



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

UNIVERSITÄT BERN | **Mobilis Lab**
OESCHGER CENTRE | **for Natural Risks**



sc | nat 

Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP

u^b

**UNIVERSITÄT
BERN**

OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH



1868 – L'alluvione che cambiò la Svizzera:

Cause, conseguenze e insegnamenti per il futuro



GEOGRAPHICA BERNENSIA

1868 – L'alluvione che cambiò la Svizzera:

Cause, conseguenze e insegnamenti per il futuro

Traduzione:

Martino Pedrazzi

Layout:

Alexander Hermann

Dati bibliografici:

Brönnimann, S., C. Rohr, P. Stucki, S. Summermatter, M. Bandhauer, Y. Barton, A. Fischer, P. Froidevaux, U. Germann, M. Grosjean, F. Hupfer, K. Ingold, F. Isotta, M. Keiler, O. Martius, M. Messmer, R. Mülchi, L. Panziera, L. Pfister, C. C. Raible, T. Reist, O. Rössler, V. Röthlisberger, S. Scherrer, R. Weingartner, M. Zappa, M. Zimmermann, A. P. Zischg (2018) 1868 – L'alluvione che cambiò la Svizzera: Cause, conseguenze e insegnamenti per il futuro. *Geographica Bernensia*, G94, 52 S., doi:10.4480/GB2018.G94.02

Traduzioni:

Tedesco (doi:10.4480/GB2018.G94.01)

Francese (doi:10.4480/GB2018.G94.03)

Inglese (doi:10.4480/GB2018.G94.04)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2018
Istituto di Geografia, Università di Berna, Svizzera



Stampato da: Publikation Digital AG

Prefazione

Questa pubblicazione nasce da un'idea del Centro Oeschger per la ricerca sul clima dell'Università di Berna e si inserisce in una lunga tradizione, a Berna, di ricerca sulle alluvioni che hanno segnato la storia e sul loro rapporto con il presente. Con il coinvolgimento di più gruppi di ricerca del Centro Oeschger e del Mobiliar-lab per i rischi naturali e grazie alla collaborazione di MeteoSvizzera, della ditta Meteotest e dell'Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio, l'idea si è concretizzata nel corso degli ultimi due anni in un vero e proprio progetto di ricerca.

La seguente ricerca si pone la domanda di quale sia la nostra conoscenza dei casi passati di precipitazioni intense, di alluvioni e delle loro conseguenze, al fine di poterne trarre insegnamenti per il futuro. Le interazioni tra ambiente e società assumono in questo senso un ruolo centrale nella ricerca. Per quel che concerne le scienze atmosferiche, il compito è quello di simulare nella maniera più dettagliata possibile le situazioni meteorologiche e gli eventi di precipitazioni intense per mezzo di un modello meteorologico. Le ricostruzioni di questi casi sono poi introdotte in un modello idrologico-idraulico affinché i fattori rilevanti che hanno causato la piena possano essere stimati correttamente. Le considerazioni storico-scientifiche raccolgono e valutano le informazioni sui danni e sulle ripercussioni di tali inondazioni sulla società. La ricerca specifica sui rischi contribuisce infine con una descrizione dell'attuale gestione delle alluvioni e ne chiarisce il rapporto con gli eventi storici. La fruttuosa collaborazione tra scienziati e scienziati appartenenti a discipline diverse è dunque alla base della realizzazione di questa pubblicazione interdisciplinare.

Lo sguardo esteso fino al XIX secolo permette un'analisi di molti even-

ti, conducendo a conclusioni più solide rispetto ad una semplice analisi degli ultimi trent'anni. Questo sguardo si rivolge inoltre a un periodo che ha influito sulla gestione odierna delle alluvioni in Svizzera. Le misure adottate allora sono efficaci ancora al giorno d'oggi. Allo stesso tempo, lo sguardo al XIX secolo è legato a un enigma scientifico: le alluvioni erano allora più frequenti rispetto alla gran parte del XX secolo. Come è possibile questo fenomeno e come possiamo spiegare le variazioni nella frequenza delle alluvioni? Uno degli obiettivi di questo progetto è quello di rispondere a tali quesiti.

Un avvenimento è messo in primo piano, vale a dire la catastrofica alluvione del 1868 – un evento che ha cambiato la Svizzera. In considerazione del fatto che nel settembre 2018 ricorre esattamente il 150° anniversario della grande alluvione, è stato deciso di far coincidere questa data con la pubblicazione del presente rapporto. Gli anniversari di avvenimenti estremi hanno contribuito storicamente alla prevenzione e alla gestione di tali disastri naturali. Questa pubblicazione si inserisce in una cultura del ricordo e della commemorazione, che però abbiamo scelto di affrontare in maniera diversa: con un approccio interdisciplinare, scientifico e quantitativo (per interessanti contributi fotografici alla memoria collettiva sulle alluvioni cfr. il sito del Mobiliar-lab per i rischi naturali dell'Università di Berna: www.ueberschwemmungsgedaechtnis.ch).

I contributi si fondano su numerosi progetti finanziati dal Fondo Nazionale Svizzero e dall'Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM).² La seguente pubblicazione è stata sostenuta dal Centro Oeschger per la ricerca climatica, dall'UFAM e dalla commissione di chimica e fisica dell'atmosfera dell'Accademia Svizzera di Scienze Naturali (SCNAT).



Fig. 1: L'alluvione del 1868 a Lustenau, nel Vorarlberg (Cfr. la carta¹ negli annessi). Si tratta di una fotografia tipica per quel che riguarda la rappresentazione delle alluvioni prima del 1900: a causa del lungo tempo di esposizione necessario per scattare una fotografia, le persone dovevano mettersi in posa come in uno studio di fotografia e restare immobili. La tecnologia allora a disposizione non permetteva la raffigurazione di flussi d'acqua. La drammaticità dell'evento è dunque sottolineata dalla presenza di imbarcazioni sulle strade. In realtà l'acqua non sarebbe stata abbastanza profonda per permettere la circolazione delle imbarcazioni. Come si può notare, l'acqua non arrivava nemmeno alle ginocchia dei bambini rappresentati nella fotografia. Il fotografo si trovava con il suo apparecchio chiaramente su un terreno asciutto (cfr. anche Fig. 5).

Indice

Introduzione	6
Stefan Brönnimann, Christian Rohr	
Situazioni meteorologiche alluvionali nella regione alpina	8
Peter Stucki, Moritz Bandhauer, Martina Messmer, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Olivia Martius	
Precipitazioni intense, flussi atmosferici e alluvioni in Svizzera	10
Olivia Martius, Regula Mülchi, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Peter Stucki	
Precipitazioni orografiche e convezione	12
Paul Froidevaux, Olivia Martius, Peter Stucki, Tom Reist, Luca Panziera	
Origine delle alluvioni – Predisposizione di base	14
Rolf Weingartner, Ole Rössler	
Origine delle alluvioni – Le condizioni variabili e l’inizio del processo	16
Rolf Weingartner, Ole Rössler, Peter Stucki	
Documenti sul 1868 e su altre alluvioni storiche	18
Christian Rohr	
Lunghe serie di misurazioni	20
Stefan Brönnimann, Peter Stucki, Rolf Weingartner, Francesco Isotta	
Dalle immagini radar all’allerta per le piene	22
Urs Germann, Olivia Martius, Yannick Barton, Massimiliano Zappa, Franziska Hupfer	
Ricostruzione meteorologica	24
Stefan Brönnimann, Moritz Bandhauer, Peter Stucki	
«Downscaling»: la ricostruzione del tempo meteorologico locale	26
Paul Froidevaux, Peter Stucki, Lucas Pfister	
Modellazione idrologica	28
Ole Rössler, Rolf Weingartner	
Ricostruzione di alluvioni storiche con modelli idrologici e idraulici	30
Andreas Zischg, Ole Rössler, Massimiliano Zappa	
Torrenti di montagna e alluvioni: ricerca di tracce sul territorio	32
Markus Zimmermann, Margreth Keiler	
I danni alluvionali	34
Veronika Röthlisberger, Andreas Zischg, Margreth Keiler, Moritz Bandhauer, Stephanie Summermatter, Peter Stucki	
Le conseguenze per la società: gestione della crisi e prevenzione	36
Andreas Zischg, Stephanie Summermatter, Veronika Röthlisberger	
L’evoluzione della protezione svizzera contro le alluvioni	38
Christian Rohr, Stephanie Summermatter, Karin Ingold	
Dinamica a lungo termine: i sedimenti lacustri come archivi delle alluvioni	40
Martin Grosjean	
Precipitazioni intense e alluvioni dall’inizio delle misurazioni	42
Stefan Brönnimann, Christoph Raible, Simon C. Scherrer	
Le alluvioni alla fine del XXI secolo	44
Stefan Brönnimann, Ole Rössler, Martina Messmer, Christoph Raible, Andreas Fischer	
Conclusione	46
Stefan Brönnimann	
Annotazioni	47
Foto credito	51

Introduzione

Quando un caro membro della famiglia muore, i parenti si occupano di onorarne la memoria. (...) La catastrofe del 1868, che ha causato un eccezionale numero di vittime e ha recato ingenti danni a beni e averi, lascia dietro di sé l'impronta di una tomba. Attorno ad essa si sono raccolte migliaia e migliaia di vittime. Il fine di queste pagine è quello di piantare un nontiscordardimé su questa tomba, dedicato a questa generazione e alla commemorazione, ai posteri e alla ricostruzione. (Kaiser und Killias, 1870)³

Questa prefazione a uno scritto sulle alluvioni del 1868 testimonia la sofferenza di coloro che ne furono colpiti, ma rivolge lo sguardo anche verso il futuro. Oggi, 150 anni dopo, possiamo nuovamente voltarci verso il passato, ricostruire gli avvenimenti e rivalutarli. Possiamo domandarci come la natura, il paesaggio e la società siano cambiati da allora e quali insegnamenti possiamo trarre per le alluvioni di oggi. Gli autori del preambolo citato sopra, non potevano ancora sapere che quell'alluvione avrebbe cambiato la Svizzera fino al XXI secolo.⁴ Mentre le tracce lasciate dall'inondazione sono oramai scomparse, il cambio di mentalità e le misure prese a seguito dell'avvenimento determinano ancora oggi il paesaggio della Svizzera – foreste, corsi d'acqua e insediamenti umani. L'alluvione si è dimostrato una forza in grado di modellare il paesaggio, ma anche la società. E non si tratta del solo caso di questo tipo. Gli avvenimenti del 1978, 1987, 1999 e 2005 portarono a loro volta a un cambiamento di mentalità per quel che riguarda la protezione contro le piene e le alluvioni – anche in questo caso con importanti ripercussioni per il paesaggio.

Anche gli avvenimenti odierni e futuri e la relativa reazione della società determineranno il paesaggio. La piena del 1868 è in questo senso non solamente un esempio d'alluvione che ci aiuta nella comprensione dei processi atmosferici e a progredire nel calcolo dei deflussi, ma ci permette di renderci conto delle interazioni esistenti tra società e ambiente.

Questa pubblicazione si riferisce principalmente al presente. Mette in chiaro i processi che causano le alluvioni, ne mostra le conseguenze per la società e discute possibili strategie per la gestione di questi fenomeni. Molti fattori contribuiscono a una piena (Fig. 2). Una causa indispensabile sono le precipitazioni intense, che a loro volta sono riconducibili a determinate situazioni meteorologiche. Le forti precipitazioni conducono ad alti deflussi d'acqua, tuttavia solo quando alcune condizioni preliminari sono già soddisfatte, come per esempio una saturazione d'acqua dei suoli, un livello già alto degli specchi d'acqua o la presenza di manti nevosi in scioglimento. La relazione tra elevate portate e inondazioni dipende dallo stato dei corsi d'acqua e dai processi legati ad essi: dighe, terrapieni, arginature così come alberi rimasti incastrati. Le precipitazioni intense possono causare an-

che colate detritiche, che a loro volta modificano lo stato degli argini e dei sedimenti. Le alluvioni infliggono danni agli uomini, agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio culturale. I danni e le ripercussioni dipendono a loro volta da come gli uomini hanno utilizzato le zone di pericolo e da quali decisioni sono state prese nel passato. Un evento naturale estremo può condurre alla presa di decisioni che influenzeranno il nostro futuro. L'alluvione del 2005 ha per esempio cambiato il sistema d'allerta in Svizzera, migliorato le procedure amministrative e portato alla realizzazione di misure preventive contro le piene.

Tutti questi aspetti sono affrontati nella presente pubblicazione. A ogni tema è dedicata una doppia pagina, focalizzata sullo stato attuale delle conoscenze sulla questione. L'avvenimento del 1868 è affrontato invece in una o due colonne sulla pagina di destra, dove si mostra come i processi prendano forma in un caso concreto. Quando è possibile ricostruire l'andamento dei fatti nel 1868, possono successivamente essere valutati fattori quali le varie condizioni preliminari – un sapere che si rivela molto utile anche come base per la presa di decisioni per ciò che concerne la situazione attuale.

In una prima parte della pubblicazione sono presentati i processi naturali, a partire dai fenomeni atmosferici. Le piene sono quasi sempre riconducibili a precipitazioni intense, per le quali tre condizioni meteorologiche principali si rivelano necessarie: umidità, convergenza e sollevamento (su grande scala in sistemi meteorologici oppure su piccola scala sotto forma di convezione). Tre capitoli sui processi atmosferici prendono in analisi le situazioni meteorologiche, l'origine del vapore acqueo e la convezione. Due capitoli mettono invece in luce la formazione delle piene: il primo analizza la disposizione di base e i fattori geografici che la determinano, mentre il secondo è dedicato ai fattori scatenanti.

Ma come arriviamo ad ottenere queste conoscenze? La seconda parte del lavoro descrive i metodi con i quali si possono studiare le precipitazioni intense e le alluvioni di oggi e del passato. La base per la ricerca sul passato è composta da una parte da documenti storici, dai quali grazie ad un lavoro di analisi delle fonti possono essere estrapolate importanti informazioni, dall'altra da lunghe serie di misurazioni meteorologiche e idrologiche. Un capitolo delinea gli odierni sistemi

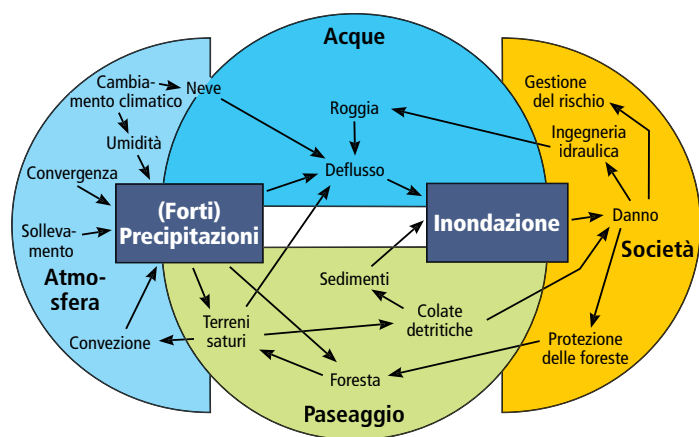


Fig. 2: Precipitazioni intense e alluvioni dipendono sotto più aspetti da processi meteorologici, idrologici, geomorfologici e sociali.

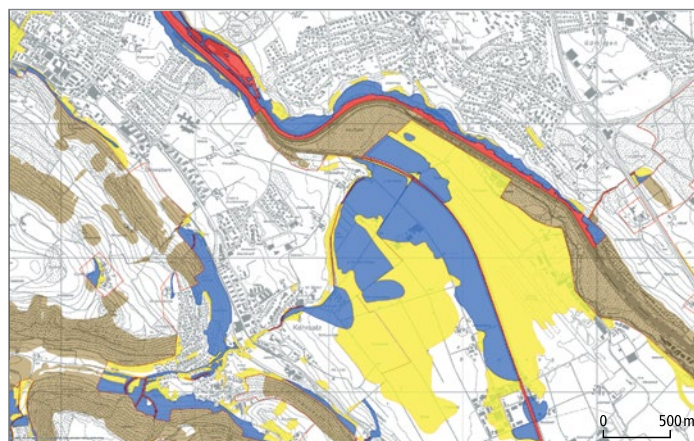


Fig. 3: Dettaglio dalla carta dei rischi naturali del Canton Berna, zona Kehrsatz-Belpmoos.

di misurazione, previsione e allarme. Per riprodurre quantitativamente un avvenimento come quello del 1868 è necessaria una lunga serie di metodi, la cui base è composta da documenti storici e da misurazioni. Al fine di ricostruire il tempo meteorologico a partire dai dati misurati è utilizzato il metodo scientifico definito «rianalisi» (un set di dati meteorologici risultante dalle combinazioni di misurazioni e di modelli di previsione meteorologica), un metodo al quale è dedicato un capitolo. L'affinamento geografico di tali risultati, ottenuto tramite il processo di «downscaling», fornisce dati ai modelli idrologici e idraulici, che permettono di calcolare su piccola scala la probabilità d'inondazione. Alcuni capitoli sono dedicati all'illustrazione di questi procedimenti. Questi sono gli strumenti grazie ai quali è possibile rilevare, giudicare, analizzare e ricostruire fenomeni naturali di questo tipo.

La terza parte della pubblicazione affronta la questione delle ripercussioni delle alluvioni. Come possono modificare il terreno le forti precipitazioni e le alluvioni? Quali danni possono arrecare a costruzioni ed edifici? Ma anche, cosa succede dopo? Come affronta la società i casi di precipitazioni intense? Quali misure preventive sono possibili e opportune? E ancora, che ripercussioni hanno le alluvioni sulla nostra società a lungo termine?



Fig. 4: Lavori di riordino dopo un'alluvione.

La quarta e ultima parte affronta la questione del cambiamento della frequenza delle alluvioni. A questo proposito sono in primo luogo analizzati i cambiamenti sul lungo termine e ci si chiede se le epoche calde siano più o meno colpite da alluvioni. Ci si focalizza in seguito sugli ultimi 200 anni. Questo periodo non è solamente rilevante per la società contemporanea, ma bensì anche per il futuro: se, come la nostra analisi mostra, la frequenza delle alluvioni ha subito delle variazioni nel corso di più secoli, allora lo farà anche in futuro. L'ultimo capitolo affronta infine i cambiamenti dei prossimi 50 anni: a cosa dobbiamo prepararci? Le precipitazioni saranno ancora più intense in futuro? Quali conseguenze avranno questi cambiamenti sulla frequenza e sull'intensità delle alluvioni?

La grave alluvione del 1868

Dopo un settembre 1868 già particolarmente ricco di piogge (e dunque con i livelli dei laghi già alti), in una settimana si verificarono due eventi di precipitazioni intense. Il primo ebbe luogo il 27 e il 28 settembre e colpì principalmente i Cantoni Ticino, Grigioni e San Gallo. Il secondo si verificò tra il primo e il 5 ottobre e coinvolse il Ticino, il Vallese e il Canton Uri. I 1118mm di precipitazioni riversatisi sull'arco di 8 giorni sul Passo del San Bernardino costituiscono un primato per la Svizzera.

Le precipitazioni portarono a inondazioni su entrambi i lati del crinale alpino. Numerosi fiumi ruppero gli argini. La valle del Reno e il Piano di Magadino furono sommersi dalle acque. Il Lago Maggiore raggiunse il 4 ottobre 1868 il livello più alto mai misurato: 199,98m (Fig. 5).

I danni causati da questo evento furono enormi. In totale persero la vita 51 persone. Numerosi ponti crollarono spazzati via, parte del villaggio di Vals fu ricoperta da un metro di detriti. Una stima proposta da Christian Pfister identifica danni per un totale di quasi 1 miliardo di franchi (cifra rapportata al contesto economico dell'anno 2000), tanto da renderla la catastrofe più cara dal 1800 fino all'inondazione del 1978.⁵

L'ammontare dei danni oltrepassava le capacità economiche dei luoghi e dei Cantoni colpiti. La ricostruzione fu resa possibile grazie alle donazioni raccolte nelle zone meno colpite e addirittura all'estero.^{3,4} Ma gli effetti e le conseguenze dell'alluvione si spinsero ben oltre, spaziando dalla realizzazione di interventi sui fiumi (discussi già prima della catastrofe) e un relativo cambiamento di mentalità nella politica riguardante le inondazioni, fino alla nascita del dibattito sul ruolo della deforestazione, che diede una svolta alla legislazione forestale.^{4,7}

In questi riquadri è illustrata la prospettiva sugli avvenimenti del 1868. I processi e i fenomeni discussi nel testo principale a sinistra sono spiegati in queste colonne alla luce dell'alluvione del 1868. In questo modo, i riquadri dedicati al 1868 ci conducono attraverso i processi dell'atmosfera, delle acque e della società. Ci fanno scoprire le fonti storiche a disposizione e lasciano emergere le parole e le voci di chi ha vissuto questo avvenimento. Descrivono la situazione atmosferica su larga scala, le portate dei fiumi e i livelli dei laghi. Mostrano ricostruzioni quantitative dei processi atmosferici e delle inondazioni del 1868. Analizzano i danni e la loro gestione da parte della società così come gli effetti sul lungo termine. Infine, i riquadri collocano l'alluvione del 1868 nel contesto delle variazioni climatiche in una prospettiva



Fig. 5: Piena del Lago Maggiore nel 1868 a Verbania¹ (a sinistra). Nel momento di in cui il lago raggiunse il livello più alto, l'acqua arrivava fin sopra ai portici delle case della città vecchia (segni dall'acqua alta nella foto a destra).

più ampia.

Situazioni meteorologiche alluvionali nella regione alpina

Nella regione Alpina il tempo dipende dalla disposizione delle aree di alta e di bassa pressione sull'Atlantico orientale e sull'Europa. La distribuzione della pressione atmosferica determina la circolazione su larga scala e di conseguenza le temperature, la direzione dei venti e l'umidità dell'aria nel territorio alpino. Tre situazioni meteorologiche sono generalmente alla base delle alluvioni: situazione Vb, PV-Streamer e blocking.

Situazioni meteorologiche

Nella meteorologia, configurazioni di pressione atmosferica simili e tipiche sono spesso riassunte in quelle che vengono definite situazioni meteorologiche.^{8,9} Esempi classici per la Svizzera sono situazioni di bise, di vento da ovest o di favonio. Inoltre, le Alpi costituiscono una barriera meteorologica e quindi le situazioni meteorologiche su larga scala possono manifestarsi a livello regionale in maniere molto differenti: nuvole e pioggia da una parte delle Alpi, tempo asciutto e soleggiato dall'altra.^{10,11}

Anche se per poter prevedere le precipitazioni in maniera dettagliata e affidabile sono necessari modelli moderni di previsione meteorologica (cfr. p. 22), una semplice osservazione dei sistemi meteorologici mediante l'analisi delle situazioni meteorologiche ha dei vantaggi significativi. In primo luogo, i sistemi meteorologici determinano su larga scala le zone e le intensità delle precipitazioni che si verificheranno su più giorni. Allo stesso tempo, le situazioni meteorologiche permettono di illustrare le relazioni esistenti tra la circolazione atmosferica su larga scala e le precipitazioni a livello locale nella regione alpina. In secondo luogo, sapendo in che situazione meteorologica ci troviamo, possiamo analizzare gli sviluppi atmosferici e idrologici (fino agli eventi estremi) con maggiore precisione. Infine, si può notare che i casi di alluvioni violente ed estreme degli ultimi 150 anni sono spesso riconducibili a situazioni meteorologiche simili.^{12,13} Ricerche idrometeorologiche di questi casi possono dunque aiutare a capire quali meccanismi si celino dietro alle alluvioni estreme e a prevedere dunque per tempo tali avvenimenti.

In passato, la denominazione delle situazioni meteorologiche si basava principalmente su un'analisi soggettiva delle carte meteorologiche al suolo o in quota e dei fronti meteorologici che vi erano indicati. Oggi sono invece impiegati diversi procedimenti oggettivi e statistici, basati sui dati delle stazioni.^{14,15} Sia termini soggettivi che oggettivi sono dunque utilizzati per la descrizione di situazioni meteorologiche alluvionali nella regione alpina. Di seguito analizzeremo nel dettaglio tre concetti ricorrenti in questo campo.

Situazioni Vb, PV-Streamer e Blocking

Il termine situazione Vb è riconducibile a una classificazione soggettiva realizzata nell'anno 1981,¹⁶ che suddivideva le situazioni meteorologiche in base ai percorsi delle aree di bassa pressione (Fig. 6). Il

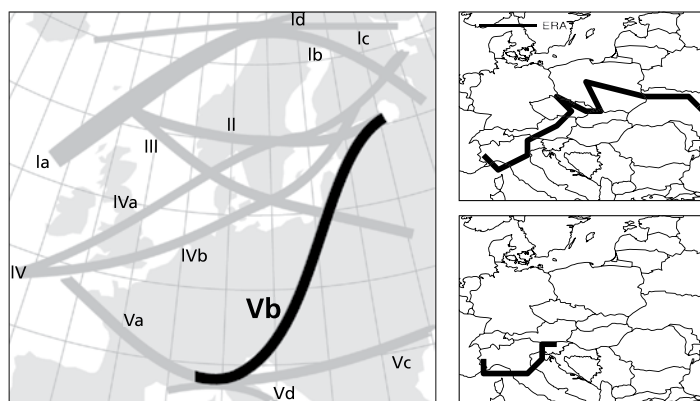


Fig. 6: A sinistra: Traiettorie e nomi dei minimi barometrici (aree di bassa pressione) tra il 1876 e il 1880 secondo W. J. Van Bebber.¹⁶ A destra: traiettorie delle depressioni atmosferiche durante le alluvioni dal 10 al 13 agosto 2002 (sopra) e dal 20 al 24 agosto 2005 (sotto).^{17,18}

termine Vb è a volte ancora utilizzato, per esempio per descrivere le situazioni meteorologiche durante le alluvioni alpine nell'agosto 2002 oppure nell'agosto 2005.¹⁷⁻¹⁹ I cicloni Vb nascono tipicamente nel Mediterraneo a sud della Francia e si intensificano nei pressi di Genova (depressione ligure). Sotto gli impulsi di una corrente in quota che soffia da sud, essi si estendono fino alle Alpi orientali per poi spingersi ulteriormente verso nord. A partire dalla parte anteriore della corrente in quota, aria molto calda e sempre più umida è spinta verso nord sul Mediterraneo. A seconda della posizione precisa, della velocità e della direzione di percorso del ciclone Vb, la massa d'aria umida è spinta da nord-ovest verso la parete nord delle Alpi, come per esempio durante l'alluvione dell'agosto 2005.^{12,17-19} La combinazione del sollevamento di aria calda sopra alla massa di aria fredda in prossimità del suolo, della spinta imposta all'aria umida dalle Alpi e della convezione può portare a precipitazioni molto intense e persistenti al Nord delle Alpi.

Il cosiddetto PV-Streamer (PV sta per potential vorticity, vorticità potenziale) è considerato il precursore meteorologico delle precipitazioni intense a sud delle Alpi. Uno streamer definisce una sottile (100–500 km) e lunga (2000–3000 km) lingua di aria stratosferica che a partire dalla regione polare si estende verso sud sull'Europa occidentale e fino alla regione mediterranea²⁰⁻²² (Fig. 7, cfr. anche Fig. 44). Gli streamer procedono solo lentamente verso ovest. Nella sua parte anteriore (spesso sopra alle Alpi occidentali) i venti in quota soffiano principalmente da nord o da nordest. Più in basso, nella bassa e media troposfera, la stabilità degli strati d'aria diminuisce e si instaura

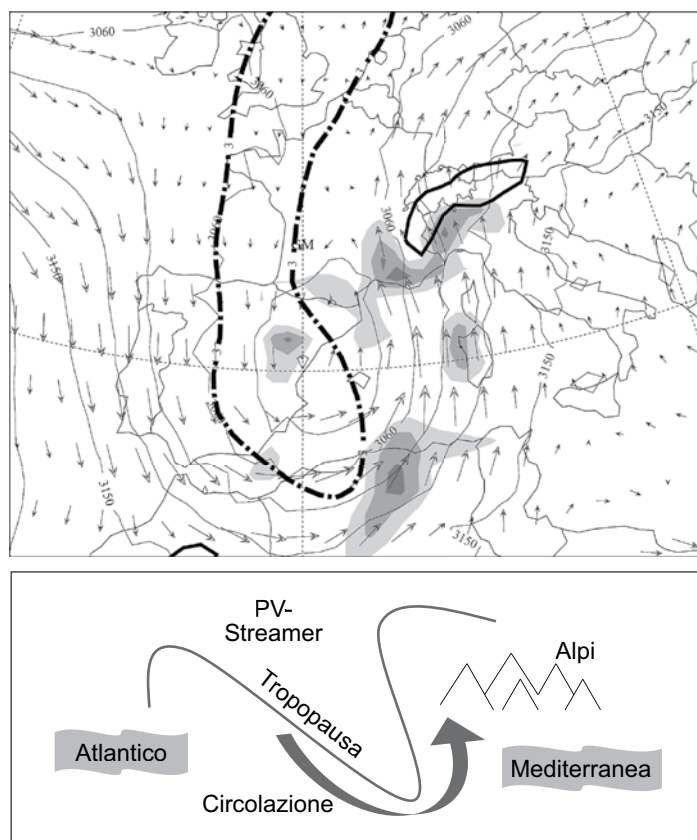


Fig. 7: Situazione meteorologica durante l'alluvione del settembre 1993. Sopra: tropopausa (tratteggiata in grassetto), altezza geopotenziale (a 200 hPa; linea continua), velocità verticale della massa d'aria (Pa/s; ombreggiatura grigia) e vento (freccette) nella troposfera superiore. Sotto: Il corrispondente schema delle correnti.²⁰

un sollevamento su larga scala. Inoltre, un flusso continuo di aria calda e umida è spinto dal sud del Mediterraneo fino alle Alpi. Come conseguenza di questa situazione meteorologica quasi stazionaria, masse d'aria umida confluiscono verso l'arco alpino meridionale, si innalzano e possono scaricarsi sotto forma di precipitazioni intense, spesso sulla stessa zona e per più giorni.

Anche i cosiddetti blocking atmosferici possono condurre a precipitazioni estreme e persistenti su larga scala. I «blocks» sono regioni di alta pressione quasi stazionarie e di lunga durata (almeno 3–5 giorni), che bloccano la progressione da ovest verso est di sistemi di bassa pressione. Un'area di bassa pressione può dunque essere bloccata, così come successive zone di instabilità e perturbazioni possono essere costrette a una deviazione di percorso. Una situazione di blocking può manifestarsi con aree di bassa pressione nella parte anteriore (a est), in quella posteriore (a ovest), oppure in tutte e due le parti (cfr. Fig. 8). Un blocco omega può svilupparsi tra due sistemi di bassa pressione (le isobare disegnano sulla carta una lettera Ω). Infine, situazioni di blocking possono contribuire alla formazione di PV-Streamer. Il Blocking ha rivestito un ruolo importante durante molte fasi delle alluvioni del 1993 e del 2000 a sud delle Alpi, così come nel 2005 e nel 2011 a nord delle Alpi.^{12,24}

La figura 8 mostra come esempio la situazione meteorologica dell'alluvione dell'agosto 2005. La depressione ligure quasi bloccata si trova qui nella prima fase di un percorso Vb (Fig. 6). Malgrado ciò, le definizioni sono soggettive e spesso ambigue: dopo le Alpi il ciclone abbandonerà il classico percorso Vb,^{10,12} vale a dire che non continuerà ulteriormente verso nord. Inoltre, alcuni esperti valuterebbero la situazione meteorologica nell'agosto 2005 come non fedele alla classica definizione di Blocking (cfr. la colonna di destra).

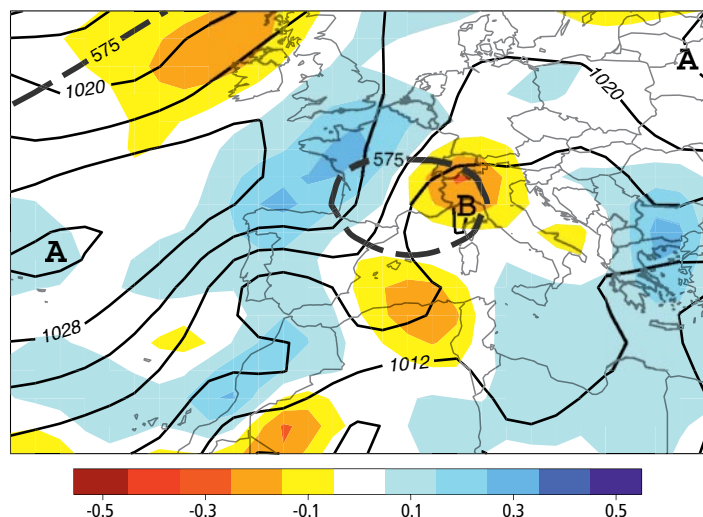


Fig. 8: Situazione meteorologica durante l'alluvione del 21 agosto 2005.²⁵ Una goccia fredda a 500 hPa (circa 5 km; tratteggiata in grassetto) ha portato allo sviluppo di una depressione ligure (B); La linea continua marca la pressione atmosferica al suolo in hPa) bloccata tra due anticloni (A). La velocità verticale è invece ombreggiata a colori (Pa/s; rosso significa sollevamento) a circa 5 km di altezza (500 hPa).

Situazioni meteorologiche nell'autunno 1868

Per le alluvioni di settembre e ottobre 1868 non sono disponibili carte meteorologiche originali (cfr. p. 23) dalle quali si potrebbero ricavare in maniera soggettiva le situazioni meteorologiche. Tuttavia, le situazioni possono essere ricostruite a partire dai dati registrati dalle stazioni meteorologiche¹⁴, oppure calcolate sulla base dei set di dati ottenuti dalla rianalisi (cfr. p. 24). Anche se nel 1868 non c'erano ancora così tante misurazioni della pressione, entrambi i metodi permettono di ottenere situazioni meteorologiche plausibili per le alluvioni in questione.

L'evento fu determinato dalla successione di quattro depressioni in quota più o meno bloccate, due delle quali, ampliandosi troppo a sud, causarono lo sviluppo progressivo di PV-Streamer. Ciò comportò la presenza di venti in quota da sud e da sud-est nel territorio alpino – una tale inversione dei venti in quota è solitamente considerata come criterio per una situazione di blocking (cfr. testo a sinistra). I set di dati a disposizione mostrano per l'episodio del 3 ottobre 1868 (Fig. 9) un chiaro sollevamento su larga scala delle masse d'aria sopra al Mediterraneo e lungo le Alpi occidentali. La corrispettiva corrente di massa d'aria in prossimità del suolo (cfr. p. 10) si arricchì di umidità grazie al Mediterraneo caldo prima di giungere sulle Alpi. Di conseguenza, il primo PV-Streamer portò precipitazioni intense e persistenti sul versante sud delle Alpi, rovesci che causarono un aumento del livello del Lago Maggiore di circa due metri, mentre la seconda situazione di PV-Streamer causò un secondo e decisivo aumento del livello del lago di ulteriori 3 metri circa (cfr. p. 21).

Le situazioni meteorologiche prima e durante l'alluvione erano dunque tipiche per quel che riguarda il sud delle Alpi. Da un punto di vista meteorologico, l'eccezionale gravità dell'evento è spiegata da un intreccio di quattro situazioni seguenti, persistenti e ricche di precipitazioni, determinate dai PV-Streamer. Sulla base della configurazione atmosferica molto chiara, l'evento alluvionale estremo sarebbe oggi prevedibile con largo anticipo. Nei riquadri seguenti tutti questi aspetti saranno ulteriormente approfonditi.

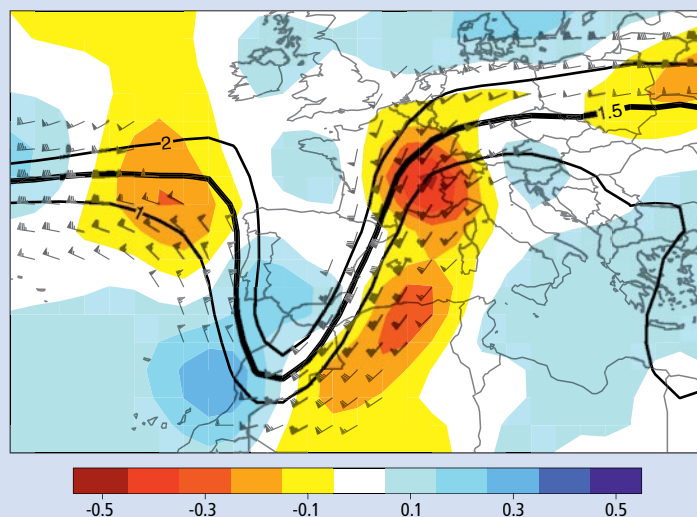


Fig. 9: Situazione meteorologica di PV-Streamer a mezzogiorno del 3 ottobre 1868.²⁵ Le linee continue indicano le PV-units (1.5 PVU – in grassetto – corrisponde alla tropopausa). Le frecce indicano la fascia di venti forti nella troposfera superiore (a 250 hPa; sono indicate solamente velocità di minimo 50 nodi). Le ombreggiature colorate indicano la velocità verticale (Pa/s; rosso significa sollevamento) delle masse d'aria in media troposfera (500 hPa).

Precipitazioni intense, flussi atmosferici e alluvioni in Svizzera

Precipitazioni molto intense e concentrate su uno stesso luogo per più giorni presuppongono un grande apporto di umidità dell'aria sotto forma di vapore acqueo, che potrà nuovamente essere trasformato in pioggia. I meccanismi di trasporto e l'origine di questo vapore acqueo sono descritti in questo capitolo.

La precipitazione richiede un adeguato e costante apporto di umidità atmosferica. Quest'umidità può provenire dall'evaporazione locale, oppure può essere trasportata dai venti nelle aree dei rovesci a partire da sorgenti più lontane. L'evaporazione locale può avvenire attraverso le piante, dal suolo oppure direttamente da specchi d'acqua. Le fonti di umidità più lontane che interessano le precipitazioni in Svizzera sono numerose: in ordine dal più al meno rilevante possiamo citare il Nordatlantico, il Mediterraneo, le superfici terrestri, il Mare del Nord e il Mar Baltico.²⁶ Per quel che riguarda il Nord delle Alpi, l'umidità arriva principalmente dall'Oceano Atlantico; al sud invece dal Mar Mediterraneo.²⁶ In inverno la fonte di umidità dominante è di origine oceanica, mentre in estate l'umidità originata dall'evaporazione sulla terraferma gioca un ruolo importante.

Le precipitazioni intense, che a loro volta possono provocare delle alluvioni, necessitano di un apporto di umidità molto più intenso e costante, a seconda della durata dei rovesci, rispetto a normali precipitazioni. Effettivamente, episodi segnati da un apporto di umidità molto forte e prolungato nel tempo sono un indicatore molto importante in Svizzera per le precipitazioni intense e le alluvioni.^{27,28} L'aria umida presente sulla Svizzera viene sospinta contro le Alpi, in seguito è costretta a salire di quota e a condensare per poi riversarsi infine sotto forma di precipitazione.

Il trasporto di umidità nell'atmosfera non avviene né in maniera uniforme né caoticamente, ma bensì spesso organizzato in strutture allungate lungo i fronti freddi delle aree di bassa pressione. Queste strutture sono denominate «fiumi atmosferici», in inglese «atmospheric rivers». Un esempio di un simile flusso atmosferico sopra all'Atlantico è rappresentato nella figura 10, dove è riportata la somma verticale di umidità trasportata nell'atmosfera alle 6UTC (7:00 ora centroeuropea) del 10 ottobre 2011. Il trasporto di umidità è calcolato dalla combinazione (moltiplicazione) del vento e del contenuto di vapore acqueo dell'atmosfera. L'unità di misura indica quanti chilogrammi di vapore acqueo al secondo sulla distanza di 1 metro sono trasportati in tutta l'atmosfera (sopra al metro preso in considerazione). Il nome di fiume atmosferico

è sicuramente giustificato, in quanto la quantità d'acqua trasportata da un tale flusso sopra al Nordatlantico corrisponde alla portata dei più grandi fiumi della terra (per esempio il Rio delle Amazzoni o il Gange).

A differenza dei fiumi, l'umidità trasportata nei flussi atmosferici è continuamente rinnovata attraverso le piogge e l'evaporazione.²⁹ Questo rinnovamento avviene principalmente sopra agli oceani, poiché l'evaporazione sopra la terra è significativamente inferiore. In questo modo, l'umidità di un fiume atmosferico è generata prevalentemente sopra agli oceani, mentre il trasporto di umidità si riduce non appena il flusso atmosferico raggiunge un continente, dove le piogge sono infatti superiori all'evaporazione (Fig. 10). Tuttavia, questi fiumi atmosferici riescono a trasportare grandi quantità di vapore acqueo fino all'interno dei continenti dove causano forti precipitazioni.

