

# ODMRZOVANJE PERMAFROSTA IN PODORI V VISOKIH ALPSKIH STENAH

## Thawing of Permafrost and Landfalls in High Alpine Mountains

Tomaž Vrhovec\* UDK 551.34(234.3)

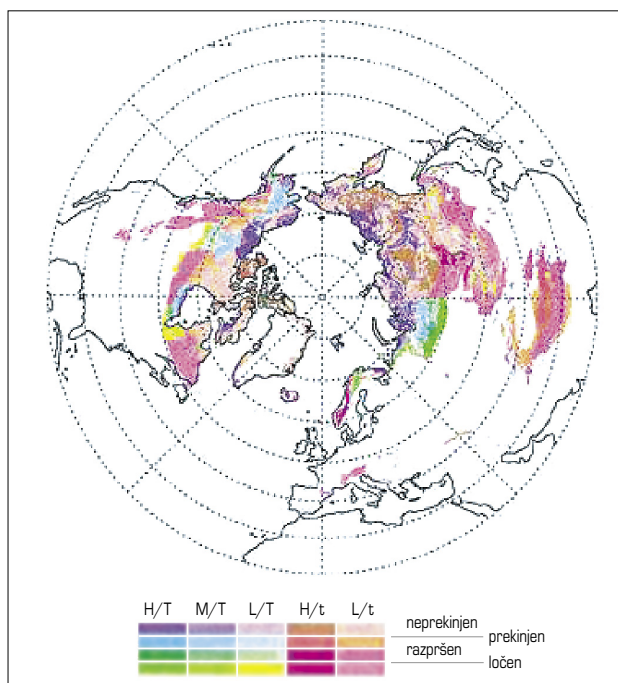
**Povzetek**  
Permafrost je zmrznjena zemljina in kamnina na zemeljskem površju in pod njim. Pogost je v subpolarnih krajih, razpršeno pa se pojavlja tudi v Alpah. Poleti permafrost odmrzuje, zaradi geometrijskih vzrokov se posebno izrazito to dogaja v gorah. Vroča poletja so eden od pokazateljev klimatskih sprememb. Poleti 2003 je permafrost v Alpah izrazito odmrzoval in posledica so bili podori skalovja in gruščja. Slikovno je dokumentiran podor skalovja na zahodnih pobočjih Aig. du Goûter pod Mt. Blanc nad Chamonixom (Francija).

**Abstract**  
Permafrost consists of frozen ground and rocks. It is a common feature in sub-polar regions, and it is also present sporadically in the Alps. During summers, permafrost thaws and, due to geometric reasons, the amount of thaw in mountains is increased. Hot summers are connected to climatic changes. In summer 2003, the disintegration of several slopes and rock falls were reported in the Alps because a lot of the permafrost was thawing. Some of the figures depict a rock fall on the west face of Aig. du Goûter near Mt. Blanc above Chamonix (France).

### Kaj je permafrost

Povečevanje učinka tople grede (zmanjševanje ohlajanja Zemlje) zaradi povečevanja koncentracije ogljikovega dioksida se kaže v višanju temperature površja in ozračja. Zaradi človekovega vpliva se zvišujejo predvsem najnižje temperature. Zmanjšano ohlajanje zemeljskega površja vpliva tudi na kriosfero, to je na del površja Zemlje, ki jo prekriva led. Pri tem mislimo na polarne ledenike, na subpolarne celinske poledenitve, na ledenike v gorah in na led pod površjem zemlje, ki je povezan s kamninami in zemljinami – permafrost.

