

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



**VYUŽITÍ SCHMIDT HAMMERU JAKO
NÁSTROJE PRO URČENÍ RELATIVNÍHO VĚKU
GLACIGENNÍCH SEDIMENTŮ**

Bakalářská práce

Barbora PROCHÁZKOVÁ

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. M. Křížek, Ph.D.

Konzultant: Mgr. Peter Mida

2012

Zadání bakalářské práce

Téma práce

Využití Schmidhammeru jako nástroje pro určení relativního věku glacienních sedimentů.

Cíle práce

Cílem práce je zhodnotit využití SH testu pro určení relativního stáří glacienních sedimentů. Dílčími cíli bude:

- a) Bude provedena stručná charakteristika principů, podmínek a limitů této metody v prostředí glaciální modelace reliéfu.
- b) Řešeno bude, kde a jak byla tato metoda provedena.
- c) Dále bude řešeno s jakými dalšími datovacími metodami a metodami studujícími míru zvětrávání bývá toto relativní datování kombinováno.
- d) Budou s přihlédnutím ke stáří a typu testované horniny srovnány R-hodnoty a příslušné odchylky měření pro morény jednotlivých oscilací ve studovaných lokalitách.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Použité pracovní metody: rešerše odborné literatury, zpracování z literatury vygenerovaných dat pomocí popisné statistiky.

1. krok: vytvoření stručné charakteristiky principů, podmínek a limitů SH testování v prostředí glaciální modelace reliéfu;
2. krok: stanovení míst použití této metody a stručná charakteristika míst, zejména vzhledem k typu horniny, podnebí, nadmořské výšce, stáří a charakteru zalednění a charakteristikám postglaciálního zvětrávání. Tvorba mapy zkoumaných lokalit, tvorba přehledových-srovnávacích tabulek a grafů;
3. krok: charakteristika způsobu SH testování (získání R-hodnot) pro jednotlivé lokality. Tvorba přehledových-srovnávacích tabulek a grafů;
4. krok: charakteristika doprovodných datovacích metod a metod sledujících míru zvětrávání pro jednotlivé studované lokality. Tvorba přehledových-srovnávacích tabulek a grafů;
5. krok: Pomocí popisné statistiky (případně analýzy rozptylu) srovnání R-hodnot a zejména jejich odchylek pro jednotlivé oscilace v rámci jednotlivých lokalit a rovněž mezi lokalitami. Srovnání (pomocí analýzy rozptylu) těchto hodnot a odchylek vzhledem ke stáří a typu horniny.

Zájmové území: glaciálně formovaná území

Datové zdroje: informační zdroje

Datum zadání:

Barbora Procházková

RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

Podpis studenta

Podpis vedoucího práce

Prohlášení

Prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu.

Tato práce ani její podstatná část nebyla použita k získání jiného než akademického titulu.

V Praze 16. 5. 2012

.....
Barbora Procházková

Děkuji především svému vedoucímu práce RNDr. Marku Křížkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, nápadů a pomoc při zpracování práce, Mgr. Peterovi Midovi za množství odborných rad a čas, který mi věnoval při konzultacích. Děkuji i mým rodičům, kteří mi studium geografie umožnili a také za jejich podporu a trpělivost.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se věnuje využití Schmidt Hammeru jako nástroje relativního datování glacienních tvarů reliéfu. Využití této datovací metody je založeno na předpokladu, že existuje vztah mezi stupněm zvětrání horniny a délkou jejího odkryvu. Aplikací Schmidt Hammeru na testovaný povrch lze získat informace o stupni zvětrání tohoto povrchu v podobě R hodnot. Čím je povrch starší (více zvětralý), tím nižší jsou naměřené R hodnoty. Vztah mezi R hodnotami a absolutním stářím povrchu zjištěným pomocí numerických metod datování lze vyjádřit v podobě věkové kalibrační křivky.

Na základě rešerše odborné literatury je provedena charakteristika principů, podmínek a limitů metody Schmidt Hammer testu v prostředí glacienní modelace reliéfu. Převážná část publikovaných studií se zabývá lokalitami v Evropě, zejména ve Skandinávském pohoří. Výsledky statistické analýzy dat ukázaly, že R hodnoty signifikantně korelují s nadmořskou výškou i klimatickými charakteristikami (průměrná roční teplota vzduchu, průměrný roční úhrn srážek) daných lokalit. U morén tvořených granitickým materiálem bylo prokázáno, že se zvyšující se nadmořskou výškou roste velikost R hodnot. Naopak, s narůstajícím ročním úhrnem srážek a narůstající průměrnou roční teplotou vzduchu velikost R hodnot klesá. Za nejvhodnější materiál pro testování jsou považovány žuly díky nízké směrodatné odchylce získané při měření a také díky jejich značnému prostorovému rozšíření.

Klíčová slova: Schmidt Hammer, glacienní sedimenty, relativní datování, zvětrávání

Abstract

The bachelor thesis is concerned with the use of the Schmidt Hammer as a relative age dating tool of glacial landforms. The Schmidt Hammer test is based on the assumption that there is a mutual relation between the degree of weathering of a particular surface and the duration of its exposure. Information about the degree of weathering is expressed by the rebound value (R value). With increasing weathering of a surface the mean R value decreases. Relationship between the R value and the absolute age of a tested surface obtained by numerical dating methods is expressed by the age calibration curve.

Principles, conditions and limitations of the Schmidt Hammer test in glacial environment were characterized according to the literature. The majority of tested sites were localized in Europe, especially in Scandes. According to the results of statistical analyses, the R value significantly correlates with the altitude and climatic characteristics (mean annual air temperature, mean annual amount of precipitation). For the moraines built-up by granitic material, R value increases with increasing altitude. On the contrary, the R value decreases with the increasing amount of precipitation and mean annual air temperature. Granite proven to be the most suitable material for testing due to small standard deviation of measured R values and also due to its large spatial extent.

Key words: the Schmidt Hammer test, glacial landforms, relative dating methods, weathering

OBSAH

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Úvod | 10 |
| 1.1 | Cíle práce | 10 |
| 2. | Geomorfologická charakteristika zaledněných území..... | 11 |
| 2.1 | Vznik a typy zalednění..... | 11 |
| 2.2 | Modelační činnost ledovců | 12 |
| 2.3 | Akumulační činnost ledovců..... | 13 |
| 3. | Schmidt Hammer v geomorfologickém výzkumu..... | 19 |
| 3.1 | Princip fungování Schmidt Hammeru..... | 19 |
| 3.2 | Typy Schmidt Hammeru..... | 21 |
| 3.3 | Využití Schmidt Hammeru a metodika sběru dat v geomorfologickém výzkumu..... | 22 |
| 3.4 | Schmidt Hammer jako nástroj relativního datování | 25 |
| 3.5 | Využití Schmidt Hammeru pro sestavení věkových kalibračních křivek | 26 |
| 3.6 | Schmidt Hammer v kombinaci s jinými datovacími metodami..... | 29 |
| 3.7 | Použití Schmidt Hammeru pro datování glacienních sedimentů | 33 |
| 3.7.1 | Lokality použití Schmidt Hammeru jako nástroje relativního datování při glacienních sedimentech | 34 |
| 4. | Metody a statistické zpracování dat..... | 36 |
| 5. | Výsledky | 37 |
| 5.1 | Výsledky statistické analýzy | 37 |
| 6. | Diskuze | 41 |
| 6.1 | Využití Schmidt Hammeru v geomorfologickém výzkumu | 41 |
| 6.2 | Relativní datování pomocí Schmidt Hammeru | 42 |
| 6.3 | Faktory ovlivňující výslednou R hodnotu..... | 42 |
| 7. | Závěr | 44 |
| | Zdroje a použitá literatura..... | 46 |
| | Přílohy..... | 51 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------------|---|----|
| Tab. 1 | Genetická klasifikace morén | 14 |
| Tab. 2 | Členění englacíálních sedimentů | 17 |
| Tab. 3 | Členění proglaciálních sedimentů | 18 |
| Tab. 4 | Klasifikace hornin dle míry jejich tvrdosti | 20 |
| Tab. 5 | Typy Schmidt Hammeru dle velikosti dopadové síly | 21 |
| Tab. 6 | Typy Schmidt Hammeru dle způsobu měření a záznamu R hodnot | 21 |
| Tab. 7 | Výhody a nevýhody použití Schmidt Hammeru | 22 |
| Tab. 8 | Postupy navržené pro stanovení výsledné R hodnoty | 24 |
| Tab. 9 | Charakteristika vybraných metod relativního datování používaných v kombinaci se Schmidt Hammer testem | 29 |
| Tab. 10 | Charakteristika nejčastěji metod numerického datování používaných v kombinaci se Schmidt Hammer testem | 30 |
| Tab. 11 | Výsledné R hodnoty a velikosti lišejníků | 31 |
| Tab. 12 | Výsledné stáří morén zjištěných pomocí metod expozičního datování a Schmidt Hammer testem | 32 |
| Tab. 13 | Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami všech studovaných lokalit (47 morén) budovaných žulovým materiálem | 38 |
| Tab. 14 | Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami lokalit z Norska (17 morén) budovaných žulovým materiálem | 38 |
| Tab. 15 | Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami lokalit z mírného klimatického pásu Evropy (32 morén) budovaných žulovým materiálem | 38 |
| Tab. 16 | Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami u morén formovaných během LIA (41 morén) | 39 |
| Tab. 17 | Intervaly R hodnot a časové zařazení testovaných povrchů | 41 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|----------------|---|----|
| Obr. 1 | Schmidt Hammer typ L | 19 |
| Obr. 2 | Pracovní princip Schmidt Hammeru | 20 |
| Obr. 3 | Faktory ovlivňující výslednou R hodnotu a vztahy mezi nimi | 26 |
| Obr. 4 | Věkové kalibrační křivky sestrojené z naměřených R hodnot u testovaných povrchů v oblasti Jotunheimen (a) a Jostedalsbren (b), Norsko | 27 |
| Obr. 5 | Věkové kalibrační křivky sestrojené z naměřených R hodnot u testovaných povrchů v oblasti Jotunheimen a Jostedalsbren, Norsko | 27 |
| Obr. 6 | Věková kalibrační křivka pro skalní povrchy s rovnicemi regresivních závislostí..... | 28 |
| Obr. 7 | Závislost R hodnot a stáří testovaných povrchů získaných metodou expozičního datování v oblasti Serra de Queixa..... | 32 |
| Obr. 8 | Lokalizace jednotlivých studií..... | 35 |
| Obr. 9 | Vliv typu horniny na R hodnotu testovaného povrchu (jednocestná ANOVA)..... | 40 |
| Obr. 10 | Vliv typu horniny na směrodatnou odchylku testovaného povrchu (jednocestná ANOVA)..... | 40 |

1. Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá využitím Schmidt Hammeru jako nástroje relativního datování glacigenních tvarů reliéfu. Schmidt Hammer byl původně vynalezen pro nedestruktivní testování tvrdosti betonu ve stavebnictví. Od 60. let 20. stol. se začal uplatňovat jako úspěšný nástroj i v geomorfologickém výzkumu. Aplikací Schmidt Hammeru na testovaný povrch lze získat informace o stupni zvětrávání, které daný povrch podstoupil. Za předpokladu, že existuje vztah mezi stupněm zvětrávání a délkou odkryvu povrchu, lze zjistit relativní stáří testovaného povrchu.

Ledovce se výrazně podílejí na modelaci reliéfu. Z hlediska geomorfologie je nejstudovanější poslední pleistocenní zalednění, jelikož tvary po tomto zalednění jsou nejvíce zachovalé a tudíž jsou nejčastěji předmětem výzkumu. Při relativním datování glacigenních tvarů reliéfu, lze zjistit informace o rozsahu a vývoji bývalých ledovců. Vývoj ledovců je přímo závislý na změnách jejich hmotnostní bilance způsobených změnami klimatických podmínek. Tak lze ledovce považovat za důležité indikátory současných i minulých klimatických změn v určité oblasti a z tohoto pohledu je rekonstrukce rozsahu bývalého zalednění důležitá též pro předpověď dopadu budoucích klimatických změn. Informace o vývoji a rozsahu bývalých ledovců mohou být užitečné nejen při studiu vývoje klimatu, ale i při studiu vývoje přírodního prostředí.

1.1 Cíle práce

Cílem předkládané bakalářské práce je zhodnotit využití Schmidt Hammer testu pro určení relativního stáří glacigenních sedimentů (glacigenních tvarů reliéfu). Na základě rešerše literatury bude provedena stručná charakteristika principů, podmínek a limitů této metody v prostředí glacigenní modelace reliéfu. Dále bude řešeno, kde a jak byla tato metoda použita. Mezi jednotlivými studii budou srovnány výsledné R hodnoty a příslušné odchylky měření. Dále bude řešeno, s jakými dalšími datovacími metodami lze Schmidt Hammer test kombinovat.

2. Geomorfologická charakteristika zaledněných území

2.1 Vznik a typy zalednění

Hlavním činitelem modelujícím reliéf zaledněných území jsou ledovce. Ledovce vznikají v oblasti s negativní tepelnou bilancí, kde všude sníh v průběhu léta neroztává a mění se ve firn (Demek, 1988). Firn se vlivem tlaku nadložního sněhu mění ve firnový led a následně v ledovcový led. U horských ledovců je jedním z důležitých procesů urychlujících přeměnu sněhu v ledovcový led relegace (opakované tání a mrznutí) (Demek, 1988). Dalším důležitým předpokladem pro vznik ledovců je dostatek srážek v dané oblasti. Vhodná konfigurace reliéfu je také důležitým faktorem, např. v případě Krkonoš vznikly ledovce tak, že z náhorních plošin byl sníh pomocí větru transportován do závětrných míst, které dnes představují kary (Migoń, 1999).

