

La sismicità del settore atesino delle Alpi centrali (Italia settentrionale): alcuni problemi aperti, limiti ed implicazioni dell'approccio multidisciplinare (geologico, storico-sismologico, archeosismologico e archeologico-architettonico)

Fabrizio Galadini¹, Massimiliano Stucchi²

1 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italia (e-mail: galadini@ingv.it)

2 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italia (e-mail: stucchi@mi.ingv.it)

Abstract

The seismicity of the central Alps in the Adige river sector (northern Italy): some open problems, limits and implications of the multi-disciplinary approach (geological, historical-seismological, archaeoseismological and archaeological-architectural).

Earthquakes with $M > 5$ affect the southern sector of the Alpine chain in most of the Italian central-eastern Alps. In contrast, in the easternmost Alpine domain (Friuli region, Tagliamento river area) destructive earthquakes also occur in the inner zones of the Alpine edifice. This raises the question if the occurrence of destructive earthquakes in the inner Alpine sectors can be completely excluded for the rest of the Italian Alps. The July 17, 2001 earthquake (M_L 5.2), which struck the Meran area, demonstrated that earthquakes above the damage threshold may occur within the inner Alpine domain of the Adige river region.

Further information on this point can be derived from archaeoseismological investigations made in the second half of the 90s. During this period, archaeological excavations at Eгна-Neumarkt in the Bolzano province uncovered the remains of a *mansio* showing traces of destruction and displacement of the walls. This event has been related to an earthquake of the half of the 3rd century AD. The walls were shifted horizontally (about 30 cm) and vertically (about 60 cm). Evidence for a "crisis" during the 3rd century (and particularly at the half of this century) is widespread and proved by the numerous cases archaeologically documented of reconstruction, rebuilding, restoration or abandonment. However, this period of modification has been traditionally attributed to the Aleman invasions. The

superposition of the effects of political instability on the possibly strong coseismic damage makes the deciphering of the earthquake characteristics difficult.

Archaeological excavations in the cloister of the Capuchin Monastery in Bolzano uncovered remains of a tower which was part of the Wendelstein Castle. Evidence of earthquake damage was represented by the expulsion of a corner and the launch of stones at several metres from the structure. The tower was probably built in the 13th century and, based on the sparse archaeo-chronological information, it may have been destroyed by the 1348 earthquake (which strongly damaged the Friuli region, east of Bolzano) or by another unknown event. Attributing the damage to the 1348 event implies the necessity to better understand the reasons of the strong damage in Bolzano, considering that this town is far from the epicentral area of the earthquake. In the meantime, investigations (e.g. archaeology of the architecture) should be performed in order to understand if the damage was caused by an unknown event of local origin.

Recent archaeological data (both from excavations and from archaeology of the architecture) suggest that the 1117 earthquake is actually a complex seismic sequence which affected most of northern Italy. The evidence of strong damage in Trento, derived from the excavation of the San Lorenzo church, suggests the possibility that one of the shocks of the sequence originated north of the southern Alpine border, due to the activation of a seismogenic source still uncovered.

Though the available information suggest that destructive earthquakes may also occur in the inner sectors of the Alpine chain east of the Friuli region, the identification of the seismogenic sources potentially responsible for these events remains problematic. Geomorphological factors related to the recent geological history of the Alps hinder the investigation on the seismogenic behaviour of the region. Indeed, the rate of the exogenic processes related to the Last Glacial Maximum and (particularly) the river dynamics following the LGM is evidently higher than the rate of tectonic modelling of the landscape. This means that the identification of the seismogenic sources can only be obtained through a better knowledge of the Alpine seismicity. Considering the exiguousness of the historical information for the earthquakes of the Antiquity and of the Middle Ages, and the mentioned problems of the geological investigation, it is evident that the future archaeoseismological research will play a key-role in better defining the seismogenic behaviour of the Alpine region.

Introduzione

Il confronto tra la distribuzione della sismicità e le caratteristiche strutturali dell'edificio alpino centro-orientale suggerisce che l'occorrenza di terremoti con $M \geq 5.5$ sia generalmente condizionata dall'attivazione delle faglie inverse al margine meridionale della catena alpina (Galadini et al., in stampa). In effetti, a parte la regione friulana, che presenta caratteristiche sismotettoniche evidentemente più complesse, gli epicentri dei terremoti distruttivi si collocano prevalentemente all'interno di una fascia al limite tra le pianure padana e veneto-friulana e il settore collinare prealpino. L'evoluzione di questo settore, in base a numerosi studi strutturali e neotettonici, risulterebbe condizionata dall'attività recente di faglie inverse, generalmente con direzione NE-SW o E-W e vergenza meridionale (Doglioni e Bosellini, 1987; Castellarin et al., 1992).

In sostanza, tali faglie rappresenterebbero le sorgenti sismogeniche dei passati terremoti distruttivi o quelle potenzialmente responsabili dei forti terremoti del futuro. Questa semplice rappresentazione sismotettonica è resa più complessa da alcuni problemi tuttora irrisolti, prevalentemente riferibili al comportamento sismogenetico dei settori alpini più interni. In pratica, alcuni indizi fanno ritenere possibile che eventi di energia moderata ($5 < M < 6$) possano avvenire anche all'interno della catena alpina. Le conclusioni su questo punto, tuttavia, sono limitate dalle difficoltà di individuazione, localizzazione e dimensionamento di eventi storici non recenti (età antica e medievale) o delle sorgenti sismogeniche potenzialmente responsabili di terremoti di magnitudo moderata.