Permafrost so zmrznjene kamnine in zemljine, večinoma dediščina hladnejši geoloških dob. Ne le v subpolarnih predelih Zemlje (nad 60° severno, v Sibiriji na Aljaski in severni Kanadi), tudi v alpskem in drugih svetovnih visokogorjih je poleg ledenikov, ki prekrivajo pobočja in doline, permafrost posebna značilnost zemeljskega površja. V permafrostu je količina ledu od nič pa do trideset odstotkov. Najbolj poznan je permafrost, ki ga sestavljajo zmrznjena zemljina, mešanica ledu, gruščja, blata, kamenja, skalovja in tudi organskega materiala. Plast zmrznjenih zemljin in kamnin je lahko debela tudi več sto metrov. Led povezuje drugače nepovezane sestavne dele permafrosta, in če je zmrznjena, je takšna vrsta tal trda in nosilna. V severnih predelih Evrazije in Amerike



Slika 1. Razporeditev različnih vrst permafrosta na severni hemisferi. Pomen oznak: H – velika količina ledu, M – srednja količina ledu, L – majhna količina ledu, T – debelo pokrit z zemljino, t – tanko prekrit z zemljino. Prirejeno po IPA, NSIDC, 2003.

Figure 1. Different types of permafrost in the Northern hemisphere. Abb: H – high ice content, M – medium ice content, L – low ice content, T – thick coverage, t – thin coverage, adapted from IPA NSIDC, 2003

\* doc. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska 19, Ljubljana, tomaz.vrhovec@uni-lj.si

so zmrznjena tla pod velikimi prostranstvi, tako da se ocenjuje, da je kar četrtnina kopnega na severni hemisferi nad permafrostom. Pogosto nad zmrznjenimi tlemi raste gozd – tajga, drugod je nad njimi tundra, v visokogorju pa so takšna tla pogosto gola. Razprostranjenost različnih vrst permafrosta na severni hemisferi prikazuje slika 1.

Iz subpolarnih krajev so znane nekatere zanimive lastnosti permafrosta. Na pomlad se tla na površju odtajajo kak meter debelo, pogosto nastane blato, v globini pa ostajajo zmrznjena, jeseni in pozimi blato spet zmrzne. Vsakoletno zmrzovanje in tajanje je tam reden pojav, čemur morajo biti prilagojene tamkajšnje ceste, zgradbe in druge naprave, med njimi predvsem naftovodi in plinovodi.

V visokih gorah po svetu in tudi v Alpah je permafrost v primerjavi s subpolarnim bistveno bolj neenoten in nepovezan, saj ga sestavljajo predvsem zmrznjen grušč in kamnine. Prenekatera alpska stena je pravzaprav gmota kamenja, ki jo skupaj drži le led. Znano je, da se ob odjugah s takšnih sten pogosto kruši kamenje, tako da je po takšnih stenah varno plezati le ob nizkih temperaturah, ponoči ali pa v hladnejšem delu leta. Ponekod v Alpah so pod gruščnatimi morenami tudi ostanki nekdanjih ledenikov. Takšni zasuti ledeniki so z gruščem izolirani od vplivov ozračja in se s časom le malo spreminjajo. V zahodnih Julijskih Alpah pod Montažem je leta 1993 ob močnih padavinah grušč zdrsnil z ledu in razkril ostanek Montaževega ledenika (Moro, 2001). Pri takšnih ledenih ostankih je razmerje med količino ledu in zemljine (grušča, kamenja) največje, najmanjši delež ledu pa je tam, kjer so v kompaktni kamnini le posamezne razpoke v skali napolnjene z ledom. Tudi če v kamnini ni bistvene količine ledu, ima kamnina v tleh lahko temperaturo pod 0 °C. O permafrostu govorimo, če so tla v globini zmrznjena vse leto, ne le pozimi.