V oblastech vyšších zeměpisných šířek se vyskytují kontinentální ledovce. Kontinentální ledovec má charakter rozsáhlé ploché klenby, která se pozvolna snižuje ke svým okrajům. Ve vysokohorských oblastech se lze setkat s horskými ledovci, které vyplňují deprese a údolí, nebo s ledovci tvořícími ledovcové čapky. Ledovcové čapky vznikají v pohorích s rozsáhlými náhorními plošinami (Benn & Evans, 1998), na kterých se tvoří a vysílají své splazy do nižších poloh.

V současné době ledovce zabírají plochu přibližně 15 mil km² (McKnight, 1999). Z této plochy více než 96 % připadá na kontinentální zalednění, s kterým se lze setkat v oblasti Antarktidy a Grónska. V chladných obdobích pleistocénu, tzv. glaciálech, pokrývaly ledovce větší plochu, než je tomu dnes. Spodní hranice pleistocénu byla určena na 2,58 Ma a konec je datován před 11,7 ka (Gibbard & Cohen, 2008).

V současné době existuje celá škála stratigrafického členění pleistocénu. Základem pro posuzování paleoklimatických poměrů je členění pleistocénu na období zvaná MIS (*marine isotope stage*). Tato období jsou definována na základě změny poměru izotopů kyslíku ¹⁸O/¹⁶O v organických i neorganických sedimentech z hlubokomořských vrtů (Gibbard & Cohen, 2008). V období glaciálů poměr izotopů kyslíku ¹⁸O/¹⁶O stoupá, v období interglaciálů naopak klesá. Během glaciálů vedly nízké teploty ke vzniku mohutných kontinentálních ledovců v Severní Evropě a Severní Americe. Značně vzrostlo i plošné zastoupení horských ledovců, kdy plocha zaledněných částí kontinentů byla 32 % oproti dnešním 10 % (Benn & Evans, 1998).

2.2 Modelační činnost ledovců

Pro geomorfologické působení ledovce je rozhodující poloha izotermy tlakového tavného bodu uvnitř ledovce (Benn & Evans, 1998). Za normálního atmosférického tlaku led taje při teplotě 0°C. Se zvyšující mocností ledu se zvětšuje tlak na led na bázi ledovce a teplota tání ledu se snižuje. Dle termické klasifikace ledovců se ledovce dělí na „chladné“ (*polar glaciers, cold glaciers*) a „teplé“ (*temperate glaciers, warm based glaciers*) a tzv. *polythermal glaciers (subpolar glaciers)* (Benn & Evans, 1998). Za chladný ledovec se považuje takový, pokud je jeho teplota nižší než teplota tlakového tavného bodu, ledovec je tak přimrzlý ke svému podloží. Pokud se teplota ledovce rovná nebo je vyšší jak teplota tlakového tavného bodu, tak se jedná se o „teplý“ ledovec, který na své bázi obsahuje vodu v tekutém skupenství. Ledovec se pohybuje po svém podloží a intenzivně jej modeluje.

Modelační činnost horských ledovců se značně liší od modelace ledovců kontinentálních. Kontinentální ledovce krajinu spíše obrušují a zarovňávají (Horník, 1986), zatímco u horských ledovců je jejich modelační činnost rozmanitější a více závisí na topografii horského údolí.

Při erozní činnosti ledovců se uplatňuje ohlazování (deterze), brázdění (exarace) a odlamování (detrakce). Nejvýznamnějším typem ledovcové eroze je deterze, která spočívá v ohlazování podloží ledovce vlivem unášeného materiálu. Deterze je doprovázena detrakcí, při níž dochází k odlamování jednotlivých bloků hornin ledovcového podloží (Bennet & Glasser, 2009). Brázdění (exaraci) umožňují jednotlivé úlomky hornin nesené ledovcem při jeho bázi.

Ve vyživovací oblasti horských ledovců alpského typu se vytváří kar, který je ze tří stran ohraničený vysokými skalními stěnami a z jedné strany je oddělen ohlazeným skalním stupněm (stupněm karu) od vlastního ledovcového údolí (Benn & Evans, 1998). Z vyživovací oblasti se ledovec pohybuje díky gravitaci a díky vlivu tlaku přírůstku ledovcové hmoty ve zdrojové oblasti. Svým pohybem ledovec modeluje původní preglaciální údolí do tvaru trogu. Trog (ledovcové údolí) je základním erozním tvarem, od původního říčního údolí se značně liší v podélném i příčném profilu. Zvláštním typem trogů jsou fjordy. Vznikají přemodelováním preglaciálního říčního údolí okrajovými splazy pevninských nebo horských ledovců, které je následně zalito mořem. Významnými erozními tvary pevninského zalednění jsou fjeldy. Fjeldy jsou

plochá území, vyskytující se v různých nadmořských výškách, která tvoří jezerní pánve a jsou pokryta velkým množstvím oblíků (Benn & Evans, 1998). Při svém pohybu ledovec působí na podloží, uvolňuje z něj materiál, který je ledovcem dál odnášen. Tvrdší horniny mohou tlaku ledovce odolávat a vytvořit tak asymetrické nízké pahorky, které se nazývají oblíky. Nárazová strana oblíků je mírnější a ohlazená, kdežto jejich odvrácený svah je příkrý a neopracovaný (Benn & Evans, 1998). V oblastech bývalého pevninského zalednění, které jsou zality mořem, mohou oblíky vystupovat nad vodní hladinu v podobě skjärů.

Materiál, který vznikl různými erozními procesy a materiál napadaný na ledovec (z okolních svahů u horských ledovců) je přemisťován ledovcem ve směru jeho toku. Transportní činnosti horských ledovců je nejvíce patrná při bázi a na bocích ledovce, kde je ledovec v kontaktu s horninovým podložím. Transportovaný materiál se vyznačuje velkou nevytřídností a rozmanitostí (Benn & Evans, 1998). V materiálu spodní morény (viz část „glacigenní sedimenty“) se lze setkat se souvkou, což jsou úlomky hornin, které jsou částečně zryhované sunutím po podloží. Kontinentální ledovce mohou transportovat materiál na velké vzdálenosti, a tak se v určitém prostředí lze setkat s bludnými (eratickými) balvany exotických hornin.

2.3 Akumulační činnost ledovců

K sedimentaci materiálu unášeným ledovcem dochází na jeho bázi, na povrchu ledovce a před jeho čelem. Tento materiál, jenž je geneticky spjat s ledovcovou činností, se označuje jako ledovcový sediment (glacigenní sediment) (Růžičková et al., 2003). Dle Růžičkové et al. (2003) se dělí glacigenní sedimenty do čtyř podskupin:

- I. *Glacigenní sedimenty*- skupina sedimentů, která je uložena přímo ledovcem.
- II. *Glacifluviální sedimenty*- sedimenty, které se ukládají v prostředí proudící vody, které je v přímém kontaktu s ledovcem.
- III. *Glacilakustrinní sedimenty*- sedimenty jezer, které byly v minulosti dotovány tavnými vodami z ledovců nebo byly v přímém kontaktu s ledovcem.
- IV. *Glacimarinní sedimenty*- mořské sedimenty, jejichž materiál byl do moře dopraven ledovcem. Nejvíce glacimarinních sedimentů se nachází v šelfových oblastech.

Vzhledem k tématu předkládané bakalářské práce budou blíže charakterizovány pouze první dvě podskupiny sedimentů. V případě glacialakustrinních a glacimarinních sedimentů nebyla metoda zkoumání stupně zvětrání povrchu sedimentů pomocí Schmidt hammeru dosud aplikovaná. První dvě podskupiny sedimentů jsou zastoupeny v oblasti střední Evropy, zatímco glacimarinními sedimenty se zde nenacházejí a glacialakustrinních sedimentů je zde velmi málo (Růžicková et al., 2003).

I. Glacigenní sedimenty

Základním a nejtypičtějším tvarem sedimentu vznikajícího činností ledovců je till. Dle Dreimanise a Lundquista (1984) je till sediment, který byl transportován a následně uložen ledovcem nebo z ledovce a přitom nebyl nebo jen málo byl vytříděn vodou (Růžicková et al., 2003). Till se vyznačuje vysokou nevytříděností, nevrstevnatostí a malým opracováním jednotlivých úlomků, kterými je tvořen (Benn & Evans, 1998). Podle pozice vzniku tillu vzhledem k ledovci lze till klasifikovat na subglaciální, englaciální a supraglaciální (Benn & Evans, 1998). Základním glacigenním akumulacním tvarem tvořeným tillem jsou morény.

V odborné literatuře existuje velké množství genetických klasifikací morén, některé podrobnější (např. Benn & Evans, 2010), jiné jednodušší a přehlednější (např. Bennett & Glasser, 2009). Bennett a Glasser (2009) z hlediska geneze vymezili dvě základní kategorie morén- ledovcových akumulacních tvarů (Tab. 1).

Tab. 1: Genetická klasifikace morén (Bennett & Glasser, 2009). Poznámka: české termíny v tabulce jsou pouze orientační, jelikož neexistuje žádná odborná česká terminologie.

| Okrajové morény (<i>Ice-margin moraines</i>) | Podledovcové tvary (<i>Subglacial landforms</i>) |
|--|---|
| Náporové morény (<i>Glaciotectonic moraine</i>) | Žlábký (<i>Flutes</i>) |
| Sypané morény (<i>Dump moraine</i>) | Drumlíny (<i>Drumlins</i>) |
| Ablační morény (<i>Ablation moraine</i>) | Žebrované morény (<i>Roggen/ Ribben moraine</i>) |
| | Velkoměřítkové glaciální lineace (<i>Megascale glacial lineations</i>) |
| | Geometrické sítě hřebenů (<i>Geometrical ridge network</i>) |

Termínem *ice-marginal moraine* (okrajové morény) se označují všechny morény vzniklé činností ledovce na jeho okraji.

Glaciotectonic moraines (push moraines, náporové morény) dle Bennetta a Glassera (2009) jsou definované jako produkt konstruktivní deformace ledu, sedimentu nebo skalního podloží, kdy vznikají hřbety příčně nebo podélně vzhledem k směru toku ledovce, u nichž je dobře patrné provrásnění sedimentů. Nacházejí se před, na, nebo pod okrajem ledovce.

Dump moraines (sypané morény) vznikají uložením vnitřního a svrchního materiálu transportovaným ledovcem v koncové části ledovce.

Ablation moraines (ablační morény). Při akumulaci suti na povrchu ledovce se stává povrch ledovce tmavší a absorbuje více sluneční energie, což má za následek rychlejší tání ledu. Ledovcová suť se hromadí více na okrajích, a když dosáhne určité mocnosti, zamezí přísunu tepla k ledovci a led přestane tát. Okraje ledovce se stávají nečinnými a vzniká ablační moréna.

Druhou skupinu tvoří tvary formované pod ledovcem (*subglacial landforms*). Tyto tvary poskytují informace o směru a rychlosti proudění ledovce (Bennett & Glasser, 2009). Z hlediska velikosti byly identifikovány tyto podskupiny podledovcových tvarů (Bennett & Glasser, 2009):

Flutes- nízké (do 3 metrů) a úzké hřebeny rozložené rovnoběžně ve směru toku ledovce.

Drumlins (drumlíny)- asymetrické pahorky, jejichž delší osa udává směr pohybu ledovce. Mohou dosahovat výšky mezi 5 a 50 metry a délky od 10 do 3000 metrů.

Rogen / Ribben moraine - jedná se o zvlněné hřebeny, které jsou příčně orientované ke směru toku ledovce.

Megascale glacial lineations – jedná se o lineárně uložené sedimenty ledovců, které byly díky své velikosti rozpoznány až v nedávné době na satelitních snímcích. Mohou dosahovat až 70 kilometrové délky, šířka se pohybuje od 200 do 1300 metrů.

Geometrical Ridge Network- geometrická síť nízkých hřebenů, která vzniká při malé rychlosti toku ledovce.

Podle pozice morény vůči ledovci se morény dělí na čelní (*frontal moraines*), boční (*lateral moraines*) a střední (*medial moraines*) (Goudie, 2006b). V místě, kde se spojí dva údolní ledovce, se spojují i jejich boční morény, a vzniká tak nepravá střední moréna. Pravá střední moréna se odlišuje od nepravé svým původem. Je tvořena z materiálu, který pochází ze skalního podloží ledovce, který v podobě nunataku vystupuje nad povrch (Benn & Evans, 1998). Čelní moréna vzniká uložením veškerého materiálu, který byl zanesen až ke konci ledovcového splazu (Goudie, 2006b). Čelní moréna dokládající maximální zásah ledovce se nazývá koncovou (*terminal*) morénou. Pokud ledovec stagnoval delší dobu na stejném místě, může výška konečné morény dosahovat až 250 m. Výrazné jsou valy koncových morén tam, kde bývalé ledovce zasahovaly až na okraj pohoří (Chábera, 1996), v těchto místech mohou vznikat hrazená ledovcová jezera. Ústup ledovce může být přerušen chladnými výkyvy klimatu, kdy ledovec začne znovu narůstat (agradovat). V těchto fázích oscilací ledovců mohou vznikat ústupové morény (*recesional moraines*).

U kontinentálních ledovců se lze setkat s náporovou morénou, která se vytváří tlakem ledovce v koncové části. Ve valu této morény je patrný deformační tlak ledovce na jeho podloží i předpolí (Benn & Evans, 1998), je zde dobře patrné provrásnění sedimentů.

