

Charles University, Faculty of Science
Department of Physical Geography and Geoecology

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Study programme: Physical Geography and Geoecology
Studijní program: Fyzická geografie a geoekologie

Summary of the doctoral dissertation
Autoreferát disertační práce



Past and Present Permafrost and Active-Layer Phenomena
as Indicators of Late Quaternary Environmental Changes

Minulé a současné charakteristiky a formy vázané na permafrost a činnou vrstvu
jako indikátory pozdně kvartérních změn přírodního prostředí

RNDr. Tomáš Uxa

Supervisor/školitel: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

Praha 2020

Abstract

Late Quaternary has seen numerous major permafrost expansions and retreats associated with alternating glacial and interglacial periods as well as stadials and interstadials, the research of which is necessary to understand the past environmental evolution, but also provides useful analogues for its present-day and future behaviour. However, observations of permafrost and active-layer phenomena are still limited, and sometimes misleading, even in many present-day permafrost regions, and naturally less comprehensive evidence is available from areas where permafrost existed in the past.

The thesis provides comprehensive information on the distribution and morphology of mostly relict patterned ground and rock glaciers in the High Sudetes Mts. and in the Western and High Tatra Mts., respectively, which are the most widespread permafrost features that occur in these Central European mountain ranges situated north of the Alps. It shows that the landforms are closely related to increased severity of climates and/or sparser vegetation at higher elevations and as such they attest to the environmental conditions, which prevailed there towards the end of the Last Glacial Period to the early Holocene, but also to their current states. Similar elevation trends in the pattern morphology are also documented for active sorted patterned ground in the Svalbard archipelago. Nonetheless, these patterns may also have been forming throughout the Holocene and as such they are not in equilibrium with present-day climate conditions, also considering the excessively thick active layer caused by recent climate warming, which has occurred in most permafrost regions in the Northern Hemisphere. It thus calls for a broader use of the pattern morphology, established at the time of its initiation, in palaeo-environmental reconstructions. However, not all present-day permafrost regions are currently experiencing its degradation as observations from the Antarctic Peninsula region indicate that active layer has been cooling and thinning there in recent years.

Conclusively, the thesis provides insights into the past and present dynamics of the examined regions, which documents that permafrost and active-layer phenomena are valuable measures of Late Quaternary environmental changes, but it also has notable methodological and genetic implications as well as relevance to concepts of permafrost landscape evolution.

Keywords: permafrost, active layer, patterned ground, rock glacier, High Sudetes Mts., Western and High Tatra Mts., Svalbard archipelago, Antarctic Peninsula region, Late Quaternary

Abstrakt

V pozdním kvartéru došlo v důsledku střídání glaciálních a interglaciálních období i stadiálů a interstadiálů k četným rozšířením a ústupům permafrostu, jehož výzkum je nezbytný pro pochopení vývoje přírodního prostředí v minulosti, ale poskytuje cenné informace i z hlediska jeho současné a budoucí dynamiky. Pozorování charakteristik a forem vázaných na permafrost a činnou vrstvu jsou však stále nedostatečná a někdy také zavádějící i v mnoha oblastech se současným výskytem permafrostu a mnohem méně informací je k dispozici z regionů, kde se permafrost nacházel v minulosti.

Disertační práce poskytuje ucelené informace o rozšíření a morfologii převážně reliktních strukturních půd a kamenných ledovců ve Vysokých Sudetech a Západních a Vysokých Tatrách, jež jsou nejrozšířenějšími formami vázanými na permafrost, které se v těchto středoevropských pohořích severně od Alp vyskytují. Je ukázáno, že tyto tvary reliéfu mají těsnou vazbu na zvyšující se drsnost klimatických podmínek a ubývání vegetace směrem do vyšších nadmořských výšek a jako takové svědčí o přírodních podmínkách, které zde panovaly ke konci posledního glaciálu a na počátku holocénu, jakož i o jejich současném stavu. Obdobné výškové trendy v morfologii strukturních půd jsou dokumentovány také pro aktivní třídné strukturní půdy na souostroví Špicberky. I tyto tvary se však mohly vyvíjet v průběhu celého holocénu a jako takové nejsou v rovnováze se současnými klimatickými podmínkami, i s ohledem na neúměrně mocnou činnou vrstvu způsobenou recentním oteplováním klimatu, k němuž došlo ve většině oblastí s výskytem permafrostu na severní polokouli. Z toho důvodu práce nabádá k širšímu využití morfologie strukturních půd, utvořené v období jejich vzniku, pro paleoenvironmentální rekonstrukce. Nicméně ne ve všech oblastech se současným výskytem permafrostu aktuálně dochází k jeho degradaci, jelikož pozorování z regionu Antarktického poloostrova indikují, že v posledních letech zde docházelo ke snižování teploty a mocnosti činné vrstvy.

Závěrem lze konstatovat, že disertační práce přispěla k lepšímu pochopení minulé i současné dynamiky zkoumaných oblastí, což ukazuje, že charakteristiky a formy vázané na permafrost a činnou vrstvu jsou cennými indikátory pozdně kvartérních změn přírodního prostředí. Výsledky však mají také značný metodický a genetický aspekt, jakož i význam pro obecné koncepty vývoje oblastí s výskytem permafrostu.

Klíčová slova: permafrost, činná vrstva, strukturní půdy, kamenný ledovec, Vysoké Sudety, Západní a Vysoké Tatry, Špicberky, Antarktický poloostrov, pozdní kvartér

List of publications included in the thesis

The thesis summarizes results of seven papers published in well-recognized international Web-of-Science-indexed journals that are attached as its supplements.

-
- Paper I Křížek, M., Krause, D., **Uxa, T.**, Engel, Z., Treml, T., Traczyk, A. (2019). Patterned ground above the alpine timberline in the High Sudetes, Central Europe. *Journal of Maps*, 15(2), 563–569. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1636890>
- Author's contribution (10 %): data collection, manuscript and maps editing.
-
- Paper II Křížek, M., **Uxa, T.** (2013). Morphology, Sorting and Microclimates of Relict Sorted Polygons, Krkonoše Mountains, Czech Republic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(4), 313–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1789>
- Author's contribution (50 %): data collection, GIS and statistical analyses, interpretation of results, drawing of figures, and manuscript co-writing.
-
- Paper III **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D., Hartvich, F., Tábořík, P., Kasprzak, M. (2019). Comment on ‘Geophysical approach to the study of a periglacial blockfield in a mountain area (Ztracené kameny, Eastern Sudetes, Czech Republic)’ by Stan *et al.* (2017). *Geomorphology*, 328(1 March 2019), 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.010>
- Author's contribution (30 %): data collection, extensive literature search, statistical analyses, (re)interpretation of results, drawing of a figure, manuscript writing, and correspondence with the journal.
-
- Paper IV **Uxa, T.**, Mida, P. (2017). Rock Glaciers in the Western and High Tatra Mountains, Western Carpathians. *Journal of Maps*, 13(2), 844–857. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1378136>
- Author's contribution (80 %): data collection, extensive literature search, GIS and statistical analyses, interpretation of results, drawing of figures, map compiling, manuscript writing, and correspondence with the journal.
-
- Paper V **Uxa, T.**, Mida, P., Křížek, M. (2017). Effect of Climate on Morphology and Development of Sorted Circles and Polygons. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(4), 663–674. <https://doi.org/10.1002/ppp.1949>
- Author's contribution (70 %): data collection, sample analysis, extensive literature search, GIS and statistical analyses, interpretation of results, drawing of figures, manuscript writing, and correspondence with the journal.
-
- Paper VI **Uxa, T.** (2017). Discussion on ‘Active Layer Thickness Prediction on the Western Antarctic Peninsula’ by Wilhelm *et al.* (2015). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(2), 493–498. <https://doi.org/10.1002/ppp.1888>
- Author's contribution (100 %).
-
- Paper VII Hrbáček, F., **Uxa, T.** (2020). The evolution of a near-surface ground thermal regime and modeled active-layer thickness on James Ross Island, Eastern Antarctic Peninsula, in 2006–2016. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 141–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.2018>
- Author's contribution (50 %): measurements of ground thermal properties, active-layer thickness modelling, extensive literature search, interpretation of results, manuscript co-writing.
-

1 Introduction

Permafrost is a layer of ground, the temperature of which remains at or below 0 °C for at least two consecutive years, but normally, it is absent at the ground surface as it is superimposed by a near-surface zone termed as the *active layer* where temperature rises above 0 °C in summer (van Everdingen, 2005). Globally, it is estimated that permafrost underlies *ca.* 19.1–24.7 million km² (14–19 %) of the exposed land surfaces mainly in polar, sub-polar, and alpine regions of the Northern Hemisphere having markedly negative mean annual air temperature (Zhang *et al.*, 2008; Gruber, 2012; Obu *et al.*, 2019a,b,c). Nonetheless, permafrost is not invariable and everlasting, as its name might suggest, but in reality it is among the Earth system components that are most sensitive to climate forcings (Riseborough *et al.*, 2008; Burn, 2013). Indeed, the Quaternary has seen numerous major permafrost expansions and retreats associated with alternating glacial and interglacial periods as well as stadials and interstadials. For instance, it is estimated that the maximum permafrost extent of the Last Glacial Period (LGP) achieved up to *ca.* 40 % larger area than at present in the Northern Hemisphere (Lindgren *et al.*, 2016) and occurred 25–17 ka, which has recently been referred to as the Last Permafrost Maximum (LPM) (Vandenberghe *et al.*, 2014). The last major permafrost expansion took place in the Younger Dryas (12.9–11.7 ka), but then it degraded rapidly and has largely retreated to its current extent at the latest during the early Holocene (Vandenberghe, 2001). However, it is now dramatically declining in most present-day permafrost regions due to recent climate warming (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Biskaborn *et al.*, 2019).

Seasonal and annual temperature variations within the uppermost permafrost and especially recurrent freezing and thawing of the active layer stimulate numerous thermally- and gravity-induced processes, mostly related to water–ice volume changes, that cause frost weathering, ground deformations, and/or mass displacements, which, if acting long enough, result in the development of a variety of distinctive landforms and subsurface structures that are collectively termed as *permafrost features*. Some of the most common features in present-day permafrost regions are various kinds of *patterned ground* and *rock glaciers*, which, along with their distinctive surface morphology and frequently large dimensions, predetermines them to be among the best and most abundantly preserved features in former permafrost environments as well. As such, patterned ground and rock glaciers are well suited for exploring past and present permafrost extents and associated temperature conditions (Barsch, 1996; Ballantyne, 2018).

Most present-day permafrost regions have experienced one of the globally fastest temperature rises over the past few decades (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Biskaborn *et al.*, 2019), which has triggered permafrost degradation and active-layer thickening over large areas, and it is expected to continue and affect wider areas in the near future (Chadburn *et al.*, 2017). As a result, this will also highly impact landscape and ecosystem dynamics, hydrological and biogeochemical cycling, and/or human infrastructure throughout permafrost regions (e.g. Ping *et al.*, 2015; Hjort *et al.*, 2018; Lafrenière & Lamoureux, 2019). Besides, carbon emissions released due to the permafrost decay are believed to further accelerate the warming through a positive feedback mechanism, which is likely to bring even more dramatic changes that may have globally significant repercussions (Schuur *et al.*, 2015). Notwithstanding the uncertainties in the current permafrost projections, it is assumed that its future areal losses under the most extreme climate-warming scenarios could reach the same order of magnitude as in the post-LPM period (cf. Lindgren *et al.*, 2016; Chadburn *et al.*, 2017). The Late Quaternary permafrost and climate evolution can thus be seen as an analogy to what is happening now in most present-day permafrost regions because of the climate warming and as such it can tell us what its consequences might be. Research of permafrost and active-layer phenomena is thus necessary to assess the Late Quaternary climate and landscape dynamics across both past and present-day permafrost regions, to forecast their future changes as well as to improve the adaptation strategies to counter the negative impacts of associated environmental adjustments. However, it is of the utmost importance for non-permafrost regions as well because many of the changes are likely to have global consequences.

Yet, despite considerable efforts, observations are still either lacking or limited, and sometimes misleading, even

in many present-day permafrost regions, and naturally less comprehensive evidence is available from areas where permafrost existed in the past. Consequently, the information remains sketchy and far from conclusive in many aspects as local or regional permafrost and active-layer dynamics may substantially differ from those at continental or global scales.

2 Objectives

The main objective of the thesis is thus to obtain new primary data on some of the poorly investigated permafrost and active-layer phenomena in mostly past permafrost landscapes of selected Central European mountain ranges situated north of the Alps as well as in present-day permafrost environments of the Svalbard archipelago and the Antarctic Peninsula region where most of the Czech permafrost and active-layer research has taken place in recent years. Specifically, research of mostly past permafrost landscapes is mainly oriented on the comprehensive cross-border mapping and analysis of the distribution and morphology of the most widespread permafrost features that occur there, that is, patterned ground and rock glaciers, and their interpretation in terms of past and potential present-day permafrost occurrences and associated temperature conditions ([Paper I](#), [Paper II](#), [Paper III](#), and [Paper IV](#)). Research of present-day permafrost regions is mainly focused on the analysis of the distribution and morphology of patterned ground, their developmental rates, chronology, and relation to present-day environmental conditions, which have implications for reconstructions of past permafrost environments ([Paper V](#)). Also, it concentrates on the long-term monitoring and modelling of the thermal regime and thickness of the active layer, which is critical for assessing the regional contrasts of climate-change impacts on this important component of the cryosphere ([Paper VI](#) and [Paper VII](#)). Beside the new or amended information about the past and present permafrost and climate evolution in the study areas and putting it into broader research and/or regional contexts that complement the mosaic of existing knowledge, it also seeks to develop and/or implement novel observation procedures and methods as well as to bring new perspectives that increase the reputation of past and present permafrost and active-layer phenomena as indicators of Late Quaternary environmental changes.

3 Study areas and methods

The research targeted past permafrost landscape of the High Sudetes Mts. ([Paper I](#), [Paper II](#), and [Paper III](#)) and a currently marginal permafrost area of the Western and High Tatra Mts. ([Paper IV](#)), Central Europe, as well as present-day permafrost regions of the northern Billefjorden, Svalbard archipelago ([Paper V](#)), and Amsler Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula region ([Paper VI](#) and [Paper VII](#)) ([Figure 1](#)). Collectively, these areas cover a wide range of climate conditions that form a transition between past and present permafrost environments.