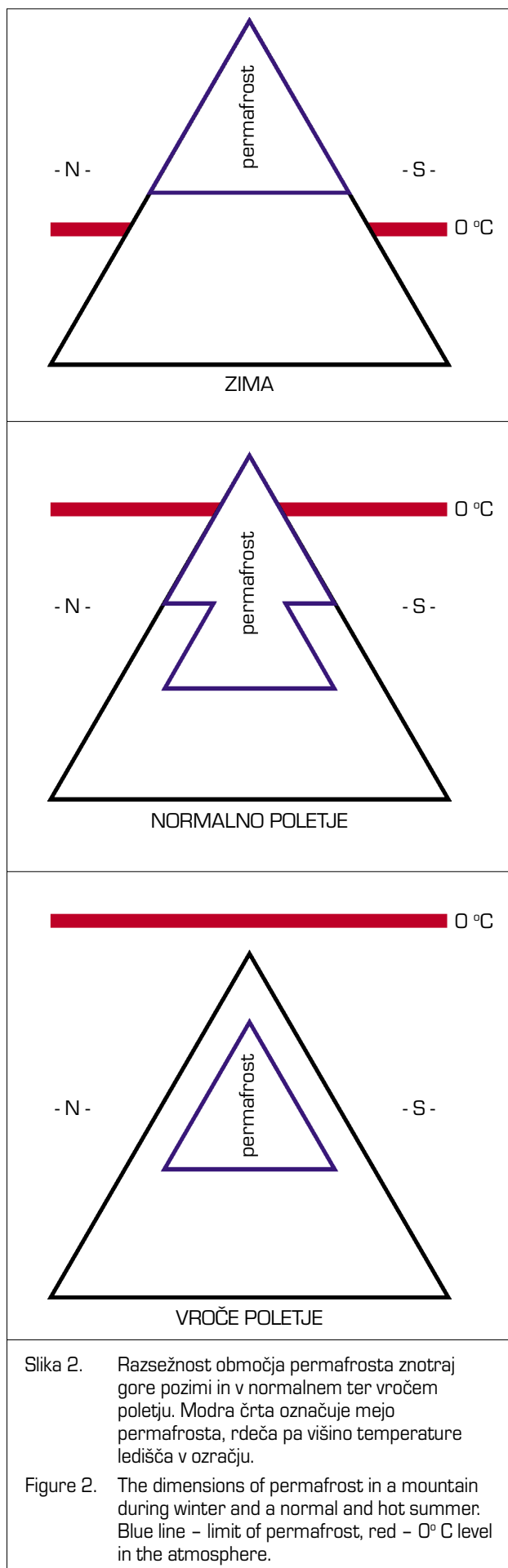
## Izginevanje alpskega permafrosta zaradi klimatskih sprememb

Alpski permafrost je dediščina hladnejših obdobij zgodovine Zemlje. Debelino zmrznjenih plasti ugotavljajo s pomočjo vrtnin. V Evropi se je med leti 1998 in 2001 odvijala raziskava PACE (Permafrost and Climate in Europe), s katero so poskušali ugotoviti razsežnosti permafrosta v Evropi, še posebno v zmernih geografskih širinah (Harris in Haeberli, 2003). V stometrskih vrtninah so merili temperaturo plasti in ugotovili, da plast letnega nihanja temperature seže okoli 10 metrov globoko, zmrznjene plasti pa segajo tudi globlje od 100 metrov. Večinoma se je permafrost ohranil le tam, kjer so povprečne letne temperature na površju pod 0 °C. Na podlagi meritev v vseh vrtninah je bilo mogoče ugotoviti, da se je temperatura površja v stotih letih povečala za nekaj manj kot 1 K. Povečevanje povprečne temperature površja pa vodi k odmrzovanju permafrosta v globini.