Poloha a morfologie morén může být užitečná pro určování rozsahu bývalého zalednění. Podle polohy morén je možné zjistit polohu ELA (*Equilibrium line altitude*). ELA udává nadmořskou výšku, kde je vyvážena akumulace ledovce s ablací. Pro stanovení hodnoty ELA v oblastech, které byly v minulosti více zaledněny nebo v oblastech, které jsou nyní nezaledněné, byly vytvořeny speciální metody. Mezi nejčastější přístupy k rekonstrukci pleistocenní ELA patří (Nesje, 2007):

- „*The Maximum Elevation of Lateral Moraines (MELM)*“ – Maximální výška bočních morén

Základem této metody je předpoklad, že boční morény se tvoří pouze v ablační zóně ledovce, a tak by nadmořská výška bočních morén měla odrážet výšku ELA. Tato metoda je vhodná pro dlouhé údolní ledovce, kde jsou dostatečně vyvinuté boční morény.

- „*The Toe-to-headwall Altitude Ratio (THAR)*“ – Poměru konce ledovce a vrcholu karové stěny

Tato metoda předpokládá, že ELA leží v pevném poměru na vertikální vzdálenosti mezi nejvyšším (karová stěna) a nejnižším bodem bývalého ledovce. Za nejnižší bod jsou zde považovány valy koncových morén.

- „*The Toe-to-summit Altitude Method (TSAM)*“ – Poměr konce ledovce a nejvyššího vrcholu v ledovcovém povodí

Tato metoda se snaží překonat problém definice horní hranice bývalého ledovce. Výška ELA se vypočítá pomocí aritmetického průměru výšky nejvyšší hory ledovcového povodí a nejnižší (koncové) morény.

II. Glacifluviální sedimenty

Do skupiny glacifluviálních sedimentů patří sedimenty, které vznikaly v proudícím vodním prostředí v přímém kontaktu s ledovcem (Růžičková et al., 2003). Jedním z hlavních kritérií při klasifikaci glacifluviálních sedimentů, podobně jako v případě tillu, je jejich pozice vůči ledovci. Hlavním kritériem členění glacifluviálních sedimentů je jejich pozice vůči ledovci. Z tohoto hlediska se glacifluviální sedimenty dělí na dvě základní skupiny (Růžičková et al., 2003): 1) sedimenty englaciální a 2) proglaciální. Mezi englaciální sedimenty (Tab. 2) se řadí sedimenty vzniklé pod (subglaciální) v (englaciální) a na (supraglaciální) povrchu ledovce. Proglaciální sedimenty jsou ukládány v předpolí čela ledovce. Jsou reprezentovány třemi základními typy (Tab. 3). V odborné literatuře se lze setkat s celou řadou klasifikací glacifluviálních sedimentů. Detailnějším členěním se zabývali např. Brodzikowsky a Van Loon in Růžičková et al. (2003).

Tab. 2: Členění englaciálních sedimentů (Růžičková et. al, 2003)

| Englaciální sedimenty | | |
|-----------------------|----------------|-------------------------|
| subglaciální s. | englaciální s. | supraglaciální s. |
| s. eskerů | s. eskerů | s. kamů, kamových teras |

Valy, které vznikají pod ledovcem díky sedimentační činnosti podledovcových toků, se označují jako eskery. Jsou tvořeny vytříděným materiálem a směřují kolmo k valům čelní morény (Benn & Evans, 1998). Kamy tvoří materiál uložený na povrchu

ledovce, vznikají po odtátí ledu v podloží (Benn & Evans, 1998). S kamovými terasami se lze setkat na okrajích ledovce při svahu na bocích, nebo na čelní straně ledovce. Kromě materiálu přineseným ledovcem jsou převážně tvořeny i materiálem místního původu (Růžičková et al., 2003).

Tab. 3: Členění proglaciálních sedimentů (Růžičková et al., 2003)

| |
|--------------------------------|
| Proglaciální sedimenty |
| s. výplavových plošin (sandry) |
| s. glacifluviálních delt |
| s. glacifluviálních teras |

Ze skupiny proglaciálních sedimentů jsou nejvíce plošně zastoupeny sedimenty výplavových plošin, neboli sandrů. Jsou tvořeny materiálem vyplaveným ze spodní a čelní morény.

3. Schmidt Hammer v geomorfologickém výzkumu

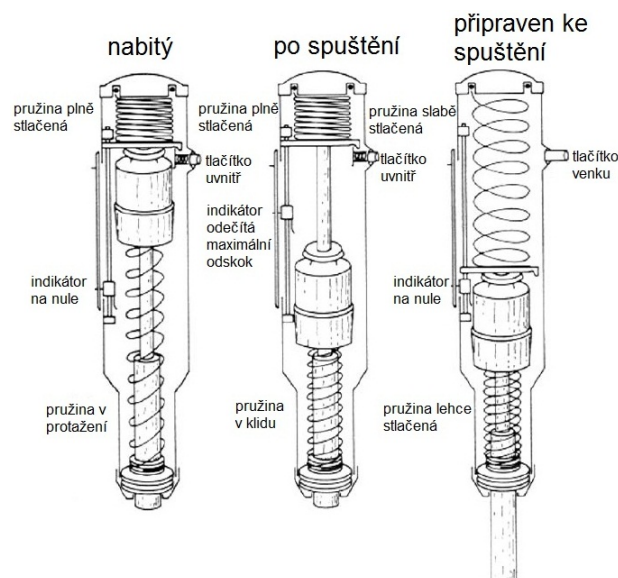
3.1 Princip fungování Schmidt Hammeru

Tvrdoměrné kladivo Schmidt Hammer (Obr. 1) oficiálním jménem „Beton-Prüfhammer Original Schmidt“ (Winkler, 2005) vynalezl Ernest Schmidt v roce 1948 ve Švýcarsku (Goudie, 2006a). Původní využití přístroje spočívalo v nedestruktivním testování tvrdosti betonu. V geomorfologickém kontextu se poprvé začal Schmidt Hammer využívat v 60. letech 20. století (Goudie, 2006a). V současnosti má Schmidt Hammer v geomorfologickém výzkumu široké uplatnění. V první řadě se osvědčil jako úspěšný nástroj relativního datování tvarů reliéfu, zejména glacienních sedimentů (Winkler, 2005). Dále jeho využití spočívá v měření tvrdosti hornin, (respektive jednoosé pevnosti hornin), vlivu pevnosti hornin na tvar reliéfu a také je využíván při studiu procesů zvětrávání (Goudie, 2006a).



Obr. 1: Schmidt Hammer typ L (viz níž) (Amaral et al., 1999)

Schmidt Hammer je založen na následujícím principu: při použití přístroje dojde ke stlačení úderníku pružinou, který je vždy stejnou silou vypuštěn proti povrchu (Hubbard & Glasser, 2005) (viz Obr. 2). Část energie z nárazu úderníku je absorbována plastickou deformací skalního povrchu a část je transformována na teplo a zvuk. Zbylá energie umožňuje odraz úderníku od testovacího povrchu a představuje tak jeho tvrdost (Goudie, 2006a). Velikost odrazu je následně zaznamenána měřidlem přístroje (elektronickým nebo mechanickým- záleží na typu přístroje, viz Tab. 4) a je prezentovaná jako tzv. R hodnota (*rebound-value*). R hodnoty se neuvádějí v žádných jednotkách, jelikož představují bezrozměrnou veličinu.



Obr. 2: Pracovní princip Schmidt Hammeru (Basu & Aydin, 2004, upraveno).

R hodnota závisí na tvrdosti, resp. na pevnosti testovaného skalního povrchu (Hubbard & Glasser, 2005). Rozmezí R hodnot se pohybuje mezi 10 - 100. Pokud je zkoumaný skalní povrch starší, tedy více zvětralý, naměřené R hodnoty jsou menší, než u mladšího, pevnějšího a odolnějšího povrchu (Goudie, 2006a). Na základě naměřených R hodnot lze horniny klasifikovat do tříd dle míry jejich tvrdosti (Tab. 4).

Tab. 4: Klasifikace hornin dle míry jejich tvrdosti (Goudie, 2006a)

| Třída | R hodnota ("N" typ) | Vlastnosti horniny | Příklad |
|-----------------------|---------------------|--|----------------------------------|
| Velmi křehké horniny | 10- 35 | zvětralé a slabě kompaktní sedimentární horniny | křída, sůl kamenná |
| Křehké horniny | 35-40 | slabě stmelené horniny | uhlí, prachovitý jíl a břidlice |
| Středně pevné horniny | 40-50 | sedimentární horniny | pískovec, břidlice |
| Pevné horniny | 50-60 | magmatické a metamorfované horniny | žula, rula a mramor |
| Velmi pevné horniny | >60 | jemnozrnné magmatické a metamorfované horniny s vysokou hustotou | kvarcit, dolerit, gabro a bazalt |

3.2 Typy Schmidt Hammeru

V geomorfologickém výzkumu se lze setkat s několika typy Schmidt Hammeru. Podle velikosti síly dopadu úderníku na skalní povrch se rozlišují tři typy přístroje (Goudie, 2006a) (Tab. 5). Druhé dělení přístrojů souvisí se způsobem měření a záznamu jednotlivých hodnot (Sládek, 2009) (Tab. 6). Při geomorfologickém výzkumu je důležité použít vždy jen jeden z typů přístroje při jedné případové studii, protože R hodnota se mění v závislosti na velikosti dopadové síly určitého typu přístroje (Bilgin et al., 2002 in Sládek, 2009).

Tab. 5: Typy Schmidt Hammeru dle velikosti dopadové síly (Goudie, 2006a)

| Název | Dopadová síla | Popis |
|---------|---------------|--|
| "N" typ | 2,207 Nm | vhodný pro měření velmi tvrdých i křehkých (oslabených) hornin |
| "L" typ | 0,735 Nm | vhodný pro měření více zvětralých hornin než u předchozího typu SH |
| "P" typ | - | vhodný pro testování velmi zvětralých hornin |

Tab. 6: Typy Schmidt Hammeru dle způsobu měření a záznamu R hodnot.
Poznámka: uvedené rozdělení přístrojů vychází z produktů Švýcarské firmy Proceq, která patří k nejvýznamnějším výrobcům Schmidt Hammeru (sensu Sládek, 2009).

| Název | Popis |
|--------------------|---|
| "Original Schmidt" | přístroj měří R hodnotu na mechanickém principu, kdy hodnoty jsou odečítány přímo ze stupnice přístroje |
| "Digi Schmidt" | naměřené R hodnoty jsou z přístroje přenášeny do příručního počítače |
| "Silver Schmidt" | kompromis mezi "Original Schmidt" a "Digi Schmidt" |

3.3 Využití Schmidt Hammeru a metodika sběru dat v geomorfologickém výzkumu

Aplikace Schmidt Hammeru v geomorfologickém výzkumu má určité výhody a nevýhody (viz Tab. 7), s kterými je nutné počítat při efektivním využití přístroje.

Tab. 7: Výhody a nevýhody použití Schmidt Hammeru (Goudie, 2006a)

| Výhody | Nevýhody |
|---|---|
| nízké náklady na pořízení přístroje, provoz i vyhodnocení dat | extrémní citlivost na diskontinuity ve zkoumaném povrchu (štěpitelné, hustě foliované a vrstevnaté horniny lze touto metodou zkoumat velmi obtížně) |
| jednoduchost použití přístroje | |
| přenosnost (díky nízké hmotnosti: 1,7- 2,3 kg) | citlivost na přítomnost vlhkosti v hornině, zvláště u slabých hornin |
| možnost získání velkého množství dat za relativně krátký čas při práci v terénu | |
| korelace R hodnot s dalšími charakteristikami hornin | výsledné R hodnoty mohou být ovlivněny texturou povrchu, kdy hladké a ploché povrchy dávají větší hodnoty než hrubší povrchy |
| R hodnoty nejsou výrazně ovlivňovány teplotou | vliv velikosti testovacích bloků |
| | vliv polohy přístroje při měření |

V odborné literatuře lze nalézt mnoho studií zabývajících se popisem takového měření, které by bylo schopné zajistit reprezentativní výsledné R hodnoty. Metodika sběru dat není sjednocená a řada autorů nabízí rozdílné postupy. Pro minimalizaci nežádoucích vlivů při testování Schmidt Hammerem byly navrženy tyto zásady a doporučení (dle Hubbard & Glasser, 2005, Winkler, 2005, Goudie, 2006a):

- testované horniny jednoho měření by měly být stejného typu z litologického a petrologického hlediska, protože měření přístroje je ovlivňováno rozdílnou původní tvrdostí a odolností horniny vůči zvětrávání.
- povrch by měl být neporušený, bez vegetačního pokryvu a hladký, jelikož větší nerovnosti povrchu způsobují nižší R hodnoty.
- před měřením je vhodné upravit povrch brusným kamenem či elektrickou bruskou. Engel (Černá & Engel, 2011) upozorňuje na nežádoucí vliv zbrúšení povrchu před měřením, jelikož při zbrúšení dojde k odstranění

zvětralé svrchní vrstvy horniny a tak naměřené hodnoty neodpovídají původnímu povrchu, ale povrchu mladšímu. Pokud tedy je účelem posoudit míru zvětrání horniny, testovaný povrch není vhodné zbrusovat. Pokud však je cílem získat informace o tvrdosti čerstvé horniny, tak je zbroušení na místě.

- pro měření jsou vybrány horizontální nebo mírně ukloněné povrchy, jelikož R hodnota je ovlivněna gravitační silou (Goudie, 2006a) a tak R hodnoty získané z ukloněných povrchů musí být normalizovány s ohledem na horizontální směr podle korekčních metod.
- přístroj by měl být aplikován kolmo k povrchu horniny. V případě použití jiného směru je nutné podobně jako u směru povrchu aplikovat určité korekční metody.
- provádět měření na pevně uložených blocích o minimální hmotnosti 25 kg,
- měření provádět min 6-15 cm od okrajů a trhlin v testovacím bloku horniny.
- každé měření by mělo být vykonané na novém místě dopadu úderníku v rámci testovaného bloku.
- minimalizovat rozdíly mezi jednotlivými měřeními, tj. používat stejný typ přístroje, dodržovat stejný postup, vybírat podobné bloky hornin pro měření.
- pro posouzení kvality výsledků a identifikaci metodologických chyb musí být data doprovázena dodatečnou statistickou informací, obvykle směrodatnou odchylkou a 95% intervalem spolehlivosti.
- provádět pravidelné kalibrace přístroje.