Numerous methods were employed for data collection and analysis, of which most were done by the author himself to the extents indicated for individual publications (see [List of publications included in the thesis](#)). These included (i) terrain and/or remotely-sensed mapping of past and present sorted and non-sorted patterns as well as rock glaciers; (ii) determining their topographic attributes from digital elevation models; (iii) and measuring their surface as well as subsurface morphology and internal structure *in situ* or using aerial photographs and digital elevation models; (iv) collecting ground samples and determining their physical properties, such as texture, bulk density, moisture content, thermal conductivity, or volumetric heat capacity; (v) measuring air and ground temperatures; (vi) active-layer thickness modelling using analytical solutions; (vii) interpreting geophysical measurements; (viii) statistical analysis; (ix) extensive literature searching aimed at putting results into broader research and/or regional contexts; (x) and interpreting and synthesizing of results. The GIS works were done in ArcGIS 10 (Environmental Systems Research Institute), whereas the computations were mostly elaborated in STATISTICA 9 (StatSoft) and Mathcad 14 (Parametric Technology Corporation).



Figure 1. Location of the study areas in the (A) Northern and (B) Southern Hemisphere, and their positions (orange rectangles) within the (C) Central Europe, (D) Svalbard archipelago, and (E) Antarctic Peninsula region. Global topography (A, B) is based on the Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 dataset (Amatulli *et al.*, 2018) and global-scale shapefiles available at Natural Earth (<https://www.naturalearthdata.com>). Regional maps are based on other data obtained from the (C) CGIAR Consortium for Spatial Information (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata>), (D) Norwegian Polar Institute (<https://geodata.npolar.no>), and (E) Antarctic Digital Database (<https://www.add.scar.org>).

4 Results, discussion, and conclusions

Comprehensive cross-border mapping of mostly relict sorted and non-sorted patterns above the alpine timberline in the High Sudetes Mts., first carried out by Paper I, resulted in one of the few such detailed maps ever published, which depicts the actual areas of the patterned ground and not just its presence or absence within predefined gridcells of hundreds of meters or kilometres (cf. Niessen *et al.*, 1992; Hjort & Luoto, 2006; Feuillet *et al.*, 2012). It confirmed that the patterns are the most widespread permafrost features that occur there (cf. Křížek, 2007, 2016). Also, it indicated that the most symmetrical patterns, such as sorted polygons and circles or peat and earth hummocks, tend to be situated on flat or gently-inclined surfaces of higher elevations, whereas the least symmetrical ones, such as sorted and non-sorted stripes, usually occur on steeper slopes of lower elevations. Likewise, sorted patterns tend to be located at somewhat higher elevations as compared to non-sorted patterns. Generally, it largely mirrors the distribution of slope inclinations within the region that is characterized by extensive summit plateaus surrounded by much steeper

slopes, but at the same time it indicates the existence of a typical mountain patterned-ground zonation associated with increased severity of climate conditions and sparser vegetation at higher elevations (cf. Harris, 1982; Niessen *et al.*, 1992; Hjort & Luoto, 2006; Feuillet *et al.*, 2012) towards the end of the LGP when most of the patterns supposedly originated (Sekyra & Sekyra, 1995; Traczyk & Migoń, 2000; Sekyra *et al.*, 2002). Given the patterns extend over a narrow range of elevations of *ca.* 1260–1555 m asl, it implies their high sensitivity to climate and environmental variables as well. Moreover, the latter also translates into the pattern morphology as Paper II revealed that sorted polygons tend to be better developed at higher elevations because of more severe and longer-lasting microclimates suitable for their development there. Specifically, these promoted shallower freeze-thaw depth (~active layer) and more numerous freeze-thaw cycles of higher intensity, which resulted in polygons having smaller diameters and higher height-to-width ratios as well as better sorting at higher elevations, but were also probably responsible for their partial reactivation and formation of secondary sorting centres during the colder periods of the Holocene. Besides, Paper II suggested that the pattern development probably involves a positive feedback mechanism between morphology and frost susceptibility that is driven by microclimates.

Strikingly, the smaller pattern diameters at higher elevations detected by Paper II for relict sorted polygons in the High Sudetes Mts. are well consistent with those observed by Paper V for active sorted patterns of similar morphology in the northern Billefjorden, Svalbard archipelago, as well as on James Ross Island, eastern Antarctic Peninsula region (Marvánek, 2010), and in other permafrost areas (Kling, 1998). On the other hand, the diameters of active sorted patterns have the opposite tendency in seasonally frozen ground regions (Holness, 2003; Feuillet *et al.*, 2012). Collectively, it suggests that pattern diameters closely relate to the freeze-thaw depth and that their elevation trends within a particular geographical area can indicate whether the patterns developed under permafrost or seasonally frozen ground conditions, or alternatively, at what level the permafrost–seasonal frost boundary was located at that time. Besides, the summary of available diameter-to-sorting depth ratios of circular and polygonal subaerial sorted patterns demonstrated that the ratios tend to cluster between values of *ca.* 3.1–3.8, previously provided by theoretical models of pattern-ground development (Ray *et al.*, 1983; Gleason *et al.*, 1986; Hallet & Prestrud, 1986; Peterson & Krantz, 2008), which indicates that surface size of the patterns might be reasonably used to estimate their sorting depth without the need for laborious and time-consuming excavations. Given the sorting depth is believed to be representative of the freeze-thaw depth and thus also of the temperature conditions at the time of the pattern formation (*sensu* Hallet & Prestrud, 1986; Ballantyne & Harris, 1994), efforts should be made towards palaeo-temperature reconstructions utilizing the sorting depth (~freeze-thaw depth) as these could provide more reasonable temperature estimates than traditional empirical procedures that build on modern air temperatures associated with active sorted patterns (Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018). Certainly, the latter can be misleading because Paper V also suggested that many of the patterns examined are probably not in equilibrium with present-day climate conditions and, albeit manifestly active, may have probably been forming throughout the Holocene, that is, under climate conditions that may have substantially differed from those of today (cf. Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018). Also, the pattern dynamics likely exhibits latitudinal variations because of contrasting insolation budgets that produce distinct thermal regimes, including the number and intensity of freeze-thaw cycles, which is another complication for the traditional reconstruction methods because these have typically utilized active high-latitude patterns as analogues for relict patterns in mid-latitude areas (Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018).

Given that some of the patterns, such as large-scale sorted polygons and nets, are commonly associated with at least discontinuous permafrost conditions and the mean annual air temperature < -6 to -4 °C (Goldthwait, 1976; Washburn, 1980; Grab, 2002; Ballantyne, 2018), their widespread presence in the High Sudetes Mts. attests that permafrost having up to *ca.* 1.5–2 m thick active layer extensively occurred there towards the end of the LGP and that the mean annual air temperature decline was at least -8 to -4 °C at that time. Since the latter denotes the minimal mean annual air temperature reduction, it is in line with the previously suggested values of *ca.* -12 to -8 °C for the summit areas of the High Sudetes Mts. based on other tentative permafrost evidence and glacier mass-balance

modelling (Czudek, 1986; Chmal & Traczyk, 1993; Heyman *et al.*, 2013), but is also well consistent with the average mean annual air temperature depressions of at least *ca.* -8 to -4.5 °C indicated by groundwater data and borehole temperature logs in the surrounding lowlands (Šafanda & Rajver, 2001; Zuber *et al.*, 2004; Corcho Alvarado *et al.*, 2011). Currently, however, the mountains most likely host no permafrost as Paper III demonstrated that it is absent even within the high-elevated blockfields, the openwork debris of which usually provides one of the most suitable places for potential permafrost maintenance, but the blockfields have rather low elevation extent and are relatively shallow there, which hinders the development of seasonally reversing, gravity-driven internal air circulation that could insulate their interiors and thus produce negative thermal anomalies as compared to the outside air (*sensu* Delaloye & Lambiel, 2005; Wicky & Hauck, 2017).

On the other hand, Paper IV, which introduced the very first cross-border inventory of rock glaciers for the Western and High Tatra Mts., and as such complemented those from other European high-mountain areas, such as the Alps, the Pyrenees, the Scandinavian Mts., or the Southern Carpathians, suggested that present-day permafrost probably discontinuously occurs there above *ca.* 2000 m asl based on the front elevations of intact rock glaciers, but its level varies locally mainly depending on the slope aspect and surface cover, which is also supported by rare near-subsurface temperature measurements (e.g. Gądek & Kędzia, 2008; Uxa & Mida, 2016, 2017). Obviously, it is slightly above the previously proposed average discontinuous permafrost boundary of 1930 m asl based on the elevation of zero isotherm of mean annual air temperature (Dobiński, 1997, 2004, 2005). Of course, the difference can be partly due to distinctive methodologies. However, the earlier estimates (Dobiński, 1997, 2004, 2005) were mostly based on air temperatures from 1985–1989 or 1985–1994 when climate was slightly colder as the mean annual air temperature has been increasing there at an average rate of 0.02 °C a^{-1} since the 1960s (Žmudzka, 2011; Pribullová *et al.*, 2013). Such a warming rate would have elevated the zero isotherm level from 1930 m asl to 2003–2039 m asl in 20–30 years, assuming the average temperature lapse rate of 0.0055 °C m^{-1} (*sensu* Niedźwiedź, 1992), or even higher because the warming accelerated in the 1980s (Žmudzka, 2011), which corresponds well to the fact that near-subsurface temperatures within the rock-glacier debris tend to be slightly lower than air temperatures there (Uxa & Mida, 2016, 2017). At the same time, it suggests that the higher permafrost limit as compared to Dobiński (1997, 2004, 2005) is reasonable.

Besides, Paper IV also estimated that the lower boundary of discontinuous permafrost at the Pleistocene–Holocene transition, that is, when the rock glaciers presumably originated there (Kotarba, 2007; Zasadni *et al.*, 2020), was around *ca.* 1400 m asl based on the lowest fronts of relict rock glaciers, and the associated mean annual air temperature decline was at least -5.4 °C, which is well in line with the temperature depression of *ca.* -7 to -6 °C based on glacier mass-balance modelling (Makos *et al.*, 2013). Similarly, Zasadni *et al.* (2020) also hypothesized that Younger Dryas rock glaciers should occur at elevations of 1320–1520 m asl if the mean annual air temperature depression of -5 to -4 °C would be assumed. However, they dated numerically only small rock glaciers at elevations of *ca.* 1800–2000 m asl, which formed 11.9–10.4 ka, that is, mostly in the early Holocene (Zasadni *et al.*, 2020) when climate was already warmer (Tóth *et al.*, 2012), and thus yielded the lower boundary of discontinuous permafrost of *ca.* 1800 m asl and the mean annual air temperature reduction as little as -1.6 °C, or -5.3 °C if enhanced annual air temperature amplitude was considered (Zasadni *et al.*, 2020). Moreover, they assumed tentatively that rock glaciers situated at lower elevations have emerged prior to the Younger Dryas because they further argued that permafrost disappeared much earlier at elevations of *ca.* <1600 m asl based on the presence of a so-called massive rock-glacier front found at the foot of a rock-avalanche fan at 1620 m asl (Zasadni *et al.*, 2020) dated at 15.6 ± 0.7 ka (Engel *et al.*, 2015; Pánek *et al.*, 2016). Nonetheless, the latter landform has previously been considered to be solely a rockfall accumulation (Engel *et al.*, 2015; Pánek *et al.*, 2016) and is also not included in the rock-glacier inventory compiled by Paper IV and as such it is probably of no significance for past permafrost distribution. Also, the mean annual air temperature reduction is estimated at up to *ca.* -10 to -9 °C at the time of its origin (Makos, 2015), which would imply that permafrost extended much lower, and certainly below *ca.* 1500 m asl as indicated by cryogenic cave carbonates (Žák

et al., 2012). Last but not least, it should be noted that there are rock glaciers descending to *ca.* 1400 m asl in the Western Tatra Mts., which have indeed been attributed to the Younger Dryas (Engel *et al.*, 2017), suggesting that the past lower boundary of discontinuous permafrost and the associated mean annual air temperature decline provided by Paper IV is plausible.

Obviously, the relict and intact rock glaciers and thus also the past and present discontinuous permafrost limits occur on average *ca.* 400–600 and 100–250 m lower than in the Alps and the Southern Carpathians, respectively, which is attributed to increasing continentality to the east as well as to latitudinal temperature decrease (*sensu* Dobiński, 2005; Onaca *et al.*, 2017). However, it must be stressed that the deduced permafrost limits should be understood as tentative because rock glaciers can provide only a first-order evaluation of potential permafrost distribution, which generally tends to overestimate the permafrost extent at places without debris cover. Ground temperature measurements supplemented by geophysical soundings are thus needed to determine the controls on permafrost existence there in order to enhance the estimates of its past and present distribution in the mountains as well as to assess its response to the current climate warming.

Ground temperature measurements should be as long as possible, as illustrated by Paper VII, which examined one of the longest observations (2006–2016) of thermal regime and modelled active-layer thickness using the Stefan and Kudryavtsev models in the Antarctic Peninsula region as well as throughout the Antarctica, but the decadal time series proved to be still too short to capture statistically significant trends. Notwithstanding that, it detected active-layer thinning that is analogous to other locations around the Antarctic Peninsula and can be mainly attributed to declining summer temperatures and shortening of the thawing seasons, which started there around 2000 (Turner *et al.*, 2016; Oliva *et al.*, 2017), and as such it highly contrasts with what is happening in most permafrost regions in the Northern Hemisphere where air and ground temperatures as well as active-layer thickness have been steadily increasing over the past few decades (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2016; Biskaborn *et al.*, 2019). The Stefan and Kudryavtsev models reproduced the active-layer thickness with lower errors than in most previous studies and it was their very first successful application in Antarctica after they had been incorrectly utilized by Wilhelm *et al.* (2015) and Wilhelm & Bockheim (2016) who modelled unrealistically thick active layers on Amsler Island, western Antarctic Peninsula region, that exceeded their actual thickness by up to hundreds of percent and basically excluded the existence of near-surface permafrost there, which gave the false impression of extreme warming and as such seriously misrepresented the climate state in the region as demonstrated by Paper VI. Both Paper VI and Paper VII also highlighted some important issues of active-layer and permafrost modelling, including phase changes and latent heat effects or model parameterizations and corrections, which is useful as the models become increasingly available not only for permafrost scientists, but also for non-specialists working in permafrost environments.

Clearly, Paper I, Paper II, Paper IV, and Paper V showed that patterned ground and rock glaciers are highly sensitive to variations in climate and environmental conditions and that these can be preserved and subsequently deduced even from the Last Glacial to early Holocene features, which has important implications for present-day permafrost regions, but especially it indicates their high potential for reconstructions of past permafrost environments that should definitely be further exploited in future investigations. These should be particularly attempted to better constrain former temperature conditions associated with the patterned ground as well as the rock glaciers and to thoroughly determine their absolute chronology using numerical dating methods. So far, their age has mostly been estimated using the knowledge about the regional glaciations and/or palaeo-climates, while numerical dating was virtually lacking because it is tricky due to their complex formation history potentially spanning multiple time periods and possible reorganization long after they have formed. Fortunately, first numerical dates have recently started to emerge at least for rock glaciers in the Western and High Tatra Mts. (Engel *et al.*, 2017; Zasadni *et al.*, 2020), but those for patterned ground in the High Sudetes Mts. will hopefully appear soon as well (Engel *et al.*, *in revision*). Correlations with local mountain glaciations as well as permafrost dynamics in the surrounding lowlands are also highly desirable to better comprehend the Late Quaternary landscape evolution of these regions as mountain and

lowland permafrost behaviour probably highly differed both spatially and temporally, but it has not yet been addressed as most chronological data on past permafrost events in Central European areas situated north of the Alps are still available almost exclusively only from lowland locations (Isarin, 1997; Huijzer & Vandenberghe, 1998; Czudek, 2005; Marks *et al.*, 2016). Besides, the monitoring of air and near-subsurface temperatures and/or active-layer thickness, which has already been established on James Ross Island (Paper VII) and in the High Tatra Mts. (Uxa & Mida, 2016, 2017), should definitely continue in order to extend the time series so that they allow for a more thorough trend analysis that tells more about the active-layer and permafrost dynamics in these regions and their drivers, which is critical for assessing the regional contrasts of climate-change impacts on these important components of the cryosphere.