Vsakoletno površinsko odmrzovanje permafrosta poteka tako, da po stalitvi snežne odeje začno odmrzovati tudi tla. Permafrost tako izginja od površja tal navzdol, v razgibanem reliefu gorskega sveta pa so pogosto pomembni vplivi segrevanja tudi s strani, na primer segrevanje bolj ali manj navpičnega skalovja in sten. Ko se snežna odeja tali, snežnica pronica v zemljino in blizu površja tali tamkajšnji led, ko pa pride v globlje (hladnejše) plasti, tam spet zmrzne. Višek snežnice odteče. Ko so tla brez snežne odeje, so temnejša, zato ob sončnih dnevih vpijejo več sončne energije. Ta toplota se s prevajanjem prenaša in segreva tudi globlje horizonte tal, hkrati tali led v zemljini. Če so temperature zraka nizke, potem sicer sonce čez dan segreje skalovje in grušč nad temperaturo ledišča, vendar se čez noč skale ohladijo pod ledišče in voda spet zmrzne. Če so temperature zraka nad lediščem, se skalovje čez noč ne ohladi pod ledišče, voda ne zmrzne in odteče zato prihodnji dan sončna energija segreva le skale, saj v vršni plasti zemljine ni več ledu. Ker je za taljenje ledu potrebno dosti več energije kot za segrevanje zemljine (za taljenje 1 kg ledu je potrebnih 330 kJ energije, za segrevanje 1 kg zemljine za 10 K pa le približno 20 kJ), se zemljina po stalitvi ledu segreva zelo hitro. Površje tal se celo v visokogorju čez dan lahko kljub nizki temperaturi zraka segreje nad 30 °C. Tedaj se tudi bistveno poveča toplotni tok v tla in taljenje ledu poteka tudi v globljih plasteh zemljine.

Visoka temperatura zraka zato poleti zelo uničujoče deluje na površinski permafrost, učinek je seveda najbolj viden tam, kjer je sončno sevanje najmočnejše, to je v južno ležečih gorstvih (Alpe, Pireneji) in na južni strani teh gora, kjer je prestrežena količina sončnega sevanja največja. Plasti, ki se poleti odtajajo, so debele do 10 metrov, pri čemer so te plasti na prisojnih straneh gora debelejšje, na osojnih pa tanjše. Pri visokih poletnih temperaturah zraka je zaradi geometrijskih razlogov najbolj prizadet permafrost v bližini vrhov in grebenov gora, saj tam odmrzuje z vseh strani (slika 2). Posebno so prizadeta območja vrhov in grebenov, kjer se je permafrost odtajal prvič. Ker so vršni deli gora večinoma tudi najbolj strmi, se skalovje in grušč, ki ju led ne veže več na podlago, takoj ločita od stene in zgrmita v dolino. Po odkrušitvi odmrznjenih plasti so soncu in visokim temperaturam izpostavljene prej zakrite plasti in ob nadaljevanju vročega vremena začno odmrzovati nove in nove plasti. Postopek odmrzovanja in krušenja se konča šele ob izraziti ohladitvi oziroma tedaj, ko se zaradi zaporednih podorov strmina pobočja zmanjša.

Zaradi postopnega povečevanja temperature zraka (za okoli 1 K v 20. stoletju) se je povprečna letna višina izoterme 0 °C v Alpah dvignila za 100 do 200 metrov. Za odmrzovanje permafrosta so pomembne predvsem poletne temperature oziroma predvsem dolžina obdobja, ko temperatura zraka podnevi in ponoči ne pade pod ledišče. Ker je zaradi stopnjevanega človekovega vpliva na ozračje pričakovati povečevanje temperature zraka tudi v prihodnjih desetletjih, se bo odmrzovanje permafrosta nadaljevalo.



Za regeneracijo permafrosta so pomembne predvsem vremenske razmere kasno jeseni in v začetku zime. Če sta jesen in začetek zime sušna in se snežna odeja pojavi kasno, se površje v visokogorju temeljito ohladi in zmrzne. Če se kmalu pojavi snežna odeja, potem ta izolira tla pred zimskim mrzom, zato se dosti manj ohladi. Za jesensko regeneracijo permafrosta so torej ugodne ravno obratne razmere kot za regeneracijo ledenikov.

O sodobnih razsežnostih permafrosta v Sloveniji lahko sklepamo le na podlagi temperaturnih razmer. Tako lahko glede na povprečno letno temperaturo 0 °C, ki je med 2400 in 2500 metri nadmorske višine, le domnevamo, da bi bil v Sloveniji permafrost mogoč v najvišjem delu Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alp. Ker je slovensko visokogorje iz apnenca in zakraselo, tako da se poleti deževnica lahko pretaka skozi kamnino, ni verjetno, da bi se ledenodobni permafrost pri nas ohranil. V pleistocenu pa je bil permafrost razširjen tudi na območju današnje Slovenije. Nekaj podatkov o zmrznjenih zemljinah in kamninah ter podzemnem ledu je na voljo za kraške jame v visokogorju (Brodar, 1931, Mihevc in Gams, 1979, Mihevc, 2001), pri čemer je led v teh jamah novejšega izvora in doživlja spremembe v skladu z letnimi in desetletnimi spremembami klime v jamah.

