

Progetto Permaqua

PERMAFROST E IL SUO EFFETTO SUL BILANCIO
IDRICO E SULL'ECOLOGIA DELLE ACQUE IN ALTA MONTAGNA



COLOPHON

AUTORI

Mair, Volkmar (LP – Ufficio Geologia e Prove Materiali, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Lang, Kathrin (LP – Ufficio Geologia e Prove Materiali, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Tonidandel, David (LP – Ufficio Geologia e Prove Materiali, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Thaler, Bertha (P1 – Laboratorio biologico dell'agenzia provinciale per l'ambiente, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Alber, Renate (P1 – Laboratorio biologico dell'agenzia provinciale per l'ambiente, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Lösch, Birgit (P1 – Laboratorio biologico dell'agenzia provinciale per l'ambiente, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Tait, Danilo (P1 – Laboratorio biologico dell'agenzia provinciale per l'ambiente, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Nickus, Ulrike (P2 – Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, Universität di Innsbruck)

Krainer, Karl (P2 – Institut für Geologie, Universität di Innsbruck)

Thies, Hansjörg (P2 – Institut für Geologie, Institut für Ökologie, Universität di Innsbruck)

Hirnspurger, Mathias (Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, Institut für Geologie, Universität di Innsbruck)

Sapelza, Astrid (Ufficio Gestione risorse idriche – Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige)

Tolotti, Monica (IASMA Research and Innovation Centre, E. Mach Foundation)

LAYOUT E STAMPA

Kraler | **Grafik**, Bressanone

Kraler | **Druck** Srl, Varna

Ottobre 2015 © tutti i diritti da Ufficio Geologia e Prove Materiali, Provincia Autonoma di Bolzano

FOTO DI COPERTINA

Il Lago Wannenkarr nella valle di Windach (Alpi Venoste, Tirolo). Foto: Karl Krainer

DOWNLOAD

www.permaqua.eu

Questa brochure è stata realizzata e finanziata nell'ambito del progetto permaqua. Il progetto permaqua è cofinanziato dal programma Interreg IV Italia-Austria, Fondo Europeo per lo sviluppo regionale dell'Unione Europea.

1. Introduzione 4

2. La diffusione del permafrost in Alto Adige e in Tirolo 5

3. L'effetto del cambiamento climatico sulla distribuzione del permafrost 9

4. Permafrost e bilancio idrico 12

5. Permafrost e qualità dell'acqua 14

6. Permafrost ed ecologia delle acque 17

7. Gli archivi ambientali nei rock glacier, nelle paludi e nei sedimenti lacustri 23

8. Permafrost e pericoli naturali 27

9. Conclusioni 29

10. Bibliografia 31

La presenza di permafrost nelle Alpi sopra i 2.500 m di quota è maggiore di quanto più volte ipotizzato. In Alto Adige le aree di permafrost hanno un'estensione di circa 440 km² (6 % dell'area totale), in Austria di circa 2.000 km². Il permafrost, a causa della sua temperatura, prossima a 0 °C, è sensibile agli innalzamenti della temperatura. Modelli climatici prevedono nelle Alpi per il 2100 un riscaldamento di 4 °C, si attende dunque un significativo scioglimento del permafrost e di conseguenza un aumento dell'instabilità dei versanti con una maggiore attività delle frane e anche variazioni del regime idrologico con ripercussioni sull'ecologia degli ambienti alpini di alta montagna.

I primi risultati di vari progetti mostrano che le acque provenienti dallo scioglimento del permafrost possono contenere alte concentrazioni di metalli pesanti. In certe zone queste concentrazioni sono molto superiori ai valori limite dell'acqua potabile. A inizio progetto è stato scientificamente provato che questi metalli pesanti non provengono dal substrato roccioso o dai blocchi o dal detrito del rock glacier. Non si avevano ancora dei risultati certi sulla provenienza dei metalli pesanti. L'unica certezza era che i metalli pesanti sono contenuti in alte concentrazioni nel ghiaccio delle carote estratte da rock glacier. Inoltre gli effetti dei metalli pesanti sulla flora e sulla fauna delle acque di alta montagna erano ancora sconosciuti.

Nel periodo tra il 2011 e il 2015 i partner del progetto Interreg IV Italia-Austria permaqua hanno cercato di fornire delle risposte alle questioni sopra elencate. I partecipanti al progetto – l'Ufficio Geologia e Prove Materiali nelle veci di Lead Partner e il Laboratorio biologico della Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige, nonché l'Università di Innsbruck – hanno analizzato le carote di ghiaccio estratte dai rock glacier Lazaun e Murfreit. Sono state eseguite analisi chimiche e la determinazione dell'età dei diversi strati di ghiaccio. Inoltre sono stati

studiati i parametri chimici e biologici di diverse acque che si trovano nella zona d'azione del permafrost in Alto Adige e nel Tirolo. È stato elaborato un rapporto sullo stato delle acque influenzate e non influenzate da permafrost. Per registrare i cambiamenti del permafrost in seguito alle variazioni climatiche la rete internazionale esistente di monitoraggio del permafrost è stata ampliata nel Tirolo e nell'Alto Adige. Le analisi delle acque sono state confrontate con le informazioni esistenti per intervenire adeguatamente sui cambiamenti in atto nelle zone di permafrost.

Nei 7 capitoli di questa brochure informativa vengono presentati i risultati ottenuti durante il progetto permaqua. Nei capitoli 2 e 3 sono riportate le nozioni di base sul permafrost, la sua distribuzione e gli effetti del cambiamento climatico nell'Alto Adige e nel Tirolo. Nei successivi quattro capitoli sono trattati invece gli argomenti del bilancio idrico, della qualità dell'acqua, dell'ecologia delle acque, degli archivi ambientali in alta montagna e dei pericoli naturali.

Gli autori sono consapevoli del fatto che i lavori svolti rispondono solo ad alcune delle tante domande riguardanti il permafrost e l'influenza sull'importanza per il bilancio idrico e la pericolosità negli ambienti di alta montagna dovuti al suo scioglimento. È stato comunque fatto un primo passo, sono stati discussi importanti concetti e sono state proposte le prime soluzioni. Ora è importante proseguire nella direzione intrapresa e mantenere le stazioni di monitoraggio esistenti per avere in futuro delle misure a lungo termine. Solo grazie a un set di dati continui sarà possibile documentare l'effettiva evoluzione del permafrost di alta montagna, valutare gli effetti del riscaldamento globale e sviluppare strategie adeguate.

Volkmar Mair

Il permafrost alpino è diffuso in tutto l'arco alpino e in particolare nelle Alpi tirolesi, a una quota di oltre 2.500 metri circa. La sua forma più frequente e più evidente da un punto di vista morfologico è quella dei rock glacier. Nel Tirolo sono stati individuati oltre 3.000 rock glacier, in Alto Adige oltre 1.700. Questo elevato numero di rock glacier intatti conferma la loro importanza come fenomeno di permafrost in ambienti di alta montagna. Nell'ambito del progetto di ricerca permafrost una serie di rock glacier in Tirolo e in Alto Adige è stata studiata approfonditamente per acquisire maggiori informazioni sulla loro composizione, sulla struttura interna, sul contenuto di ghiaccio, sulle dinamiche e sulla loro formazione. I relativi metodi di indagine includono il rilevamento geologico, le analisi granulometriche, i rilevamenti della temperatura, le analisi idrogeologiche, i rilevamenti dei movimenti con GPS, le indagini geofisiche (georadar, sismica), i carotaggi e le analisi del ghiaccio nei campioni (carote) estratti.

I rock glacier nelle zone caratterizzate da roccia calcarea (Dolomiti, Alpi calcaree settentrionali) solitamente si distinguono in modo significativo da quelli nelle zone con roccia metamorfica come il micasisto e lo gneiss (ad esempio nelle Alpi Venoste). Le differenze riguardano

soprattutto le granulometrie, la morfologia di superficie e l'idrogeologia. I rock glacier nelle Alpi calcaree sono caratterizzati da classi granulometriche molto più fini, presentano una geomorfologia meno movimentata e una quantità significativamente inferiore di acque superficiali, poiché la maggior parte dell'acqua defluisce attraverso sistemi di fratture e di faglie o cavità carsiche. Si notano anche delle differenze evidenti nella composizione chimica dell'acqua proveniente dai rock glacier nelle zone caratterizzate da rocce calcaree rispetto a quelle con rocce metamorfiche.

Le condizioni di deflusso nei rock glacier in zone con rocce metamorfiche, ad esempio le Alpi Venoste, sono caratterizzate da forti oscillazioni sia durante l'arco della giornata che stagionali.

Il deflusso dell'acqua nei rock glacier è più forte nel periodo del disgelo (giugno), poi diminuisce costantemente verso la fine dell'estate e in autunno e nei mesi invernali raggiunge un livello minimo. La temperatura dell'acqua delle sorgenti alimentate da rock glacier intatti è costantemente molto bassa, con temperature inferiori a 1,5 °C e molto spesso inferiori a 1 °C.

Nei rock glacier delle Alpi Venoste, le sorgenti sono caratte-

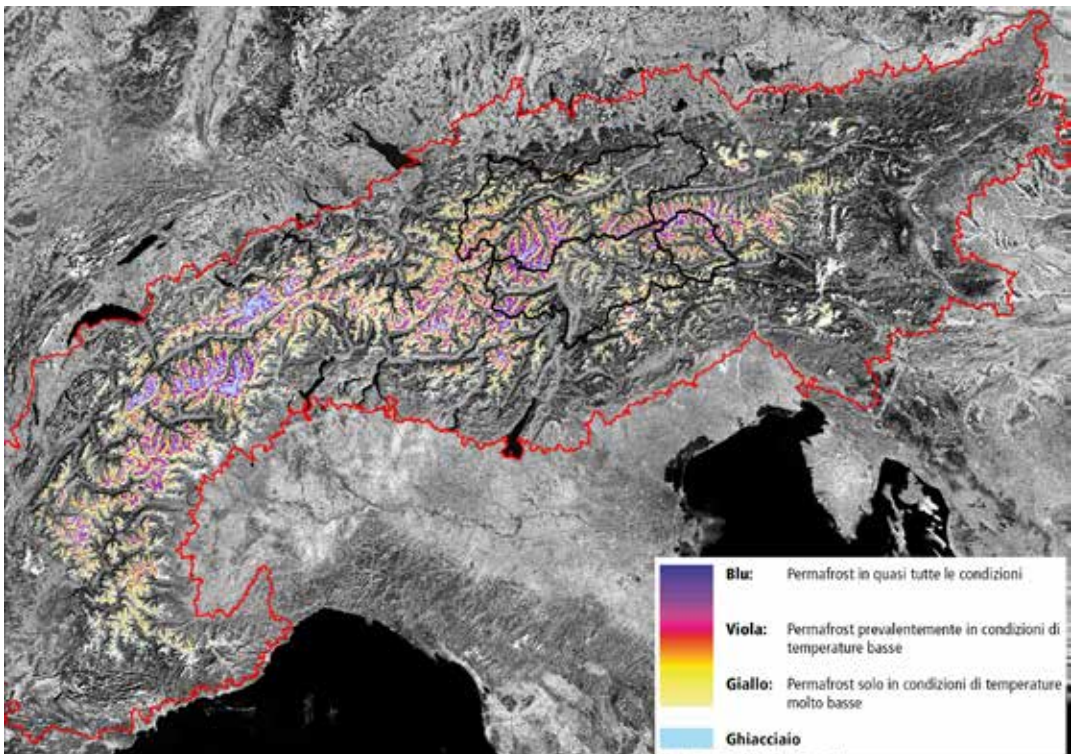


Fig. 2.1 – Carta della modellazione della distribuzione del permafrost sulle Alpi (Fonte: Progetto Alpine Space PermaNET).

rizzate da una conducibilità elettrica molto elevata; inoltre, la maggior parte di queste sorgenti contiene un'alta quantità di nichel e altri metalli.

Con appositi rilevamenti è stato constatato che la maggior parte dei rock glacier attivi presenta movimenti dell'ordine di grandezza di pochi centimetri fino a diversi decimetri all'anno. Tuttavia, per un numero ridotto di rock glacier sono stati rilevati movimenti di diversi metri all'anno. Si nota inoltre, che la velocità del movimento di alcuni rock glacier, ad esempio il rock glacier Lazaun in Val Senales, negli ultimi anni è aumentata significativamente.

Due carotaggi effettuati proprio nel rock glacier di Lazaun hanno fornito dei risultati sensazionali.

Dal sondaggio geognostico denominato Lazaun I è stata estratta una carota lunga 40 m. Lo strato detritico, attivo e non ghiacciato era spesso 2,8 m, seguito da un nucleo di materiale interamente congelato che si estendeva fino ad una profondità di 14,7 m. Tra i 14,7 m e i 16,8 m di profondità il sondaggio ha attraversato uno strato non ghiacciato, mentre nel restante tratto della perforazione è stato riscontrato del materiale completamente ghiacciato, fino a una profondità di 25 m.

Nella fascia tra i 19,5 m e i 25 m la percentuale di ghiaccio era elevata e il ghiaccio mostrava una evidente laminazione. Dai 25 m ai 28 m di profondità, il sondaggio geognostico ha attraversato materiale grossolano e a blocchi mentre tra i 28 m e i 40 m è stato riscontrato detrito con un'elevata percentuale di materiale a granulometria fine. Nel nucleo ghiacciato la percentuale di ghiaccio variava dall'1 % al 98 %, la percen-

tuale di ghiaccio media era del 43 %. Una maggiore quantità di ghiaccio (48 %) è stata osservata tra 2,8 m e 14 m, nonché tra 19,5 m e 25 m di profondità (51 %).

Nel sondaggio geognostico denominato Lazaun II, lo strato attivo era spesso 4,5 m. Il contenuto di ghiaccio era molto inferiore rispetto al sondaggio Lazaun I. È stata rilevata la presenza di ghiaccio nei tratti tra 4,5 m e 5 m, 6,6 m e 7,7 m, 9,1 m e 10,5 m e 15,5 m e 18,5 m. Tra i 18,5 m e i 24,5 m il sondaggio ha attraversato materiale grossolano e a blocchi con poco materiale fine, mentre nella parte successiva, fino alla quota finale del sondaggio a 32 m, il materiale era grossolano con un elevato contenuto di materiale fine. Il contenuto medio di ghiaccio dei tratti ghiacciati del carotaggio era pari a 22 %.