Conclusively, the thesis contributed to a better understanding of the past and present dynamics of the examined regions, which documents that permafrost and active-layer phenomena are valuable measures of Late Quaternary environmental changes if observed in detail (Paper I, Paper II, Paper IV, Paper V, and Paper VII) and/or interpreted carefully (cf. Paper III and Paper VI). Besides, newly introduced approaches, methods, and perspectives as well as established monitoring networks enhance the breadth of details that can be retrieved from both past and present permafrost and active-layer phenomena, and thus the thesis outcomes also have notable methodological and genetic implications as well as relevance to concepts of permafrost landscape evolution. Yet, they should be viewed rather as partial but important steps that pave the way for follow-up investigations.

5 References

- Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M.-N., Parmentier, B., Ranipeta, A., Malczyk, J., Jetz, W. (2018). *A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling, links to files in GeoTIFF format*. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.867115>
- Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Hoboken, USA.
- Ballantyne, C.K., Harris, C. (1994). *The Periglaciation of Great Britain*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Springer, Berlin, Germany.
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A., Schoeneich, P., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W.L., Christiansen, H.H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaksen, K., Ishikawa, M., Johansson, M., Johannsson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kröger, T., Lambiel, C., Lanckman, J.-P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A.B.K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., Lantuit, H. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10(1), 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Burn, C.R. (2013). Permafrost. In Elias, S.A., Mock, C.J. (Eds). *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2nd Edition. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 464–471. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00099-6>
- Chadburn, S.E., Burke, E.J., Cox, P.M., Friedlingstein, P., Hugelius, G., Westermann, S. (2017). An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 7(5), 340–344. <https://doi.org/10.1038/nclimate3262>
- Chmal, H., Traczyk, A. (1993). Plejstocénskie lodowce gruzowe w Karkonoszach [Pleistocene Rock Glaciers in the Karkonosze Mts.]. *Czasopismo Geograficzne*, 64(3–4), 253–263.
- Corcho Alvarado, J.A., Leuenberger, M., Kipfer, R., Paces, T., Purtschert, R. (2011). Reconstruction of past climate conditions over central Europe from groundwater data. *Quaternary Science Reviews*, 30(23–24), 3423–3429. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.09.003>
- Czudek, T. (1986). Pleistocéní permafrost na území Československa [Pleistocene Permafrost in Czechoslovakia]. *Geografický časopis*, 38(2–3), 245–252.
- Czudek, T. (2005). *Vývoj reliéfu krajiny České republiky v kvartéru* [Quaternary Development of Landscape Relief of the Czech Republic]. Moravské zemské muzeum, Brno, Czech Republic.
- Delaloye, R., Lambiel, C. (2005). Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 59(2), 194–203. <https://doi.org/10.1080/00291950510020673>
- Dobiński, W. (1997). Distribution of mountain permafrost in the High Tatras based on freezing and thawing indices. *Biuletyn Peryglacjalny*, 36, 29–37.
- Dobiński, W. (2004). Wieloletnia zmarzlina w Tatrach: Geneza, cechy, ewolucja [Permafrost in the Tatra Mts.: Genesis, features, evolution]. *Przegląd Geograficzny*, 76(3), 327–343.

- Dobiński, W. (2005). Permafrost of the Carpathian and Balkan Mountains, eastern and southeastern Europe. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(4), 395–398. <https://doi.org/10.1002/ppp.524>
- Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Minár, J., Léanni, L., ASTER Team (2015). Geomorphological evidence and ^{10}Be exposure ages for the Last Glacial Maximum and deglaciation of the Velká and Malá Studená dolina valleys in the High Tatra Mountains, central Europe. *Quaternary Science Reviews*, 124(15 September 2015), 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.015>
- Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Křížek, M., Pluháčková, M., ASTER Team (2017). ^{10}Be exposure age chronology of the last glaciation of the Roháčská Valley in the Western Tatra Mountains, central Europe. *Geomorphology*, 293, Part A(September 2017), 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.012>
- Engel, Z., Křížek, M., Braucher, R., Uxa, T., Krause, D., ASTER Team (in revision). ^{10}Be exposure age for sorted polygons in the Sudetes Mountains. *Permafrost and Periglacial Processes*.
- Feuillet, T., Mercier, D., Decaulne, A., Cossart, E. (2012). Classification of sorted patterned ground areas based on their environmental characteristics (Skagafjörður, Northern Iceland). *Geomorphology*, 139–140(15 February 2012), 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.022>
- Gądek, B., Kędzia, S. (2008). Winter ground surface temperature regimes in the zone of sporadic discontinuous permafrost, Tatra Mountains (Poland and Slovakia). *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(3), 315–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.623>
- Gleason, K.J., Krantz, W.B., Caine, N., George, J.H., Gunn, R.D. (1986). Geometrical Aspects of Sorted Patterned Ground in Recurrently Frozen Soil. *Science*, 232(4747), 216–220. <https://doi.org/10.1126/science.232.4747.216>
- Goldthwait, R.P. (1976). Frost Sorted Patterned Ground: A Review. *Quaternary Research*, 6(1), 27–35. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(76\)90038-7](https://doi.org/10.1016/0033-5894(76)90038-7)
- Grab, S. (2002). Characteristics and palaeoenvironmental significance of relict sorted patterned ground, Drakensberg plateau, southern Africa. *Quaternary Science Reviews*, 21(14–15), 1729–1744. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00149-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00149-4)
- Gruber, S. (2012). Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6, 221–233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>
- Hallet, B., Prestrud, S. (1986). Dynamics of Periglacial Sorted Circles in Western Spitsbergen. *Quaternary Research*, 26(1), 81–99. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(86\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0033-5894(86)90085-2)
- Harris, C. (1982). The distribution and altitudinal zonation of periglacial landforms, Okstindan, Norway. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 26(3), 283–304.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M., Vonder Mühl, D. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92(3–4), 117–171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>
- Heyman, B.M., Heyman, J., Fickert, T., Harbor, J.M. (2013). Paleo-climate of the central European uplands during the last glacial maximum based on glacier mass-balance modeling. *Quaternary Research*, 79(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.09.005>
- Hjort, J., Luoto, M. (2006). Modelling patterned ground distribution in Finnish Lapland: an integration of topographical, ground and remote sensing information. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88(1), 19–29. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2006.00280.x>
- Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E., Etzelmüller, B., Luoto, M. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature Communications*, 9(1), 5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
- Holness, S.D. (2003). Sorted circles in the maritime Subantarctic, Marion Island. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(4), 337–347. <https://doi.org/10.1002/esp.430>
- Huijzer, B., Vandenbergh, J. (1998). Climatic reconstruction of the Weichselian Pleniglacial in northwestern and central Europe. *Journal of Quaternary Science*, 13(5), 391–417. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1417\(199809\)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(199809)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6)
- Isarin, R.F.B. (1997). Permafrost Distribution and Temperatures in Europe During the Younger Dryas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8(3), 313–333. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199709\)8:3<313::AID-PPP255>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199709)8:3<313::AID-PPP255>3.0.CO;2-E)
- Kling, J. (1998). The difference between sorted circle and polygon morphology and their distribution in two alpine areas, northern Sweden. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, 42(4), 439–452.
- Kotarba, A. (2007). Lodowce gruzowe i wały niwalne – efekt późnoglacialnej ewolucji rzeźby Tatr [Rock Glaciers and protalus ramparts – an effect of the Lateglacial evolution of the Tatra Mountains]. *Przegląd Geograficzny*, 79(2), 199–213.
- Křížek, M. (2007). Periglacial landforms above the alpine timberline in the High Sudetes. In Goudie, A.S., Kalvoda, J. (Eds). *Geomorphological Variations*. P3K, Praha, Czech Republic, 313–337.
- Křížek, M. (2016). Periglacial landforms of the Hrubý Jeseník Mountains. In Pánek, T., Hradecký, J. (Eds). *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. Springer, Cham, Switzerland, 277–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6_22
- Lafrenière, M.J., Lamoureux, S.F. (2019). Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews*, 191(April 2019), 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.018>
- Lindgren, A., Hugelius, G., Kuhry, P., Christensen, T.R., Vandenbergh, J. (2016). GIS-based Maps and Area Estimates of Northern Hemisphere Permafrost Extent during the Last Glacial Maximum. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(1), 6–16. <https://doi.org/10.1002/ppp.1851>

- Luo, D., Wu, Q., Jin, H., Marchenko, S.S., Lü, L., Gao, S. (2016). Recent changes in the active layer thickness across the northern hemisphere. *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 555. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5229-2>
- Makos, M. (2015). Deglaciation of the High Tatra Mountains. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(2), 317–335. <https://doi.org/10.18172/cig.2697>
- Makos, M., Nitychoruk, J., Zreda, M. (2013). The Younger Dryas climatic conditions in the Za Mnichem Valley (Polish High Tatra Mountains) based on exposure-age dating and glacier-climate modelling. *Boreas*, 42(3), 745–761. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00298.x>
- Marks, L., Gałazka, D., Woronko, B. (2016). Climate, environment and stratigraphy of the last Pleistocene glacial stage in Poland. *Quaternary International*, 420(28 October 2016), 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.047>
- Marvánek, O. (2010). Sorted patterned ground on the James Ross Island and its morphological diversity. *Acta Geographica Silesiana*, 7, 49–53.
- Niedźwiedz, T. (1992). Climate of the Tatra Mountains. *Mountain Research and Development*, 12(2), 131–146. <https://doi.org/10.2307/3673787>
- Niessen, A., Van Horssen, P., Koster, E.A. (1992). Altitudinal zonation of selected geomorphological phenomena in an alpine periglacial area (Abisko, Northern Sweden). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 74(2–3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/04353676.1992.11880361>
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., Zou, D. (2019a). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*, 193(June 2019), 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Obu, J., Westermann, S., Kääh, A., Bartsch, A. (2019b). *Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost*. University of Oslo, PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905512>
- Obu, J., Westermann, S., Kääh, A., Bartsch, A. (2019c). *Ground Temperature Map, 2000–2017, Antarctic*. University of Oslo, PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.902576>
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbáček, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., Ruiz-Fernández, J., Trigo, R. (2017). Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Science of The Total Environment*, 580(15 February 2017), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.030>
- Onaca, A., Ardelean, F., Urdea, P., Magori, B. (2017). Southern Carpathian rock glaciers: Inventory, distribution and environmental controlling factors. *Geomorphology*, 293, Part B(15 September 2017), 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.032>
- Pánek, T., Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Břežný, M., Škarpich, V., Zondervan, A. (2016). Cosmogenic age constraints on post-LGM catastrophic rock slope failures in the Tatra Mountains (Western Carpathians). *Catena*, 138(March 2016), 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.005>
- Peterson, R.A., Krantz, W.B. (2008). Differential frost heave model for patterned ground formation: Corroboration with observations along a North American arctic transect. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113, G03S04. <https://doi.org/10.1029/2007JG000559>
- Ping, C.L., Jastrow, J.D., Jorgenson, M.T., Michaelson, G.J., Shur, Y.L. (2015). Permafrost soils and carbon cycling. *Soil*, 1, 147–171. <https://doi.org/10.5194/soil-1-147-2015>
- Pribullová, A., Chmelík, M., Pecho, J. (2013). Air Temperature Variability in the High Tatra Mountains. In Kozák, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., Wyzga, B. (Eds). *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Springer, Berlin, Germany, 111–130. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_9
- Ray, R.J., Krantz, W.B., Caine, T.N., Gunn, R.D. (1983). A Model for Sorted Patterned-Ground Regularity. *Journal of Glaciology*, 29(102), 317–337. <https://doi.org/10.3189/S0022143000008376>
- Riseborough, D., Shiklomanov, N., Etzelmüller, B., Gruber, S., Marchenko, S. (2008). Recent Advances in Permafrost Modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2), 137–156. <https://doi.org/10.1002/ppp.615>
- Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Christiansen, H.H. (2010). Permafrost Thermal State in the Polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a Synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 106–116. <https://doi.org/10.1002/ppp.689>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat C.C., Vonk, J.E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Sekyra, J., Sekyra, Z. (1995). Recent Cryogenic processes. In Soukupová, L., Kociánová, M., Jeník, J., Sekyra, J. (Eds). *Arctic-alpine tundra in the Krkonoše, the Sudetes, Opera Corcontica*, 32, 31–37.
- Sekyra, J., Kociánová, M., Štursová, H., Kalenská, J., Dvořák, I., Svoboda, M. (2002). Frost phenomena in relationship to mountain pine. *Opera Corcontica*, 39, 69–114.
- Šafanda, J., Rajver, D. (2001). Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. *Global and Planetary Change*, 29(3–4), 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00093-5)
- Tóth, M., Magyari, E.K., Brooks, S.J., Braun, M., Buczkó, K., Bálint, M., Heiri, O. (2012). A chironomid-based reconstruction of late glacial summer temperatures in the southern Carpathians (Romania). *Quaternary Research*, 77(1), 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.09.005>

- Traczyk, A., Migoń, P. (2000). Cold-climate landform patterns in the Sudetes. Effects of lithology, relief and glacial history. *AUC Geographica*, 35, Supplementum, 185–210.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Scott Hosking, J., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R., Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature18645>
- Uxa, T., Mida, P. (2016). First results from thermal investigations of rock glaciers in the Slovak High Tatra Mountains, Western Carpathians. In Günther, F., Morgenstern, A. (Eds). *Proceedings of the 11th International Conference on Permafrost*. Potsdam, Germany, 1060–1061.
- Uxa, T., Mida, P. (2017). Ground surface thermal regime of rock glaciers in the High Tatra Mts., Slovakia. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017–1740.
- Vandenberghe, J. (2001). Permafrost During the Pleistocene in North West and Central Europe. In Paepe, R., Melnikov, V.P., Van Overloop, E., Gorokhov, V.D. (Eds). *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 185–194.
- Vandenberghe, J., French, H.M., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A.A., Jin, H., Cui, Z., Zhang, T., Wan, X. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas*, 43(3), 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- van Everdingen, R.O. (2005). *Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. Arctic Institute of North America, University of Calgary, Calgary, Canada.
- Washburn, A.L. (1980). Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth-Science Reviews*, 15(4), 327–402. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(80\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(80)90114-2)
- Wicky, J., Hauck, C. (2017). Numerical modelling of convective heat transport by air flow in permafrost talus slopes. *The Cryosphere*, 11, 1311–1325. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1311-2017>
- Wilhelm, K.R., Bockheim, J.G., Kung, S. (2015). Active Layer Thickness Prediction on the Western Antarctic Peninsula. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(2), 188–199. <https://doi.org/10.1002/ppp.1845>
- Wilhelm, K., Bockheim, J. (2016). Influence of soil properties on active layer thermal propagation along the western Antarctic Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(11), 1550–1563. <https://doi.org/10.1002/esp.3926>
- Zasadni, J., Kłapyta, P., Broś, E., Ivy-Ochs, S., Świąder, A., Christl, M., Balážovičová, L. (2020). Latest Pleistocene glacier advances and post-Younger Dryas rock glacier stabilization in the Mt. Kriváň group, High Tatra Mountains, Slovakia. *Geomorphology*, 358(1 June 2020), 107093. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107093>
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A., Brown, J. (2008). Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 31(1–2), 47–68. <https://doi.org/10.1080/10889370802175895>
- Zuber, A., Weise, S.M., Motyka, J., Osenbrück, K., Róžański, K. (2004). Age and flow pattern of groundwater in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from combined isotope, noble gas and chemical data. *Journal of Hydrology*, 286(1–4), 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.004>
- Žmudzka, E. (2011). Contemporary Climate Changes in the High Mountain Part of the Tatras. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development*, 15(1), 93–102. <https://doi.org/10.2478/v10288-012-0005-6>
- Žák, K., Richter, D.K., Filippi, M., Živor, R., Deininger, M., Mangini, A., Scholz, D. (2012). Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe. *Climate of the Past*, 8, 1821–1837. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1821-2012>

Seznam publikací zahrnutých do disertační práce

Disertační práce shrnuje výsledky sedmi článků publikovaných v mezinárodních vědeckých časopisech indexovaných v databázi Web-of-Science, které tvoří její přílohu.