## Podori v alpskih stenah v letu 2003

Poletje 2003 je bilo v Evropi eno najtoplejših v zapisani zgodovini in temperaturni rekordi so se kar vrstili. Izjemne temperaturne razmere so se pokazale tudi v Alpah. Zima 2002/2003 je bila glede snega skoraj povprečna, hladno je bilo dokler je po Alpah ležal sneg, a pomlad je bila topla in že junija se je snežna odeja stalila visoko nad 3000 metri. Poleti so bile temperature še višje, ledišče je bilo kar nekaj tednov nad 4000 metri. Stalila se je snežna odeja, izrazito so se talili ledeniki, pa tudi led, ki v visokogorju povezuje grušč in skalovje. Podori so bili tako veliki in pogosti.

Že prejšnja topla poletja se je permafrost v Alpah talil. Predvsem se je to čutilo na območjih blizu umikajočih se ledenikov na južnih pobočjih gora. V preteklih letih so ugotovili, da sta se zaradi taljenja podlage začela nagibati kočja in observatorij na vrhu Sonnblicka (3105 m) v Visokih Turah, nekoliko manj izrazito tudi Oberwalderhütte (2973 m) nasproti Grossglocknerja. Zaradi odmrzovanja skalovja in popuščanja ledenih vezi med skalami se je pred leti zrušil tudi del turistične poti Gamsgrubenweg tik zraven parkirišč na koncu glocknerske visokogorske ceste nad ledenikom Pasterza. Letošnje poletje sta zaznamovala izrazita podora skalovja na dveh najbolj obiskanih gorah v Alpah, na Matterhornu in na Mt. Blancu.

Na grebenu Hörnli na Matterhornu se je 14. julija 2003 zrušil del grebena na višini okoli 3400 metrov okoli 200 metrov nad kočjo Hörnli. Po tem grebenu poskuša vsak



Slika 3. Začetek podora tik pod vrhom Aig. du Goûter. Planinski dom je na vrhu gore, desno od podora (vse fotografije: F. Štupar).