Pro získání výsledné R hodnoty bylo navrženo několik postupů (Tab. 8), které se od sebe v mnohém odlišují. Neshoda autorů panuje u počtu úderů na jednotlivé testovací bloky i u jejich lokalizace. Rozdílné názory panují i v otázce, zda do výpočtu výsledné (průměrné) R hodnoty započítat všechny naměřené hodnoty, nebo některé (např. nejextrémnější) vynechat.

Tab. 8: Postupy navržené pro stanovení výsledné R hodnoty

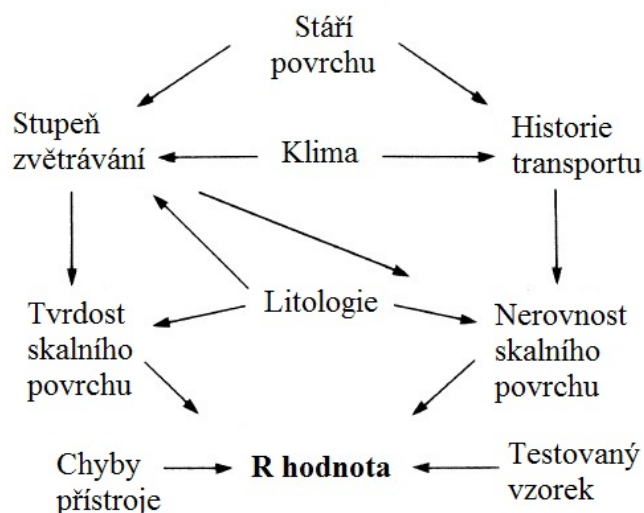
| Autor a rok | Postup |
|---------------------------------|---|
| IRMS (1978) (in Goudie, 2006a) | doporučuje 20 úderů do testovaného bloku, kdy vzdálenost mezi jednotlivými údery musí být minimálně stejně velká jako průměr hrotu. Výsledná R hodnota je spočítána jako průměr 10 nejvyšších hodnot. |
| Evans et al. (1999) | v moréně bylo vybráno 5-7 bloků, kde bylo provedeno 5 měření. Výsledná R hodnota byla spočítána jako průměr z pěti nejvyšších naměřených hodnot v moréně. |
| Amaral et al. (1999) | při výpočtu výsledné R hodnoty bere v úvahu všechny naměřené hodnoty, jelikož zastává názor, že je potřeba porozumět vniklým odchylkám v měření, jelikož souvisí s heterogenitou materiálu |
| Katz & Reches & Roegiers (2000) | provedli 32-40 měření a zprůměrovali horních 50 % hodnot. Velmi nízké hodnoty byly vynechány, protože mohou souviset s tím, že hornina byla oslabena samotným aplikováním přístroje nebo malými trhlinami na povrchu. |
| Winkler (2005) | provedl vždy jedno měření na 50 vybraných blocích. Při použití velkého čísla testovaných bloků chtěl minimalizovat vliv petrografických nehomogenit a mikroklimatu, které ovlivňují rychlost zvětrávání povrchů, které byly obnaženy ve stejný čas. |
| Engel (2007) | navrhl změřit 25 hodnot na každém testovaném povrchu, z kterých se vypočítá průměr. Pět hodnot s největší odchylkou od průměru se vyřadí. Výsledná R hodnota se vypočítá jako průměr ze zbylých (20) hodnot |

3.4 Schmidt Hammer jako nástroj relativního datování

Tvrdoměrné kladivo Schmidt Hammer lze využít k určení stupně zvětrávání, který testovaný povrch podstoupil (Goudie, 2006a). Za předpokladu, že existuje vztah mezi stupněm zvětrávání a délkou odkryvu povrchu, lze Schmidt Hammer použít jako nástroj relativního datování (Goudie, 2006a). Nicméně vztah mezi stupněm zvětrávání a délkou odkryvu testovaného povrchu není jednoznačný. White et al. (1991) při studii aluviálních sedimentů v Tunisku shledal, že rychlost zvětrávání není lineární, ale postupem času se mění (zmenšuje). Většina autorů však při svém výzkumu počítá s lineární rychlostí zvětrávání (sensu Černá & Engel, 2011). Takovýto přístup je velmi zjednodušený, jelikož rychlost zvětrávání je ovlivněna mnoha faktory.

Základním faktorem, ovlivňujícím míru/rychlost zvětrávání, je geomorfologická hodnota hornin. Geomorfologickou hodnotu hornin lze chápat jako funkci chemických (minerální složení) a fyzikálních (struktura a textura horniny) vlastností hornin, které jsou schopné určitým stupněm odolávat exogenním činitelům za stálých klimatických podmínek (Demek, 1988). Důležitým faktorem determinujícím zvětrávání jsou mikro- až makroklimatické podmínky. Místní konfigurace reliéfu, expozice vůči světovým stranám (v souvislosti s přísunem slunečního záření), úhrn a charakter srážek a délka sněhové pokrývky ovlivňují zvětrávání z pohledu mikro- až mezoklimatického hlediska (Ritter & Kochel & Millet, 2011). Z hlediska vlivu makroklimatických činitelů a jejich změn v průběhu kvartéru dochází během interglaciálů k zesílení zvětrávání (zejména chemického) a naopak během glaciálů dochází obecně k pomalejším modifikacím povrchu hornin (sensu Černá & Engel, 2011).

Schmidt Hammer jako nástroj relativního datování je oblíbený pro svou finanční nenáročnost a rychlé získání velkého počtu dat při měření. Ale jako každá jiná metoda má i své nevýhody, jelikož výslednou R hodnotu ovlivňuje mnoho faktorů (Obr. 3). Všechny tyto faktory je třeba brát v úvahu, jelikož každý představuje potenciální zdroj chyb.



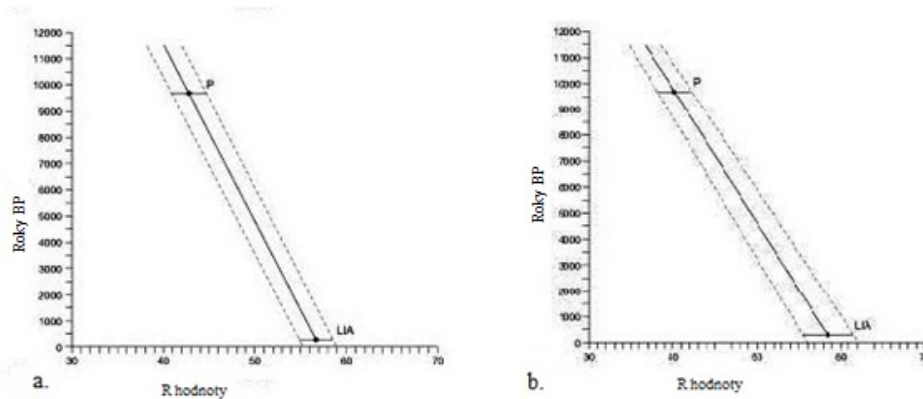
Obr. 3: Faktory ovlivňující výslednou R hodnotu a vztahy mezi nimi (McCarroll, 1989, upraveno)

Průkopníky použití Schmidt Hammeru jako nástroje relativního datování byli Matthews a Shakesby (1984). Schmidt Hammer lze využít k odhadu relativního stáří různých geomorfologických fenoménů, jako např. glacienních sedimentů (viz níže), kamenných ledovců (Humlum, 1998), lavinových usazenin (Christiansen et al., 2002), fosilních břehových linií (Trenhaile et al., 1999) a aluviálních kuželů (White et al, 1998).

3.5 Využití Schmidt Hammeru pro sestrojení věkových kalibračních křivek

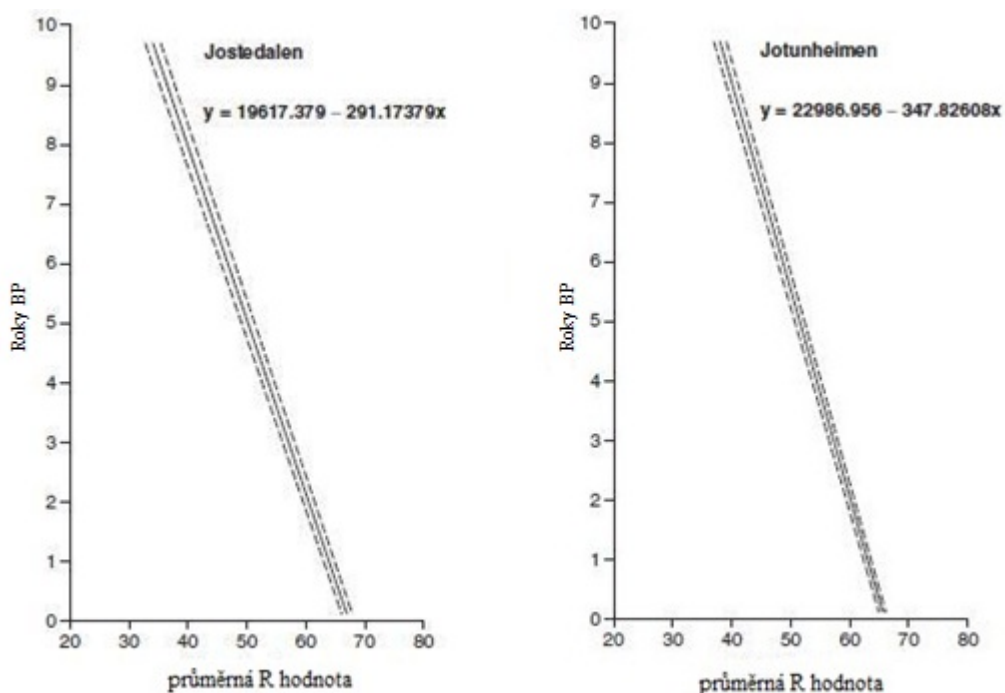
V poslední době se objevují pokusy použít R hodnoty povrchů o známém stáří k sestrojení věkových kalibračních křivek (např. Matthews & Owen, 2010, Shakesby et al. 2006, Winkler, 2005). Shakesby et al. (2006) upozorňuje na značný potenciál využití Schmidt Hammeru pro sestrojení věkových kalibračních křivek povrchů holocenního stáří. Je však zapotřebí dané křivky sestrojít s velkou pečlivostí, což vyžaduje značné množství kontrolních bodů (povrchů o známém stáří) rozprostřených po co nejdelší časové období. S použitím více kontrolních bodů lze zúžit interval spolehlivosti, a tak redukovat potřebu pro další nezávislé datovací techniky (expoziční datování, radiokarbonové datování).

Shakesby et al. (2006) sestrojil věkové kalibrační křivky pro oblast Jostedalsbreen-Sunmore a Jotunheimen-Sognefjell v Norsku s odhadovanou chybou ± 700 až 1600 let (Obr. 4).



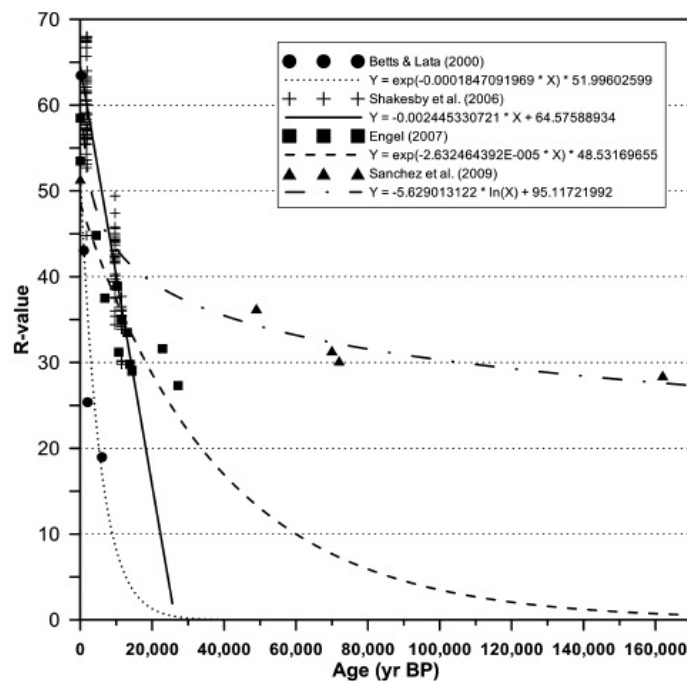
Obr. 4: Věkové kalibrační křivky sestrojené z naměřených R hodnot u testovaných povrchů v oblasti Jotunheimen (a) a Jostedalsbren (b), Norsko, (Shakesby et al, 2006). Upraveno

Matthews & Owen (2010) dosáhli větší přesnosti kalibračních křivek (Obr. 5). Z naměřených dat z oblasti Jotunheimen bylo dosaženo přesnosti ± 115 - ± 185 let, z oblasti Jostedalsbren ± 128 - ± 180 let. Větší přesnost lze přisoudit použití skalního podloží jako kontrolních bodů, u kterého jsou menší rozdíly v litologii, a použití více kontrolních bodů.



Obr. 5: Věkové kalibrační křivky sestrojené z naměřených R hodnot z testovaných povrchů v oblasti Jotunheimen a Jostedalsbren, Norsko. (Matthews & Owen, 2010). Upraveno.

Pro sestavení kalibračních křivek obou studií bylo využito jednoduchého lineárního vztahu mezi R hodnotou a absolutním stářím. Ke zjištění stáří kontrolních bodů lze využít numerického datování (viz níže). Při studiu povrchů vzniklých před počátkem holocénu je však přístup, který počítá s lineární mírou zvětrávání, nevhodný, jelikož míra zvětrávání se v souvislosti s kvartérním klimatickým cyklem mění v čase (viz Černá & Engel, 2011). Pro starší povrchy je vhodnější využít exponenciální křivku závislosti R hodnot na narůstajícím věku (viz Obr. 6).