Nei complessivi 11 campioni di ghiaccio estratti dal sondaggio Lazaun I e 2 dal sondaggio Lazaun II, la quantità di materiale vegetale trasportato dal vento e imprigionato dal ghiaccio era sufficientemente elevata (da 1,1 a 9,7 mg di peso a secco) da poter eseguire una datazione al radiocarbonio (con spettrometria di massa o AMS). Il contenuto organico/vegetale nei campioni di ghiaccio della carota di Lazaun I risaliva a 2.240 anni fa, a 2,82 m di profondità e a 8.960 anni fa, a una profondità di 23,50 m. Sulla base del modello elaborato, l'età del ghiaccio alla base del rock glacier, cioè a 25 m, è pari a 10.300 anni. Lo strato non ghiacciato, tra 14,70 m e 16,82 m, risale a un periodo tra circa 3.740 e 4.300 anni fa. Il campione estratto dal sondaggio Lazaun II ha dimostrato che il ghiaccio, alle profondità di 7,27 e 9,47 m, ha rispettivamente 5.257 e 5.873 anni (Krainer et al. 2015).



Fig. 2.2 – Fronte del rock glacier attivo Murfreit sul versante settentrionale del Sella (Dolomiti).



Fig. 2.3 – Ortografia del circo glaciale di Lazaun nell'alta Val Senales: al centro si distinguono le tipiche forme dovute allo scorrimento verso nord-est del rock glacier di Lazaun.

Anche le temperature rilevate nel foro del sondaggio hanno fornito dati interessanti. Nel 2011, la temperatura più bassa rilevata nel foro di sondaggio Lazaun I, nel tratto tra 10 e 25 m, era tra -0.9 e -0.1 °C. Le temperature più alte fino a una profondità di 10 m arrivavano a > 0 °C e tra 10–35 m di profondità erano tra -0.1 e -0.4 °C. Anche nel foro del sondaggio Lazaun II, nei tratti in cui la carota era ghiacciata, non sono mai state misurate temperature inferiori a -1 °C. Le temperature erano sempre vicine al punto di congelamento (Krainer et al. 2015). Le misure inclinometriche eseguite nel foro di sondaggio Lazaun I, a una profondità di 20–25 m, cioè alla base del rock glacier, hanno evidenziato con chiarezza un orizzonte di scorrimento con deformazioni nell'ordine di grandezza di 12 cm in 36 giorni (3,3 mm/giorno). Un altro piano di scorrimento è stato rilevato ad una profondità di 14 m, alla base del corpo ghiacciato superiore, con una velocità di deformazione di 6 cm in 36 giorni. Le deformazioni sono limitate esclusivamente a queste due zone di deformazione alla base dei due corpi ghiacciati, mentre all'interno di queste due strutture non è stata rilevata alcuna deformazione. I sondaggi geognostici hanno fornito delle informazioni ec-



Fig. 2.4 – Il marcato fronte di un rock glacier sopra il lago Wannenkar nella Valle di Windach: l'acqua di scioglimento del rock glacier alimenta il lago di alta montagna.

cezionali sulla struttura interna e la composizione del rock glacier e sul suo comportamento. I sondaggi hanno anche evidenziato che il rock glacier si compone di due corpi ghiacciati separati da uno strato non ghiacciato. La datazione al

radiocarbonio dei resti vegetali contenuti nel ghiaccio del permafrost ha rivelato un dato sorprendente, ovvero che il ghiaccio alla base del rock glacier risale a circa 10.300 anni fa. Da questo dato si vince che il rock glacier ha iniziato a formarsi nel circo glaciale di Lazaun, dopo il ritiro del ghiacciaio dello stadio Egesen, mentre il ghiaccio del rock glacier da allora è rimasto protetto sotto a uno strato detritico superficiale. Attualmente, il rock glacier è molto attivo, con movimenti annui fino a 1,7 m. Negli ultimi 10.000 anni, queste fasi di attività devono comunque essere state sempre molto brevi; per la maggior parte del tempo il rock glacier, che è lungo solo ca. 660 m, deve essere rimasto inattivo. Le misurazioni inclinometriche nel foro del sondaggio hanno evidenziato delle zone di deformazione di taglio alla base dei due corpi del rock glacier, per cui il suo movimento è costituito da uno scivolamento alla base. All'interno dei corpi ghiacciati non sono state rilevate deformazioni degne di nota.

Nonostante il ghiaccio alla base sia molto antico, la temperatura del ghiaccio nel foro del sondaggio è vicina al punto di congelamento. La temperatura del ghiaccio del permafrost relativamente „calda” è causata dal riscaldamento globale che in combinazione con una maggiore quantità di acqua di fusione è la causa probabile dell'attuale elevata attività.

Lo strato non ghiacciato risale a circa 4.300-3.740 anni fa ed è indicativo di un periodo durato circa 500 anni in cui il clima era asciutto e caldo. Dalle analisi del ghiaccio è risultato che l'alta concentrazione di nichel contenuta nell'acqua delle sorgenti alimentate da rock glacier viene rilasciata dal ghiaccio dei rock glacier stessi.

Karl Krainer

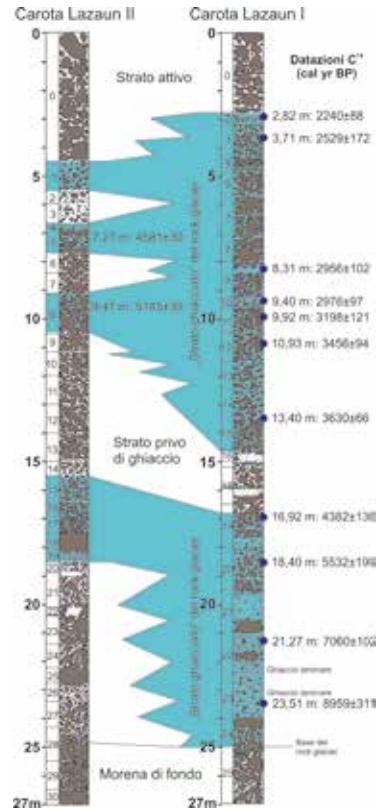


Fig. 2.6 – Profilo stratigrafico dei sondaggi effettuati sul rock glacier Lazaun con le rispettive età fornite dalle datazioni.



Fig. 2.5 – Questa carota di ghiaccio del rock glacier Lazaun è stata estratta a 20 m di profondità.

Per poter valutare e interpretare lo sviluppo delle zone di permafrost, prima di tutto è necessario volgere lo sguardo al passato. L'andamento nel futuro prossimo può essere pronosticato solo sulla base di eventi analoghi del passato. Lo sviluppo climatico degli ultimi 50.000 anni è stato caratterizzato fondamentalmente dalla massima estensione della glaciazione Würm e il successivo riscaldamento globale. Il periodo di massima estensione, che risale a 20.000 anni fa, in alta montagna ha cancellato tutte le precedenti tracce di permafrost, come i rock glacier o le zone con copertura di neve perenne, ecc. In questo periodo il permafrost poteva formarsi solo sulle cime più alte che sporgevano dalla calotta di ghiaccio. Questa calotta di ghiaccio, secondo le ricostruzioni, arrivava a una quota di circa 2.500-2.600 m, per cui le zone eventualmente interessate dal permafrost avrebbero potuto trovarsi soltanto a quote ancora più elevate. Con il ritiro dei ghiacciai dalle zone vallive e dai versanti delle montagne in seguito al riscaldamento globale, si tornò a un regime climatico con temperature e precipitazioni tali da permettere la formazione del permafrost a partire da 1.700 m. Inoltre, la formazione del permafrost è legata alla presenza di zone senza ghiaccio. Poiché i rock glacier sono la forma geomorfologica più

evidente del permafrost alpino, i dati dei catasti dei rock glacier dell'Alto Adige e del Tirolo realizzati nell'ambito dei progetti PROALP e PermaNET sono stati utilizzati per svolgere un'analisi statistica. L'analisi della quota a cui si trovano i rock glacier ha dimostrato che meno dell'1 % dei 4.888 rock glacier rilevati sono situati a una quota inferiore ai 2.000 m (il fronte di rock glacier più basso si trova a 1.700 m). Questi rock glacier a quota bassa sono fossili e privi di ghiaccio, il che evidenzia che devono essersi formati in un clima più freddo di quello attuale. Poiché i rock glacier segnano il bordo inferiore di uno strato di permafrost rilevante, si può concludere che le condizioni climatiche degli ultimi 20 mila anni non hanno permesso la formazione di permafrost a una quota inferiore a 1.700 m.

L'osservazione dello sviluppo dei rock glacier dopo la piccola era glaciale (massimo 1850) dimostra che in soli 150 anni si sono formati rock glacier di dimensioni relativamente grandi dalle morene laterali e frontali dei ghiacciai in espansione. Ciò suggerisce che il tempo di risposta ovvero di formazione minimo dei rock glacier è solo di poche centinaia di anni. Dagli ampi ed estesi rock glacier a una quota di circa 2.200 m, si deduce che, oltre a una generale dislocazione geomorfologica e topografica, per un lungo periodo le condizioni

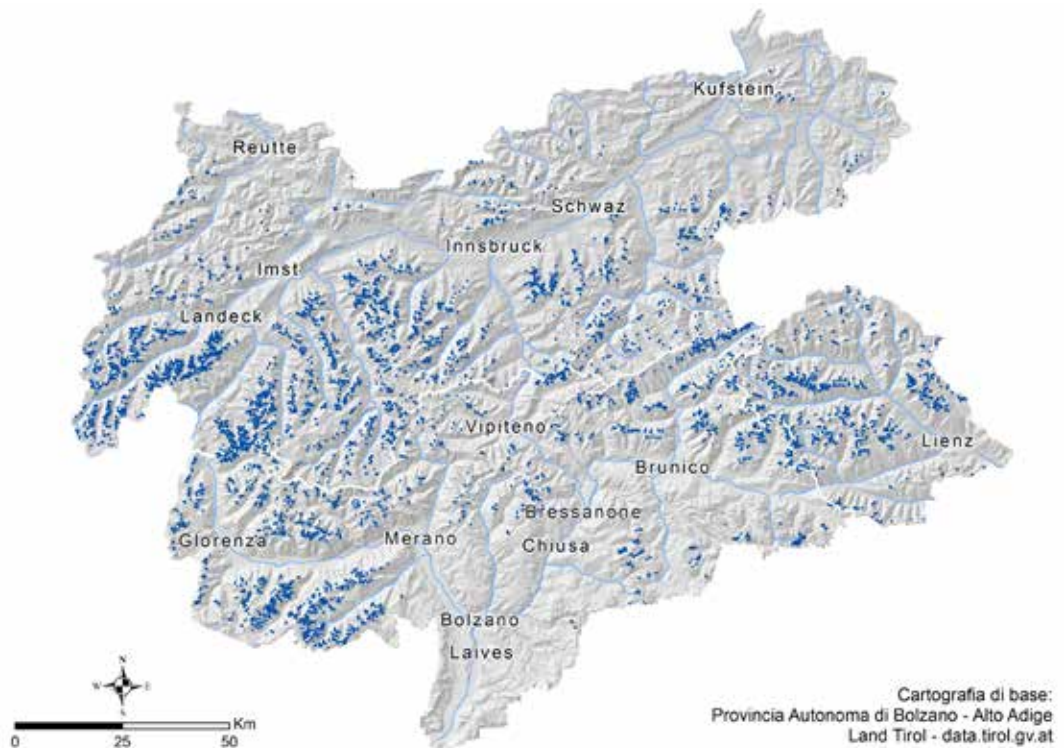


Fig. 3.1 – Catasto dei rock glacier dell'Alto Adige e del Tirolo (Fonte: Krainer & Ribis, 2012; Bollmann et al., 2012).

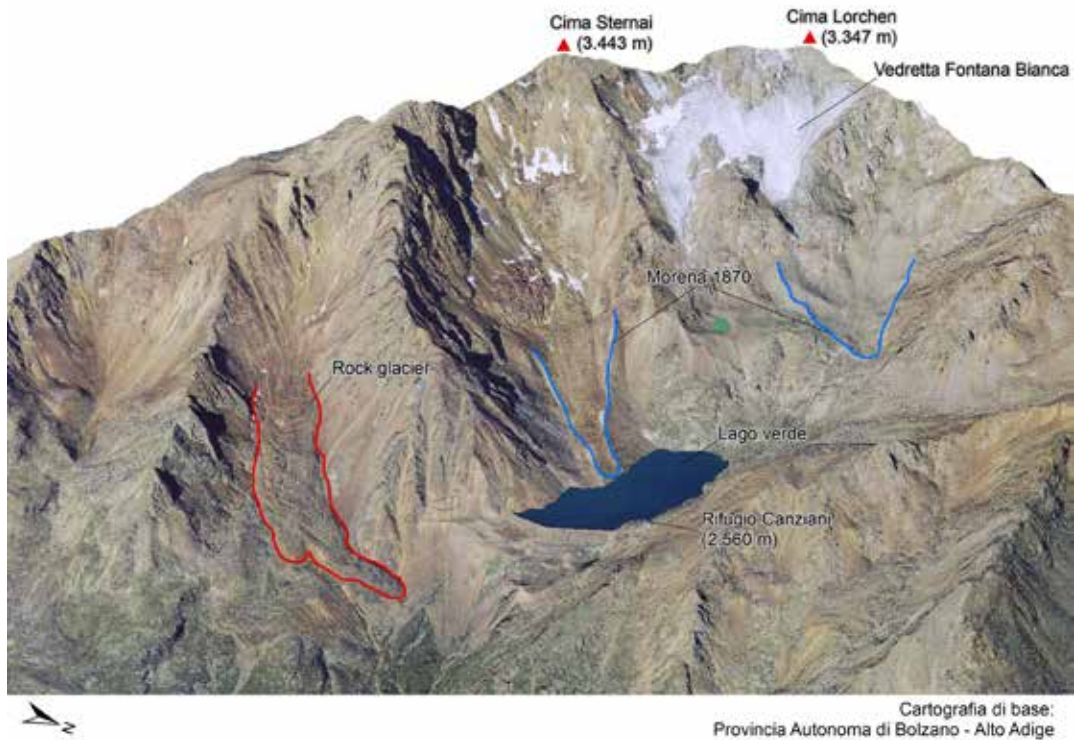


Fig. 3.2 – In questa ortofoto in 3D dell'alta Val d'Ultimo si riconoscono il rock glacier attivo Rossbänk (linea rossa), lo stato attuale della Vedretta Fontana Bianca e la massima espansione del ghiacciaio durante la piccola età glaciale attorno al 1870 (linee blu).

devono essere state ideali per la formazione di rock glacier. Attualmente esistono solo pochi rock glacier attivi che arrivano alla quota relativamente bassa di 2.300 m; essi sono situati in zone molto ombreggiate e caratterizzate da abbondanti precipitazioni (ad es. Monte Luco, Alto Adige). La maggior parte dei rock glacier attivi con un elevato contenuto di ghiaccio e velocità di movimento che variano da alcuni centimetri ad alcuni decimetri all'anno sono situati a quote oltre i 2.500 m. Il riscaldamento globale degli ultimi 20.000 anni ha quindi causato un innalzamento della quota minima del permafrost di 300-500 m. Sono state documentate fasi di avanzamento e fasi di scioglimento dei rock glacier in Val Senales (Lazaun) e in Val d'Ultimo (Lago Lungo). Gli effetti del cambiamento climatico sul permafrost che sono visibili e misurabili già oggi sono, a titolo di esempio, le maggiori velocità di scorrimento dei rock glacier, il maggior grado di infossamenti in superficie, le strutture collassate e lo svuotamento di laghi sotterranei.