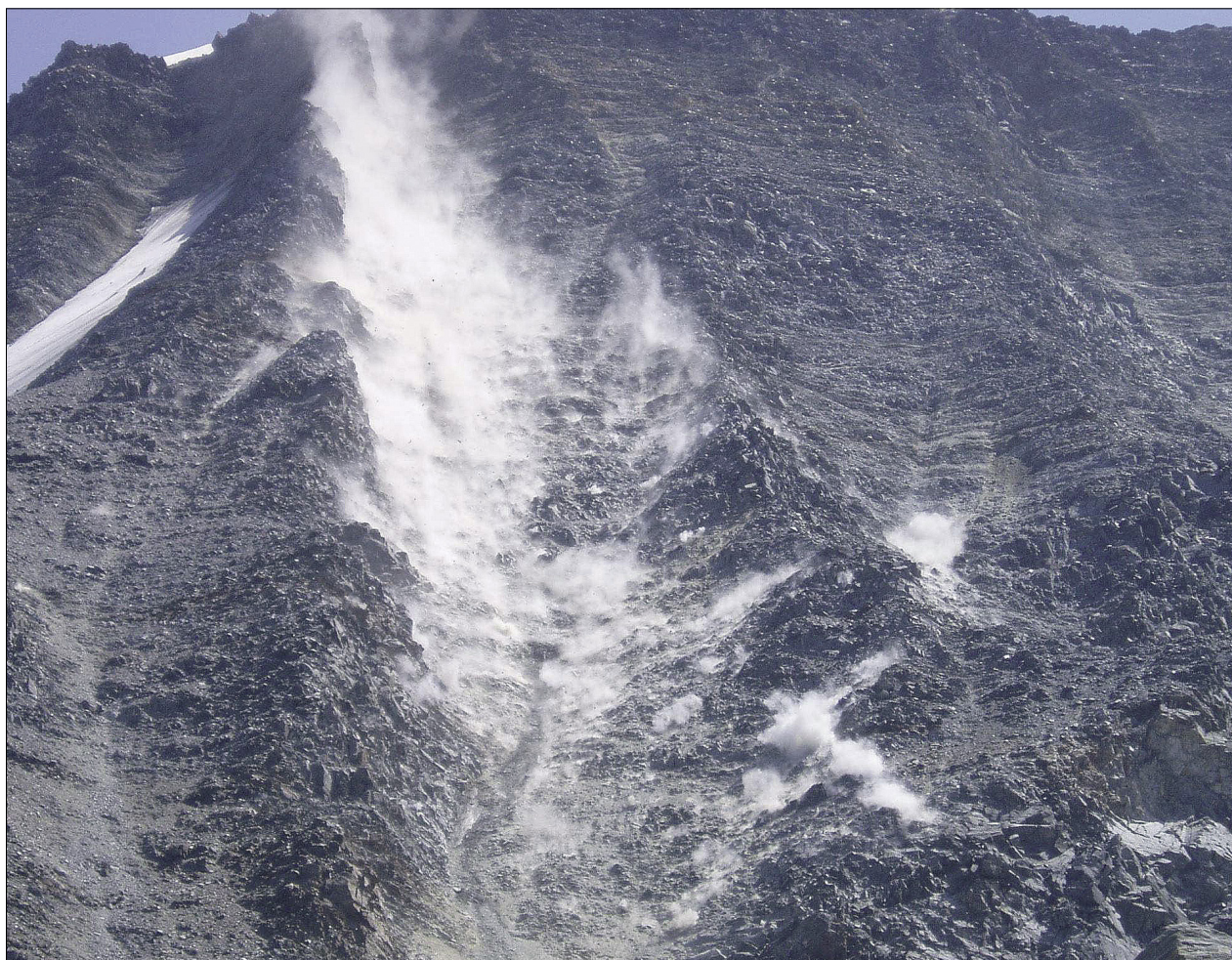
Figure 3. Beginning of a rock fall just under the crest of Aig. du Goûter. The Refuge du Goûter is situated to the right of the rock fall (all photos: F. Štupar).

dan na impozantno goro priti vsaj 200 ljudi. Podor se je zgodil popoldne, tako da je nad podorom ostalo več kot petdeset alpinistov. Ker so se skale še kar naprej krušile, so s pomočjo helikopterjev z gore evakuirali vse, ki so bili nad podorom. V naslednjih dneh so vodniki iz Zermatta na mestu podora odstranili razmajano skalovje in navkljub svojim ekonomskim interesom varnejši prehod označili z markacijami. Na srečo smer na Matterhorn vodi po grebenu, tako da krušeče se skalovje večinoma ne leti na smer vzpona.

Večji in bolj neugoden podor se je zgodil 9. avgusta 2003 na običajnem (najlažjem) pristopu na Mt. Blanc v zahodni steni Aig. du Goûter nad Chamonixom. Po tej poti najvišjo goro Evrope vsak dan naskakuje več sto gornikov. Od zgornje postaje gorske železnice (2372 m) se pot naprej dvigne po morenah in skalovju do kočice Tête Rousse (3167 m). Nad manjšim ledenikom se od tu dviguje zahodna stena Aig. du Goûter (3817 m). Vrh stene in gore stoji velika planinska kočica Goûter, kjer se ob vzponu na Mt. Blanc običajno prenočuje. Stena je gruščnata, visoka okoli 500 metrov in od vrha do vznožja jo preseka nekaj ozebnikov, med njimi so skalnati razci. Pri vzponu na Mt. Blanc je treba prek te stene, vzpon traja vsaj dve uri, sestop pa je za kakšne pol ure krajši. Pravega plezanja je v steni malo, najlažji prehodi so shojeni. Že od nekdanj

je veljalo, da se s stene čez dan krušijo kamni in letijo po ozebnikih, tako kot se to dogaja po vseh alpskih stenah, na primer tudi pri nas v Jalovčevem ozebniku.