Di tali questioni si intende trattare nella presente nota, con particolare riferimento al settore atesino della catena alpina, mediante informazioni di varia provenienza (geologica, storica, archeologica e archeologico-architettonica). Si tenterà altresì di evidenziare le potenzialità e i limiti delle ricerche archeosismologica e di archeologia dell'architettura con approccio areale nella prospettiva dell'incremento delle conoscenze sulle caratteristiche sismogenetiche del settore indagato.

Inquadramento sismotettonico

Per la catena alpina italiana, il catalogo sismico del Gruppo di Lavoro CPTI (2004) riporta nove terremoti con magnitudo $M_w \geq 5.9$, parametrizzati secondo quanto

riassunto in Tabella 1, il cui epicentro è posto al margine meridionale dei rilievi prealpini (Fig. 1).

Le informazioni sismologico-storiche sulla distribuzione del danno legato ai terremoti di età moderna e contemporanea (es. 1695, 1873, 1936) e quelle strumentali per i terremoti recenti (sequenza del 1976 in Friuli) sono state variamente utilizzate in prospettiva sismotettonica (es. Fitzko, 2002; Peruzza et al., 2002; Sirovich e Pettenati, in stampa; Galadini et al., in stampa). I lavori citati evidenziano il ruolo sismogenico dei thrust attivi sud-vergenti al margine meridionale della catena alpina per quanto riguarda i terremoti principali. Va sottolineato, tuttavia, che l'informazione storica sui terremoti di età moderna e contemporanea è di gran lunga superiore a quella dei terremoti di età medievale (1117, 1222 e 1348). Dell'incertezza sulle caratteristiche dei terremoti più antichi risentono, ovviamente, anche le interpretazioni sismogenetiche. Di tale quadro conoscitivo si avrà evidenza nei paragrafi dedicati al caso archeosismologico di Bolzano e all'evento del 1117.

Numerosi altri terremoti cui è attribuita una magnitudo tra 5 e 6 hanno interessato l'area oggetto della presente nota (Fig. 1). A parte la regione friulana, generalmente anche gli epicentri di questi eventi si ubicano nel dominio prealpino o nella fascia di raccordo tra l'area collinare e quella di pianura (es. 1776 e 1794, Tramonti; 1812, Sequals; 1836, Bassano; 1891, Valle d'Ilasi; 1901, Salò; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004). In tale quadro, ben si inserisce il recente terremoto del 24 novembre 2004 (M 5.2, <http://www.ingv.it/terremoti/bresciano2004/bresciano.html>). Esso ha infatti colpito la regione del Lago di Garda, in un'area già in passato (es. 1901) caratterizzata da eventi distruttivi. Inoltre, il meccanismo focale disponibile è compatibile con l'attivazione di una sorgente che è parte del sistema di faglie attivo del cosiddetto dominio Giudicariense, con direzione NNE-SSW (Fig. 1).

Al contrario di quanto osservabile nei settori veneto e lombardo, nella regione friulana (in particolare nell'area della valle del Tagliamento) i terremoti con magnitudo compresa tra 5 e 6 interessano non solo il margine meridionale della catena alpina ma anche le zone interne (es. 1700, Raveo; 1788, Tolmezzo; 1928, Carnia). Ciò costituisce la maggiore disomogeneità, dal punto di vista sismotettonico, della catena alpina. Tale disomogeneità diventa evidente se si confronta la sismicità friulana con quella, ad esempio, dei settori alpini interni lombardi e altoatesini (Onida et al., 2000; Galadini et al., 2001a). Tali caratteristiche sismotettoniche rendono lecito chiedersi se sia totalmente valido l'assunto secondo il quale i terremoti distruttivi possono

avvenire quasi esclusivamente al margine tra catena prealpina e settori di pianura nella maggior parte dell'area indagata. Come si dirà nel prossimo capitolo, informazioni geologiche e sismologiche di varia natura oggi disponibili invitano alla cautela nell'assunzione di un tale modello.

Sismicità ed implicazioni sismotettoniche: problemi aperti

Il terremoto del 17 luglio 2001

Se il terremoto del 24 novembre 2004 non rappresenta un evento anomalo nel contesto sismotettonico sopra delineato, non si può dire altrettanto del terremoto del 17 luglio 2001 (M_L 5.2, danni limitati al grado 6 della scala MCS, in virtù dell'elevata profondità ipocentrale, 18 km, e della ridotta energia rilasciata; <http://www.ingv.it/~roma/reti/rms/terremoti/italia/merano/bolzano.html>) che ha interessato l'area della Val Venosta e la città di Merano. Il meccanismo focale di questo evento evidenzia una compatibilità con l'attivazione di una sorgente a direzione NNE-SSW con cinematica strike-slip, parte del sistema di faglie ad andamento giudicariense (Fig. 1). Tale determinazione geometrica sembra essere la più attendibile, in considerazione del fatto che il piano coniugato espresso nel meccanismo focale (dir. WNW-ESE; Fig. 1) non ha evidente riscontro geologico-strutturale.

La geometria delle sorgenti sismogeniche sembrerebbe l'elemento che accomuna i due eventi citati. Le sorgenti sono probabilmente caratterizzate da simile direzione e (in base all'energia rilasciata) dimensione. Ma al di là degli aspetti geometrici, il fatto più importante è l'occorrenza dell'evento del 2001 in un settore (in pratica la parte interna della catena alpina, a nord del lago di Garda, compresa nella provincia di Bolzano) per cui sia le informazioni storiche, sia i dati strumentali definivano, prima di questo evento, un'attività al massimo circoscritta a pochi terremoti di magnitudo decisamente più bassa.