Článek I Křížek, M., Krause, D., **Uxa, T.**, Engel, Z., Treml, T., Traczyk, A. (2019). Patterned ground above the alpine timberline in the High Sudetes, Central Europe. *Journal of Maps*, 15(2), 563–569. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1636890>

Autorský podíl (10 %): sběr dat, editace manuskriptu a map.

Článek II Křížek, M., **Uxa, T.** (2013). Morphology, Sorting and Microclimates of Relict Sorted Polygons, Krkonoše Mountains, Czech Republic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(4), 313–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1789>

Autorský podíl (50 %): sběr dat, GIS a statistické analýzy, interpretace výsledků, příprava obrázků a spolupráce na přípravě manuskriptu.

Článek III **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D., Hartvich, F., Tábořík, P., Kasprzak, M. (2019). Comment on ‘Geophysical approach to the study of a periglacial blockfield in a mountain area (Ztracené kameny, Eastern Sudetes, Czech Republic)’ by Stan *et al.* (2017). *Geomorphology*, 328(1 March 2019), 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.010>

Autorský podíl (30 %): sběr dat, rešerše literatury, statistické analýzy, (re)interpretace výsledků, příprava obrázku, příprava manuskriptu a korespondence s redakcí časopisu.

Článek IV **Uxa, T.**, Mida, P. (2017). Rock Glaciers in the Western and High Tatra Mountains, Western Carpathians. *Journal of Maps*, 13(2), 844–857. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1378136>

Autorský podíl (80 %): sběr dat, rešerše literatury, GIS a statistické analýzy, interpretace výsledků, příprava obrázků, kompilace mapy, příprava manuskriptu a korespondence s redakcí časopisu.

Článek V **Uxa, T.**, Mida, P., Křížek, M. (2017). Effect of Climate on Morphology and Development of Sorted Circles and Polygons. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(4), 663–674. <https://doi.org/10.1002/ppp.1949>

Autorský podíl (70 %): sběr dat, analýza půdních vzorků, rešerše literatury, GIS a statistické analýzy, interpretace výsledků, příprava obrázků, příprava manuskriptu a korespondence s redakcí časopisu.

Článek VI **Uxa, T.** (2017). Discussion on ‘Active Layer Thickness Prediction on the Western Antarctic Peninsula’ by Wilhelm *et al.* (2015). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(2), 493–498. <https://doi.org/10.1002/ppp.1888>

Autorský podíl (100 %).

Článek VII Hrbáček, F., **Uxa, T.** (2020). The evolution of a near-surface ground thermal regime and modeled active-layer thickness on James Ross Island, Eastern Antarctic Peninsula, in 2006–2016. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 141–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.2018>

Autorský podíl (50 %): měření tepelných vlastností půdních vzorků, modelování mocnosti činné vrstvy, rešerše literatury, interpretace výsledků a spolupráce na přípravě manuskriptu.

1 Úvod

Permafrost je půda, sediment či hornina, jejíž teplota dosahuje po dobu dvou a více po sobě jdoucích let hodnoty menší nebo rovné 0 °C. Většinou se však nevyskytuje přímo na zemském povrchu, neboť v jeho nadloží se obvykle nachází tzv. *činná vrstva*, kde teplota během léta stoupá nad 0 °C (van Everdingen, 2005). Celosvětově permafrost pokrývá ca. 19,1–24,7 milionů km² (14–19 %) exponovaného zemského povrchu, a to převážně v polárních, subpolárních a vysokohorských oblastech severní polokoule, kde se průměrné roční teploty vzduchu pohybují hluboko pod 0 °C (Zhang *et al.*, 2008; Gruber, 2012; Obu *et al.*, 2019a,b,c). Permafrost nicméně není neměnný ani věčný, jak by jeho název mohl naznačovat; naopak citlivě reaguje na klimatické změny (Riseborough *et al.*, 2008; Burn, 2013). Během kvartéru tak došlo k četným rozšířením a ústupům permafrostu v důsledku střídání glaciálů a interglaciálů i stadiálů a interstadiálů. Je odhadováno, že v posledním glaciálu permafrost na severní polokouli zaujímal až o ca. 40 % větší plochu než v současnosti (Lindgren *et al.*, 2016), což nastalo v období 25–17 ka, které je nyní označováno jako tzv. poslední maximum permafrostu (Last Permafrost Maximum [LPM]) (Vandenberghe *et al.*, 2014). K velkému rozšíření permafrostu došlo ještě během mladšího dryasu (12,9–11,7 ka), od té doby nicméně rychle ustupoval a svého stávajícího rozsahu dosáhl nejpozději na počátku holocénu (Vandenberghe, 2001). V současnosti však dochází ve většině oblastí k jeho degradaci v důsledku oteplování klimatu (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Biskaborn *et al.*, 2019).

Sezónní a roční teplotní změny ve svrchní části permafrostu a především opakované mrznutí a tání činné vrstvy vyvolávají četné teplotně či gravitačně podmíněné procesy, často vázané na objemové změny vody–ledu, které způsobují mrazové zvětrávání, deformace a pohyby půdy, jež při delším působení vedou k vývoji řady charakteristických tvarů reliéfu a podpovrchových struktur, které lze souhrnně označit jako *formy vázané na permafrost*. Jedny z nejhojněji se vyskytujících forem v oblastech se současným výskytem permafrostu jsou různé typy *strukturních půd* a *kamenné ledovce*, což je spolu s jejich charakteristickou povrchovou morfologií a často velkými rozměry předurčuje k tomu, že patří mezi nejlépe a nejvíce zachované formy i v oblastech bývalého výskytu permafrostu. Strukturní půdy a kamenné ledovce jsou proto velmi vhodné ke studiu bývalého a současného rozšíření permafrostu a souvisejících teplotních podmínek (Barsch, 1996; Ballantyne, 2018).

Většina oblastí se současným výskytem permafrostu zaznamenala v posledních desetiletích výrazný nárůst teploty (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Biskaborn *et al.*, 2019), což vyvolalo jeho degradaci a prohlubování činné vrstvy v rozsáhlých regionech, přičemž se očekává, že tento trend bude pokračovat i nadále a ovlivní další území (Chadburn *et al.*, 2017). To významně postihne také tamní krajinnou a ekosystémovou dynamiku, hydrologický a biogeochemický cyklus či technickou infrastrukturu (např. Ping *et al.*, 2015; Hjort *et al.*, 2018; Lafrenière & Lamoureux, 2019). Navíc se předpokládá, že uvolňování uhlíku z tajícího permafrostu oteplování klimatu dále urychlí v důsledku pozitivní zpětné vazby, což pravděpodobně přinese ještě dramatičtější změny, které mohou mít významné globální důsledky (Schuur *et al.*, 2015). Bez ohledu na nejistoty v současných projekcích vývoje permafrostu se předpokládá, že jeho budoucí plošné ztráty by v nejextrémnějších scénářích mohly dosáhnout podobného rozsahu jako v období po LPM (cf. Lindgren *et al.*, 2016; Chadburn *et al.*, 2017). Pozdně kvartérní vývoj permafrostu a klimatu lze proto chápat jako jistou analogii toho, co se v současnosti odehrává ve většině oblastí s výskytem permafrostu vlivem oteplování klimatu, a jako takový nám může napovědět, jaké mohou být jeho následky. Výzkum charakteristik a forem vázaných na permafrost a činnou vrstvu je proto nezbytný pro zhodnocení pozdně kvartérní dynamiky klimatu a krajiny napříč minulými i současnými oblastmi s výskytem permafrostu, pro předvídaní jejich budoucích změn, ale i pro zlepšení adaptačních opatření zmírňujících jejich případné negativní dopady. Důležitý je však i pro oblasti bez permafrostu, neboť řada změn může mít globální dopady.

Přes značné úsilí však pozorování stále zcela chybí nebo jsou nedostatečná, případně zavádějící, i v mnoha oblastech se současným výskytem permafrostu a ještě méně informací je přirozeně k dispozici z regionů, kde se permafrost vyskytoval v minulosti. V důsledku toho jsou naše znalosti v mnoha ohledech velmi kusé, což souvisí

i s tím, že dynamika permafrostu a činné vrstvy na lokální či regionální úrovni se může velmi lišit od kontinentálních či globálních trendů.

2 Cíle

Hlavním cílem práce je proto získat nové primární údaje o některých špatně prozkoumaných charakteristikách a formách permafrostu a činné vrstvy v oblastech převážně bývalého výskytu permafrostu ve vybraných středoevropských pohořích severně od Alp, ale i v oblastech současného výskytu permafrostu na souostroví Špicberky a v regionu Antarktického poloostrova, do kterých se v posledních letech soustředila většina českých výzkumných aktivit zaměřených na studium permafrostu a činné vrstvy. Výzkum oblastí s převážně bývalým výskytem permafrostu je zaměřen zejména na komplexní přeshraniční mapování a analýzu prostorového rozmístění a morfologie nejrozšířenějších forem vázaných na permafrost – strukturních půd a kamenných ledovců – a jejich interpretaci z hlediska minulého a potenciálně současného výskytu permafrostu a souvisejících teplotních podmínek ([Článek I](#), [Článek II](#), [Článek III](#) a [Článek IV](#)). Výzkum oblastí se současným výskytem permafrostu je orientován na analýzu prostorového rozmístění a morfologie strukturních půd, jejich dynamiky, chronologie a vztahu k současným environmentálním podmínkám, což má význam i z hlediska jejich využití pro rekonstrukce přírodního prostředí v oblastech s někdejší výskytem permafrostu ([Článek V](#)). Výzkum se však zaměřuje i na dlouhodobý monitoring a modelování teplotního režimu a mocnosti činné vrstvy, který je klíčový pro posouzení regionálních rozdílů dopadů klimatických změn na tuto důležitou složku kryosféry ([Článek VI](#) a [Článek VII](#)). Kromě nových či upravení dosavadních informací o bývalém a současném vývoji permafrostu a klimatu ve studovaných oblastech a jejich zasazení do širších výzkumných či regionálních souvislostí, které doplňují mozaiku stávajících znalostí, je cílem práce rovněž vyvinout a/nebo implementovat nové metodické postupy a přinést nové pohledy na formy vázané na permafrost, které zvýší jejich význam jako indikátorů pozdně kvartérních změn přírodního prostředí.

3 Zájmové oblasti a metody

Výzkum směřoval do oblastí bývalého výskytu permafrostu ve Vysokých Sudetech ([Článek I](#), [Článek II](#) a [Článek III](#)) a regionu jeho okrajového výskytu v Západních a Vysokých Tatrách ([Článek IV](#)), jakož i do míst se současnou přítomností permafrostu v prostoru severního Billefjordenu na souostroví Špicberky ([Článek V](#)) a na ostrovech Amstler a James Ross v regionu Antarktického poloostrova ([Článek VI](#) a [Článek VII](#)) ([Obrázek 1](#)). Dohromady tyto oblasti pokrývají široké rozpětí klimatických podmínek, které tvoří přechod mezi prostředím s minulým a současným výskytem permafrostu.

Ke sběru a analýze dat byla využita řada metod, z nichž většina byla aplikována přímo autorem disertační práce, a to v rozsahu deklarovaném u jednotlivých publikací (viz [Seznam publikací zahrnutých do disertační práce](#)). Jednalo se zejména o (i) terénní a distanční mapování minulých a současných tříděných a netříděných strukturních půd a kamenných ledovců; (ii) určování jejich polohových charakteristik z digitálního modelu terénu; (iii) a měření jejich povrchové i podpovrchové morfologie a vnitřní stavby *in situ* či s využitím leteckých snímků a digitálního modelu terénu; (iv) sběr půdních vzorků a určování jejich fyzikálních parametrů, jako je zrnitost, objemová hmotnost, vlhkost, tepelná vodivost a objemová tepelná kapacita; (v) měření teplot vzduchu a půdy; (vi) modelování mocnosti činné vrstvy pomocí analytických modelů; (vii) interpretace geofyzikálních měření; (viii) statistické analýzy; (ix) literární rešerše zaměřené na uvedení získaných výsledků do širších výzkumných a regionálních souvislostí; (x) a interpretace a syntézu výsledků. Prostorové analýzy byly prováděny s využitím software ArcGIS 10 (Environmental Systems Research Institute). Pro statistické analýzy a matematické modelování byly využito programů STATISTICA 9 (StatSoft) a Mathcad 14 (Parametric Technology Corporation).