V vročem poletju 2003 so se snežišča v ozebnikih povsem stalila, talila sta se tudi led in gruščnati permafrost. Že v dneh pred velikim podorom so padajoči kamni v velikem ozebniku (Le grand Couloir) do smrti potolkli sestopajočega gornika, zato je veljalo, da je vzpon do kočice na Aig. du Goûter varen le ponoči. Podor 9. avgusta se je zgodil okoli 14. ure po lokalnem poletnem času, to je le malo po sončnem poldnevu. Slike 3, 4 in 5 prikazujejo potek podora (posnete v 45 sekundah), kot mu je bila z razdalje okoli 1000 metrov priča skupina planincev iz Ljubljane (med njimi avtor), ki se je nameravala naslednji dan prek Aig. du Goûterja povzpeti na Mt. Blanc. Skalovje se je odtajalo in odtrgalo tik pod vrhom gore in nekaj sto kubičnim metrom skalovja se je rušilo več kot 500 metrov v globino. Skale, med njimi posamezni kosi veliki kot omare in težki po več ton, so poletavali po zraku, se odbijali, razbijali in leteli križemkražem po ozebniku in prek grebenov. V desetih sekundah so največji kosi prileteli na ledenik, zahodna stena se je zavila v oblak prahu in drobnejši grušč je še kar naprej osipal po steni. Med podorom je po steni sestopalo kakšnih 40 gornikov, ki so tega dne navsezgodaj opravili vzpon na Mt. Blanc.



Slika 4. Skale poletavajo po velikem ozebniku in zahodni steni Aig. du Goûterja.  
Figure 4. Rocks falling down the Grand Coulouir and the west face of Aig. du Goûter

Imeli so neverjetno srečo, saj so leteči drobcji poškodovali le enega. Pot prek velikega ozebnika je grušč povsem zasul.

V pol ure je priletel helikopter in odpeljal poškodovanega alpinista v dolino. Medtem se je na južnem robu velikega ozebnika nabrala skupina vseh sestopajočih. Po ozebniku so se od časa do časa spet valile in poletavale skale, poti prek njega pa ni bilo videti. Po uri oklevanja, ko se prek ozebnika ni mogla prebiti nobena naveza, se je helikopter vrnil in začela se je evakuacija sestopajočih. S skalne rame v steni Aig. du Goûterja nad velikim ozebnikom, kamor so se vrnili sestopajoči, je helikopter z več kot dvajsetimi voznjami na ledenik Tête Rousse odpeljal vse čakajoče. Med njimi je bila tudi skupina šestih planincev iz Šentvida. Na skalni rami je reševalec na jeklenico pripel po enega ali dva čakajoča in po nekaj minutah leta jih je helikopter odložil. Vsa evakuacija je trajala dobri dve uri. Tudi med evakuacijo in po njej so se po steni še kar naprej prožili kamniti plazovi in manjši podori so se vrstili.