Il terremoto del 2001 è già in grado di fornire una risposta alla domanda che conclude il precedente capitolo. Il fatto che la sorgente del terremoto del 2001 sia rappresentata da una faglia ad andamento simile a quello del sistema delle Giudicarie sembra definire una continuità sismogenica delle faglie di tale dominio strutturale tra il Lago di Garda e l'Alto Adige. Pertanto, in caso di fondatezza dell'ipotesi della continuità strutturale, l'occorrenza del terremoto del 2001 suggerirebbe che eventi con effetti al di sopra della soglia del danno possano avvenire nell'intera regione a nord del lago di

Garda, nei settori più interni della catena alpina. La continuità strutturale di cui sopra si accompagnerebbe, comunque, ad un non omogeneo rateo di sismicità, essendo i terremoti di gran lunga più frequenti nel settore meridionale (gardesano).

Il caso archeosismologico di Egna-Neumarkt

Come osservato, al terremoto del 2001 non sono associabili danni ingenti. Dati archeosismologici farebbero pensare, tuttavia, che energia più elevata potrebbe essere associata ad un evento antico avvenuto nell'area della valle dell'Adige.

Nel 1997, nel corso di scavi archeologici nell'abitato di Egna-Neumarkt (loc. Kahn), vennero individuate chiare tracce di un evento distruttivo che, alla metà del III secolo d.C., aveva interessato un edificio, probabilmente una *mansio* lungo l'importante strada Claudia Augusta (Galadini e Galli, 1999; Di Stefano, 2002). Non solo l'edificio recava chiare tracce di una distruzione improvvisa, ma addirittura le sue fondazioni risultavano dislocate verticalmente fino a 60 cm e orizzontalmente fino a 33 cm (Fig. 2) da almeno quattro piani di taglio paralleli con direzione NNE-SSW.

I piani di taglio individuati avevano la stessa direzione delle faglie del sistema delle Giudicarie che interessano in maniera evidente il versante occidentale della valle dell'Adige nel settore di Egna-Neumarkt (thrust di Cortaccia-Kurtatsch; Prosser e Selli, 1991). Inoltre, l'indagine paleosismologica effettuata al sito archeologico, mediante scavi fino a 7 m di profondità, chiarì che un altro evento di dislocazione aveva interessato il sito dopo la data 2581-2197 a.C. (età radiocarbonio calibrata). Nel complesso, il quadro informativo desunto dall'analisi integrata archeosismologica e paleosismologica sembrava chiarire in maniera adeguata l'occorrenza di un evento sismico distruttivo. Le indagini effettuate portarono ad escludere cause di dislocazione alternative a quella cosismica (es. cedimenti differenziali per motivi geotecnici, instabilità al margine del corso del fiume Adige, liquefazioni, fattori antropici).

Il limite principale di questa ipotesi derivava dall'impossibilità di definire una continuità planimetrica dei piani di taglio individuati sia verso nord che verso sud. In pratica, poichè il sito archeologico era ubicato all'interno di un'area densamente edificata, la visibilità delle dislocazioni era limitata soltanto ad esso. L'analisi di fotogrammi aerei precedenti all'edificazione della zona non permise l'identificazione di tracce geomorfologiche (es. scarpate di faglia) riconducibili all'attivazione dei piani di taglio. Ma ciò fu imputato da Galadini e Galli (1999) al fatto che l'area aveva subito

la deposizione di sedimenti alluvionali successivamente all'evento di dislocazione di età romana. Tale deposizione alluvionale sarebbe stata la causa della cancellazione delle tracce geomorfologiche dell'evento stesso.

A fronte delle difficoltà di analisi tettonica, si ritenne opportuno contestualizzare l'evento archeosismologico di Egna in un ambito areale, mediante l'analisi delle informazioni provenienti da altri scavi archeologici effettuati nella regione Trentino-Alto Adige. I dati disponibili, riassunti in Galadini e Galli (1999), definivano un periodo di significativi cambiamenti edilizi (con distruzioni, abbandoni e ricostruzioni) nel corso del terzo secolo. Per esempio, negli scavi del Teatro Sociale a Trento furono scoperte numerose strutture databili dal III secolo d.C. in poi (Fig. 3), sigillanti quelle di età più antica (Zamboni, com. pers.). Tale periodo di importanti modifiche edilizie viene tradizionalmente riferito ad instabilità politica legata alle invasioni di Alemanni in Italia settentrionale a partire dal 258 d.C. (Christlein, 1979; Buchi, 2000; Ciurletti, 2002). E' un fatto che anche dati archeologici più recentemente pubblicati e relativi ai settori più settentrionali della regione indagata (Tesido, presso Monguelfo-Welsberg e San Candido-Innichen; di Stefano e Pezzo, 2002 e Dal Ri et al., 2002, rispettivamente) definiscono interventi edilizi collocabili nella seconda metà del III secolo d.C. Pertanto questo evidente periodo di cambiamenti interessa un territorio più vasto di quello che ci si attenderebbe da un esclusivo condizionamento di natura sismica (a meno di non ammettere l'occorrenza di un evento di proporzioni eccezionali).

Nel complesso, se le informazioni archeosismologiche relative al sito di Egna suggeriscono l'occorrenza di un evento sismico distruttivo al confine tra Alto Adige e Trentino alla metà del III secolo d.C., la contestualizzazione di tale evento risulta complicata da fatti connessi alla notevole instabilità politica del periodo storico. E' evidente che solo il reperimento di ulteriori informazioni archeologiche potrà gettare luce definitiva sul problema degli effetti di tale evento archeosismico.