Obrázek 1. Lokalizace zájmových oblastí na (A) severní a (B) jižní polokouli a jejich pozice (oranžové čtverce) v rámci (C) střední Evropy, (D) souostroví Špicberky a (E) oblasti Antarktického poloostrova. Globální mapy (A, B) vychází z dat Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (Amatulli *et al.*, 2018) a globálních vrstev dostupných na Natural Earth (<https://www.naturalearthdata.com>). Regionální mapy jsou založeny na doplňkových datech (C) CGIAR Consortium for Spatial Information (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata>), (D) Norwegian Polar Institute (<https://geodata.npolar.no>) a (E) Antarctic Digital Database (<https://www.add.scar.org>).

4 Výsledky, diskuse a závěry

Komplexní přeshraniční mapování převážně reliktních tříděných a netříděných strukturních půd ve Vysokých Sudech nad horní hranicí lesa, poprvé provedené **Článkem I**, vyústilo v jednu z mála takto detailních map, která vyobrazuje skutečné hranice areálů strukturních půd a nikoliv pouze jejich přítomnost či nepřítomnost v rámci čtvercové sítě o velikosti oka ve stovkách metrů až prvních kilometrů (cf. Niessen *et al.*, 1992; Hjort & Luoto, 2006; Feuillet *et al.*, 2012). Mapování potvrdilo, že strukturní půdy jsou nejrozšířenějšími formami vázanými na permafrost, které se zde vyskytují (cf. Křížek, 2007, 2016) a rovněž ukázalo, že nejvíce symetrické tvary, jako tříděné polygony a tříděné kruhy nebo rašelinné a půdní kopečky, se nacházejí převážně na plochých či mírně ukloněných površích vyšších nadmořských výšek, zatímco méně symetrické vzory, jako tříděné a netříděné pruhy, se obvykle vyskytují na poněkud strmějších svazích a v nižších nadmořských výškách. Dále bylo zjištěno, že tříděné strukturní půdy se vyskytují ve vyšších nadmořských výškách oproti netříděným strukturním půdám. To do značné míry odráží rozložení sklonu

svahů v alpinském bezlesí, které je charakterizováno rozsáhlými vrcholovými plošinami obklopenými strmějšími svahy, zároveň to však poukazuje na existenci charakteristického výškového uspořádání strukturních půd, jež odráží zvyšující se drsnost klimatických podmínek a ubývání vegetace směrem do vyšších nadmořských výšek (cf. Harris, 1982; Niessen *et al.*, 1992; Hjort & Luoto, 2006; Feuillet *et al.*, 2012) ke konci posledního glaciálu, kdy většina zdejších strukturních půd pravděpodobně vznikla (Sekyra & Sekyra, 1995; Traczyk & Migoń, 2000; Sekyra *et al.*, 2002). Vzhledem k tomu, že strukturní půdy se vyskytují v poměrně úzkém výškovém rozpětí *ca.* 1260–1555 m n. m., to ale také indikuje jejich vysokou citlivost na změny klimatických a environmentálních podmínek. To se promítá také do morfologie strukturních půd, jelikož Článek II zjistil, že tříděné polygony bývají lépe vyvinuté ve vyšších nadmořských výškách, protože zde byly po delší dobu vystaveny drsnějším klimatickým podmínkám. Ty způsobily, že hloubka mrznutí a tání (~činná vrstva) zde byla mělejší a cykly mrznutí a tání byly četnější a intenzivnější, což vedlo k vývoji menších, více vyklenutých a lépe vyříděných tříděných polygonů ve vyšších nadmořských výškách, zároveň to ale také pravděpodobně způsobilo jejich částečnou reaktivaci a tvorbu sekundárních center třídění během chladnějších období holocénu. Kromě toho Článek II dále naznačil, že vývoj tříděných strukturních půd pravděpodobně zahrnuje pozitivní zpětnou vazbu mezi jejich morfologií a mrazovou susceptibilitou substrátu, která je ovlivněna mikroklimatickými podmínkami.

Je pozoruhodné, že menší rozměry strukturních půd ve vyšší nadmořské výšce zjištěné Článkem II v případě reliktních tříděných polygonů ve Vysokých Sudetech jsou konzistentní s pozorováními Článku V v případě aktivních tříděných strukturních půd podobné morfologie v oblasti severního Billefjordenu na souostroví Špicberky, jakož i na ostrově Jamese Rosse v regionu východního Antarktického poloostrova (Marvánek, 2010) i v jiných oblastech se současným výskytem permafrostu (Kling, 1998). Naopak rozměry aktivních tříděných strukturních půd vykazují opačný trend v oblastech se sezónně zmrzlou půdou (Holness, 2003; Feuillet *et al.*, 2012). To dohromady ukazuje, že velikost strukturních půd úzce souvisí s hloubkou mrznutí a tání a že její výškové trendy v určité oblasti mohou naznačovat, zda se strukturní půdy vyvinuly v podmínkách permafrostu, nebo sezónně zmrzlé půdy, případně v jaké nadmořské výšce se hranice mezi permafrostem a sezónně zmrzlou půdou v době jejich vzniku nacházela. Souhrn dostupných hodnot poměrů povrchové velikosti a hloubky třídění u kruhových a polygonálních tříděných strukturních půd navíc ukázal, že tyto mají tendenci shlukovat se mezi hodnotami *ca.* 3,1–3,8, dříve predikovanými teoretickými modely vývoje strukturních půd (Ray *et al.*, 1983; Gleason *et al.*, 1986; Hallet & Prestrud, 1986; Peterson & Krantz, 2008), což indikuje, že povrchová velikost strukturních půd by mohla být využita pro odhad jejich hloubky třídění bez nutnosti pracného a časově náročného hloubení kopaných sond. Vzhledem k tomu, že hloubka třídění je reprezentativní pro hloubku mrznutí a tání a tím pádem také pro teplotní podmínky v období vývoje strukturních půd (*sensu* Hallet & Prestrud, 1986; Ballantyne & Harris, 1994), mělo by být snahou zaměřit se na paleoteplotní rekonstrukce využívající hloubku třídění (~hloubku mrznutí a tání), protože ty by mohly poskytnout hodnověrnější odhady teploty než tradiční empirické metody, které vycházejí ze současných teplot vzduchu v místech výskytu aktivních tříděných strukturních půd (Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018). Ty totiž mohou být zavádějící, jelikož Článek V rovněž poukázal na to, že většina jím analyzovaných strukturních půd pravděpodobně není v rovnováze se současnými klimatickými podmínkami a, byť jsou zjevně aktivní, pravděpodobně se vyvíjely během celého holocénu, tedy v podmínkách, které se mohly podstatně lišit od těch současných (cf. Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018). Dynamika strukturních půd se navíc také pravděpodobně liší v různých zeměpisných šířkách vlivem rozdílů v solární insolaci, což generuje odlišné termální režimy, včetně různého počtu a intenzity cyklů mrznutí a tání, a tím představuje další komplikaci pro empirické rekonstrukce, které obvykle využívají aktivní strukturní půdy z vysokých zeměpisných šířek jako analogy pro reliktní tvary ve středních zeměpisných šířkách (Ballantyne & Harris, 1994; Ballantyne, 2018).

Vzhledem k tomu, že vznik některých strukturních půd, jako velkých tříděných polygonů či sítí, je obvykle spojován s přítomností alespoň nesouvislého permafrostu a průměrnou roční teplotou vzduchu < -6 až -4 °C (Goldthwait, 1976; Washburn, 1980; Grab, 2002; Ballantyne, 2018), jejich hojný výskyt ve Vysokých Sudetech svědčí o tom, že permafrost s činnou vrstvou o mocnosti až *ca.* 1,5–2 m se zde ve velké míře nacházel ke konci posledního glaciálu

a že snížení průměrné roční teploty vzduchu tehdy dosáhlo alespoň -8 až -4 °C. Vzhledem k tomu, že se jedná o minimální snížení teploty, je tento odhad v souladu s dříve udávanými hodnotami *ca.* -12 až -8 °C založenými na jiných charakteristikách a formách vázaných na permafrost a modelování hmotové bilance ledovců (Czudek, 1986; Chmal & Traczyk, 1993; Heyman *et al.*, 2013) a rovněž je konzistentní i s minimálním poklesem teploty *ca.* -8 až $-4,5$ °C rekonstruovaným z podzemních vod a teplotních profilů z hlubokých vrtů v okolních nížinách (Šafanda & Rajver, 2001; Zuber *et al.*, 2004; Corcho Alvarado *et al.*, 2011). V současnosti se však ve Vysokých Sudetech pravděpodobně žádný permafrost nenachází, jelikož Článek III potvrdil jeho absenci i ve vysoko položených kamenných mořích, která obvykle poskytují vůbec nejvhodnější prostředí pro jeho potenciální uchování, avšak zdejší kamenná moře mají spíše malý vertikální rozsah a navíc jsou poměrně mělká, což brání rozvoji vnitřní cirkulace vzduchu a tím pádem i vytvoření negativních teplotních anomálií vůči okolnímu vzduchu (*sensu* Delaloye & Lambiel, 2005; Wicky & Hauck, 2017).

Naopak Článek IV, který představil první komplexní přeshraniční mapu kamenných ledovců v Západních a Vysokých Tatrách, a jako takový doplnil obdobné, dříve provedené výzkumy z jiných evropských pohoří, jako Alp, Pyrenejí, Skandinávského pohoří či Jižních Karpat, naznačil, že permafrost se zde pravděpodobně nesouvisle vyskytuje i dnes v nadmořské výšce nad *ca.* 2000 m n. m. soudě dle polohy čel intaktních kamenných ledovců. Jeho výskyt se nicméně vyznačuje značnou prostorovou variabilitou podmíněnou zejména orientací vůči světovým stranám a charakterem krajinného pokryvu, což potvrzují i ojedinělá podpovrchová teplotní měření (např. Gądek & Kędzia, 2008; Uxa & Mida, 2016, 2017). Tato úroveň je mírně nad dříve navrženou průměrnou nadmořskou výškou nesouvislého permafrostu v hladině 1930 m n. m. vycházející z polohy nulové izotermy průměrné roční teploty vzduchu (Dobiński, 1997, 2004, 2005), což může být částečně dáno odlišnými metodikami. Na druhou stranu dřívější odhad (Dobiński, 1997, 2004, 2005) byl založen na teplotách vzduchu z let 1985–1989 či 1985–1994, kdy bylo klima mírně chladnější, neboť průměrná teplota vzduchu zde od 60. let 20. století rostla v průměru o $0,02$ °C rok⁻¹ (Žmudzka, 2011; Pribullová *et al.*, 2013). Za předpokladu vertikálního teplotního gradientu $0,0055$ °C m⁻¹ (*sensu* Niedźwiedz, 1992) by tak během 20 až 30 let došlo ke zvýšení úrovně nulové izotermy z 1930 m n. m. na 2003 až 2039 m n. m. nebo dokonce výše, neboť oteplování v 80. letech 20. století ještě zrychlilo (Žmudzka, 2011), což dobře odpovídá skutečnosti, že podpovrchové teploty v kamenných ledovcích zde bývají v průměru mírně nižší než teploty vzduchu (Uxa & Mida, 2016, 2017). Zároveň to ale také ospravedlňuje výše položenou úroveň spodní hranice nesouvislého permafrostu ve srovnání s dřívějším odhadem (Dobiński, 1997, 2004, 2005).

Článek IV dle polohy čel reliktních kamenných ledovců dále určil, že spodní hranice nesouvislého permafrostu se zde na přelomu pleistocénu a holocénu, kdy kamenné ledovce pravděpodobně vznikly (Kotarba, 2007; Zasadni *et al.*, 2020), nacházela okolo *ca.* 1400 m n. m. a související pokles průměrné roční teploty vzduchu tehdy dosáhl alespoň $-5,4$ °C, což je v dobrém souladu s hodnotami *ca.* -7 až -6 °C založenými na modelování hmotové bilance ledovců (Makos *et al.*, 2013). Podobně Zasadni *et al.* (2020) uvažovali, že mladodryasové kamenné ledovce by se měly nacházet ve výškovém rozpětí 1320–1520 m n. m. za předpokladu snížení průměrné roční teploty vzduchu -5 až -4 °C. Nicméně uvedení autoři numericky datovali pouze malé kamenné ledovce ve výškách *ca.* 1800–2000 m n. m., které vznikly 11.9–10.4 ka, tedy převážně až na počátku holocénu (Zasadni *et al.*, 2020), kdy již bylo klima poněkud teplejší (Tóth *et al.*, 2012), v důsledku čehož stanovili spodní hranici nesouvislého permafrostu *ca.* 1800 m n. m. a snížení teploty $-1,6$ °C, nebo $-5,3$ °C při uvažování zvýšení roční amplitudy teploty vzduchu (Zasadni *et al.*, 2020). Dále předpokládali, že kamenné ledovce v nižších nadmořských výškách vznikly v období před mladším dryasem, pro což argumentovali tím, že permafrost ve výškách *ca.* <1600 m n. m. údajně zmizel mnohem dříve dle přítomnosti tzv. rozsáhlého čela kamenného ledovce na bázi akumulace skalního říčení v 1620 m n. m. (Zasadni *et al.*, 2020) datovaného do doby $15,6 \pm 0,7$ ka (Engel *et al.*, 2015; Pánek *et al.*, 2016). Nicméně tato akumulace je jinými studiemi považována výhradně za produkt skalního říčení (Engel *et al.*, 2015; Pánek *et al.*, 2016) a není zahrnuta ani v mapě kamenných ledovců publikované Článkem IV a jako taková tedy pravděpodobně nemá žádný význam z hlediska někdejšího rozšíření permafrostu. Pokles teploty v období jejího vzniku je navíc odhadován na

ca. -10 až -9 °C (Makos, 2015), což by implikovalo, že permafrost se tehdy nacházel mnohem níže a určitě pod hranicí ca. 1500 m n. m., jak naznačují data z kryogenních jeskynních karbonátů (Žák *et al.*, 2012). V neposlední řadě je nezbytné zmínit, že kamenné ledovce v Západních Tatrách datované do mladšího dryasu sestupují do výšky ca. 1400 m n. m., což ukazuje, že spodní hranice permafrostu, jakož i pokles průměrné roční teploty vzduchu stanovená Článkem IV je opodstatněná.

Reliktní i intaktní kamenné ledovce a tím pádem také minulá i současná spodní hranice nesouvislého permafrostu se v průměru nacházejí o ca. 400–600 m níže než v Alpách a o ca. 100–250 m níže než v Jižních Karpatech, což je dáno vyšší kontinentalitou a nižšími teplotami danými vyšší zeměpisnou šířkou (*sensu* Dobiński, 2005; Onaca *et al.*, 2017). Je však třeba podotknout, že odvozené spodní hranice permafrostu by měly být chápány jako předběžné, jelikož kamenné ledovce umožňují spíše orientační odhad potenciálního rozšíření permafrostu, který má tendenci nadhodnocovat jeho výskyt v místech nepokrytých kamennou sutí. Podpovrchová teplotní měření doplněná geofyzikálním průzkumem jsou proto nezbytná pro stanovení zdejších zákonitostí výskytu permafrostu, což pomůže zlepšit odhady jeho minulého i současného rozšíření a případně zhodnotit jeho reakci na současné oteplování klimatu.