L'esempio del 10 ottobre 2011 illustra tutto ciò in maniera molto chiara ed ebbe come conseguenze gli eventi alluvionali nelle regioni della Kandertal e della Lötschental.²⁴ L'acqua riversatasi sull'Oberland bernese e sul Vallese traeva le sue origini in parte dall'Atlantico nordorientale, in parte dall'Atlantico subtropicale.²⁴ Il trasporto di umidità verso le Alpi verificatosi al 10 ottobre 2011 (Fig. 10) era eccezionalmente forte. Negli ultimi trent'anni, solamente una manciata di episodi di trasporto d'umidità con un'intensità simile hanno colpito il Nord delle Alpi e in tutti i casi hanno portato a grandi alluvioni.²⁸ Un forte trasporto d'umidità da nord-ovest o da nord è particolarmente pericoloso per la Svizzera nord-occidentale, mentre per la regione nord-orientale il pericolo è maggiore quando l'umidità proviene da nord-est. Il versante sud-alpino è raggiunto dall'aria umida a partire da sud. I valori assoluti del trasporto di umidità sono generalmente più elevati al Sud delle Alpi, poiché il Mar Mediterraneo è più caldo rispetto al Nordatlantico e l'evaporazione d'acqua risulta essere maggiore. Questo fatto si rispecchia nei maggiori quantitativi di precipitazione che colpiscono il Sud delle Alpi.

Oltre all'intensità del trasporto d'umidità, anche la sua durata gioca un ruolo importante per le precipitazioni. Anche se normalmente episodi

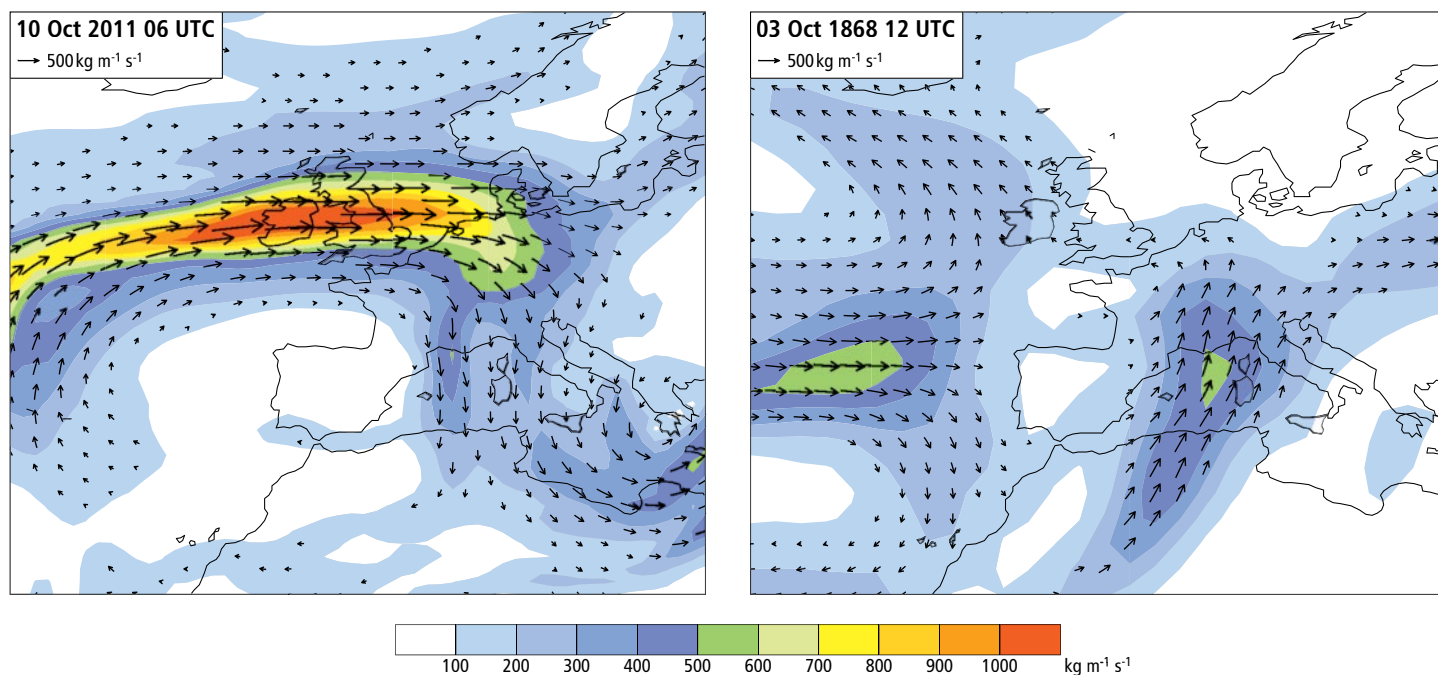


Fig. 10: Somma verticale del trasporto atmosferico di umidità ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; ombreggiatura colorata) alle 6UTC del 10 ottobre 2011 (a sinistra) e alle 12UTC del 3 ottobre 1868 (a destra). Le frecce indicano la direzione di trasporto. Il flusso atmosferico è riconoscibile nell'immagine di sinistra come una lunga e sottile struttura sopra all'Atlantico. Nell'ottobre 2011 l'aria umida raggiunse le Alpi da nord, il 3 ottobre 1868 da sud.

di trasporto di umidità con un'intensità estrema non durano più di 12 ore, grandi quantitativi d'umidità possono in altri casi essere trasportati verso le Alpi anche per più giorni.²⁸ Ciò successe per esempio nell'autunno del 1868 (cfr. riquadro a destra).

I flussi d'umidità possono a loro volta essere utilizzati per la previsione di possibili inondazioni. Nella meteorologia odierna, i modelli numerici moderni possono prevedere i flussi d'umidità in anticipo rispetto alla precipitazione.³⁰ Informazioni sulla direzione e sull'intensità dei flussi atmosferici e del trasporto di umidità nell'atmosfera possono essere impiegati soprattutto per le previsioni a medio termine (5–10 giorni) di forti precipitazioni e di potenziali inondazioni. Flussi d'umidità intensi in direzione delle Alpi sono pertanto segnali di preallarme per possibili future inondazioni.

Le prime valutazioni mostrano che con un clima più caldo il trasporto di umidità atmosferica tenderà ad intensificarsi. La figura 11 indica il cambiamento percentuale dei trasporti di umidità estrema (99 percentile) fino alla metà e alla fine del secolo, per tre differenti modelli climatici a livello globale. I modelli climatici prendono in considerazione un continuo aumento dei gas serra senza l'adozione di misure di riduzione. A seconda del modello seguito, i cambiamenti risultano essere differenti, tuttavia tutti e tre gli scenari indicano un chiaro aumento del trasporto d'umidità dalle direzioni dei venti maggiormente rilevanti per il rischio d'alluvioni. Questo aumento si rafforzerebbe ulteriormente verso la fine del XXI secolo.

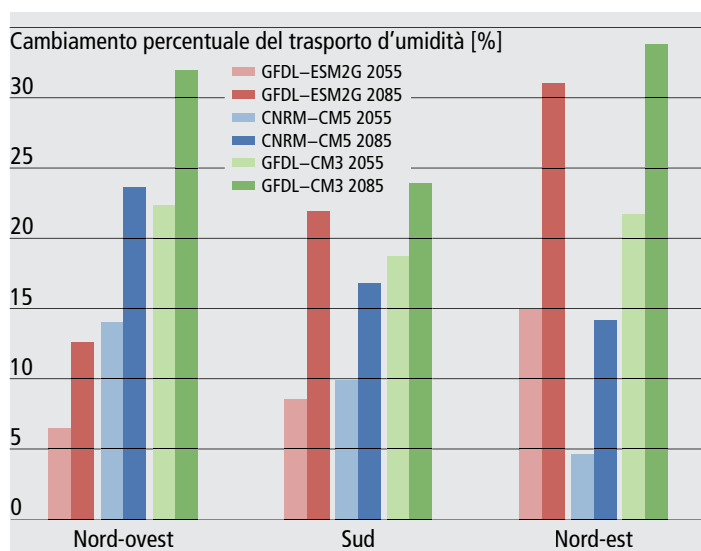


Fig. 11: Cambiamento percentuale degli episodi estremi di trasporto d'umidità nella Svizzera nordorientale, nordoccidentale e al Sud delle Alpi, calcolato con tre diversi modelli climatici a livello globale. I colori più chiari indicano i cambiamenti fino a metà secolo, quelli più scuri invece fino alla fine del XXI secolo. Tutti e tre i modelli riscontrano un incremento significativo del trasporto estremo di umidità.

Da dove arrivava l'acqua dell'alluvione del 1868?

Esistono diversi approcci per rispondere a questo quesito da un punto di vista meteorologico. Si può per esempio prendere in considerazione la somma verticale del trasporto di umidità atmosferica al di sopra di una certa area e per un determinato lasso di tempo. La figura 10 mostra per l'evento del 1868 un trasporto di umidità elevato sulla regione mediterranea occidentale, mentre le frecce che indicano la direzione del vento puntano verso il Sud delle Alpi. Ciò indica che il vapore acqueo aveva in parte origine mediterranea.

Un secondo approccio considera le cosiddette traiettorie. Si parte dal presupposto che un pacchetto d'aria, nel suo complesso, è trasportato dal vento come una sorta di palloncino. La figura 12 mostra il percorso aereo compiuto su tre giorni dai pacchetti d'aria, che in due differenti date (27 settembre e 3 ottobre 1868) causarono precipitazioni molto intense nella regione sud-alpina. A basse quote, in prossimità del suolo, i pacchetti d'aria risalirono lentamente verso nord lungo il Mar Tirreno; in alta quota, invece, il percorso seguito passò sopra al Mediterraneo occidentale e in parte addirittura sopra all'Atlantico subtropicale. Tutti i pacchetti d'aria subirono alla fine un sollevamento. Ciò significa che sull'arco di più giorni fu assorbito molto vapore acqueo proveniente dal Mediterraneo caldo, che in seguito si condensò durante l'ascesa sul versante sud-alpino.

Un terzo approccio non è applicabile nel nostro caso dell'alluvione del 1868. Si basa su un'analisi diretta delle acque, che a secondo dell'origine del vapore acqueo contengono isotopi differenti. Naturalmente non disponiamo di alcun campione d'acqua dell'evento del 1868. Tuttavia, gli studi di moderni casi analoghi hanno evidenziato come parte del vapore acqueo provenga da acque presenti sulle superfici terrestri ormai sature: attraverso una ripetuta convezione l'acqua è in parte riciclata a livello regionale.³¹

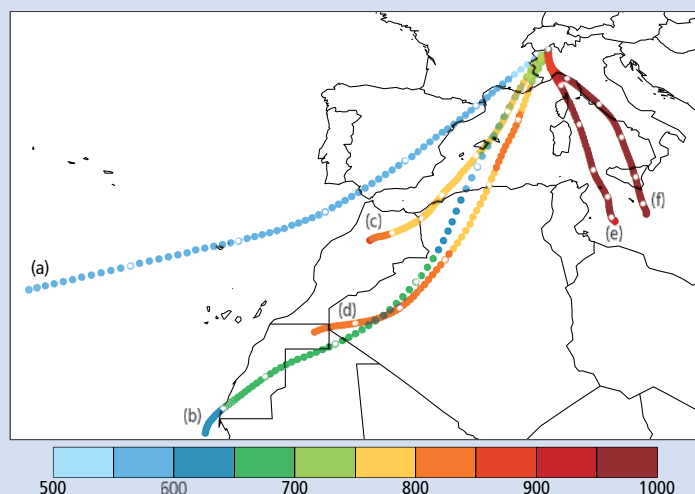


Fig. 12: Ricostruzione delle traiettorie su 3 giorni in 20CR (cfr. p. 24). Il trasporto dei pacchetti d'aria termina nel punto 46°E 8°N alle 12 UTC del 27 settembre 1868 per le linee (a), (c) e (e) e alle 12 UTC del 3 ottobre 1868 per le linee (b), (d), e (f). Sono indicati i punti finali a diverse quote, vale a dire circa 5,5 km sul livello del mare (che corrisponde a 500 hPa) per le linee (a) e (b), 3 km (700 hPa) per le linee (c) e (d) e 1,5 km (850 hPa) per le linee (e) e (f). I segmenti colorati delle linee indicano il valore della pressione in hPa lungo le traiettorie. Periodi temporali di 12 ore sono illustrati con dei punti bianchi.³² Valori di pressione alta indicano che i pacchetti d'aria si trovano in prossimità del suolo, mentre valori più bassi indicano invece che gli stessi pacchetti d'aria si trovano a una quota più elevata.

Precipitazioni orografiche e convezione

Nei capitoli precedenti abbiamo visto come le correnti su larga scala possano causare forti e persistenti flussi d'umidità in direzione delle Alpi centro-meridionali. La corrente può essere bloccata da una barriera orografica come le Alpi centrali, ma può anche riuscire a scavalcarla o aggirarla. Per oltrepassare le Alpi, l'aria si alza, si dilata e si raffredda. L'aria fredda può contenere meno vapore acqueo rispetto all'aria calda, durante l'ascesa può dunque essere raggiunto il 100% di umidità relativa dell'aria. A questo punto il vapore acqueo si condensa, si formano delle goccioline e si creano le precipitazioni.

Aggirare o oltrepassare le Alpi

La corrente di una massa d'aria che raggiunge una catena montuosa può essere descritta dal numero di Froude. Se il vento è debole, le montagne alte e la stratificazione atmosferica stabile, il numero di Froude è inferiore a 1 e la corrente sarà bloccata (oppure dovrà aggirare l'ostacolo). Se il vento è invece forte, le montagne basse e la stabilità più scarsa, la catena montuosa potrà in questo caso essere scavalcata. In questo modo si crea per esempio una situazione di favonio (Fig. 13). L'aria satura ascende più facilmente rispetto a quella insatura. Se una corrente può riuscire ad attraversare una catena montuosa dipende dunque dalla sua stratificazione termica e dal vento.

La stabilità riveste un ruolo chiave. Se l'atmosfera è «stabile», l'aria che sta cercando di oltrepassare le montagne ricade in basso. Il vento orizzontale dovrebbe dunque essere particolarmente forte affinché la corrente possa contrastare la stabilità atmosferica per poter scavalcare la catena montuosa. Se l'atmosfera presenta invece una stratificazione «neutra», l'aria può scavalcare le montagne senza resistenza. Nel caso di una stratificazione particolarmente instabile, l'aria deve prima di tutto raggiungere la saturazione, dopo di che ascenderà da sola sotto forma di bolle calde (celle convettive). Lo stesso tipo di convezione atmosferica è responsabile della formazione dei temporali. L'aria può in questo modo raggiungere velocemente le alte quote. Pertanto, la convezione è in grado di aumentare a livello locale l'intensità e la quantità di precipitazioni in maniera sensibile.



Fig. 13: Immagine di un cosidetto «muro del favonio» sopra alla Jungfrau.¹ L'aria proveniente da sud si condensa durante l'ascesa sopra alle Alpi e crea una nuvola. Durante la discesa lungo l'altro versante della montagna, la nuvola si dissolve. Il risultato è una nuvola stazionaria, che assomiglia ad un muro.

In relazione ai più recenti e forti eventi alluvionali che hanno colpito il Lago Maggiore, è stata intrapresa una ricerca sulla struttura verticale delle correnti. I dati a disposizione provengono da misurazioni con palloni sonda dall'aeroporto di Milano Linate, da immagini radar dal Monte Lema (Ticino) e da una campagna di misurazioni del Mesoscale Alpine Program.³³ A tale proposito, e con l'obiettivo di osservare nei dettagli l'atmosfera sopra alle Alpi, sono stati impiegati contemporaneamente aeroplani e diversi strumenti al suolo. Per le precipitazioni intense sul Lago Maggiore³⁴ (cfr. Fig. 14) sono state riscontrate le seguenti caratteristiche: (1) venti dal quadrante sudorientale nella regione del Po al di sotto dei 1000 m s.l.m. e venti dal quadrante sudoccidentale al di sopra di questa quota, (2) Un'umidità relativa dell'aria di 100% negli strati dai 500 m ai 4 km al di sopra del suolo (ciò significa che i venti da sud trasportano l'umidità in direzione delle Alpi centro-meridionali) e (3) una stratificazione atmosferica neutra e quasi instabile.

Convezione e grandine

La differenza tra precipitazioni «intense» o «estreme» è determinata dalla presenza di una particolare instabilità atmosferica e dunque della convezione.³⁴ Per quel che riguarda le forti precipitazioni in Svizzera, le correnti sono generalmente associate a cielo nuvoloso e i movimenti convettivi così come l'ascesa imposta all'aria lungo i fianchi delle montagne contribuiscono ulteriormente ad accentuare la copertura nuvolosa. Le nuvole locali possono influenzare le precipitazioni in diversi modi. Normalmente le celle convettive hanno una durata di poche ore e si estendono per pochi chilometri quadrati. Tuttavia, quando più celle si susseguono nello stesso luogo le precipitazioni possono essere molto abbondanti (Fig. 14).

Una forte convezione può essere alla base di una grandinata. La grandine si genera nel caso di temperature al di sotto del punto di congelamento nelle cosiddette «nuvole a fasi miste», dove dei fiocchi di neve raccolgono altre goccioline per poi ricongelarsi assieme. Si formano delle palline di ghiaccio, alle quali si aggiungono progressivamente altre gocce o si fondono con altre palline dello stesso tipo, per poi ricongelarsi assieme e via dicendo. I chicchi di grandine possono continuare a ingrandirsi fino a quando la forza dei venti ascensionali lo permette. Venti ascensionali abbastanza forti da poter mantenere in sospeso grossi chicchi di grandine sono riscontrabili unicamente nelle nuvole convettive.

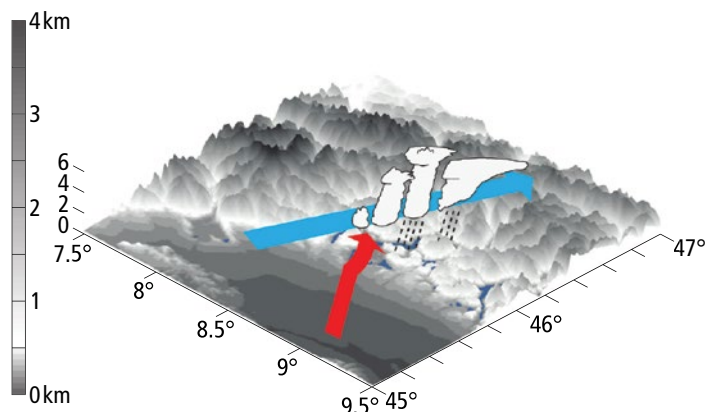


Fig. 14: Concetto di convezione sopra al Lago Maggiore.³⁴ L'aria umida e instabile in prossimità del suolo (freccia rossa) è costretta ad ascendere. Si formano delle celle convettive che vengono trasportate dal vento ad un livello intermedio (frecciablu). Tutte le celle convettive seguono praticamente lo stesso percorso e generano precipitazioni sullo stesso luogo. Questa sequenza conduce a quantitativi di precipitazione localmente abbondanti.

Inondazione dell'Emmental nel 1837

Il 13 agosto 1837, un temporale in una vallata laterale scatenò la più grande piena mai documentata del fiume Emme. L'evento naturale fu reso celebre da un racconto di Jeremias Gotthelf intitolato «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». Gotthelf redasse il testo basandosi sulle sue impressioni e sulle discussioni avute nella sua visita della valle immediatamente dopo la catastrofe. Egli descrisse come la devastante inondazione fu causata da una successione di temporali. Una modellazione realizzata nel 2002 mostra come, al di là dell'intensità e della quantità delle precipitazioni, gli antefatti alla catastrofe siano decisivi: senza i temporali dei giorni precedenti non si sarebbe arrivati ad un'inondazione di una tale portata.

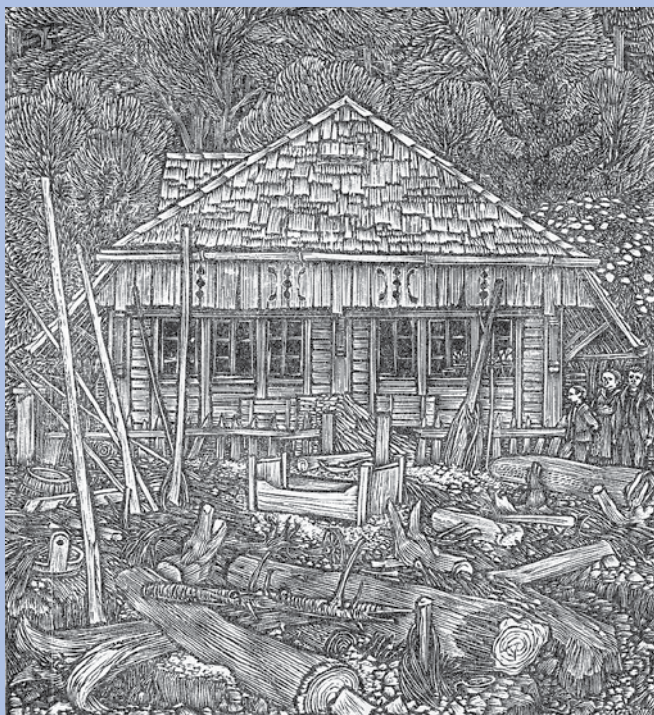


Fig. 15: Xilografia di Emil Zbinden; illustrazione per l'opera pubblicata dalla Ghilda del libro Gutenberg (1951).

Che importanza ebbe la convezione per l'evento del 1868?

I processi sopra descritti si svolsero in maniera simile anche durante l'alluvione del 1868. Ciò è attestato da diverse fonti e comprovato da simulazioni.³² Tra le due principali fasi delle precipitazioni tra il 26 settembre e il 4 ottobre 1868 sono segnalati, tra le altre cose, piogge persistenti e forti temporali con singole grandinate.^{3,35} Anche le somme giornaliere di pioggia misurate in questo periodo (per esempio al 3 ottobre 1868, Fig. 33) lasciano presupporre la presenza di attività temporalesca: esse sono piuttosto indipendenti dall'altitudine, e le intensità della precipitazione presentano forti gradienti in aree abbastanza ristrette.³²

La figura 16 dimostra l'importanza della convezione per l'evento del 1868 alla luce di una simulazione realizzata con il modello WRF (cfr. p. 26). La massa d'aria al di sotto dei 4 km di quota (600 hPa) si muove verso nord (nella figura da sinistra verso destra), mentre la massa d'aria al di sopra della stessa quota si sposta verso est (in direzione del lettore). Il colore verde chiaro sopra ai 900 hPa al di sopra di Genova indica che la corrente d'aria lì non è saturata. Risalendo la regione del Po per giungere fino alle Alpi centro-meridionali, questa corrente si innalza e si satura. Una bassa coltre di nubi si delinea sopra le Alpi e genera pioggia. Il colore grigio-verde corrisponde più o meno alla coltre di nubi, mentre le precipitazioni non sono indicate. I numerosi contorni rossi tra Genova e Locarno indicano le correnti ascensionali di un temporale convettivo che si avvicina alla città sul Lago Maggiore. Il temporale inumidisce gli strati più alti e genera nubi che si estendono sino ad alte quote: nella zona temporalesca l'aria è saturata dal suolo fino ai 300 hPa (9 km di altezza). Nel modello, la tempesta si sposta progressivamente verso nord e causa forti precipitazioni sul Lago Maggiore circa quattro ore più tardi.

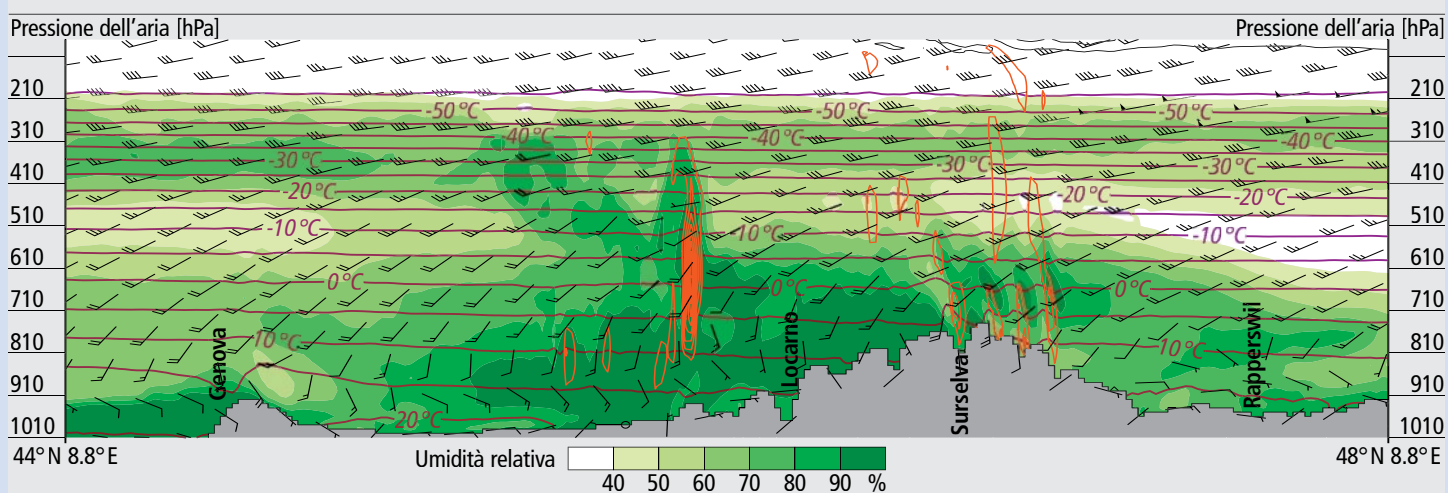


Fig. 16: Sezione trasversale attraverso le Alpi da sud (a sinistra) a nord (a destra) alle 21 UTC del 26 settembre 1868. I dati sono tratti da una simulazione realizzata con il modello meteorologico WRF con una risoluzione di 2 km e con 40 strati. La topografia (corrispondente all'area grigia) è realizzata con un modello topografico. I colori indicano l'umidità relativa dell'aria. Le frecce indicano il vento orizzontale: verso l'alto per i venti da sud, verso destra per i venti da ovest, ecc. I trattini laterali corrispondono alla forza del vento (10 nodi, circa 20 km h⁻¹, per ogni trattino). I contorni rossi presentano le zone d'aria ascendente. Le isoterme sono indicate dalle linee viola rossastro con i relativi valori di temperatura. L'isoterma di zero gradi si trova a circa 630 hPa (circa 4000 m sul livello del mare).

Origine delle alluvioni – Predisposizione di base

Le alluvioni sono generate da una complessa interazione tra la predisposizione di base, condizioni variabili e le precipitazioni che scatenano l'evento. Il suolo, la geologia, l'utilizzo del territorio e la topografia determinano la predisposizione di base di un bacino idrografico. Esse descrive come un bacino idrografico reagisce a forti precipitazioni, quale percentuale delle piogge raggiunge il deflusso e come defluiscono le ondate di piena. Per rilevare la predisposizione totale alle alluvioni di un determinato bacino, devono essere considerate anche la quantità, la durata e l'intensità delle precipitazioni, così come altri fattori variabili.

Formazione dei deflussi – la nascita delle piene

Il quantitativo di precipitazione riversatasi al suolo che riesce a giungere a deflusso risulta essere un fattore decisivo per lo sviluppo delle piene e delle alluvioni. Fa una grande differenza se il 10% oppure il 70% della precipitazione giunge a deflusso. Si parla in questo caso di processi di formazione dei deflussi. Essi variano all'interno di un bacino idrografico a seconda del tipo di suolo e delle condizionigeologiche. Nel complesso se ne possono riconoscere quattro tipi. (1) Il suolo è poco permeabile, la precipitazione non riesce a infiltrarsi e scorre sulla superficie. (2) Il suolo è saturo (per esempio un prato umido) e l'acqua piovana non può infiltrarsi nel terreno. In entrambi i primi due tipi una gran parte della precipitazione può direttamente scorrere e defluire. (3) Quando la precipitazione riesce a infiltrarsi nel suolo, sia attraverso il terreno sia tramite macropori, bisogna domandarsi se nel terreno siano presenti strati impermeabili. In tal caso, l'acqua scorre lateralmente nel terreno e le precipitazioni potrebbero portare ad alluvioni

solamente in misura minore e in maniera differita. (4) Particolarmente favorevole da un punto di vista della protezione contro le alluvioni è infine la situazione che vede le acque piovane penetrare nel suolo e infiltrarsi in un sottosuolo geologicamente permeabile. Le precipitazioni in questo caso giungono a deflusso solamente dopo giorni o addirittura settimane e non portano dunque direttamente a situazioni alluvionali.

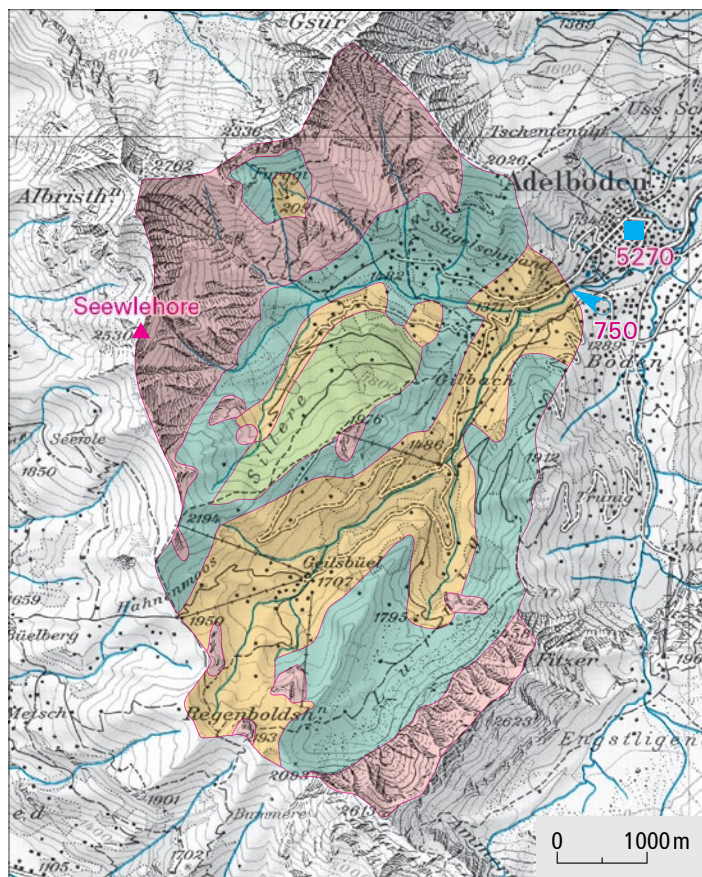
In funzione della distribuzione spaziale e della diffusione di questi quattro tipi di suolo, può essere valutata la predisposizione di base alle alluvioni di un determinato bacino idrografico. Ad Adelboden lungo il fiume Allenbach (Fig. 17) i tipi (1) e (2) si ritrovano non solo in gran parte del bacino, ma si trovano inoltre in zone impervie e in prossimità di ruscelli. In estate, in caso di temporali intensi, si verificano spesso delle grandi piene.

Oltre al ruolo fondamentale del suolo e della geologia, altri fattori come l'utilizzo del terreno e la pendenza influiscono nella formazione dei deflussi. Il ruolo dei boschi è molto discusso e controverso. Grazie alla capacità delle chiome degli alberi di trattenere le precipitazioni e alla favorevole permeabilità che caratterizza il terreno boschivo, il bosco esercita un effetto di contenimento delle inondazioni che risulta essere efficace soprattutto per eventi di lieve entità. In caso di precipitazioni molto forti questi fattori hanno invece solamente una rilevanza secondaria.

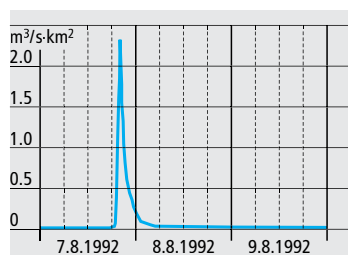
Concentrazione dei deflussi – lo sviluppo delle piene

La concentrazione dei deflussi descrive come i deflussi che si formano in un determinato luogo scorrono attraverso la rete idrografica. Fattori come la pendenza, la densità della rete idrografica e la conformazione degli alvei dei fiumi e dei ruscelli si rivelano determinanti. Anche la forma del bacino idrografico influisce sulla tipologia e sul decorso di un'alluvione. Se per esempio le precipitazioni dovessero colpire un bacino idrografico di forma circolare, le acque seguirebbero percorsi della stessa lunghezza e si riverserebbero contemporaneamente nella rete idrografica: ne risulterebbero livelli di piena maggiori rispetto a un bacino idrografico di forma allungata.

In Svizzera, i bacini idrografici prealpini nel Nord delle Alpi e i bacini più elevati del versante sud-alpino presentano una predisposizione di base alle alluvioni che può portare a piene di natura importante: essi sono infatti molto ripidi e dispongono di fitte reti idrografiche. In combinazione con rovesci intensi o persistenti, entrambe queste regioni mostrano i volumi di piena più elevati per km² (portata specifica; cfr. fig. 18).



- Tipo 1: reazione rapida
- Tipo 2: reazione leggermente ritardata
- Tipo 3: reazione ritardata
- Tipo 4: reazione fortemente ritardata



Formazione di alluvioni nell'Allenbach (secondo: tavola HADES 5.7)

Fig. 17: Formazione dei deflussi lungo il fiume Allenbach ad Adelboden.¹ Valutazione della predisposizione di base.³⁶

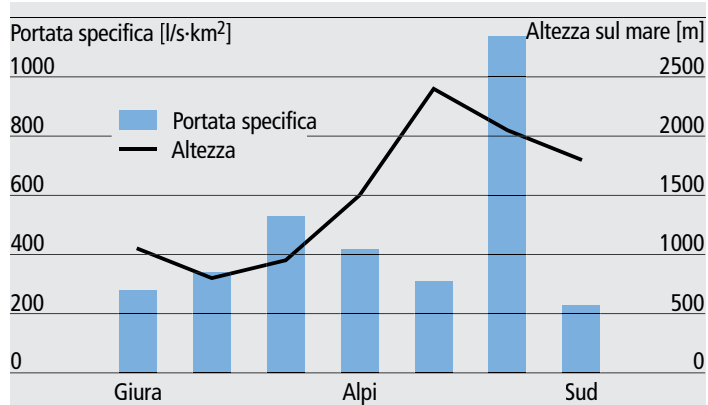


Fig. 18: Portata specifica di una piena di medie dimensioni lungo il profilo nord-sud attraverso la Svizzera.³⁷

Nel corso degli ultimi 200 anni, la maggior parte dei fiumi e dei ruscelli è stata arginata e rettificata. Questi interventi di sistemazione hanno migliorato la protezione contro le piene solo in parte. Allo stesso tempo, infatti, essi contribuiscono all'incremento delle punte di portata massima delle piene per due motivi principali. (1) Le piene scorrono più rapidamente lungo un corso d'acqua canalizzato che lungo un fiume naturale e ramificato, fatto che determina una portata massima maggiore. (2) Le superfici che in passato erano periodicamente inondate sono oggi protette da dighe e offrono nuovi spazi per eventuali insediamenti, per l'industria e per i trasporti. In questo modo sono state perse delle aree inondabili, nelle quali si sarebbe potuta disperdere parte dell'acqua delle piene, limitando dunque i picchi dell'onda di piena.

Anche un lago può contenere le punte di portata massima grazie alla sua capacità di stoccaggio (cfr. Fig. 19). Quest'ultima varia di lago in lago (cfr. Tab. 1). La relazione tra capacità di stoccaggio e l'afflusso d'acqua è decisiva per l'importanza dell'effetto contenitivo. Un lieve effetto contenitivo è riscontrabile per i laghi il cui stoccaggio risulta essere piccolo in rapporto agli afflussi giornalieri. È per esempio il caso del lago di Thun o quello di Sarnen. Con l'inaugurazione nel 2009 di alcuni tunnel di accumulo delle acque, lo spazio di contenimento del Lago di Thun è stato aumentato.

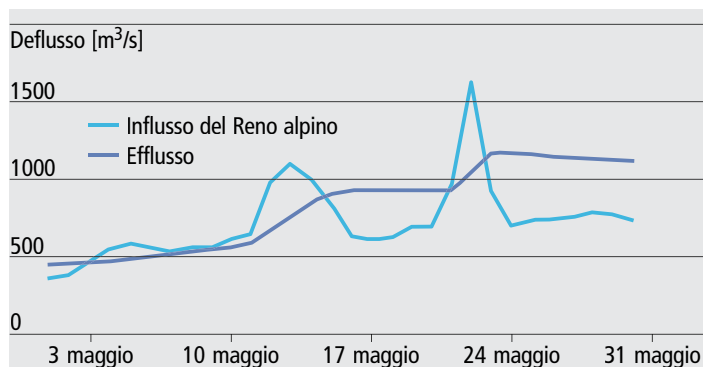


Fig. 19: L'effetto contenitivo del Lago di Costanza durante le due alluvioni nel maggio 1999 (Dati: UFAM).

Questi esempi ci mostrano come l'uomo possa determinare, per lo meno fino ad un certo punto, la predisposizione di base alle alluvioni di un bacino, intervenendo nella gestione delle acque o tramite la designazione di spazi di ritenzione (aree in cui l'acqua può essere stoccata temporaneamente). Un tale intervento non è possibile invece per altri fattori, quali la pendenza o la composizione del sottosuolo.

Nome del lago	Superficie del bacino idrografico [km ²]	Superficie del lago [km ²]	Stoccaggio [mm] ¹⁾	Precipitazioni giornalieri per l'evento secolare [mm/giorno]	Rapporto tra stoccaggio e afflusso [giorni]
Lago di Costanza	11887	541,2	69	24	2,88
Lago di Zurigo	1840	90,1	32	30	1,07
Lago dei 4 Cantoni	2251	113,6	44	43	1,02
Lago di Sarnen	267	7,5	30	60	0,50
Lago di Zugo	259	38,3	151	49	3,08
Lago di Brienz	1129	29,8	40	35	1,14
Lago di Thun	2490	48,4	12	24	0,50
Laghi ai piedi del Giura	8217	280,7	41	19	2,16

1) Volume tra il limite normale (corrisponde al livello medio del lago) e il limite di piena, in riferimento alla dimensione del bacino idrografico.

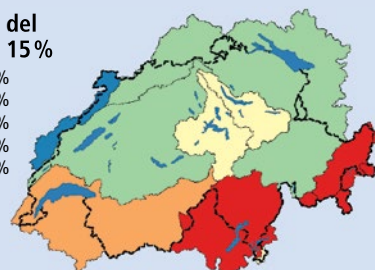
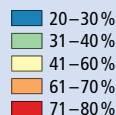
Tab. 1: Dati rilevanti per le piene dei laghi svizzeri.³⁸

Predisposizione di base alle alluvioni nel 1868

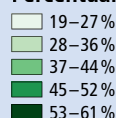
La predisposizione di base alle piene e alluvioni del bacino idrografico del Lago Maggiore è sensibilmente più elevata rispetto ad altri bacini svizzeri. La figura 20 confronta tre importanti caratteristiche della predisposizione alle alluvioni nei principali bacini idrografici della Svizzera. La regione del fiume Ticino, nel bacino idrografico del Lago Maggiore, presenta montagne molto ripide. Inoltre, il sottosuolo geologico è composto da rocce cristalline, che non permettono la ritenzione delle acque e contribuiscono dunque a formare i deflussi. Infine, l'area è situata in una regione idro-climatica che è caratterizzata dalle più alte intensità di precipitazioni di tutta la Svizzera. A questi fattori, che promuovono la formazione dei deflussi, si contrappongono una delle più elevate percentuali boschive della Svizzera e la capacità di ritenzione del Lago Maggiore. La sua capacità di stoccaggio per il suo bacino idrografico (6386 km²) corrisponde a circa 50 mm.

La percentuale boschiva nel 1868 era inferiore ad oggi. Ginzler e co-autori³⁹ riportano che la superficie forestale corrispondeva a circa la metà di quella attuale. Tuttavia, la ritenzione del lago era più elevata (cfr. S. 31).⁴⁰ Mettendo insieme tutti questi fattori si può comprendere come la regione sia oggi incline alle alluvioni, e come lo fosse ancor di più attorno al 1868. I fiumi e i letti dei corsi d'acqua, grazie a secoli di eventi alluvionali caratterizzati da deflussi elevati, si sono però «adattati» a questa predisposizione di base elevata alle alluvioni: la presenza di alti deflussi non implica per forza un'esondazione delle acque. Questo lo si può notare osservando come i letti dei fiumi di questa regione siano particolarmente ampi. Con riferimento all'alluvione del 1868, bisogna sottolineare come la predisposizione di base alle alluvioni giochi un ruolo fondamentale soprattutto in relazione alla modalità in cui un bacino idrografico reagisce a precipitazioni intense nell'arco di poco tempo, mentre gli effetti per precipitazioni che durano più giorni – come fu il caso nel 1868 – sono invece inferiori.