Obr. 6: Věkové kalibrační křivky pro skalní povrchy s rovnicemi regresivních závislostí (Černá & Engel, 2011). Jednotlivé kalibrační křivky jsou vypočítané z dat studií Betts & Latta (2000), Shakesby et al. (2006), Engel (2007) a Sánchez et al. (2009).

Přesnost každé věkové kalibrační křivky klesá se stářím testovaného povrchu, což je přisuzováno větší proměnlivosti mezi R hodnotami u starších povrchů (Mathews & Owen, 2010). Odhadované chyby lze snížit např. použitím většího počtu testovaných povrchů o známém stáří.

3.6 Schmidt Hammer v kombinaci s jinými datovacími metodami

Schmidt Hammer test lze kombinovat s dalšími metodami relativního datování (např. mocnost zvětralé kůry, ostrohrannost úlomků, fáze vývoje zvětrávacích jamek, vývoj půd, lichenometrie atd.) (Tab. 9) nebo s metodami numerického datování (např. expoziční datování, luminiscenční metody, radiokarbonové datování atd.) (Tab. 10). Kombinace metod absolutního a relativního datování umožňuje sestavení kalibračních křivek pro metody relativního datování, nicméně jen s lokální platností (Böhler et al., 2011).

Tab. 9: Charakteristika vybraných metod relativního datování používaných v kombinaci se Schmidt Hammer testem. Princip a použití jednotlivých metod je popsán dle Hubbarda & Glassera (2005).

| Název | Princip | Použití | Studie |
|--------------------------------|--|--|--|
| Mocnost zvětrávací kůry | Tato metoda je založena na principu, že na čerstvě obnaženém skalním povrchu se postupem času začne vytvářet zvětrávací kůra. Čím déle je skalní povrch vystaven zvětrávání, tím větší je tloušťka kůry. | Nejprve se udeří geologickým kladívkem do navětralého povrchu. Následně je změřena tloušťka odloupnuté kůry pomocí posuvného měřítka v nejšířším místě povrchu. | Böhler et al (2011) |
| Lichenometrie | Metoda je založena na principu, že existuje přímý vztah mezi velikostí lišejníků a jejich stářím (čím větší lišejník, tím starší). | Nejčastěji používaný postup je tento: výsledná hodnota je spočítána jako průměrná velikost z pěti největších lišejníků na testovaném bloku. Nejčastěji používaný druh lišejníku je <i>Rhizocarpon geographicum</i> . | Rune & Skjard (2000), Evanse et al. (1999), Shakesby et al. (2004) |
| Fáze vývoje zvětrávacích jamek | Metoda je založena na předpokladu, že čím déle jsou testované povrchy vystaveny zvětrávacím procesům, tím větší celkové rozměry vykazují zvětrávací jamky. | Na testovaných površích se měří průměr a hloubka vybraných zvětrávacích jamek. | Hubbard & Glasser (2005) |

Tab. 10: Charakteristika nejčastěji používaných metod numerického datování používaných v kombinaci se Schmidt Hammer testem. Princip a použití jednotlivých metod je popsán dle Hubbarda & Glassera (2005).

| Název | Princip | Použití | Studie |
|--|---|---|---|
| Nuklidové datování / <i>exposure age</i> | Expoziční datování s využitím kosmogenních nuklidů (^3He , ^{10}Be , ^{14}C , ^{21}Ne , ^{26}Al a ^{36}Cl) je založeno na předpokladu, že balvany transportované ledovcem a skalní podloží jsou po ústupu ledovce vystaveny kosmickému záření. Zastoupení jednotlivých nuklidů odráží délku odkryvu testovaného povrchu. | Vzorky testovaných bloků jsou odebrány dlátem či kladívkem, následně jsou testovány v laboratoři. Výběr jednotlivých vzorků by měl být proveden dle doporučení Hubbard & Glasser (2005) | Böhler et al. (2011) Engel et al. (2011), Matthews & Winkler (2011), Sánchez et al. (2009) |
| Radio-karbonové datování | Nejpoužívanější metoda pro datování organických materiálů. Během života organismy asimilují uhlík, když zemrou, nahromaděný izotop uhlíku v organismech se začne rozpadat. Při datování je zjišťován poměr ^{12}C (stabilního izotopu) ke zbylému množství ^{14}C . | Na glacienních sedimentech je nejčastěji použita rašelina, nicméně zjištěné stáří není příliš přesné, jelikož rašelina se nezačíná tvořit bezprostředně po ústupu ledovce. Čas, po který se začne tvořit rašelina, je závislý na stanovištních faktorech. Odebrané vzorky se dále testují v laboratořích. | Strelin et al. (2011) |
| Luminescenční metody: Opticky stimulovaná luminescence a Termoluminescence | Tato metoda je aplikována na sedimentární zrna, které obsahují radioaktivní izotopy ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th nebo ^{40}K . V důsledku radioaktivního záření se uvolní elektrony ze struktury minerálů a nahromadí se v místech poruch jeho krystalické mřížky. Zahřáním (TL) nebo ozáření (OSL) se elektrony vrátí zpět do elektronových obalů. Čím déle je materiál vystaven radioaktivnímu záření, tím více elektronů se uvolní a efekt luminescence je mohutnější. | Při sběru vzorků sedimentů musí být zamezeno přísunu slunečního záření. Vzorky jsou získávány vložením trubky do sedimentu. U glacienních sedimentů je třeba brát v úvahu, že materiál transportovaný ledovcem nebyl při transportu vystaven přímo slunečnímu záření a nebyl tak plně „vynulován“. | Xu et al. (2009) |

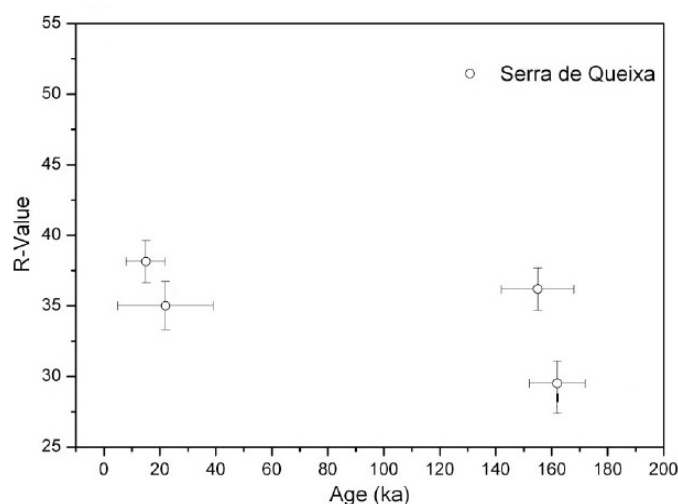
Z metod relativního datování je nejčastěji metoda Schmidt Hammer testu kombinována s lichenometrií (Evans et al., 1999) nebo s mocností zvětralé kůry (Böhler et al., 2011).

Pomocí lichenometrie lze dosáhnout vyšší přesnosti v datování než při použití Schmidt Hammeru (5-10 let), ale její použití je omezeno na datování povrchů mladších 500 let (Winkler, 2005). Kombinací metod Schmidt Hammer s lichenometrií se zabývali Aa & Sjastad (2000). Na základě naměřených R hodnot byly zjištěny významné rozdíly ve stupni navětrání mezi morénou M1 a morénami M2 a M3 ve výzkumné oblasti (oblast Boyabreen, Norsko). Tento předpoklad byl potvrzen i lichenometrií, kde byly zjištěny značné rozdíly mezi průměrnou velikostí *Rhizocarpon geographicum* u testovaných morén (Tab. 11).

Tab. 11: Výsledné R hodnoty a velikosti lišejníků (Aa & Sjastad, 2000)

| Moréna | Průměrná vel. lišejníků (cm) | Největší lišejník | R hodnota | Odhadované stáří |
|--------|------------------------------|-------------------|-----------|------------------|
| M1 | 16-22 | 22 | 44,59 | 8560 BP |
| M2 | 9,5-10 | 13 | 56,53 | 2890 BP |
| M3 | 6.10 | 12 | 55,63 | 3317 BP |

Sánchez et al. (2009) zkombinoval Schmidt Hammer měření s metodou expozičního datování s využitím kosmogenního nuklidu ^{21}Ne . Oproti Schmidt Hammeru se jedná o drahou a časově náročnou metodu datování, proto je vhodné využít Schmidt Hammer pro výběr jednoho reprezentativního místa testovaného povrchu (Sánchez et al., 2009). Ve své studii porovnáním R hodnot s daty expozičního datování naznačil nelineární změny rychlosti zvětrávání během času. V případě glacigenně modelované oblasti (pohoří Serra de Queixa, Španělsko) byly naměřeny podobné R hodnoty u testovaných povrchů velmi odlišného stáří (Obr. 7). Tyto podobné R hodnoty starších povrchů (~160ka) a mladších povrchů (~20ka) mohou být způsobeny tím, že původní starý (~160 ka) materiál z povrchu byl odstraněn a na jeho místě se vyskytuje povrch mladší (Ritter et al., 2011).



Obr. 7: Závislost R hodnot a stáří testovaných povrchů získaných metodou expozičního datování v oblasti Serra de Queixa (Sanchéz, 2009, upraveno).

Matthews a Winkler (2011) porovnali výsledky Schmidt Hammer měření na morénách holocenního stáří, které byly jako první datované pomocí expozičního datování (Matthews et al. 2008) v oblasti Austanbotnbreen v Norsku. Datování pomocí Schmidt Hammeru se prokázalo přesnější (Tab. 12), ale věk obou morén (M1 a M2) nebylo možné od sebe statisticky rozlišit, jelikož přesnost kalibrační křivky byla ± 1262 let. Menší přesnost expozičního datování mohla být pravděpodobně zapříčiněna menším počtem vhodných bloků pro datování. Příliš nízký odhadovaný věk (expozičním datováním) morény M2 může být zapříčiněn sněhovými lavinami, díky kterým se dostal na morénu mladší materiál (Matthews & Winkler, 2011). Naopak vyšší odhadovaný věk pro morénu M1 mohl být způsoben zhroucením morény, kdy se na povrch dostal jemnější a více sypký materiál vnitřní morény (Matthews & Winkler, 2011).

Tab. 12: Výsledné stáří morén zjištěných pomocí metod expozičního datování a Schmidt Hammer testu (Matthews & Winkler, 2011). Stáří morén uvedené v sloupci „Schmidt Hammer“ bylo zjištěno pomocí věkové kalibrační křivky.

| Moréna | ^{10}Be | ^{26}Al | Schmidt Hammer |
|--------|------------------|------------------|-------------------|
| M 1 | 9930 \pm 1020 | 10871 \pm 1319 | 9546 \pm 1262 |
| M 2 | 8449 \pm 857 | 8494 \pm 940 | 10 227 \pm 1262 |

V nashromážděných člancích a studiích byla z metod numerického datování v kombinaci se Schmidt Hammer testem používána pouze metoda expozičního datování. Oproti Schmidt Hammer testu jde o finančně náročnou metodu, je však

nezbytná pro určení absolutního stáří povrchů, které jsou dále využívány jako kontrolní body pro sestavení věkových kalibračních křivek metod relativního datování. V případě expozičního datování má klíčovou roli výběr vhodných míst pro datování. Při výpočtu expozičního stáří se musí brát v úvahu stínový efekt sněhové pokrývky vůči kosmickému záření, a tak značnou nejistotou v měření a potenciálním zdrojem chyb je odhadovaná délka trvání sněhové pokrývky na testovaných površích. Délka trvání sněhové pokrývky má značný vliv i na zvětrávání a tím pádem i na R hodnoty, při delším trvání sněhové pokrývky je povrch delší dobu izolován od vlivu exogenních činitelů.