La serie di misurazioni più lunga al mondo per la quale sia disponibile della documentazione riguarda il rock glacier Äußerer Hochebenkar (Tirolo) e si estende per più di

75 anni. Le temperature superiori alla media hanno sempre comportato un aumento della velocità di scorrimento. In particolare le estati calde e umide accelerano i processi in alta montagna; tra il 1938 e il 1997 il rock glacier è avanzato complessivamente di 165 metri. Su questa base si può calcolare una velocità media di spostamento di circa 2,7 m all'anno (Schneider & Schneider 2001).

Lo scioglimento del ghiaccio rende instabili i ripidi pendii frontali e laterali dei rock glacier e comporta così un maggiore scivolamento in seguito agli eventi di precipitazioni con conseguenti frane e debris flow, ovvero colate detritiche torrentizie, meglio descritte nel capitolo 8.

Gli effetti concreti del riscaldamento climatico sugli ammassi rocciosi non possono essere confermati con certezza poiché il monitoraggio della temperatura della roccia (ad es. Croda delle Cornacchie e Ortles) in Alto Adige è iniziato solo verso la fine del 2009 e del 2011.

Una prima analisi ha evidenziato che ci sono oscillazioni di temperatura notevoli soprattutto tra la superficie rocciosa fino a una profondità massima di 15 m. Per questo, tale fascia viene definita „zona attiva“ (o active layer). Qui le

temperature variano a seconda di diversi fattori: tra il giorno e la notte, nelle diverse stagioni, a volte anche nell'arco di poche ore, ad esempio, in seguito a cadute improvvise delle temperature. Tra il giorno e la notte possono verificarsi variazioni di temperatura fino a 30 °C. La zona attiva a nord è profonda fino a 8 m, mentre a sud arriva fino a circa 15 m. All'interno dell'ammasso roccioso la temperatura è costantemente inferiore allo zero, da circa -2,6 °C ad una quota

di 3.200 metri (Croda delle Cornacchie) fino a -2,8 °C ad un'altitudine di 3.800 m (Ortles). Lo spessore della zona attiva presumibilmente aumenta con l'incremento delle temperature conseguenti al riscaldamento globale.

Volkmar Mair
Kathrin Lang
David Tonidandel

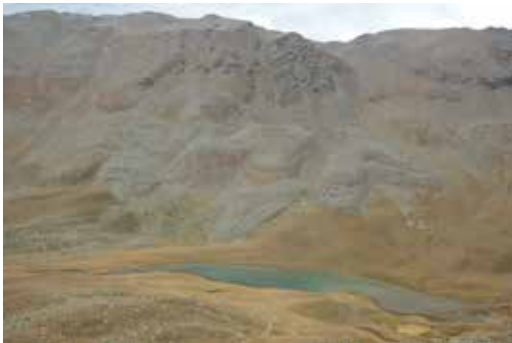


Fig. 3.3 – Alcuni rock glacier sopra il lago Lungo nell'alta Val d'Ultimo documentano fasi di avanzamento e fasi di scioglimento.



Fig. 3.4 – Il fronte del rock glacier attivo Äußeres Hochebenkar (Ötztal).



Fig. 3.5 – All'interno dell'ammasso roccioso della Croda delle Cornacchie nell'alta Val Senales durante l'anno vengono misurati costantemente -2,6 °C.

Negli ultimi anni, presso alcuni torrenti alimentati da rock glacier attivi, sono stati installati degli idrometri sul fronte del rispettivo ghiacciaio roccioso per analizzare più dettagliatamente il regime idrogeologico (e in particolare la portata) di rock glacier attivi.

In questo contesto sono stati indagati gli effetti del riscaldamento globale sul bilancio idrico in alta montagna e in particolare sui bacini idrografici caratterizzati dalla presenza di permafrost (rock glacier attivi).

In Alto Adige sono stati oggetto di analisi i rock glacier Lazaun (Alpi Venoste) e Napfen (Gruppo delle Vedrette di Ries), nel Tirolo i rock glacier ÄuBeres Hochebenkar presso Obergurgl (Alpi Venoste), Reichenkar (ad ovest delle Alpi dello Stubai), Ölgrube e Kaiserberg (Kaunertal, Alpi Venoste) volgendo particolare attenzione al bilancio idrico.

Il comportamento di deflusso dai rock glacier in zone con rocce metamorfiche, ad esempio le Alpi Venoste, è caratterizzato da forti oscillazioni sia durante l'arco della giornata che stagionali, oltre ad essere fortemente condizionato dall'andamento meteorologico. La maggior parte dell'acqua che ha origine da una sorgente alimentata da un rock glacier è composta di acqua di fusione della copertura nevosa invernale e di acqua meteorica, che nei mesi estivi solitamente cade sotto forma di pioggia. Una minima parte dell'acqua è di origine freatica che, in quanto tale, è stata all'interno dell'ammasso per più tempo e ha quindi una conducibilità elettrica più alta. Anche la parte di acqua proveniente dall'incrementato scioglimento del ghiaccio del permafrost è molto esigua.

Il periodo del disgelo inizia a fine aprile/inizio maggio. I maggiori volumi di deflusso vengono misurati durante il periodo del disgelo a giugno e a luglio nonché immediatamente dopo gli eventi di precipitazioni molto intensi. Le ondate di maltempo con forti cali delle temperature e con neviccate possono far diminuire la portata durante l'estate. Nelle giornate calde e soleggiate, il deflusso è caratterizzato da forti oscillazioni durante l'arco della giornata, con volumi di portata molto

bassi intorno a mezzogiorno e picchi nelle tarde ore serali. A partire dalla fine di luglio/l'inizio di agosto, il deflusso diminuisce costantemente; tale fenomeno è interrotto solo da singoli picchi in caso di eventi di precipitazioni. Dalla fine di novembre fino all'inizio del periodo del disgelo in primavera, la portata ammonta solo a pochi litri al secondo. A novembre, alcune sorgenti alimentate dai ghiacciai rocciosi si isteriliscono completamente.

Il deflusso dell'acqua dai rock glacier è più forte nel periodo del disgelo (giugno), poi diminuisce costantemente verso la fine dell'estate e in autunno e nei mesi invernali raggiunge un livello minimo.

A causa dell'elevato contenuto di acqua di fusione, durante il principale periodo di disgelo tra la fine di maggio e l'inizio di luglio la conducibilità elettrica è molto bassa (di solito tra 30 e 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$); verso l'autunno questo valore invece torna ad aumentare in maniera continuativa, in conseguenza dell'incremento della percentuale di acqua freatica e la progressiva diminuzione dell'acqua di fusione. Verso la fine dell'autunno si registrano i valori più alti, che per molti rock glacier situati in regioni con rocce metamorfiche si trovano in un range tra 100 e 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nel frattempo sono anche state scoperte alcune sorgenti alimentate da rock glacier con valori di conducibilità elettrica molto più elevati (200-300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante la fase principale di disgelo con picchi oltre i 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ verso la fine dell'autunno). Queste sorgenti alimentate da rock glacier solitamente presentano anche una concentrazione molto elevata di nichel e altri metalli. L'analisi della carota estratta dal rock glacier Lazaun ha evidenziato che il nichel e gli altri metalli vengono rilasciati dal ghiaccio del permafrost del rock glacier.

La temperatura dell'acqua delle sorgenti alimentate da rock glacier intatti è costantemente molto bassa con temperature inferiori ai 1,5 °C e molto spesso inferiori a 1 °C. Questo è dovuto al fatto che l'acqua nei rock glacier scorre in mezzo al ghiaccio che la raffredda notevolmente.

Una conseguenza dell'attuale riscaldamento globale è che anche il ghiaccio del permafrost dei rock glacier è maggiormente soggetto a scioglimento o fusione. Tuttavia, il tasso di scioglimento è molto esiguo poiché lo strato detritico sovrastante, solitamente spesso da 2 a 4 m, protegge il permafrost sottostante. I rilevamenti con GPS eseguiti sul rock glacier Lazaun hanno evidenziato che la superficie del rock glacier si abbassa di circa 10 cm all'anno a causa dello scioglimento del ghiaccio del permafrost. Tradotta, questa cifra implica un calo annuo di circa 10.000 m³ di ghiaccio e con un conseguente aumento del tasso di deflusso medio di 0,6 l/s nei mesi estivi (da maggio a ottobre) che tuttavia è significativamente inferiore al 5% del deflusso totale. I primi tentativi di modellizzazione del processo hanno evidenziato che il maggiore volume



Fig. 4.1 – Idrometro per la misura della portata del torrente alimentato dal rock glacier di Lazaun.

di acqua di fusione del permafrost può alterare significativamente il bilancio idrico. A causa dello scioglimento del ghiaccio del permafrost nei sedimenti sciolti (rock glacier, detriti di falda), aumentano sia lo spazio intergranulare nei sedimenti che, conseguentemente, la capacità di trattenere l'acqua.

Nel momento in cui una maggiore quantità di acqua si fermasse nei sedimenti, si avrebbe uno smorzamento dei picchi di flusso da una parte e un lieve aumento del volume d'acqua nei periodi di secca dall'altra parte.

Karl Krainer

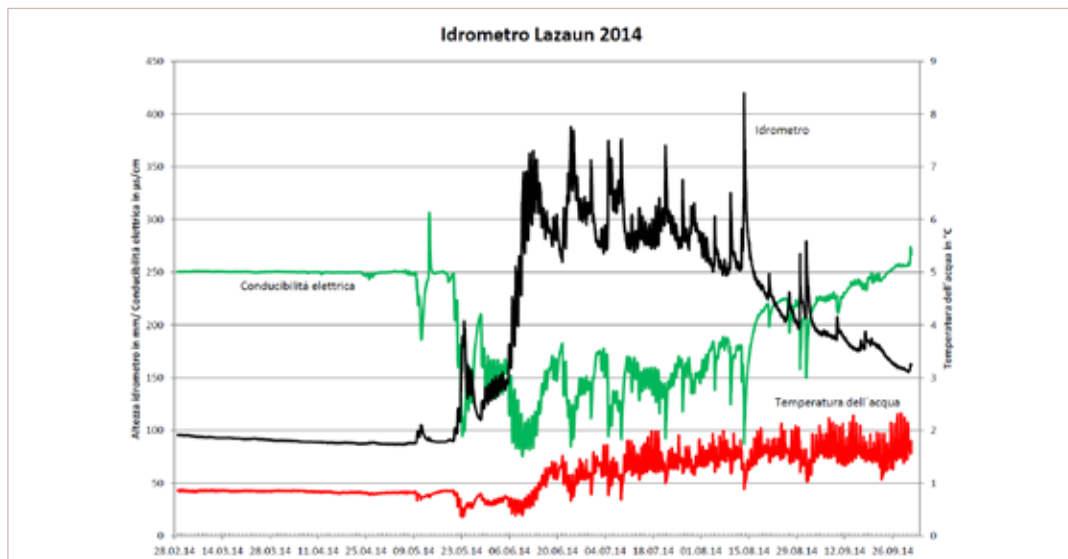


Fig. 4.2 – Grafico della portata, della conducibilità elettrica e della temperatura dell'acqua misurata dall'idrometro presso il torrente del rock glacier di Lazaun.

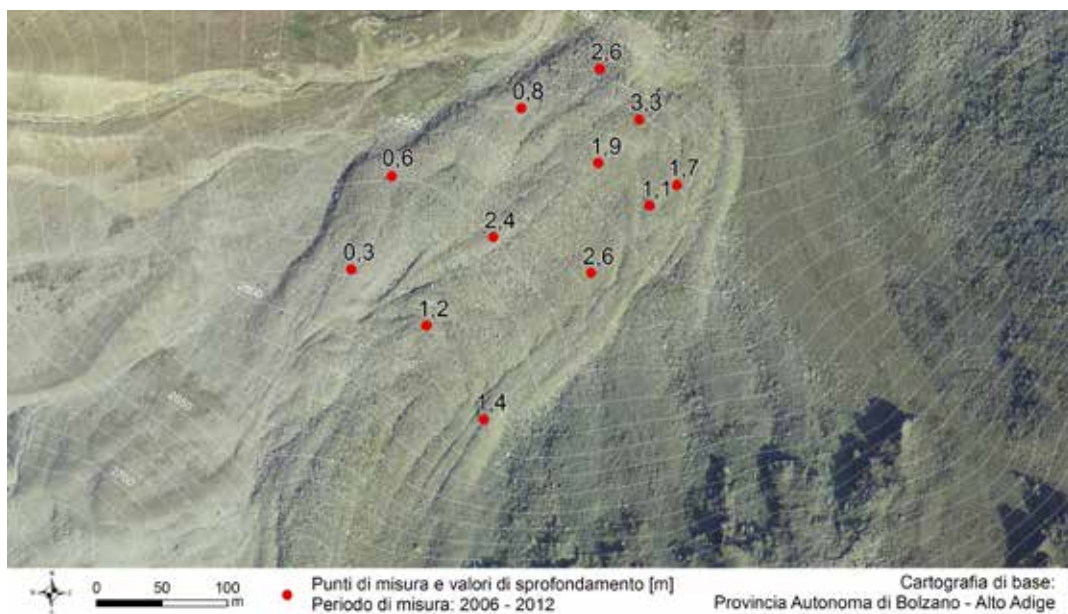


Fig. 4.3 – Ortofoto con i valori di sprofondamento del rock glacier di Lazaun misurati nell'intervallo di 6 anni.

La qualità dell'acqua dei laghi di alta montagna nel campo di influenza del permafrost alpino può essere significativamente alterata soprattutto dalla presenza di rock glacier attivi.