Il caso archeosismologico di Bolzano

Nel 1997, nel corso di scavi archeologici nel chiostro del Convento dei Cappuccini in Bolzano, furono rinvenuti resti di una torre con evidenti tracce di crollo e lesioni. Tale edificio fu identificato da Bombonato et al. (2000) come la " torre piccola " del Castello Wendelstein, in passato proprietà dei Conti del Tirolo. La costruzione di tale

torre, per confronto stilistico con altre strutture della zona, viene fatta risalire alla prima metà del XIII secolo.

Dell'edificio erano ben visibili due muri d'angolo (Fig. 4a), parte di una struttura a pianta quadrata, con lato di circa 5.5 m. I muri erano realizzati con pietre di forma irregolare e dimensione varia legate da cemento, e rivestimento con pietre squadrate, disposte regolarmente, pure di varie dimensioni. Lo spessore del muro era dell'ordine dei novanta centimetri. I materiali del crollo riempivano l'interno della struttura (Fig. 4b) e consistevano anche di resti di pavimentazione di piani superiori. Inoltre, uno spesso strato di crollo ricopriva l'intera area dello scavo, con blocchi anche a distanza di alcuni metri dall'edificio (Fig. 4c). In tale strato furono anche ritrovati frammenti dei cornicioni delle finestre della " torre piccola " (Bombonato et al., 2000). Infine, i due muri rinvenuti mostravano un'espulsione di angolata (Fig. 4d). Il quadro archeo-cronologico disponibile consentiva di collocare genericamente l'evento distruttivo nel XIII-XIV secolo.

Nell'insieme, i dati acquisiti (e soprattutto l'espulsione di angolata e i frammenti di crollo a distanza dalla costruzione originaria) suggeriscono che la distruzione dell'edificio in questione sia frutto della sollecitazione dinamica connessa ad un evento sismico.

Bombonato et al. (2000) hanno attribuito la distruzione dell'edificio al terremoto del 1348. L'epicentro di tale evento è attualmente posto in Friuli (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004). Esso ha causato danni ingenti in Friuli, Carinzia e Slovenia occidentale (Hammerl, 1994). Galadini et al. (in stampa) hanno attribuito tentativamente l'evento alla faglia Gemona-Kobarid. Il risentimento in Bolzano sembrerebbe essere stato piuttosto consistente: il *Bozner Chronik* (XIV) riporta la distruzione di dieci case e una torre. E' pertanto evidente la compatibilità dell'informazione storica con il dato archeologico.

Tuttavia, come sottolineato da Bombonato et al. (2000), non c'è alcuna certezza che la torre distrutta dal terremoto del 1348 (citata nella fonte storica) sia la "torre piccola" del Castello Wendelstein. Inoltre, certamente sorprende l'entità dell'evidenza archeosismica in considerazione del fatto che Bolzano si trova a più di 150 km di distanza dalla zona epicentrale.

In alternativa sembra lecito sollevare il dubbio che il danno in Bolzano possa essere l'effetto di un evento (forse di origine locale) tuttora indefinito. E' evidente che in un contesto di questo tipo, utili informazioni potrebbero derivare da indagini di

archeologia dell'architettura sugli alzati monumentali di età medievale della città di Bolzano. Tali indagini sono da considerarsi attualmente come una possibile linea di ricerca futura, per chiarire la cronologia e la portata dell'evento distruttivo.

Il problema del terremoto del 1117

Sebbene il terremoto del 1117 sia stato citato in un cospicuo numero di fonti contemporanee in Europa, le conoscenze che si hanno di questo evento non possono definirsi soddisfacenti. In effetti, la documentazione disponibile evidenzia danni nel territorio italiano a Verona, Ronco all'Adige, Costozza, Padova, Cremona e Nonantola. La distanza tra Padova e Cremona (150 km) fornisce un'indicazione dell'ampiezza dell'area interessata da danni. Il catalogo del Gruppo di Lavoro CPTI (2004) pone l'epicentro nell'area di Verona e attribuisce all'evento una magnitudo M_w pari a 6.49 (Tab. 1). In passato sono stati fatti più tentativi di migliorare le conoscenze analizzando la storia di edifici monumentali (in genere chiese romaniche) per definire possibili andamenti areali e temporali nella storia dei restauri, ricostruzioni, modifiche strutturali e riconsacrazioni (ENEL, 1986; Boschi et al., 1995; Galadini et al., 2001b). Tali indagini di archeologia dell'architettura erano mirate a chiarire se in determinate aree fossero presenti in numero elevato tracce di cambiamenti architettonici cronologicamente compatibili con gli effetti del terremoto del 1117. Inoltre, Galadini et al. (2001b) inclusero nella loro analisi anche dati archeosismologici relativi a scavi di due strutture medievali (Chiesa di San Lorenzo a Trento; Chiesa di San Martino a Pranzo; Fig. 5) e dati geocronologici relativi alla messa in posto di due frane storiche (Lavini di Marco nella valle dell'Adige, Fig. 6; Tenno, a nord del Lago di Garda). In base ai dati disponibili, gli autori menzionati conclusero che l'area compresa tra Padova, Verona e Trento era stata molto probabilmente interessata da danni ingenti. Tuttavia, indagini paleosismologiche condotte lungo le faglie possibilmente attive dell'area citata (faglia del M. Baldo e faglie dei Monti Lessini) chiarirono l'assenza di dislocazioni riferibili al terremoto del 1117 (Galadini et al., 2001a). Su queste basi fu avanzata l'ipotesi che l'evidenza di danno nell'area menzionata non fosse del tutto indicativa della reale origine dell'evento e che forse l'epicentro doveva ubicarsi più a est, lungo il *thrust* attivo Thiene-Bassano (Galadini et al., 2001b). Rispetto al quadro delle conoscenze riassunto da Galadini et al. (2001b), dati archeosismologici di recente acquisizione relativi al Duomo di Cremona chiariscono che questa struttura (in costruzione dal 1107) fu distrutta dal terremoto del 1117 (Galli

et al., 2004). Il duomo attuale fu costruito successivamente al terremoto senza che in esso venisse inglobata alcuna delle strutture precedenti al 1117 (evidentemente distrutte). Il disegno originale dell'edificio fu completamente cambiato e soltanto qualche scultura e pochi elementi architettonici più antichi furono riutilizzati (Galli et al., 2004). Tali dati corroborano quanto già noto dalle fonti scritte.