3.7 Použití Schmidt Hammeru pro datování glacienních sedimentů

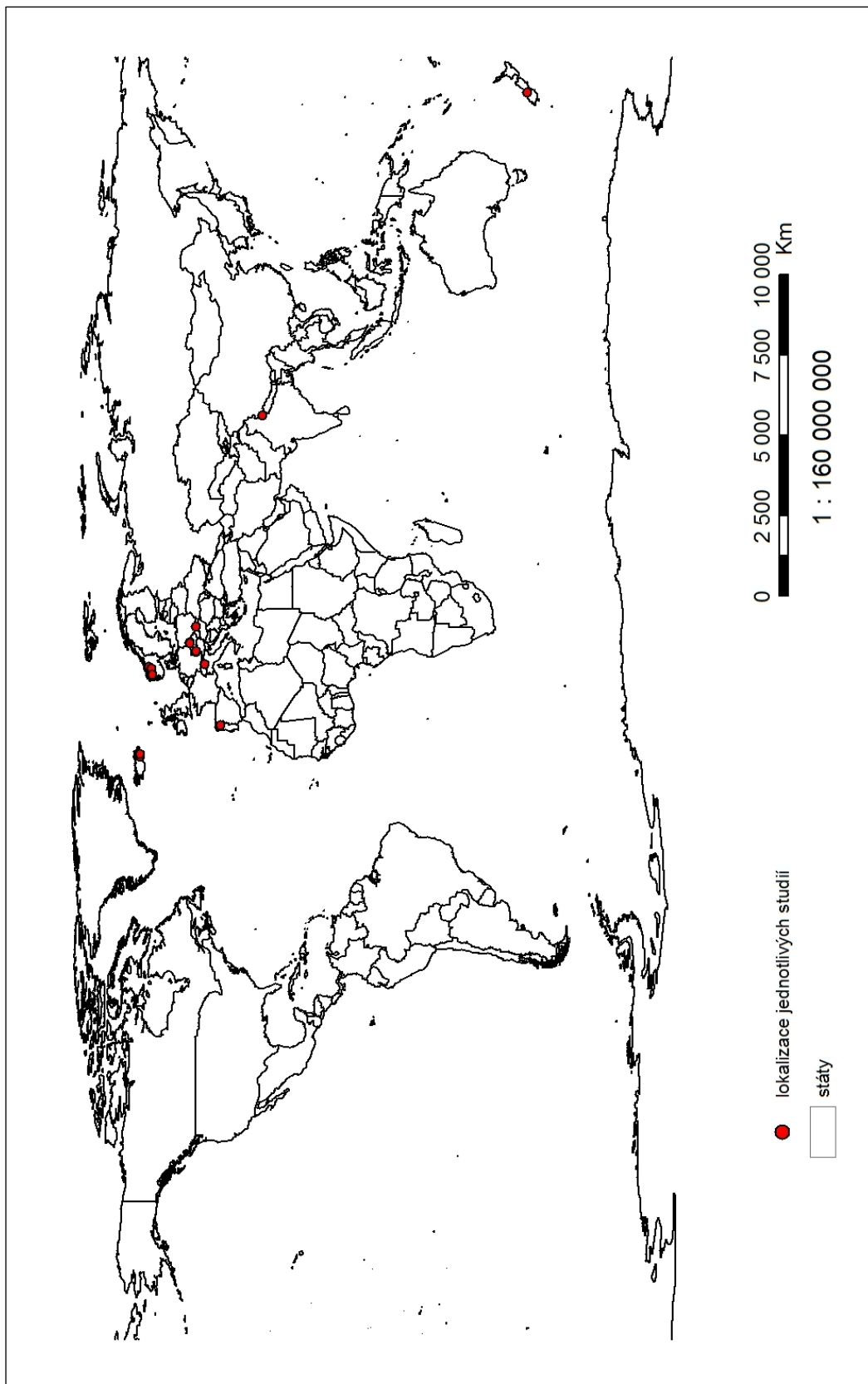
Shakesby a Matthews (1984) poprvé využili Schmidt Hammer jako nástroj relativního datování při studiu glacienních sedimentů. R hodnoty byly tehdy použity ve spojení s velikostí lišejníků na morénových akumulacích v jižním Norsku (Shakesby et al., 2006). Použití této metody u glacienních sedimentů má však svá rizika spojená s působením paraglaciálních (Ballantyne, 2002) a postglaciálních procesů. Paraglaciální procesy působí ihned po ústupu ledovce, kdy dochází k přizpůsobení prostředí novým podmínkám (Benn & Evanse, 1998). Významnými paraglaciálními i postglaciálními procesy jsou svahové pochody, během kterých se na morénu může dostat materiál odlišného stáří a různého genetického původu. Při studiu takovéto morény obohacené o materiál např. mur nebo sesuvů není často možné Schmidt Hammer test provést a považovat za reprezentativní (Goudie, 2006a). Pro snížení rizika testování jiného než chtěného materiálu v rámci morény je vhodné vybírat si testované morény mimo dosah svahových procesů. Vybrané balvany pro testování by se měly nacházet na vrcholových partiích morénového valu, jelikož na úpatí morénového valu je větší pravděpodobnost výskytu nepůvodního materiálu. Při výběru testovacích balvanů je třeba brát v úvahu vliv fluviální činnosti, díky které je rozplavován a erodován materiál čelních a koncových morén (Matthews & Winkler, 2011). Po odtátí ledovce se může dlouho dobu vyskytovat v moréně led. Oteplení v daném prostředí vede k odtátí tohoto ledu a následnému zhroucení materiálu morény, což může vést k odkryvu mladšího materiálu (méně zvětralého materiálu) uvnitř morény.

Schmidt Hammer lze využít pro relativní datování glacienních sedimentů formovaných během holocénu nebo pozdního glaciálu, nicméně maximální časové rozlišení, kterého je Schmidt Hammer schopen dosáhnout, je 200 až 300 let (Winkler,

2005). I když jsou názory, že metoda Schmidt Hammer je vhodná pouze pro rozlišení míst odledněných během Malé doby ledové od míst odledněných během posledního glaciálu a ranního holocénu (McCarroll & Nesje, 1993 in Goudie, 2006a).

3.7.1 Lokality použití Schmidt Hammeru jako nástroje relativního datování při glacigenních sedimentech

V různých prostředích glacigenní modelace reliéfu bylo metodou Schmidt Hammer testu zjišťováno relativní staří glacigenních sedimentů (Příloha 1, Obr. 8). Výsledné R hodnoty (Příloha 1) byly většinou vypočítány odlišným způsobem (viz Příloha 2).



Obr. 8: Lokalizace jednotlivých studií.

4. Metody a statistické zpracování dat

Statistické zpracování dat s charakteristikami daných lokalit (Příloha 1) bylo provedeno v programu STATISTICA (StatSoft, Inc., 2009). Pomocí Pearsonova korelačního koeficientu byly zjišťovány korelace mezi R hodnotami a dalšími charakteristikami jednotlivých lokalit, signifikantnost těchto korelací byla testována t-testem na hladině spolehlivosti $p=0,05$.

Pro první korelační analýzu byly vybrány morény tvořené žulovým materiálem, *aby se zamezil vliv odlišného typu horniny na výslednou R hodnotu*. Byly vypočteny tři korelační matice: 1. pro všechny lokality dohromady, 2. pro studie z Norska, 3. pro lokality Evropy v mírném klimatickém pásu. Byl zjišťován vztah mezi R hodnotami a stářím morén, R hodnotami a nadmořskou výškou morén a R hodnotami a klimatickými charakteristikami (průměrná roční teplota, průměrný roční úhrn srážek). Stáří jednotlivých morén bylo přepočteno na roky BP (*before present*), kdy jako současnost byl brán rok 2000. Pokud informace o klimatických poměrech nebyly v původních člácích uvedeny, byly tyto informace získány z dat meteorologických stanic poblíž studovaných lokalit nebo z jiné dostupné literatury.

Pro druhou korelační analýzu byly vybrány morény vzniklé během LIA a mladší. Byl zjišťován vztah mezi R hodnotami a klimatickými charakteristikami (průměrná roční teplota, průměrný roční úhrn srážek) a R hodnotami s nadmořskou výškou. Dá se předpokládat, že u těchto „mladých“ morén jsou v daných oblastech rozdíly klimatických podmínek při jejich vzniku oproti současným klimatickým podmínkám velmi podobné.

Analýza rozptylu (ANOVA – *Analysis of variance*) se používá pro posouzení významnosti jednotlivých zdrojů variability v souboru dat (Meloun & Militký, 2002). V této práci byl zjišťován vliv typu hornin na R hodnoty a na směrodatnou odchylku R hodnot. Pro analýzu byly vybrány morény o stáří 8000-12000 let BP, kterých bylo ve zdrojovém souboru dat nejvíc. Výběrem těchto morén lze omezit vliv stáří morén na vztah R hodnoty s typem horniny. Výsledkem analýzy je, zda jsou morény tvořené různým typem hornin od sebe na základě průměrných R hodnot statisticky odlišitelné. Rozdíly byly posuzované na hladině významnosti $p=0,05$, síla testu je vyjádřena pomocí hodnoty F-statistiky (F-testu) (Meloun, Militký, Hill, 2005).

5. Výsledky

Nejvyšší průměrné R hodnoty (50-66,1) byly naměřeny na morénách formovaných během a po skončení LIA (Malá doba ledová) (Tab. 10). Absolutně nejvyšší R hodnota (66,1) byla naměřena na moréně z roku 1928. Jedná se o morénu z metamorfovaných hornin z oblasti Jotunheimen-Storbreen v Norsku (McCarroll, 1989). Výjimku mezi vysokými R hodnotami patřícími k tvarům vzniklým během LIA tvoří moréna z roku 1777 na Islandu, kde byla naměřena R hodnota 38,6 (Evans et al., 1999). Podobně nízké R hodnoty (39,5-42,4) byly získány na morénách formovaných během období 1831-1935 v údolí Gangotri v Indii (Awatshi et al., 2005). Lze předpokládat, že nízké R hodnoty jsou způsobeny silným postglaciálním zvětráváním v této oblasti.

Naopak nejnižší průměrné R hodnoty (25-40) byly získány na morénách vzniklých během pozdního glaciálu v oblasti Krkonoš (Engel et al., 2007, Baláková, 2006), a Šumavy (Vočadlova, 2006) (Příloha 1).

5.1 Výsledky statistické analýzy

Vzájemné vztahy mezi jednotlivými charakteristikami studovaných lokalit jsou vyjádřeny hodnotou Pearsonova korelačního koeficientu (r). Nejvíce byl zkoumaný vztah mezi R hodnotami a ostatními charakteristikami (absolutní stáří, nadmořská výška, průměrné roční teploty, průměrné roční úhrny srážek).

Pro všechny studie (Příloha 1) byl potvrzen předpoklad, že s narůstajícím stářím testovaného povrchu signifikantně klesá velikost R hodnot ($r=-0,54$).

V případě první korelační analýzy, pro kterou byly vybrány morény tvořené žulovým materiálem, byla zjištěna poměrně silná kladná korelace mezi R hodnotami a nadmořskou výškou ($r = 0,45$) (Tab. 13). V případě vztahu mezi R hodnotou a klimatickými charakteristikami byly prokázány poměrně silné korelace, kdy s narůstající teplotou a ročním úhrnem srážek klesá velikost R hodnot (Tab. 13).

Při zúžení výběru jen na lokality z Norska pro korelační analýzu, byla zjištěna poměrně silná korelace mezi R hodnotou a nadmořskou výškou ($r=0,68$) (Tab. 14). Mezi R hodnotou a průměrnou roční teplotou byla zjištěná poměrně silná korelace ($r = 0,7$), kdy se zvyšující se průměrnou roční teplotou narůstá velikost R hodnoty. Opačný vztah byl zjištěn mezi R hodnotou a ročním úhrnem srážek ($r = -0,7$), kdy s narůstajícím množstvím srážek klesá velikost R hodnot.

V případě morén z oblasti mírného klimatického pásu Evropy nebyly zjištěné žádné signifikantní korelace mezi R hodnotou a dalšími charakteristikami (Tab. 15)

Tab. 13: Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami všech studovaných lokalit (47 morén) morén budovaných žulovým materiálem. Tučně jsou vyznačeny signifikantní závislosti na hladině spolehlivosti $p = 0,05$.

| | Nadm. výška (m n. m.) | Teplota (°C/rok) | Srážky (mm/rok) | R hodnota (průměr) |
|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Nadm. v. (m n. m.) | 1,00 | 0,02 | -0,57 | 0,45 |
| Teplota (°C/rok) | 0,02 | 1,00 | 0,31 | -0,62 |
| Srážky (mm/rok) | -0,57 | 0,31 | 1,00 | -0,65 |
| R hodnota (průměr) | 0,45 | -0,62 | -0,65 | 1,00 |

Tab. 14: Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami lokalit z Norska (17 morén) u morén tvořených žulovým materiálem. Tučně jsou vyznačeny signifikantní závislosti na hladině spolehlivosti $p = 0,05$.

| | Nadm. v. (m n. m.) | teplota (°C/rok) | srážky (mm/rok) | R hodnota (průměr) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Nadm. v. (m n. m.) | 1 | 1 | -1 | 0,68 |
| teplota (°C/rok) | 1 | 1 | -1 | 0,7 |
| srážky (mm/rok) | -1 | -1 | 1 | -0,7 |
| R hodnota (průměr) | 0,68 | 0,7 | -0,7 | 1 |

Tab. 15: Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami lokalit z mírného klimatického pásu Evropy (32 morén) u morén tvořených žulovým materiálem. Tučně jsou vyznačeny signifikantní závislosti na hladině spolehlivosti $p = 0,05$.

| | Nadm. v. (m n. m.) | teplota (°C/rok) | srážky (mm/rok) | R hodnota (průměr) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Nadm. v. (m n. m.) | 1,00 | 0,54 | -0,55 | 0,32 |
| teplota (°C/rok) | 0,54 | 1,00 | -0,78 | 0,20 |
| srážky (mm/rok) | -0,55 | -0,78 | 1,00 | -0,16 |
| R hodnota (průměr) | 0,32 | 0,20 | -0,16 | 1,00 |

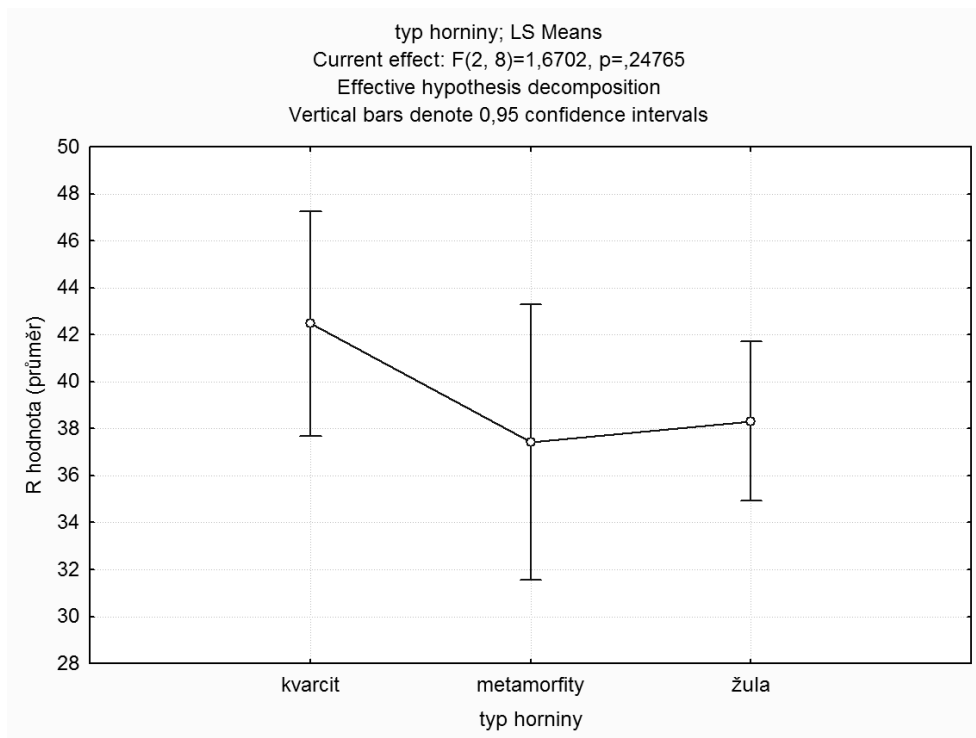
V druhé korelační analýze (Tab. 16), pro kterou byly vybrány morény formované během LIA a mladší, nebyla zjištěna signifikantní závislost mezi R hodnotou a nadmořskou výškou. Mezi R hodnotou a klimatickými charakteristikami byla zjištěna signifikantní závislost, kdy s narůstajícím úhrnem srážek a se zvyšující se průměrnou roční teplotou klesá velikost R hodnot ($r = -0,82$, $r = -0,7$).

