



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ufficio federale dell'ambiente UFAM

Monitoraggio dei movimenti di masse permanenti con InSAR

InSAR Inventario dei movimenti di masse
Documentazione

Versione 1.0: aprile 2026

Autori: *Hugo Raetzo*
 Johannes Reinthaler

Indice

| | |
|--|-----------|
| Introduzione | 5 |
| Parte A | |
| Inventario originale dei movimenti di massa | 6 |
| 1 Inventario originale dei movimenti di massa | 6 |
| 1.1 Processi di movimento di massa nell'inventario originale | 6 |
| 1.2 Velocità dei movimenti di massa | 6 |
| 1.3 Basi dell'inventario originale | 8 |
| 1.4 Rappresentazione e metadati dell'inventario originale | 9 |
| 1.5 Aggiornamento dell'inventario originale | 10 |
| Parte B | |
| Analisi InSAR con dati puntuali | 11 |
| 2 Panoramica dell'analisi InSAR con dati puntuali | 11 |
| 3 Dati puntuali InSAR con serie temporale | 12 |
| 3.1 Orbite satellitari e direzione di acquisizione | 12 |
| 3.2 Distribuzione e densità dei punti | 14 |
| 3.3 Distinzione tra direzione di misurazione e direzione di movimento | 15 |
| 3.4 Intervallo di acquisizione e creazione del grafico della serie temporale | 16 |
| 3.5 Attributi dei dati dei punti InSAR | 17 |
| 4 Punti InSAR in movimento | 18 |
| 4.1 Analisi dei cluster e controllo di qualità dei punti | 18 |
| 4.2 Preselezione statistica dei punti | 19 |
| 4.3 Analisi ottimizzata degli hotspot | 19 |
| 4.4 Analisi di vicinato | 19 |
| 4.5 Periodo di riferimento e periodo di analisi | 20 |
| 4.6 Calcolo della velocità 3D | 20 |
| 4.6.1 Aree pianeggianti (pendenza < 5°) | 20 |
| 4.6.2 Zona di transizione e pendii poco inclinati (inclinazione da 5° a 10°) | 21 |
| 4.6.3 Calcolo su pendii (inclinazione > 10°) | 21 |
| 4.6.4 Filtraggio e controllo qualità | 21 |
| 4.7 Output e utilizzo | 21 |
| 5 Zone di movimento generate automaticamente | 22 |
| 5.1 Introduzione | 22 |
| 5.2 Metodologia per la derivazione delle aree in movimento | 23 |
| 5.3 Visualizzazione delle zone di movimento | 24 |
| 6 Inventario dei movimenti di massa aggiornato automaticamente | 25 |
| 6.1 Metodo di calcolo per l'inventario aggiornato automaticamente | 25 |
| 6.1.1 Controllo di qualità per il calcolo della velocità | 25 |
| 6.1.2 Calcolo della velocità di scorrimento in 3D | 26 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 6.1.3 | Analisi delle tendenze..... | 26 |
| 6.2 | Variazione della classe di velocità nell'inventario aggiornato automaticamente | 27 |
| 6.3 | Struttura dei dati dell'inventario dei movimenti di massa..... | 28 |
| Parte C | | |
| 7 | Analisi InSAR con dati di superficie..... | 30 |
| Parte D | | |
| Utilizzo dei dati InSAR, riferimenti e documentazione | | 31 |
| 8 | Accesso ai dati InSAR | 31 |
| 8.1 | Messa a disposizione dei dati su GIN..... | 31 |
| 8.2 | Accesso ai dati tramite API (interfaccia di programmazione)..... | 31 |
| 9 | Utilizzo dei dati InSAR | 32 |
| 9.1 | Esempi di utilizzo dei dati InSAR | 32 |
| 9.2 | Limiti nell'utilizzo dei dati InSAR | 35 |
| 10 | Domande frequenti (FAQ)..... | 35 |
| Parte E | | |
| Glossario, abbreviazioni, bibliografia | | 37 |
| 11 | Glossario e abbreviazioni..... | 37 |
| 12 | Bibliografia..... | 38 |