L'evidenza storica ed archeologica della distruzione del duomo di Cremona cambia il quadro delle ipotesi sismogeniche relative all'evento del 1117. Se danni cospicui hanno interessato contemporaneamente edifici delle città di Padova e Cremona è ovvio che oggi si debba interpretare l'insieme degli effetti del 1117 come il risultato di una complessa sequenza sismica che ha interessato gran parte dell'Italia settentrionale. In questo contesto, ed ammettendo danni consistenti anche nell'area trentina, sembra lecito ipotizzare l'attivazione di sorgenti sismogeniche non ancora definite in settori più interni della catena alpina. Ovviamente solo l'incremento dei dati sugli effetti della sequenza del 1117 potrà contribuire a chiarire questo punto. Nell'analisi di tali effetti, i dati archeosismologici sembrano aver portato informazioni particolarmente utili (Trento, Pranzo, Cremona). Il problema metodologico principale risiede nell'utilizzo dei dati di archeologia dell'architettura. Tali informazioni sono, in effetti, quelle meno conclusive nell'ottica della definizione di aree possibilmente colpite dal terremoto. Anzitutto, la conoscenza sull'evoluzione architettonica degli edifici romanici dell'Italia settentrionale non è equamente distribuita. Il che significa che l'individuazione di determinati *trend* potrebbe risentire dell'effetto della distribuzione della conoscenza piuttosto che dell'impatto del terremoto. In secondo luogo molte modifiche architettoniche potrebbero essere state condizionate da fattori diversi da quelli legati alla ricostruzione post-sismica. In un periodo di lotte fra comuni e impero, le modifiche architettoniche furono anche l'espressione di un'affrancatura culturale dell'Italia dal resto d'Europa (es. Suitner, 1991). Tale tendenza portò al rifiuto di modelli architettonici di derivazione europea a favore dello stile rappresentativo del potere comunale col quale furono costruiti nuovi edifici. Gli stessi dati sulla storia architettonica di singoli edifici religiosi possono essere discutibili. Galadini et al. (2001b) citarono, come esempio di trasformazione architettonica compatibile con interventi post-1117, il duomo di Trento, sulla base di dati pubblicati in precedenza (es. Rogger, 1996). Le informazioni disponibili evidenziavano che strutture costruite nell'XI secolo avevano subito restauri nel corso della prima metà del XII secolo. Informazioni più recenti chiariscono che gli

interventi del XII secolo sono inquadrabili nella normale evoluzione edilizia di una importante fabbrica come il duomo di Trento (Seebach, 2001). Il lavoro di Seebach rappresenta uno studio di grande dettaglio sulla storia architettonica di tale chiesa. Studi con tale grado di approfondimento mancano per la maggior parte degli edifici romanici. Ciò significa, alla luce del semplice caso citato, che i dati di archeologia dell'architettura sulle chiese romaniche in Italia settentrionale devono essere considerati con grande cautela, al fine di definire gli effetti della sequenza del 1117. Alla luce di quanto riportato, nuove indicazioni su tale complesso evento sismico (e di conseguenza sulla caratterizzazione delle sue sorgenti sismogeniche) potranno soltanto derivare da scavi archeologici su contesti stratigrafici medievali e da analisi architettoniche (ma di grande dettaglio) di alzati monumentali già presenti all'epoca del terremoto.

Difficoltà di individuazione di sorgenti sismogeniche all'interno della catena alpina

Se quanto evidenziato finora suggerisce che eventi al di sopra della soglia del danno possano interessare i settori interni della catena alpina, il passo successivo è rappresentato dall'identificazione delle sorgenti potenzialmente responsabili di tali terremoti. La trattazione del problema passa attraverso due considerazioni, la prima riguarda la dimensione delle sorgenti (legata alla energia massima rilasciata), la seconda riguarda il contesto geologico nel quale tali sorgenti sarebbero attive. Per quanto riguarda la dimensione e l'energia attesa, è noto che sorgenti sismogeniche di dimensioni tali da originare terremoti con M non maggiore di 6-6.2 hanno scarsa espressione geomorfologica superficiale. Se si ammette che, come probabile, i terremoti che interessano i settori interni della catena non siano generalmente caratterizzati da rilasci di energia maggiori della soglia di magnitudo sopra citata, ecco che anche l'identificazione delle sorgenti potenzialmente responsabili di tali eventi diventa problematica. A questo va aggiunto un ulteriore elemento di difficoltà, rappresentato dal contesto geologico (secondo punto sopra citato). La parte interna della catena alpina presenta chiare evidenze della storia geomorfologica successiva all'ultimo massimo glaciale. Ciò significa che forme erosive e di accumulo (in misura maggiore terrazzi alluvionali post-glaciali) testimoniano di una storia geologica di pochi millenni. In sostanza, l'attività recente di faglie avrebbe potuto essere registrata soltanto su forme e depositi molto recenti. A fronte della probabile scarsità delle deformazioni superficiali cosismiche, è evidente che la dislocazione cumulata su