Pendenza del terreno > 15%



Percentuale boschiva



Classi geologiche

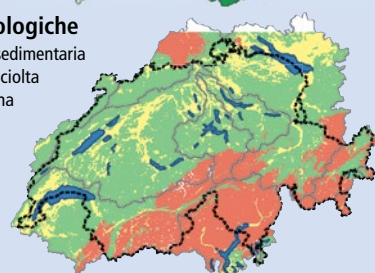
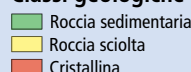


Fig. 20: Confronto dei fattori di predisposizione di base alle alluvioni. Percentuale di pendenza del terreno del 15% (sopra), geologia cristallina e resistente all'acqua (sotto), percentuale boschiva (al centro).

Origine delle alluvioni – Le condizioni variabili e l’inizio del processo

Oltre alla predisposizione di base immutabile nel tempo, diversi fattori variabili nel tempo, e in particolare le precipitazioni che scatenano il processo alluvionale, assumono un’importanza decisiva per lo sviluppo delle piene. Importanti fattori variabili sono la saturazione del suolo, lo scioglimento delle nevi così come l’altezza dell’isoterma di zero gradi. Le piogge che scatenano il fenomeno sono classificabili a seconda della quantità, della durata e dell’intensità.

La complessità delle alluvioni

Le alluvioni sono generate da una complessa interazione tra la predisposizione di base, le condizioni variabili e l’evento scatenante, come evidenziato dall’esempio del bacino idrografico del Kander (nell’Oberland bernese): a partire dal 1999 possiamo osservare una maggiore frequenza di grandi alluvioni, le cui punte sono superiori a quelle degli eventi registrati in precedenza (Fig. 21). Spontaneamente si potrebbe ipotizzare che la causa di tutto ciò possa essere il cambiamento di uno solo dei tanti fattori scatenanti. Un’analisi più precisa mostra però che l’ipotesi non è giusta (Fig. 22). La maggiore intensità delle alluvioni è il risultato della combinazione di diversi fattori. Nel 1999 (cfr. p. 8) e nel 2011 (cfr. p. 10) lo scioglimento delle nevi ha contribuito in maniera sostanziale al deflusso delle piene. In occasione della piena del 2005 – la più importante dal 1903 ad oggi – la quantità di rovesci riversatasi su tre giorni era molto grande. Durante l’evento del 2007, anch’esso verificatosi in agosto, le precipitazioni sull’arco di un giorno furono intense, ma grazie all’isoterma di zero gradi relativamente bassa, in quota le precipitazioni si manifestarono sotto forma di neve così che non tutto il bacino idrografico ha contribuito alla formazione dei deflussi della piena. L’alluvione del 1987 mostrata nella Fig. 22 si distingue chiaramente dalle altre. Il suolo all’inizio dell’evento era meno saturo e le precipitazioni scatenanti meno intense. Tuttavia l’isoterma di zero gradi era situata molto in alto.

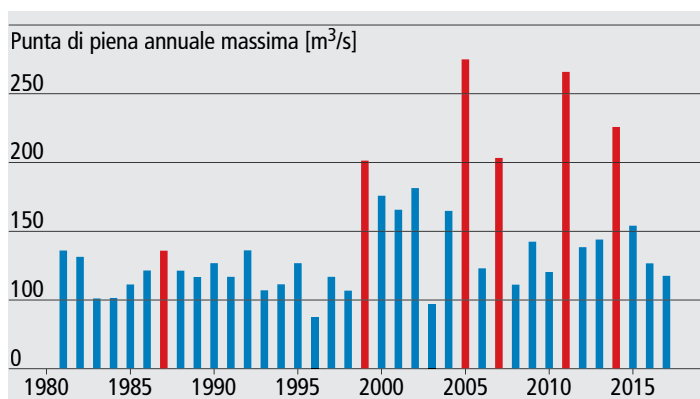


Fig. 21: Punta massima annuale delle piene per il fiume Kander. Rosso: piene analizzate nella Fig. 22.

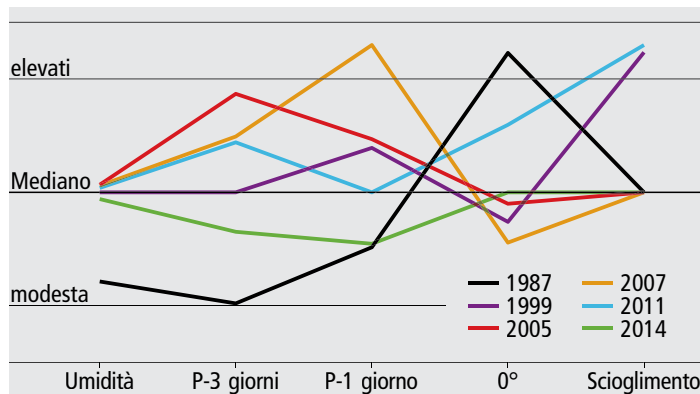


Fig. 22: Condizioni variabili e fattore scatenante per le maggiori piene del Kander (cfr. Fig. 21). Umidità: saturazione del suolo all’inizio dell’evento; P-3 giorni, P-1 giorno: Quantitativo di precipitazioni su 3 e rispettivamente 1 giorno; 0°: Quota dell’isoterma di zero gradi; Scioglimento: Contributo dello scioglimento delle nevi.

Una complessa interazione di più fattori è dunque alla base della formazione delle piene. Le alluvioni più forti si verificano quando la costellazione di fattori si delinea in maniera particolarmente sfavorevole, vale a dire quando le precipitazioni scatenanti si riversano su un suolo già saturo, quando l’isoterma di zero gradi durante l’evento è situato a quote elevate e quando lo scioglimento delle nevi contribuisce alla formazione delle piene.

La precipitazione scatenante

Diezig⁴¹ ha analizzato e studiato le precipitazioni scatenanti delle maggiori piene in 39 bacini idrografici svizzeri, per un totale di più di 1000 eventi su un arco temporale compreso tra il 1974 e il 2003. Circa un terzo delle precipitazioni scatenanti sono durate tra le 12 e le 24 ore e hanno mostrato un’intensità [mm di pioggia per ora] relativamente alta. Queste «piogge brevi» sono dunque molto importanti per scatenare un’alluvione. Il 20% circa degli eventi fu scatenato da «piogge durature» o rispettivamente da rovesci. Le prime durano due o più giorni e sono abbondanti. I rovesci sono generalmente di breve durata (minuti o poche ore) e si verificano soprattutto in caso di temporali. La loro intensità varia da forte a molto forte.

La figura 23 offre una panoramica sulla distribuzione spaziale dei vari tipi di precipitazione. Nella regione prealpina i rovesci rivestono un ruolo significativo, poiché in questa regione i temporali sono frequenti. Le «piogge durature» sono molto importanti nella regione delle Alpi centrali e anche in Ticino. È sorprendente notare che il tipo più frequente, vale a dire le «piogge brevi», hanno sull’arco alpino un’importanza solamente secondaria. Nel Giura possiamo trovare anche i cosiddetti eventi di «pioggia sulla neve»: quando la pioggia cade su un già esistente manto nevoso, attraverso l’immissione di calore di fusione possono essere attivate ulteriori masse d’acqua. La combinazione di precipitazioni scatenanti e dello scioglimento delle nevi ha causato nel maggio 1999 grosse alluvioni nella regione alpina, che però hanno potuto verificarsi unicamente grazie a un’eccezionale interazione di diversi fattori variabili: le basse temperature protrattesi fino ad aprile avevano impedito lo scioglimento di una quantità di neve superiore alla media; in seguito l’arrivo del calore aveva dato inizio allo scio-

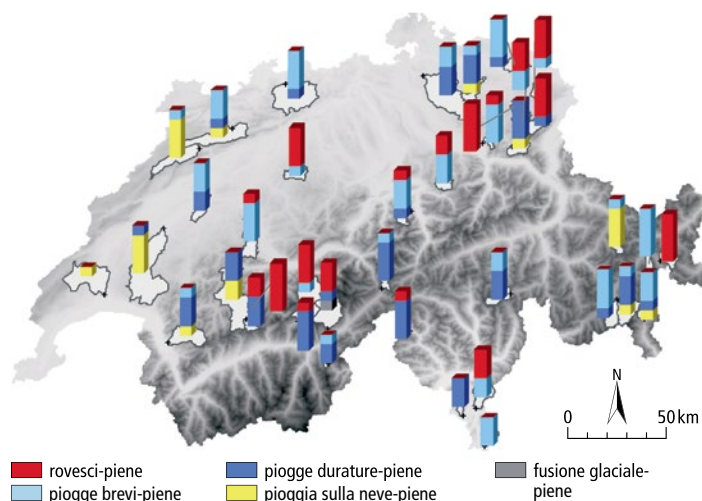


Fig. 23: Frequenza ponderata del tipo di precipitazione scatenante nei bacini idrografici selezionati. Per la ponderazione, ai tipi di precipitazione che portano a piene più importanti è attribuito un peso maggiore rispetto a quelli che causano piene più piccole.

glimento delle nevi che ha poi condotto alla saturazione del suolo. Questa combinazione di fattori da sola non sarebbe tuttavia bastata per causare le grosse alluvioni, come dimostra l'anno 2018. Fu grazie alle relativamente intense «piogge durature» che nel maggio 1999 si arrivò a elevati picchi di piena e all'esonazione dei laghi (per esempio del Lago di Thun). La partecipazione dello scioglimento delle nevi alla creazione dei deflussi variò a seconda dei bacini idrografici dal 15 al 30%.⁴²

Il ruolo dell'isoterma di zero gradi

Nella regione alpina, buone conoscenze della predisposizione di base e dell'intensità delle precipitazioni scatenanti bastano solo parzialmente per prevedere o valutare un'inondazione. Un ruolo fondamentale è in questo senso giocato dall'altezza dell'isoterma di zero gradi. Essa determina in che area le precipitazioni si manifesteranno sotto forma di pioggia e avranno dunque un effetto sui deflussi. Per ciò che riguarda per esempio il fiume Kander, piene importanti possono verificarsi unicamente quando piove su almeno l'80% del bacino idrografico. Questo accade quando l'isoterma di zero gradi raggiunge almeno i 2400m s.l.m..

In Svizzera, l'isoterma di zero gradi è salita dal 1961 al 2016 in maniera significativa per ogni stagione. L'aumento totale varia dai 200m in autunno ai 400m in primavera e in estate.⁴³ In questo modo, le condizioni variabili per le alluvioni sono generalmente salite. Un ulteriore aumento delle temperature comporterà non solo un'ascesa dell'isoterma di zero gradi, bensì anche un incremento dell'intensità delle precipitazioni (cfr. p. 44). Con il riscaldamento climatico i fattori importanti per la formazione delle piene vengono modificati in maniera sfavorevole. Il tema delle piene e delle alluvioni sarà dunque d'attualità anche in futuro.



Fig. 24: L'alluvione del maggio 1999 a Berna.

Le condizioni variabili nel 1868

L'evento del 1868 fu preceduto da un settembre piovoso, che esaurì la capacità di stoccaggio d'acqua nel suolo e portò, a partire da metà settembre, a un sensibile aumento del livello del lago (cfr. Fig. 34). Nel settembre 1868 il lago raggiunse in questo modo il sesto livello più alto mai registrato nel mese di settembre. Per quel che riguarda la saturazione del suolo non disponiamo di documentazione, tuttavia le modellazioni idrologiche³² confermano l'ipotesi formulata in precedenza di un esaurimento della capacità di stoccaggio verso la fine di settembre 1868.

A queste condizioni preliminari di grande umidità si aggiunsero a fine settembre e a inizio ottobre due grandi eventi di precipitazione, con quantità giornaliere di pioggia al di sopra delle massime stagionali registrate da lunghi anni a quella parte (cfr. p. 21), che a causa dell'isoterma di zero gradi costantemente situato ad alte quote (Fig. 25) confluirono interamente nei deflussi. Aspetto positivo per l'evento del 1868, è invece il ruolo minimo giocato dallo scioglimento delle nevi. Nonostante le temperature positive fino in quota, questo fenomeno influi in maniera molto marginale, poiché non rimanevano resti significativi di neve dall'inverno precedente e l'evento in sé non portò alcuna precipitazione di carattere nevoso che potesse essere rilevante.

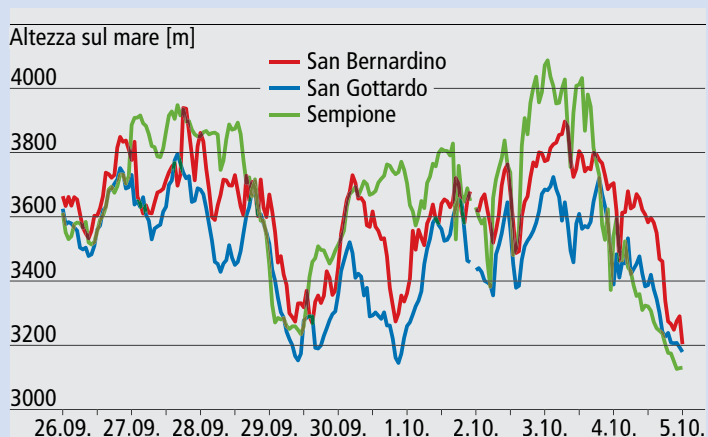


Fig. 25: Isoterme di zero gradi i per tre luoghi¹ e ricostruiti tramite modelli climatici regionali (cfr. p. 26) indicano tra la fine di settembre e l'inizio di ottobre 1868 altezze elevate.³²

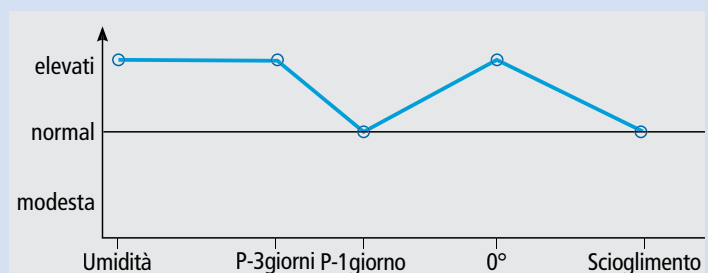


Fig. 26: Rappresentazione schematica dell'impatto dei fattori variabili (Fig. 22) sull'alluvione del 1868.

Documenti sul 1868 e su altre alluvioni storiche

Fonti scritte e iconografiche, così come mappature, iscrizioni, segni e tracce lasciati dalle acque alte fanno parte delle testimonianze storiche più dettagliate delle alluvioni del passato. Ci forniscono informazioni sulla percezione della popolazione colpita e sulle misure preventive e di aiuto che sono state adottate.

Le più importanti alluvioni che hanno colpito la Svizzera a partire dalla fine del Medioevo sono ricostruibili in primo luogo a partire da documenti storici. Fanno parte di quest'ultimi le fonti prodotte dall'uomo senza l'ausilio di strumenti di misurazione. I dati documentali si lasciano a loro volta suddividere in più gruppi a seconda del contesto della loro creazione, del mezzo di pubblicazione e delle loro intenzioni.

Da un lato ci sono le fonti individuali, dall'altro invece quelle amministrative e seriali. Il primo gruppo comprende le notizie nelle cronache e nei giornali e i documenti personali come le lettere e le cartoline, scritte direttamente sulla base di opinioni e osservazioni personali, oppure rielaborando i resoconti rilasciati da terzi. A seconda dei casi si può trattare di brevi notizie sulla portata o sulle conseguenze dell'evento, ma anche di rapporti dettagliati, come resoconti della situazione generale pubblicati sotto forma di libro dalle popolazioni toccate dall'evento.^{3,35} Per la ricerca sulle alluvioni queste fonti offrono informazioni rilevanti soprattutto per sapere fino a che punto si sono spinte le acque alte, quali danni sono stati subiti, quali misure preventive e di gestione sono state adottate, ma anche come sono state ricercate le cause dell'evento. Fanno parte dell'altro gruppo le fonti seriali e amministrative, pubblicate su lunghi lassi di tempo e normalmente per ragioni tecniche e amministrative e che dunque mantengono la loro struttura e il loro carattere su più decenni o addirittura secoli. Gli autori erano impiegati amministrativi che si sono occupati di questi libri contabili per più anni, per poi cederli ai loro successori. Le spese per la riparazione dei ponti e la costruzione di protezioni dopo le alluvioni erano documentate meticolosamente, di settimana in settimana, nel libro delle spese settimanali di Basilea e nei libri di conto tenuti dai cassieri di Friburgo e di Soletta.⁴⁴

Le fonti si contraddistinguono anche a seconda del mezzo di pubblicazione: se le cronache scritte a mano nei conventi o anche nelle città servivano principalmente alla memoria individuale del solo gruppo che aveva accesso a queste scritture, i fogli volanti dell'età moderna e successivamente le notizie dei giornali, sempre più numerosi a partire dal XVIII secolo, si rivolgevano invece sin dall'inizio all'intera opinione pubblica alfabetizzata. Più un evento era spettacolare, drammatico, unico e catastrofico, più i giornali gli dedicavano spazio e lo raccontavano nei dettagli. Nel corso del XIX secolo i giornali non erano più solamente dei media per raccontare gli avvenimenti, coinvolgendo tra l'altro anche le sorti dei singoli, ma diventarono anche importanti piattaforme per lanciare appelli di donazione (Fig. 27). Viceversa, gli stessi giornali pubblicavano anche la lista dei benefattori che con le loro donazioni avevano contribuito ad alleviare i danni materiali subiti. Ben presto, anche i politici si resero conto che una loro apparizione sui luoghi delle catastrofi poteva aumentare la loro popolarità e queste apparizioni erano rese pubbliche dalle notizie sui giornali. Gli articoli di giornale sono le fonti più importanti e dettagliate di cui disponiamo per le alluvioni del XIX secolo e in particolare per l'evento del 1868, ma nell'utilizzarli bisogna analizzare anche il loro contesto di pubblicazione: gli eventi più sensazionali tendono a essere enfatizzati, mentre quelli meno spettacolari non sono quasi presi in considerazione o sono citati solo marginalmente.

Un altro fondamentale gruppo di fonti sono le disposizioni legali riguardanti la gestione delle alluvioni e le misure preventive, ad esempio la protezione delle foreste in montagna. Esse erano in regola promulgate qualche anno dopo gli eventi estremi, ma erano direttamente riconducibili a quest'ultimi (cfr. p. 38). A ciò vanno aggiunte le direttive regionali volte a gestire la catastrofe direttamente sul luogo, per esempio per la regolazione del traffico provvisorio in caso della distruzione di ponti oppure per l'approvvigionamento d'acqua potabile.

Fanno parte dei documenti storici non solamente registrazioni scritte, bensì anche immagini di vari tipi. Con l'instaurazione delle correzioni fluviali nel XVIII e nel XIX secolo e grazie alla realizzazione di una cartografia precisa nella forma dei cosiddetti catasti, furono registrate le vecchie e le nuove portate dei fiumi, elaborati i profili di sezione dei fiumi e creati precisi disegni progettuali per i ponti, per i quali era fondamentale stabilire nuovamente una precisa analisi idrologica delle

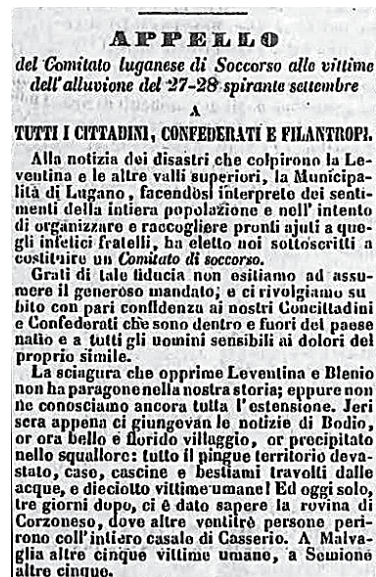


Fig. 27: Appello d'aiuto lanciato dal neofondato Comitato luganese di Soccorso a sostegno delle vittime delle alluvioni in Leventina e nella Valle di Blenio. A esso si aggiunge un rapporto della situazione nelle regioni maggiormente colpite. Nel testo si riferisce come la portata dei danni e delle distruzioni cominci ad essere nota solamente tre giorni dopo all'accaduto. Gazzetta Ticinese del 1. ottobre 1868: p. 897.

portate medie, dei periodi di punta e del materiale solido di fondo.⁴⁵ Le alluvioni e i relativi danni furono raffigurati anche in dipinti, in disegni e in calcografie (Fig. 28), quest'ultime utilizzate sempre più a partire dal tardo XIX secolo come illustrazioni sui giornali. La tecnica della fotografia era già disponibile a partire dalla fine degli anni 1830, ma i lunghi tempi di esposizione necessari non la rendevano adatta a immortalare movimenti come lo scorrere delle acque in caso d'inondazioni. Le prime fotografie dell'alluvione del 1868 (cfr. Fig. 1) sono dunque scattate come in uno studio. Solamente a partire dalla metà degli anni 1880 il tempo di esposizione delle camere professionali fu ridotto a sufficienza per poter ritrarre le acque in movimento oppure gli uomini impegnati nei lavori di sgombero e di bonifica. Solamente poco prima dell'inizio del Novecento la tecnologia di stampa fu in grado di permettere l'integrazione di fotografie nei giornali.

Una pratica al limite delle misurazioni strumentali dell'altezza delle acque e delle forti precipitazioni (cfr. p. 21) sono i segni fatti dall'uomo nel corso di più secoli per indicare il livello raggiunto dalle acque alte su edifici privati e pubblici, chiese, torri cittadine e ponti. A causa dei numerosi interventi antropogenici sui corsi d'acqua e in funzione dell'utilizzo del territorio nei bacini idrografici, queste tracce oggi non hanno una rilevanza solamente parziale per i calcoli idrologici, ma possono essere interpretate come segni di una cultura della memoria vissuta in maniera attiva. La loro presenza nella quotidianità ricordava alla popolazione i possibili rischi del vivere in riva a un fiume o a un lago. Nel corso del XX secolo, i segni delle piene scomparvero progressivamente o non furono rinnovati nel caso di ristrutturazioni

di vecchie case, in alcuni casi per non ridurre il valore dell'immobile. Le grandi alluvioni dell'ultimo quarto del XX secolo e dell'inizio del XXI mostrano però chiaramente come la cultura della memoria abbia ancora un significato importante. Oggi essa si manifesta sotto forma di blogs⁴⁶ o per esempio con la piattaforma di recente attivazione «Kollektives Überschwemmungsgedächtnis» (memoria collettiva delle

inondazioni). Esperti, così come i non addetti ai lavori, possono contribuire al progetto caricando fotografie storiche o attuali di piene e alluvioni.

Il 1868 nei documenti storici

La densità di documenti a disposizione a proposito delle alluvioni del 1868 è eccellente, ma non offre lo stesso livello per tutte le regioni colpite. Per il Canton Grigioni abbiamo trovato due pubblicazioni quasi contemporanee redatte da esperti ben informati e che affrontano sia gli aspetti tecnici e idrologici, sia le strategie di gestione, le misure di aiuto e le opere di beneficenza. L'ispettore forestale cantonale grigionese Johann Coaz, che più tardi diventò esperto responsabile federale per le questioni del rimboschimento e della protezione contro le valanghe, riassunse in tre rapporti, pubblicati sotto forma di libro nel 1869, i suoi viaggi d'ispezione nelle regioni del Reno Posteriore e Anteriore.³⁵ Le conseguenze dell'alluvione sono descritte in maniera precisa e anche illustrate tramite tavole iconografiche. Mentre Johann Coaz si occupava delle questioni idrologiche e dello stato delle foreste sulle montagne (cfr. p. 29), Johann Arpagaus si focalizzò nel suo libro pubblicato nel 1870 principalmente sui danni materiali subiti dai singoli comuni.³ Egli espose approfonditamente le misure di aiuto e pose l'accento sulle opere di beneficenza create all'interno della regione, promosse nel resto della Svizzera e anche all'estero. Discussioni tecniche sull'accaduto furono condotte su riviste scientifiche come la «Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen», su opuscoli e in rapporti stampati.

I giornali regionali e sovregionali dell'autunno 1868 sono vere e proprie miniere di informazioni per la ricostruzione dell'alluvione e dei suoi effetti, eppure la ricerca in questo campo è ben lungi dall'essere conclusa. Le redazioni ricostruirono le loro notizie sulla base di una rete di informatori ufficiali e sui riscontri registrati tra la popolazione. A causa della distruzione delle infrastrutture dei trasporti, gli eventi intercorsi in regioni remote potevano essere riferiti e raccontati solamente con molti giorni di ritardo (Fig. 27). L'aggiunta d'illustrazioni ai contributi giornalistici non era allora ancora usuale in virtù di motivi di tecnica di stampa.

Rapporti interni, liste dei danni, consulenze di esperti e la corrispondenza tra i vari responsabili sono conservati nell'Archivio federale e negli archivi cantonali dei Cantoni toccati dal disastro e permettono di ricostruire con precisione le procedure amministrative della gestione dell'alluvione. Abbondante è il fondo del Comitato centrale federale di Aiuto per il periodo 1868–1870, comitato che fu incaricato per le azioni di aiuto nel 1868 e che coordinò le misure a livello svizzero.⁴



Fig. 28: L'inondazione del 1868 ad Au (SG)¹ (acquarello). A sinistra è illustrato il ponte ferroviario rimasto danneggiato. Le immagini considerate affidabili e contemporanee agli avvenimenti possono illustrare gli effetti delle inondazioni nella valle del Reno molto meglio rispetto a fonti scritte, soprattutto quando sono combinate con altre immagini che ritraggono invece dei dettagli – per esempio come la fotografia di Lustenau vista in precedenza (Fig. 1, sull'acquarello Lustenau si trova sullo sfondo a sinistra). Tuttavia non è chiaro se l'immagine mostri il livello più alto raggiunto dalle acque oppure se – soprattutto in virtù dei lavori di sgombero già iniziati – le acque si stessero già abbassando.

Lunghe serie di misurazioni

Ricerca, valutazione dei rischi, monitoraggio, allertamento: diversi campi di applicazione necessitano di dati e misurazioni sulle precipitazioni intense e le piene. La Svizzera dispone oggi di una fitta rete di misurazione sia per le precipitazioni sia per i deflussi. Fino a che punto possiamo però accedere a misurazioni effettuate nel passato per studiare e analizzare eventi storici?

Misurazione delle precipitazioni

Le precipitazioni variano su una piccola scala spaziale. È dunque importante disporre di una buona densità spaziale di stazioni. La rete svizzera di misurazioni delle precipitazioni è attualmente gestita da MeteoSvizzera. Oltre alle tradizionali stazioni meteorologiche automatiche ci sono anche una fitta rete di stazioni di misurazione delle precipitazioni manuali e automatiche (Fig. 29), di altre stazioni di misurazione cantonali e private e le misure ricavate dai radar (cfr. p. 22).

In passato la densità di stazioni era inferiore ad oggi. L'evento del 1868 si è verificato in un periodo precedente alla costruzione di una rete di misurazioni delle precipitazioni, ma dopo rispetto all'istituzione di una rete meteorologica svizzera. Disponiamo dunque di misurazione realizzate da stazioni meteorologiche tradizionali. La realizzazione di una rete aggiuntiva di stazioni di misurazioni delle precipitazioni iniziò negli anni 1880 e raggiunse nell'anno 1900 il numero di 247 stazioni. Le precipitazioni erano rilevate quotidianamente (in regola alle 6 del mattino circa).

Per la misurazione delle precipitazioni ci furono per lungo tempo unicamente strumenti manuali. Una misurazione automatica e precisa non è una cosa banale. La figura 30 a sinistra raffigura una stazione di misurazione automatica. Il dato misurato dipende fortemente dai venti locali e dalle turbolenze in prossimità del pluviometro. Tali errori di misurazione influenzano la stabilità delle misure sul lungo termine. Anche piccoli cambiamenti nei pressi di una stazione possono influenzare le misurazioni e per esempio condurre a una variazione nei dati.

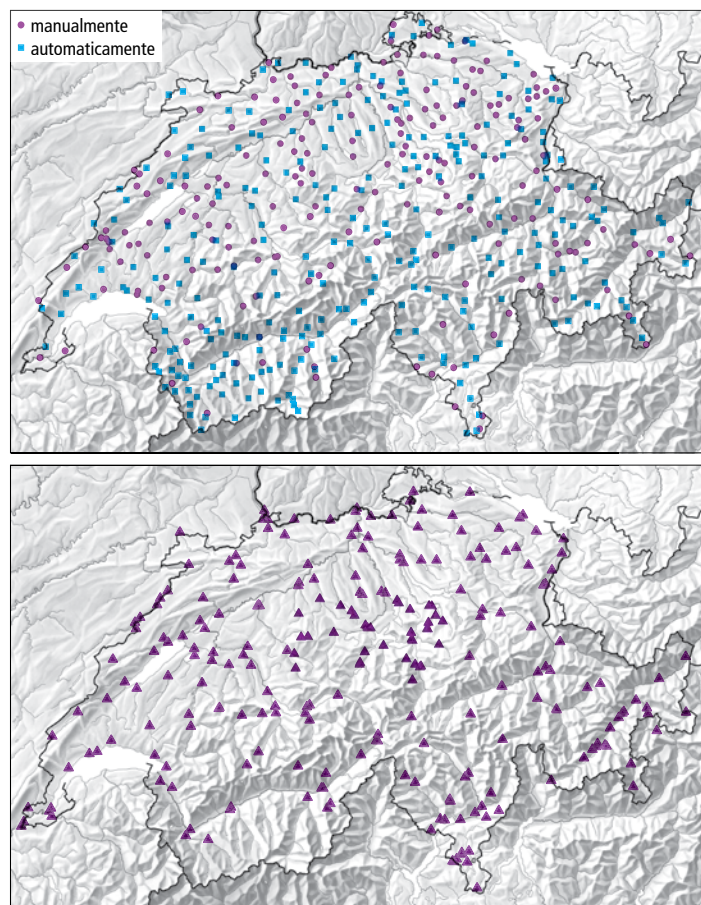


Fig. 29: La rete svizzera di misurazione. Sopra: Stazioni manuali e automatiche di rilevamento delle precipitazioni di MeteoSvizzera (stato al 2017). Sotto: Stazioni di misurazione idrometriche dell'UFAM.



Fig. 30: A sinistra: Misurazione delle precipitazioni alla stazione meteorologica di Zollikofen; a destra: Stazione idrometrica Liène-Tseuzier.

Grazie all'ausilio di metodi statistici, per esempio tramite il confronto di stazioni vicine, tali variazioni possono essere corrette per lo meno su base mensile. I dati mensili corretti con questo metodo mostrano per ricostruzione la distribuzione delle precipitazioni nei mesi di settembre e ottobre 1868 (Fig. 31).

Misurazione dei deflussi

Le stazioni di misurazione dei deflussi sono gestite dall'Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM). In circa 260 punti sono misurate le portate dei fiumi e rispettivamente i livelli dei laghi. La misurazione sistematica iniziò in Svizzera verso la metà del XIX secolo. Queste lunghe serie hanno un'importanza centrale proprio per la protezione contro le piene dei corsi d'acqua. Le stazioni per la misurazione delle portate sono esaminate settimanalmente e tarate fino a sei volte all'anno.

Per la determinazione della portata dei deflussi sono misurati i livelli dell'acqua e la velocità del flusso. La portata è in seguito stabilita in funzione del rapporto tra livello e deflusso oppure determinata direttamente con un'analisi volumetrica tramite uno stramazzone triangolare (vgl. Fig. 30). Il livello dell'acqua è misurato tramite i livelli registrati con delle sonde a pressione oppure senza contatto con l'ausilio di un radar; la velocità di deflusso invece tramite eliche idrometriche o sensori acustici.

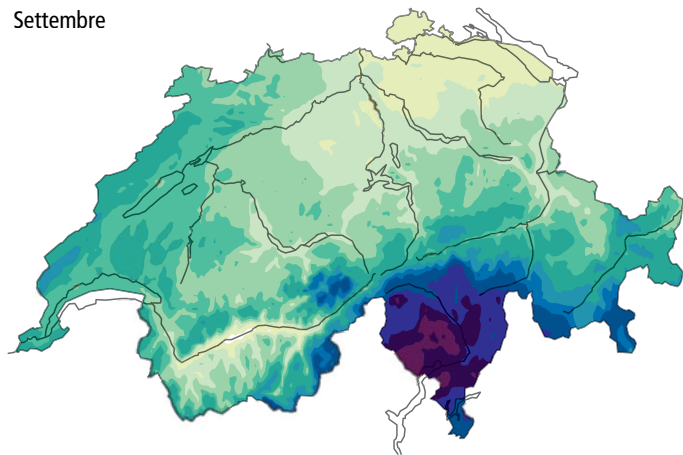
I dati sulle precipitazioni e le portate sono stati per lungo tempo annotati su carta e archiviati (Fig. 32). Nel corso degli ultimi decenni, essi sono invece stati raccolti elettronicamente – i dati precedenti sono stati parzialmente registrati elettronicamente a posteriori, ma non in maniera completa, così che per i periodi più antichi molti dati esistono solamente in forma cartacea. Una digitalizzazione di questi dati storici permetterebbe una migliore ricostruzione degli eventi naturali estremi

L'Atlante idrologico della Svizzera HADES

«L'Atlante idrologico della Svizzera» HADES (atlanteidrologico.ch) è un lavoro collettivo sull'idrologia svizzera che da più di trent'anni a questa parte mette a disposizione di un'ampia cerchia di utenti informazioni idrologiche di base, conoscenze speciali e materiale didattico. Oltre alle originali carte con 63 tavole stampate, l'Atlante idrologico include un'ampia gamma di prodotti come guide escursionistiche e materiale per l'insegnamento.

intercorsi nel passato. Con tali dati a disposizione si potrebbero effettuare confronti con gli eventi attuali e ulteriori classificazioni. L'UFAM e MeteoSvizzera mettono a disposizione una piattaforma pubblicamente accessibile che rende possibile la classificazione delle precipitazioni estreme: www.climate-extremes.ch.

Settembre



Ottobre

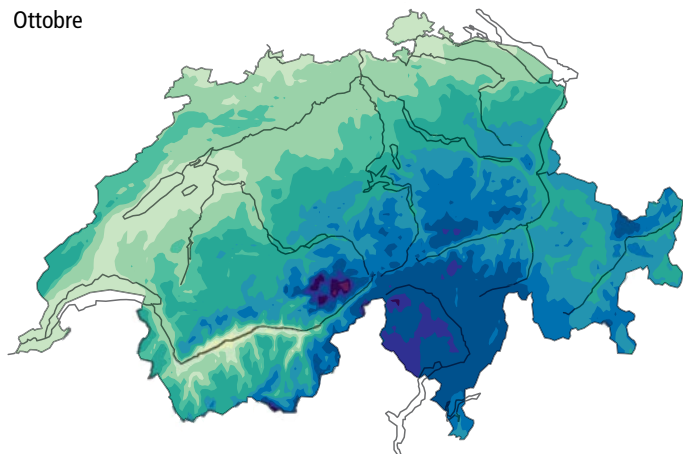


Fig. 31: Somma mensile delle precipitazioni nel settembre e nell'ottobre 1868.⁴⁷

Jahr 1868		Monat Oktober		Thermometer.	Barometer.	Windrichtung und Stärke.	Zug der Wolken.	Bevölkerung.	Witterungs-Charakter.	Ombrometer.	Hydrometeore.
Tag.	Stunde.	Trocken.	Feucht.								
1	7	15,6	12,2	14,5	685,0	0	11	11		1,85	Regen
1	1	15,6	14,5	15,0	682,5	1	11	11		1,85	Regen - Nebel
1	9	14,8	13,7	15,1	684,8	0	10	10	ganz bedeckt	1,85	Regen - Nebel
2	7	14,6	12,0	14,5	685,7	0	10	10		2,46	Regen
2	9	15,6	13,5	15,0	686,5	10	8	8	bedeckt	2,46	Regen
3	7	16,3	14,0	15,0	685,8	11	10	10		2,70	Regen
3	1	16,1	15,1	15,1	685,8	12	10	10		2,70	Regen
3	9	15,0	12,0	15,1	685,1	10	10	10	ganz bedeckt	2,70	Regen
4	7	15,2	11,8	15,0	683,0	0	10	10		2,49	Regen, fog. ab.
4	1	13,6	12,0	14,5	681,1	0	10	10		2,49	Regen
4	9	13,8	12,0	14,0	681,0	0	10	10	ganz bedeckt	2,49	Regen - Nebel
5	7	18,0	8,9	14,0	684,5	0	2	2		1,30	
5	1	14,2	12,1	15,0	687,0	0	9	9		1,30	

Fig. 32: Misurazioni meteorologiche nell'ottobre 1868 alla stazione di Brusio¹ (la colonna «Ombrometer» indica la quantità giornaliera di precipitazioni).

L'evento del 1868 nelle misurazioni

Sebbene l'evento si sia verificato in una delle prime fasi dello sviluppo delle reti di misurazione (cfr. p. 23), esisteva già allora, un numero rispettabile di stazioni di misurazione delle precipitazioni, anche in rapporto al numero di stazioni presenti a livello internazionale, permettendo dunque l'analisi di alcuni aspetti dell'evento direttamente a partire da dati di misurazioni.¹² Ci furono due fasi con estremi quantitativi di precipitazioni sull'arco di più giorni (Fig. 33 e 34). In data 28 settembre 1868, alla stazione di San Bernardino Ospizio¹, circa 2000 m s.l.m., furono misurati 254 mm di precipitazione giornaliera, vale a dire il più alto livello mai registrato in quella stazione, e anche i quantitativi su 5 giorni si attestarono su livelli record. Il valore massimo durante la seconda fase fu raggiunto il 3 ottobre con i 170 mm registrati a Platta¹ non lontano dal Passo del Lucomagno. Sull'arco delle due fasi (otto giorni), la pioggia registrata sul Passo del San Bernardino ammontò incredibilmente a 1118 mm – un valore superiore alle precipitazioni annuali a Berna.

Anche il livello del Lago Maggiore¹ era misurato. La figura 34 mostra come le acque del lago fossero già sensibilmente alte prima dell'evento principale. Le acque rimasero alte per 3 settimane. La piena del 1868 causò il più alto livello mai registrato per questo lago.

03.10.1868

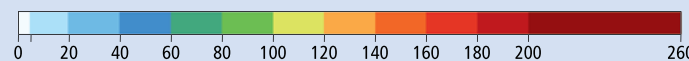
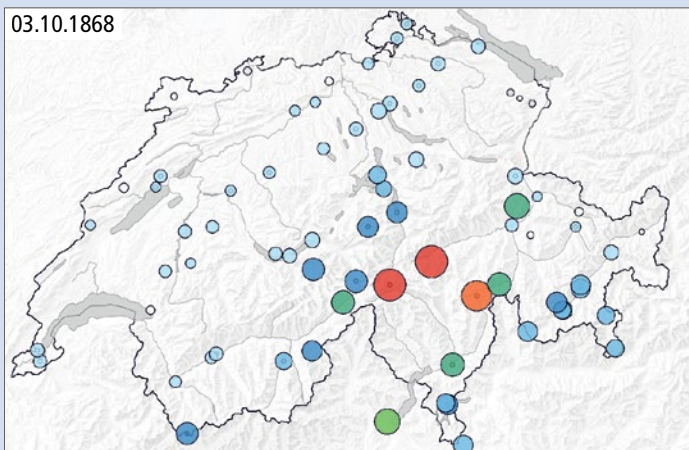


Fig. 33: Misure della quantità giornaliera di precipitazioni (mm o litri per metro quadrato sull'arco di 24 ore) in Svizzera il 3 ottobre 1868.^{12,32}

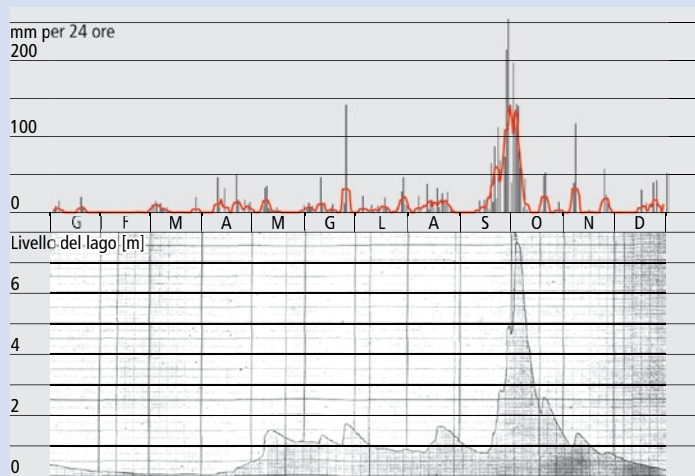


Fig. 34: (Sopra) Somma giornaliera (barre) e somma sui 5 giorni (linea rossa) delle precipitazioni per la stazione San Bernardino Ospizio alla quota del Passo. (Sotto) Livello del Lago Maggiore a Verbania, 1868.⁴⁸

Dalle immagini radar all'allerta per le piene

Per emanare allerte rapide e precise per precipitazioni intense, alluvioni e inondazioni è indispensabile disporre d'informazioni sulle precipitazioni in tempo reale e con un'ampia estensione spaziale e temporale.