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| Figura 1: Rappresentazione schematica di diverse curve di spostamento in aree di scorrimento (UFAM 2016)..... | 7 |
| Figura 2: Panoramica dell'inventario dei movimenti di massa permanenti in Svizzera. | 9 |
| Figura 3: Schema riassuntivo della procedura di analisi InSAR con dati puntuali. | 11 |
| Figura 4: Panoramica della copertura delle singole tracce orbitali. Rosso: tracce orbitali ascendenti; verde: tracce orbitali discendenti. Figura tratta da Reinders et al., 2023 (preprint)..... | 13 |
| Figura 5: Visualizzazione dei dati puntuali InSAR. A) Orbita ascendente, B) Orbita discendente. | 14 |
| Figura 6: Visualizzazione della densità di punti per km^2 . In blu i confini cantonali. | 15 |
| Figura 7: Visualizzazione della relazione tra il movimento LOS e il movimento reale (NGU). | 16 |
| Figura 8: Periodicità delle acquisizioni codificata a colori in base alla traiettoria orbitale. Più scuro è il colore, più lungo è l'intervallo di tempo. Si tratta sempre di un multiplo di sei. | 17 |
| Figura 9: Esempio di una serie temporale di un punto InSAR..... | 17 |
| Figura 10: Panoramica dei punti in movimento in Svizzera. | 22 |
| Figura 11: L'idoneità di un'orbita (orbit suitability) dipende dalla geometria di acquisizione, dall'esposizione del versante e dalla pendenza. I versanti esposti a sud e a nord sono i meno adatti. | 23 |
| Figura 12: Panoramica delle zone di movimento generate automaticamente in Svizzera..... | 24 |
| Figura 13: Velocità aggiornata automaticamente dei movimenti di massa permanenti. | 27 |
| Figura 14: Le aree di scorrimento con velocità costante sono in grigio-bianco, le aree rosse sono passate a una classe di velocità superiore, quelle blu a una inferiore. | 28 |

Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| Tabella 1: Classi di velocità e codifica cromatica dell'inventario originale dei movimenti di massa permanenti..... | 7 |
| Tabella 2: Attributi e metadati nell'inventario originale dei movimenti di massa. | 10 |
| Tabella 3: Panoramica della distribuzione dei punti in base alla classe di utilizzo del suolo e per l'intera Svizzera..... | 15 |
| Tabella 4: Attributi dei dati puntuali InSAR con serie temporale (prodotto 1). | 17 |
| Tabella 5: Attributi dei punti in movimento (Prodotto 2). | 22 |
| Tabella 6: Attributi delle zone di movimento generate automaticamente (prodotto 3). | 24 |
| Tabella 7: Descrizione degli indici di qualità..... | 25 |
| Tabella 8: Attributi per l'inventario dei movimenti di massa (prodotto 4). | 28 |

Introduzione

I processi di movimento di masse sono molto diffusi in Svizzera e interessano numerosi comuni. In presenza di una topografia ripida e di specifiche condizioni geologiche si verificano frane attive, cadute di massi e smottamenti. Queste aree e altri processi di movimento di masse sono stati raccolti dall'UFAM in un inventario sulla base di dati di telerilevamento e di ulteriori dati di base. Per la gestione dei rischi legati ai processi di movimento di masse sono rilevanti l'estensione attuale e potenziale, la velocità, il volume delle masse instabili e altre caratteristiche. L'UFAM utilizza ora nuovi dati satellitari radar per monitorare i movimenti di masse permanenti e, laddove le caratteristiche tecniche lo consentono, per calcolarne sistematicamente la velocità (monitoraggio). I dati InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) vengono utilizzati anche per individuare movimenti del suolo finora sconosciuti e per elaborare dati di base sui pericoli naturali (UFAM 2016).

Grazie all'elaborazione dei dati satellitari radar, vengono misurati spostamenti della superficie terrestre con una precisione millimetrica. I dati grezzi vengono valutati («elaborati») con diversi metodi. I dati puntuali InSAR (Persistent Scatterer – PS e Distributed Scatterer – DS) sono il risultato di un'elaborazione in cui vengono esaminati i pixel dell'immagine SAR che sono coerenti nel tempo. Essi consentono un'analisi dei movimenti del suolo lenti e continui mediante punti. Per i movimenti rapidi, l'UFAM utilizza interferogrammi su vasta scala (immagini satellitari InSAR, dati raster). Attualmente l'analisi degli interferogrammi viene effettuata manualmente. Per la valutazione delle instabilità vengono utilizzate entrambe le basi, ovvero i dati puntuali e quelli su vasta scala. L'UFAM prevede di mettere a disposizione prodotti InSAR aggiornati annualmente. Trattandosi di una prima versione che sarà resa disponibile nel 2026, i dati potrebbero ancora presentare lacune ed errori. I prodotti saranno tuttavia continuamente sviluppati e migliorati.