5.1 | L'effetto dello scioglimento del permafrost sulla chimica dell'acqua

Le alterazioni della composizione chimica di un lago di alta montagna in Val Venosta (lago Rasass, 2.682 m) hanno fornito l'occasione di avviare una campagna di indagini più dettagliate sulle acque di fusione provenienti da rock glacier attivi. In questo specifico lago, la conducibilità elettrica dell'acqua, dalla quale si può dedurre la quantità di sostanze disciolte in essa, è aumentata di quasi 20 volte nell'arco di vent'anni. L'unica spiegazione plausibile di questo fenomeno era la maggiore quantità di infiltrazioni di acqua altamente concentrata proveniente dal rock glacier direttamente sopra il lago (Thies et al. 2007).

Per determinare se l'acqua di fusione del permafrost possa influenzare le acque di superficie, nell'ambito del progetto permafrost è stata analizzata la chimica dell'acqua di diversi torrenti, alcuni dei quali rientranti nel campo d'azione di rock glacier attivi e altri non influenzati. Tra il 2007 e il 2013, sempre nel periodo compreso tra luglio e ottobre (Fig. 5.2 e Fig. 5.3), sono stati prelevati campioni d'acqua in prossimità di due rock glacier in Tirolo - ovvero l'Äußeres Hochebenkar (Ötztal) e il Krummgampen (Kauental) (Fig. 5.1). L'analisi chimica era volta a determinare il valore del pH, la conducibilità elettrica, le concentrazioni di ioni e il contenuto

di metalli pesanti.

Di regola, la quantità di sostanze disciolte nell'acqua di fusione dei rock glacier aumentava nel corso dell'estate e in autunno la concentrazione era raddoppiata o triplicata rispetto alla fine del periodo del disgelo (Fig. 5.4). Ad esempio, il valore medio mensile di conducibilità elettrica del torrente Hochebenkarbach nell'estate 2012 è aumentato da 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nel mese di luglio a 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a settembre (Nickus et al. 2015). Una serie di fattori, tra cui il disgelo della neve, gli eventi di precipitazioni, lo scioglimento del ghiaccio nonché i deflussi intermedi e di base che tutti insieme costituiscono il deflusso complessivo di un rock glacier che alimenta un torrente, contribuiscono all'aumento delle concentrazioni di sostanze disciolte nell'acqua. Poiché le proporzioni di queste singole componenti variano nel corso dell'estate, il flusso di base fortemente mineralizzato è soggetto a gradi di diluizione diversi tra il mese di giugno e l'autunno. Il grado di diluizione è particolarmente elevato all'inizio dell'estate, durante il periodo del disgelo, ma anche in seguito a copiose piogge estive. In autunno invece, quando è presente prevalentemente il deflusso di base, le concentrazioni delle sostanze disciolte nell'acqua raggiungono

solitamente i livelli più elevati che potenzialmente possono anche aumentare per l'acqua di fusione proveniente dal corpo di ghiaccio del rock glacier attivo. L'analisi di una carota di sondaggio estratta dal rock glacier Lazaun (Alto Adige) ha evidenziato che nel ghiaccio sono presenti strati con diverse sostanze altamente concentrate (vedasi il capitolo 7). Anche l'attività dei microrganismi può comportare il rilascio di diverse sostanze quali calcio, magnesio o manganese incrementando ulteriormente la concentrazione di

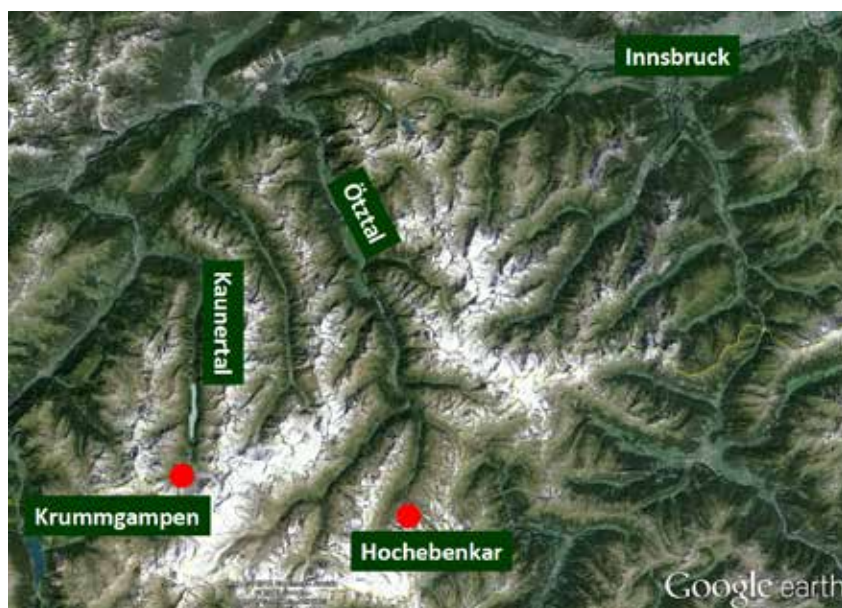


Fig. 5.1 – Ortofoto con la localizzazione delle aree di studio Krummgampen e Hochebenkar nel Tirolo (Cartografia di base: Google Earth).



Fig. 5.2 – Idrometro per la misura della portata del torrente proveniente dal rock glacier Hochebenkar (Alpi Venoste).



Fig. 5.3 – Raccoglitore automatico di campioni d'acqua collocato presso l'idrometro del rock glacier Hochebenkar.

queste sostanze nelle acque superficiali (Sonnleitner et al. 2011). Nei torrenti non rientranti nel campo d'azione di rock glacier attivi, la concentrazione delle varie sostanze disciolte nell'acqua era nettamente inferiore. Il valore medio di conducibilità elettrica delle acque di tali torrenti era inferiore a $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ e quindi significativamente al di sotto dei valori registrati nei torrenti alimentati da un rock glacier. Inoltre, le concentrazioni non erano praticamente soggette a particolari variazioni nell'arco dell'estate. Oltre all'alta concentrazione di componenti ioniche, i torrenti alimentati da rock glacier possono avere anche un elevato contenu-

to di metalli pesanti (Thies et al. 2013). Soprattutto nei torrenti il cui pH era acido, come ad esempio l'acqua proveniente dal rock glacier Krummgampen, la concentrazione di alcuni metalli (ad es. nichel, manganese, zinco o alluminio) era chiaramente superiore ai valori limite stabiliti dalla direttiva UE sulle acque. Invece nei torrenti non influenzati da un rock glacier non sono state rilevate, in pratica, tracce di metalli pesanti e i valori erano attorno al limite di rilevazione, pari a pochi $\mu\text{g}/\text{l}$, o inferiori a tale valore.

Ulrike Nickus, Hansjörg Thies

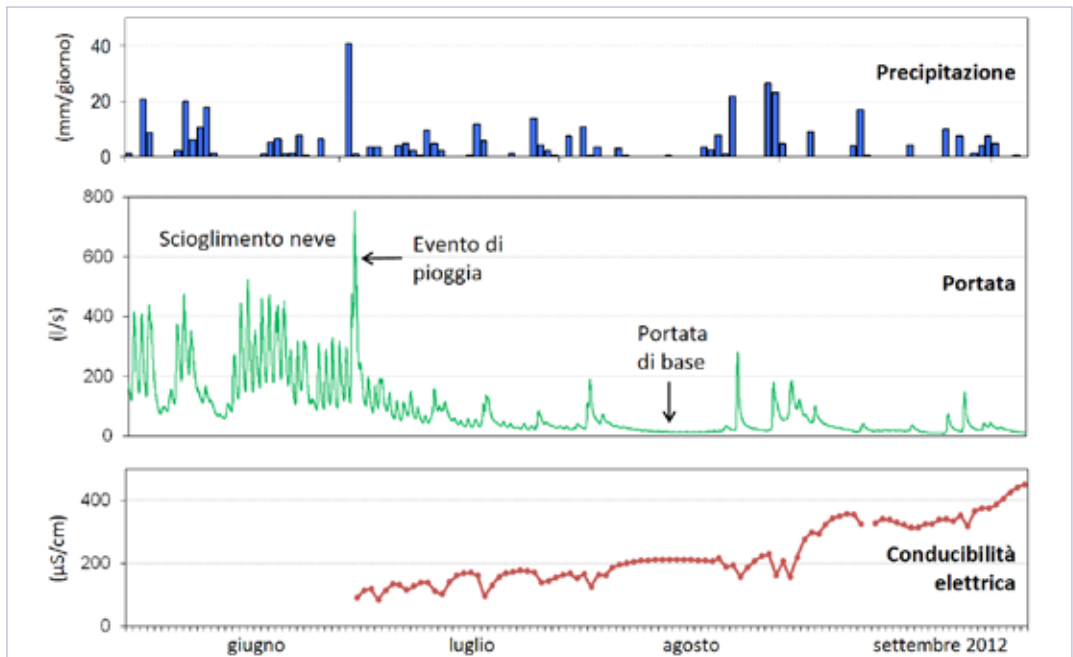


Fig. 5.4 – Grafico della portata e della conducibilità elettrica misurati presso l'idrometro del rock glacier Hochebenkar nell'estate 2012.

5.2 | Sorgenti di acqua potabile in prossimità di rock glacier in Alto Adige

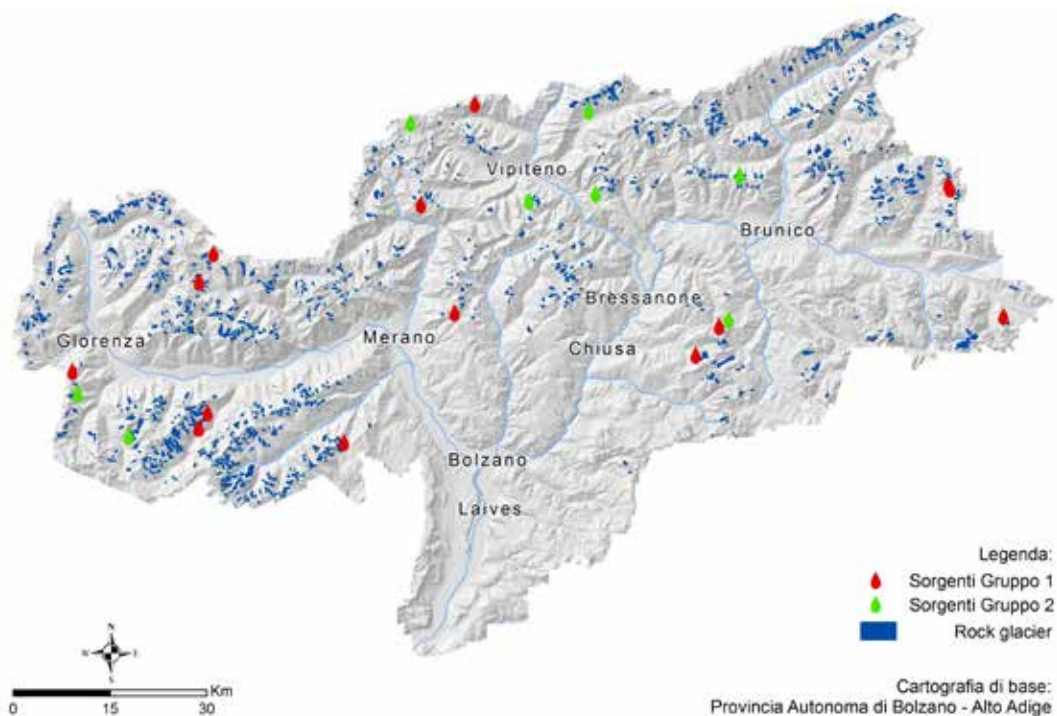


Fig. 5.5 – Modello digitale del terreno dell'Alto Adige con i rock glacier e con le sorgenti d'acqua potabile di alta montagna analizzate (Fonte dati catasto rock glacier: Bollmann et al., 2012).

Nel 2014, è stata eseguita una serie di analisi chimiche su sorgenti utilizzate per l'approvvigionamento pubblico di acqua potabile in Alto Adige. Questa attività era volta a verificare l'eventuale aumento della concentrazione di metalli pesanti nell'acqua, conseguente allo scioglimento del permafrost ovvero dei rock glacier. Sono stati prelevati 32 campioni di acqua in 22 zone di sorgenti, suddividendo le sorgenti in 2 gruppi: le sorgenti del gruppo 1 erano ubicate a una distanza inferiore a 100 m in linea d'aria da un rock glacier, quelle del gruppo 2 erano distanti fino a 500 m.

Le analisi, in molti casi, hanno evidenziato la presenza di metalli pesanti e di elementi in traccia con concentrazioni per lo più molto basse (meno di 10 µg/l). Per alcune sorgenti il contenuto di tali sostanze era leggermente diminuito rispetto alle analisi degli anni precedenti. Questa circostanza va probabilmente ricondotta all'effetto diluitivo delle frequenti precipitazioni dell'estate del 2014. Solo in alcune sorgenti è stato constatato un aumento del contenuto di nichel, zinco e alluminio.

Il valore più elevato di nichel, pari a 66 µg/l, è stato rilevato nella sorgente Lazaun, mentre per tutte le altre

sorgenti i valori erano pari o inferiori a 20 µg/l. Il valore più elevato riscontrato per lo zinco ammonta a 90 µg/l. In alcune sorgenti è stato rilevato un contenuto di alluminio relativamente alto, ma ancora al di sotto del valore limite di 200 µg/l stabilito per l'acqua potabile, ad eccezione della sorgente Lazaun (220 µg/l) già oggetto di molteplici analisi e i cui valori erano rimasti ancora elevati anche nel 2014. In questo anno ricco di precipitazioni non si può tuttavia escludere un aumento delle concentrazioni che tuttavia potrebbe essere compensato dall'effetto di diluizione delle acque meteoriche.

Al momento non v'è certezza che sussista una correlazione tra lo scioglimento del permafrost e l'aumento della concentrazione dei metalli pesanti o degli elementi in traccia nelle sorgenti di acqua potabile. La sorgente Lazaun, a causa dell'alta concentrazione di nichel e di alluminio, non viene più utilizzata per l'approvvigionamento di acqua potabile. Per tutte le altre sorgenti sono state programmate altre serie di analisi negli anni a venire, per poter rilevare eventuali impatti negativi.

Astrid Sapelza

Nell'ambito del pacchetto di lavoro 4 sono stati analizzati gli effetti dello scioglimento del permafrost e in particolare dei rock glacier sull'ecologia dei corsi d'acqua e dei laghi. A questo scopo, tra il 2012 ed il 2013 nelle aree interessate dal permafrost dell'Alto Adige e del Tirolo sono state eseguite delle analisi chimico-fisiche e biologiche su sorgenti, torrenti e laghi (Fig. 6.1).