In Svizzera, le precipitazioni sono misurate continuamente in tempo reale e in maniera automatica grazie alle stazioni meteorologiche al suolo (cfr. p. 20) e ai radar meteo. In una topografia complessa, le precipitazioni misurate dai pluviometri al suolo sono rappresentative solamente per le zone strettamente limitrofe. La rete di radar di MeteoSvizzera è composta da cinque stazioni radar completamente automatiche equipaggiate di tecnologia Doppler e Dual-Polarization e in grado di rilevare in tempo reale un'immagine dettagliata e tridimensionale delle precipitazioni e delle celle temporalesche sulla Svizzera e sulle zone limitrofe (Fig. 35).^{49,50} A partire da questi dati si può stabilire una cartina degli indici di precipitazione al suolo.^{51,52}

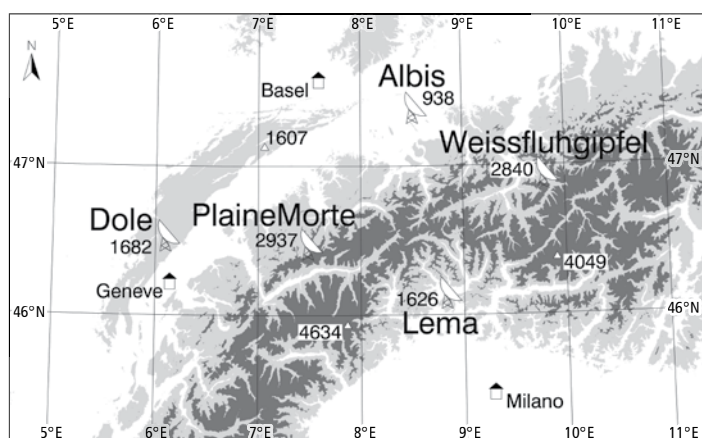


Fig. 35: La rete radar di MeteoSvizzera con le sue cinque stazioni su La Dôle¹ (dal 1959), l'Albis¹ (dal 1959), il Monte Lema¹ (dal 1993), la Pointe de la Plaine Morte¹ (dal 2014) e il Weissfluhgipfel¹ (dal 2016).

Un radar emette onde elettromagnetiche nell'atmosfera. Esse sono respinte di nuovo verso il radar quando incontrano precipitazioni o temporali e il radar, alla loro ricezione, misura l'energia ricevuta in funzione della distanza, dell'azimut e del grado di elevazione. La retro-diffusione delle onde è causata da gocce di pioggia, fiocchi di neve, grandine, gragnola e cristalli di ghiaccio, ossia tutte le cosiddette idrometeorie, ma anche da aeroplani, uccelli e insetti. Quando un'onda radar incontra una montagna anche in questo caso una parte dell'energia è riflessa indietro. Una laboriosa operazione permette di filtrare questi echi di disturbo che ritornano al radar e alla fine rimangono solamente gli echi meteorologici. Il rapporto tra l'energia emessa e quella ritornata permette di calcolare l'intensità delle precipitazioni. Il raggio radar emesso dall'antenna ha un'ampiezza di un solo grado e

permette dunque un rilevamento dettagliato dei sistemi di precipitazioni e temporaleschi. Per scannerizzare l'atmosfera verticalmente fino a un'altezza di 18 chilometri e orizzontalmente fino a una distanza di 246 chilometri, l'antenna gira su sé stessa seguendo uno schema fisso e compie 20 giri completi ogni 5 minuti. I dati raccolti dalle cinque stazioni radar sono trasmessi al calcolatore centrale, che li assembla per stabilire le mappe di precipitazione, per elaborare le allerte grandine e temporale e inviarle infine ai numerosi utilizzatori. Fanno parte di questi il controllo del traffico aereo, la protezione della popolazione dai rischi naturali, i settori assicurativi ed energetici, il tempo libero e molti altri. I dati radar sono aggiornati ogni 2,5 minuti e hanno una risoluzione spaziale di 1 chilometro. Da ciò emerge un'immagine dei cambiamenti nello spazio e nel tempo delle precipitazioni e dei sistemi temporaleschi (Fig. 36 sopra a destra). Grazie all'impiego delle tecnologie Doppler e Dual-Polarization e ad una raffinata programmazione informatica, il radar può fare la distinzione tra gli echi di gocce, fiocchi di neve, chicchi di grandine, cristalli di ghiaccio, insetti, uccelli, aeroplani e montagne e oltre alla localizzazione delle precipitazioni è in grado di determinare anche l'intensità delle stesse e dei venti.

Per ottenere determinare in modo ottimale la quantità di precipitazione al suolo, i dati radar (Fig. 36 sopra a destra) sono statisticamente combinati in tempo reale (Fig. 36 sotto a sinistra) con le misurazioni delle stazioni al suolo (Fig. 36 sopra a sinistra).⁵³ La combinazione di dati radar, dati satellitari, dati sulla localizzazione dei fulmini e dati ricavati dai modelli costituisce la base per la previsione a corto termine di precipitazioni, temporali e grandine – il cosiddetto nowcasting.

Le previsioni delle precipitazioni per periodi di tempo più lunghi (più ore fino a più giorni) si basano su valutazioni di modelli numerici di previsione meteorologica. Questi modelli offrono informazioni capillari sulle precipitazioni (Fig. 36 sotto a destra). A tal fine, i modelli di previsione meteorologica risolvono le equazioni fisiche dell'atmosfera e utilizzano osservazioni basate sull'assimilazione dei dati (cfr. p. 24) per stabilire la descrizione più precisa possibile dello stato dell'atmosfera al momento iniziale della procedura di calcolo. Esistono comunque delle incertezze, poiché le osservazioni sono passibili di errore e non raffigurano lo stato dell'atmosfera in maniera dettagliata. Gli effetti di queste incertezze sulle previsioni numeriche sono quantificati con l'aiuto delle cosiddette previsioni di ensemble. Per una previsione di ensemble sono calcolate diverse previsioni numeriche a partire da condizioni e circostanze d'inizio leggermente differenti. Le differenze che emergono tra le singole previsioni d'ensemble forniscono informazioni sull'incertezza delle previsioni meteo.⁵⁴ La determinazione delle previsioni numeriche è effettuata con l'aiuto di supercomputer, ma ciononostante i tempi di calcolo richiesti sono così elevati, che solamente un numero limitato di previsioni possono essere calcolate.

Con le osservazioni radar e le informazioni ricavate dai modelli meteorologici possono essere emanate le allerte per precipitazioni intense e per le piene. Per esempio, le allerte a corto termine per precipitazioni intense e per straripamenti si basano sulla combinazione di misurazioni radar delle ultime ore con le previsioni delle precipitazioni delle ore seguenti.^{55,56} Per la stima dell'incertezza delle previsioni sono impiegati i metodi di previsione di ensemble.^{57,58} Questo tipo di allerte per le precipitazioni intense sono importanti per la gestione d'inondazioni locali nelle città o per la valutazione del pericolo di colate detritiche in montagna.

Le allerte per alluvioni per i giorni seguenti si basano sul calcolo delle precipitazioni dei modelli di previsione meteorologica. Queste stime sono date in entrata ai modelli idrologici numerici (cfr. p. 28) che a loro volta calcolano il trasferimento delle acque piovane attraverso il

suolo nei fiumi e nei ruscelli (Fig. 37).^{59,60} Per la determinazione delle superfici inondabili i modelli idrologici sono combinati con quelli idraulici (cfr. p. 30).⁶¹ I modelli idrologici forniscono migliori previsioni dei deflussi quando sono tarati in funzione della misurazione delle portate. A questo scopo è fondamentale disporre di valide informazioni qualitative sulle precipitazioni (radar, CombiPrecip e misurazioni al suolo).⁶² La figura 37 mostra per un periodo di maggio 2016 come i calcoli idrologici possano variare a seconda di quale prodotto informativo sulle piogge è utilizzato. Nel caso specifico, i migliori risultati rispetto alle osservazioni sono stati ottenuti con il prodotto Combi-Precip.

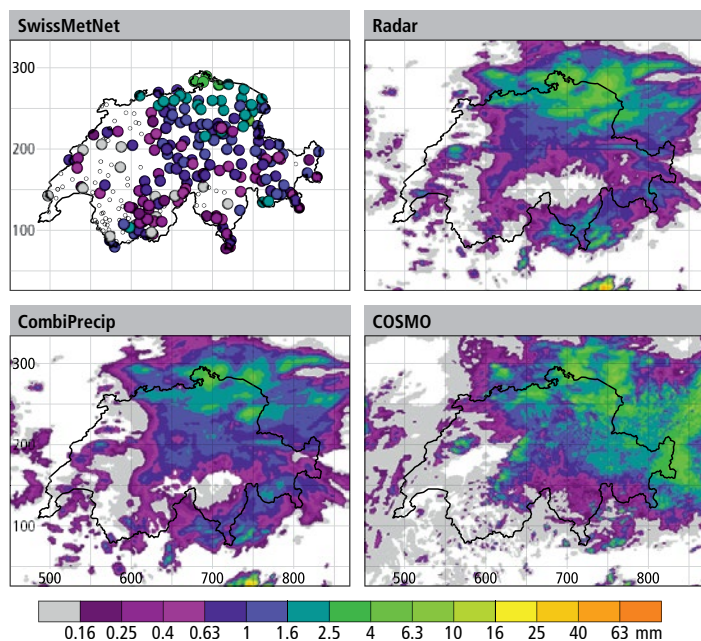


Fig. 36: Quantità di precipitazioni [mm] tra le 11 e le 12 UTC del 12 maggio 2016 misurate alle stazioni di SwissMetNet (sopra a sinistra); stimate dai radar (sopra a destra); stimate con la combinazione dei dati delle stazioni e dei radar (CombiPrecip, sotto a sinistra); nell'analisi del modello di previsione meteorologica COSMO (sotto a destra).

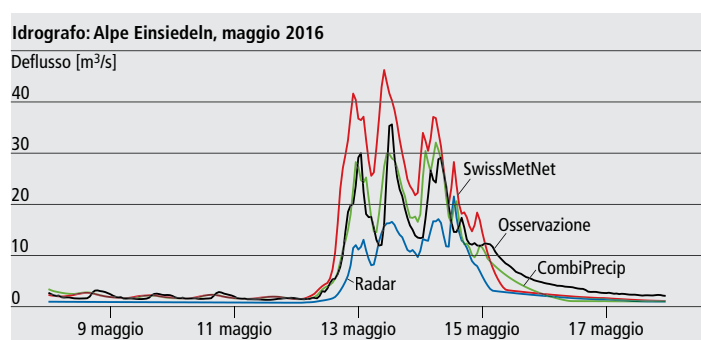


Fig. 37: Simulazione dei deflussi del fiume Alp nei pressi di Einsiedeln [$m^3 s^{-1}$] con il modello idrologico PREVAH per il periodo dall'8 al 17 maggio 2016. Sono utilizzati dati sulle precipitazioni a partire da tre prodotti diversi: dati SwissMetNet (in rosso), dati radar (in blu) e dati CombiPrecip (in verde).

Gli albori di MeteoSvizzera

La storia della rete di misurazione attualmente in vigore in Svizzera inizia nei primi anni 1860. Allora la Società Elvetica di Scienze naturali organizzava osservazioni meteorologiche sistematiche in tutto il Paese. A partire dal dicembre 1863 in circa 80 postazioni erano registrate tre volte al giorno la temperatura e la pressione così come la quantità giornaliera di precipitazione e altre grandezze ancora. L'idea dietro a questo progetto era che avendo a disposizione le medie e i valori estremi registrate su più anni, si sarebbe stati in grado di descrivere il clima in maniera migliore. A Zurigo fu creato un ufficio per la coordinazione del progetto: la Stazione centrale svizzera di meteorologia, predecessore dell'Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera.

Diversamente da oggi, l'istituzione non aveva inizialmente il compito di allertare in caso di pericoli meteorologici. Le sue competenze erano limitate, anche in occasione dell'evento del 1868, alla registrazione dei quantitativi della precipitazione. La variabilità spaziale poteva essere interpretata solo in modo impreciso. In questo contesto, l'evento del 1868 – assieme a quello del 1876 – diede grande slancio alla volontà di migliorare la rete di misurazione. Nel 1868 in tutta la Svizzera le precipitazioni erano misurate solo in 76 stazioni, nel 1900 erano già 380.

Progressivamente ci si pose la domanda, se la Stazione centrale, oltre alla raccolta dei dati climatologici, dovesse offrire anche previsioni meteorologiche. Alcune nazioni, in particolare quelle affacciate sul mare, disponevano già di servizi per l'allerta delle tempeste. Le loro centrali ricevevano ogni mattina per telegrafo i dati misurati dalle stazioni. Su una carta dell'Europa erano quindi segnate le regioni di alta e di bassa pressione e, alla luce dell'esperienza ricavata sul rapporto tra la distribuzione della pressione atmosferica e i venti, erano previsti gli sviluppi meteorologici per i giorni seguenti.

Le previsioni ricavate con questo metodo erano discutibili poiché mancavano di una solida base scientifica. Tuttavia, i fautori di questo progetto sostenevano che le previsioni fossero una necessità per l'agricoltura e altri settori che dipendevano dal tempo. Il Consiglio Federale approvò questa richiesta e ciò permise alla Stazione centrale di meteorologia di cominciare a stilare le proprie previsioni. A partire dal 1880 essa pubblicava quotidianamente un rapporto meteorologico sulla situazione attuale e sulle prospettive per il giorno seguente. Questo nuovo servizio incoraggiò la Confederazione a rilevare la Stazione centrale, fino ad allora nelle mani della Società Elvetica di Scienze naturali. A partire dal 1881, in Svizzera l'osservazione del clima e la previsione meteorologica sono un compito dello Stato.

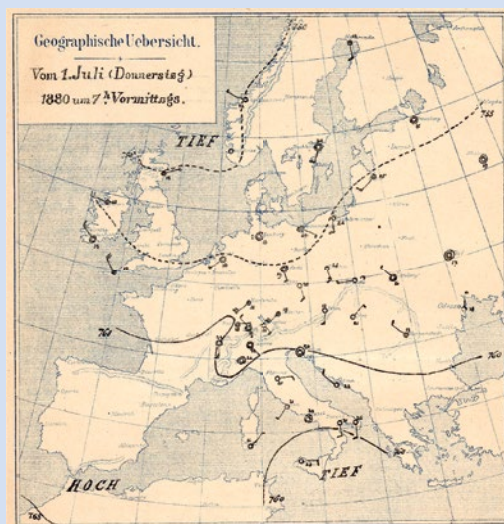


Fig. 38: Dettaglio estratto dal primo rapporto meteorologico della Stazione centrale svizzera di meteorologia del 1 luglio 1880.

Ricostruzione meteorologica

Come possiamo ricostruire il tempo meteorologico dell'evento del 1868? Esistono alcune misurazioni meteorologiche risalenti a questo periodo, ma non a sufficienza per poter permettere un'interpretazione estesa e precisa. I diari meteorologici contengono alcune informazioni aggiuntive che, combinate con le conoscenze degli esperti, rendono possibile la ricostruzione delle condizioni meteorologiche di questo periodo. Esiste però anche un approccio quantitativo: si tratta della ricostruzione meteorologica numerica tramite la cosiddetta «assimilazione dati». In questo modo si possono elaborare dati meteorologici tridimensionali di eventi passati.

La rianalisi come macchina del tempo

L'assimilazione dati consiste nella combinazione di dati misurati con un modello numerico di previsione meteorologica. In questo modo, il modello è utilizzato per riprodurre tutte le misurazioni all'interno del loro margine di errore e di quello del modello stesso. Allo stesso tempo, il modello conserva le sue caratteristiche come la coerenza fisica.⁶³

Ci si può immaginare questa procedura come una costante opera di correzione, come mostrato nella Fig. 39. Inizialmente, con l'ausilio di un determinato modello viene calcolata una previsione meteorologica per un tempo relativamente corto (6 ore). Su un arco temporale di questa durata le previsioni sono generalmente buone. La previsione è in seguito confrontata con le reali misurazioni a disposizione in quel momento. Tramite le relazioni statistiche stabilite si procede dunque alla correzione delle variabili e delle maglie del modello tridimensionale. In gergo tecnico questa procedura è chiamata «analisi». Ogni carta meteorologica è creata con questo sistema. L'analisi è in seguito utilizzata come punto di partenza per le prossime previsioni e tutta la procedura sarà ulteriormente ripetuta. Quando questo procedimento è applicato in maniera retrospettiva si parla di «rianalisi».

I set di dati delle rianalisi fanno parte dei dati maggiormente utilizzati nelle geoscienze. La maggior parte delle carte mostrate in questa pubblicazione derivano dalle rianalisi. Alcune rianalisi, come per esempio le ERA-Interim64 del Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine, offrono dati per tutto il periodo successivo al 1979, vale a dire da quando sono disponibili dati satellitari.

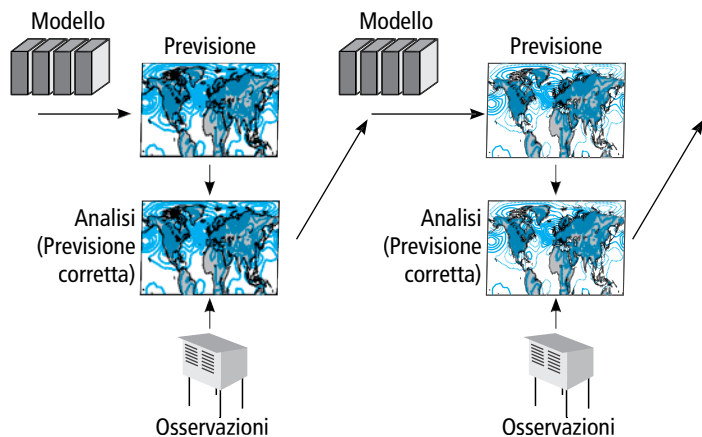


Fig. 39: Procedimento schematico di una rianalisi.

Negli ultimi anni, l'approccio dell'assimilazione dati è stato migliorato a tal punto da rendere possibile una valida riproduzione dello stato atmosferico tridimensionale di un determinato momento del passato già a partire da poche misurazioni.⁶³ A tal fine sono utilizzate quasi esclusivamente misurazioni della pressione atmosferica. Esse permettono di ricostruire il tempo meteorologico fino al XIX secolo, poiché con l'avvento dei servizi meteorologici di Stato verso la metà del Novecento (cfr. p. 23) disponiamo dei dati sulla pressione per lo meno dell'Europa e del Nordamerica. Questi dati sono messi a disposizione in numerosi archivi in tutto il mondo, tuttavia spesso solamente sotto forma cartacea. Sono dunque necessari ancora molti sforzi per digitalizzare questi dati e renderli utilizzabili (cfr. p. 20). Un esempio di rianalisi basata sulla pressione atmosferica è la rianalisi «Twentieth Century» (20CR), che si estende fino al 1851.²⁵

Un esempio di ciò che un set di dati di questo tipo rende possibile

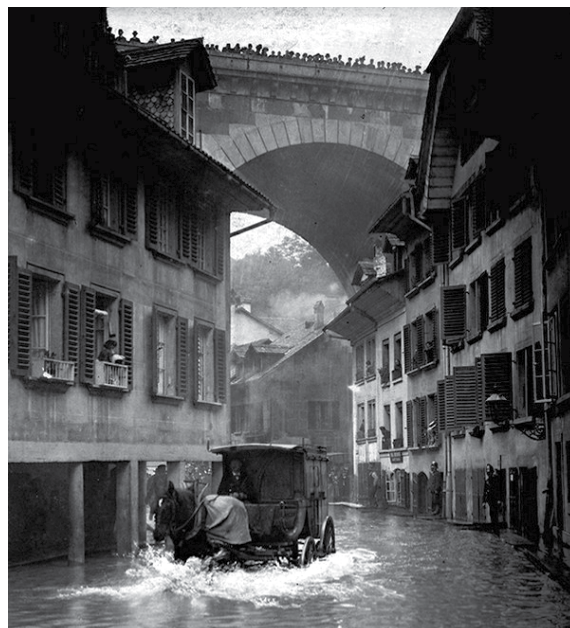


Fig. 40: Alluvione nel quartiere Matte a Berna il 14 giugno 1910.

è mostrato nella pagina accanto per quel che concerne il 1868, e di seguito in relazione all'esempio dell'alluvione sul versante nord alpino del 14 giugno 1910 (Fig. 40). Quest'ultimo evento è molto simile a quello del 2005 (cfr. p. 8). Vista la rarità di eventi di questo genere, è molto prezioso poter studiare più avvenimenti singoli.

Benché nel 1910 erano già realizzate numerose misurazioni, solo una piccola parte di esse è disponibile elettronicamente e dunque utilizzabile per le rianalisi (Fig. 41). Si potrebbe dunque sviluppare una ricostruzione meteorologica migliore. Oltre alle stazioni meteorologiche terrestri, la figura indica anche i dati raccolti dalle navi, che rivestono

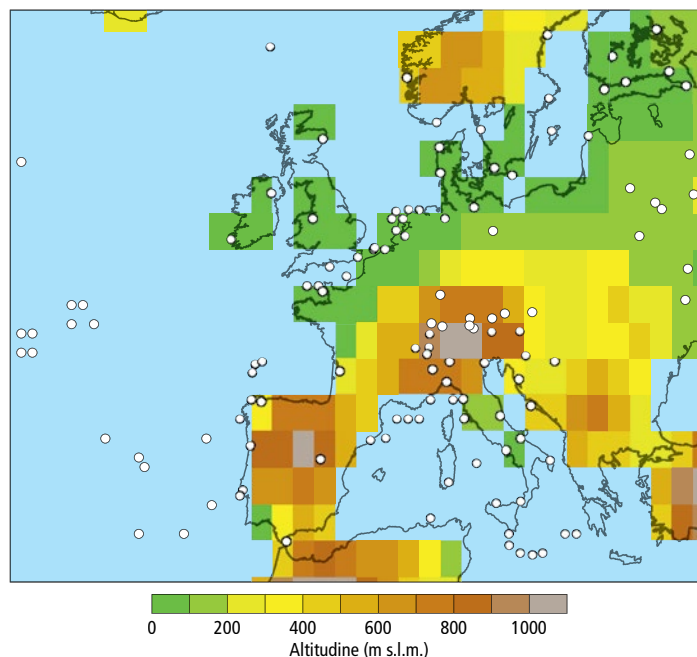


Fig. 41: Misurazioni della pressione atmosferica per la rianalisi 20CR²⁵ del 14 giugno 1910, 6–12 UTC.

un ruolo particolarmente importante. L'immagine mostra inoltre la topografia abbastanza approssimativa del modello: è possibile solo una ricostruzione su larga scala (cfr. p. 26).

Le carte meteorologiche ricavate da questi dati sono mostrate nelle figure 42 (da 20CR) e 43 (Rianalisi CERA-20C65). La carta del geopo-

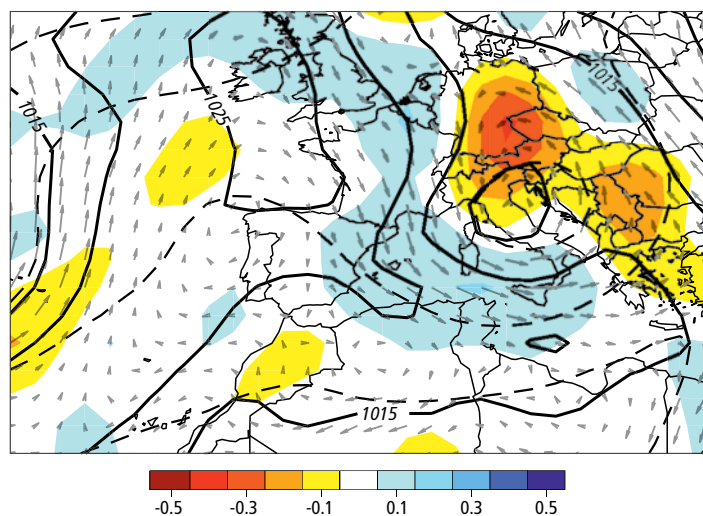


Fig. 42: Carta meteorologica dalla rianalisi 20CR²⁵ per il mezzogiorno (12 UTC) del 14 giugno 1910: pressione atmosferica al suolo (hPa; linea nera in grassetto), venti a 850 hPa (circa 1,5 km di altitudine; linee grigie), pressione a 500 hPa (circa 5 km di altitudine; linea tratteggiata in grassetto), movimento verticale delle masse d'aria a 500 hPa (valori negativi indicano movimenti verso l'alto).

tenziale a 500 hPa mostra al momento dell'evento una depressione in quota sopra al Norditalia. Nella zona frontale della stessa i dati indicano un sollevamento su larga scala. La carta dei venti al suolo e delle temperature (Fig. 43) mostra una situazione Vb (cfr. p. 8), nella quale l'aria umida è costretta a girare attorno alle Alpi, dove, a causa della pendenza delle montagne e all'ascesa al contatto con l'aria fredda presente in loco, causa delle piogge.

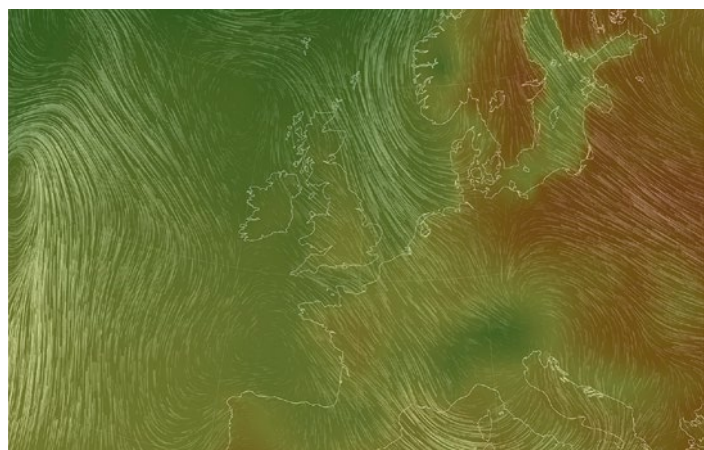


Fig. 43: Temperature al suolo e linee di corrente del vento alle 12 UTC del 14 giugno 1910 nella rianalisi CERA-20C.

L'analisi degli estremi storici aiuta a valutare gli eventi odierni: una vasta estensione temporale dei set di dati aumenta il numero di casi analizzabili. Il fatto che i dati disponibili siano quantitativi e tridimensionali rende possibile un loro utilizzo anche per la ricerca sull'impatto climatico. Per esempio possono essere ridotti di scala tramite modelli climatici regionali (cfr. p. 26) e impiegati in seguito per la modellizzazione dell'impatto climatico. La qualità dei set di dati non è tuttavia così buona per tutto il mondo come lo è per l'Europa centrale. Anche in questo caso è necessario agire con cautela, in particolare per il calcolo delle tendenze.

Ricostruzione meteorologica per il 1868

Al momento esiste solamente un set di dati di rianalisi che copre l'anno 1868: la rianalisi «Twentieth century» (abbreviato 20CR). 20CR si basa unicamente sulle misurazioni della pressione atmosferica (cfr. a sinistra). Per il 1868 sono disponibili per l'Europa centrale e occidentale solamente poche misurazioni di pressione, ancora meno rispetto al 1910 (Fig. 41), ma sono però geograficamente abbastanza ben distribuite (Fig. 44).

La carta meteorologica tratta da 20CR per il 22 settembre 1868 (Fig. 44) mostra un'area di bassa pressione sul centro Europa con una propaggine sopra alle Alpi e un canale di bassa pressione esteso fino al Nordafrica. Una particolarità della 20CR è che fornisce l'intera gamma di possibili soluzioni risultanti dall'incertezza delle misurazioni e della distribuzione dell'assimilazione dati. Questa gamma è calcolata come un «ensemble» di 56 varianti ugualmente probabili. Spesso è rappresentato unicamente il loro valore medio e la dispersione; nella Fig. 44 sono mostrate tutte le 56 varianti per l'isobara di 1008 hPa. La loro dispersione nella zona centro europea è relativamente piccola. Il margine d'incertezza è dunque relativamente basso, mentre è maggiore sopra all'Africa o al Nordatlantico a causa della mancanza di stazioni.

20CR può fornire dati non solamente sulla pressione al suolo, ma anche per altri parametri e per altre altitudini. La ricostruzione mostra per esempio che a un'altitudine di circa 1,5 km sopra al Mediterraneo soffiava vento da sud diretto verso il versante sudalpino. Regione alpina dov'era presente una saccatura a circa 5 km di quota (500 hPa) e dove le masse d'aria venivano sollevate, causando un raffreddamento e un fenomeno di convezione. La ricostruzione 20CR permette di dedurre perfino variabili meteorologiche complicate ad altre quote come nella tropopausa (cfr. p. 8).

Il margine d'incertezza relativamente basso e la sorprendentemente buona corrispondenza tra la carta meteorologica al suolo e le circolazioni in quota, dimostrano che la ricostruzione 20CR è in grado di rappresentare in modo coerente e plausibile le variabili fisiche su larga scala di questa parte del mondo attorno alla metà del XIX secolo.

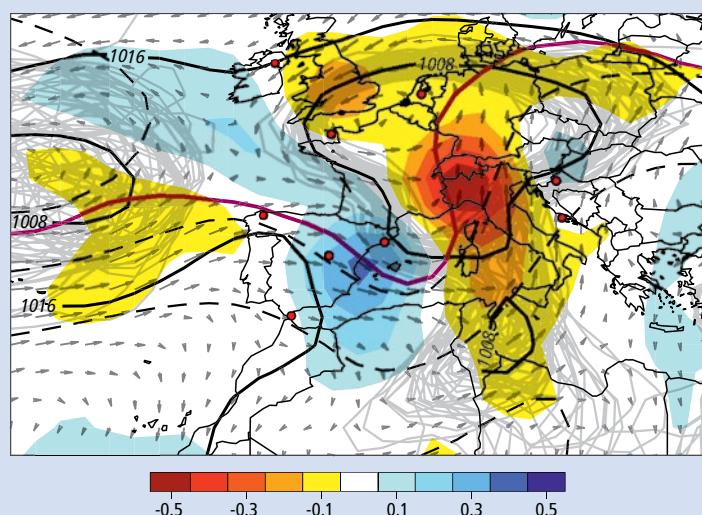


Fig. 44: Pressione atmosferica al suolo (hPa; linea continua nera in grassetto); linee grigie per l'«ensemble», vento a 850 hPa (1,5 km di quota, frecce grigie), pressione a 500 hPa (circa 5 km di quota, linea nera tratteggiata), movimento verticale delle masse d'aria a 500 hPa (valori negativi indicano movimenti verso l'alto) e tropopausa (1,5 PVU; linea rossa) dalla ricostruzione 20CR per il 22 settembre 1868, 12 UTC. Le misurazioni integrate nella ricostruzione sono marcate con un punto rosso.

«Downscaling»: la ricostruzione del tempo meteorologico locale

I prodotti meteorologici globali non sono in grado di ricostruire le importanti caratteristiche del tempo e del clima alpini. Ciò vale in modo particolare per le rianalisi storiche. Per ricavare rilevanti informazioni locali a partire da prodotti globali sono utilizzate diverse tecniche di «downscaling». A questo scopo, i metodi dinamici utilizzano modelli numerici di previsione meteorologica, mentre i metodi statistici si basano sulle informazioni ricavate da misurazioni locali.

Il «downscaling» dinamico

Il fatto che una rianalisi globale possa ricostruire le situazioni meteorologiche per l'alluvione del 1868 in modo realistico è notevole. I dati delle rianalisi hanno però un valore ogni 200 km e le Alpi sono rappresentate come una sola grande e lieve collina (Fig. 41). Fenomeni meteorologici importanti come i fronti, i temporali, le convezioni o la canalizzazione dei venti nelle vallate alpine avvengono su una scala più ridotta e non possono essere ricostruiti tramite una rianalisi.

Il «downscaling» dinamico si basa su modelli meteorologici regionali come il modello WRF.⁶⁶ La simulazione necessita delle condizioni di partenza e delle condizioni limite per ogni fase temporale. Per la previsione del tempo è dunque utilizzata una «analisi» (cfr. p. 24) così come una previsione meteorologica globale. Per effettuare il «downscaling» di un evento storico, il modello WRF è avviato con una rianalisi a partire dai margini del dominio spaziale. Inizialmente il modello WRF è calcolato su una sezione della regione nordatlantica-europea. Questa prima simulazione sarà in seguito utilizzata come condizione al contorno per un ulteriore perfezionamento. La figura 45, avvalendosi dell'esempio dell'evento del 2005, mostra come attraverso una procedura di perfezionamento in quattro tappe possa essere ottenuta una risoluzione alta.

Se dalle osservazioni dovesse risultare che nel caso di un evento storico i temporali abbiano contribuito alle precipitazioni in maniera essenziale, allora la massima risoluzione dovrebbe essere abbastanza fine da poter mostrare i temporali, dunque non più grossolana di alcuni chilometri.⁶⁷ A partire da una rianalisi con una risoluzione di 200 km possiamo stabilire simulazioni con risoluzioni di 81 km, 27 km, 9 km e infine di 3 km. Le uniche informazioni aggiuntive sono la copertura forestale e la topografia – tuttavia i risultati ottenuti tramite il perfezionamento sono decisamente migliori rispetto a quelli originali della rianalisi (Fig. 45, sotto a destra).

Il «downscaling» dinamico consente la ricostruzione del tempo locale di eventi storici con una risoluzione paragonabile a quella delle migliori previsioni meteorologiche moderne. L'alta risoluzione della topografia permette per esempio la ricerca del modo in cui le masse d'aria siano penetrate nelle vallate alpine (Fig. 46).

Evidentemente, i risultati per un evento storico sono meno affidabili di quelli ottenuti per un evento attuale. Ciò è dovuto principalmente alle limitate osservazioni a disposizione. Il «downscaling» dinamico ci mostra come possa essere stato il tempo meteorologico locale durante un determinato evento storico. Per ogni evento, il «downscaling» dinamico consente una ricerca quadridimensionale di fenomeni meteorologici locali che hanno contribuito al tempo estremo. Eventi meteorologici del passato possono in questo modo essere paragonati con quelli moderni.

Il «downscaling» statistico

Oltre alla dispendiosa simulazione numerica esistono anche approcci statistici. Uno molto semplice è il procedimento per analogia. Le informazioni a disposizione per un giorno del passato sono confrontate con le stesse informazioni di tutti i giorni di un periodo moderno, per il quale esistono dati quotidiani e ad alta definizione. Il giorno che risulta essere il più simile – a seconda dei criteri prestabiliti – è preso come ricostruzione per il giorno del passato. Se si dispone di una quantità sufficiente di possibili casi analoghi, si possono ottenere buoni risultati. Sono tuttavia necessari diversi passi d'ottimizzazione. A seconda

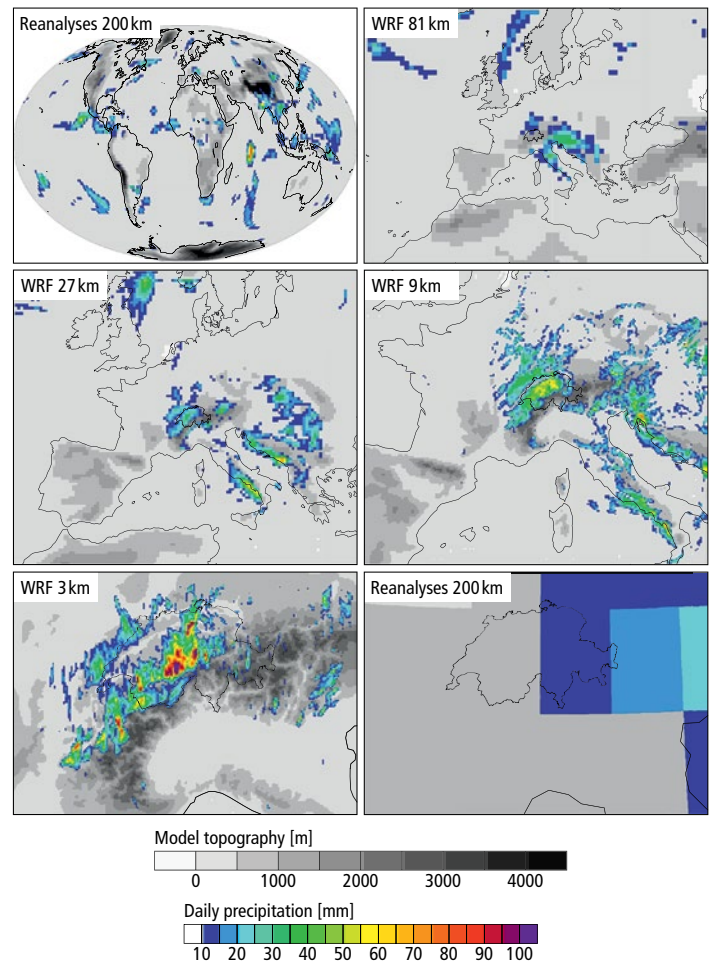


Fig. 45: «Downscaling» dinamico. A partire dalle rianalisi 20CR sono condotte delle simulazioni WRF con un dimensione della griglia di 81, 27, 9 e 3 km. Nelle immagini è rappresentata la simulazione per il giorno 22 agosto 2005. Il riquadro in basso a destra mostra i dati 20CR per la stessa sezione come termine di paragone.

del procedimento seguito, i dati ottenuti possono essere ulteriormente corretti in funzione delle misurazioni a disposizione.

A partire dal 1960, MeteoSvizzera ha ricostruito, sulla base dei dati delle stazioni meteo, le condizioni quotidiane di temperature e precipitazioni su una griglia di 2 km.^{68,69} Sono più di 20000 dati al giorno. Grazie a questo grande numero di possibili casi analoghi, il metodo produce risultati molto buoni per le precipitazioni da scarse a medie. Per le precipitazioni estreme i risultati sono meno precisi: gli eventi estremi sono rari e i casi analoghi da usare come termine di paragone sono pochi. Inoltre, in regioni con una copertura dei dati inferiore i risultati ottenuti sono peggiori.

«Downscaling» delle precipitazioni del 1868

«Downscaling» dinamico

Per l'evento 1868 è stato applicato sia il «downscaling» dinamico sia quello statistico. Il «downscaling» dinamico si basa sul modello WRF. Le sequenze sono confrontabili con quelle della Fig. 45, ma per il periodo temporale dal 26 settembre al 4 ottobre 1868. La risoluzione finale corrisponde in questo caso a 2 km.³² Sull'arco dei 9 giorni, il modello ha prodotto precipitazioni pressoché ininterrotte, estese e intense sul Ticino, che possono essere spiegate da un persistente trasporto di umidità da sud, da un sollevamento orografico e dallo sviluppo di temporali. Dal modello, come anche dalle osservazioni storiche, emerge solo una breve interruzione delle forti precipitazioni tra il 29 e il 30 settembre.

Nella simulazione ad alta risoluzione, i temporali si sviluppano nella regione del Po e si diffondono fino al Ticino. Le figure 46 e 47 mostrano una tale istantanea. Negli strati alti una corrente di aria umida scorre da sud verso le Alpi (con nuvolosità estesa, cfr. Fig. 47, sotto a sinistra). In prossimità del suolo troviamo una corrente d'aria umida da sudovest sulla regione del Po. Quando essa incontra le prime Prealpi in Ticino, viene sollevata verso l'alto e si formano le nuvole a bassa quota (sopra a sinistra). In questo modo vengono prodotte delle celle convettive che si estendono sino ad alte quote, dalle quali nascono in seguito i temporali (sopra a destra). I temporali si spostano verso nord con le correnti a quote medie e le precipitazioni raggiungono il sud del Ticino (sotto a destra). Nelle ore successive, la corrente instabile penetra nelle vallate alpine (cfr. Fig. 46) e le forti precipitazioni raggiungono anche il nord del Ticino. Lo sviluppo dei temporali presenta similitudini notevoli con i più recenti casi di piogge intense sul Lago Maggiore.³⁴ Il tempo meteorologico locale riprodotto con il metodo di «downscaling» è dunque plausibile.