Parte A

Inventario originale dei movimenti di masse

1 Inventario originale dei movimenti di masse

L'inventario originale dei movimenti di masse permanenti è il prodotto finale di livello superiore, che costituisce una sintesi di grandi quantità di dati. L'inventario fornisce una panoramica di facile comprensione che consente una rapida classificazione e localizzazione dei processi di pericolo.

1.1 Processi di movimento di masse nell'inventario originale

L'inventario originale comprende i movimenti di masse che sono stati registrati manualmente sulla base di dati InSAR o di altre fonti utilizzando un poligono georeferenziato.

La classificazione dei movimenti di masse utilizzata segue gli standard internazionali ed è stata semplificata e integrata per questa applicazione (modificata secondo Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996).

Tra i movimenti di masse dell'inventario figurano i seguenti processi (con la denominazione inglese):

- frane in senso lato, cedimenti (landslides)
- ghiacciai di roccia (rock glacier)
- Movimenti di detriti (various debris movement)
- Soliflusione (solifluction)
- Movimenti di ghiacciai o distese di ghiaccio ricoperti di detriti (debris covered glacier)
- Abbassamenti del suolo, subsidenza (subsidence)
- Movimenti di masse sconosciuti o processi indefiniti (undefined process)

Il processo di scivolamento comprende qui tutti i processi di scorrimento, ovvero tutti i diversi tipi di scivolamenti e cedimenti in senso lato. Non viene fatta alcuna distinzione tra movimenti di rotazione o traslazione. Si rinuncia anche a una distinzione delle formazioni geologiche secondo Varnes 1978. Nelle immagini satellitari e aeree è spesso riconoscibile la struttura dei terreni sciolti, in assenza di copertura vegetale e del suolo. Ne fanno parte, ad esempio, i detriti ai piedi di pareti rocciose o morene. In questi casi il processo viene classificato tra i vari «movimenti di roccia friabile». Le forme miste vengono di norma classificate tra i processi di scivolamento. Analogamente si procede per i processi di soliflusione.

1.2 Velocità dei movimenti di masse

L'inventario comprende movimenti di masse che possono essere attivi o inattivi. L'esclusione dei movimenti di masse inattivi si basa su criteri geologici e geomorfologici. Tra questi figurano, ad esempio, le frane fossili. Un approccio analogo viene applicato ai processi di movimento di masse per i quali non è possibile determinare la velocità con le basi disponibili. Per i movimenti di masse attivi, i poligoni contengono attributi relativi alle velocità e metadati. I movimenti di masse, tuttavia, non hanno necessariamente una velocità permanente e costante. Nel corso del tempo la velocità può aumentare o diminuire. L'attività variabile dei movimenti di masse è influenzata da fattori ambientali. Ad esempio,

le frane reagiscono alle acque sotterranee: in caso di elevata saturazione idrica delle masse instabile o di elevata pressione interstiziale, la velocità può aumentare. Se la pressione interstiziale diminuisce, la frana potrebbe rallentare e può persino rimanere inattiva (cioè senza movimento) per un certo periodo di tempo. Questi cambiamenti possono essere, ad esempio, di natura stagionale: in primavera la saturazione è maggiore a causa dell'acqua di disgelo e delle abbondanti precipitazioni e quindi le frane possono essere più attive. In estate o in autunno la velocità può nuovamente diminuire (vedi curva blu nella figura 1).