contesti geomorfologici estremamente recenti sia di entità comunque ridotta e pertanto tracce dell'attività siano difficilmente identificabili. Peraltro, i fattori esogeni responsabili della modellazione del paesaggio sono, nell'area alpina, certamente preponderanti rispetto a quelli tettonici (basti citare il fatto che terrazzi fluviali di pochi millenni si trovano sospesi di decine di metri sui fondovalle attuali). A questo proposito, va ricordato che indagini sismiche ad alta risoluzione nella Valsugana (ad est della valle dell'Adige) hanno evidenziato dislocazioni tardo-quadernarie nel riempimento vallivo (Felber et al., 1998). Di tale attività recente lungo la cosiddetta "linea della Valsugana" non c'è traccia in superficie, proprio in virtù dell'elevato rateo di sedimentazione olocenica, cui viene attribuita la deposizione di circa 40 m di sedimenti nell'area di Levico. Come ulteriore esempio si può ricordare che l'elevato rateo di sedimentazione sarebbe la causa principale dell'occultamento delle dislocazioni osservate ad Egna, sigillate da un cospicuo spessore di sedimenti alluvionali post-romani.

A quanto sopra riportato si deve aggiungere anche la difficoltà interpretativa di evidenze geologiche di deformazioni recenti. I casi riportati nella Figura 7 sono solo alcuni degli esempi utilizzabili per chiarire l'affermazione di cui sopra. La Figura 7a si riferisce al contatto tra il substrato carbonatico e depositi glaciali, presso l'abitato di Revò in Val di Non (provincia di Trento), lungo una delle faglie che costituiscono il settore settentrionale del dominio strutturale giudicariense. L'evidenza del trascinarsi del deposito glaciale lungo il contatto suggerirebbe un'attivazione della struttura dopo l'ultimo massimo glaciale. Tuttavia, la stessa deglaciazione con l'effetto della riduzione di volume dei depositi glaciali avrebbe potuto condizionare il movimento relativo delle due parti. In quest'ultimo caso, evidentemente, l'attivazione della faglia non sarebbe necessaria per spiegare la dislocazione. Il caso della Figura 7b si riferisce a deformazioni su sedimenti glacio-lacustri nell'area di Caldaro-Kalern (provincia di Bolzano), già segnalate da Castiglioni e Trevisan (1973). Sebbene deformazioni simili possano essere condizionate dalla sollecitazione dinamica cosismica (le cosiddette "sismiti"), il contesto deposizionale in ambiente glaciale rende più plausibili processi deformativi legati alla dinamica della lingua glaciale che era ospitata nella depressione di Caldaro (la cosiddetta "glaciotettonica").

In base a quanto discusso, sembra opportuno evidenziare che i numerosi problemi e limiti dell'utilizzo della geologia nei contesti alpini riducono il peso dell'apporto

geologico alla caratterizzazione sismogenica e rendono l'informazione sismologica s.l. più significativa nel guidare l'identificazione delle sorgenti.

Conclusioni

Il terremoto del 17 luglio 2001 ha chiarito che eventi di magnitudo moderata possono originarsi anche nelle aree più interne del settore centrale della catena alpina. Tale evento, in virtù della ridotta energia rilasciata e della profondità a cui si è originato, non ha causato danni rilevanti. Evidenze storiche ed archeosismologiche relative ad eventi antichi e medievali, sebbene per nulla conclusive, suggeriscono che anche eventi sismici di maggiore energia, e quindi con potenziale distruttivo maggiore, possano originarsi nella regione alpina più interna. La frequenza di occorrenza di tali eventi sarebbe comunque piuttosto bassa. In sostanza, gli eventi sarebbero caratterizzati da lunghi periodi di ritorno.

Le limitazioni di utilizzo dei tradizionali metodi geologici e geomorfologici, legate alla storia geologica recente del settore alpino, portano a preferire un approccio mirato alla migliore caratterizzazione della distribuzione degli effetti dei terremoti storici per l'individuazione di sorgenti sismogeniche. In caso di informazione storica lacunosa (e soprattutto per terremoti medievali) la ricostruzione della storia architettonica di edifici monumentali (archeologia dell'architettura) costituisce una potenziale fonte di dati utili all'incremento delle conoscenze sugli effetti cosismici. Tuttavia, l'esperienza maturata chiarisce che tali dati sono spesso non univocamente interpretabili e che la lettura in chiave di effetti sismici di una stratigrafia architettonica necessita di studi di grande dettaglio da parte di specialisti. Tali studi, oggi, sono disponibili per una minoranza di edifici rispetto al numero che sarebbe necessario per chiarire potenziali effetti cosismici.

L'approccio archeosismologico rappresenta una ulteriore potenziale fonte di incremento delle conoscenze. Perché tale incremento possa diventare consistente, occorre una migliore interazione tra gli enti preposti al controllo dei beni archeologici e gli organi di ricerca che svolgono attività in ambito geo-sismologico. Attraverso tale interazione sarà possibile proseguire nella caratterizzazione degli effetti degli eventi del 1117 e del 1348 o degli eventi non noti da catalogo che hanno interessato l'area alpina.

Ringraziamenti

Le indagini archeosismologiche ad Egna e a Bolzano e quelle relative al terremoto del 1117 furono effettuate da F. Galadini e P. Galli, nella seconda metà degli anni novanta, in collaborazione con l'Ufficio Beni Archeologici della Provincia di Trento e l'Ufficio Beni Archeologici della Provincia di Bolzano. Si desidera pertanto ringraziare i responsabili di tali uffici, G. Ciurletti e L. Dal Ri. Rilevamenti geologici di cui è testimonianza la Figura 7 furono condotti nella seconda metà degli anni novanta da F. Galadini e P. Galli. Il lavoro è stato parzialmente finanziato dal CNR - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria.