Teplotní měření by měla být co možná nejdelší, jak ukazuje Článek VII, který analyzoval jednu z nejdelších časových řad (2006–2016) teploty vzduchu a půdy a modelované mocnosti činné vrstvy pomocí Stefanova a Kudryavtsevova modelu v oblasti Antarktického poloostrova i celé Antarktidě, ale i desetiletá řada se ukázala jako příliš krátká na to, aby zachytila statisticky významné trendy. Navzdory tomu však bylo zaznamenáno ztenčování činné vrstvy podobné jiným lokalitám v okolí Antarktického poloostrova, které bylo způsobeno především klesajícími letními teplotami vzduchu i půdy a zkracováním sezóny tání, k čemuž v oblasti dochází přibližně od roku 2000 (Turner *et al.*, 2016; Oliva *et al.*, 2017) a její dynamika se tak značně liší od většiny oblastí s výskytem permafrostu na severní polokouli, kde teploty vzduchu a půdy a mocnost činné vrstvy během posledních desetiletí vytrvale stoupají (Harris *et al.*, 2009; Romanovsky *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2016; Biskaborn *et al.*, 2019). Analytické modely použité pro odhad mocnosti činné vrstvy reprodukovaly její tloušťku s menšími chybami než ve většině předchozích studií. Navíc to byla jejich vůbec první úspěšná aplikace v Antarktidě poté, co byly chybně využity dvěma předchozími studii (Wilhelm *et al.*, 2015; Wilhelm & Bockheim, 2016), které modelovaly nerealisticky mocné činné vrstvy na ostrově Amsler v západní části regionu Antarktického poloostrova, jež nadhodnocovaly skutečné hodnoty až o stovky procent a tím v podstatě vylučovaly přítomnost přípovrchového permafrostu, což vyvolávalo mylný dojem extrémního oteplování a jako takové silně zkreslovalo skutečný stav klimatu v regionu, na což poukázal Článek VI. Článek VI a Článek VII také upozornil na některé důležité aspekty modelování permafrostu a činné vrstvy, včetně fázových změn a vlivu latentního tepla nebo parametrizací a korekcí modelů, což je užitečné, jelikož tyto modely jsou stále více dostupné nejen pro výzkumníky zabývající se permafrostem, ale i pro odborníky z jiných disciplín, kteří pracují v oblastech s výskytem permafrostu.

Článek I, Článek II, Článek IV a Článek V prokázal, že strukturní půdy a kamenné ledovce jsou velmi citlivé na změny klimatických a environmentálních podmínek a že tyto podmínky mohou být zpětně rekonstruovány i z forem vzniklých během posledního glaciálu či raného holocénu, což má velký význam pro oblasti se současným výskytem permafrostu, zejména to však ukazuje na jejich značný potenciál pro rekonstrukce přírodních podmínek v oblastech, kde se permafrost vyskytoval v minulosti a které si jednoznačně zaslouží další výzkum. Ten by měl být orientován zejména na přesnější odvození teplotních podmínek spojených se vznikem strukturních půd i kamenných ledovců a na jejich důkladné časové zařazení pomocí metod numerického datování. Dosud bylo jejich stáří pouze odhadováno s využitím znalostí o místním zalednění a/nebo paleoklimatu, zatímco absolutní datování prakticky zcela chybělo, a to i kvůli potenciálním nepřesnostem v důsledku jejich možného polycyklického vývoje či morfologických změn dlouho po jejich vzniku. V poslední době se nicméně začala objevovat numerická data alespoň pro kamenné ledovce v Západních a Vysokých Tatrách (Engel *et al.*, 2017; Zasadni *et al.*, 2020), první data pro strukturní půdy ve Vysokých Sudetech by se však rovněž měla brzy objevit (Engel *et al.*, in revision). Velmi žádoucí je také jejich korelace s lokálními horskými zaledněními a dynamikou permafrostu v okolních nížinách, aby bylo možné lépe pochopit pozdě

kvartérní vývoj krajiny v těchto regionech. Chování permafrostu v horách a nížinách se totiž pravděpodobně velmi lišilo jak prostorově, tak časově, avšak tato problematika dosud nebyla téměř řešena, jelikož většina chronologických dat z forem vázaných na permafrost ve středoevropském prostoru severně od Alp stále pochází téměř výhradně z nížinných oblastí (Isarin, 1997; Huijzer & Vandenberghe, 1998; Czudek, 2005; Marks *et al.*, 2016). Monitoring teploty vzduchu a půdy a/nebo mocnosti činné vrstvy, s nímž bylo započato na ostrově Jamese Rosse (Článek VII) a ve Vysokých Tatrách (Uxa & Mida, 2016, 2017), by rovněž měl pokračovat, aby se prodloužily dosavadní časové řady a bylo tak možné provést důkladnější analýzu trendů, která více napoví o dynamice činné vrstvy a permafrostu v těchto oblastech a faktorech, které ji ovlivňují, což je nezbytné pro posouzení regionálních rozdílů dopadů klimatických změn na tyto důležité složky kryosféry.

Závěrem lze konstatovat, že disertační práce přispěla k lepšímu pochopení minulé i současné dynamiky zkoumaných oblastí, což dokládá, že charakteristiky a formy vázané na permafrost a činnou vrstvu jsou cennými indikátory pozdně kvartérních změn přírodního prostředí, jsou-li podrobně analyzovány (Článek I, Článek II, Článek IV, Článek V a Článek VII) a správně interpretovány (Článek III a Článek VI). Nově zavedené metodické postupy a nové pohledy na formy vázané na permafrost, jakož i nově vybudované observační sítě kromě toho zvyšují šíři informací, které lze z minulých a současných charakteristik a forem vázaných na permafrost a činnou vrstvu získat, a proto mají výsledky práce také značný metodický a genetický aspekt, jakož i význam pro obecné koncepty vývoje oblastí s výskytem permafrostu. Přesto by se na ně mělo pohlížet spíše jako na dílčí, ale důležité kroky, které připravují půdu pro navazující výzkum.

5 Seznam použité literatury

- Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M.-N., Parmentier, B., Ranipeta, A., Malczyk, J., Jetz, W. (2018). *A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling, links to files in GeoTIFF format*. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.867115>
- Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Hoboken, USA.
- Ballantyne, C.K., Harris, C. (1994). *The Periglaciation of Great Britain*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Springer, Berlin, Germany.
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A., Schoeneich, P., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W.L., Christiansen, H.H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaksen, K., Ishikawa, M., Johansson, M., Johannsson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kröger, T., Lambiel, C., Lanckman, J.-P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A.B.K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., Lantuit, H. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10(1), 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Burn, C.R. (2013). Permafrost. In Elias, S.A., Mock, C.J. (Eds). *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2nd Edition. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 464–471. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00099-6>
- Chadburn, S.E., Burke, E.J., Cox, P.M., Friedlingstein, P., Hugelius, G., Westermann, S. (2017). An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 7(5), 340–344. <https://doi.org/10.1038/nclimate3262>
- Chmal, H., Traczyk, A. (1993). Plejstocénskie lodowce gruzowe w Karkonoszach [Pleistocene Rock Glaciers in the Karkonosze Mts.]. *Czasopismo Geograficzne*, 64(3–4), 253–263.
- Corcho Alvarado, J.A., Leuenberger, M., Kipfer, R., Paces, T., Purtschert, R. (2011). Reconstruction of past climate conditions over central Europe from groundwater data. *Quaternary Science Reviews*, 30(23–24), 3423–3429. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.09.003>
- Czudek, T. (1986). Pleistocénní permafrost na území Československa [Pleistocene Permafrost in Czechoslovakia]. *Geografický časopis*, 38(2–3), 245–252.
- Czudek, T. (2005). *Vývoj reliéfu krajiny České republiky v kvartéru* [Quaternary Development of Landscape Relief of the Czech Republic]. Moravské zemské muzeum, Brno, Czech Republic.
- Delaloye, R., Lambiel, C. (2005). Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 59(2), 194–203. <https://doi.org/10.1080/00291950510020673>
- Dobiński, W. (1997). Distribution of mountain permafrost in the High Tatras based on freezing and thawing indices. *Biuletyn Peryglacjalny*, 36, 29–37.

- Dobiński, W. (2004). Wieloletnia zmarzlina w Tatrach: Geneza, cechy, ewolucja [Permafrost in the Tatra Mts.: Genesis, features, evolution]. *Przegląd Geograficzny*, 76(3), 327–343.
- Dobiński, W. (2005). Permafrost of the Carpathian and Balkan Mountains, eastern and southeastern Europe. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(4), 395–398. <https://doi.org/10.1002/ppp.524>
- Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Minár, J., Léanni, L., ASTER Team (2015). Geomorphological evidence and ^{10}Be exposure ages for the Last Glacial Maximum and deglaciation of the Velká and Malá Studená dolina valleys in the High Tatra Mountains, central Europe. *Quaternary Science Reviews*, 124(15 September 2015), 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.015>
- Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Křížek, M., Pluháčková, M., ASTER Team (2017). ^{10}Be exposure age chronology of the last glaciation of the Roháčská Valley in the Western Tatra Mountains, central Europe. *Geomorphology*, 293, Part A(September 2017), 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.012>
- Engel, Z., Křížek, M., Braucher, R., Uxa, T., Krause, D., ASTER Team (in revision). ^{10}Be exposure age for sorted polygons in the Sudetes Mountains. *Permafrost and Periglacial Processes*.
- Feuillet, T., Mercier, D., Decaulne, A., Cossart, E. (2012). Classification of sorted patterned ground areas based on their environmental characteristics (Skagafjörður, Northern Iceland). *Geomorphology*, 139–140(15 February 2012), 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.022>
- Gądek, B., Kędzia, S. (2008). Winter ground surface temperature regimes in the zone of sporadic discontinuous permafrost, Tatra Mountains (Poland and Slovakia). *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(3), 315–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.623>
- Gleason, K.J., Krantz, W.B., Caine, N., George, J.H., Gunn, R.D. (1986). Geometrical Aspects of Sorted Patterned Ground in Recurrently Frozen Soil. *Science*, 232(4747), 216–220. <https://doi.org/10.1126/science.232.4747.216>
- Goldthwait, R.P. (1976). Frost Sorted Patterned Ground: A Review. *Quaternary Research*, 6(1), 27–35. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(76\)90038-7](https://doi.org/10.1016/0033-5894(76)90038-7)
- Grab, S. (2002). Characteristics and palaeoenvironmental significance of relict sorted patterned ground, Drakensberg plateau, southern Africa. *Quaternary Science Reviews*, 21(14–15), 1729–1744. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00149-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00149-4)
- Gruber, S. (2012). Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6, 221–233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>
- Hallet, B., Prestrud, S. (1986). Dynamics of Periglacial Sorted Circles in Western Spitsbergen. *Quaternary Research*, 26(1), 81–99. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(86\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0033-5894(86)90085-2)
- Harris, C. (1982). The distribution and altitudinal zonation of periglacial landforms, Okstindan, Norway. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 26(3), 283–304.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M., Vonder Mühl, D. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92(3–4), 117–171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>
- Heyman, B.M., Heyman, J., Fickert, T., Harbor, J.M. (2013). Paleo-climate of the central European uplands during the last glacial maximum based on glacier mass-balance modeling. *Quaternary Research*, 79(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.09.005>
- Hjort, J., Luoto, M. (2006). Modelling patterned ground distribution in Finnish Lapland: an integration of topographical, ground and remote sensing information. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88(1), 19–29. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2006.00280.x>
- Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E., Etzelmüller, B., Luoto, M. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature Communications*, 9(1), 5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
- Holness, S.D. (2003). Sorted circles in the maritime Subantarctic, Marion Island. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(4), 337–347. <https://doi.org/10.1002/esp.430>
- Huijzer, B., Vandenberghe, J. (1998). Climatic reconstruction of the Weichselian Pleniglacial in northwestern and central Europe. *Journal of Quaternary Science*, 13(5), 391–417. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1417\(199809\)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(199809)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6)
- Isarin, R.F.B. (1997). Permafrost Distribution and Temperatures in Europe During the Younger Dryas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8(3), 313–333. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199709\)8:3<313::AID-PPP255>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199709)8:3<313::AID-PPP255>3.0.CO;2-E)
- Kling, J. (1998). The difference between sorted circle and polygon morphology and their distribution in two alpine areas, northern Sweden. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, 42(4), 439–452.
- Kotarba, A. (2007). Lodowce gruzowe i wały niwalne – efekt późnoglacialnej ewolucji rzeźby Tatr [Rock Glaciers and protalus ramparts – an effect of the Lateglacial evolution of the Tatra Mountains]. *Przegląd Geograficzny*, 79(2), 199–213.
- Křížek, M. (2007). Periglacial landforms above the alpine timberline in the High Sudetes. In Goudie, A.S., Kalvoda, J. (Eds). *Geomorphological Variations*. P3K, Praha, Czech Republic, 313–337.
- Křížek, M. (2016). Periglacial landforms of the Hrubý Jeseník Mountains. In Pánek, T., Hradecký, J. (Eds). *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. Springer, Cham, Switzerland, 277–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6_22
- Lafrenière, M.J., Lamoureux, S.F. (2019). Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews*, 191(April 2019), 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.018>