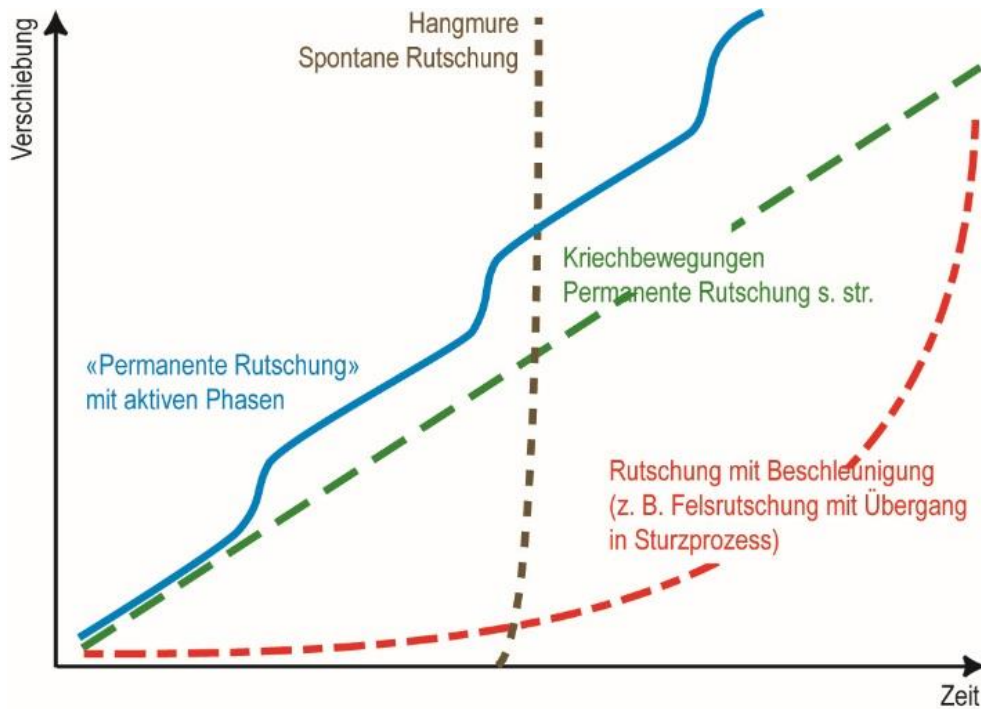


Figura 1: Rappresentazione schematica di diverse curve di spostamento in aree di scorrimento (UFAM 2016). Solo nel caso della curva verde si può parlare di una velocità «permanente» in senso stretto (ovvero di velocità costante). Per tutte le altre curve la velocità è variabile. Le frane spontanee e le colate detritiche non fanno parte dell'inventario dei movimenti di masse permanenti se non si trovano in un'area di frana con movimenti del terreno (potenzialmente) permanenti.

Le classi di velocità nell'inventario originale seguono, nella parte inferiore, la definizione contenuta nella guida applicativa per la gestione dei pericoli legati ai movimenti di masse (UFAM 2016). Secondo questa definizione per la creazione di mappe di pericolo, i valori soglia sono di 2 e 10 cm all'anno. Una velocità superiore a 10 cm all'anno rappresenta di norma un'intensità elevata e può portare alla distruzione di edifici e infrastrutture. Danni lievi e medi si verificano già a velocità comprese tra 0,5 e 10 cm all'anno. Se in grandi aree di frana si verificano movimenti differenziali, le case possono presentare danni ingenti o diventare inabitabili dopo alcuni anni, nonostante i movimenti siano lenti. Una panoramica delle classi di velocità nell'inventario dei movimenti di masse è riportata nella tabella 1.

Tabella 1: Classi di velocità e codifica cromatica dell'inventario originale dei movimenti di masse permanenti.

| Velocità (v) [cm/anno] | Descrizione | Definizione dei colori nella mappa |
|---------------------------|---|------------------------------------|
| 0-2 | velocità lenta, bassa intensità | colore giallo |
| 2-10 | velocità media | colore arancione |
| 10-50 | velocità elevata, probabili danni ingenti, possibile distruzione di edifici | colore rosso chiaro |
| 50-100 | velocità molto elevata, danni molto gravi sono altamente probabili | colore rosso scuro |

| | | |
|-------|---|--------------|
| v>100 | velocità di scivolamento estrema, le persone possono essere in pericolo | colore viola |
|-------|---|--------------|

Classi aggiuntive per l'attributo Velocità senza indicazioni quantitative in cm all'anno. Testo dell'attributo in lingua inglese (significato e spiegazione in lingua tedesca, colorazione dei poligoni):

- active, undefined velocity (lo scivolamento è attivo, ma la velocità non è nota, colore azzurro)
- inactive (nessun movimento rilevato, la grande maggioranza dei punti si attesta a circa 0 mm all'anno +/- 3 mm, masse di scorrimento o di caduta inattiva o potenzialmente fossile, colore verde)
- uncertain (dati InSAR mancanti o incerti, elevato rumore, incertezza riguardo all'attività e alla velocità, colore blu scuro)

Le velocità riportate nell'inventario si basano, ove possibile, su dati radar satellitari (interferogrammi, valutazioni puntuali). Vengono tuttavia utilizzate anche altre fonti (cfr. cap. 1.3).