Bibliografia

- Bombonato, G., Dal Ri, L., Marzoli, C. & Rizzi, G., 2000. Die Ausgrabungen im Kapuzinerkloster. Der Schlern, Monatszeitschrift für Südtiroler Landeskunde, 2000, 281-308.
- Boschi, E., Ferrari, G., Gasperini, P., Guidoboni, E., Smriglio, G. & Valensise, G. (eds.), 1995. *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, ING-SGA, Bologna, 973 pp.
- Buchi, E., 2000. Dalla colonizzazione della Cisalpina alla colonia di "Tridentum". In: E. Buchi (a cura di), *Storia del Trentino, II, L'età romana*, Bologna, 47-131.
- Bozner Chronik, XIV sec. Universitäts Bibliothek, Innsbruck, ms. 502.
- Castellarin, A., Cantelli, L., Fesce, A.M., Mercier, J.L., Picotti, V., Pini, G.A., Prosser, G. & Selli, L., 1992. Alpine compressional tectonics in the Southern Alps. Relationships with the N-Apennines. *Annales Tectonicae*, 6, 62-94.
- Castiglioni, G.B. & Trevisan, L., 1973. La sella di Appiano-Caldaro presso Bolzano nel Quaternario. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, 29, 3-33.
- Christlein, R., 1979. Die Alamannen. *Archäologie eines lebendigen Volkes*. Stuttgart und Aalen, 179 pp.
- Ciurletti, G., 2002. Qualche riflessione su Trento romana alla luce di dati storici ed evidenze archeologiche. In: L. Dal Ri, S. di Stefano (a cura di), *Archäologie der Römerzeit in Südtirol – Beiträge und Forschungen, Band 1*, Bozen/Wien, 73-85.
- CNR-PFG, 1983. Structural Model of Italy and Gravity Map. *Quaderni de La Ricerca Scientifica*, 114.
- Dal Ri, L., di Stefano, S. & Leitner, B., 2002. L'impianto termale di Littamum (San Candido/Innichen). In: L. Dal Ri, S. di Stefano (a cura di), *Archäologie der Römerzeit in Südtirol – Beiträge und Forschungen, Band 1*, Bozen/Wien, 926-1051.
- di Stefano, S., 2002. La struttura romana di Egna-Kahn. Scavo e studio di una stazione stradale lungo la via Claudia Augusta. In: L. Dal Ri, S. di Stefano (a cura di), *Archäologie der Römerzeit in Südtirol – Beiträge und Forschungen, Band 1*, Bozen/Wien, 159-259.
- di Stefano, S. & Pezzo, I., 2002. Testimonianze di epoca romana in Alto Adige: gli scavi di Laives e di Tesido. In: L. Dal Ri, S. di Stefano (a cura di), *Archäologie der Römerzeit in Südtirol – Beiträge und Forschungen, Band 1*, Bozen/Wien, 580-639.
- Doglioni, C. & Bosellini, A., 1987. Eoalpine and mesoalpine tectonics in the Southern Alps. *Geologische Rundschau*, 76, 735-754.
- ENEL, 1986. Studi ed indagini per l'accertamento della idoneità tecnica delle aree suscettibili di insediamento di impianti nucleari, Regione Lombardia, Area Viadana, indagini di sismicità storica, rapporto finale, il terremoto del 3 gennaio 1117. ISMES unpublished report RAT-DGF-0012, 907 pp.
- Felber, M., Veronese, L., Cocco, S., Frei, W., Nardin, M., Oppizzi, P., Santuliana, E. & Violanti, D., 1998. Indagini sismiche e geognostiche nelle valli del Trentino meridionale (Val d'Adige, Valsugana, Valle del Sarca, Valle del Chiese), Italia. *Studi Trentini di Scienze Naturali – Acta Geologica*, 75, 3-52.
- Fitzko, F., 2002. Seismic hazard at the Alps-Dinarides junction. The 1511 earthquake. PhD. Thesis, Università di Trieste, Italia, 203 pp.
- Galadini, F. & Galli, P., 1999. Paleoseismology related to the displaced Roman archaeological remains at Egna (Adige valley, northern Italy). *Tectonophysics*, 308, 171-191.

