30.0	45.0	50.0	17.5	45.0	70	40	15.0	12.5	30	10
Mechy	8.8	85.0	20.0	80.0	50.0	70.0	1.3	80.0	2.5	70	0.0	92.5	5	95
<i>Agrostis capillaris</i>		8.8	40.0		11.0	4.0	10.8	0.1	14		1.0		7	0.05
<i>Agrostis stolonifera</i>		0.1									6.5			
<i>Alopecurus pratensis</i>				0.1	0.6	1.5	46.3	0.1	0.1	1.5		0.1		0.1
<i>Carex bigelowii</i>														
<i>Deschampsia cespitosa</i>									0.5					
<i>Elytrigia repens</i>	48.0						5.0							
<i>Festuca rubra</i> agg.	4.8	31.3	7.5		0.6		3.8		1.05	0.1	3.5	12.5	2.5	5
<i>Festuca vivipara</i>								13.5		11				
<i>Luzula multiflora</i>				0.1				0.1		0.05				
<i>Poa annua</i>		0.025					0.8							
<i>Poa pratensis</i>	3.8	1.6	10.0		3.5	0.1	19.0	0.1	12.5	0.05	15.0	0.6	1.05	0.1
<i>Achillea millefolium</i>									0.05					
<i>Alchemilla filicaulis</i>									0.05					
<i>Cerastium alpinum</i>					0.1									
<i>Empetrum nigrum</i>				15.0		2.0								
<i>Galium boreale</i>		1.0	0.5	11.0	24.0	16.5		27.5	3.5	12.5		17.5		22.5
<i>Galium normanii</i>				0.1						0.1				
<i>Galium verum</i>		6.3	1.1	3.0	3.0	3.5		0.6	0.1	4	0.1	0.1	0.1	5
<i>Potentilla anserina</i>							3.0							0.05
<i>Potentilla crantzii</i>				0.1	0.1			0.5						
<i>Ranunculus acris</i>	1.0		0.1		0.1		0.1		3.5		0.1		0.1	
<i>Ranunculus acetosa</i>				0.1			0.6						0.55	
<i>Salix herbacea</i>														
<i>Taraxacum officinale</i>	0.3							0.1	0.05		0.1			
<i>Thalictrum alpinum</i>														0.05
<i>Equisetum arvense</i>	39.3	0.3	22.5		2.0		10.8		35	0.1	75.0	0.1	5.05	0.05
<i>Equisetum pratense</i>				1.5						4.5			65	0.1
<i>Equisetum variegatum</i>						0.1								
Počet druhů na 1m ²	6	8	9	10	10	8	11	9	12	11	7	7	8	10

Příloha 2. Satelitní snímky detekující větrnou erozi (červené kruhy), způsobenou východními větry. Zkratky názvů farem (bílé kruhy) jsou v souladu s Tabulkou 1. Zdroj: <https://googlemaps.com>, upraveno v programu PhotoPhiltre 7



Příloha 3. Na levé straně (a) je schematicky znázorněný kamenný větrolam vč. jeho stavby, na pravé straně (b) je vyfocen větrolam v terénu. Zdroje: Schéma větrolamu – Islandské muzeum Visitor centre Sagnagardur, foto větrolamu – Tom Jůnek, upraveno v programu PhotoPhiltre 7



Příloha 4. Postup (od 1. do 6. kroku) při sbírání dat z půdy půdní sondou. (a) Výběr ideálního místa pro odběr vzorku, (b) aplikace půdní sondy, (c + d) opatrné vysunutí sondy pomalým kroutivým pohybem, (e) očištění a zarovnání vzorků v půdní sondě, (f) změření vrchní vrstvy na 10 cm a její následné odebrání do sáčku. Foto – Tom Jůnek, upraveno v programu PhotoPhiltre 7



Příloha 5. (a) Pohled z dálky na porost *Lupinus nootkatensis* v Islandské krajině, (b) Pohled z blízka na porost *Lupinus nootkatensis* v Islandské krajině, (c) Silný kořenový systém lupiny. Foto – Tom Jůnek, upraveno v programu PhotoPhiltre 7.



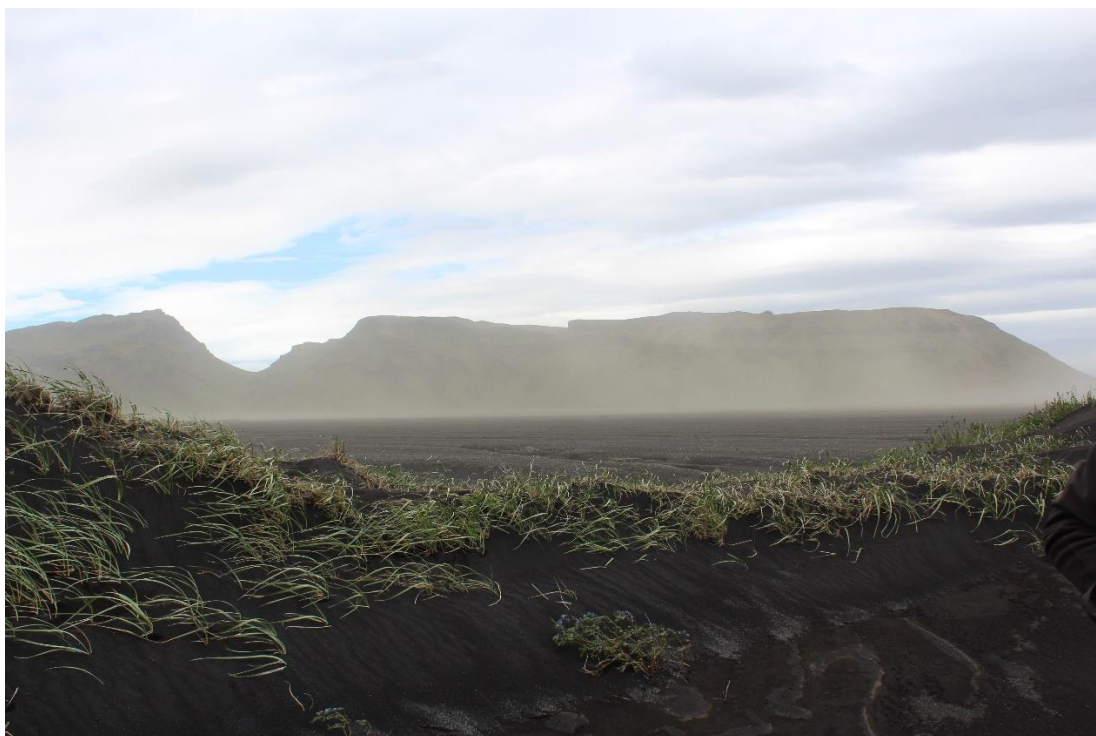
Příloha 6. Zbytek přirozeného Islandského březového porostu znázorňující význam kořenového systému zamezující větrné erozi. Rozdíl převýšení mezi erodovanou půdou a půdou pod porostem je cca 3–4 m. Foto – Tom Jůnek.



Příloha 7. Ukázka eroze na Islandu. Foto – Tom Jůnek



Příloha 8. Prachová bouře nad Islandkou pouští. Foto – Jiří Vašák



Příloha 9. Oplocení může mít na Islandu zásadní vliv na budoucí formování krajiny. Foto – Jiří Vašák



Příloha 10. Sušení vzorků biomasy a půdy v sušičce Islandské instituce (<https://www.land.is>). Foto – Tom Jůnek