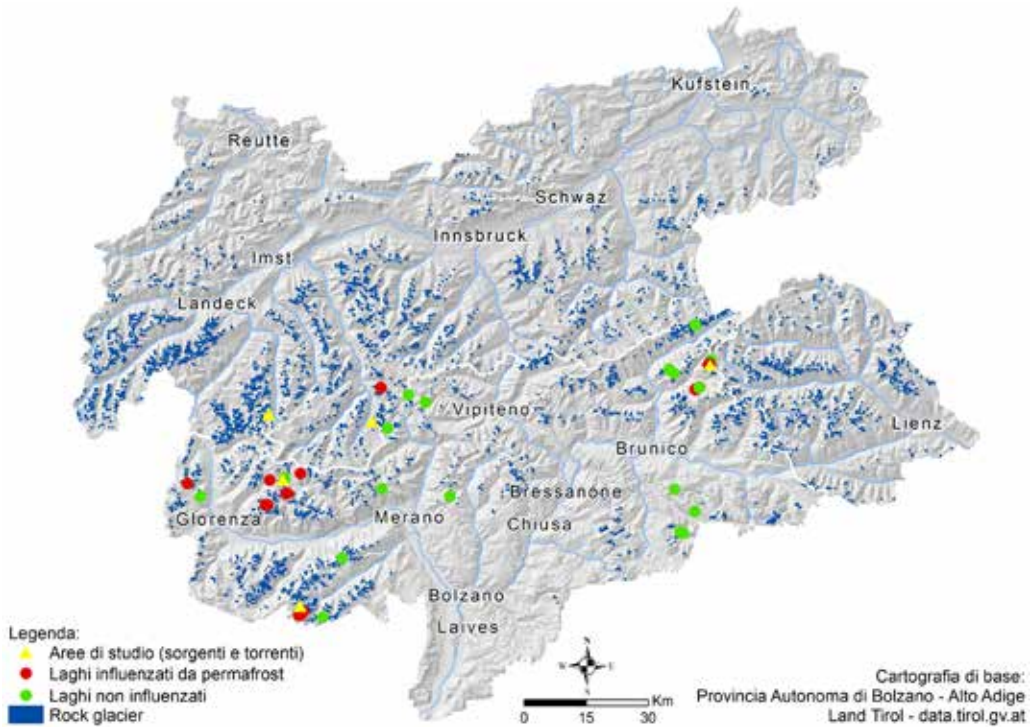


Fig. 6.1 – Aree di ricerca nell'Alto Adige e nel Tirolo (Fonte dati catasto dei rock glacier: Krainer & Ribis, 2012; Bollmann et al., 2012).

6.1 | Sorgenti e torrenti

Lo scopo dell'analisi era quello di determinare se la chimica e la comunità degli esseri viventi dei corsi d'acqua influenzati da rock glacier fosse diversa da quella di simili ruscelli non influenzati (cd. di riferimento).

Inoltre, si voleva accertare se determinati parametri chimici oppure il contenuto di metalli influenzassero la flora e la fauna delle acque superficiali e in qual modo.

Nelle cinque aree d'indagine Rossbänk (Val d'Ultimo), Lazaun (Val Senales), Napfen (Val di Riva), Hochebenkar (Ötztal, Tirolo) e Krummgampen (Kaunertal, Tirolo) sono stati eseguiti in primavera e in autunno campionamenti chimico-fisici e biologici su sorgenti e corsi d'acqua alimentati da rock glacier e su relativi ambienti di riferimento (Fig. 6.2, 6.3, 6.4). La temperatura, la conducibilità



Fig. 6.2 – Sorgente nei pressi della fronte del rock glacier (Napfen, Valle di Riva).



Fig. 6.3 – Torrente del rock glacier e nello sfondo il rock glacier Rossbänk (Val d'Ultimo).



Fig. 6.4 – Torrente di riferimento a Lazaun (Val Senales).

elettrica e il contenuto di ossigeno sono stati misurati sul posto, mentre il pH e la composizione chimica (principali ioni e nutrienti) sono stati determinati nel Laboratorio Biologico dell'Agenzia provinciale per l'Ambiente. L'analisi dei metalli è stata condotta a cura dell'Università di Innsbruck. Per la caratterizzazione biologica delle sorgenti e dei corsi d'acqua sono stati prelevati campioni di diatomee e di zoobentos.

Le diatomee sono alghe unicellulari presenti nell'acqua sulle pietre, sulle piante e sui sedimenti (Fig. 6.5) che possono essere facilmente prelevate utilizzando uno spazzolino (Fig. 6.6) per poi essere determinate al microscopio. Sulla base della composizione in specie riscontrata, si possono trarre conclusioni circa lo stato ecologico di un ambiente acquatico.

Lo zoobentos consiste in piccoli invertebrati che vivono sul fondo degli ambienti acquatici. A seconda della loro dimensione, si distinguono il macrozoobentos (> 1 mm), il meiozoobentos (0,063-1 mm) e il microzoobentos (< 0,063 mm). Nell'ambito di questo studio sono stati analizzati il macrozoobentos e il meiozoobentos. Rientrano nel gruppo del macrozoobentos (Fig. 6.7), tra altri, gli anellidi, i turbellari e le larve di insetti (ad es. plecoteri, efemeroteri, tricotteri, coleotteri). I nematodi, i crostacei e i rotiferi sono importanti rappresentanti del meiozoobentos.

Per il campionamento si smuove il fondo nell'alveo del corso d'acqua per poi catturare gli animali liberati con una rete a maglie fini (Fig. 6.8). La determinazione delle specie catturate viene poi eseguita al microscopio.

La composizione chimica dei corsi d'acqua alimentati da rock glacier si distingue significativamente da quella dei corsi d'acqua di riferimento: il contenuto di magnesio, calcio e solfato è molto più elevato nel primo gruppo rispetto al secondo (Fig. 6.9). Solo il corso d'acqua di riferimento in Val d'Ultimo ha concentrazioni paragonabili a quelle delle acque influenzate da rock glacier, il che fa supporre che anche esso sia in qualche modo comunicante con un rock glacier.

L'analisi del contenuto di metalli nell'acqua ha evidenziato in parte dei valori elevati per le acque influenzate da rock glacier. Così, le acque influenzate da rock glacier in Val d'Ultimo sono caratterizzate da un alto contenuto di alluminio, manganese e nichel e le acque influenzate in Val Senales da un alto contenuto di nichel. In Val Kauner (Tirolo), le acque influenzate hanno un contenuto molto elevato di alluminio, cobalto, manganese, nichel e zinco. A Riva di Tures non sono stati rilevati dati degni di nota. Tutte le acque di riferimento non presentano concentrazioni di metalli particolarmente alte (Tab. 6.1).

In base alle analisi condotte sulla fauna, si può affermare



Fig. 6.5 – Diatomee al microscopio.



Fig. 6.6 – Campionamento delle diatomee con uno spazzolino da denti.

che il numero di specie e di individui nelle acque influenzate da rock glacier è perlopiù inferiore rispetto alle acque di riferimento non influenzate. Questo vale sia per le diatomee che per lo zoobentos (Fig. 6.10).

Le larve di diversi chironomidi sono gli animali che si riscontrano più di frequente nelle acque di alta montagna. Nelle acque influenzate da rock glacier costituiscono circa il 90 % degli individui presenti. Nelle acque di riferimento, invece possono essere ben rappresentati anche altri gruppi di animali (Fig. 6.11).

L'analisi statistica dei punti di indagine in Alto Adige ha

revelato che la composizione in specie è simile in tutti i punti di riferimento ed è dovuta principalmente alla più alta temperatura dell'acqua. Le acque influenzate da rock glacier invece sono caratterizzate da comunità di specie individuali e diverse per ogni corso d'acqua, presumibilmente a causa delle diverse concentrazioni di metalli nell'acqua.

Birgit Lösch
Renate Alber
Danilo Tait



Fig. 6.7 – Macrozoobenthos.



Fig. 6.8 – Campionamento del macro- e mezzozoobenthos.

	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Sr	Zn
UL_BGO	802	< 5	4	< 5	5	3	259	15	29	8
UL_BGB	636	< 5	4	< 5	5	3	193	12	28	8
UL_REF	< 5	< 5	< 5	< 5	3	< 5	< 5	< 5	57	4
SCH_BGO	< 5	2	6	< 5	3	< 5	3	59	65	30
SCH_BGB	< 5	2	4	< 5	3	< 5	9	33	71	15
SCH_REF	7	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	10	4
RE_BGO	< 1	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	62	< 1
RE_BGB	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	62	< 1
RE_REF	4	< 5	< 5	< 5	3	3	< 5	< 5	23	4
HK_BGO	< 1	5,1	< 1	< 2	< 1	< 1	< 1	7,3	141,7	2,7
KG_BGO	4736	13	50	< 2	13	< 1	438	246	63	181
KG_BGB	4668	17	56	< 2	13	1	491	333	71	189
KG_REF	93	2	< 1	< 2	< 1	78	3	1	4	2
Lago Maler	< 1	4	< 1	< 2	< 1	5	11	9	45	4
Affluente lago Maler	3025	13	13	< 2	2	1954	83	45	16	36
Laghi della Fame	1896	1	41	< 1	< 1	< 1	293	133	49	34
Lago di Collecchio	< 1	28	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	276	< 1
Lago Upia	< 1	< 1	2	< 2	1	< 1	2	20	37	3
Wannenkarsee	117	6	14	< 2	2	15	50	64	43	39
Lago Nero (Ultimo)	< 1	17	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	137	< 1

Tab. 6.1 – Contenuto di metalli (µg/l) nelle acque delle sorgenti di rock glacier, dei torrenti di rock glacier, dei torrenti di riferimento e dei laghi investigati. I valori elevati sono evidenziati in arancione, i siti di riferimento in verde (BGO=sorgente del rock glacier, BGB=torrente del rock glacier, REF=torrente di riferimento, UL=Val d'Ultimo, SCH=Val Senales, RE=Valle di Riva).

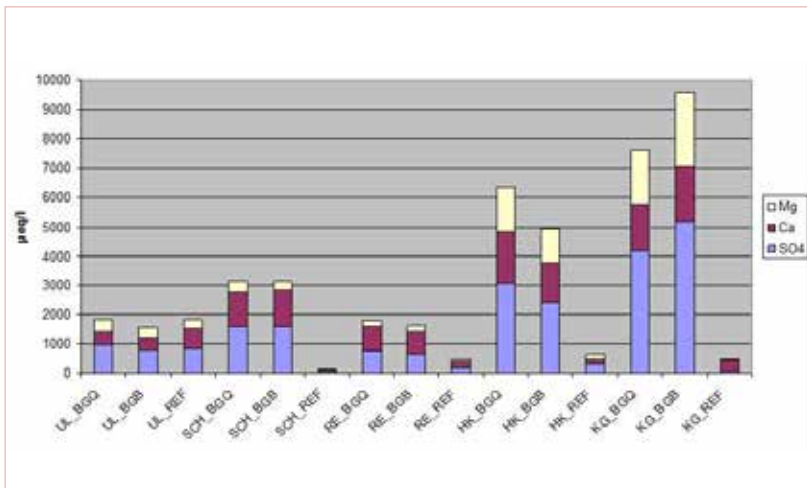


Fig. 6.9 – Alcuni parametri chimici dei vari siti di campionamento. Nei siti influenzati da rock glacier il magnesio (Mg), il calcio (Ca) e il solfato (SO₄) presentano valori più alti rispetto ai siti di riferimento non influenzati (tranne nell'area nella Val d'Ultimo, dove non era possibile trovare un corso d'acqua non influenzato da rock glacier). BGQ=sorgente del rock glacier, BGB=torrente del rock glacier, REF=torrente di riferimento, UL=Val d'Ultimo, SCH=Val Senales, RE=Valle di Riva, HK=Ötztal, KG=Kauertal.

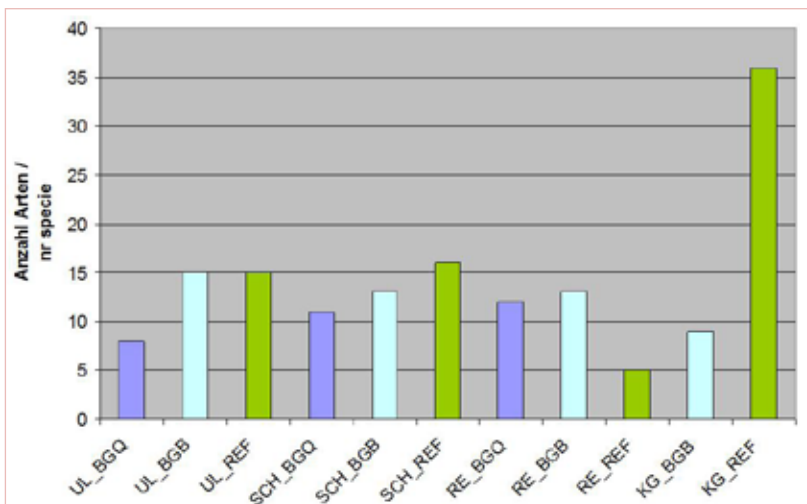


Fig. 6.10 – Numero di specie di diatomee nei vari siti di campionamento (BGQ=sorgente del rock glacier, BGB=torrente del rock glacier, REF=torrente di riferimento, UL=Val d'Ultimo, SCH=Val Senales, RE=Valle di Riva, KG=Kauertal).

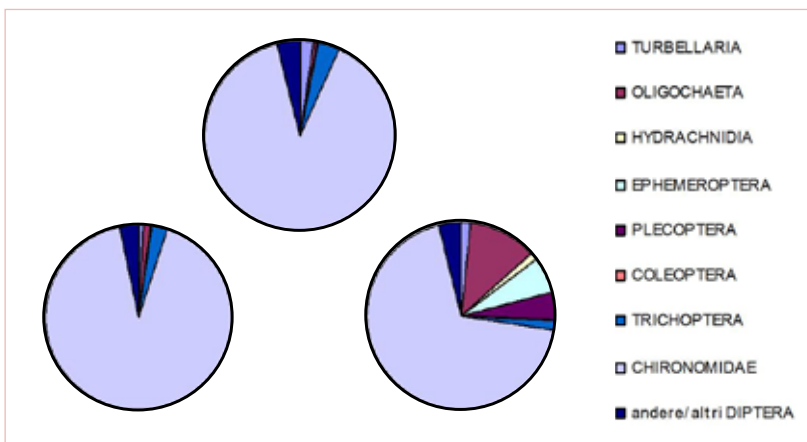


Fig. 6.11 – Percentuale dei vari gruppi faunistici del macrozoobenthos nelle sorgenti di rock glacier (in alto), nei torrenti di rock glacier (centro) e nei torrenti di riferimento (in basso).