Per la rilevazione delle velocità si distinguono diversi casi:

- in caso di velocità permanente e costante, nell'inventario originale viene registrata la velocità media (cfr. curva verde nella figura 1, ad es. 0-2 cm all'anno). Non sono escluse piccole variazioni.
- In caso di variazioni significative della velocità e di grandi cambiamenti, viene registrata la velocità massima o una velocità nella fascia alta (vedi curva rossa nella figura 1). Una velocità massima viene presa in considerazione in caso di parossismi. Questi includono movimenti che portano a una frana: ad esempio la frana del Nesthorn (Lötschental) nel maggio 2025. Rientrano nei parossismi anche i movimenti di scorrimento massicci che, con spostamenti dell'ordine dei metri, possono causare danni: ne sono esempi lo scorrimento di Brienz/Brinzauls negli anni dal 2021 al 2024 e lo scorrimento di Falli Hölli, che nel 1994 ha distrutto tutti gli edifici. Queste zone di scorrimento sono rappresentate in viola nell'inventario originale (spostamento superiore a 100 cm all'anno). In questi casi, come riferimento per la classe di velocità si considera l'anno del parossismo o la fase di massima attività.
- La determinazione delle variazioni di velocità non è sempre possibile con i dati InSAR disponibili o altri dati di misurazione. Inoltre, in alcuni casi le variazioni sono poco pronunciate o irrilevanti. In questi casi, se possibile, viene determinata una velocità media. Questi dati sull'attività contengono quindi delle incertezze e non forniscono informazioni sulle variazioni.

Per la velocità nell'inventario originale (org): cfr. l'attributo «Classe di velocità originale» (velocity_class_org).

I valori di velocità si riferiscono a dati e basi del passato. L'inventario originale non formula previsioni sull'evoluzione della velocità o su un imminente crollo. La definizione di uno scenario per i pericoli legati ai movimenti di masse avviene nell'ambito della creazione di mappe di intensità e di pericolo (UFAM 2016).

1.3 Basi dell'inventario originale

La base dell'inventario originale comprende, da un lato, dati InSAR di vario tipo a partire dal 1991 e, dall'altro, numerose altre fonti di dati. Per le valutazioni sono stati utilizzati dati InSAR dei seguenti sensori: JERS, ALOS-PALSAR, SAOCOM, ERS, ENVISAT, RADARSAT, SENTINEL-1, TERRASAR-X, TANDEM-X e COSMO-SKY-MED. Per le altre fonti di dati sono state utilizzate basi a partire dal 1960. Esempi: dati della misurazione ufficiale, vettori di spostamento pluriennali, dati di monitoraggio, dati catastali, immagini aeree, immagini satellitari, dati fotogrammetrici, carte geologiche, carte dei movimenti di masse, carte dei fenomeni, carte del rilievo, dati sugli eventi.

Nei Cantoni di Friburgo, Ticino e Vaud è stato possibile utilizzare come input carte cantonali di sintesi sul tema dei movimenti di masse o inventari digitali georeferenziati. In questo contesto, i dati geografici

(poligoni, superfici) sono stati ripresi e, in alcuni casi, adattati. In altri Cantoni e nella maggior parte delle aree, i poligoni sono stati mappati manualmente sulla base dei dati disponibili. La delimitazione spaziale nell'inventario dei movimenti di masse è semplificata e generalizzata.

L'inventario dei movimenti di masse costituisce il punto di partenza per ulteriori lavori, offre una prima panoramica e viene integrato o perfezionato annualmente (aggiornamenti dinamici). Piccole frane spontanee, colate detritiche e instabilità locali su piccola scala non sono registrate, poiché i dati di telerilevamento qui utilizzati non lo consentono (vedi a questo proposito [StorMe](#)). La maggior parte dei dati satellitari utilizzati ha risoluzioni che vanno da diversi metri a pochi decimetri. Nella maggior parte dei casi sono necessari più pixel per individuare spazialmente le aree con movimenti di masse nelle immagini radar. Da ciò si deduce una dimensione minima degli oggetti di circa 10 m. Di conseguenza, l'inventario non contiene nemmeno (piccole) singole fonti di caduta di massi e pietrisco. L'inventario originale è molto completo e viene aggiornato, ma presenta delle lacune e non sarà mai completo.