Tab. 16: Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (r) mezi vybranými charakteristikami u morén formovaných během LIA (41 morén). Tučně jsou vyznačeny signifikantní závislosti na hladině spolehlivosti $p=0,05$.

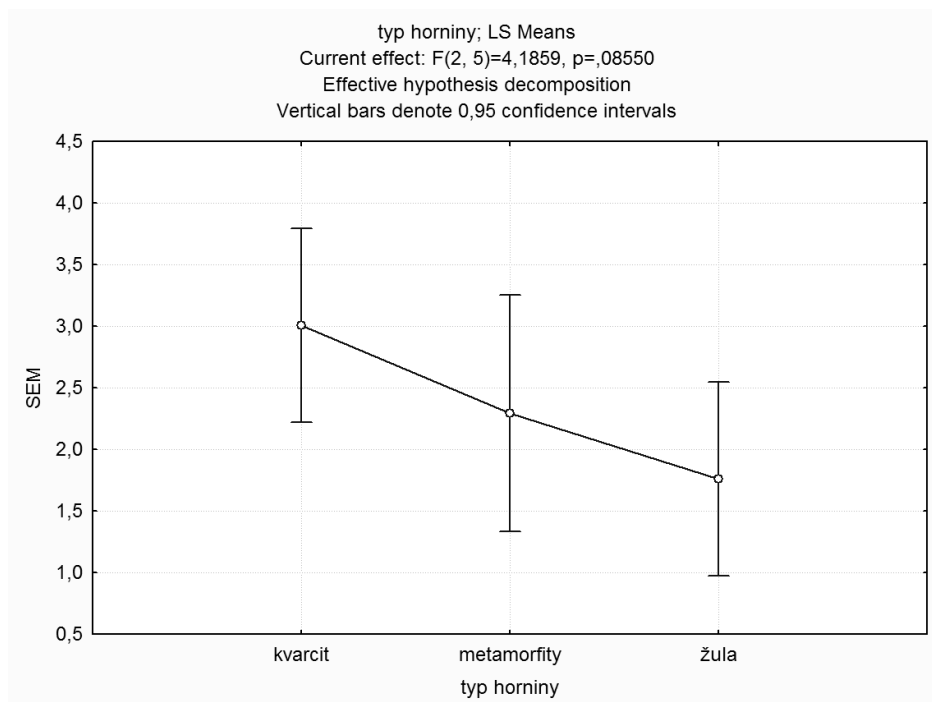
| | Nadm. v. (m n. m.) | teplota (°C/rok) | srážky (mm/rok) | R hodnota (průměr) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Nadm. v. (m n. m.) | 1 | -0,7 | -0,82 | 0,11 |
| teplota (°C/rok) | -0,7 | 1 | 0,96 | -0,45 |
| srážky (mm/rok) | -0,82 | 0,96 | 1 | -0,36 |
| R hodnota (průměr) | 0,11 | -0,45 | -0,36 | 1 |

Na základě výsledků analýzy rozptylu lze říci, že morény tvořené kvarcitem se signifikantně odlišují ve velikosti R hodnot (vyšší R hodnoty) od morén tvořených žulami nebo metamorfity (nižší R hodnoty) (Obr. 9).

Při zjišťování vlivu typu horniny na směrodatnou odchylku R hodnot byla největší hodnota směrodatné odchylky (3) zjištěna u kvarcitu (Obr. 10). Naopak nejmenší hodnota směrodatné odchylky (1,75) byla zjištěna u morén tvořených žulou.



Obr. 9: Vliv typu horniny na R hodnotu testovaného povrchu (jednocestná ANOVA).



Obr. 10: Vlivu typu horniny na směrodatnou odchylku testovaného povrchu (jednocestná ANOVA).

6. Diskuze

6.1 Využití Schmidt Hammeru v geomorfologickém výzkumu

Od prvního využití Schmidt Hammeru pro potřeby geomorfologie v 60. letech 20. století se jeho uplatnění stále zvětšuje. Od té doby metoda Schmidt Hammer testu prodělala značný vývoj a v současnosti s využitím věkových kalibračních křivek umožňuje vysokou přesnost i absolutního (numerického) datování tvarů reliéfu.

Böhler et al. (2011) ve své studii došel k závěru, že Schmidt Hammer se osvědčil jako úspěšný nástroj pro rozlišení věku forem zejména holocenního stáří (Tab. 17). Uvedené intervaly R hodnot jsou porovnatelné s výsledky Shakesbyho et al. (2006) a Engela (2007). V případě souboru zpracovaných studií (Příloha 1), do těchto intervalů nezapadají výsledky prací Aa & Sjastadt (2000), Awatshiho et al. (2005) a Evanse et al. (1999). U studie Aa & Sjastadt (2000) byly naměřeny velmi vysoké R hodnoty (55,63 a 56,63) u studovaných morén, které by odpovídaly LIA stáří, ale absolutní věk odvozený pomocí věkové kalibrační křivky byl kladen do období pozdního glaciálu. Tato neshoda může být zapříčiněna malým množstvím získaných naměřených dat. U studie Awatshiho et al. (2005) byly naměřeny velmi nízké R hodnoty (40,7- 47) pro morény formované v období 1900-1970. Tyto velmi nízké R hodnoty mohou být způsobeny silným postglaciálním zvětráváním. U studie Evanse et al. (1999) byla naměřena velmi nízká R hodnota (38,6) pro morénu formovanou v roce 1777. Takto nízká R hodnota by měla odpovídat morénám tvořeným v období pozdního glaciálu, zatímco její absolutní věk je datován do vrcholného období LIA. Porovnání naměřených R hodnot z různých geografických oblastí přináší značnou nepřesnost díky odlišné intenzitě zvětrávání způsobené odlišnými klimatickými podmínkami v daných oblastech.

Tab. 17: Intervaly R hodnot a časové zařazení testovaných povrchů (dle Böhler et al., 2011)

| Interval R hodnot | Stáří |
|-------------------|----------------------------------|
| 30-40 | Pozdní glaciál |
| 40-50 | Brzký holocén až střední holocén |
| 50-60 | Mladší a současný povrch |

6.2 Relativní datování pomocí Schmidt Hammeru

Metodu Schmidt Hammer testu, která na základě stupně navětrání hornin určuje jejich relativní stáří, lze považovat v současné geomorfologii za používanou a poměrně průkaznou. Neshoda autorů však panuje v metodickém postupu, kdy počet jednotlivých měření a jejich vyhodnocení se neřídí ustálenými pravidly. Evans et al. (1999) doporučuje 5 měření na každém bloku, Engel (2007) doporučuje 25 a Aa & Sjastadt (2000) doporučují 150. Výsledek studie Shakesbyho et al. (2006) ukázal, že výsledná průměrná R hodnota zůstává relativně stabilní a statisticky nerozlišitelná při počtu měření mezi 25-150, a to i za předpokladu značných rozdílů mezi naměřenými R hodnotami. Výpočet výsledných průměrných R hodnot z naměřených hodnot je také odlišný. Engel (2007) doporučuje při výpočtu výsledné R hodnoty odstranit 5 nejextrémnějších hodnot, zatímco Evans et al. (1999) vypočítal výslednou R hodnotu z pěti nejvyšších naměřených R hodnot na každém testovaném povrchu, přičemž ale tento přístup vede k průměrně vyšším výsledným R hodnotám.

6.3 Faktory ovlivňující výslednou R hodnotu

S narůstajícím stářím obvykle klesá velikost R hodnoty (v souvislosti s narůstající mírou zvětrávání povrchu testovaného materiálu), avšak v různých oblastech se faktory ovlivňující R hodnoty podílejí různým vlivem. V případě Evanse et al. (1999) se zdá, že s narůstajícím věkem R hodnota stoupá, a proto se většina R hodnot nedá brát jako reprezentativní. Tato anomálie může být způsobena výběrem nesprávných testovacích bloků.

Značné rozdíly v R hodnotách u povrchů stejného stáří mohou být způsobeny odlišným typem horniny, kdy určitý typ horniny je různě odolný vůči zvětrávání. Výsledek analýzy rozptylu (Obr. 1) prokázal značně vyšší R hodnoty morén datovaných v období 8000-12000 BP, které jsou tvořeny kvarcitem. Vyšší R hodnoty lze přisoudit velké odolnosti kvarcitu vůči zvětrávání. Kvarcit patří k odolným horninám díky vysokému obsahu SiO_2 (oxidu křemičitého). U morén tvořených metamorfity a žulami byly naměřené R hodnoty výrazně nižší. Nejvyšší směrodatné odchylky byly naměřeny u morén tvořených kvarcitem, naopak u morén tvořených žulou byly směrodatné odchylky nejmenší. Díky těmto nízkým směrodatným odchylkám (z hlediska minimalizace odchylek mezi jednotlivými měřeními) lze žuly považovat za vhodnější typ hornin pro testování.

Na základě prokázané signifikantní záporné korelace mezi R hodnotou a klimatickými charakteristikami (průměrná roční teplota, průměrný roční úhrn srážek) (Tab. 13, Tab. 16) lze předpokládat, že v oblastech s nižšími úhrny srážek a nižší průměrnou roční teplotou je menší

zvětrávání, a tak testované povrchy stejného stáří mohou vykazovat vyšší R hodnoty. Tento předpoklad byl statisticky prokázán jak u morén formovaných žulovým materiálem (Tab. 13), tak i u morén formovaných během LIA (Tab. 16). Při analýze vztahu R hodnot s klimatickými charakteristikami, kde byly vybrány pouze morény v Norsku, byla dosažena kladná korelace mezi R hodnotami a průměrnou roční teplotou a záporná korelace mezi R hodnotami a průměrným ročním úhrnem srážek (Tab. 14). Kladná korelace byla dosažena i mezi průměrnými ročními teplotami a nadmořskou výškou a naopak záporná korelace byla dosažena u průměrného ročního úhrnu srážek a nadmořskou výškou. Tato situace by mohla být způsobena tím, že studované lokality se nacházejí v oblastech vyšších nadmořských výšek, kde je méně oblačnosti a kde více slunečního záření dopadá na zemský povrch.

Ve studii (Shakesby et al., 2006) nebyla prokázána přímá vazba mezi R hodnotami (zvětráváním) a nadmořskou výškou. Tento důkaz o malém vlivu nadmořské výšky na zvětrávání byl podpořen i předešlými pracemi (McCarroll & Nesje, 1993 in Shakesby et al., 2006). V případě korelační analýzy u morén formovaných během LIA a mladších vyšla velmi nízká nesignifikantní korelace ($r = 0,11$). Tato velmi nízká hodnota může indikovat, že ne vždy nárůst nadmořské výšky znamená výhodnější podmínky pro zvětrávání. Avšak v případě provedené korelační analýzy (Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15), byla prokázána poměrně vysoká korelace mezi nadmořskou výškou a R hodnotami (velikost R hodnot narůstá se zvyšující se nadmořskou výškou) u morén formovaných žulovým materiálem. Ve vyšších nadmořských výškách lze předpokládat, že se zde ledovce uchovají nejdéle, a tak tamější povrch vykazuje vyšší R hodnoty, jelikož byl vystaven kratší dobu procesu zvětrávání.

7. Závěr

Na základě rešerše odborné literatury lze shrnout poznatky o Schmidt Hammeru do následujících bodů:

- Schmidt Hammer lze využít jako nástroj relativního datování tvarů reliéfu za předpokladu, že existuje vztah mezi stupněm navětrání testovaného povrchu a délkou jeho odkryvu.
- u glacienních tvarů reliéfu je třeba brát v potaz rizika spojená s působením paraglaciálních a postglaciálních procesů, z nichž nejvýznamnější jsou svahové pohyby, při kterých se může na morénu dostat materiál odlišného stáří a různého genetického původu.
- mezi hlavní výhody Schmidt Hammeru patří nízké náklady na pořízení přístroje, jednoduchost použití a získání velkého počtu dat za relativně krátký čas.
- mezi hlavní nevýhody patří citlivost přístroje na diskontinuity a přítomnost vlhkosti v testovaném povrchu. R hodnota je výrazně ovlivňována texturou povrchu, velikostí testovaných bloků a polohou přístroje vůči povrchu při měření.
- pro získání reprezentativních R hodnot z měření je třeba dodržovat řadu zásad a doporučení:
 - minimalizovat rozdíly mezi jednotlivými měřeními- z hlediska typu horniny, i použitého typu přístroje.
 - pro měření by měly být vybrány horizontální nebo mírně ukloněné plochy, na které je přístroj aplikován kolmo.
 - měření by se měla provádět 6-15 cm od okrajů a trhlin v blocích, testovaný blok by měl být pevně uložen a o minimální váze 25 kg.
 - pro následující statistické vyhodnocení a výpočet výsledné (průměrné) R hodnoty existuje několik odlišných postupů (Příloha 2)
- pro detailnější odhady stáří lze využít věkové kalibrační křivky, které jsou založené na vztahu R hodnot a absolutním stáří kontrolních bodů, které je získáno pomocí numerických datovacích metod.
- v kombinaci se Schmidt Hammer testem se nejčastěji z metod relativního datování využívá lichenometrie, mocnost zvětralé kůry a fáze vývoje zvětralých jamek.
- z metod numerického datování je Schmidt Hammer nejčastěji kombinován s expozičním datováním pomocí kosmogenních nuklidů.