Ob velikem podoru je župan občine Saint Gervais, v katerega pristojnost spada območje Aig. du Goûterja, izdal opozorilo, s katerim je strogo odsvetoval vzpon na goro po tej smeri. Po francoski zakonodaji je namreč za varnost na območju občine odgovoren župan. Zasutost

poti in neprestana nevarnost novih podorov sta v drugi polovici avgusta 2003 bistveno vplivali na število vzponov na Mt. Blanc. Avgust je sicer višek poletne turistične sezone v visokogorju nad Chamonixom, ki se ponaša s skoraj 30.000 turističnimi posteljami. Proti Mt. Blancu se je v lepih dnevih ponavadi vzpenjalo okoli 1000 ljudi. Nepretnost najlažje in najbolj obljudene poti na Mt. Blanc je imela bistven finični vpliv na vodniško dejavnost v Chamonixu, saj je več kot pol dejavnosti tamkajšnjih desetih gorskih vodnikov usmerjena prav na Mt. Blanc. Glede na to, da je Mt. Blanc vsak dan naskakovalo vsaj po 50 vodniških navez, je bil izpad dohodka že pri vodniški dejavnosti nekaj deset tisoč evrov na dan. Upoštevati je treba še zmanjšanje dohodka, ki so ga zaradi nedostopnosti imeli na žičnicah in železnicah ter v koči Goûter ter v drugih kočah ob poti, saj obiskovalci niso prihajali tja. Zaradi tega, ker se je podor zgodil na višku kratke poletne sezone, ko bi moralo biti v gorah največ zaslužka, je celoten negativen učinek še večji. Ker je dosedanja pot prek stene speljana po ozebniku in razu, ki ga neprestano ogrožajo novi podori, je verjetno, da bodo morali vodniki poiskati prek stene novo, varnejšo smer vzpona za stotnije obiskovalcev. Kasno jeseni 2003 so prek velikega ozebnika potegnili novo jeklenico in pot ponovno odprli. Ker je bila poletje 2003 zaradi krušečih se serakov nepretna tudi pot prvopristopnikov na Mt. Blanc po



Slika 5. Ozebnik in pobočje sta zavita v oblak prahu.

Figure 5. The couloir and the west face of Aig. du Goûter in a cloud of dust.



Slika 6. Zahodno pobočje Aig. du Goûterja po podoru, veliki ozebnik je prekrit s sivim drobirjem. Helikopter je rdeča pika v rdečem okvirju. Vrisana je smer dosedanje poti.

Figure 6. The west face of Aig. du Goûter with the ascent route after the rock fall. The red dot within a red frame is a helicopter.



Slika 7. Helikopter leti nad kočjo Tête Rousse  
 Figure 7. A helicopter above Refuge Tête Rousse

ledeniku Bossons in ker je bilo prečenje z Aig. du Midi do Mt. Blanca zaradi previsne krajine zevi pod Mt. Blanc du Taculom zelo zahtevno, je v prekrasnem, a pretoplem avgustu 2003 na Mt. Blanc prišlo, le izjemno malo alpinistov.

Ponavljajoči se podori skalovlja in grušča – odmrznjenega permafrosta – povzročajo pod visokimi alpskimi stenami nastanek novih melišč. Del teh melišč je naložen na ledenikih in z njimi se bo v prihodnosti pomaknil v doline. Novo odloženi grušč pod stenami je še nestabilen in pričakovati je, da bo ob močnih padavinah prišlo do izrazitega odplavljanja drobirja in s tem do povečane erozije in akumulacije vzdolž hudournikov in alpskih rek. Povečani učinek tople grede tako izrazito vpliva tudi na dejavnosti v najvišjih delih Alp.

## Viri in literatura

1. Brodar, S., 1931. Temperature v Potočki zijalki na Olševi. Geografski vestnik, 7, 109–114, Ljubljana.
2. Harris, C., Haeberli, W., 2003. Warming permafrost in the mountains of Europe. World meteorological organisation, 52, 3, July 2003, 252–257.
3. Mihevc, A., Gams, I., 1979. Nova odkritja v Veliki Ledenici v Paradani (kat. št. 742). Naše jame, let. 20, 7–20.
4. Mihevc, A., 2001. Jamski fluvialni sedimenti v Snežni jami na Raduhi in v Potočki zijalki. V: Horvat, A. (ur.), Povzetki referatov, Geološki zbornik, 16, Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 60–63.
5. Morro D., 2001. Ghiacciaio del Montasio (quota 1800 m). Neve e Valanghe, 43, agosto 2001, 42–43.