- Lindgren, A., Hugelius, G., Kuhry, P., Christensen, T.R., Vandenberghe, J. (2016). GIS-based Maps and Area Estimates of Northern Hemisphere Permafrost Extent during the Last Glacial Maximum. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(1), 6–16. <https://doi.org/10.1002/ppp.1851>
- Luo, D., Wu, Q., Jin, H., Marchenko, S.S., Lü, L., Gao, S. (2016). Recent changes in the active layer thickness across the northern hemisphere. *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 555. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5229-2>
- Makos, M. (2015). Deglaciation of the High Tatra Mountains. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(2), 317–335. <https://doi.org/10.18172/cig.2697>
- Makos, M., Nitychoruk, J., Zreda, M. (2013). The Younger Dryas climatic conditions in the Za Mnichem Valley (Polish High Tatra Mountains) based on exposure-age dating and glacier-climate modelling. *Boreas*, 42(3), 745–761. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00298.x>
- Marks, L., Gałazka, D., Woronko, B. (2016). Climate, environment and stratigraphy of the last Pleistocene glacial stage in Poland. *Quaternary International*, 420(28 October 2016), 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.047>
- Marvánek, O. (2010). Sorted patterned ground on the James Ross Island and its morphological diversity. *Acta Geographica Silesiana*, 7, 49–53.
- Niedźwiedz, T. (1992). Climate of the Tatra Mountains. *Mountain Research and Development*, 12(2), 131–146. <https://doi.org/10.2307/3673787>
- Niessen, A., Van Horsen, P., Koster, E.A. (1992). Altitudinal zonation of selected geomorphological phenomena in an alpine periglacial area (Abisko, Northern Sweden). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 74(2–3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/04353676.1992.11880361>
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., Zou, D. (2019a). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*, 193(June 2019), 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Obu, J., Westermann, S., Kääh, A., Bartsch, A. (2019b). *Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost*. University of Oslo, PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905512>
- Obu, J., Westermann, S., Kääh, A., Bartsch, A. (2019c). *Ground Temperature Map, 2000–2017, Antarctic*. University of Oslo, PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.902576>
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbáček, F., Hernández, A., Nývt, D., Pereira, P., Ruiz-Fernández, J., Trigo, R. (2017). Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Science of The Total Environment*, 580(15 February 2017), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.030>
- Onaca, A., Ardelean, F., Urdea, P., Magori, B. (2017). Southern Carpathian rock glaciers: Inventory, distribution and environmental controlling factors. *Geomorphology*, 293, Part B(15 September 2017), 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.032>
- Pánek, T., Engel, Z., Mentlík, P., Braucher, R., Břežný, M., Škarpich, V., Zondervan, A. (2016). Cosmogenic age constraints on post-LGM catastrophic rock slope failures in the Tatra Mountains (Western Carpathians). *Catena*, 138(March 2016), 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.005>
- Peterson, R.A., Krantz, W.B. (2008). Differential frost heave model for patterned ground formation: Corroboration with observations along a North American arctic transect. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113, G03S04. <https://doi.org/10.1029/2007JG000559>
- Ping, C.L., Jastrow, J.D., Jorgenson, M.T., Michaelson, G.J., Shur, Y.L. (2015). Permafrost soils and carbon cycling. *Soil*, 1, 147–171. <https://doi.org/10.5194/soil-1-147-2015>
- Pribullová, A., Chmelík, M., Pecho, J. (2013). Air Temperature Variability in the High Tatra Mountains. In Kozák, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., Wyzga, B. (Eds). *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Springer, Berlin, Germany, 111–130. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_9
- Ray, R.J., Krantz, W.B., Caine, T.N., Gunn, R.D. (1983). A Model for Sorted Patterned-Ground Regularity. *Journal of Glaciology*, 29(102), 317–337. <https://doi.org/10.3189/S0022143000008376>
- Riseborough, D., Shiklomanov, N., Etzelmüller, B., Gruber, S., Marchenko, S. (2008). Recent Advances in Permafrost Modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2), 137–156. <https://doi.org/10.1002/ppp.615>
- Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Christiansen, H.H. (2010). Permafrost Thermal State in the Polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a Synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 106–116. <https://doi.org/10.1002/ppp.689>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat C.C., Vonk, J.E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Sekyra, J., Sekyra, Z. (1995). Recent Cryogenic processes. In Soukupová, L., Kociánová, M., Jeník, J., Sekyra, J. (Eds). *Arctic-alpine tundra in the Krkonoše, the Sudetes, Opera Corcontica*, 32, 31–37.
- Sekyra, J., Kociánová, M., Štursová, H., Kalenská, J., Dvořák, I., Svoboda, M. (2002). Frost phenomena in relationship to mountain pine. *Opera Corcontica*, 39, 69–114.
- Šafanda, J., Rajver, D. (2001). Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. *Global and Planetary Change*, 29(3–4), 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00093-5)

- Tóth, M., Magyari, E.K., Brooks, S.J., Braun, M., Buczkó, K., Bálint, M., Heiri, O. (2012). A chironomid-based reconstruction of late glacial summer temperatures in the southern Carpathians (Romania). *Quaternary Research*, 77(1), 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.09.005>
- Traczyk, A., Migoń, P. (2000). Cold-climate landform patterns in the Sudetes. Effects of lithology, relief and glacial history. *AUC Geographica*, 35, Supplementum, 185–210.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Scott Hosking, J., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R., Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature18645>
- Uxa, T., Mida, P. (2016). First results from thermal investigations of rock glaciers in the Slovak High Tatra Mountains, Western Carpathians. In Günther, F., Morgenstern, A. (Eds). *Proceedings of the 11th International Conference on Permafrost*. Potsdam, Germany, 1060–1061.
- Uxa, T., Mida, P. (2017). Ground surface thermal regime of rock glaciers in the High Tatra Mts., Slovakia. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017–1740.
- Vandenberghe, J. (2001). Permafrost During the Pleistocene in North West and Central Europe. In Paepe, R., Melnikov, V.P., Van Overloop, E., Gorokhov, V.D. (Eds). *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 185–194.
- Vandenberghe, J., French, H.M., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A.A., Jin, H., Cui, Z., Zhang, T., Wan, X. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas*, 43(3), 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- van Everdingen, R.O. (2005). *Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. Arctic Institute of North America, University of Calgary, Calgary, Canada.
- Washburn, A.L. (1980). Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth-Science Reviews*, 15(4), 327–402. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(80\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(80)90114-2)
- Wicky, J., Hauck, C. (2017). Numerical modelling of convective heat transport by air flow in permafrost talus slopes. *The Cryosphere*, 11, 1311–1325. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1311-2017>
- Wilhelm, K.R., Bockheim, J.G., Kung, S. (2015). Active Layer Thickness Prediction on the Western Antarctic Peninsula. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(2), 188–199. <https://doi.org/10.1002/ppp.1845>
- Wilhelm, K., Bockheim, J. (2016). Influence of soil properties on active layer thermal propagation along the western Antarctic Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(11), 1550–1563. <https://doi.org/10.1002/esp.3926>
- Zasadni, J., Kłapyta, P., Broś, E., Ivy-Ochs, S., Świąder, A., Christl, M., Balážovičová, L. (2020). Latest Pleistocene glacier advances and post-Younger Dryas rock glacier stabilization in the Mt. Kriváň group, High Tatra Mountains, Slovakia. *Geomorphology*, 358(1 June 2020), 107093. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107093>
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A., Brown, J. (2008). Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 31(1–2), 47–68. <https://doi.org/10.1080/10889370802175895>
- Zuber, A., Weise, S.M., Motyka, J., Osenbrück, K., Róžański, K. (2004). Age and flow pattern of groundwater in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from combined isotope, noble gas and chemical data. *Journal of Hydrology*, 286(1–4), 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.004>
- Žmudzka, E. (2011). Contemporary Climate Changes in the High Mountain Part of the Tatras. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development*, 15(1), 93–102. <https://doi.org/10.2478/v10288-012-0005-6>
- Žák, K., Richter, D.K., Filippi, M., Živor, R., Deininger, M., Mangini, A., Scholz, D. (2012). Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe. *Climate of the Past*, 8, 1821–1837. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1821-2012>

Curriculum vitae

Personal details

Name RNDr. Tomáš Uxa
Birthdate 24 November 1986
E-mails tomas.uxa@natur.cuni.cz, uxa@ig.cas.cz

Education

2011–present Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Thesis: *Past and Present Permafrost and Active-Layer Phenomena as Indicators of Late Quaternary Environmental Changes*
Supervisor: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

2016 RNDr., Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Thesis: *Morfologie fosilních tříděných strukturních půd Krkonoš* [Structure of non-active sorted patterned ground in the Giant Mts.]
Supervisor: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

2009–2011 Mgr., Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Thesis: *Morfologie fosilních tříděných strukturních půd Krkonoš* [Structure of non-active sorted patterned ground in the Giant Mts.]
Supervisor: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

2006–2009 Bc., Geography and Cartography, Faculty of Science, Charles University
Thesis: *Třídění strukturních půd Krkonoš* [Sorting of patterned ground in the Giant Mts.]
Supervisor: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

Employment

2016–present Department of Geothermics, Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences
2017–2019 Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University

Publications

Author or co-author of 8 publications in international scientific journals, 1 monograph, 1 patent, 7 outreach papers, and 41 contributions in conference or seminar proceedings (for detailed publication history see [List of publications](#)). A brief scientometrics as of 9 June 2020 is as follows:

[Web of Science](#) 7 publications, 19 citations (15 excluding self-citations), *h*-index 3

[Scopus](#) 7 publications, 16 citations (11 excluding self-citations), *h*-index 3

Projects

Principal investigator, co-investigator or team member of a total of 14 projects supported by the Czech Science Foundation, the Technology Agency of the Czech Republic, the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, the Charles University Grant Agency, or the Charles University.

2020–2022 TAČR TK02010092 Analysis of the geothermal energy potential at medium and large depths in the Czech Republic on the basis of available data (team member)

2019–2020 MŠMT EF16_013/0001792 RINGEN – Research Infrastructure Upgrade (team member)

2017–2019 GAČR GA17-21612S Patterned ground development and its implications for the Quaternary environment in Central Europe (team member)

2014–2016	GAUK 1312214 Spatial distribution, morphology and contemporary thermal regime of rock glaciers in the High Tatras (Slovakia) (co-investigator)
2012–2014	GAUK 674512 Thermal characteristics of patterned ground (principal investigator)
2014	123 PřF II Innovation of exercise in geomorphology: development of working procedures for basic morphometrical analyses (team member)
2008–2010	GAAV ČR KJB301110804 Recent activity of patterned ground in the selected areas of Central Europe (contract for work)
2018	SVV 260438 Dynamics of the environmental changes in times of climate change (team member)
2017	SVV 260438 Physical-geographical processes influenced by climate change (team member)
2016	SVV 260307 The influence of climate change on the dynamics of physical-geographical processes (team member)
2015	SVV 260203 Dynamics of the physical-geographical processes in times of climate change (team member)
2014	SVV 260078 Research of the dynamics of physical-geographical processes (team member)
2013	SVV 267202 Analysis of the dynamics of physical-geographical processes (team member)
2012	SVV 265212 Research of the processes of physical-geographical sphere (team member)

Reviewing

Author of 6 manuscript reviews for international (see [Publons](#)) or national scientific journals (4× Permafrost and Periglacial Processes, 2× Opera Corcontica) and 3 reviews of bachelor theses.

Awards

2009	National award for outstanding bachelor thesis in the field of geography (3rd place)
2009	Faculty award for outstanding bachelor thesis in the field of geography (1st to 2nd place)

Professional membership and positions

2020–present	Permafrost Young Researchers Network (regular member)
2018–present	Czech Association of Geomorphologists (regular member)
2016–present	International Permafrost Association (regular member)

Teaching experience

2012–2015	Periglacial and Glacial Geomorphology (~10–15 students) Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
2013–2014	Geomorphology – Exercise (~10–15 students) Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University

Foreign research stays

2012–2019	Geomorphological surveys and air and ground temperature monitoring in the Western and High Tatra Mts., Slovakia (1–3 weeks/year)
2014	Geomorphological surveys in the Northern Billefjorden and Longyearbyen area, Svalbard (3 weeks)
2013	Geomorphological and glaciological surveys in the Northern Billefjorden area, Svalbard (2 weeks)

Language skills

English	Upper-intermediate level (First Certificate in English – Level B2)
German	Elementary level (graduate exam)

List of publications

Scientific peer-reviewed articles

- (8) Hrbáček, F., Uxa, T. (2020). The evolution of a near-surface ground thermal regime and modeled active-layer thickness on James Ross Island, Eastern Antarctic Peninsula, in 2006–2016. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 141–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.2018>
- (7) Křížek, M., Krause, D., Uxa, T., Engel, Z., Treml, T., Traczyk, A. (2019). Patterned ground above the alpine timberline in the High Sudetes, Central Europe. *Journal of Maps*, 15(2), 563–569. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1636890>
- (6) Uxa, T., Křížek, M., Krause, D., Hartvich, F., Tábořík, P., Kasprzak, M. (2019). Comment on ‘Geophysical approach to the study of a periglacial blockfield in a mountain area (Ztracené kameny, Eastern Sudetes, Czech Republic)’ by Stan *et al.* (2017). *Geomorphology*, 328(1 March 2019), 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.010>
- (5) Uxa, T., Mida, P. (2017). Rock Glaciers in the Western and High Tatra Mountains, Western Carpathians. *Journal of Maps*, 13(2), 844–857. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1378136>
- (4) Uxa, T., Mida, P., Křížek, M. (2017). Effect of Climate on Morphology and Development of Sorted Circles and Polygons. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(4), 663–674. <https://doi.org/10.1002/ppp.1949>
- (3) Uxa, T. (2017). Discussion on ‘Active Layer Thickness Prediction on the Western Antarctic Peninsula’ by Wilhelm *et al.* (2015). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(2), 493–498. <https://doi.org/10.1002/ppp.1888>
- (2) Křížek, M., Uxa, T. (2013). Morphology, Sorting and Microclimates of Relict Sorted Polygons, Krkonoše Mountains, Czech Republic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(4), 313–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1789>
- (1) Hanáček, M., Nývlt, D., Flašar, J., Stacke, V., Mida, P., Lehejček, J., Tóthová, G., Břežný, M., Procházková, B., Uxa, T., Křenovská, I. (2013). New methods to reconstruct clast transport history in different glacial sedimentary environments: Case study for Old Red sandstone clasts from polythermal Hørbyebreen and Bertilbreen valley glaciers, Central Svalbard. *Czech Polar Reports*, 3(2), 107–129. <https://doi.org/10.5817/CPR2013-2-13>

Monographs

- (1) Křížek, M., Uxa, T., Mida, P. (2016). *Praktikum morfometrických analýz reliéfu* [Practicum of Morphometric Analyses of Relief]. Karolinum, Praha, Czech Republic.

Patents

- (1) Křížek, M., Uxa, T., Pechačová, B. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. *Způsob identifikace regelačních cyklů* [Method of Identification of Freeze-Thaw Cycles]. Česká republika. Patentový spis CZ 304120 B6. 25.9.2013

Popularizing articles

- (7) Křížek, M., Uxa, T., Krause, D. (2019). [Periglaciální fenomén a problematika jeho ochrany](#) [Periglacial Features and Their Protection]. *Ochrana přírody*, 74(4), 24–28.
- (6) Uxa, T., Křížek, M. (2019). [Mrazové klíny v Podkrkonoší](#) [Frost Wedges in the Foothills of the Krkonoše Mts.]. *Krkonoše – Jizerské hory*, 52(8), p. 20.
- (5) Křížek, M., Uxa, T. (2018). [Mrazová modelace hor](#) [Frost Activity as a Modeling Factor for Mountain Landscape]. *Geografické rozhledy*, 27(5), 16–19.
- (4) Krause, D., Uxa, T. (2017). [Práce vody od sněhové vločky po kapku v moři](#) [Work of Water from a Snowflake to a Drop in the Sea]. *Geografické rozhledy*, 27(1), 12–15.
- (3) Uxa, T., Křížek, M., Mida, P. (2015). [Relativní výšková členitost reliéfu](#) [Relative Relief]. *Geografické rozhledy*, 24(4), 22–23.