6.2 | Laghi

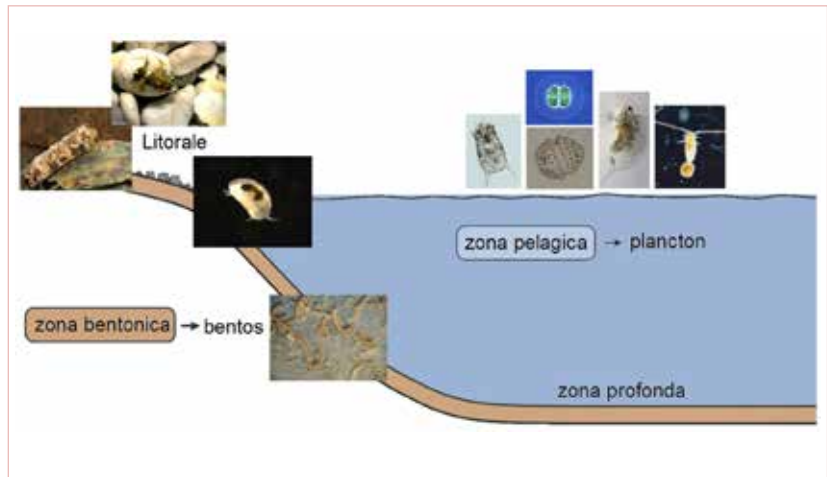
Per studiare l'impatto dell'acqua di scioglimento dei rock glacier sui laghi, sono stati considerati dati rilevati su un totale di 33 laghi di alta quota, di cui 15 erano in diverso modo influenzati da rock glacier. I campioni sono stati prelevati una volta per lago, verso la fine dell'estate o in autunno.

Cinque dei laghi influenzati da rock glacier, cioè il Lago Tasca, il Lago di Upia, il Lago di Collecchio, il Lago Wannenkär (Ötztal, Tirolo, Fig. 6.12) e il Lago Grande Maler, sono stati analizzati più approfonditamente, rilevando i principali parametri fisici e chimici nell'intera colonna d'acqua nonché le piante e gli animali dei principali habitat (Fig. 6.13).



Fig. 6.12 – Lago Wannenkär (2.639 m s.l.m., Windachtal) con un rock glacier nello sfondo.

Fig. 6.13 – Nei laghi si distinguono due ambienti principali: la zona delle acque aperte (zona pelagica) e la zona dei fondali o bentonica. La zona bentonica è composta dalla zona litorale vicino alle sponde e dalla zona delle acque profonde. Nella zona delle acque aperte sono presenti le specie galleggianti del plancton. Il fitoplancton è composto da alghe unicellulari e coloniali. Al zooplancton appartengono organismi unicellulari e pluricellulari. Quest'ultime comprendono soprattutto piccoli crostacei e rotiferi. Nella zona bentonica crescono diverse alghe (fitobenthos) e macrofite (muschi e piante vascolari). Tra gli animali della zona fondale (zoobenthos) vi sono organismi unicellulari e diversi gruppi di organismi pluricellulari.



Al zooplancton appartengono organismi unicellulari e pluricellulari. Quest'ultime comprendono soprattutto piccoli crostacei e rotiferi. Nella zona bentonica crescono diverse alghe (fitobenthos) e macrofite (muschi e piante vascolari). Tra gli animali della zona fondale (zoobenthos) vi sono organismi unicellulari e diversi gruppi di organismi pluricellulari.

Inoltre, è stato misurato il contenuto di metalli nell'acqua di lago (Tab. 6.1). Negli altri laghi è stata eseguita l'analisi dei principali ioni e dei nutrienti contenuti in campioni prelevati dalla superficie dell'acqua oltre al campionamento della fauna ripariale e dello zooplancton.

L'analisi delle componenti principali effettuata sulle concentrazioni chimiche dell'acqua lacustre ha suddiviso i laghi in esame in tre gruppi: un gruppo di laghi con un elevato contenuto di solfato, magnesio e calcio (laghi più o meno fortemente influenzati da rock glacier), un gruppo il cui bacino idrografico è caratterizzato da roccia dolomitica e l'ultimo gruppo il cui bacino idrografico è caratterizzato da rocce prevalentemente cristalline con basso contenuto di solfato, magnesio e calcio (Fig. 6.14).

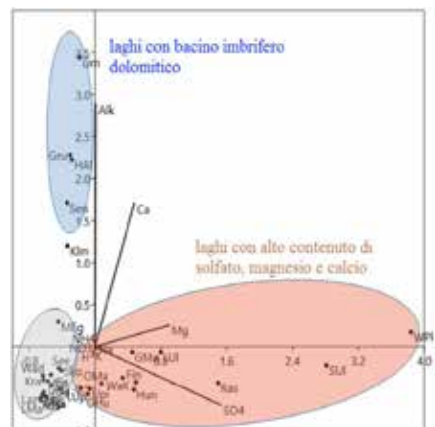


Fig. 6.14 – Analisi degli elementi principali della composizione chimica nei laghi indagati.

La composizione chimica dell'acqua dei laghi di alta montagna è principalmente determinata dalla geologia del relativo bacino idrografico nonché dalla composizione chimica delle acque meteoriche. Normalmente, la composizione degli ioni principali non varia anche per lunghi periodi di tempo (Fig. 6.15, a sinistra). Nei laghi di alta montagna influenzati dallo scioglimento dei rock glacier la composizione chimica dell'acqua invece può subire variazioni significative e improvvise (Fig. 6.15, a destra). L'entità di tali variazioni nella chimica dell'acqua lacustre dipende soprattutto dalla dimensione del rock glacier e dal tempo di ricambio dell'acqua del lago.

Un obiettivo importante dell'indagine era di determinare se i cambiamenti nella chimica dell'acqua influenzino la fauna e la flora e in che modo. A tal fine, è stato eseguito un campionamento di piante e animali presenti nelle diverse zone lacustri (Fig. 6.13). Nell'ambito di questo progetto è stata raccolta una grande quantità di dati biologici che documentano lo stato attuale dei laghi di alta quota del Tirolo e dell'Alto Adige potendo fungere così da base per ricerche future, soprattutto in tema di cambiamento climatico.

Poiché il campionamento biologico è stato effettuato una sola volta, i dati hanno una significatività statistica limitata e sarebbero consigliabili ulteriori ricerche, soprattutto con campionamenti nelle diverse stagioni. Ciononostante è stato possibile rilevare delle differenze tra i laghi influenzati e non influenzati da rock glacier. Mentre per la composizione del plancton sembra essere determinante soprattutto il pH ed il livello trofico, per quanto riguarda la composizione della fauna ripariale sono state rilevate delle differenze tra i laghi influenzati dai rock glacier e quelli che non lo sono.

Il macrozoobentos di laghi non influenzati presentava in media una maggiore diversità, soprattutto perché erano presenti anche specie più sensibili come gli efemerotteri e i tricoteri, del tutto assenti nei laghi influenzati. Inoltre, le specie erano distribuite in maniera più uniforme senza particolari valori di dominanza di una specie. In condizioni ambientali sfavorevoli, spesso dominano le poche specie che sono resistenti e caratterizzate da un'elevata capacità di adattamento. Oltre alla riduzione della biodiversità nei laghi influenzati da rock glacier, sono state rilevate delle differenze nella composizione delle comunità, caratterizzate soprattutto dalla predominanza di specie poco sensibili. Per quanto riguarda le larve di chironomidi che presentano la più grande varietà di specie e la più alta densità di individui nella fauna ripariale dei laghi di alta montagna, sono state individuate due specie caratteristiche. Il *Paratanytarsus austriacus* era predominante nella maggior parte dei laghi influenzati dai rock glacier con un pH

alcalino o solo lievemente acido. Questa specie preferisce un pH alcalino e una maggiore quantità di nutrienti e non sembra essere sensibile agli ambienti con una bassa concentrazione di ossigeno. È possibile che degli effetti indiretti dell'elevato contenuto di solfato e di altre sostanze provenienti dalle acque che defluiscono dai rock glacier apportino una discreta quantità di sostanze nutritive e producano un ambiente scarsamente ossigenato sul fondo lacustre. La seconda specie caratteristica per i laghi influenzati da rock glacier è la *Corynoneura arctica*; anche questa specie non è particolarmente sensibile, ma preferisce un ambiente con un pH acido. Presso tre dei laghi influenzati da rock glacier, che inoltre presentavano una concentrazione di nichel più elevata, la composizione dei gruppi di chironomidi era del tutto diversa rispetto agli altri laghi considerati.

Anche la composizione del meiobentos - sono stati rilevati solo crostacei - ha evidenziato delle differenze tra i laghi influenzati da rock glacier e quelli che non lo sono. Le due specie caratteristiche per i laghi influenzati, ovvero la *Cypria ophthalmica*, un ostracodo, e il *Chydorus sphaericus*, un cladocero, non sono specie sensibili e sopravvivono anche in condizioni ambientali estreme.

Lo scioglimento dei rock glacier ha prodotto delle alterazioni significative della chimica dell'acqua dei laghi di alta quota, che in parte impattano anche gli esseri viventi in questi habitat. Anche nei laghi con presenza di rock glacier nel bacino idrografico, ma situati a quota più bassa si sono verificate delle alterazioni della chimica dell'acqua - benché di entità inferiore. La concentrazione di solfato nel Lago di San Valentino alla Muta e nel Lago di Anterselva è infatti lievemente aumentata negli ultimi 10 anni. Nel Lago di Vernago, oltre al solfato, è aumentata anche la concentrazione di nichel. È necessario monitorare gli ulteriori sviluppi.

Bertha Thaler
Danilo Tait

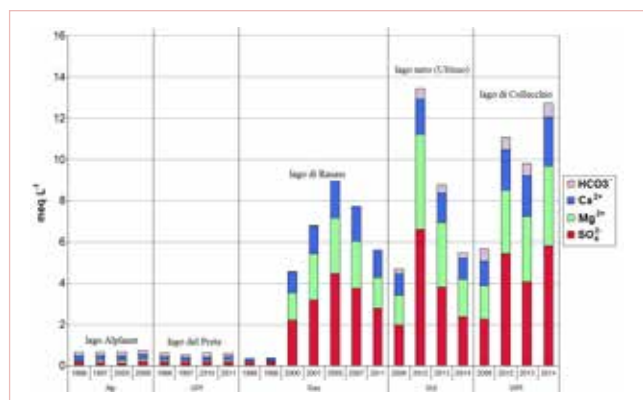


Fig. 6.15 - Sviluppo della composizione degli ioni principali a lungo termine nei laghi influenzati da rock glacier (lago Rasass, lago Nero e lago di Collecchio) e nei laghi non influenzati (lago Alplaner e lago del Prete).

Sono definiti archivi ambientali i depositi di materiale che possono essere datati permettendo così una ricostruzione delle condizioni ambientali in determinati periodi del passato. I sedimenti lacustri e i depositi di torba, ad esempio, sono archivi ambientali ad alta risoluzione che ci forniscono informazioni molto dettagliate sulle condizioni climatiche nel periodo della loro formazione. I rock glacier attivi ci forniscono informazioni sulle condizioni del permafrost.

7.1 | Rock glacier

I rock glacier attivi contengono nel loro interno un volume di ghiaccio talmente elevato da provocarne una lenta discesa a valle. Possono essere composti da lenti di ghiaccio e materiale sciolto o possono essere formati da un corpo di puro ghiaccio. Tutte le sostanze contenute in forma particolata o dissolta possono rivelare informazioni sulla storia, l'età o la formazione del ghiacciaio del rispettivo rock glacier. Per questa ragione, nell'estate



Fig. 7.1 – Ubicazione dei sondaggi presso il rock glacier Lazaun.

2010 sono state estratte due carote di sondaggio dalla lingua del rock glacier Lazaun (Fig. 7.1 e 7.2) (Kraimer et al. 2015) ed è stata analizzata la composizione chimica nonché l'età degli strati delle due carote, lunghe rispettivamente 32 m e 40 m.

I piccoli residui di piante contenuti nel ghiaccio sono stati analizzati con la tecnica di datazione al radiocarbonio, rivelando che lo strato di ghiaccio superiore ha un'età pari a circa 2.200



Fig. 7.2 – Nell'estate 2010 sono stati eseguiti due sondaggi a carotaggio continuo nel rock glacier Lazaun.

anni, mentre la base del corpo di ghiaccio, a 25 metri di profondità, risale a 10.300 anni fa. Sulla base di questi dati si deduce che la formazione del rock glacier Lazaun risale all'Olocene e il suo ammasso di ghiaccio ha probabilmente resistito anche a dei periodi caldi. Nel ghiaccio del rock glacier sono state rilevate sostanze disciolte, con diversi gradi di concentrazione, in parte anche molto elevati (Fig. 7.3). Le componenti ioniche erano distribuite in tutto il nucleo di ghiaccio e i valori più alti sono stati rilevati nella parte inferiore del nucleo, ad una profondità di circa 18 m. I metalli pesanti erano presenti in concentrazioni molto elevate solo fino a una profondità di 13 m, ovvero in strati con un'età inferiore a 4.000 anni.

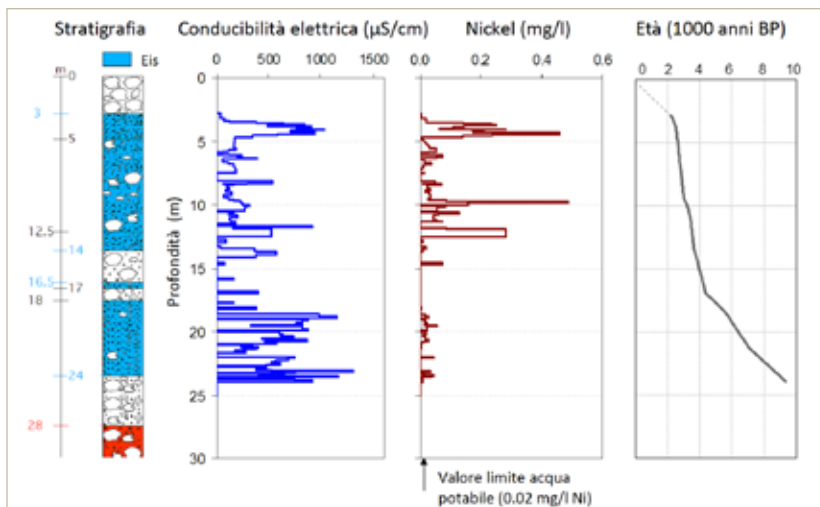


Fig. 7.3 – Questo grafico indica la conducibilità elettrica, il contenuto di Nickel e l'età delle rispettive profondità della carota di ghiaccio Lazaun I.

Ulrike Nickus
Hansjörg Thies



Fig. 7.4 – Sonda perforatrice presso la torbiera di Lazaun, a poca distanza dal rock glacier.