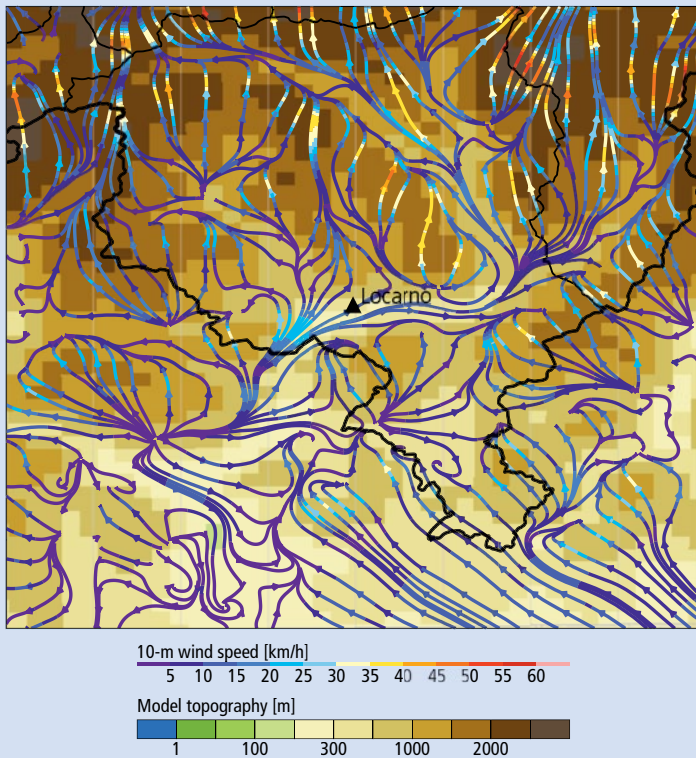


Fig. 46: Il vento a 10 metri d'altezza sul Ticino alle 12 UTC del 27 settembre 1868 ricostruito con il modello WRF con una risoluzione di 2 km. La topografia del modello è rappresentata dai colori, il vento dalle frecce (il colore delle frecce indica la velocità del vento).³²

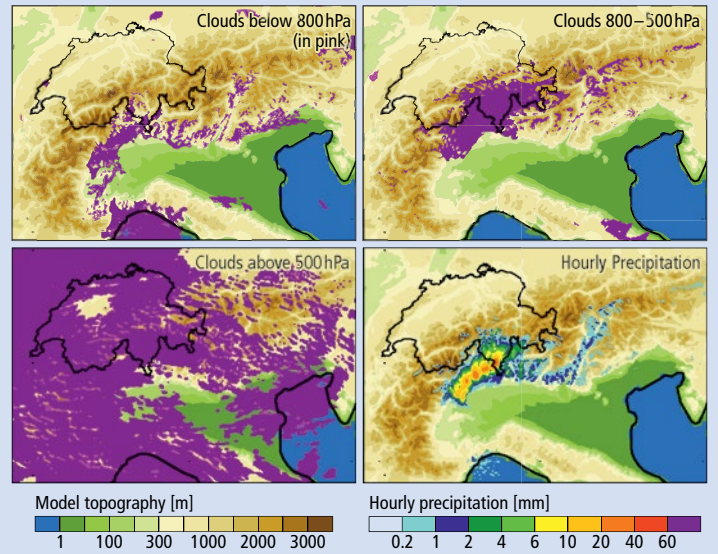


Fig. 47: Nuvolosità e somma delle precipitazioni per ora (sotto a destra) con il modello WRF (griglia di 2 km) per le ore 3 del 27 settembre 1868. La nuvolosità (in viola) mostra nubi basse (sopra a sinistra), a medie quote (sopra a destra) e alte (sotto a sinistra).

«Downscaling» statistico

Il «downscaling» statistico per le precipitazioni dell'evento del 1868 è stato effettuato con metodo di analogia ottimizzata per le precipitazioni estreme. (cfr. a sinistra). Visto che Lugano¹ era la sola stazione meteorologica nella zona colpita, i risultati sono maggiormente affidabili per il sud del Ticino, mentre il nord presenta una maggiore incertezza. Nella Fig. 48 sono rappresentati i campi di precipitazione su 5 giorni sul Ticino per i periodi dal 26 al 30 settembre e dal 1 al 5 ottobre.

La quantità di precipitazioni per tutto l'evento calcolata dal metodo dinamico e da quello statistico è praticamente identica. Il metodo dinamico mette però l'accento principalmente sul primo episodio, l'approccio statistico sul secondo. Anche i singoli giorni appaiono molto simili nonostante i due metodi siano completamente diversi.

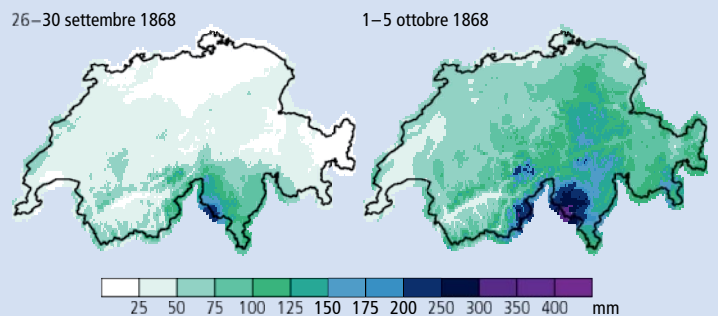


Fig. 48: Condizioni delle precipitazioni sommate su 5 giorni per il Ticino, per i periodi dal 26 al 30 settembre e dal 1 al 5 ottobre, ricavate con il metodo per analogia con una risoluzione di 2 km.

Modellazione idrologica

Quando le osservazioni sono incomplete o del tutto mancanti, quando le previsioni e le ricostruzioni risultano necessarie oppure se la comprensione del sistema deve essere migliorata, i modelli idrologici si rivelano molto utili. Questi modelli descrivono, in modo completo o anche solo settoriale, il ciclo idrologico delle precipitazioni, dello stoccaggio delle acque, dei deflussi e dell'evaporazione. Particolarmente rilevante è la catena causa-effetto tra le precipitazioni e i deflussi. L'idrologia dispone di numerosi modelli di complessità differenti, che possono essere utilizzati a seconda della problematica e della disponibilità di dati e di risorse numeriche.

Esiste una distinzione tra modelli deterministici e modelli stocastici: i primi calcolano valori assoluti (per esempio la quantità dei deflussi) mentre i secondi generano risultati in termini di probabilità e verosimiglianza. I modelli deterministici sono suddivisi in tre sottogruppi a seconda del livello di dettaglio della loro descrizione dei processi (cfr. Fig. 49).⁷⁰ I cosiddetti modelli «black box» rispecchiano per esempio la correlazione tra precipitazioni e deflussi, senza considerare in sé i fattori di formazione dei deflussi. Si servono dunque principalmente dei rapporti determinati in modo empirico. I modelli «grey box» descrivono invece una parte dei processi del ciclo idrologico da un punto di vista fisico, ma spesso unicamente in maniera semplificata e servendosi anche di rapporti stabiliti empiricamente. Infine, i modelli «white box» ricostruiscono i processi interamente sulla base delle leggi fisiche. Rappresentano dunque il modello più complesso.

Con la complessità del modello aumentano anche le esigenze sui dati necessari alle simulazioni. Mentre un semplice modello precipitazioni-deflussi («black box»), come il nome stesso suggerisce, necessita unicamente dei dati sulle precipitazioni e sui deflussi, i modelli più complessi hanno bisogno di più dati. Sono richieste grandezze meteorologiche come la temperatura, l'umidità dell'aria, la velocità del vento e la radiazione solare globale, parametri del suolo come la profondità, la granulometria e la densità, parametri riguardanti l'uso del territorio come il tipo di vegetazione, l'altezza della vegetazione, la profondità delle radici e l'indice di area fogliare. In questo senso, per la scelta del modello bisogna sempre tenere conto della base di dati di cui si dispone. Enfatizzando un po' la cosa, si potrebbe dire che non ha senso equipaggiare la carrozzeria di una Ferrari (modello complesso) con il motore di un tosaerba (pochi dati). A questa differenza riguardo alle esigenze di dati corrisponde anche una risoluzione spaziale diversa. I più semplici modelli «black box» si basano su dati medi sull'area di interesse, mentre i modelli «white box» impiegano risoluzioni differenziate nello spazio oppure elementi finiti che prendono in considerazione la varietà spaziale esistente all'interno di un determinato bacino idrografico.

I modelli «black box» non sono adeguati, poiché non sono in grado di simulare processi eccezionali. b) Le basi di dati a disposizione per le ricostruzioni sono generalmente limitate. I tipi di modello che richiedono molti dati sono dunque da escludere. Di conseguenza, i modelli maggiormente indicati sono quelli che non richiedono basi di dati eccessivamente ampie, ma che allo stesso tempo si basano principalmente su algoritmi fisici.

La taratura di un modello idrologico è necessaria e va effettuata su periodi temporali per i quali si dispone di una buona base di dati. La qualità strutturale dei dati di partenza non deve però essere diversa da quella del periodo che si vuole ricostruire: se per esempio la ricostruzione dovesse essere effettuata a partire da dati climatici ottenuti mediante «downscaling» dinamico (cfr. p. 26), allora anche i dati meteorologici usati per la taratura dovrebbero provenire dalla medesima procedura – anche se per il periodo di taratura dovessero essere disponibili dati raccolti dalle stazioni. Affinchè la ricostruzione abbia successo, è importante che il modello idrologico fornisca risultati affidabili anche nelle situazioni estreme di un'alluvione. Ciò può essere verificato mediante dati misurati oppure con osservazioni qualitative. Le cose si complicano quando il modello non è in grado di rispecchiare le osservazioni. In questo caso possono essere modificati, a seconda di diversi scenari ipotetici, i dati di partenza, la storia precedente oppure i processi, in modo che l'alluvione possa essere ricostruita. Le modifiche rese necessarie possono in seguito fornire importanti indicazioni su ciò che è realmente accaduto durante l'alluvione.

Modelli per la ricostruzione di alluvioni storiche

Per la ricostruzione di alluvioni si delineano le seguenti osservazioni.

a) Per l'analisi di alluvioni estreme sono da preferire modelli complessi.

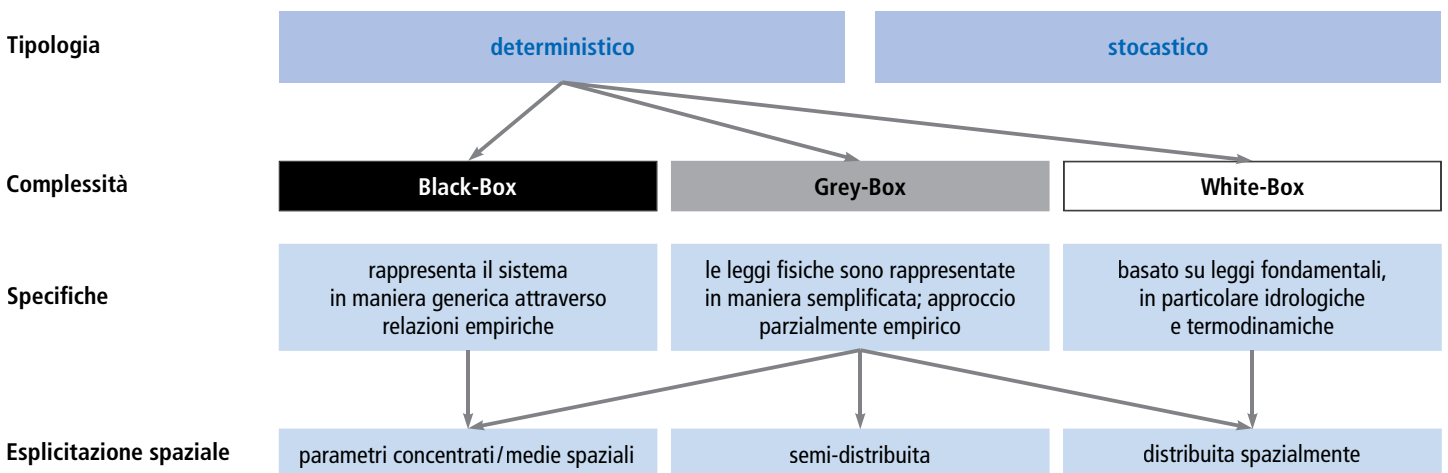


Fig. 49: Riassunto dei differenti tipi di modello nell'idrologia. Per la ricostruzione di alluvioni in regola i modelli «grey box» sono la scelta migliore.⁷⁰

Modellazione idrologica dell'alluvione del 1868

Dopo aver ricostruito il tempo meteorologico sia su larga scala sia localmente per l'evento del 1868, ci si pone la domanda se sia possibile simulare anche i deflussi e i livelli dei laghi. Per la modellazione idrologica dell'alluvione 1868 si è fatto ricorso al modello «grey box» PREVAH. L'intero bacino idrografico del Lago Maggiore (6368 km²) è stato suddiviso in 37 sezioni, a loro volta composte in totale da 735 delle cosiddette «hydrological response units» (HRUs). Le HRUs sono aree dal comportamento idrologico simile e per le quali può essere eseguita una simulazione geografica comune. Il modello utilizzato fu originariamente sviluppato per le previsioni su base oraria a corto termine per il bacino idrografico del Lago Maggiore.⁶² Il complesso comportamento attuale di formazione dei deflussi con numerose influenze antropogeniche (energia idroelettrica) è stato realizzato in questa versione del modello idrologico con lo speciale modello di «routing» RSMInerve. Ai tempi dell'alluvione del 1868, tutti questi interventi umani sul bacino idrografico non c'erano ancora e dunque per la simulazione di questa alluvione non è stato utilizzato il modello di «routing».

Visto che per la ricostruzione si disponeva unicamente di dati giornalieri sulle temperature e sulle precipitazioni – dati però presenti con un'alta risoluzione spaziale –, il modello è stato adeguato di conseguenza. Con l'ausilio di questo modello semplificato sono stati simulati i deflussi per il periodo temporale 1961–2010 e poi confrontati con i dati delle misurazioni. È stata rilevata solamente una piccola deviazione rispetto al modello originale. Infine è stato elaborato anche un rapporto tra il livello dei laghi e i deflussi dell'emissario, il cui risultato è stato convalidato dai dati delle stazioni di misurazione delle portate. Questo rapporto, che descrive quant'acqua defluisce dal lago per ogni determinato livello lacustre, è necessario per poter simulare al meglio il livello del lago. Con questo modello possono tuttavia essere ben determinati solamente i valori medi su più settimane. La causa è la forte regolazione del Lago con l'obiettivo di trattenerne durante l'inverno abbastanza acqua d'irrigazione per la regione del Po. La regolazione precisa è però sconosciuta e dunque a corto termine il modello non può raggiungere un'elevata qualità.

La figura 50 mostra la ricostruzione del livello del lago per l'alluvione del 1868 con l'utilizzo di due diversi approcci di ricostruzione climatica (Analogia: arancione; WRF: blu chiaro, cfr. p. 26) così come il livello del lago secondo le misurazioni (blu scuro). Sono riconoscibili le due forti precipitazioni che hanno portato a un chiaro aumento del livello del lago in due tappe. È interessante notare che entrambe le ricostruzioni delle precipitazioni evidenziano somme praticamente identiche (278 e 279 mm), anche se propongono decorsi temporali molto differenti. Entrambe le ricostruzioni conducono tuttavia nel corso della simulazione idrologica a una sensibile sottovalutazione del livello del lago.

Sono stati ricreati differenti scenari ipotetici, tra gli altri un'altamente improbabile ostruzione all'emissario del lago. Il motivo più probabile per questa sottovalutazione consiste in un cambiamento del rapporto esistente tra il livello del lago e i deflussi dell'emissario accorso durante l'alluvione del 1868 a causa di un'erosione della soglia del lago.⁴⁰

Uno scenario che simula per il 1868 uno stato delle foreste decimato rispetto ad oggi (meno 50%)³⁹ e calcolato con i dati climatici WRF, mostra una differenza appena percettibile per ciò che concerne il livello del lago. Il motivo è che i suoli erano già saturi e che lo stoccaggio d'acqua sulla chioma degli alberi (5–8 mm) sarebbe risultato praticamente ininfluente rispetto alle precipitazioni occorse (280 mm).

Il paradigma del disboscamento

La correlazione tra il disboscamento nelle montagne e le alluvioni nelle valli fu parzialmente individuata già nel XVI secolo, quando l'esplosione dell'estrazione mineraria nelle Alpi orientali e nelle Mittelgebirge tedesche portò a un massiccio disboscamento. Nel XVIII secolo, l'emergente selvicoltura si interessò sempre più a una gestione sostenibile delle foreste. Alla fine del secolo furono gli ingegneri forestali francesi a stabilire la relazione esistente tra la deforestazione e le alluvioni nei Pirenei. Alexandre Moreau de Jonnès affermò infine nel 1825 che il disboscamento sollecitava il riscaldamento del suolo e il prosciugamento dello stesso e di conseguenza causava anche l'erosione:⁷¹ «Non appena gli alberi cessano di proteggere il suolo dall'impatto dell'atmosfera e di ostacolare le interazioni tra i due, aumenta il calore dovuto alla rifrazione delle radiazioni e alla capacità di assorbimento del calore da parte delle componenti minerali ... Mancheranno completamente anche le esalazioni delle foreste. A causa di tutto ciò una grande quantità di calore, invece di essere legata, resterà libera nell'atmosfera.»

Grazie alla traduzione in tedesco dello studio, il discorso inizialmente diffuso unicamente in Francia conobbe grande successo in tutta l'Europa centrale e fu ripreso anche dalla Società Forestale Svizzera fondata nel 1843. Visto che lo stato dei boschi di montagna svizzeri era stato reso pietoso da secoli di disboscamento e di conflitti d'uso da parte della popolazione contadina, agli occhi degli ingegneri forestali il collegamento con le inondazioni del 1834, 1852 o 1868 appariva evidente. I membri della Società Forestale, in particolare Karl Kasthofer (1777–1853) e Elias Landolt (1821–1896), cercarono di sensibilizzare l'opinione pubblica e la politica a proposito della questione, riscontrando un certo successo solamente in seguito dell'alluvione del 1868.⁷

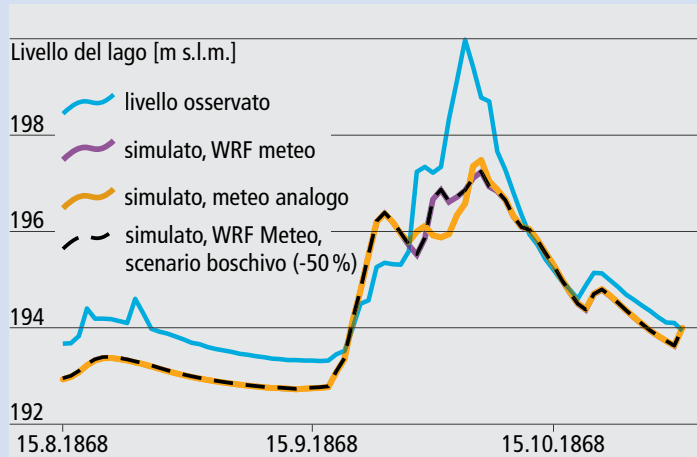
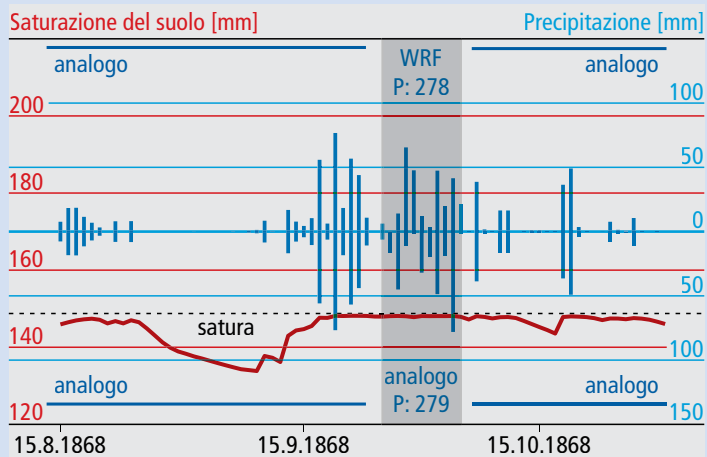


Fig. 50: Ricostruzione delle precipitazioni e della saturazione del suolo (valori medi per regione, a sinistra) e del livello del lago (a destra). Gli istogrammi verso l'alto rappresentano le precipitazioni del modello WRF (sfondo grigio), quelli verso il basso e al di fuori dell'area grigia derivano invece dal metodo per analogia (cfr. p. 27).

Ricostruzione di alluvioni storiche con modelli idrologici e idraulici

Grandi deflussi non devono per forza causare inondazioni. La simulazione idraulica è decisiva in questo senso. Attraverso una precisa ricostruzione del territorio, eventi alluvionali del passato possono essere simulati con modelli idrologici e idraulici. Tali valutazioni sono certamente legate a molte incertezze. Per la gestione del rischio di alluvioni questo genere di informazioni ha però un significato molto importante.

Ricostruzione di eventi estremi del passato

La ricostruzione di alluvioni storiche può completare le misure strumentali e fornire dunque informazioni fondamentali per la valutazione di eventi meteorologici estremi. Gli eventi estremi sono fattori importanti per la progettazione e il dimensionamento di costruzioni di protezione^{72,3} e per la pianificazione del territorio. Da un lato, tali eventi permettono lo studio dei processi che conducono alle catastrofi. Dall'altro, eventi alluvionali ben documentati riducono le incertezze nella valutazione dei rischi e dei pericoli.

Le alluvioni del passato lasciano dietro di sé tracce individuabili nel territorio che sono visibili per esempio nei bordi delle erosioni o nei depositi di sedimenti,^{74,75} negli anelli legnosi degli alberi,⁷⁶ nei documenti storici (cfr. p. 18) o ancora nei segni tracciati sugli edifici per indicare il livello raggiunto dalle acque.⁷⁷ Sulla base di queste fonti possono essere ricostruite le alluvioni passate. Ciò offre un grande potenziale per l'analisi della variabilità del clima a livello regionale e per l'ampliamento dei dati ricavati dai rilevamenti strumentali. Molti gruppi di ricerca si occupano dunque della ricostruzione di eventi alluvionali del passato, utilizzando metodi e dati diversi.⁷⁸⁻⁸¹

Le alluvioni storiche in Svizzera sono relativamente ben documentate. Oltre ai documenti e ai segni sugli edifici, possiamo trovare abbastanza presto delle misurazioni e delle buone fonti cartografiche.⁸² Nell'ottica delle importanti correzioni fluviali furono eseguite precise registrazioni come mappature, carte topografiche storiche, rilevazioni di sezioni trasversali dei fiumi e misurazioni dei livelli delle acque (cfr. p. 20). In confronto ad altre regioni, questa grande disponibilità di dati consente una dettagliata analisi storica degli eventi.⁸³

Per riportare i dati storici ricostruiti riguardanti i deflussi, i livelli delle acque e le aree d'inondazione alla situazione e al paesaggio odierno bisogna però agire con cautela. Oltre alle variazioni climatiche e ai cambiamenti riguardanti l'utilizzo del territorio nei bacini idrografici⁸⁴, l'uomo ha cominciato abbastanza presto a intervenire direttamente sul sistema acquifero. Deviazioni e correzioni dei fiumi, dighe e progetti di protezione contro le piene hanno effetti diretti sulla situazione idrologica dell'intero sistema acquifero e soprattutto sulla situazione di pericolo e di vulnerabilità a livello locale. Esempi tipici di mutazione della situazione sono un abbassamento o un interrimento del letto del fiume o la costruzione di dighe laterali, che cambiano in modo rilevante la sezione trasversale del fiume e di conseguenza il rapporto tra livello delle acque e deflussi.⁸⁵ Le costruzioni di protezione contro le piene nelle parti superiori di un fiume possono aumentare i picchi di portata nelle parti inferiori dello stesso.⁸⁶ Prima di poter prendere in considerazione i segni del livello delle acque raggiunto durante un'alluvione del passato in ulteriori analisi statistiche e valutazioni dei rischi, bisogna prima di tutto ricostruire la situazione idraulica al tempo dell'evento in questione.⁸⁷ I cambiamenti della situazione idraulica devono assolutamente essere considerati soprattutto quando si vuole analizzare l'influenza del cambiamento climatico sulla frequenza e sulla forza delle alluvioni su un lungo periodo.⁸⁸

Illustrazione dei cambiamenti nel tempo

Nell'ambito di lavori attualmente in corso presso l'Istituto di Geografia dell'Università di Berna, sono stati digitalizzati e georeferenziati piani di situazioni e rilevamenti del primo XIX secolo presenti negli archivi storici. Queste basi, in combinazione con i nuovi modelli digitali del terreno ad alta risoluzione attualmente disponibili che rendono visibili le tracce lasciate dai processi alluvionali del passato, permettono una

ricostruzione dettagliata di come apparivano una volta le superfici del terreno. Esse sono rappresentate sotto forma di un modello digitale del terreno e possono essere impiegate per le simulazioni idrauliche. Con i nuovi modelli di simulazione oggi disponibili, che risolvono l'equazione di propagazione delle piene in maniera bidimensionale, possono essere ricavate solide informazioni sui deflussi di piena a partire dai segni lasciati dalle acque alte. Le fonti storiche e generalmente qualitative possono essere verificate, quantificate e interpretate con l'ausilio di queste simulazioni. Un ulteriore vantaggio della ricostruzione delle superfici del territorio nel passato è che permette un confronto con la situazione odierna. Grazie a questo confronto è possibile isolare l'influenza dovuta al cambiamento di morfologia del fiume dagli altri fattori che influiscono sui deflussi, per analizzare dunque il singolo effetto⁸⁹ (www.risikodynamik.ch).

La ricostruzione delle alluvioni presenta vantaggi anche per la gestione del rischio nel suo complesso, vale a dire l'osservazione integrale di tutte le misure volte a limitare e a ridurre i rischi delle alluvioni. La vulnerabilità e i rischi legati alle alluvioni possono essere illustrati a livello locale in maniera efficace soprattutto con la presenza di documenti storici o di immagini. Ciò agevola la sensibilizzazione della popolazione (www.ueberschwemmungsgedaechtnis.ch).



Fig. 51: Vista del fiume nei pressi di Giubiasco¹ e sul Piano di Magadino. Fotografia risalente agli anni 1880. I lavori di correzione erano già stati avviati, ma è ancora visibile il corso del fiume originale.

L'alluvione dell'ottobre 1868 in un modello idraulico sperimentale

Nell'ambito di un modello sperimentale basato su lavori precedenti,⁶² i livelli del Lago Maggiore e i deflussi di piena nel piano di Magadino ricostruiti con il modello idrologico (cfr. p. 28) sono stati utilizzati in un modello idraulico, con lo scopo di simulare le differenze nelle aree di inondazione. Il modello idraulico include i modelli digitali del territorio allo stato naturale (circa 1864) e allo stato attuale (circa 2003). Oltre ai livelli del lago ottenuti dalle simulazioni sono stati utilizzati anche quelli realmente osservati.

Il modello sperimentale mostra che il più alto livello del lago allora registrato non potrebbe più essere raggiunto con la relazione esistente oggi tra il livello dell'acqua e i deflussi dell'emissario del Lago Maggiore. Durante l'evento del 1868, infatti, il letto del fiume emissario si è abbassato sensibilmente e il deflusso in uscita dal lago è quindi aumentato.⁴⁰ Ciò significa che oggi il lago non potrebbe più accumulare così tanta acqua come ad allora. Il modello sperimentale mostra inoltre che la correzione del fiume nel Piano di Magadino ha ridotto notevolmente le aree d'inondazione. L'esempio mostra in maniera efficace come diverse possano essere le conseguenze dello stesso evento di deflusso e come le modifiche della morfologia del fiume debbano sempre essere tenute in considerazione durante l'interpretazione di fonti storiche.

Impatti dell'alluvione del 1868 nel passato e oggi

Dal 1868 a oggi non sono cambiati solamente il corso del fiume e i deflussi in uscita del lago, ma anche lo stato degli insediamenti. Nella zona a sud di Bellinzona¹ e nei pressi delle sponde del Lago Maggiore sul lato svizzero, nel 1868 esistevano 436 edifici situati nella zona d'inondazione stabilita in base ai livelli del lago misurati e alle ricostruzioni dei deflussi di piena. Sulla medesima area d'inondazione ricostruita con il modello del territorio storico, si conterebbero nel 2016 ben 3934 edifici. Ciò significa che lo stato degli insediamenti esposti all'alluvione sarebbe moltiplicato per un fattore 9. Se invece consideriamo lo stato odierno dei corsi d'acqua (modello del territorio attuale, con una simulazione del livello del lago e della portata del fiume a Bellinzona), in caso di inondazione sarebbero colpiti 944 edifici. Ciò vuol dire che la protezione dalle alluvioni e l'aumento dei deflussi in uscita dal lago a causa dell'erosione del letto del fiume durante l'evento del 1868 mostrano i loro effetti. 2990 edifici traggono vantaggio da questi cambiamenti, sia pianificati sia naturali, del sistema acquifero. Le ricostruzioni di alluvioni del passato possono in questo modo fornire importanti fondamenta per la valutazione della frequenza e della portata delle alluvioni. Sono inoltre una buona base per l'analisi delle dinamiche temporali e spaziali dello sviluppo del rischio di alluvioni.



Fig. 52: Confronto delle aree d'inondazione secondo la ricostruzione dell'evento del 1868 (sopra) e nella simulazione degli effetti del medesimo evento ma nella situazione odierna (sotto).

Torrenti di montagna e alluvioni: ricerca di tracce sul territorio

Grandi alluvioni non portano unicamente a inondazioni. Sono accompagnate da frane, colate detritiche (nei bacini idrografici più piccoli e irti), così come cambiamenti lungo i corsi d'acqua causati dall'erosione delle rive e dal deposito dei sedimenti trasportati dalle correnti. L'erosione e il deposito delle materie solide causati dai differenti processi cambiano il paesaggio conosciuto e infliggono grossi danni agli edifici, alle infrastrutture e all'agricoltura. Le alluvioni dell'agosto 2005 o le colate detritiche nella Lötschental¹ nell'ottobre 2011 ne sono un chiaro esempio.

Processi

Durante le alluvioni, ruscelli e torrenti trasportano detriti, ghiaia, sabbia, fango e spesso anche legna. Questo materiale giunge da frane, colate detritiche, franamenti degli argini o dall'erosione dei corsi d'acqua e si deposita in seguito nei tratti ampi e pianeggianti dei fiumi. Mentre durante le esondazioni l'acqua dopo un certo tempo torna a defluire normalmente, i sedimenti rimangono, sia sotto forma di ammassi di ghiaia sia come depositi di macerie nei campi o negli insediamenti. Nelle grandi pianure, durante le alluvioni del passato i fiumi hanno spesso modificato il loro corso a causa di questi depositi ed eroso nuovi alvei. Oggi non è praticamente più possibile a causa delle canalizzazioni dei corsi d'acqua, ma le vecchie forme del territorio sono ancora riconoscibili (Fig. 53).



Fig. 53: Tracce dei vecchi corsi d'acqua lungo il Reno Alpino (nei pressi di Trübbach).

Durante le grandi alluvioni con intense precipitazioni, come nel 1868, 1987, 2005 o 2011, a essere colpiti erano dei bacini idrografici piccoli: sui pendii saturi si sono verificati grandi frane e i ripidi torrenti di montagna hanno portato a colate detritiche e intensi trasporti di materiale solido di fondo. Le materie solide trasportate dai torrenti si sono depositate lasciando dietro di sé le tipiche forme: conoidi detritici e alluvionali, solchi e canali, e altre ancora. Le colate detritiche in particolare hanno effetti importanti sulla forma del paesaggio. Si tratta di un miscuglio di acqua, sassi e materiale fine in grado di scor-



Fig. 54: Alluvione e colate detritiche a Zignau (da sinistra) nel 1868³⁵ e 1987 (a destra).

rere rapidamente.⁹⁰ Le colate possono trasportare per lunghi tratti grandi quantità di materiale, tra i quali anche grossi macigni. Fanno dunque parte dei processi più pericolosi legati ai torrenti di montagna.

Mentre il trasporto nei fiumi di materiali solidi di fondo era già studiato scientificamente e descritto in formule fisiche a partire dagli anni '40, le colate detritiche in Svizzera non hanno suscitato l'interesse della scienza fino alla fine degli anni '80. I grandi eventi dell'estate 1987 hanno mostrato chiaramente la necessità di ricerche scientifiche in questo campo. Con la documentazione e l'analisi di questi fenomeni naturali è stata intrapresa un'intensa attività di ricerca.⁹¹ Le questioni della dinamica delle colate detritiche, delle condizioni d'innescio di frane di scivolamento e di colate (anche in relazione al cambiamento climatico⁹²) o ancora la simulazione di questi processi,^{93,94} sono balzate in primo piano nel campo della ricerca, in particolare con la finalità di mettere validi strumenti a disposizione della pratica.^{95,96} A partire dalle alluvioni della primavera 1999 e infine dell'agosto 2005, che furono caratterizzate da numerose devastanti frane e colate detritiche (Sörenberg,¹ Glarona,¹ Guttannen,¹ Brienz¹), il termine colata detritica è giunto fino alla scena mediatica ed è oggi un termine standard utilizzato anche per le allerte.

Nel 1987 è stata colpita anche la Val Zavravia (Zignau,¹ GR), dove anche nel corso di numerose alluvioni del passato si erano già verificate colate detritiche, con episodi molto violenti accorsi in particolare nel 1868 (cfr. a destra) e nel 1927 (cfr. Fig. 54).

Misure e provvedimenti

I grandi eventi alluvionali del 1868, 1987, 1999 e 2005 hanno influenzato le strategie volte a ridurre i rischi e i pericoli legati alle alluvioni e al trasporto di materiale solido nelle acque (cfr. p. 36). Mentre a seguito del 1868 l'accento fu messo sulla stabilità del bacino idrografico e sulle misure architettoniche di canalizzazione dei fiumi e dei ruscelli, le strategie di protezione dopo gli eventi del 1987 si sono concentrate su un approccio integrale con misure di pianificazione (evitando le zone di pericolo), biologiche (rimboschimento), edilizie (costruzioni di protezione) e organizzative. Nel periodo successivo alle alluvioni del 1999 e del 2005 è stata posta maggior enfasi sull'allerta della popolazione.

Gli interventi strutturali nella protezione dalle alluvioni, volti a gestire le acque e soprattutto i materiali solidi, si basano su tre concetti fondamentali: contenere, deviare, dirigere. Nella seconda metà del XIX secolo si scoprì che il comportamento dei torrenti di montagna



era decisivo per la situazione alluvionale⁹⁷ e dovevano dunque essere domati. Il pessimo stato delle foreste e la mancanza di costruzioni di protezione lungo i corsi d'acqua erano allora indicati come i responsabili del continuo ripetersi di danni causati dai torrenti. Anche la commissione di esperti chiamata ad analizzare l'alluvione del 1868 giunse alla stessa conclusione.⁹⁸ L'arginatura dei torrenti di montagna proposta dalla commissione aveva l'obiettivo di ridurre l'erosione nella parte superiore dei corsi d'acqua e di aumentare la capacità di trasporto di materiale solido a valle. Con queste riflessioni si cominciò a contrastare le cause e non più a curare solamente i sintomi del fenomeno.⁹⁹ Oltre al rimboschimento si realizzarono anche massicce barriere di consolidamento e di contenimento e briglie a gradinata per i ruscelli più ripidi (Fig. 55), come per esempio per il fiume Zavraglia.

Allo stesso tempo della progettazione di misure di stabilizzazione nei bacini idrografici più piccoli, nelle valli e in particolare sui coni alluvionali furono realizzate canalizzazioni dei fiumi e dei ruscelli, veri e propri canali o sfioratori, con lo scopo di dirigere i deflussi alluvionali e i materiali solidi nelle sezioni soggette a tali fenomeni o di deviare gli stessi verso aree meno utilizzate. Anche nella Val Zavraglia negli anni '60 il corso d'acqua fu completamente canalizzato lungo il cono alluvionale. Per impedire ai sedimenti di giungere fino al conoide di deposito, negli ultimi decenni sono state realizzate numerose piazze di deposito, di piccole ma anche di grandi dimensioni.

Oggi, il ciclo di vita di molte di queste costruzioni di protezione è stato ormai raggiunto o superato. Soprattutto per ciò che concerne le grandi opere di contenimento nei bacini idrografici (per esempio le briglie a gradinata) ci si pone la domanda se queste opere debbano essere sostituite oppure se non sia meglio puntare su altre strategie più sostenibili. Al posto del contenimento dei sedimenti nei bacini idrografici, si cerca oggi di gestirli a livello del conoide o degli affluenti oppure di guidarli verso aree inutilizzate.¹⁰⁰

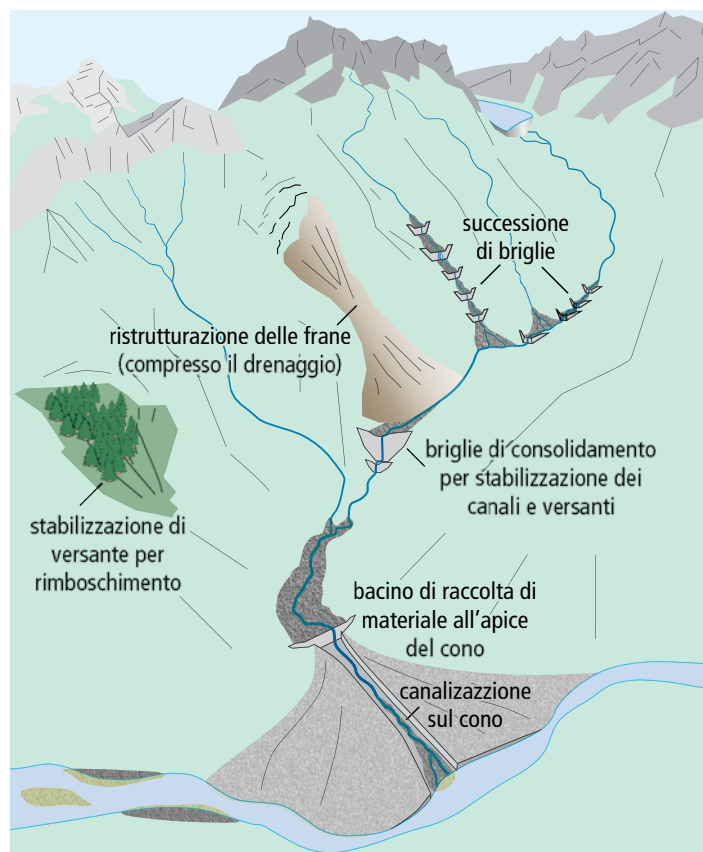


Fig. 55: Differenti concetti di misure preventive nei bacini idrografici di torrenti di montagna.¹⁰⁰

Tracce dell'evento del 1868

Le precipitazioni dell'autunno 1868 causarono grandi inondazioni nei fondovalle del Reno, della Reuss e del Ticino; in alcuni casi le rive furono erose, in altri il fiume deviò il suo corso. Secondo il Bündner Tagblatt del 1 ottobre 1868, grossi danni alle rive e ai terreni adiacenti si verificarono lungo il Reno Posteriore, il Glogn e il Nolla. Lungo questi fiumi le acque erosero le sponde, trascinarono le protezioni costruite per proteggere le rive e distrussero alcuni ponti.

Ma non furono colpite unicamente le vallate dei grandi fiumi. Le precipitazioni forti e persistenti causarono frane, colate detritiche e esondazioni di torrenti anche lungo fiumi più piccoli e ruscelli. Stando al rapporto della commissione di esperti⁹⁸, «le acque di montagna sono aumentate a dismisura e, senza essere contenute a sufficienza dalle barriere e dai boschi, hanno trasportato con sé sassi e rocce, strappato via i terreni di montagna, inondato e insabbiato le valli, scosso o distrutto interi villaggi e sepolto dietro di sé molti dei loro abitanti». Il ruolo dei sedimenti trascinati a valle dai fiumi e dai ruscelli è ben evidenziato. Il ruscello Peilerbach nei pressi di Vals esondò dal suo alveo a causa dei sedimenti trascinati dalla sua corrente: «per tutta la notte delle colate di terra precipitarono sulla valle di Vals, ostruendo le acque; per sette volte queste masse di detriti rotolarono giù dalla montagna fino al fiume Glogn.»⁹⁸

L'evento meglio documentato è la colata detritica in Val Zavraglia (12 km²) (cfr. Fig. 54): «sotto una cospicua tempesta, una montagna di materiale detritico si riversò in mezzo al vicolo. Nel buio pesto della notte non si poteva nemmeno cercare di fuggire, come d'abitudine, in direzione delle terre e dei giardini verso nord, poiché le colate detritiche erano cadute in ogni direzione.»³ Johan Coaz ha immortalato queste grandi devastazioni in una calcografia. Nonostante il fatto che per la Val Zavraglia grandi alluvioni e colate detritiche fossero state documentate già negli anni 1748 e 1834, il conoide d'alluvione era ancora densamente abitato (Fig. 56).

Le commissioni di esperti create in seguito dell'evento di settembre e ottobre 1868 si espressero sulla questione delle misure preventive. Gli esperti Landolt, Culmann e Escher von der Linth trovavano che fosse altamente auspicabile investire grandi somme per l'arginatura delle valli laterali. Richiamavano l'attenzione sul fatto che le correzioni fluviali sui fondovalle non sarebbero state sufficienti, se ulteriori misure non fossero state prese anche nei territori d'origine delle acque alte e dei carichi di sedimenti. Le nuove leggi (legislazione forestale e per il settore idrico) richiedono in maniera esplicita una prevenzione delle alluvioni e in particolare dei torrenti di montagna.