- Galadini, F., Poli, M.E. & Zanferrari, A., in stampa. Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with $M \geq 6$ in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy). *Geophysical Journal International*
- Galadini, F., Galli, P., Cittadini, A. & Giaccio, B., 2001a. Late Quaternary fault movements in the Mt. Baldo-Lessini Mts. sector of the Southalpine area (northern Italy), *Geol. en Mijn.* (Netherlands Journal of Geosciences), 80, 119-140.
- Galadini, F., Galli, P., Molin, D. & Ciurletti G., 2001b. Searching for the seismogenic source of the 1117 earthquake in northern Italy: a multidisciplinary approach. In: T. Glade, P. Albini & F. Frances (a cura di), *The Use of Historical Data in Natural Hazards Assessment*, Dordrecht, The Netherlands, 3-27.
- Galli, P., Galadini, F. & Pitcher, L.P., 2004. The earthquakes of January 1117 in northern Italy. Hypothesis for an epicentre in the southern Po Plain. In: *Archaeoseismology at the beginning of the 21st century*, Meeting of the ESC WG "Archaeoseismology", volume degli abstract, 15-16
- Gruppo di Lavoro CPTI, 2004. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>.
- Hammerl, C., 1994. The earthquake of January 25th, 1348: discussion of sources. In: Albini P. & Moroni A. (a cura di), *Materials of the CEC project "Review of historical seismicity in Europe"*, CNR Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milano, Italy, vol 2, 225-240.
- MECOS, 1999. *Macroseismic earthquake catalogue of Switzerland*. Internet address, <http://seismo.ethz.ch/products/catalogs/>.
- Monachesi, G. & Stucchi, M., 1998. DOM 4.1 an intensity database of damaging earthquakes in the Italian area. Internet address, <http://emidius.mi.ingv.it/DOM/home.html>.
- Onida, M., Mirto, C., Stucchi, M., Galadini, F. & Leschiutta, I., 2000. Tettonica attiva e sismicità nelle Alpi. In: F. Galadini, C. Meletti, A. Rebez (a cura di), *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999)*. CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 93-104.
- Peruzza, L., Poli, M.E., Rebez, A., Renner, G., Rogledi, S., Slejko, D. & Zanferrari, A., 2002. The 1976-1977 seismic sequence in Friuli: new seismotectonic aspects, *Memorie della Società Geologica Italiana*, 57, 391-400.
- Prosser, G. & Selli, L., 1991. Thrusts of the Mezzocorona-Mendola pass area (southern Alps, Italy): structural analysis and kinematic reconstruction. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 110, 805-821.
- Rogger, I., 1996. La basilica paleocristiana di S. Vigilio. In: D. Primerano (a cura di), *Il museo Diocesano Tridentino*, Trento, 137-144.
- Seebach, G. 2001. Archäologische und bauhistorische Untersuchungen 1991-1994. In: Rogger I., Cavada E. (a cura di), *L'antica basilica di San Vigilio in Trento*, Storia Archeologia Reperti, Trento, 135-313.
- Sirovich, L. & Pettenati, F., in stampa. Source inversion of intensity patterns of earthquakes: a destructive shock in 1936 in northeast Italy. *Journal of Geophysical Research*.
- Suitner, G., 1991. *Le Venezie*. In: *Italia Romanica*, Milano, 436 pp.

Didascalie

Fig. 1 - Schema sismotettonico delle Alpi centro-orientali. Per il settore alpino ad est di Vicenza sono riportate le sorgenti sismogenetiche potenzialmente responsabili di terremoti con $M \geq 6$ (da Galadini et al., in stampa). Per il settore compreso tra Vicenza, il lago di Garda e Trento, sono rappresentate le faglie probabilmente attive nel corso del Quaternario (da Galadini et al., 2001a); i dati oggi disponibili non consentono di definire le geometrie delle sorgenti sismogenetiche. Gli epicentri dei terremoti sono derivati dal catalogo del Gruppo di Lavoro CPTI (2004).

Sorgenti sismogenetiche (numeri grandi): 1) Thiene Bassano; 2) Bassano-Cornuda; 3) Montello-Conegliano; 4) Cansiglio; 5) Polcenigo-Maniago; 6) Arba-Ragogna; 7) Gemona-Kobarid; 8) Susans-Tricesimo; 9) Trasaghis; 10) Medea.

Faglie con probabile attività quaternaria (numeri piccoli): 1) Schio-Vicenza; 2) Monte Stivo; 3) La Paganella; 4) Molveno; 5) Terlago; 6) Monte Pastel- Monte Pastelletto; 7) Sirmione-Garda; 8) Monte Baldo; 9) Lago di Garda ovest.

Fig. 2 - Egna-Neumarkt, scavi in località Kahn. Sono visibili le dislocazioni orizzontale (A) e verticale (B) di uno dei muri della *mansio*. La distruzione dell'edificio è probabilmente da riferire ad un evento sismico della metà del III secolo d.C.

Fig. 3 - Trento - Teatro Sociale. Strutture tarde, databili dal III secolo d.C., scoperte negli scavi del 1998.

Fig. 4 - Bolzano - Chiostro del Convento dei Cappuccini. A) Muri d'angolo di un edificio medievale; B) macerie addossate ad uno dei muri; C) elemento della muratura in giacitura di crollo a distanza dall'edificio; D) espulsione d'angolata. La distruzione dell'edificio è forse il risultato del terremoto del 1295.

Fig. 5 - A) Trento - San Lorenzo: lesioni diffuse (orizzontali e verticali) sull'abside sinistra della chiesa precedente al XII secolo; B) Pranzo - San Martino: accumulo di materiale di crollo che costituisce il substrato del piano di calpestio di una chiesa presumibilmente sin-/post- XII secolo. La distruzione degli edifici può essere riferita al terremoto del 1117.

Fig. 6 - Piano di scivolamento della grande frana dei Lavini di Marco: quasi tutta la porzione di valle dell'Adige visibile nella foto è riempita dall'accumulo di frana. L'evento potrebbe essere avvenuto in occasione del terremoto del 1117.

Fig. 7 - A) Contatto per faglia tra substrato calcareo (sinistra della foto) e *till* glaciale lungo una struttura del sistema giudicariense nei pressi di Revò (Val di Non, Trento); la deformazione potrebbe essere il risultato della deglaciazione e non del movimento della faglia. B) Deformazioni glacioteettoniche in sedimenti lacustri nell'area di Caldaro-Kalern (Bolzano).

Tab. 1 - Parametri dei terremoti con $M_w \geq 5.9$ che hanno interessato l'area alpina centro-orientale secondo quanto riportato nel catalogo del Gruppo di Lavoro CPTI (2004).