24

Nell'ottobre 2011, nella zona centrale della palude di Lazaun, a una distanza di circa 600 m dal fronte del rock glacier Lazaun, è stato eseguito un carotaggio volto a prelevare una carota dai depositi sedimentari e di torba della palude di Lazaun. La carota di sondaggio estratta ha un diametro di 100 mm ed è stata sottoposta ad analisi sedimentarie e geochimiche. Su 4 provini di torba è già stata eseguita la datazione assoluta (al radiocarbonio) e al momento è in corso l'analisi dello spettro dei pollini della carota prelevata. I dati ottenuti dall'analisi di questa carota vengono confrontati con quelli relativi alla carota estratta dal rock glacier Lazaun. In particolare lo spettro dei pollini fornirà informazioni più chiare sulle condizioni climatiche nel periodo in cui i sedimenti e la torba si sono depositati. Inoltre, si dovrebbe verificare la presenza, nei sedimenti o nella torba, di accumuli di metalli analogamente a quanto è avvenuto per la carota estratta dal rock glacier.

Fino a una profondità di 7,6 m, la carota è composta da sedimenti da limosi a sabbiosi fini con intercalazioni di strati torbosi e sedimenti di ghiaino. In singoli strati sono stati reperiti dei resti vegetali (resti di legno). Fino a una profondità di 4 m, gli strati torbosi sono frequenti, mentre oltre tale profondità sono relativamente rari. Questi sedimenti giacciono su una morena di fondo compatta. Dalla datazione radiometrica al C¹⁴, è risultato che a una profondità di 8 m, il sedimento si è depositato circa 11.000 anni fa. Da questo dato si evince che la morena di fondo risale allo stadio „Egesen“ (il punto culminante dello stadio di glaciazione „Egesen“ risale a circa 12.500 anni fa). I sedimenti e gli strati di torba che giacciono sopra alla morena di fondo hanno dunque la stessa età del nucleo di ghiaccio del rock glacier, ovvero ambedue risalgono all'Olocene.

Mediante una spettrometria XRF (fluorescenza a raggi X) sono stati analizzati complessivamente 66 campioni per determinare gli elementi principali (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅) e i microelementi (tra cui As, Co, Cr, Cu, Ni,

Pb, Zn). L'analisi era volta a scoprire se anche nei sedimenti e negli strati torbosi della palude di Lazaun si siano accumulati determinati microelementi (ad esempio il nichel) come quelli riscontrati nella carota estratta dal rock glacier. Questo dato è stato effettivamente confermato, perché a una profondità di 133 cm è stata rilevata una concentrazione elevata di nichel. Il materiale del campione in questione risale a circa 3.400 anni fa. Anche in un campione di ghiaccio contenuto nella carota estratta dal rock glacier e risalente allo stesso periodo è stata rilevata un'elevata concentrazione di nichel.

In singoli campioni è stata anche misurata un'elevata concentrazione di Cobalto (157 ppm), Cromo (293 ppm), Rame (128 ppm) e Zinco (192 ppm).

Sondaggio torbiera di Lazaun

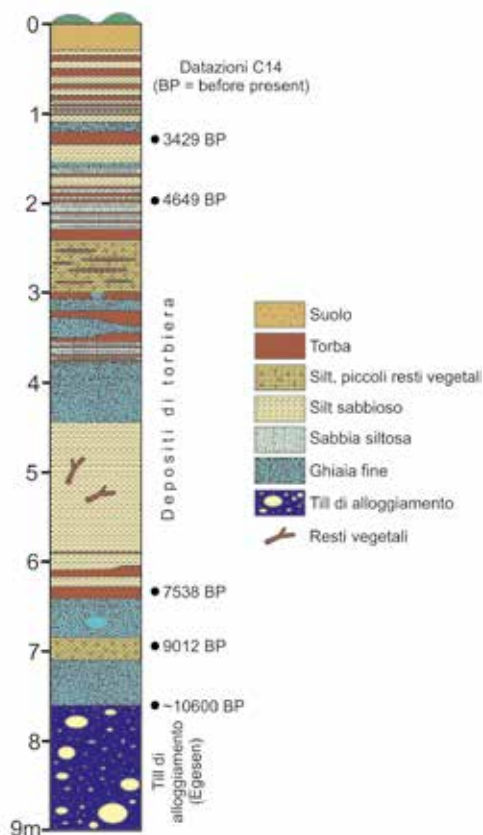


Fig. 7.5 – Stratigrafia del sondaggio eseguito nella torbiera di Lazaun con le rispettive età.

Lo spettro di minerali pesanti nei sedimenti della carota, come era prevedibile, è tipico per le rocce del bacino idrografico (paragneiss e micascisti) e si compone di granato (circa il 60 %), staurolite (20 %), tormalina (8 %), apatite (4 %), cianite (3 %), zircone e rutilo.

I sedimenti della palude di Lazaun non sono tipici sedimenti lacustri (argille stratificate), bensì sono sedimentazioni limose e soprattutto sabbiose e ghiaiose. I sedimenti di limo probabilmente rappresentano depositi di acque ferme che si sono formati in paludi poco profonde. Gli strati sabbiosi e ghiaiosi costituiscono singoli eventi deposizionali conseguenti a precipitazioni intense.

Soprattutto gli strati ghiaiosi costituiscono sedimenti distali di colate detritiche che si sono estese su ampie superfici della palude di Lazaun, coprendole integralmente. Gli orizzonti di torba, tuttavia, ci rappresentano dei periodi di tempo più lunghi in cui le condizioni climatiche erano più favorevoli (probabilmente più calde e un po' più secche), con intensa formazione di strati

di torba, vista la presenza della relativa vegetazione.

Mathias Hirsperger, Karl Krainer



Fig. 7.6 – Carota tra 14 e 16 m di profondità: si tratta di till di alloggiamento della morena di fondo.

25

7.3 | Sedimenti lacustri

Gli eventi fisici, chimici e biologici che si susseguono con l'alternarsi delle stagioni, lasciano resti e tracce nei laghi, che giorno dopo giorno vanno a fondo nell'acqua e formano lentamente gli strati di sedimento lacustri. Per questo motivo, lo studio dei sedimenti lacustri - o paleolimnologia - rappresenta l'accesso all'archivio storico custodito sui fondali dei laghi. L'obiettivo principale della paleolimnologia è la ricostruzione dello sviluppo dei laghi in relazione ai cambiamenti locali e globali durante gli ultimi secoli o addirittura millenni. Le conoscenze acquisite sullo sviluppo ecologico a lungo termine dei laghi possono essere sfruttate per la previsione degli sviluppi futuri di questi specchi d'acqua. Questo è particolarmente importante per i numerosi laghi, dove l'influenza dell'uomo è iniziata precedentemente agli studi delle condizioni ecologiche, che in generale sono iniziate solo due o tre decenni fa. I laghi di alta montagna sono un oggetto di studio ideale per l'analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle acque interne, perché in alta montagna l'influenza umana diretta è esigua. Tuttavia, anche le conoscenze sullo sviluppo ecologico dei laghi di alta montagna spesso sono carenti, soprattutto per difficoltà logistiche e per le condizioni climatiche estreme. Recenti studi hanno dimostrato che anche i laghi di alta montagna sono impattati dall'inquinamento atmosferico e che sono molto sensibili agli effetti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici (ad es. il riscaldamento globale, lo scioglimento dei ghiacciai e del permafrost).

Le analisi dei sedimenti lacustri nell'ambito del progetto permaqua sono state condotte con i seguenti obiettivi: a) documentare lo sviluppo ecologico dei laghi nelle aree caratterizzate

dalla presenza di permafrost dalla fine della piccola era glaciale (tra il 1850 e il 1900); b) analizzare gli effetti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici sulle comunità biologiche nei laghi di alta montagna in aree caratterizzate dalla presenza di permafrost; c) confrontare i sedimenti lacustri con carote verticali estratte da rock glacier e da sedimenti di torbiera. Nell'autunno 2012 e 2013 sono stati eseguiti carotaggi di sedimenti in cinque laghi di alta montagna in Alto Adige e in Tirolo.

La maggior parte dei laghi si trova lungo lo spartiacque alpino a una quota di 2.500–2.700 m (Tab. 7.1). Tutte le carote sono state

Lago	Valle	Altitudine [m s.l.m.]	Data campionamento	Lunghezza carota [cm]
Lago della fame	Val Senales (AA)	2700	06/09/2012	18
Lago di Collecchio	Val d'Ultimo (AA)	2483	11/09/2012	26
Lago Maler	Valle di Rein (AA)	2501	22/10/2012	60
Wannenkarsee	Windachtal (T)	2636	22/08/2013	13
Lago Upia	Val Mazia (AA)	2552	04/09/2013	4,5

Tab. 7.1 – Elenco dei laghi studiati con indicazione della data di campionamento e della lunghezza delle carote di sedimenti.

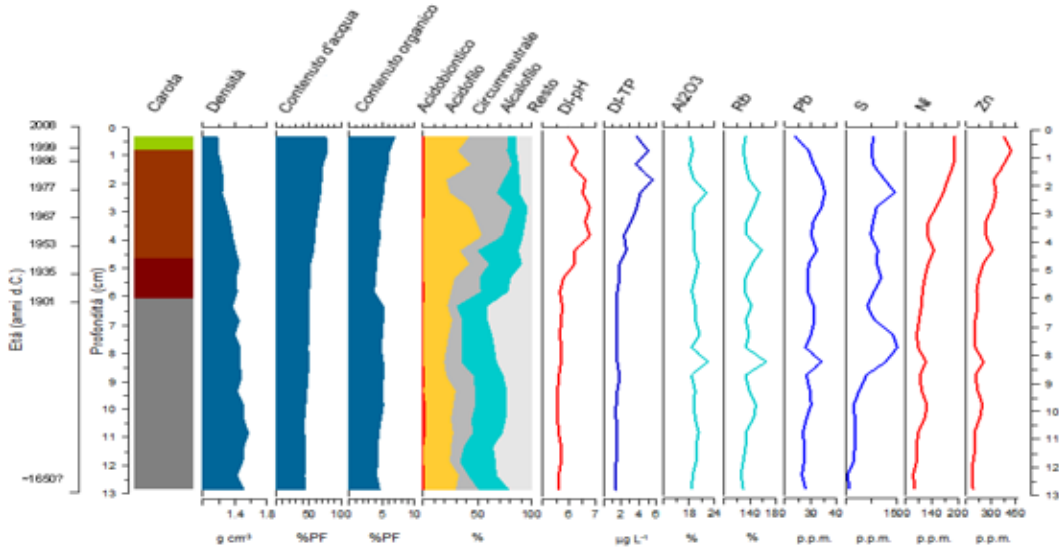


Fig. 7.7 – Profili di alcuni indicatori geochimici e delle preferenze delle diatomee per il pH, relativi alla carota di sedimento dal lago Wannenkari (Tirolo). Carota = aspetto e consistenza del sedimento, verde = strato acquoso con muschi acquatici e tubi di Chironomidi, marrone = gel bruno da morbido a compatto con resti di muschi in progressiva diminuzione, grigio = sedimento progressivamente compatto e minerale, FG = peso fresco, TG = peso secco, Acidobiontico = presente solo in acque con pH<7, Acidofilo = prevalentemente presente in acque leggermente acide, Circumneutrale = principalmente presente a pH 7, Alcalofilo = prevalentemente presente in acque leggermente basiche, Resto = nessuna preferenza per il pH dell’acqua, DI-pH a DI-TP = valori di pH e, rispettivamente, concentrazioni di fosforo totale dell’acqua del lago ricostruiti attraverso le diatomee sub-fossili.

sottoposte a datazione radiometrica con isotopi radioattivi ²¹⁰Pb e ¹³⁷Cs e sono state analizzate per diversi indicatori (Tab. 7.2). L’analisi dei sedimenti ha fornito una panoramica dello sviluppo ecologico i sedimenti hanno evidenziato negli ultimi secoli e millenni. I sedimenti hanno evidenziato una netta variazione stratigrafica (diminuzione della densità dei sedimenti, aumento del contenuto organico e alterazione della composizione e dell’abbondanza delle specie di diatomee) che segna il periodo di transizione tra il culmine della piccola era glaciale (circa 1850) e lo scioglimento dei ghiacciai all’inizio del 20. secolo (Fig. 7.7).

I cambiamenti conseguenti al boom economico degli anni ‘60-’70, che solitamente sono chiaramente individuabili nei laghi a quote più basse, non sono rilevabili nell’area di indagine grazie all’esiguo influsso antropogenico. Gli indicatori dell’inquinamento atmosferico (per es. il piombo e lo zolfo) sono aumentati durante gli ultimi 2 secoli, ma sono in progressiva diminuzione dall’introduzione della benzina senza piombo e dai catalizzatori a metà degli anni 70. Le concentrazioni di metalli pesanti (ad es. nichel, zinco, cobalto, rame, arsenico) mostrano un aumento negli ultimi 200 anni in tutti i laghi oggetto di indagine e raggiungono un picco tra gli anni ‘90 e i primi anni del 21. secolo.

L’andamento dei valori del pH dell’acqua lacustre, ricostruito attraverso le diatomee subfossili, evidenzia una diminuzione

recente solo nel Wannenkarsee (Tirolo), meno tamponato; ciò, forse, è correlato con lo scioglimento del permafrost. Negli altri laghi oggetto di indagine gli effetti sulle diatomee bentoniche sono difficilmente rilevabili.

Monica Tolotti

Indicatore	Informazione
Aspetto e consistenza	Cambiamenti all’interno del bacino imbrifero del lago
Radionuclidi (²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs, ²²⁶ Ra, ²⁴¹ Am)	Datazione
Tasso di sedimentazione	Accumulo del sedimento sul fondale del lago
Densità	Modificazioni idrologiche
Contenuto d’acqua e di materiale organico	Evoluzione chimica e trofica del lago
Elementi in traccia e metalli pesanti	Contaminazione atmosferica e effetti del cambiamento climatico sul permafrost
Diatomee (composizione specifica, preferenze ecologiche e abbondanza)	Cambiamenti ambientali in epoca storica
	Ricostruzione del pH dell’acqua del lago (scioglimento del permafrost) Ricostruzione del contenuto di fosforo totale come indicatore di trofia del lago
Cisti di Chrysophyceae	Livello trofico del lago

Tab. 7.2 – Indicatori geochimici e biologici determinati nelle carote di sedimento dei laghi studiati.