Fig. 56: Zignau sul Siegfriedatlas 1881 dove sono visibili i depositi dell'evento.

I danni alluvionali

Le alluvioni ed i relativi processi hanno numerose conseguenze per gli uomini ed i loro spazi vitali. Gli effetti positivi di quest'ultime, come il deposito di sostanze nutritive e l'irrigazione hanno, un significato secondario nella Svizzera moderna. Di gran lunga più importanti sono le conseguenze negative ed i danni ad esse associate.

A partire dalle statistiche delle assicurazioni e del settore pubblico, come anche dalle notizie dei media e dalla documentazione degli eventi, si può stimare che nel corso degli ultimi cinquant'anni le alluvioni in Svizzera abbiano causato annualmente danni per un valore di circa 300 milioni di franchi.¹⁰¹ In questa stima sono considerati i danni diretti e monetari agli edifici ed al loro contenuto, ai veicoli, alle infrastrutture e alle colture.

I danni sono causati dagli effetti di pressione statici e dinamici delle acque, e dai materiali solidi da esse trasportati, dai cambiamenti del terreno e dei corsi d'acqua (si vedano i capitoli precedenti), dall'umidità e dalla sporcizia.^{102,103} L'entità dei danni diretti e monetari è calcolata sulla base dei costi di riparazione o di sostituzione degli oggetti danneggiati.

Nel corso degli ultimi cinquant'anni si può osservare un aumento di questi danni. Una crescita riconducibile principalmente all'ampliamento e all'aumento di valore dell'ambiente edificato. La figura 57 mostra in maniera esemplare l'evoluzione dei danni alluvionali risarciti e dei valori degli immobili assicurati da parte di 18 assicurazioni di stabili cantonali per gli anni dal 1960 al 2017. Si può inoltre constatare che nel corso degli ultimi decenni un numero crescente di abitazioni sono state realizzate in aree potenzialmente soggette a inondazioni (cfr. Fig. 58).¹⁰⁴ Delle 110 000 abitazioni realizzate tra il 1971 ed il 1980, stando alla carta dei pericoli attualmente disponibile e stabilita in base alle disposizioni della Confederazione, il 14% di esse si trova in una zona di pericolo. Nei periodi d'edificazione seguenti, la percentuale cresce costantemente e si attesta al 16% durante il periodo più recente (2001–2012).

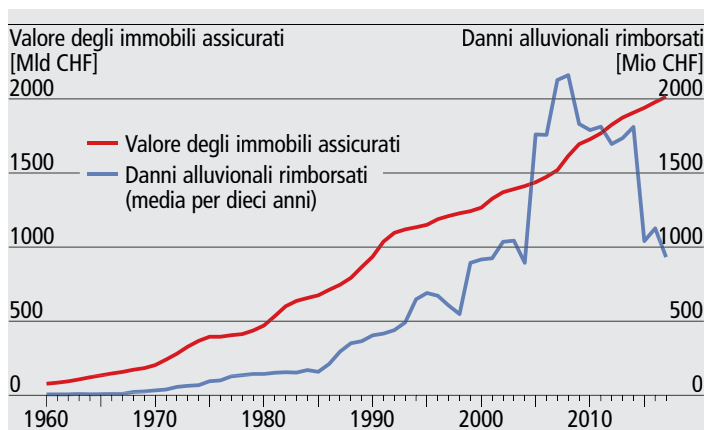


Fig. 57: Valore degli immobili assicurati (in Mld CHF, asse di sinistra) e danni alluvionali rimborsati (in Mio CHF, media per i dieci anni precedenti, asse di destra) 1960–2017 per 18 assicurazioni cantonali di stabili, che assicurano circa il 70% degli immobili in Svizzera.¹⁰⁵

L'ipotesi finale è che gli oggetti e gli immobili potenzialmente danneggiati dalle alluvioni siano oggi costruiti ed utilizzati in maniera più vulnerabile alle piene. Gli ingressi rialzati di due o tre scalini, e dunque meno vulnerabili all'acqua ed al fango, vengono sostituiti da ingressi senza soglia, che collegano direttamente il soggiorno ed il giardino. Al giorno d'oggi, nei seminterrati non vengono più conservate mele e patate, ma riserve di gasolio per il riscaldamento. I ripostigli invece, sono trasformati in sale di controllo della tecnologia casalinga.

Quantificare la vulnerabilità di immobili ed altri oggetti alle alluvioni e mettere questi dati a disposizione al fine di valutare i danni in caso di

eventi futuri, si rivela essere una grande sfida. I risultati dei pochi lavori scientifici nel campo dei rischi alluvionali evidenziano la necessità di ulteriori indagini. La tematica a lungo trascurata presenta notevoli incertezze.^{106,107}

Gli effetti negativi di un'alluvione comprendono di più dei danni diretti e monetari appena illustrati. Difatti i costi per le riparazioni o le sostituzioni rivestono un'importanza secondaria. Nel caso di infrastrutture, catene di produzione o reti di comunicazione, i danni principali sono causati dai costi indiretti legati ad un'interruzione delle attività. Se prendiamo ad esempio una panetteria danneggiata da un'alluvione, essa dovrà far fronte ad ingenti costi diretti come la sostituzione della farina, del sistema di controllo dei forni e dei veicoli per le consegne. Maggiori saranno però i costi indiretti dovuti ad un'interruzione d'esercizio, in particolare quelli legati alla perdita di guadagno. Essi si manifestano non soltanto durante l'alluvione, ma anche in seguito ad essa, quando la clientela comprerà il pane dalla concorrenza. L'entità dei danni indiretti è spesso difficile da stimare. Ancora più difficile è la valutazione dei danni che non si possono esprimere in valore monetario, come la morte di alcune persone per annegamento o ancora la distruzione di beni culturali.

Le alluvioni causano danni monetari e non monetari, diretti e indiretti. Le ricerche attuali stanno tentando di registrare in maniera comparabile danni molto diversi tra loro e di renderli disponibili al fine d'essere usati come base decisionale. Nel costante percorso di crescita della nostra società, queste basi decisionali contribuiscono a tenere in considerazione in maniera opportuna il rischio alluvionale.

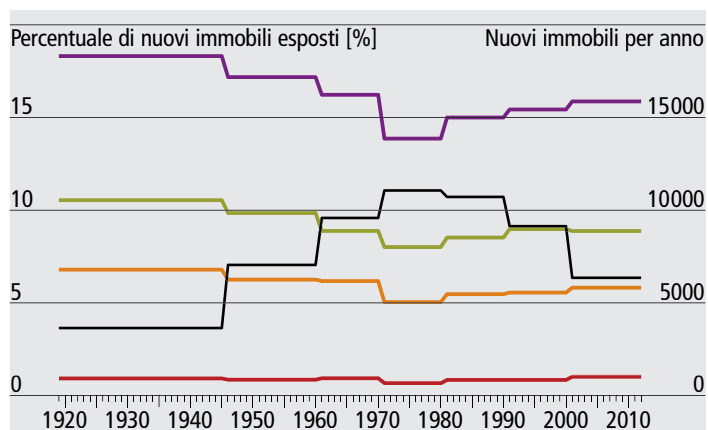


Fig. 58: Immobili ad uso residenziale di nuova realizzazione suddivisi per periodo d'edificazione. La percentuale di nuovi immobili esposti (asse di sinistra, in percentuale) corrisponde al rapporto tra gli immobili di nuova realizzazione in aree presentanti un pericolo d'alluvione secondo la carta di pericolo emessa ed il totale degli immobili analizzati dalla carta di pericolo. Quest'ultimi sono inoltre presentati in cifre assolute annuali (asse di destra).¹⁰⁴

La ripartizione dei danni nel 1868

L'alluvione del 1868 causò, specialmente al Sud delle Alpi, dei danni eccezionali.^{3,32,35,108} Siccome non esisteva ancora un procedimento sistematico per la raccolta dei dati di tali danni, il Consiglio Federale incaricò per questo compito una commissione di stima, che nei mesi successivi all'inondazione valutò nei dettagli i danni accorsi nei cinque Cantoni toccati (Ticino, Grigioni, San Gallo, Vallese e Uri).⁴

I costi totali per l'intero territorio elvetico ammontavano a 14 milioni di franchi, di cui 6,5 nel solo Canton Ticino (Fig. 59). Rapportati all'anno 2000, si tratterebbe di 915 e rispettivamente 425 milioni CHF.¹⁰⁹ Le precipitazioni intense e persistenti ebbero come conseguenza il più alto livello mai registrato del Lago Maggiore.¹⁰⁸ Non è dunque sorprendente che il Canton Ticino fu la regione maggiormente colpita. I danni maggiori si verificarono in Val di Blenio e in Leventina per un totale di 4,1 milioni di franchi; le stesse regioni registrarono inoltre 41 dei 51 decessi totali.³ Nel Canton Grigioni, praticamente ogni villaggio lungo il Reno fu colpito dalla piena e le numerose colate detritiche aumentarono notevolmente i danni. Per esempio, il villaggio di Vals¹ (nella Fig. 59 VL) fu ricoperto da uno strato di sabbia spesso in media 45 cm (Fig. 60). Anche il villaggio di Zignau¹ (ZI) visse un simile destino (Fig. 54).³⁵ Altri danni furono causati a valle, nel Canton San Gallo, a causa delle masse d'acqua di quattro laghi temporanei. Nel Canton Vallese alti costi furono sostenuti principalmente lungo il Rodano, nel Canton Uri lungo la Reuss.^{32,108}

La commissione di stima sopraccitata censì i danni nei dettagli, da un lato in funzione del tipo di danno, dall'altro a seconda dei danneggiati. La maggior parte dei danni, il 59%, colpì dei privati, un terzo circa fu sofferto dai comuni e dalle corporazioni e solamente l'8% ricadde sui Cantoni. La tipologia dei danni chiarisce questa distribuzione: il 55% dei danni riguardava terreni agricoli e parzialmente anche i raccolti, andando dunque a incidere sulla base esistenziale di molte persone colpite nei cinque Cantoni principalmente a tradizione agraria. Un terzo dei danni riguardava ponti, strade e soprattutto opere idrauliche. Da un punto di vista odierno, sorprende che i Cantoni non siano stati danneggiati maggiormente. Diversamente da oggi, a quei tempi i Cantoni pagavano unicamente per strade e ponti d'importanza cantonale e per alcune opere fluviali sovraregionali, per esempio sul Reno o sul Rodano, mentre la maggior parte delle infrastrutture di questo tipo



Fig. 60: Foto del fondovalle ricoperto di sabbia nei pressi di Vals, poco tempo dopo l'alluvione e le conseguenti colate detritiche³ (cfr. p. 32).

era finanziata unicamente dai comuni. Se si pensa che molti di questi lavori furono realizzati dagli abitanti dei comuni nell'ambito di lavori comunitari, appare chiaro che molti privati furono doppiamente colpiti da questo evento. Accanto ai danni ai terreni agricoli e alle infrastrutture, i danni agli immobili e ai beni mobili – tra i quali rientravano il mobilio, il bestiame e le provviste – rappresentavano solamente una piccola parte, a dimostrazione del fatto che l'insediamento in zone di pericolo nel 1868 non era ancora un problema.

In totale, la commissione contò più di 18000 persone danneggiate – più di 8000 in Ticino –, più della metà delle quali apparteneva, con un reddito imponibile di meno di 1000CHF, alla classe indigente dei «poveri». Sulle spalle di queste povere persone gravò un terzo dei danni occorsi a privati, senza poter contare su alcuna protezione fornita dall'attuale sistema assicurativo. Solamente le campagne di raccolta fondi, che ebbero un forte successo, poterono alleviare in parte il loro stato di necessità (cfr. p. 37).

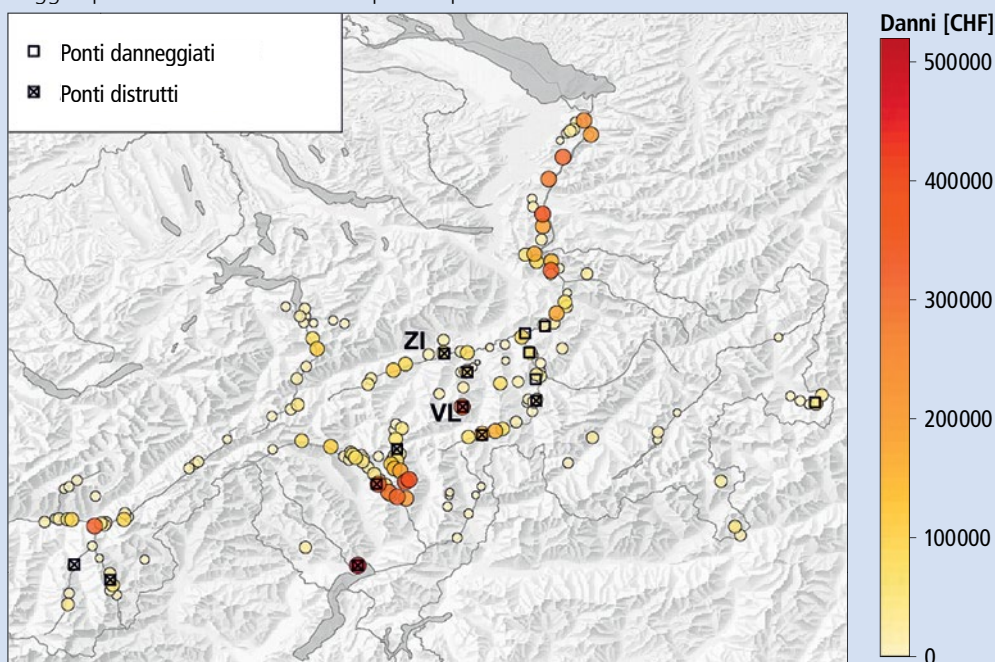


Fig. 59: Somma dei danni (in CHF) per comune secondo le ricerche dell'epoca e per i cinque Cantoni colpiti nel sudest della Svizzera. I rettangoli indicano i ponti danneggiati, i rettangoli crociati quelli distrutti. VL = Vals; ZI = Zignau.

Le conseguenze per la società: gestione della crisi e prevenzione

Eventi alluvionali sovragionali determinano da sempre i processi d'adattamento e di trasformazione della società, per esempio nei settori della protezione contro le alluvioni e della gestione del rischio. Possono indurre o velocizzare gli insegnamenti e di conseguenza anche i processi d'innovazione e di ottimizzazione nel superamento e nella prevenzione delle catastrofi. Un requisito per tali innovazioni è che le nuove strategie e soluzioni si fondino sulle conoscenze già disponibili.

Anche il XIX secolo è stato contraddistinto da eventi estremi: la loro entità e le loro conseguenze oltrepassavano le capacità di superamento e di rigenerazione della collettività locale, ma anche quelle dei Cantoni. Nel 1868, il giovane Stato confederale dovette intervenire per la prima volta nella gestione delle catastrofi (cfr. riquadro di destra). Per la prima volta nel 1868 e in maniera più importante nel 1876 e nel 1910, le truppe militari furono ingaggiate a sostegno dei Cantoni (Fig. 61).¹¹⁰ Grazie a questa unificazione degli sforzi nella gestione delle catastrofi, in questo periodo la solidarietà tra le regioni della Svizzera fu rafforzata.

Queste tre alluvioni, oltre alle tempeste temporalesche e alle cadute di valanghe, contribuirono ad aumentare la pressione sulle assicurazioni di immobili ad ampliare le loro prestazioni, fino ad allora limitate unicamente ai danni da incendio. Nel 1926, l'assicurazione pubblica del Canton Vaud fu il primo istituto a includere i rischi naturali a scelta nella sua copertura.¹¹¹ Sull'arco di tre decenni, tutte le assicurazioni di immobili e di beni mobili della Svizzera seguirono questo esempio. A partire dalle soluzioni ad-hoc basate su donazioni, contributi statali e prestazioni assicurative volontarie, si sviluppò a livello svizzero fino alla metà degli anni '50 il sistema assicurativo capillare e fortemente regolato che conosciamo oggi.¹¹² In 19 Cantoni, tutti gli immobili sono obbligatoriamente assicurati contro incendi e pericoli naturali presso istituti cantonali di monopolio. Nel resto dei Cantoni, l'inclusione dei rischi naturali in ogni assicurazione incendio prevista dalla legge federale comporta una copertura vicina al 100%. I danni causati da alluvioni e da altri rischi naturali alle strutture e al contenuto degli immobili in Svizzera sono sostenuti dalle assicurazioni. I costi di riparazione e di sostituzione sono rimborsati al valore d'acquisto, la franchigia a carico degli assicurati è minima.^{113,114}

Ancora oggi i grandi eventi alluvionali giocano un ruolo importante per l'innovazione. A livello locale sono ancora il più frequente fattore scatenante per l'elaborazione di piani d'emergenza e di misure di prevenzione.¹¹⁵ A seguito dell'alluvione del 2005 sono stati ampliati i sistemi di previsione meteorologica e di preallerta, così come la pianificazione delle emergenze e le strategie di pianificazione in caso di crisi. In generale, a partire dagli anni 1990 stiamo assistendo a un cambio di paradigma dalla difesa e dalla prevenzione dei pericoli naturali a una gestione degli stessi basata sul rischio: le misure tecniche sono combinate con misure organizzative e di pianificazione territoriale. Nella cosiddetta gestione del rischio integrale si cerca di attuare una combinazione delle misure maggiormente efficaci. A livello internazionale è seguito soprattutto un approccio volto a rinforzare la resilienza contro le conseguenze dei pericoli naturali e le incertezze nelle previsioni sono quantitativamente sempre più coinvolte nei processi di decisione. Gli aspetti delle capacità di resistenza, di rigenerazione e di adattamento sono tenuti in considerazione per la gestione dei rischi derivati da pericoli naturali anche nelle nuove strategie della piattaforma «pericoli naturali» (PLANAT). Questa commissione extraparlamentare coordina in Svizzera le attività di gestione del rischio e promuove l'attuazione di nuovi approcci. Anche la solidarietà e la capacità di trarre insegnamenti dagli eventi naturali rivestono in questo senso un ruolo importante.

La popolazione svizzera beneficia oggi delle innovazioni degli ultimi 200 anni: attraverso la pianificazione del territorio si evitano gli insediamenti in aree vulnerabili e si riducono dunque i rischi (pianificazione delle zone rischio). Il codice edilizio assicura che nelle aree leggermente a rischio siano attuate misure di protezione degli oggetti e degli

immobili in grado di limitare i danni in caso di alluvione. In diverse aree a rischio, la presenza di misure edilizie protegge le zone d'insediamento e le infrastrutture. Se tuttavia un evento dovesse superare la capacità delle opere di protezione, le forze d'intervento locali come i pompieri e la protezione civile sarebbero pronte a proteggere gli oggetti più importanti con misure di protezione mobili. Esse si fondano su un sistema di preallerta (previsioni meteorologiche e dei pericoli, per esempio www.gin.admin.ch) e di comunicazione ben funzionante. Inoltre, in molte località è stato elaborato un piano d'emergenza con strategie per la gestione dell'evento adattate alla situazione. Danni agli immobili e ai beni mobili sono rimborsati dalle assicurazioni di base. La popolazione in questo modo deve farsi carico solamente di una parte minima del rischio.



Fig. 61: Durante la gestione dell'alluvione del 1927, le truppe elvetiche aiutarono anche in Liechtenstein, che per ringraziare del gesto pubblicò una speciale serie di francobolli. Sopra: il pontoniere Siegrist di Sciaffusa porta in braccio i ragazzi Oskar e Martin Kind; sotto: il francobollo che riporta lo stesso motivo.¹¹⁶

La raccolta di beneficenza del 1868

Il turbamento fu grande quando l'arco alpino svizzero nell'autunno 1868 fu sommerso dalle acque.^{4,109} Già due giorni dopo l'inondazione offerte d'aiuto arrivavano da tutta la Svizzera e il Consiglio Federale inviò uno dei suoi membri nelle aree colpite per mostrare il suo cordoglio in questa «tragedia nazionale». Anche se al Consiglio Federale a tale scopo mancava un appropriato mandato costituzionale, seguendo il motto «situazioni e circostanze eccezionali richiedono anche mezzi eccezionali per scongiurare l'emergenza» convocò una conferenza per organizzare le attività d'aiuto e trasmettere «morale e supporto, unità e solidarietà». Anche se in passato ne aveva già avuto l'occasione, nel 1868 per la prima volta dalla sua creazione, il Consiglio Federale assunse l'iniziativa nella gestione di una catastrofe. Con questa conferenza il Consiglio Federale lanciò il 12 ottobre 1868 una campagna nazionale di raccolta fondi, incaricò un comitato centrale di aiuto e convocò una commissione di esperti per la valutazione dei danni. Un simile intervento aveva dato buoni risultati già nel 1834.¹¹⁷

La raccolta fondi ravvivò «l'antico amore e l'eterna lealtà» dei confederati e spinta dal motto «uno per tutti e tutti per uno!» divenne la raccolta di maggior successo della storia svizzera, eclissando anche le moderne azioni della Catena della Solidarietà: furono donati 3,63 milioni di franchi, che sommati ai prodotti naturali raccolti nell'ambito della stessa azione raggiungevano la somma di circa 4 milioni.¹¹⁸ Facevano parte dei beni naturali donati anche 3160t di prodotti alimentari, di cui ben 2560t di patate.⁴ Le donazioni monetarie furono fatte da privati, a seguito di eventi di raccolta fondi o da collette di ditte, chiese, scuole e comunità, ma anche da celebri personalità come l'Imperatore Napoleone III, il re di Prussia Guglielmo I o il Papa Pio IX.

Zurigo, Berna e Basilea Città furono i cantoni più generosi e la popolazione della Svizzera romanda, soprattutto nei Cantoni Vaud, Ginevra e Neuchâtel, si impegnò in maniera importante nonostante la distanza geografica e culturale dalle regioni colpite (Fig. 62).

Il comitato centrale di aiuto era il perno dell'intera azione d'aiuto. Il suo monopolio dell'informazione e il mandato federale ricevuto gli assicuravano la competenza direttiva. Si combatteva però contro alcune difficoltà: la grande quantità di derrate alimentari e di capi di vestiario obbligava a un pesante sforzo amministrativo e logistico, per quanto riguarda ad esempio lo stoccaggio, il trasporto e l'imballaggio; per esempio i sacchi di patate dopo poco tempo divennero una merce rara. Proprio i prodotti naturali ricevuti in donazione non corrispondevano spesso alle reali necessità delle popolazioni colpite, preoccupate soprattutto della loro sussistenza sul lungo termine.¹¹⁷ In particolare, dopo poco tempo nessuno desiderava più patate e i Cantoni colpiti chiesero con insistenza di non accettare più questo tipo di donazioni.

Gli stessi problemi sono riscontrabili anche per le odierne azioni d'aiuto:¹¹⁹ gli aiuti non corrispondono sempre le reali necessità dei luoghi di destinazione, anzi, in funzione della laboriosa amministrazione richiesta dai prodotti naturali sono a volte addirittura d'intralcio. Sul posto, gli aiuti ricevuti possono portare a un crollo dei prezzi dei prodotti corrispondenti. Come nel 1868, anche oggi le infrastrutture e l'amministrazione locali sono spesso sommerse dalle offerte di aiuto e gli enti benefici mantengono raramente il totale controllo della distribuzione, poiché al sistema di distribuzione, ieri come oggi, viene prestata meno attenzione rispetto a quello di raccolta.



Fig. 62: L'immagine «Appel de la Patrie» fu venduta a Ginevra nel 1868 a favore delle vittime dell'alluvione e rispecchia con la sua divisione in due parti gli elementi centrali della raccolta di beneficenza. A sinistra, una donna con due bambini protrae la sua mano verso Elvezia, sullo sfondo le acque impetuose trasportano con sé case, alberi e uomini. A destra, un contadino e un cittadino corrono verso Elvezia, il contadino con pane e vestiti, il cittadino con dei soldi. Al centro, un'Elvezia coronata dal motto «Un pour tous, tous pour un» indica a Fraternité il cammino da seguire.

L'evoluzione della protezione svizzera contro le alluvioni

Quando nel 1848 fu fondata la moderna Confederazione Svizzera, la protezione contro le piene era tutt'altro che un tema sconosciuto: le inondazioni costituivano già da secoli una costante nel territorio dell'attuale Svizzera. Appena due decenni dopo la sua fondazione, la Confederazione assunse un ruolo attivo in questo settore e in seguito continuò ad ampliare le sue competenze in materia. Gli eventi alluvionali estremi si rivelarono spesso un'importante forza politica e furono alle origini, o per lo meno costituirono un punto di svolta, di nuovi approcci in materia di protezione contro le piene.

L'instaurazione di una strategia infrastrutturale (1848–1877)

Fino all'inizio del XIX secolo la protezione contro le piene era eseguita a livello puramente locale. Con la correzione del fiume Linth (1807–1816) fu realizzato per la prima volta un progetto federale e sovragionale, che servì da esempio per la Costituzione federale del 1848 con il suo articolo sulle infrastrutture (Art. 21 della Cost. federale del 1848). Sulla base di questo articolo, negli anni 1860 furono deliberati i progetti di correzione delle acque del Giura, del Reno e del Rodano^{109,120–123} (cfr. Fig. 63 a sinistra). Questi grandi progetti erano considerati «opere di interesse federale» ed erano costruzioni infrastrutturali di prestigio attraverso le quali il giovane Stato federale voleva dominare la configurazione delle condizioni paesaggistiche e legare a sé i Cantoni tramite lo stanziamento d'ingenti mezzi finanziari.

La protezione contro le piene in sé rimaneva però nelle mani dei Cantoni. La prima fase di questo periodo infrastrutturale è limitata unicamente ai fiumi principali, mentre gli affluenti e le aree sorgentifere non erano presi in considerazione. Già negli anni 1850 si levarono voci che chiedevano di porre rimedio a queste mancanze e di inserire la protezione dalle alluvioni nei compiti federali. Queste discussioni prendevano spunto dal dibattito sviluppatosi negli anni 1820 e di estrema attualità a seguito delle catastrofiche inondazioni del 1834, che indicava il disboscamento nelle aree di alta montagna come causa delle inondazioni sui fondovalli (cfr. p. 29) e che proponeva come contromisure l'arginatura dei torrenti di montagna e il rimboschimento. Le rivendicazioni degli esperti – in prima linea i difensori della Società Forestale Svizzera fondata nel 1843 – inizialmente non ottennero però molta attenzione presso le élite politiche. Un cambiamento di mentalità ebbe luogo solamente con le inondazioni del 1868 e con la revisione costituzionale del 1874 si trasferì il settore delle opere idriche e forestali nelle competenze della Confederazione (cfr. a destra). Ciò contribuì da un lato ad ancorare la protezione contro le piene come compito federale, dall'altro ad ampliare il regime infrastrutturale da un approccio

unicamente settoriale a uno maggiormente globale, che prendeva in considerazione l'intero bacino idrografico di un fiume.

La lunga strada verso una strategia di pianificazione territoriale (anni 1950–1991)

La legge sulla sistemazione dei corsi d'acqua del 1877 rimase fino al 1991 il testo di riferimento per le opere idrauliche in Svizzera. Ciò può essere parzialmente spiegato dal «disaster gap», vale a dire la mancanza di gravi eventi alluvionali dal 1882/1910 al 1976.⁵ La tesi di un «vuoto di catastrofi» sottostima però l'influenza rivestita da eventi locali, come per esempio la serie di inondazioni degli anni '20 in Vallese che portò alla seconda correzione del Reno oppure i frequenti episodi legati a torrenti alpini come la Gürbe¹ a sud di Berna.^{109,115,121} Il fatto che la protezione dalle alluvioni all'inizio del XX secolo rimase invariata nonostante gli eventi accorsi dipende principalmente dalla grande flessibilità concessa dalle leggi sulla sistemazione dei corsi d'acqua del 1877. Inoltre, non bisogna dimenticare che la Svizzera subì gli effetti della grande depressione e delle guerre mondiali. Mancava infine anche un dibattito esteso, che avrebbe potuto preparare il terreno per nuove soluzioni.

Ciò cambiò nel corso degli anni '50, quando in seguito al dibattito sulla protezione dell'ambiente furono introdotte nella Costituzione federale la protezione delle acque (1953), la pianificazione del territorio (1969) e la protezione dell'ambiente (1971).¹⁰⁹ Sotto questa influenza fu promulgato nel 1975 l'articolo sul diritto delle acque, che per la prima volta ha considerato le acque nella loro interezza come un campo politico.¹⁰⁹

Questi sviluppi crearono terreno fertile per l'instaurazione di una nuova pratica amministrativa nel settore delle opere idrauliche. La protezione contro le alluvioni doveva essere resa compatibile anche con la protezione dell'ambiente. Un ruolo di precursore in questo senso fu rivestito dalla direttiva «Protezione contro le piene dei corsi d'acqua»

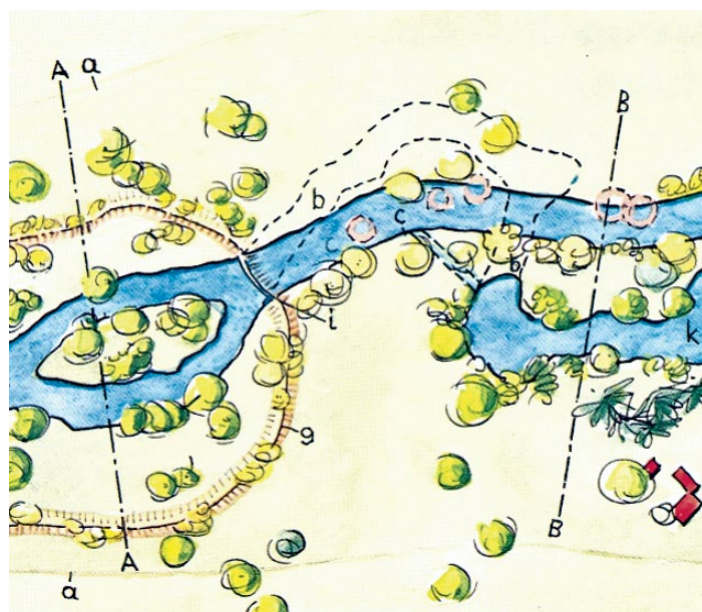
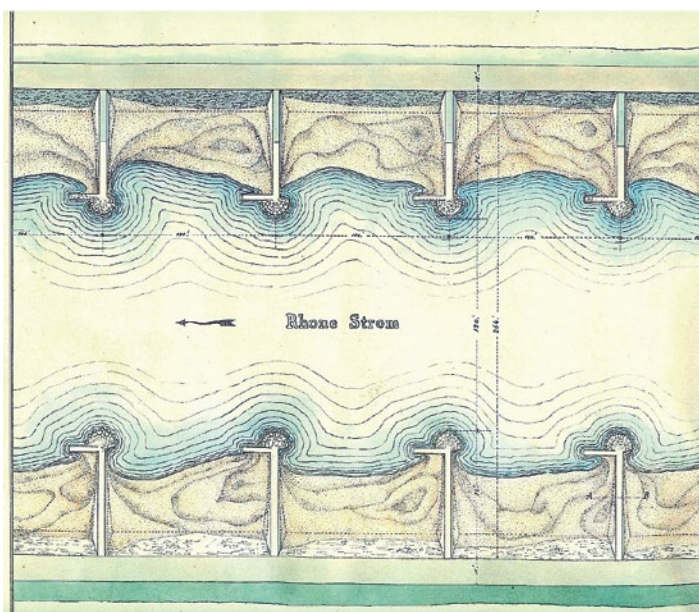


Fig. 63: Le raffigurazioni del sistema a sponi stretti applicato nel XIX secolo tra gli altri anche al Rodano (immagine di sinistra) e del concetto «più spazio ai corsi d'acqua» tratto dalla direttiva «protezione contro le piene dei corsi d'acqua» del 1982 (immagine di destra) mostrano il chiaro cambiamento intercorso dal XIX secolo ad oggi nella protezione contro le piene dei corsi d'acqua.

del 1982, che proponeva una protezione contro le piene sostenibile e con elementi di pianificazione del territorio (cfr. Fig. 63 a destra). Una nuova legislazione non era necessaria e la legge allora in vigore offriva agli uffici federali responsabili ampio spazio di manovra. Il settore delle opere idriche fu nuovamente discusso dai legislatori in occasione del dibattito di natura polito-finanziaria riguardante la redistribuzione dei compiti tra i Cantoni e la Confederazione. Nel pieno di questo dibattito, nel 1987 si verificò un'annata ricca di inondazioni con un'estate veramente catastrofica. Lo stesso Parlamento elvetico, che in precedenza aveva regolarmente decurtato i crediti per la protezione contro le piene nell'ottica di misure d'economia, criticò in quell'occasione i bassi contributi. Sotto l'influenza degli eventi del 1987, la nuova legge sulle opere idriche presentata nel 1988 ed emanata nel 1991 ricevette una massima attenzione, che servì ad ancorare nelle leggi una strategia di pianificazione del territorio già utilizzata nella pratica.¹²⁵

La strategia integrata al passaggio al nuovo millennio

Il passo necessario per passare dalla strategia di pianificazione del territorio a una strategia integrata fu più breve se comparato con i cambiamenti precedenti. Le nuove inondazioni del 1993, con i grandi danni conseguenti, mostrarono in maniera efficace che non sono necessariamente le caratteristiche idrologiche a trasformare un evento in una catastrofe, ma spesso l'utilizzo del territorio da parte dell'uomo. Con il motto «più spazio ai corsi d'acqua», si cercò in seguito d'istituire una strategia integrata, che accettasse un rischio residuo e che fornisse maggiore spazio ai corsi d'acqua, in modo che essi potessero esercitare contemporaneamente le loro numerose funzioni nei settori della protezione contro le piene, della protezione della natura, dell'utilizzo delle acque ma anche come luogo ricreativo e di relax. Tappe importanti in questa nuova via furono la fondazione nel 1997 della Piattaforma nazionale «Pericoli naturali» (PLANAT) e la promulgazione nel 2001 delle nuove direttive sulla protezione contro le piene, nelle quali furono coinvolti, oltre all'Ufficio federale delle acque e della geologia, anche altri tre uffici federali e che stabilirono gli obiettivi di protezione e le priorità dello spazio richiesto dalle acque. Il catastrofico anno 2005 conferì grande vigore a questo nuovo corso – così come a loro tempo fecero le inondazioni del 1868 e del 1987.^{109,126}

Sulla base delle dodici grandi alluvioni accorse tra il 1868 e il 2015, uno studio di scienze politiche realizzato nel 2016 analizza in quali condizioni le alluvioni abbiano portato a cambiamenti politici.¹²⁶ Solamente le alluvioni del 1868, 1978, 1987 e 2005 possono essere identificate secondo questo approccio come degli eventi scatenanti. Né l'entità geografica, né i danni o le vittime e neppure la presenza mediatica possono spiegare chiaramente i motivi per cui proprio questi avvenimenti siano stati così importanti. Poiché non è unicamente la gravità di un evento ad essere determinante, ma piuttosto il contesto in cui esso si è verificato: i nuovi paradigmi non nascono da un giorno all'altro, ma si sviluppano come nuove proposte di soluzioni sul lungo termine e al di là di ogni senso d'urgenza politica. Se questi nuovi approcci sono presenti, un evento alluvionale può allora fungere da catalizzatore del cambiamento politico e creare uno spazio d'attenzione che permette ai differenti attori coinvolti d'affermare le loro richieste politiche.¹²⁷

Il cambiamento di proposte di soluzioni politiche attorno al 1868

Nei loro rapporti⁹⁷ sulle foreste e sui torrenti d'alta montagna, gli esperti Elias Landolt (1862) e Carl Culmann (1864) proposero di ampliare l'influenza della Confederazione sull'arginatura dei torrenti di montagna e sul rimboschimento e di armonizzare le leggi cantonali. Secondo il loro punto di vista, in quel momento una legislazione forestale o una legge sulle opere idriche a livello federale non apparivano realistiche in virtù della sovranità cantonale.¹⁰⁹

Ciò cambiò dopo gli eventi del 1868: l'appello per un energico intervento della Confederazione si fece sempre più forte. Le proposte si spostarono dunque dal livello cantonale a quello nazionale. Le inondazioni del 1868 furono strumentalizzate e il federalismo messo alla gogna: se richiesto, i Cantoni sovrani avrebbero dovuto scendere dal loro piedistallo e far buon viso alle leggi nazionali. Mentre per decenni il dibattito si è costantemente consolidato attorno al paradigma del disboscamento (cfr. p. 29), a partire dal 1868 le proposte di soluzioni politiche compirono passi da gigante: le acque dell'anno catastrofico spinsero il tema all'attenzione delle élite politiche. L'alluvione conferì il necessario significato agli argomenti degli esperti e l'appropriata veemenza alle loro rivendicazioni. Mentre le caute proposte dei primi anni 1860 non avevano ancora alcuna chance in Parlamento, le inondazioni del 1868 contribuirono allo sviluppo di nuove e più ampie rivendicazioni.

L'aspra discussione a proposito dell'utilizzo delle donazioni fu un'importante tappa intermedia: la tanto invocata volontà dei donatori si opponeva diametralmente ai desideri dei Cantoni colpiti. Mentre i Cantoni colpiti e gli esperti volevano impiegare la gran parte delle donazioni per lavori di prevenzione, i Cantoni donatori ribadivano che la volontà della beneficenza era quella di aiutare le povere vittime, e non di finanziare le opere di protezione che spettavano invece allo Stato. Il compromesso fu trovato con il cosiddetto «Wuhrmillion» («milione per le dighe»): almeno un quarto delle donazioni fu utilizzato per la costruzione di opere di protezione. Queste discussioni condotte con rappresentanti di tutti i cantoni mostrarono però in modo chiaro che la prevenzione presentava il potenziale per essere un compito federale. Fu dunque inevitabile che dopo al «milione per le dighe» seguisse una decisione di sovvenzione, con la quale la Confederazione metteva annualmente a disposizione 100 000 CHF per l'arginatura dei torrenti di montagna e per il rimboschimento in tutte le aree di alta montagna.

Gli anni 1870 furono favorevoli per l'inclusione di questi nuovi compiti nella Costituzione federale, anche se dal 1865 federalisti e centralisti si confrontavano in un acceso dibattito per una revisione della Costituzione. Mentre molte delle dibattute possibili competenze federali furono stralciate nella ricerca di un compromesso con gli avversari federalisti, il settore idrico e quello forestale furono centralizzati senza discussioni significative con l'articolo 24 della Costituzione federale del 1874, che fu seguito nel 1876 dalla legge federale sulla polizia delle foreste e nel 1877 dalla legge federale sulla polizia delle acque.

Il cambio di filosofia a lungo promosso dagli esperti – via dal focus sulle grandi correzioni fluviali e maggiore concentrazione sull'arginature dei torrenti di montagna e sul rimboschimento – visse dopo il 1868 una svolta politica. Cambiarono non solamente i valori, le norme e la rilevanza data al tema, ma anche le norme giuridiche, la struttura e le pratiche amministrative che ruotavano attorno a questa tematica.

Dinamica a lungo termine: i sedimenti lacustri come archivi delle alluvioni

Come conseguenza delle alluvioni, gli strati dei flussi alluvionali si depositano nei sedimenti lacustri. Questi strati possono essere datati con precisione e in questo modo i sedimenti dei laghi costituiscono un archivio naturale del clima, a partire dal quale è possibile ricostruire la frequenza delle alluvioni nel passato su diverse migliaia di anni. Le ricostruzioni effettuate mostrano che nel corso degli ultimi 10 000 anni la frequenza delle alluvioni nella regione alpina è stata particolarmente alta nelle estati caratterizzate da un clima freddo e umido. Al Sud delle Alpi e in Engadina l'alluvione del 1868 è ben visibile negli strati dei sedimenti lacustri.

I sedimenti lacustri registrano le passate alluvioni

Forti precipitazioni nel bacino idrografico di un lago causano deflussi superficiali, erosione, mobilizzazione e trasporto di sedimenti negli affluenti. Raggiunto il lago, la forza di trasporto degli affluenti a correnti torbide si riduce e le particelle di roccia si depositano sul fondo del lago formando uno strato di deposito. Le particelle grandi e dense precipitano più rapidamente rispetto a quelle piccole e leggere. Gli strati alluvionali hanno di norma uno spessore che varia da alcuni millimetri ad alcuni centimetri e sono creati da un deposito rapido nel corso di poche ore (Fig. 64). Gli strati alluvionali sono riconoscibili dal fatto che presentano una granulometria più spessa rispetto alla «normale sedimentazione» e una classificazione dei granuli: in un lago i granelli di sabbia si depositano più rapidamente dei fini granelli di silt o di argilla. Gli strati alluvionali si distinguono dalla sedimentazione normale (acque tranquille) anche in rapporto alla composizione chimica, alla densità maggiore e spesso anche in relazione a un basso contenuto di carbonio organico.