Ze statistického zpracování dat vykonané v rámci této práce vyplývá následující:

- starší (více zvětralé) povrchy vykazují nižší R hodnot než povrchy mladší, což bylo potvrzeno dosažením signifikantní záporné korelace ($r = -0,54$) mezi R hodnotami a absolutním stářím testovaných povrchů uvedených v této práci.
- byla prokázána poměrně silná kladná korelace ($r = 0,45$) mezi R hodnotami a nadmořskou výškou pro všechny morény tvořené žulami. Tento vztah nebyl potvrzen u morén tvořených během LIA a mladších a ve studii Shakesbyho et al. (2006), což může indikovat, že ne vždy ve vyšších nadmořských výškách jsou výhodnější podmínky pro zvětrávání.
- mezi R hodnotami a klimatickými charakteristikami byla prokázána poměrně silná signifikantní korelace, kdy s narůstající teplotou ($r = -0,62$) a ročním úhrnem srážek ($r = -0,65$) klesá velikost R hodnot, při výběru morén tvořených žulovým materiálem.
- žuly lze považovat za velmi vhodný materiál pro testování, díky jejich značnému rozšíření a malé směrodatné odchylce získané při měření.

Zdroje a použitá literatura

AA, A. R., SJASTAD, J., SONSTEGAARD, E., BLIKRA, L. H. (2007): Chronology of Holocene rock-avalanche deposits based on Schmidt-hammer relative dating and dust stratigraphy in nearby bog deposits, Vora, inner Nordfjord, Norway. *The Holocene*, vol. 17, no. 7, p. 955-964

AA, A. R., SJASTAD, J.A. (2000): Schmidt hammer age evaluation of the moraine sequence in front of Boyabreen, western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, vol. 80, p. 27-32

AMARAL, P. M., GUERRA ROSA, L., CRUZ FERNANDES, J. (1999): Determination of Schmidt remund hardness consistency in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, p. 833-837

AWASTHI, D. D., BALI, R., TEWARI, N. K. (2005): Relative dating of moraines by lichenometric and Schmidt hammer techniques in the Gangotri glacier valley, Uttarkashi district, Uttaranchal. *Special Publication of the Paleontological Society of India*, no. 2, p. 201-206

AYDIN, A., BASU, A. (2005): The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, vol. 81, p. 1-14

BALÁKOVÁ, H. (2007): Geneze blokových akumulací a jejich vztah k vývoji reliéfu povodí Bílého Labe. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. 108 s.

BALLANTYNE, C. K. (2002): Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, vol. 21, p.1935-2017

BASU, A., AYDIN, A. (2004): A method for normalization of Schmidt hammer remund values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, p. 1211-1214

BENN, D. I., EVANS, D. J. A. (1998): *Glaciers & Glaciation*. Edward Arnold, London, 734 p.

BENN, D.I., EVANS, D.J.A. (2010): *Glaciers & Glaciation*. 2nd Edition, Hodder Education, London, 802 p

BENNETT, M. R., GLASSER, N. F. (2009): *Glacial geology: Ice Sheets & Landforms*. 2nd ed., Chichester, England: Wiley-Blackwell, 385 p.

BÖHLER, R., EGLI, M., MAISCH, M., BRANDOVÁ, D., IVY-OCHS, S., KUBIK, P. W., HAEBERLI, W. (2011): Application of a combination of dating techniques to reconstruct the Lateglacial and early Holocene landscape of the Albula region (eastern Switzerland). *Geomorfology*, vol. 127, p. 1-13

ČERNÁ, B., ENGEL, Z. (2011): Surface and sub-surface Schmidt hammer rebound variation for a granite outcrop. *Earth surface processes and landforms*, vol. 36, p. 170-179

- DEMEK, J. (1988): Obecná geomorfologie. Academia, Praha, 476 s.
- ENGEL, Z. (2007): Measurement and age assignment of intact rock strength in the Krkonoše Mountains, Czech Republic. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 51, p. 69-80
- ENGEL, Z., TRACZYK, A., BRAUCHER, R., WORONKO, B., KRÍŽEK, M. (2011): Use of ¹⁰Be exposure ages and Schmidt hammer data for correlation of moraines in the Krkonoše Mountains, Poland / Czech Republic. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 55, no. 2, p. 175-196
- ENGEL, Z., JANKOVSKÁ, V., KRÍŽEK, M., TREML, V. (2007): Doklady vývoje Labského dolu v pozdním glacial a holocénu. In: ŠTRUSA, J & KNAPIK, R. (eds.), Geoekologické problem Krkonoš. Sborník Mez. Věd. Konf., říjen 2006, Svoboda nad Úpou. Opera Corcontica, 44/1: 89-93.
- EVANS, D. J. A., ARCHER, S., WILSON, D. J. H. (1999): A comparison of the lichenometric and Schmidt hammer dating technique based on data from the proglacial areas of some Icelandic glaciers. *Quaternary Science Reviews*, vol. 18, p. 13-41
- GOUDIE, A. S. (2006a): The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, vol 30, no. 6, p. 703-718
- GOUDIE, A.S. (2006b): Moraine. In: Goudie, A. S. (Ed): Encyklopedia of geomorfology. Routledge Ltd., London, p. 691- 693.
- GIBBARD, P. L., COHEN, K. M. (2008): Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years. *Episodes*, vol. 31, p. 243-247
- HORNÍK, S. (1986): Fyzická geografie II. Státní pedagogické nakladatelství v Praze. 320 s.
- HUBBARD, B., GLASSER, N. (2005): Field techniques in glaciology and glacial geomorphology. *Wiley*, Chichester, 400p.
- HUMLUN, O. (1998): Rock glacier on the Faeroe Island, the North Atlantic. *Journal of Quaternary science*. Vol. 13, no. 4, p. 293-307
- CHÁBERA, S. (1996): Geomorfologie. Jihočeská univerzita České Budějovice, České Budějovice, 151 s.
- CHRISTIANSEN. H.H., BENNIKE, O., BÖCHER, J., ELBERLING, B., HUMLUN, O., JAKOBSEN, H.J. (2002): Holocene environmental reconstructions from deltaic deposits in northern Greenland. *Journal of Quaternary Science*, vol. 17, p. 145-160
- KATZ, O., RECHES, Z., ROEGIERS, J. C. (2000): Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, p. 723- 728

- KARÁSEK, J. (2001): Základy obecné geomorfologie. Masarykova Univerzita v Brně, Brno, 216 s.
- KACHLÍK, V., CHLUPÁČ, I. (2008): Základy geologie. Historická geologie. Nakladatelství Karolinum, Univerzita Karlova v Praze, 342 s.
- MATTHEWS, J. A., SHAKESBY, R. A., SCHNABEL, CH., FREEMAN, S. (2008): Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al ages of Holocene moraines in southern Norway I: testing the method and confirmation of the date of the Erdalen Event (c. 10 ka) at its type site. *The Holocene*, vol. 18, no. 8, p. 1155-1164
- MATTHEWS, J. A., OWEN, G. (2010): Schmidt hammer exposure-age dating: developing linear age-calibration curves using Holocene bedrock surfaces from the Jotunheimen-Jostedalbreen regions of southern Norway. *Boreas*, vol. 39, p. 105-115
- MATTHEWS, J. A., WINKLER, S. (2011): Schmidt-hammer exposure-age dating (SHD): application to early Holocene moraines and a reappraisal of the reliability of terrestrial cosmogenic-nuclide dating (TCND) at Austanbotnbreen, Jotunheimen, Norway. *Boreas*, vol. 40, p. 256-270
- McCARROLL, D. (1989): Potential and limitations of the Schmidt hammer for relative-age dating: field tests on neoglacial moraines, Jotunheimen, southern Norway. *Arctic and Alpine researches*, vol. 21, no. 3, p. 268-275
- McKNIGHT, T.L. (1999): Physical Geography: landscape appreciation. Upper Saddle River: Prentice-Hall, New Jersey, 604 p.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J. (2002): Kompendium statistického zpracování dat. Academia, Praha, 764 s.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J., HILL, M. (2005): Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. Academia, Praha, 449 s
- MENTLÍK, P. (2006): Relative dating of glacial landforms in the surrounding of Prášílské Lake (Šumava Mountains, Czech Republic). *Geomorfologia Slovaca*, vol. 6, p. 45-54
- MIDA, P. (2011): Glaciálna modelácia karov a stratigrafia morén Vysokých Tatier. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. 166 s.
- MIGON, P. (1999): The role of preglacial relief in the development of mountain glaciation in the Sudetes, with special reference to the Karkonosze Mountains. *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. 113, p. 33-44
- Podnebí ČSSR - tabulky, vydal HMÚ, Praha 1960, 379 s.
- RITTER, D. F., KOCHER, R., MILLER, J. R. (2011): Process geomorphology. Waveland Press, 652 s.

- RŮŽIČKOVÁ, E., RŮŽIČKA, M., ZEMAN, A., KADLEC, J. (2003): Kvarterní klastické sedimenty České republiky: struktury a textury hlavních genetických typů. Česká geologická služba, Praha, 68 s.
- SÁNCHEZ, J. S., MOSQUERA, D. F., ROMANÍ, J.R.V. (2009): Assessing the age-weathering correspondence of cosmogenic ^{21}Ne dated Pleistocene surface by the Schmidt Hammer. *Earth surface processes and landforms*, vol. 34, p. 1121-1125
- NESJE, A. (2007): Paleo ELAs, Encyklopedy of Quaternary Science, p. 882-892.
- SHAKESBY, R.A., MATTHEWS, J. A., OWEN, G. (2006): The Schmidt hammer as a relative-age dating tool and its potential for calibrated-age dating in Holocene glaciated environments. *Quaternary Science Reviews*, vol. 25, p. 2846-2867
- SHAKESBY, R. A., MATTHEWS, J. A., WINKLER, S. (2004): Glacier variations in Breheimen, southern Norway: relative-age dating of Holocene moraine complexes at six high-altitude glaciers. *The Holocene*, vol. 14, no. 6, p. 899-910
- SLÁDEK, J. (2009): Určovanie geomorfologickej hodnoty hornín metódou Schmidt hammer test v južnej časti pohoria Žiar. *Geomorfologia Slovaca et Bohemica*, vol.9, no. 2, p. 78-87
- STERNIL, J. A., DENTON, G. H., VANDERGOES, M. J., NINNEMANN, U. S., PUTNAM, A. E. (2011): Radiocarbon chronology of the late-glacial Puerto Bandera moraines, Southern Patagonian Icefield, Argentina. *Quaternary Science Reviews*, vol. 30, p. 2251-2569
- StatSoft, Inc., (2009) STATISTICA (data analysis software system), version 9.0. www.statsoft.com
- TRENHAILE, A. S., ALBERTI, A. P., CORTIZAS, M. A., CASAIS, C. M., CHAO, B. R. (1999): Rock coast inheritance: an example from Galicia, northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, p. 605-621
- VOČADLOVÁ, K. (2006): Glaciální formy reliéfu v okolí Černého jezera na Šumavě. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. 107 s.
- WINKLER, S. (2005): The Schmidt hammer as a relative-age dating technique: Potential and limitations of this application on Holocene moraines in Mt Cook National Park, Southern Alps, New Zealand. *Journal of Geology and Geophysics*, vol. 48, no. 1, p. 105-116
- WHITE, K., BRYANT, R., BRAKE, N. (1998): Techniques for measuring rock weathering: application to a data fan segment sequence in southern Tunisia. *Earth Surface and Landforms*. Vol. 23, p. 1031-1043
- XU, X., YANG, J., DONG, G., WANG, L., MILLER, L. (2009): OSL dating of glacier extent during the Last Glacial and the Kanas Lake basin formation in Kanas River valley, Altai Mountains, China. *Geomorfologia*, vol. 112, p. 306-317

Internetové zdroje:

Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years [online]. 2010 [cit. 2012-03-01]. Dostupný z WWW:

<[http://www.quaternary.stratigraphy.org.uk/charts/chartversions/POSTERSTRAT_v2010\(2\).jpg](http://www.quaternary.stratigraphy.org.uk/charts/chartversions/POSTERSTRAT_v2010(2).jpg)>

YR.NO [online]. 2007-2012 [cit. 18.4.2012]. Dostupné z:

http://www.yr.no/place/Norway/Sogn_og_Fjordane/Gloppen/Byrkjelo/climate.html

Klimadiagramme weltweit [online]. [cit. 18.4.2012]. Dostupné z:

http://www.klimadiagramme.de/GMA_neu/Europa/schweiz0.htm

Klimadiagramme weltweit [online]. [cit. 18.4.2012]. Dostupné z:

http://www.klimadiagramme.de/GMA_neu/Europa/spanien0.htm

Klimadiagramme weltweit [online]. [cit. 18.4.2012]. Dostupné z:

http://www.klimadiagramme.de/pics/st_nzs.html

Ústní sdělení:

VALERIANOVA, ANNA. ČHMÚ, Na Šabatce 17, Praha 4, 7.5.2012