Il monitoraggio degli ultimi anni ha dimostrato che l'incidenza di rischi naturali che hanno origine in regioni caratterizzate dalla presenza di permafrost è aumentata. Generalmente, si tratta di fenomeni naturali costituenti una conseguenza secondaria di processi correlati al permafrost, come per esempio cadute di massi, frane di scivolamento o



Fig. 8.1 – Dal fronte di questo rock glacier nell'alta Valle di Solda si è generata una colata di detrito a causa di una combinazione di alte temperature e forti piogge. Il materiale mobilizzato ha raggiunto il volume di alcune centinaia di metri cubi. (Ripartizione Opere idrauliche, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige).



Fig. 8.2 – Situazione simile in Val Senales: in seguito ad un forte temporale il fronte del rock glacier nella Similaungrube si è mobilizzato, generando una colata di detrito. (Ripartizione Opere idrauliche, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige).



Fig. 8.3 – Le conseguenze delle colate di detrito sono visibili soprattutto nel fondovalle. (Ripartizione Opere idrauliche, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige).



Fig. 8.4 – Il 18 settembre 2004 si sono staccati 1 Mio di metri cubi di roccia dalla cima Thurwieser generando una rock avalanche.



Fig. 8.5 – Classico esempio di una frana in alta montagna (Krummgampental, Tirolo).

colate detritiche (debris flow). Gli effetti del riscaldamento globale e delle precipitazioni estive, come i pioviaschi o i periodi prolungati di pioggia, portano a una forte mobilitazione del materiale sciolto in ambienti di permafrost. Le aree in cui sono presenti dei rock glacier o delle falde detritiche sono particolarmente soggette proclivi a fenomeni di questo genere. Alcuni eventi in Alto Adige avvenuti nel 2013 e nel 2014 e ben documentati hanno dimostrato che soprattutto la combinazione di eventi di precipitazioni intense e alte temperature atmosferiche causano fenomeni naturali straordinari. Gli eventi sono stati suddivisi in più categorie in base ai diversi scenari di partenza:

a) In due casi (Solda e Senales), dal fronte di un rock glacier attivo si staccarono grandi quantità di detrito e rocce che hanno poi assunto un ruolo determinante nello scatenamento di colate o smottamenti di materiale detritico e fango (o debris flow).

b) In altri due casi (Trafoi e Sella), la causa è stata la rottura di una grande falda acquifera sotterranea che a Trafoi ha causato una grande frana. La rottura ha avuto luogo diverse ore dopo un pioviasco.

c) La caduta di massi dai rock glacier per fortuna non ha riguardato nessuna zona abitata, tuttavia ha colpito numerosi sentieri di montagna, strade ferrate e vie di accesso a baite in quasi tutte le zone di alta montagna del Tirolo. Questi sentieri e vie sono stati chiusi svariate volte in seguito a periodi prolungati di frequente caduta massi (Solda, Val Martello, Valle Aurina, Sella).

L'analisi di questi eventi indica, che i fattori scatenanti per il verificarsi di tali fenomeni in alta montagna, siano la combinazione di temperature elevate con degli eventi di forti precipitazioni. Probabilmente, questa circostanza è da ricondurre all'ottima conduttività termica dell'acqua, poiché il „calore“ penetra nel suolo solo grazie alle precipitazioni. In Alto Adige, si è iniziato a monitorare la temperatura della roccia solo da pochi anni, per cui gli effetti concreti del riscaldamento globale sugli ammassi rocciosi non possono essere confermati con certezza (cfr. Capitolo 3). Mentre la caduta massi e le frane in seguito alle variazioni della temperatura di una zona attiva possono essere spiegate e comprese con facilità, i fenomeni di movimenti di massa nelle crepe e nelle fratture all'interno dell'ammasso roccioso restano tuttora inspiegati. Lo spessore della zona attiva presumibilmente aumenta con l'incremento delle temperature a causa del riscaldamento globale. Di conseguenza, è molto probabile un futuro aumento degli eventi di caduta massi e delle frane.

*Volkmar Mair
Karl Krainer
Kathrin Lang
David Tonidandel*

I partecipanti al progetto sono coscienti che gli studi svolti nell'ambito del progetto permaqua possono dare solo alcune risposte riguardo alle diverse problematiche legate al permafrost alpino e al suo significato per l'ambiente e per la minaccia che deriva in ambito montuoso dallo scioglimento del permafrost. In ogni caso sono state definite importanti problematiche e si è pensato a prime soluzioni.

Il riassunto che segue da un quadro dei principali risultati:

- Sulla base delle datazioni eseguite sulle carote di ghiaccio del rock glacier di Lazaun in Val Senales (Alto Adige) si ricava che l'età del ghiaccio alla base del rock glacier, ad una profondità di 25 m, è di 10.300 anni. Ciò corrisponde all'incirca alla fine dell'ultimo periodo freddo (Dryas recente) o anche alla fine del Paleolitico. Ne deriva che questo rock glacier si è formato direttamente dopo il ritiro del ghiacciaio dell'Egesen (Egesen = ultima successione di avanzate glaciali del Tardoglaciale). Da allora il ghiaccio si è conservato grazie alla protezione dello strato sovrastante di detrito.
- L'evoluzione dei rock glacier dopo la Piccola Età Glaciale (con massimo nel 1850) mostra che, già dopo 150 anni, si sono sviluppati dalla fronte delle morene laterali e frontali di questa avanzata glaciale ampi rock glacier. Ciò significa che il tempo di formazione dei rock glacier è solamente di alcune centinaia di anni.
- I sedimenti lacustri e palustri sono archivi ambientali molto dettagliati che ci consentono uno sguardo approfondito e preciso nella storia climatica al tempo del loro sviluppo. I dati provenienti dalle carote del sondaggio eseguito nella palude di Lazaun sono stati confrontati con quelli del rock glacier di Lazaun. La carota della palude ha fornito un'età di circa 11.000 anni a una profondità di 8 m. Di conseguenza la morena di fondo, presente al di sotto, va assegnata allo stadio Egesen. I sedimenti e i livelli torbosi al di sopra della morena presentano quindi la stessa età del nucleo di ghiaccio alla base del rock glacier. Nella carota di torba, a una profondità di 133 cm si è accertata un'elevata concentrazione di nichel. Il campione ha un'età di 3.400 anni. In un campione di ghiaccio con età simile, proveniente dalla carota del rock glacier, sono state misurate anche elevate concentrazioni di nichel.
- I tassi di movimento di alcuni dei rock glacier studiati hanno subito un'evidente accelerazione negli ultimi anni. Contemporaneamente essi si sono sgonfiati a causa del maggior scioglimento del ghiaccio: si sono formate strutture da collasso e si assiste allo svuotamento di laghi sotterranei.
- A causa dello scioglimento del ghiaccio le ripide scarpate laterali e frontali dei rock glacier diventano instabili e franano di frequente in occasione di precipitazioni: si formano crolli e debris flow. L'analisi di questi eventi ha mostrato che non solo le alte temperature sono responsabili del loro innesco ma in particolare la combinazione di alte temperature e precipitazioni favorisce la comparsa di questi fenomeni in alta montagna.
- Il pericolo idrogeologico, derivante dai rock glacier, deve essere definito caso per caso. L'affermazione generale, secondo la quale gli eventi di crolli e di debris flow aumentano con il procedere del riscaldamento del clima, non può essere condivisa, perché lo svilupparsi di questi eventi dipende in maniera preponderante dalla geomorfologia presente nelle immediate vicinanze del rock glacier. Così per esempio dal rock glacier al di sopra del Lago Lungo in Val d'Ultimo o da quello di Lazaun non deriva alcun pericolo in quanto essi sono in una zona piana. Altri rock glacier, come quello del Coston di Dentro a Solda o del Vallone del Similaun in Val Senales, si muovono su pendii ripidi e hanno già causato eventi documentati di crollo e debris flow.
- Non è ancora stato possibile confermare in modo incontrovertibile quali siano le conseguenze dirette del riscaldamento climatico sulle masse rocciose. Una prima analisi ha comunque dimostrato che esistono grandi oscillazioni di temperatura soprattutto tra la superficie rocciosa e una profondità di massimo 15 metri. Lo strato attivo si estende sui versanti nord fino a una profondità di circa 8 m, mentre su quelli sud raggiunge i 15 m. All'interno della massa rocciosa sono presenti costantemente temperature negative di circa $-2,6^{\circ}\text{C}$ ad un'altezza di 3.200 m (Croda delle Cornacchie) e $-2,8^{\circ}\text{C}$ ad un'altezza di 3.800 m (Ortles).
- A causa dello scioglimento del ghiaccio del permafrost nei sedimenti sciolti (rock glacier, detrito di versante) aumenta il volume dei pori del sedimento e di conseguenza anche la capacità d'immagazzinamento dell'acqua. Maggiore acqua può essere immagazzinata nei sedimenti, per cui i picchi di deflusso vengono ridotti mentre il deflusso aumenta leggermente nei periodi di scarse precipitazioni in autunno ed inverno.
- Molte sorgenti dei rock glacier sono caratterizzate da una marcata alta conducibilità elettrica (fino ad oltre $1.000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ in tardo autunno) così come da alte con-

- centrazioni di nichel e altri metalli.
- In particolare nei torrenti con pH acido le concentrazioni dei singoli elementi (quali nichel, manganese, zinco o alluminio) sono ben maggiori dei limiti consentiti dalla direttiva EU sulle acque. In torrenti non influenzati da rock glacier non si registra invece la presenza significativa di metalli pesanti: i valori sono dell'ordine o al disotto della soglia di rilevazione di pochi µg/L.
 - Il numero di specie e di individui nelle acque influenzate da rock glacier è inferiore rispetto alle acque di riferimento non influenzate. Questo vale sia per le diatomee che per lo zoobentos. Le larve di diversi chironomidi sono gli animali che si riscontrano più di frequente nelle acque di alta montagna. Nelle acque influenzate da rock glacier costituiscono circa il 90 % degli individui presenti.
 - In seguito all'analisi di alcuni laghi di alta montagna è stata individuata in media una maggiore diversità del macrozoobentos in laghi non influenzati da permafrost, soprattutto perché erano presenti anche delle specie più sensibili come gli efemerotteri e i tricotteri, del tutto assenti nei laghi influenzati da permafrost. Inoltre, le specie erano distribuite in maniera più uniforme senza particolari valori di dominanza di una specie. In condizioni ambientali sfavorevoli, spesso dominano le poche specie che sono resistenti e caratterizzate da un'elevata capacità di adattamento. Presso tre dei laghi influenzati da rock glacier, che inoltre presentavano una concentrazione di nichel più elevata, la composizione dei gruppi di

chironomidi era del tutto diversa rispetto agli altri laghi considerati.

- I laghi di alta montagna sono oggetti di studio ideali per l'analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle acque interne, perché in alta montagna l'influenza umana diretta è esigua. I sedimenti dei laghi oggetto di indagine hanno evidenziato una netta variazione stratigrafica (diminuzione della densità dei sedimenti, aumento del contenuto organico e alterazione della composizione e dell'abbondanza delle specie di diatomee) che segna il periodo di transizione tra il culmine della piccola era glaciale (circa 1850) e lo scioglimento dei ghiacciai all'inizio del 20° secolo. Le concentrazioni di metalli pesanti (ad es. nichel, zinco, cobalto, rame, arsenico) negli ultimi 200 anni sono in costante aumento in tutti i laghi oggetto di indagine e raggiungono un picco tra gli anni '90 e i primi anni del 21. secolo.

Nel progetto permaqua sono stati affrontati numerosi aspetti riguardanti gli effetti dello scioglimento del permafrost sul bilancio idrico e sull'ecologia delle acque di alta montagna. Ora è importante proseguire nella direzione intrapresa e mantenere le stazioni di monitoraggio esistenti per avere in futuro delle misure a lungo termine. Solo grazie a un set di dati continui sarà possibile documentare lo stato attuale e l'effettiva evoluzione del permafrost di alta montagna, nonché valutare gli effetti del riscaldamento globale e trarre delle conclusioni.

Volkmar Mair

Bollmann, E., Rieg, L., Spross, M., Sailer, R., Bucher, K., Maukisch, M., Monreal, M., Zischg, A., Mair, V., Lang, K. & Stötter, J. (2012) Blockgletscherkataster Südtirol – Erstellung und Analyse. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 147-171.

Gabrielli, P., Barbante, C., Carturan, L., Cozzi, G., Dalla Fontana, G., Dinale, R., Dragà, G., Gabrieli, J., Kehrwald, N., Mair, V., Mikhalenko, V.N., Piffer, G., Rinaldi, M., Sepi, R., Spolaor, A., Thompson, L.G. & Tonidandel, D. (2012) Discovery of cold ice in a new drilling site in the Eastern European Alps. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 35: 101-105.

Krainer, K. & Ribis, M. (2012) A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austria Journal of Earth Sciences* 105/2, 32-47.

Krainer, K. (2015) Der aktive Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar. *Forschung am Blockgletscher – Methoden und Ergebnisse*, Schallhart, N. & Erschbamer, B., *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 4*, innsbruck university press: 55-75.

Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. & Tonidandel, D. (2015) A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). *Quaternary Research* 83: 324-335.

Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremone, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L. (2011) PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis report. *INTERPRAEVENT Journal series 1*, Report 3.

Mair, V., Lang, K., Zischg, A. & Tonidandel, D. (2012) PROALP und die Erforschung des Permafrosts in Südtirol. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 9-14.

Nickus, U., Krainer, K., Thies, H. & Tolotti, M. (2015) Blockgletscherabflüsse am Äußeren Hochebenkar – Hydrologie, Wasserchemie und Kieselalgen. *Forschung am Blockgletscher – Methoden und Ergebnisse*, Schallhart, N. & Erschbamer, B., *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 4*, innsbruck university press: 117-134.

Reinthal, J. (2014) Permafrostforschung an der Grauwand (Schmalstal, Südtirol). Bachelorarbeit an der Universität Innsbruck.

Schneider, R., Schneider, H. (2001) Zur 60-jährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar (Ötztaler Alpen, Tirol). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 37: 1-33.

Sonnleitner, R., Redl, B. & Schinner, F. (2011) Microbial mobilization of major and trace elements from catchment rock samples of a high mountain lake in the European Alps. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 43: 465-473.

Thies, H., Nickus, U., Mair, V., Tessadri, R., Tait, D., Thaler, B. & Psenner, R. (2007) Unexpected response of high alpine lake waters to climate warming. *Environmental Science and Technology* 41: 7424-7429.

Thies, H., Nickus, U., Tolotti, M., Tessadri, R. & Krainer, K. (2013) Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. *Cold Regions Science and Technology* 96: 77-85.

Zischg, A., Mair, V., Tonidandel, D. & Lang, K. (2012) Berücksichtigung von Permafrost in der Gefahrenzonenplanung in Südtirol. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 173-187.