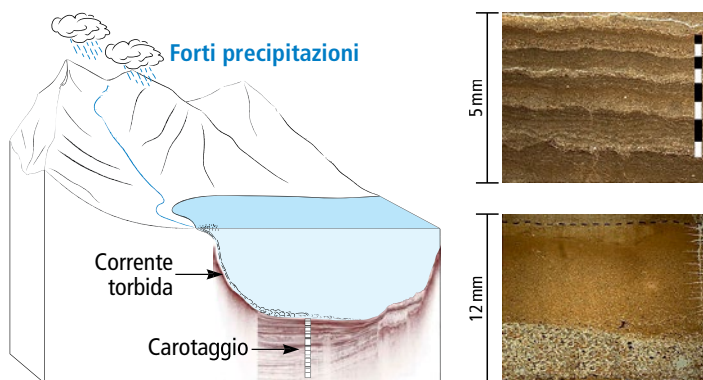


Fig. 64: Schema di un bacino idrografico con la formazione del deposito di uno strato alluvionale e la posizione di un carotaggio (diagramma di sinistra);¹²⁹ Sedimenti dal Lago di Oeschinen¹ mostrano (sopra a destra) una normale sedimentazione con quattro strati annuali (lo strato chiaro rappresenta la primavera con lo scioglimento delle nevi) e (sotto a destra) uno strato alluvionale di 12 mm di spessore con gli spessi granelli di sabbia alla base e uno strato superiore di silt e argilla.¹²⁸

I carotaggi di sedimenti contenenti strati alluvionali possono essere datati precisamente tramite i radionuclidi (^{14}C , ^{210}Pb) oppure contando gli strati di sedimenti annuali (varve). Partendo dai sedimenti di un lago è in questo modo possibile stabilire una cronologia su più millenni delle alluvioni del rispettivo bacino idrografico e calcolare dunque la frequenza delle stesse su un lasso di tempo molto ampio. Va tenuto presente che in regioni a basse quote (Altipiano svizzero o regione del Po) le alluvioni possono verificarsi in qualsiasi stagione, mentre i laghi nella regione alpina registrano alluvioni unicamente nella stagione calda, quando non ci sono i ghiacci. Visto che inoltre le precipitazioni possono variare molto a livello locale e regionale e che la formazione delle piene è fortemente determinata da caratteristiche specifiche dei bacini idrografici (grandezza, geologia, topografia, copertura vegetale, ecc.), è da prevedere una cronologia delle alluvioni diversa di lago in lago. Il Lago Maggiore, per esempio, registra piccole alluvioni ogni circa due anni. Il Lago di Oeschinen registra alluvioni ogni 5–10 anni e il Lago di Silvaplana in media ogni 10–20 anni. Le grandi alluvioni

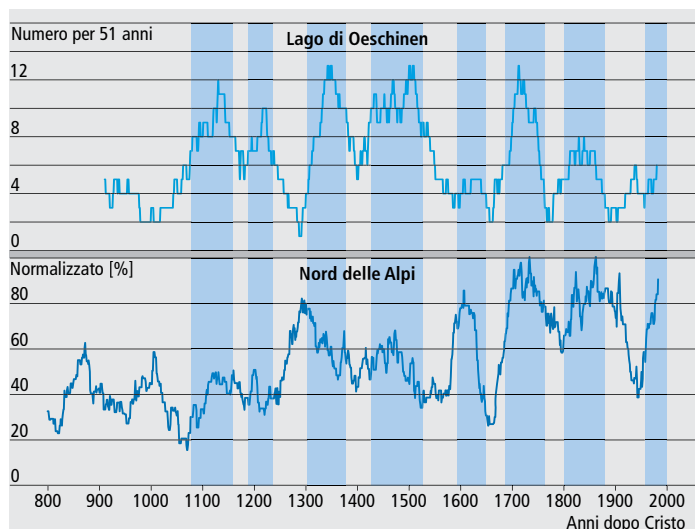


Fig. 65: Frequenza delle alluvioni negli ultimi 1000 anni nel Lago di Oeschinen¹²² e nel Nord delle Alpi (medie di 10 laghi).¹²⁹

regionali sono generalmente ben distinguibili. Nei laghi delle Prealpi e dei versanti sud e nord alpini, le ricostruzioni delle alluvioni permettono di tornare indietro di circa 10 000 anni. Se più laghi della stessa regione mostrano indipendentemente l'uno dall'altro un'elevata attività alluvionale, si può dedurre che i motivi alla base di quest'attività siano di natura climatica. La relazione tra lo spessore di uno strato alluvionale e l'entità della relativa alluvione non è diretta e statisticamente non risulta rilevante. Degli spessi strati alluvionali indicano comunque, in regola, una grande alluvione.

La dinamica a lungo termine delle alluvioni nella regione alpina

Nella regione alpina occidentale e centrale ci sono per il momento circa due dozzine di dettagliate ricostruzioni di alluvioni a partire da sedimenti lacustri, che permettono di tornare indietro di 1000 e spesso anche di 10 000 anni. La frequenza delle alluvioni (numero di alluvioni ogni 50 o 100 anni) mostra nel corso degli ultimi 1000 anni una spiccata variabilità su lassi temporali di più decenni. Il XX secolo è stato da questo punto di vista un periodo relativamente tranquillo. Le ricostruzioni mostrano in maniera molto coerente che le alluvioni sui due versanti dell'arco alpino si sono verificate con maggiore frequenza in periodi contraddistinti da estati fredde e umide. Ciò è chiaramente riconoscibile durante la piccola era glaciale, con valori di punta nella frequenza dell'attività alluvionale nel XIV, XV e XVIII secolo. Anche il XIX secolo presenta una frequenza di alluvioni molto elevata. Nelle Alpi francesi ci sono alcuni indizi isolati che ci fanno pensare che nei periodi caldi e secchi le alluvioni siano state sì più rare, ma più forti nella loro intensità. Per il Lago di Oeschinen è ben documentato un periodo nella prima parte del XIII secolo, che in maniera eccezionale mostra ricorrenti strati alluvionali durante una fase di estati generalmente calde e asciutte. Questo periodo di elevate frequenze all'inizio del XIII secolo manca nelle ricostruzioni eseguite nei laghi prealpini e delle Alpi orientali svizzere, a indicare che per il Lago di Oeschinen si è

trattato probabilmente di alluvioni locali dovute a temporali convettivi estivi sulle montagne. Alcuni modelli di calcolo mostrano che in scenari climatici futuri nell'arco alpino saremo confrontati con processi simili.

L'osservazione degli ultimi 10000 anni deve essere fatta con una certa prudenza, poiché la frequenza delle alluvioni può essere influenzata anche da interventi antropogenici come il disboscamento, i pascoli e le conseguenti modifiche nell'utilizzo del territorio e della copertura vegetale.¹³⁰ Per esempio, i massicci cambiamenti nell'uso del territorio dell'età del bronzo possono sovrapporsi con i cambiamenti climatici verso condizioni più umide e fredde con aumento dei ghiacciai vissute nel secondo millennio avanti Cristo. Le cause che portano a un aumento della frequenza delle alluvioni sono dunque molto complesse e difficili da distinguere. In conclusione, si può comunque affermare che, sia a nord sia a sud delle Alpi, durante l'olocene le alluvioni sono state più frequenti nelle fasi climatiche fredde.

Una ricerca quantitativa su circa 2000 varve (dall'età del bronzo alla fine dell'epoca romana) del Lago di Silvaplana¹ in Engadina ha mostrato che sul lungo termine un raffreddamento delle temperature medie estive pari a 1°C ha portato a un quadruplicazione della frequenza degli strati alluvionali.¹³¹ Per quel che riguarda il Sud delle Alpi si può notare che la frequenza di alluvioni nel primo e nel medio olocene è stata molto bassa e che a partire da circa 4000 anni fa (antica età del bronzo) è aumentata rapidamente e significativamente. I picchi sono stati raggiunti circa 2600 anni fa, nel X secolo e durante la piccola era glaciale. Al Nord delle Alpi, la frequenza delle alluvioni si è ridotta leggermente dall'olocene antico fino al riscaldamento climatico del medio olocene. Le ricostruzioni indicano un graduale ma sensibile aumento della frequenza a partire dalla tarda età del bronzo con picchi di massima durante la piccola era glaciale. Anche nella prospettiva degli ultimi 10000 anni si può osservare una variabilità della frequenza di alluvioni su lassi temporali di decenni e altri di millenni. Alcuni autori hanno stabilito un nesso per i primi con la variazione dell'attività solare e per gli ultimi con cambiamenti dei parametri dell'orbita terrestre. Altri autori ipotizzano che la variabilità su periodi decennali della frequenza di alluvioni al Nord delle Alpi possa piuttosto essere ricondotta alle temperature della superficie del mare nell'Atlantico del Nord (oscillazione multidecennale atlantica AMO, cfr. p. 43) oppure all'oscillazione Nord Atlantica (NAO).

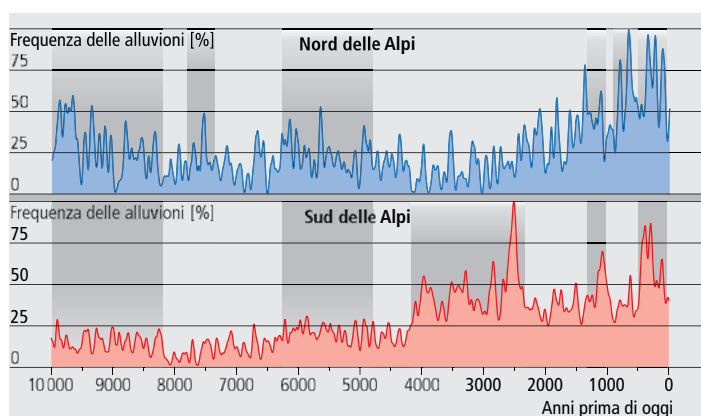


Fig. 66: Frequenza delle alluvioni al Nord delle Alpi (10 laghi) e al Sud delle Alpi (5 laghi) durante gli ultimi 10000 anni.¹³⁰

L'alluvione del 1868 nei sedimenti dei laghi

L'alluvione dell'ottobre 1868 è chiaramente riscontrabile nei sedimenti del bacino Pallanza nel Lago Maggiore e nel Lago di Silvaplana. Nel Lago Maggiore si tratta di uno strato di sedimenti con uno spessore di 12 mm, il più spesso per il periodo determinato dall'inizio delle misurazioni strumentali. Questo strato si trova a circa 71 cm di profondità nei depositi di sedimenti. Il livello del lago superava la media di 6,94 m e l'origine dei sedimenti suggerisce che le acque alluvionali giunsero soprattutto dal fiume Toce, cioè dalla Val d'Ossola.¹³² Nel Lago di Silvaplana lo strato corrispondente all'alluvione del 1868 ha uno spessore di soli 2 mm e quindi inferiore rispetto agli strati delle alluvioni del 1888 (4 mm) e soprattutto a quello del forte evento sovraregionale dell'agosto 1834 (12 mm di spessore). Nei sedimenti del Lago di Silvaplana sono registrate anche le alluvioni più piccole occorse nel 1850, 1860, 1871, e 1874 (in totale 9 alluvioni tra il 1850 e il 1900). Tutte queste alluvioni sono attestate da documenti storici locali.¹³³ Le alluvioni sovraregionali di febbraio e di settembre 1862 mancano

nel Lago di Silvaplana, poiché – secondo le tracce documentali – le precipitazioni in alta quota si verificarono sotto forma di neve e non portarono quindi ad alti deflussi nel Fextal (immissario principale del lago in questione).

Per quanto riguarda il Nord delle Alpi, la ricerca di strati alluvionali corrispondenti al 1868 ha dato risultati negativi nel sud della Germania (Ammersee), nel Toggenburg (Schwenisee), nell'Oberland bernese (Lago di Oeschinen) e nella Alpi francesi (Lac Blanc nei pressi di Grenoble). Nel Lago di Oeschinen sono invece ben distinguibili le grandi alluvioni del 1834, 1852 e 1860. L'anno 1868 non mostra invece nulla di particolare.

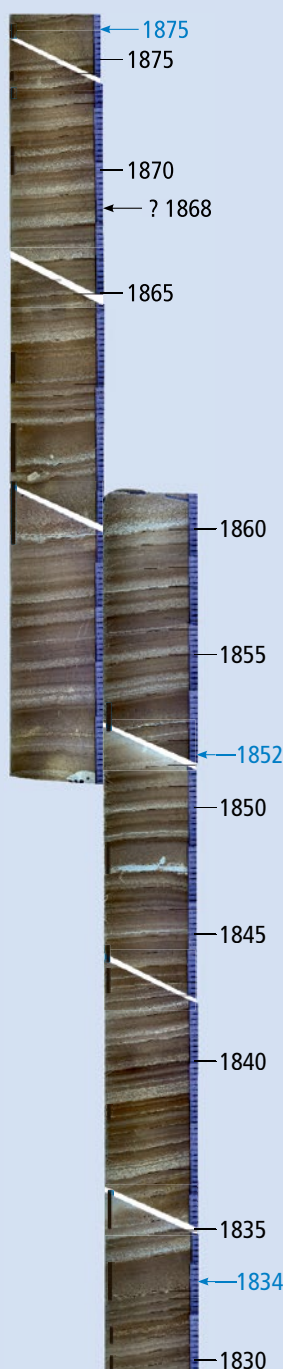


Fig. 67: Strati alluvionali nel Lago di Oeschinen 1830–1875.¹²⁸

Precipitazioni intense e alluvioni dall'inizio delle misurazioni

I fattori che causano le alluvioni, precedentemente presentati in questa pubblicazione, cambiano nel corso del tempo. I corsi d'acqua, l'uso del territorio, i suoli e la vegetazione si modificano e le aree d'insediamento si estendono. Non da ultimo, anche il clima cambia. Negli ultimi 100–200 anni, quindi da quando sono effettuate misurazioni sistematiche, questi fattori si sono sovrapposti.

Cambiamenti nella frequenza delle alluvioni

La sequenza sull'arco di un secolo delle portate massime annuali del fiume Aar a Berna (Fig. 68) mostra picchi molto elevati negli ultimi 20 anni. I cinque valori più elevati – 1999, 2005 (cfr. p. 8), 2015, 2007 e 2004 – fanno tutti parte degli ultimi 20 anni. Questo fatto è riconducibile al cambiamento climatico? Effettivamente, in particolare i fiumi alpini registrano un aumento della portata massima annuale¹³⁴ che può essere ricondotta alle temperature più elevate e al conseguente aumento di quota dell'isoterma di zero gradi. Alcuni studi europei mostrano invece che la stagione delle alluvioni è davvero cambiata,¹³⁵ ma che tuttavia non è riscontrabile un trend generale dell'aumento delle alluvioni.¹³⁶

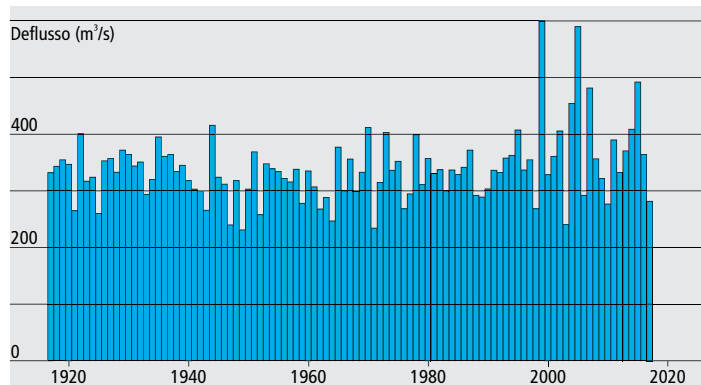


Fig. 68: Portata massima annuale del fiume Aar a Berna (Schönau): trend oppure no? (Dati: UFAM).

Cambiamenti delle precipitazioni intense

Come influisce il cambiamento climatico sui picchi di portata? In Svizzera, a partire da 1900 la temperatura è aumentata di circa 1,5°C.¹³⁷ Ciò influisce direttamente sullo scioglimento delle nevi anticipandone l'inizio e causa meno neve e più pioggia durante l'inverno, cosicché a seconda del regime di deflusso il corso annuale delle portate risulta più equilibrato.¹³⁸ Ma questo fatto riveste per le alluvioni solamente un piccolo ruolo. Molto più importante è il fatto che l'aria calda può contenere più vapore acqueo rispetto a quella fredda, circa il 7% in più per ogni grado Celsius di riscaldamento. Se gli altri fattori dovessero restare uguali, ciò porterebbe a precipitazioni più intense. Le precipitazioni medie in Svizzera a partire dal 1901 non sono aumentate in modo considerevole, ma le precipitazioni massime annuali registrate tra il 1901 e il 2014 sono invece aumentate nel 90% delle stazioni di misurazione svizzere e la maggior parte con un incremento compreso tra il 5 e il 20% (Fig. 70). Le osservazioni corrispondono alla relazione prevista dalla teoria.¹³⁹ Tra il 1901 e il 2014, le forti precipitazioni non sono solamente diventate più intense, bensì anche più frequenti dal 10% al 50% (Fig. 70). Ciò vuol dire che eventi che a inizio del XX secolo accadevano circa tre volte all'anno si verificano oggi circa quattro volte all'anno.

Fluttuazioni decennali

Oltre ai cambiamenti sul lungo termine, il clima mostra variazioni misurabili sull'arco di decenni (cfr. box a sinistra). Queste variazioni sono determinate principalmente dalla temperatura. Se per esempio gli anni '40 erano caldi, gli anni '60 erano invece freddi. Anche la frequenza delle alluvioni mostra fluttuazioni su scala decennale (cfr. p. 40). Fasi caratterizzate da un'alta frequenza di alluvioni si alternano ad altre con pochi eventi di questo tipo. Le cause di questo fenomeno sono ancora

Variabilità su più decenni

Per quale motivo il sistema climatico subisce variazioni a livelli decennali? La causa di tutto ciò è spesso cercata nell'oceano. Esso è da un lato un grande accumulatore di calore. Rimette in equilibrio le oscillazioni di temperatura sul breve termine e rimanda un segnale smussato all'atmosfera. Dall'altro lato, l'oceano stesso è sempre in movimento e trasporta il calore. Ne risulta che le temperature del mare alla superficie fluttuano su scala temporali decennali, influenzando il clima globale. Le più grandi altalene climatiche degli oceani su questa scala temporale sono l'oscillazione decennale pacifica (PDO) e l'oscillazione multidecennale atlantica (AMO).

La PDO è strettamente legata al fenomeno de El Niño nel Pacifico. Se gli eventi El Niño si presentano frequentemente nell'arco di 20 anni, significa che la PDO è positiva. L'AMO non è altro che la temperatura del Nordatlantico, la quale evidenzia una marcata fluttuazione multi decennale (Fig. 69). PDO e AMO influenzano le temperature globali. Per esempio, una fase di PDO negativa negli anni 2000 è stata responsabile di un rallentamento del riscaldamento terrestre – che ha poi riaccelerato bruscamente attorno al 2015.

L'AMO ha conseguenze sugli uragani, sui monsoni in India e in Africa, ma anche su ondate di calore e siccità in Europa.¹⁴⁰ La fase di massima dell'AMO negli anni 1940 andò di pari passo con estati calde e siccità devastanti nel Centro Europa – si verificarono record di calore superati solamente nel 2003.¹⁴¹ Non è ancora risaputo se AMO e PDO abbiano effetti anche sulle precipitazioni intense.

In generale, le variabilità decennali possono però avere effetti considerevoli sulla valutazione dei rischi. Spesso le osservazioni degli ultimi trent'anni sono utilizzate come base per le valutazioni dei prossimi 30. Dovessimo fare ciò con l'indice AMO, sbaglieremmo sistematicamente (Fig. 69). Ciò ci mostra che o consideriamo le fluttuazioni decennali oppure dobbiamo osservare lunghi periodi di tempo.

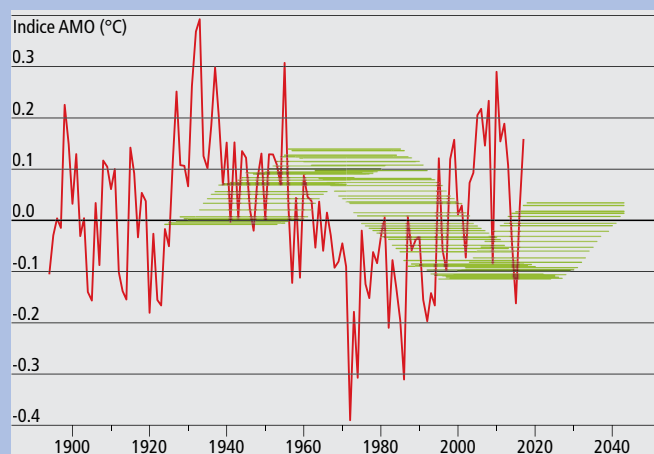
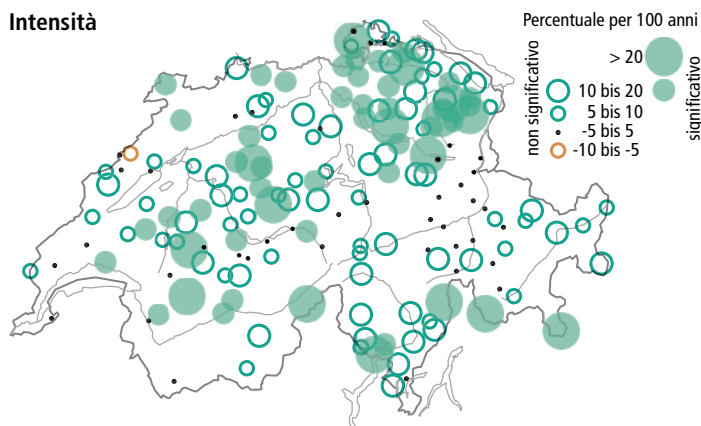


Fig. 69: Indice AMO (Temperatura del mare alla superficie del Nordatlantico al netto della media globale, in grigio) e previsioni dello stesso (in verde), per le quali la media degli ultimi 30 anni è stata usata come base per la previsione dei successivi 30.

sconosciute.⁸² Il XIX secolo mostra molte alluvioni (cfr. riquadro a destra), le quali portarono anche a discussioni politiche – non solo in Svizzera.¹⁴² Al contrario, il periodo compreso tra il 1920 e il 1980 è stato caratterizzato da poche alluvioni. In questo stesso periodo ci sono state anche la ripresa economica dopo la seconda Guerra mondiale, l'estensione delle aree d'insediamento e la costruzione di grandi infrastrutture.¹⁴³ In una fase storica molto importante per il presente, le alluvioni sono dunque passate in secondo piano. A partire dagli eventi del 1978 e del 1987 è cominciato un periodo nuovamente ricco di alluvioni.

Intensità



Frequenza

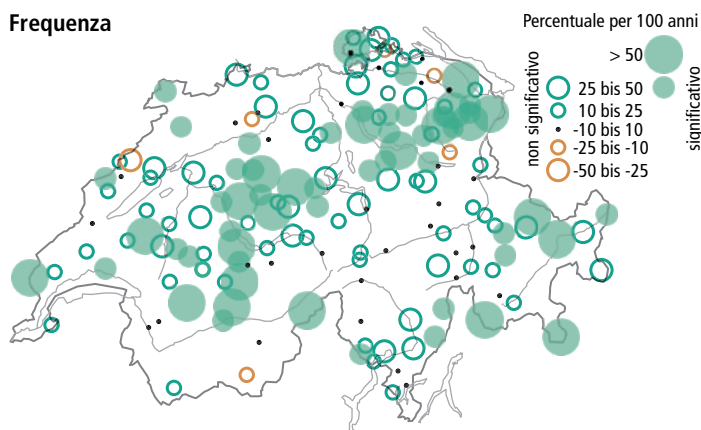


Fig. 70: Trend (in % per secolo) dell'intensità (sopra; precipitazione giornaliera massima per anno) e della frequenza (sotto; giorni che superano il 99 percentile delle precipitazioni giornaliere) per le stazioni di MeteoSvizzera, 1901–2014.¹³⁹



Fig. 71: Contemporaneamente alla ripresa economica degli anni '50, le alluvioni passarono in secondo piano. E iniziò un nuovo stile di vita. I campeggi sono spesso stati costruiti in aree a rischio di alluvioni.

Accumulo di alluvioni nel XIX secolo

Nell'anno 1934, gravi alluvioni colpirono Vallese, Grigioni, Ticino, Uri e Glarona. Nel 1937 fu la Emmental a essere teatro di un'alluvione secolare (cfr. p. 13). Nel 1852 l'Aare raggiunse il più alto livello mai registrato. Già in seguito dell'evento del 1868 si cominciò a dire che le alluvioni fossero divenute più frequenti. Altri eventi di questo tipo seguirono nel 1876 (Fig. 72), 1881 e 1886.

Qual è lo stato attuale delle ricerche? Ci fu veramente una fase con molte alluvioni oppure ciò è unicamente riconducibile alla percezione dei contemporanei? E qual era la causa? Queste domande sono tutt'oggi attuali, non solo per l'interpretazione di eventi passati, ma anche per la valutazione di future alluvioni. Poiché se ci furono variazioni della frequenza delle alluvioni nel passato, allora ci saranno anche in futuro.

L'accumulo di alluvioni nel XIX secolo è un fatto, anche se esse toccarono spesso solamente alcuni bacini idrografici (Fig. 73 mostra la sequenza di piene del Reno a Basilea, così come i più alti livelli del Lago di Costanza e del Lago Maggiore).³² Ciò doveva essere almeno in parte riconducibile alla circolazione atmosferica: le situazioni meteorologiche (cfr. p. 8) propizie per le alluvioni erano più frequenti nel XIX secolo rispetto al XX (Fig. 73). Le cause restano però ad oggi sconosciute.



Fig. 72: Alluvione a Sciaffusa, 1876.

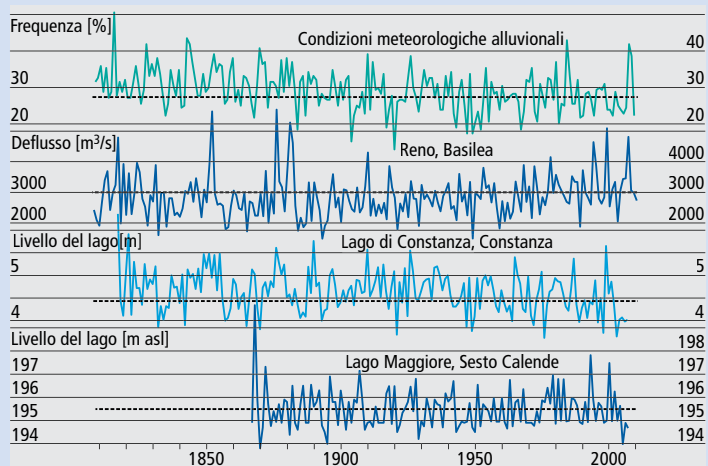


Fig. 73: Portata massima annuale del Reno a Basilea e livello massimo del Lago di Costanza e del Lago Maggiore.³² La linea più in alto indica la frequenza delle situazioni meteorologiche¹⁴ «nord, ciclonica» e «ovest sopra al Sud Europa, ciclonica» (maggio–ottobre), tipiche per lo sviluppo di alluvioni al Nord delle Alpi (tratteggiato: media 1951–2000).

Le alluvioni alla fine del XXI secolo

I cambiamenti dei diversi fattori in grado di influenzare le alluvioni continueranno ancora e la frequenza di questi eventi, così come i danni da essi causati, si modificherà nel tempo. In quale misura avranno luogo i cambiamenti, dipenderà da come l'uomo gestirà il rischio di alluvioni e da come interverrà sull'ambiente idrico e sui corsi d'acqua. Dipenderà anche dagli sviluppi nell'uso del territorio e dai processi naturali legati al suolo e alla vegetazione. Ciò che sicuramente cambierà in modo sostanziale è il clima. È possibile stimare le conseguenze di questo cambiamento?

Lo sviluppo futuro dei gas serra prodotti dall'attività umana giocherà un ruolo importante. A seconda delle decisioni politiche che saranno prese, il riscaldamento globale risulterà maggiore o minore. Se dovessero essere messi in pratica grandi sforzi globali per la protezione del clima, allora l'aumento della temperatura alla fine del XXI secolo potrebbe essere stabilizzato attorno ai 1,5–2 °C in più rispetto al clima preindustriale. Se invece le emissioni di gas serra dovessero continuare ad aumentare, la temperatura globale potrà aumentare di circa 3,5 °C (rispetto al periodo 1986–2005).¹⁴⁴ Nel seguito di questo capitolo analizziamo con precisione questo scenario di grandi cambiamenti (RCP8.5). Lo scopo è di illustrare quali conseguenze potrebbe avere un tale aumento delle temperature globali sulle precipitazioni e i deflussi in Svizzera.

Su una scala regionale, le valutazioni dei futuri sviluppi climatici sono legate a grandi incertezze. Ciò vale in primo luogo per le precipitazioni, una cui corretta simulazione è ulteriormente ostacolata da un'insufficiente comprensione dei processi, per esempio per ciò che concerne i processi di formazione delle nuvole. La risoluzione di modelli permette però di fare passi avanti nella rappresentazione della convezione e della formazione delle nubi, ma questi sviluppi per il momento sono ancora ai loro inizi.¹⁴⁵

Alcuni cambiamenti sono tuttavia più sicuri poiché sono strettamente legati alle temperature. Secondo la legge di Clausius-Clapeyron, un aumento della temperatura comporta un incremento della saturazione di umidità. Avevamo già affermato in precedenza (cfr. p. 10) che i trasporti di umidità estremi in futuro saranno sensibilmente più frequenti. Allo stesso tempo, l'isoterma di zero gradi si sposterà ulteriormente a quote più elevate. Da ciò possiamo trarre le seguenti conclusioni: in primo luogo in futuro ci sarà più umidità a disposizione per le forti precipitazioni, secondariamente le precipitazioni si verificheranno sempre più sotto forma di pioggia e non di neve, in terzo luogo lo scioglimento della neve comincerà prima in primavera. Oltre a queste conseguenze dirette di un aumento della temperatura, vi saranno anche altri effetti indiretti del cambiamento climatico. Vi saranno cambiamenti nella circolazione atmosferica (per esempio cambiamenti nella frequenza delle situazioni meteorologiche) con conseguenze per la Svizzera: lunghe fasi asciutte alternate a brevi ma violente precipitazioni.

Le precipitazioni più intense aumenteranno ancora. La figura 74 mostra come esempio i cambiamenti delle precipitazioni massime su 5 giorni sull'Europa in estate e in inverno basandosi su attuali simulazioni del clima regionale. Su gran parte dell'Europa le precipitazioni massime invernali diventeranno più intense. Per le Alpi questo aumento corrisponderà circa a 15%. Anche le precipitazioni giornaliere massime sull'arco di un anno aumenteranno. La figura 75 mostra questo dato per il bacino idrografico dell'Aar, risultati qui ottenuti tramite «downscaling» statistico a partire da modelli globali (CMIP5). Tutte le simulazioni indicano una chiara intensificazione. Allo stesso tempo assisteremo a un cambiamento della stagionalità delle forti precipitazioni: mentre nel clima attuale la precipitazione giornaliera massima si verifica spesso in piena estate, i modelli prevedono uno spostamento verso l'inizio dell'estate oppure verso il primo autunno. Questo effetto è evidenziato in maniera più marcata dai modelli che per il futuro prevedono siccità estive. I cicloni Vb, che oggi hanno spesso luogo in giugno e in luglio, si verificheranno secondo le simulazioni per la fine del XXI secolo nei mesi di maggio e di settembre.¹⁴⁶ Inoltre, le simulazioni climatiche suggeriscono che in futuro il numero di eventi di tipo Vb diminuirà e che la frequenza in estate di questa situazione meteorologica sarà dunque ridotta.

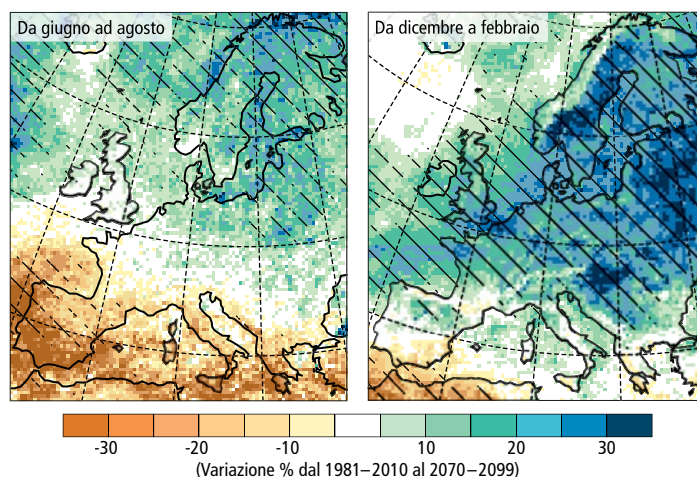


Fig. 74: Cambiamenti delle precipitazioni massime su 5 giorni sull'Europa (in %) per inverni e estati dal 2070 al 2099 rispetto ai valori attuali (1981–2010). Sono mostrati i cambiamenti medi su 15 modelli climatici regionali di Euro-CORDEX con una risoluzione di circa 12 km.¹⁴⁷

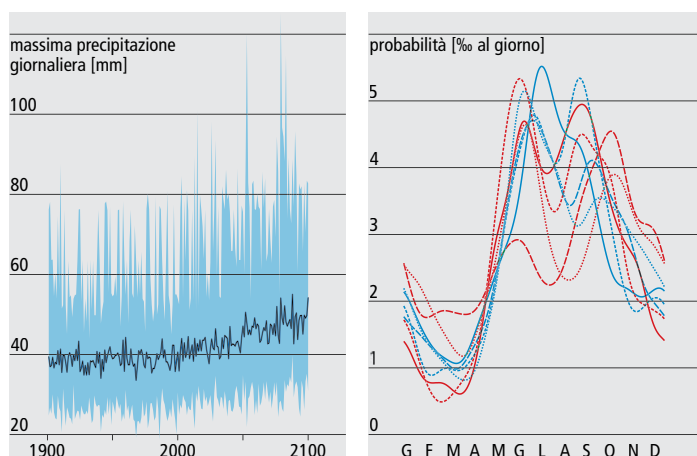


Fig. 75: (A sinistra) Sviluppo delle precipitazioni giornaliere massime per anno per il bacino idrografico dell'Aar dalla simulazione CMIP5 (blu scuro, valori medi di tutte le simulazioni; blu chiaro: valori massimi e minimi). (A destra) Calendario delle precipitazioni giornaliere massime sull'arco di un anno nel presente (1971–2005, blu) e nel futuro (rosso, 2065–2099, le differenti linee indicano differenti modelli di ensemble).¹⁴⁸

Che cosa significa tutto questo per i deflussi e per le alluvioni? La portata del Reno a Basilea (Fig. 76) in futuro sarà più elevata in inverno, mentre in estate le siccità estive si faranno sentire. I picchi di portata massima, normalmente registrati a giugno, potranno essere leggermente più elevati, mentre in piena estate le grandi portate saranno sensibilmente più rare. A causa dei bacini idrografici influenzati dallo scioglimento dei ghiacciai, le portate saranno temporaneamente più alte, fino a quando i ghiacciai non saranno quasi completamente scomparsi e i deflussi legati allo scioglimento dei ghiacci si ridurranno.

Nuovi scenari climatici per la Svizzera (CH2018, www.klimaszenarien.ch) sono attualmente creati nell'ambito del National Center for Climate Services (NCCS). Essi sono pubblicati alla fine del 2018 e costituiscono la base per una serie di studi sulle conseguenze climatiche. Sulla base di questi dati sono calcolati anche nuovi scenari idrologici (Hydro-CH2018). Quest'ultimi faranno luce in particolare anche sui cambiamenti delle alluvioni dovuti agli sviluppi climatici.

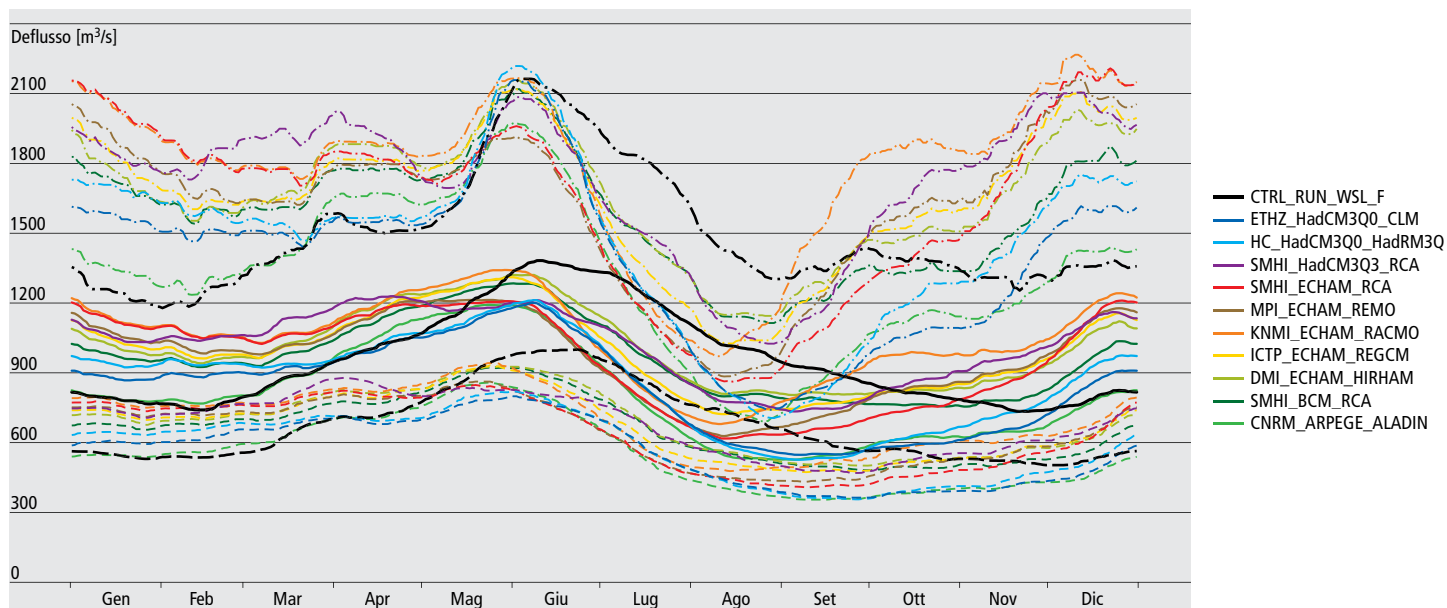


Fig. 76: Cambiamento della portata del Reno a Basilea. Rappresentazione del 10% quantile (tratteggiato), 50% quantile (linea continua) e 90% quantile (a puntini) per il periodo di controllo (1980–2010, nero) e per 10 scenari climatici (a colori) per il periodo attorno al 2085.¹⁴⁹

Come abbiamo ben visto in questo rapporto, molti altri fattori contribuiscono alle alluvioni e determinano i loro danni. Oltre al clima cambierà anche la superficie terrestre. L'uso del territorio subirà delle modifiche e gli interventi umani sui corsi d'acqua e sugli emissari dei laghi sono probabili. Devono essere prese in considerazione anche la trasformazione del paesaggio culturale e la progressiva impermeabilizzazione del suolo, fattori che modificheranno il comportamento dei flussi. È infine probabile un cambiamento dei potenziali danni.

A titolo indicativo per ciò che concerne i possibili futuri cambiamenti socioeconomici, la figura 77 riporta tre scenari per lo sviluppo della popolazione in Svizzera. La popolazione residente in Svizzera raggiungerà nel 2045 i 9,4–11,0 milioni. Allo stesso tempo crescerà anche la richiesta di terreni, con un'intensità variabile a seconda della densità abitativa. La figura 78 mostra uno dei quattro scenari per lo sviluppo

degli insediamenti in Svizzera realizzati in un programma di ricerca nazionale. La crescita degli insediamenti umani prevista da questo scenario sarà percentualmente ancora più elevata rispetto alla crescita della popolazione.

Allo stesso tempo, l'espansione degli insediamenti in aree a rischio potrebbe essere contrastata tramite una pianificazione lungimirante, una mappatura e una definizione delle zone di pericolo, mentre alcune situazioni potrebbero essere migliorate con misure preventive e interventi sui fiumi. Con una prevenzione efficace, migliori previsioni e sistemi d'allerta e una migliore protezione degli oggetti, i danni potrebbero essere ridotti. Le conoscenze sono a disposizione – la futura situazione alluvionale è dunque almeno in parte nelle nostre mani. È molto probabile che – come nel 1868 – saranno singoli eventi alluvionali a dare il via a questi progressi.