- (2) **Uxa, T.** (2014). [Geomorfologická činnost sněhu – co dokáže snůh?](#) [Geomorphological Effects of Snow: What Can Snow Do?] *Geografické rozhledy*, 23(3), 6–7.
- (1) **Uxa, T., Mida, P.** (2013). [Reliéf horských oblastí střední Evropy jako archiv chladných období kvartéru](#) [Relief of Mountainous Areas in Central Europe as an Archive of the Quaternary Cold Periods]. *Geografické rozhledy*, 23(1) 4–5.

Abstracts from conferences and seminars

- (41) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Engel, Z. (2019). Rozmístění, stáří a paleoenvironmentální interpretace tříděných polygonů ve Vysokých Sudetech. In Kleprlíková, L., Plichta, A., Turek, T. (Eds). 25. *Kvartér; Sborník abstrakt.* Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic, p. 43. (talk)
- (40) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Engel, Z. (2019). Kryogenní reliéf Hrubého Jeseníku – unikátní a křehké přírodní bohatství. In Dýma, M. (Ed). *Konference k 50. výročí založení Chráněné krajinné oblasti Jeseníky, Sborník abstraktů.* Nature Conservation Agency of the Czech Republic, Jeseníky Protected Landscape Area Administration, Jeseník, Czech Republic, 17–18. (talk)
- (39) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Engel, Z. (2019). Geomorphological evidences of Late Quaternary mountain permafrost in the Hrubý Jeseník Mts. In Dýma, M. (Ed). *Konference k 50. výročí založení Chráněné krajinné oblasti Jeseníky, Sborník abstraktů.* Nature Conservation Agency of the Czech Republic, Jeseníky Protected Landscape Area Administration, Jeseník, Czech Republic, p. 26. (poster)
- (38) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D., Engel, Z., Moska, P., Braucher, R., Aster Team (2019). Distribution and Timing of Last Glacial Patterned Ground in the Czech Republic. In Urdea, P., Baroni, C., Stamatopoulos, L. (Eds). *Abstract book, IAG Regional Conference 2019 – Geomorphology of Climatically and Tectonically Sensitive Areas.* Faculty of Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens, Athens, Greece, p. 155. (talk – presenting author)
- (37) Křížek, M., Krause, D., **Uxa, T.**, Engel, Z. (2019). Distribution and ¹⁰Be exposure age of patterned ground/sorted polygons above the alpine timberline in the Krkonoše Mts. In Štursa, J., Erlebach, M. (Eds) *Book of Abstracts, International Scientific Conference, Krkonoše – Nature and People.* Krkonoše Mountains National Park Administration, Špindlerův Mlýn, Czech Republic, p. 43. (talk)
- (36) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D., Moska, P., Vohradský, L. (2019). Distribution, morphology and preliminary dating of past thermal-contraction-cracking features in the Czech Republic. *20th Congress of the International Union for Quaternary Research.* Dublin, Ireland, O-5114. (talk – presenting author)
- (35) Safanda, J., Dedecek, P., Cermak, V., **Uxa, T.** (2019). Uncertainty in Terrestrial Heat Flow Determinations: a Case Study from Czechia. *27th International Union for Geodesy and Geophysics General Assembly.* Montréal, Canada, JV04p-091. (poster)
- (34) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D. (2019). State of knowledge about past thermal-contraction-cracking features in the Czech Republic. In Klimeš, J., Hartvich, F. (Eds). *Book of Abstracts, Český ráj '19: State of geomorphological research in 2019.* Institute of Rock Structure and Mechanics CAS, Czech Association of Geomorphologists, Geopark Český ráj, Czech Republic, p. 34. (talk – presenting author)
- (33) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Engel, Z. (2019). Geomorphological evidences of Late Quaternary mountain permafrost in the Hrubý Jeseník Mts. In Klimeš, J., Hartvich, F. (Eds). *Book of Abstracts, Český ráj '19: State of geomorphological research in 2019.* Institute of Rock Structure and Mechanics CAS, Czech Association of Geomorphologists, Geopark Český ráj, Czech Republic, p. 22. (poster – presenting author)
- (32) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Engel, Z. (2018): Geomorfologické doklady výskytu permafrostu v Hrubém Jeseníku od LGM. In Kleprlíková L., Šamánek L., Turek, T., Calábková G., Ivanov, M. (Eds). 24. *Kvartér; Sborník abstrakt.* Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic, p. 37. (talk)
- (31) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D., Vohradský, L. (2018). Late Pleistocene Ice-Wedge Pseudomorphs and Sand-Wedge Casts in the Czech Republic. In Fuchs, M. (Ed). *Book of Abstracts, Central European Conference on Geomorphology and Quaternary Sciences.* Justus-Liebig-University, Giessen, Germany, p. 209. (poster – presenting author)

- (30) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D. (2018). Towards a numerical palaeo-climate interpretation of periglacial features: initial results for sorted nets. In Deline, P., Bodin, X., Ravanel, L. (Eds). *5th European Conference on Permafrost, Book of Abstracts*. Laboratoire Edytem, Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget du Lac cedex, France, 128–129. (poster – presenting author)
- (29) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Vohradský, L. (2018). Spatial distribution of ice-wedge pseudomorphs in the Czech Republic. In Deline, P., Bodin, X., Ravanel, L. (Eds). *5th European Conference on Permafrost, Book of Abstracts*. Laboratoire Edytem, Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget du Lac cedex, France, 103–104. (poster – presenting author)
- (28) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D. (2018). Palaeo-Temperature Reconstructed From Relict Sorted Patterned Ground in the Krkonoše Mts. In Máčka, Z., Ježková, J., Nováková, E., Kuda, F. (Eds). *Geomorfologický sborník 16*. Institute of Geonics of the CAS, Masaryk University, Ostrava, Brno, Czech Republic, p. 83. (talk – presenting author)
- (27) Dědeček, P., **Uxa, T.**, Šafanda, J., Čermák, V. (2018). Heat flow map of the Czech Republic. In Artemieva, I., Verdoya, M., Balling, N. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 20*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, EGU2018-17037. (poster)
- (26) Krause, D., Křížek, M., **Uxa, T.** (2018). How geomorphologic processes on slopes affect mid-mountain valley headwalls during the post-glacial history: a multi-methodical approach from the High Sudetes Mts. In Laute, K., Beylich, A.A., Savi, S., Cienciala, P., Seta, M.D., Knight, J., Mao, L., Morche, D., Zwoliński, Z. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 20*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, EGU2018-16117. (poster)
- (25) Křížek, M., **Uxa, T.**, Krause, D., Vohradský, L. (2017). Rozšíření pseudomorfóz mrazových a ledových klínů na území České republiky. In Ivanov, M., Kleprlíková, L., Zacheus, L., Šamánek, J., Káňa, V. (Eds). *23. Kvartér, Sborník abstrakt*. Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic, 29–30. (talk)
- (24) Hrbáček, F., **Uxa, T.** (2017). The application of simple models to predict active layer thickness on James Ross Island in 2006–2015. In Ruiz-Fernandez, J., García-Hernández, C., Oliva, M., Rodríguez-Pérez, C., Gallinar, D. (Eds). *Ambientes periglaciares: avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, Spain, p. 188. (poster)
- (23) Nývlt, D., Hrbáček, F., Engel, Z., Kňázková, M., **Uxa, T.**, Roman, M., Kavan, J., Ondruch, J., Láska, K. (2017). Overview of the Czech Permafrost, Active Layer and Periglacial Research on James Ross Island, Antarctic Peninsula. In Ruiz-Fernandez, J., García-Hernández, C., Oliva, M., Rodríguez-Pérez, C., Gallinar, D. (Eds). *Ambientes periglaciares: avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, Spain, 31–36. (invited talk)
- (22) **Uxa, T.** (2017). Reconstructing temperature conditions associated with past periglacial structures: a case study for sorted patterned ground in the Krkonoše Mountains. In *Geofyzikální doktorandský den*, Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Praha, Czech Republic, p. 7. (talk)
- (21) **Uxa, T.**, Mida, P., Křížek, M. (2017). The Effect of Climate on Morphology and Development of Sorted Circles and Polygons. In Křížek, M. (Ed.). *Geomorfologický sborník 15*. Faculty of Science, Charles University, Praha, Czech Republic, 28–29. (poster – presenting author)
- (20) Křížek, M., **Uxa, T.**, Engel, Z., Krause, D. (2017). Typology of patterned ground in the Czech Republic. In Křížek, M. (Ed). *Geomorfologický sborník 15*. Faculty of Science, Charles University, Praha, Czech Republic, p. 9. (talk)
- (19) Hrbáček, F., **Uxa, T.** (2017). Modelling of active layer thickness evolution on James Ross Island in 2006–2015. In Krautblatter, M., Bartsch, A., Muskett, R., Westermann, S. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 19*, European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, EGU2017-2637. (poster – presenting author)
- (18) **Uxa, T.**, Křížek, M., Krause, D. (2017). Reconstructing air temperature and permafrost attributes associated with past periglacial structures: a case study for sorted nets from the Krkonoše Mts., Czech Republic. In Lukas, S., Gärtner-Roer, I., Kellerer-Pirklbauer, A. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 19*. European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, EGU2017-15315. (poster – presenting author)

- (17) **Uxa, T.**, Mida, P. (2017). Ground surface thermal regime of rock glaciers in the High Tatra Mts., Slovakia. In Krautblatter, M., Bartsch, A., Muskett, R., Westermann, S. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 19*, European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, EGU2017-1740. (poster – presenting author)
- (16) **Uxa, T.**, Mida, P., Křížek, M. (2017). The Effect of Climate on Morphology and Development of Sorted Circles and Polygons. In Ondráčková, L., Ambrožová, K., Čížková, K., Hrbáček, F., Ondruch, J. (Eds). *Proceedings: Students in Polar and Alpine Research Conference 2017*. Masaryk University, Brno, Czech Republic, p. 48. (poster – presenting author)
- (15) Čermák, V., Dědeček, P., Krešl, M., Šafanda, J., **Uxa, T.** (2016). Heat transfer in shallow subsurface under different climate conditions in Europe (Czechia, Slovenia, Portugal). In *CzechGeo/EPOS Workshop*, Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Praha, Czech Republic. (talk)
- (14) **Uxa, T.**, Mida, P. (2016). First results from thermal investigations of rock glaciers in the Slovak High Tatra Mountains, Western Carpathians. In Günther, F., Morgenstern, A. (Eds). *XI. International Conference on Permafrost – Book of Abstracts*, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, Potsdam, Germany, 1060–1061. (poster – presenting author)
- (13) Mida, P., **Uxa, T.** (2016). A rock glacier inventory of the Western and High Tatra Mountains, Western Carpathians. In Günther, F., Morgenstern, A. (Eds). *XI. International Conference on Permafrost – Book of Abstracts*, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, Potsdam, Germany, p. 1046. (poster)
- (12) **Uxa, T.**, Mida, P., Křížek, M. (2016). Distribution and Morphology of Sorted Circles and Polygons in the Northern Billefjorden. In Günther, F., Morgenstern, A. (Eds). *XI. International Conference on Permafrost – Book of Abstracts*. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, Potsdam, Germany, 101–102. (poster – presenting author)
- (11) Mida, P., **Uxa, T.** (2015). Distribution and Morphology of Rock Glaciers in the Tatra Mountains. In Mentlík, P., Stacke, V. (Eds). *Role of Fieldwork in Geomorphology*. University of West Bohemia, Plzeň, Czech Republic, p. 76. (talk)
- (10) **Uxa, T.**, Křížek, M. (2014). Morphology and Environmental Significance of Relict Sorted Polygons, Krkonoše Mountains, Czech Republic. In Lukas, S., Gärtner-Roer, I., Spagnolo, M., Winkler, S. (Eds). *Geophysical Research Abstracts 16*. European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, Austria, EGU2014-12228. (poster – presenting author)
- (9) **Uxa, T.** (2014). Sorted Patterned Ground in the Petuniabukta, Billefjorden, Central Svalbard. In Marek, T., Raška, P., Dolejš, M. (Eds). *Geomorfologický sborník 12*, Jan Evangelista Purkyně University, Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences, Ústí nad Labem, Praha, Czech Republic, 75–76. (poster)
- (8) **Uxa, T.**, Křížek, M., Engel, Z., Treml, V. (2013). Spatial distribution, morphology and clast arrangement of sorted polygons in the Krkonoše Mts. In Štursa, J., Andrlé, J. (Eds). *Book of Abstracts, International Scientific Conference Mountain Protected Areas in a Changing World*. Krkonoše National Park Administration, Vrchlabí, Czech Republic, p. 112. (poster – presenting author)
- (7) **Uxa, T.**, Křížek, M., Pechačová, B. (2013). Thermal and moisture regime of earth hummocks in the High Sudetes and High Tatras. In Máčka, Z., Havlíček, M., Demek, J., Kirchner, K. (Eds). *Geomorfologický sborník 11*. Institute of Geonics, Czech Academy of Sciences, Department of Geography, Faculty of Science, Masaryk University, Ostrava, Brno, Czech Republic, 50–51. (talk – presenting author)
- (6) **Uxa, T.**, Křížek, M. (2012). Odras paleoenvironmentální heterogenity v morfologii tříděných polygonů Vysokých Sudet. In Uhlířová, H., Malíková, R., Ivanov, M. (Eds). *18. Kvartér, Sborník abstrakt*. Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic, p. 53. (talk – presenting author)
- (5) **Uxa, T.**, Křížek, M. (2012). The structure of relict sorted polygons related to environmental characteristics: a case study from Mt. Luční hora, the Krkonoše Mts. In Blahůt, J., Klimeš, J., Štěpančíková, P., Hartvich, F. (Eds). *Geomorfologický sborník 10*. Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences, Praha, Czech Republic, 53–54. (talk – presenting author)
- (4) Křížek, M., Pechačová, B., **Uxa, T.** (2011). Regelation cycles of the patterned ground in the High Tatras. In Hradecký, J., Šilhán, K. (Eds). *Book of Abstracts, Carpatho-Balcanic-Dinaric Conference on Geomorphology*. Faculty of Science, University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, p. 38. (talk)

- (3) **Uxa, T.** (2011). The structure of relict sorted polygons in the eastern part of the Giant Mts. In Andrlé, J., Knapik, R. (Eds). *6th Student "Cloudberry" Conference on Krkonoše Research*. Krkonoše National Park Administration, Vrchlabí, Czech Republic. (talk)
- (2) **Uxa, T., Křížek, M.** (2010). The structure of sorted patterned ground in relationship to site characteristics in the Giant Mts. (Krkonoše Mts.), Czech Republic. In Křížek, M., Nyplová, P., Vočadlová, K., Borská, J. (Eds). *Geomorfologický sborník 9*. Faculty of Science, Charles University, Praha, Czech Republic, 67–68. (talk – presenting author)
- (1) **Uxa, T.** (2009). Sorting of selected patterned ground in the eastern part of the Giant Mts. In Andrlé, J., Knapik, R. (Eds). *4th Student "Cloudberry" Conference on Krkonoše Research*. Krkonoše National Park Administration, Vrchlabí, Czech Republic, p. 11. (talk)