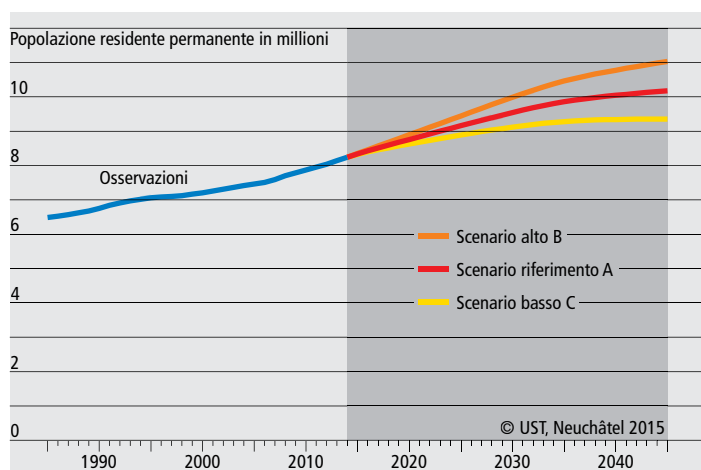


Fig. 77: Scenari per lo sviluppo della popolazione in Svizzera fino al 2045.¹⁵⁰

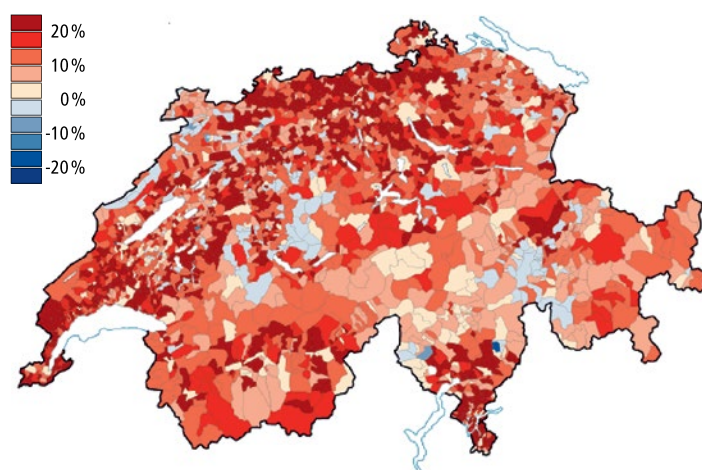


Fig. 78: Crescita delle aree di insediamento dal 2000 al 2030 secondo lo scenario B (Metropolitane Expansion) dello sviluppo degli insediamenti in Svizzera.¹⁵¹

Conclusione

Nell'ottobre 1868 – esattamente 150 anni fa – alcune regioni della Svizzera furono colpite da forti alluvioni. A causa di due fasi di precipitazioni intense dal 27 al 28 settembre e dal 1 al 5 ottobre, molti fiumi e laghi strariparono. La gestione degli enormi danni, l'amministrazione delle notevoli donazioni e la questione dei provvedimenti da prendere in vista di futuri eventi dello stesso tipo furono una grande sfida per il giovane Stato federale e posero le fondamenta per la gestione delle catastrofi naturali.

Nuovi metodi permettono oggi la ricostruzione dettagliata di precipitazioni intense e d'inondazioni del passato, mentre da un punto di vista storico è possibile valutare la gestione di un tale evento. Un progetto di ricerca interdisciplinare del Centro Oeschger per la ricerca climatica dell'Università di Berna e del Mobiliar Lab per i rischi naturali, in collaborazione con MeteoSvizzera, la ditta Meteotest e l'Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio, ha approfondito queste tematiche nel corso degli ultimi due anni. Il contesto meteorologico di questo evento è conosciuto e può essere ricostruito molto bene su grande scala. Anche le situazioni meteorologiche locali e i temporali a esse collegati possono essere riprodotti. La ricerca sui rischi naturali si avvale oggi di catene di modelli per ricostruire gli eventi naturali e le loro conseguenze e per studiare in seguito il ruolo dei singoli fattori. Ciò è possibile anche per l'evento in questione, che risale a ben 150 anni fa. La modellazione idrologica ci mostra che a causa della grande erosione verificatasi durante l'evento del 1868, oggi le acque del Lago Maggiore non potrebbero più raggiungere un livello così alto. La modellazione idraulica può invece designare le aree d'inondazione così come le case a rischio nella regione. Tali simulazioni sono importanti e istruttive per poter valutare i fattori scatenanti e comprendere al meglio l'evento alluvionale mediante l'applicazione di scenari ipotetici. Per ciò che riguarda la valutazione dei danni è emerso che bisogna considerare anche gli effetti sul lungo termine. L'analisi della gestione delle conseguenze dell'alluvione da parte della società mostra come Cantoni e Confederazione abbiano dovuto organizzarsi e quali misure furono adottate in seguito. In questo senso, il contesto sociale e politico nel quale si verifica un evento alluvionale come quello del 1868 è fondamentale per poter mettere in moto un cambiamento di mentalità a livello politico e stabilire una nuova rotta sul lungo termine.

Gli effetti della grave alluvione del 1868 si protraggono fino ai giorni nostri. Aree d'insediamento, arginature dei fiumi, foreste di montagna – senza l'evento del 1868 la Svizzera apparirebbe diversa da come la conosciamo oggi. Allo stesso tempo, a partire dall'evento possiamo trarre insegnamenti per il futuro a proposito di come affrontare le nuove alluvioni. Con l'aumento dell'intensità delle precipitazioni come conseguenza del cambiamento climatico, molto probabilmente si profilano dinnanzi a noi nuove sfide. E anche in futuro ci saranno sicuramente nuovi eventi che daranno un'ulteriore svolta agli approcci seguiti nella protezione contro le alluvioni e che plasmeranno la Svizzera di domani.



Fig. 79: Alluvione sul Lago dei Quattro Cantoni, 2005.

Annotazioni

¹ Mappa dei luoghi menzionati nel testo.



- ² Il lavoro alla base di questo rapporto è stato sostenuto dal Centro di ricerca sul clima Oeschger dell'Università di Berna, dal Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica (progetti EXTRA-LARGE e CHIMES) e dall'Ufficio federale dell'ambiente (progetto EXAR).
- ³ Arpagaus, J. B. (1870) Das Hochwasser des Jahres 1868 mit besonderer Berücksichtigung des Kantons Graubünden. Denkblätter. Chur, Senti & Casanova.
- ⁴ Summermatter, S. (2005) Die Überschwemmungen von 1868 in der Schweiz. Unmittelbare Reaktion und längerfristige Prävention mit näherer Betrachtung des Kantons Wallis. Nordhausen, T. Bautz.
- ⁵ Pfister, C. (2009) Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins. *GAIA* **18**, 239–246.
- ⁶ Vischer, D. (2003) Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 5, Bern.
- ⁷ Pfister, C., D. Brändli (1999) Rodungen im Gebirge – Überschwemmungen im Vorland: Ein Deutungsmuster macht Karriere, in: Sieferle, R. P. und H. Breuninger (Eds.) Natur-Bilder: Wahrnehmungen von Natur und Umwelt in der Geschichte. Frankfurt/New York, Campus Verlag, 297–321.
- ⁸ Gerstengarbe, P. C., F.-W. Werner, U. Rüge (1999) Katalog der Großwetterlagen Europas – nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Vol. 138.
- ⁹ Lamb, H. H. (1972) British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861–1971. *Geophysical Memoir* **116**, London, HMSO.
- ¹⁰ MeteoSchweiz (2015) Typische Wetterlagen im Alpenraum. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.
- ¹¹ Schiemann R., C. Frei (2010) Wetterlagen und Niederschlagsverteilung im europäischen Alpenraum. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.8.
- ¹² Stucki, P., R. Rickli, S. Brönnimann, O. Martius, H. Wanner, D. Grebner, J. Luterbacher (2012) Five weather patterns and specific precursors characterize extreme floods in Switzerland. *Meteorol. Z.* **21**, 531–550.
- ¹³ Wehry, W. (1967) Hochwasser-Wetterlagen in den Alpen. In: Schram, K., J. C. Thams (Eds.): Neunte Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Brig und Zermatt, 14.–17. September 1966. Veröffentlichungen der SMA, Nr. 4.
- ¹⁴ Schwander, M., S. Brönnimann, G. Delaygue, M. Rohrer, R. Auchmann, Y. Brugnara (2017) Reconstruction of Central European daily weather types back to 1763. *Int. J. Climatol.* **37**, 30–44.
- ¹⁵ Giannakaki, P., O. Martius (2015) Synoptic-scale flow structures associated with extreme precipitation events in northern Switzerland. *Int. J. Climatol.* **36**, 2497–2515.
- ¹⁶ Van Bebber, W. (1891) Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890. *Meteorol. Z.* **8**, 361–366.
- ¹⁷ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2015) Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth Syst. Dyn.* **6**, 541–553.
- ¹⁸ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2017) Sensitivity experiments on the response of Vb cyclones to sea surface temperature and soil moisture changes, *Earth Syst. Dyn.* **8**, 477–493.
- ¹⁹ MeteoSchweiz (2006) Starkniederschlagsereignis August 2005. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz* **211**.
- ²⁰ Massacand, A. C., H. Wernli, H. C. Davies (1998) Heavy precipitation on the alpine southside: An upper – level precursor. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1438.
- ²¹ Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: A climatology. *Int. J. Climatol.* **26**, 1149–1164.
- ²² Wernli, H., M. Sprenger (2007) Identification and ERA-15 Climatology of Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause. *J. Atmos. Sci.* **64**, 1569–1586.
- ²³ Barton, Y., P. Giannakaki, H. von Waldow, C. Chevalier, S. Pfahl, O. Martius (2016) Clustering of Regional-Scale Extreme Precipitation Events in Southern Switzerland. *Mon. Weather Rev.* **144**, 347–369.

- 24 Piaget, N., P. Froidevaux, P. Giannakaki, F. Gierth, O. Martius, M. Riemer, G. Wolf, C. M. Grams (2015) Dynamics of a local Alpine flooding event in October 2011: Moisture source and large-scale circulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 1922–1937.
- 25 Compo, G. P. et al. (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**, 1–28.
- 26 Sodemann, H., E. Zuber (2010) Seasonal and inter-annual variability of the moisture sources for Alpine precipitation during 1995–2002. *Int. J. Climatol.* **30**, 947–961.
- 27 Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine Heavy Precipitation with an Overlying Elongated Stratospheric Intrusion: A Climatology. *Int. J. Climatol.* **26**, 1149–1164.
- 28 Froidevaux, P., O. Martius (2016) Exceptional integrated vapour transport toward orography: an important precursor to severe floods in Switzerland. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **142**, 1997–2012.
- 29 Dacre, H. F., P. A. Clark, O. Martinez-Alvarado, M. A. Stringer, D. A. Lavers (2015) How Do Atmospheric Rivers Form? *Bull. American Meteor. Soc.* **96**, 1243–1255.
- 30 Lavers, D. A., F. Pappenberger, E. Zsoter (2014) Extending medium-range predictability of extreme hydrological events in Europe. *Nature Commun.* **5**, 5382.
- 31 Aemisegger, F., S. Pfahl, H. Sodemann, I. Lehner, S. I. Seneviratne, H. Wernli (2014) Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 4029–4054.
- 32 Stucki, P. et al. (2018) Reconstruction and simulation of an extreme flood event in the Lago Maggiore catchment in 1868. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* (in review).
- 33 Bougeault, P. et al. (2012) The MAP Special Observing Period. *Bull. American Meteor. Soc.* **82**, 433–462.
- 34 Panziera, L., C. N. James, U. Germann (2015) Mesoscale organization and structure of orographic precipitation producing flash floods in the Lago Maggiore region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 224–248.
- 35 Coaz, J. F. (1869) Die Hochwasser im September und October 1868 im bündnerischen Rheingebiet. Vom naturwissenschaftlichen und hydrotechnisch-forstlichen Standpunkt betrachtet. Mit sechs Landschaftsbildern, zehn Bach- und Flußprofilen und einer graph. Darstellung der Wassermassen der atmosphärischen Niederschläge. Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- 36 Naef, F., S. Scherrer, C. Zurbrügg (1999) Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7, Bern.
- 37 Weingartner, R., J. Fürst, K. Schulz (in Vorbereitung) Hydrologie der europäischen Alpenflüsse. Wien.
- 38 Bezzola, G. R., C. Hegg (Eds.) (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2. Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern.
- 39 Ginzler, C., U.-B. Brändli, M. Hägeli (2011) Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. *Swiss Forestry Journal* **162**, 337–343.
- 40 Ambrosetti, W., L. Barbanti, R. de Bernardi, V. Libera, A. Rolla (1994) La piena del Lago Maggiore dell'autunno 1993: un evento di portata secolare. *Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* **45**.
- 41 Diezig, R. (2006) Hochwasserprozesstypen in der Schweiz – Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Tesi di master, Università di Berna.
- 42 BWG (2000) Hochwasser 1999. Studienbericht Nr. 10. Bern.
- 43 MeteoSchweiz (2017) Klimareport 2016. Zürich.
- 44 Spycher, F. (2018) Witterungsbedingte Ausgaben des Basler Rates. Eine Untersuchung der Basler Wochen-Ausgabenbücher, 1600–1650. Tesi di master, Università di Berna. Una versione leggermente modificata sarà disponibile online in «Berner Studien zur Geschichte», e Longoni, R. (2017) Saanehochwasser und kommunaler Hochwasserschutz in Freiburg i. Ü., 1387–1570, in: *Freiburger Geschichtsblätter* **94**, 55–99. Questo studio si basa sulla tesi di master di Berna del 2016, che sarà pubblicata integralmente nel 2018 nell'ambito della collana online «Berner Studien zur Geschichte».
- 45 Per l'utilizzo di disegni piano storici per la ricostruzione delle alluvioni: Bolzern, M. (2017) Reconstruction of historical floods of the Aare River in Aarau. Tesi di master, Università di Berna. Una versione leggermente modificata sarà disponibile online in «Berner Studien zur Geschichte».
- 46 Per esempio, vedi: Die Berner Matte – Archiv: Hochwasser 2005 – Aufbau-News: <https://www.matte.ch/archive-der-berner-matte/frischnotiert/1277-hochwasser-2005-aufbau-news> (19 maggio 2018)
- 47 Ilotta, F. A., M. Begert, C. Frei (2018) Long-term consistent monthly temperature and precipitation grid datasets for Switzerland over the past 150 years (in preparazione).
- 48 Ciampittello, M. (2017) Grafico disegnato a mano dell'andamento dei livelli del Lago Maggiore nell'anno 1868. Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ISE-CNR) (pers. comm.).
- 49 Germann, U., M. Boscacci, M. Gabella, M. Sartori (2015) Peak performance – Radar design for prediction in the Swiss Alps. *Meteorological Technology International*, April 2015, 42–45.
- 50 Germann, U., D. Nerini, I. Sideris, L. Foresti, A. Hering, B. Calpini (2017) Real-time radar – A new Alpine radar network. *Meteorological Technology International*, April 2017, 88–92.
- 51 Joss, J., R. Lee (1995) The Application of Radar-Gauge Comparisons to Operational Precipitation Profile Corrections. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 2612–2630.
- 52 Germann, U., G. Galli, M. Boscacci, M. Bolliger (2006) Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **132**, 1669–1692.
- 53 Sideris, I. V., M. Gabella, R. Erdin, U. Germann (2014) Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **140**, 1097–1111.
- 54 Montani, A., D. Cesari, C. Marsigli, T. Paccagnella (2011) Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus* **63**, 605–624.
- 55 Mandapaka, P. V., U. Germann, L. Panziera, A. Hering (2012) Can Lagrangian extrapolation of radar fields be used for precipitation nowcasting over complex Alpine orography? *Weather Forecast.* **27**, 28–49.
- 56 Panziera, L., M. Gabella, S. Zanini, A. Hering, U. Germann, A. Berne (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **20**, 2317–2332.
- 57 Zappa, M., S. Jaun, U. Germann, A. Walser, F. Fundel (2011) Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmos. Res.* **100**, 246–262.
- 58 Germann, U., M. Berenguer, D. Sempere-Torres, M. Zappa (2009) REAL – Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **135**, 445–456.
- 59 Viviroli, D., M. Zappa, J. Gurtz, R. Weingartner (2009) An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* **24**, 1209–1222.
- 60 Romang, H. et al. (2011) IFKIS-Hydro: an early warning and information system for floods and debris flows. *Nat. Hazards* **56**, 509–527.
- 61 Addor, N., S. Jaun, F. Fundel, M. Zappa (2011) An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**, 2327–2347.
- 62 Andres, N., G. Lieberherr, I. V. Sideris, F. Jordan, M. Zappa (2016) From calibration to real-time operations: an assessment of three precipitation benchmarks for a Swiss river system. *Meteorol. Appl.* **23**, 448–461.
- 63 Brönnimann, S., O. Martius, S. Dierer (2014) Die Wetter-Zeitmaschine. *Phys. unserer Zeit* **45**, 84–89.
- 64 Dee, D. P. et al. (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. R. Meteorol. Soc.* **137**, 553–597.
- 65 Laloyaux, P. et al. (2018) CERA – 20C: A coupled reanalysis of the Twentieth Century. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **10**, 1172–1195.
- 66 Skamarock, W. C. et al. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note.
- 67 Guichard F., F. Couvreur (2017) A short review of numerical cloud-resolving models. *Tellus A* **69**, 1.
- 68 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily mean, minimum and maximum temperature: TabsD, TminD, TmaxD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 69 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily precipitation (final analysis): RhiresD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 70 Nemeč, J. (1993) Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, CHR/KHR-Report No. II-7, secretariaat CHR/KHR, Maerlant 16, Postbus 17, Lelystad NL.

- 71 Moreau de Jonnés, A. (1828) Untersuchungen über die Veränderungen, die durch die Ausrottung der Wälder in dem physischen Zustand der Länder entstehen. Aus dem Französischen übersetzt von W. Widenmann, Prof. der Forstwissenschaft zu Tübingen. Tübingen, C. F. Osiander.
- 72 Cook, J. L. (1987) Quantifying peak discharges for historical floods. *J. Hydrol.* **96**, 29–40.
- 73 Hosking, J. R. M., J. R. Wallis (1986) The Value of Historical Data in Flood Frequency Analysis. *Water Resour. Res.* **22**, 1606–1612.
- 74 Baker, V. R. (1987) Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *J. Hydrol.* **96**, 79–99.
- 75 Schulte, L., J. C. Peña, F. Carvalho, T. Schmidt, R. Julià, J. Llorca, H. Veit (2015) A 2600-year history of floods in the Bernese Alps, Switzerland: frequencies, mechanisms and climate forcing. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3047–3072.
- 76 Ballesteros-Cánovas, J. A., C. Rodríguez-Morata, V. Garófano-Gómez, J. M. Rubiales, R. Sánchez-Salguero, M. Stoffel (2015) Unravelling past flash flood activity in a forested mountain catchment of the Spanish Central System. *J. Hydrol.* **529**, 468–479.
- 77 Wetter, O. (2017) The potential of historical hydrology in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **21**, 5781–5803.
- 78 Benito, G., R. Brázdil, J. Herget, M. J. Machado (2015) Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3517–3539.
- 79 Bodoque, J. M., A. Díez-Herrero, M. A. Eguibar, G. Benito, V. Ruiz-Villanueva, J. A. Ballesteros-Cánovas (2015) Challenges in paleoflood hydrology applied to risk analysis in mountainous watersheds – A review. *J. Hydrol.* **529**, 449–467.
- 80 Herget, J., H. Meurs (2010) Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. *Glob. Planet. Change* **70**, 108–116.
- 81 Wilhelm, B., H. Vogel, C. Crouzet, D. Etienne, F. S. Anselmetti (2016) Frequency and intensity of palaeofloods at the interface of Atlantic and Mediterranean climate domains. *Clim. Past* **12**, 299–316.
- 82 Schmocker-Fackel, P., F. Naef (2010) Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14**, 1581–1594.
- 83 Reist, T., R. Weingartner, J. Gurtz (2002) Wege bei der Beschreibung alter Hochwasser – «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». *Wasser und Boden* **54**, 50–54.
- 84 Rogger, M. et al. (2017) Land-use change impacts on floods at the catchment scale – Challenges and opportunities for future research. *Water Resour. Res.* **53**, 5209–5219.
- 85 Bronstert, A. et al. (2007) Multi-scale modelling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine basin. *River Res. Applic.* **23**, 1102–1125.
- 86 Pinter, N., R. R. van der Ploeg, P. Schweigert, G. Hoefler (2006) Flood magnification on the River Rhine. *Hydrol. Process.* **20**, 147–164.
- 87 Vermeer, J. A. M., P. A. Finke, A. Zwertvaegher, V. Gelorini, M. Bats, M. Antrop, J. Verniers, P. Crombé (2014) Reconstructing a prehistoric topography using legacy point data in a depositional environment. *Earth Surf. Proc. Land.* **39**, 632–645.
- 88 Munoz, S. E., L. Giosan, M. D. Therrell, J. W. F. Remo, Z. Shen, R. M. Sullivan, C. Wiman, M. O'Donnell, J. P. Donnelly (2018) Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. *Nature* **556**, 95–98.
- 89 Zischg, A. P., P. Hofer, M. Mosimann, V. Röthlisberger, J. A. Ramirez, M. Keiler, R. Weingartner (2018) Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Sci. Total Environ.* **639**, 195–207.
- 90 Iverson, R. M. (2005) Debris-flow mechanics, in: Debris-flow hazards and related phenomena (Jakob, M., O. Hungr). Berlin, Springer, 105–134.
- 91 Haeberli, W., D. Rickenmann, U. Rösli, M. Zimmermann (1990) Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: General concept and geophysical soundings. *IAHS Publ.* **194**, 303–310.
- 92 Zimmermann, M., P. Mani, P. Gamma, P. Gsteiger, O. Heiniger, G. Hunziker (1997) Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. NFP31. Schlussbericht. Zürich, Vdf Verlag.
- 93 Gamma, P. (1999) dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Tesi di dottorato, Università di Berna.
- 94 Christen, M. et al. (2012) Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit «RAMMS» (Rapid Mass Movements). *Zeitschrift für Wildbach-, Lawnen-, Erosions- und Steinschlagschutz* **169**, 282–293.
- 95 Rickenmann, D. (1999) Empirical relationships for debris flows. *Nat. Hazards* **19**, 47–77.
- 96 Horton, P., M. Jaboyedoff, B. Rudaz, M. Zimmermann (2013) Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* **13**, 869–885.
- 97 vedi i rapporti: Landolt, E. (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweizerischen Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. Bern, e Culmann, C. (1864) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Wildbäche, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863. Zürich, Zürcher und Furrer.
- 98 Berichte der Expertencommissionen über die Ursachen und den Betrag des durch die Ueberschwemmungen im Jahr 1868 in den Cantonen Uri, St. Gallen, Graubünden, Tessin und Wallis angerichteten Schadens. Bern, 1869 (Archivio federale, Dossier BAR E 21 21724.)
- 99 Schmid, F. (2001) Politische Konsequenzen aus dem Unwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwasserschutzes.
- 100 Piton, G., S. Carladou, A. Recking, J. M. Tacnet, F. Liébault, D. Kuss, Y. Quefféléan, O. Marco (2017) Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surf. Process. Landforms* **42**, 91–108.
- 101 Bundesrat (2016) Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz – Bericht des Bundesrates, Bern.
- 102 Egli, T. (2005) Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren: Wegleitung, https://www.vkg.ch/media/1375/wegleitung_objektschutz_gegen_gravitativ_naturgefahren_d_v0-0.pdf.
- 103 Suda, J., M. Holub, J. Hübl, W. Jaritz, H. Starl, F. Rudolf-Miklau (2012) Gefährdungs- und Schadensbilder für Gebäude, in: Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz (J. Suda, F. Rudolf-Miklau, Eds.). Wien/New York, Springer, 71–117.
- 104 Röthlisberger, V., A. Zischg, M. Keiler, M. Lang, F. Klijn, P. Samuels (2016) Spatiotemporal aspects of flood exposure in Switzerland. *E3S Web. Conf.* **7**, 8008
- 105 Statistiche di perdita dell' Associazione degli istituti cantonali di assicurazione antincendio, luglio 2018.
- 106 Apel, H., G. T. Aronica, H. Kreibich, A. H. Thieken (2009) Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Nat. Hazards* **49**, 79–98.
- 107 Papatoma-Köhle, M., M. Kappes, M. Keiler, T. Glade (2011) Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Nat. Hazards* **58**, 645–680.
- 108 Bandhauer, M. (2017) Historical reconstruction and numerical simulation of an extreme flood event on Lago Maggiore in 1868. Tesi di master, Facoltà di lettere, Università di Berna.
- 109 Summermatter, S. (2012) Die Prävention von Überschwemmungen durch das politische System der Schweiz von 1848 bis 1991. Tesi di dottorato, Università di Berna. <https://boris.unibe.ch/id/eprint/97587>
- 110 L'impiego delle truppe nel 1868 avvenne in maniera spontanea e senza basi costituzionali. Dopo che uno stesso tipo di impiego spontaneo ebbe luogo anche nel 1876 e 1877, il Consiglio federale nel 1877 accolse in maniera formale questo tipo di intervento. Oggi, l'intervento dell'esercito in caso di catastrofi è suddiviso tra l'intervento spontaneo e l'aiuto militare in caso di catastrofi. L'aiuto spontaneo è portato da truppe stanziato nei pressi del luogo dell'evento ed è deciso dal comandante delle truppe; l'aiuto militare in caso di catastrofe è invece deciso dal Dipartimento della difesa, della protezione della popolazione e dello sport su richiesta dei Cantoni. Ulteriori interventi, per esempio per i lavori di riordino e di ricostruzione, sono regolati separatamente (Cfr. Summermatter 2012, S. 220-221).
- 111 Wanner, C. (2003) Ein tragbares Risiko? Naturkatastrophen als Auslöser für Lernprozesse: die Entstehung der Elementarschadenversicherung in der Schweiz. *Traverse* **10**, 100–114.
- 112 Wanner, C. (2002) 100 Jahre zeitgemäss – Meilensteine in der Brand- und Elementarschadenversicherung in der Schweiz. Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen und Schweizerischer Pool für Erdbebendeckung. Bern.
- 113 Fischer, M. (2004) Solidarität schafft Sicherheit. Die Kantonalen Gebäudeversicherungen als System. In: Pfister C., S. Summermatter (Eds.): Katastrophen und ihre Bewältigung, Perspektiven und Positionen. Bern, Haupt.
- 114 Von Ungern-Sternberg, T. (2004) Efficient Monopolies. The Limits of Competition in the European Property Insurance Market. Oxford University Press.

- 115 Thomi, L., A. Zischg, H. Suter (2015) Was macht Hochwasserschutzprojekte erfolgreich?: Eine Evaluation der Risikoentwicklung, des Nutzens und der Rolle privater Geldgeber, Istituto di geografia, Bern.
- 116 Foto pubblicate in «Rheinnot in Liechtenstein. Zum 50. Jahrestag der Rheinüberschwemmungen von 1927», herausgegeben von den Gemeinden Eschen, Gamprin, Mauren, Ruggell, Schaan und Schellenberg. Schaan 1977: p. 114.
- 117 Nienhaus, A. (2000) Naturkatastrophe und Modernisierungsprozess. Tesi di master, Università di Berna.
- 118 Secondo una proiezione basata su un indice storico dei salari nel 2009, questo importo di 3,63–4 milioni di franchi corrisponde a 272–300 milioni di franchi. (<http://www.swistoval.ch>, 28 aprile 2018).
- 119 Knap, H. (1996) Hilfe, die Helfer kommen. Karitative Organisationen im Wettbewerb um Spenden und Katastrophen.
- 120 Vischer, D. L. (1986) Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich 84). Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 1986.
- 121 Speich, D. (2003) Helvetische Meliorationen. Die Neuordnung der gesellschaftlichen Naturverhältnisse an der Linth (1783–1823), Zürich, Chronos.
- 122 Nast, M. (2006) Überflutet – überlebt – überlistet. Die Geschichte der Juragewässerkorrekturen. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- 123 Trottmann, J. (2017) Echte Kompromisse führen zu echten Lösungen. Der politische Entscheidungsprozess zur ersten Juragewässerkorrektur. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- 124 Salvisberg, M. (2017) Der Hochwasserschutz an der Gürbe. Eine Herausforderung für Generationen (1855–2010). Wirtschafts-, Sozial- und Umweltgeschichte 7, Basel.
- 125 Zaugg, M. (2006) Philosophiewandel im schweizerischen Wasserbau. Zur Vollzugspraxis des nachhaltigen Hochwasserschutzes. Publication series in Human Geography, 20, Zurich.
- 126 Gavilano, A., K. Ingold (2016) Under what conditions does an extreme event deploy its focal power? Paradigm change during one century of Swiss flood prevention. Presented at the Annual Conference of Swiss Political Science, Basel.
- 127 Sulla medialità di questi eventi: Zemp, H. (2015) Von der Wassernot zu «SOS! Die Schweiz versinkt»: Wahrnehmung und Darstellung von Naturkatastrophen 1910–2005 in der Schweizer Presse, 2 Bde., Diss. Universität Zürich; vedi anche: Burger, L. (2008) Informationsbeschaffung bei Hochwassersituationen. Dokumentation der grössten überregionalen Hochwasserkatastrophen der letzten 200 Jahre in der Schweiz. Tesi di master, Università di Berna.
- 128 Amann, B., S. Szidat, M. Grosjean (2015) A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: implications for the future. *Quat. Sci. Rev.* **115**, 89–100.
- 129 Glur, L., S. B. Wirth, U. Büntgen, A. Gilli, G. H. Haug, C. Schär, J. Beer, F. S. Anselmetti (2013) Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years. *Sci. Rep.* **3**, 2770.
- 130 Wirth, S.B., L. Glur, A. Gilli, F.S. Anselmetti (2013) Holocene flood frequency across the Central Alps - solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. *Quat. Sci. Rev.* **80**, 112-128.
- 131 Stewart, M. M., M. Grosjean, F.G. Kuglitsch, S.U. Nussbaumer, L. von Gunten (2011) Reconstructions of late Holocene paleofloods and glacier length changes in the Upper Engadine, Switzerland (ca. 1450 BC/AD 420). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **311**, 215-223.
- 132 Kämpf, L., A. Brauer, P. Dulski, A. Lami, A. Marchetto, S. Gerli, W. Ambrosetti, P. Guilizzoni (2012) Detrital layers marking flood events in recent sediments of Lago Maggiore (N. Italy) and their comparison with instrumental data. *Freshwater Biol.* **57**, 2076–2090.
- 133 Caviezel, G. (2007) Hochwasser und ihre Bewältigung anhand des Beispiels Oberengadin 1750-1900. Tesi di master, Università di Berna.
- 134 Castellarin, A., A. Pistocchi (2012) An analysis of change in alpine annual maximum discharges: implications for the selection of design discharges. *Hydrol. Process.* **26**, 1517–1526.
- 135 Blöschl, G. et al. (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science* **357**, 588–590.
- 136 Madsen, H. et al. (2014) Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. Hydrol.* **519**, 3634–3650.
- 137 Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016) Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports* **11(5)**.
- 138 BAFU (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Bern.
- 139 Scherrer, S. C., E. M. Fischer, R. Posselt, M. A. Liniger, M. Croci-Maspoli, R. Knutti (2016) Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland, *J. Geophys. Res.* **121**, doi:10.1002/2015JD024634.
- 140 Sutton, R. T., D. L. Hodson (2005) Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* **309**, 115–118.
- 141 Schär C., P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, C. Appenzeller (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332–336.
- 142 Brückner, E. (1890) Klima-Schwankungen seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit, Wien.
- 143 Pfister, C. (1995) Das 1950er Syndrom. Der Weg in die Konsumgesellschaft. Bern, Verlag Paul Haupt.
- 144 Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 145 Ban, N., J. Schmidli, C. Schär (2015) Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophys. Res. Lett.* **42**, 1165–1172.
- 146 Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2018) The Impact of Climate Change on the Climatology of Vb-Cyclones. *Tellus*, submitted.
- 147 Rajczak, J., C. Schär (2017) Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *J. Geophys. Res.* **122**, 10773–10800.
- 148 Brönnimann, S., J. Rajczak, E. Fischer, C. C. Raible, M. Rohrer, C. Schär (2018) Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* **18**, 2047-2056.
- 149 Bundesamt für Umwelt BAFU (Ed.) (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217.
- 150 Bundesamt für Statistik (2015) Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2015–2045. Neuchâtel.
- 151 Perlik, M., U. Wissen, M. Schuler, J. Hofschreuder, A. Jarne, M. Keiner, D. Cavens, W. A. Schmid (2008) Szenarien für die nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung in der Schweiz (2005–2030). Abschlussbericht NFP 54. Zürich und Lausanne.

Foto credito

Immagine di copertina: Foto: Esercito svizzero / Forze aeree; acquarello: Proprietà privata/Riproduzione Staatsarchiv St. Gallen, ZMH 05/006

Fig. 1: Wikipedia, autore sconosciuto

Fig. 3: © Kanton Bern

Fig. 4: Foto: Hansjörg Marbach.

Fig. 5: Foto a sinistra: Giacomo Imperatori, Foto a destra Peter Stucki

Fig. 7: Annot. 20 e di note di lezione, M. Sprenger, ETH Zürich

Fig. 13: Foto: Ralph Rickli

Fig. 15: Xilografia da Emil Zbinden (Jeremias Gotthelf: «Die Wassernot im Emmental», Büchergilde Gutenberg 1951). Archivio Emil Zbinden, Gabinetto delle stampe, Biblioteca nazionale svizzera, Berna. ©Limmat Verlag e K. Zbinden, Bern.

Fig. 24: Foto: Blank

Fig. 28: Proprietà privata/Riproduzione Staatsarchiv St. Gallen, ZMH 05/006

Fig. 30: Foto a sinistra: Stefan Brönnimann, Foto a destra: www.naturwissenschaften.ch

Fig. 35: Fotos: MeteoSchweiz

Fig. 38: ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke

Fig. 40: Hinkender Bot 1911, e-periodica

Fig. 51: Archivio di Stato del Cantone Ticino

Fig. 53: Ufficio federale di topografia swisstopo

Fig. 54: Foto a destra: Ton Venzin

Fig. 56: <https://map.geo.admin.ch/>

Fig. 60: Gemeindearchiv Vals

Fig. 61: Liechtensteinische Post AG

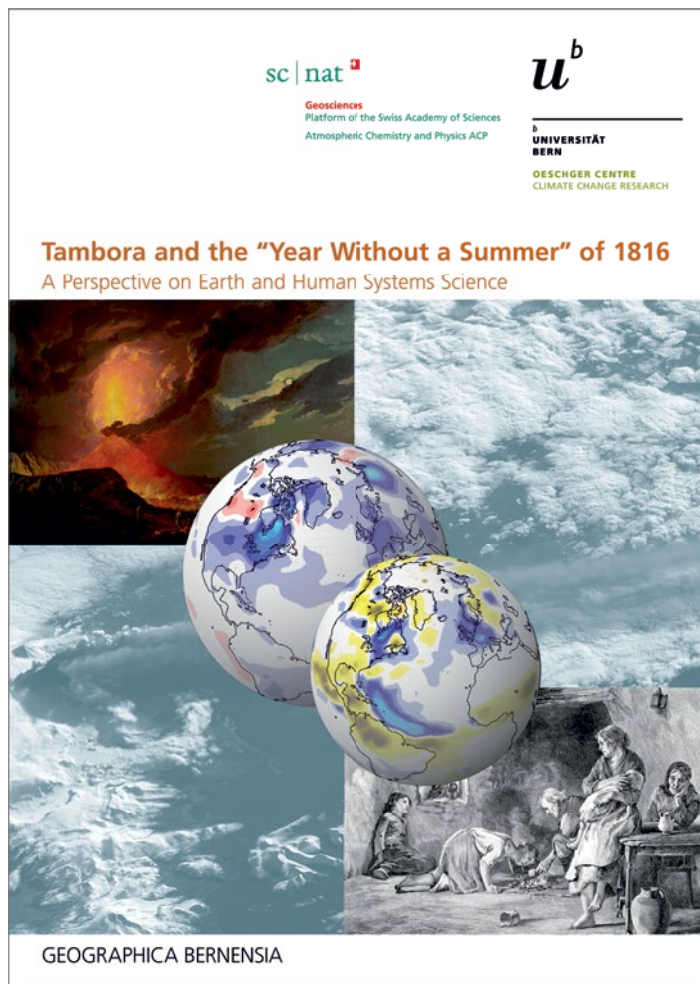
Fig. 62: Archivio federale, Signatur E 21 21715

Fig. 63: Expertenbericht von Leopold Blotnitzky und Friedrich Wilhelm Hartmann, Juni 1863, Archivio federale, Sig. E 19 1443 (a sinistra); Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hg.): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung 1982. Bern 1982, 18 (a destra).

Fig. 71: Interfoto / Alamy Stock Foto

Fig. 72: Foto: Louis-Alphonse Tronel (Bruno Sternegg, <http://www.schaffhausen-foto-archiv.ch/hochwasser.html>, e Stadtarchiv Schaffhausen, Ref. Code: J 02.01.207/047)

Fig. 75: Foto: Esercito svizzero / Forze aeree



Brönnimann S., Krämer D. (2016): Tambora and the „Year Without a Summer“ of 1816. A Perspective on Earth and Human Systems Science. Geographica Bernensia G 90, 48 pp., doi:10.4480/GB2016.G90.01



Dicembre 1916: Il Mese della Morte Bianca

Una delle peggiori catastrofi meteorologiche della storia prese forma nelle Alpi sud-orientali durante il terribile inverno del 1916/17. Le abbondanti nevicate causarono innumerevoli valanghe, uccidendo migliaia di soldati impegnati al fronte, ma anche civili. Oggi è possibile rivisitare l'evento in dettaglio grazie a ricostruzioni basate sui modelli che vengono usati quotidianamente per le previsioni meteo. Questo mostra come si possono combinare tecniche numeriche e documenti storici per comprendere meglio gli eventi estremi nel passato e nel futuro, nonché il loro impatto sociale.

Cento anni fa l'Europa era nel mezzo della Prima Guerra Mondiale. Sul fronte italiano, gli eserciti dell'Impero Austro-Ungarico e del Regno d'Italia si affrontavano in uno dei più estremi campi di battaglia della storia, sulle cime delle Alpi sud-orientali (Box 1: Il fronte italiano). Qui, durante gran parte dell'anno, i combattimenti cessavano quasi completamente, per lasciare spazio ad un'altra guerra, combattuta contro il freddo, il ghiaccio e la neve.^{1,2} Con medie di oltre 2 metri di precipitazioni all'anno, quella parte delle Alpi è una delle regioni più piovose del continente. I soldati erano letteralmente sepolti dalla neve, tanto che i loro corpi vengono restituiti ancora oggi dai ghiacci in ritirata, un drammatico promemoria di quell'assurda carneficina.

Anche il destino giocò contro quegli uomini, facendo dell'inverno 1916/17 uno dei più nevosi del secolo (Fig. 1), una situazione riconosciuta come eccezionale già allora.^{3,4} Tra il novembre 1916 e il gennaio 1917, un pluviometro nei pressi del Tanvino misurò 1432 mm di precipitazione, circa l'80% di quanto si misura normalmente in un anno. E dopo un febbraio secco, ulteriori 560 mm si aggiunsero tra marzo e aprile 1917.

Ci fu un giorno in particolare che entrò di diritto nei libri di storia: il 13 dicembre 1916, conosciuto in Italia come la «Santa Lucia Nera».

In questo giorno, che seguì una settimana di nevicate incessanti, l'arrivo di una massa d'aria calda e umida dal Mediterraneo portò intense precipitazioni e un aumento della quota neve, causando innumerevoli valanghe ovunque nella regione (vedi Box 2: Le valanghe al fronte). Il numero di perdite umane fu senza precedenti per questo tipo di evento naturale. Un conteggio accurato non è pos-



Foto 1: Trincea sul Monte Sciorluzzo, presso Passo dello Stelvio.

Autori: Yuli Brugnara^{A,B}, Stefan Brönnimann^{A,B}, Marcelo Zamuriano^{A,B}, Jonas Schild^A, Christian Rohr^{A,C}, Daniel Marc Segesser^D

^A Deschger Centre for Climate Change Research, Università di Berna, Berna, Svizzera

^B Istituto di Geografia, Università di Berna, Berna, Svizzera

^C Istituto di Storia, Università di Berna, Berna, Svizzera

^D Citazione: Brugnara Y., Brönnimann S., Zamuriano M., Schild J., Rohr C., Segesser DM (2016) Dicembre 1916: Il Mese della Morte Bianca. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-49-6, doi:10.4480/GB2016.G91.03

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Brugnara, Y., Brönnimann S., Zamuriano, M., Schild, J., Rohr, C., Segesser, D. (2016) Dicembre 1916: Il Mese della Morte Bianca. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-49-6, doi:10.4480/GB2016.G91.03