1.4 Rappresentazione e metadati dell'inventario originale

La rappresentazione dell'inventario originale è definita dalla combinazione di colori (vedi tabella 1). Le classi di velocità (in inglese: `velocity_class_org`) in cm all'anno sono rappresentate con i colori dal giallo al viola per le rispettive classi (vedi figura 2).

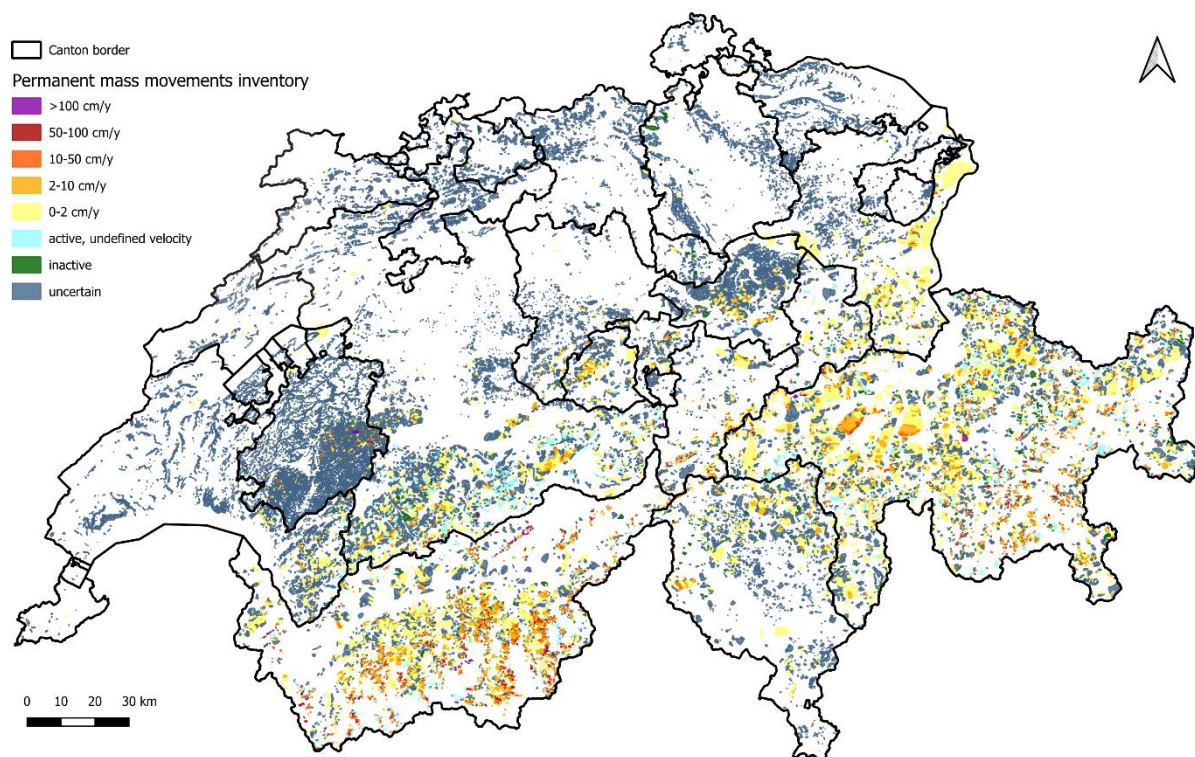


Figura 2: Panoramica dell'inventario dei movimenti di masse permanenti in Svizzera.

I poligoni relativi ai movimenti di masse contengono inoltre dei metadati (tabella 2). Tra i metadati figurano, tra l'altro:

- Un numero di identificazione composto dall'abbreviazione del cantone, dalle coordinate e dalla versione dell'inventario (`bafu_id`).
- L'anno della prima registrazione cartografica del movimento di masse nell'inventario originale, ovvero del poligono nel database (in inglese: `first_cartographic_version`). Le prime registrazioni nell'inventario risalgono al 2009 (anno più antico possibile).
- L'anno dell'ultimo aggiornamento o dell'ultima revisione (in inglese: `latest_review`). Se non è stato effettuato alcun aggiornamento, in questa posizione viene indicato l'anno della prima registrazione cartografica.

- L'indicazione se i confini del poligono del movimento di masse sono certi o relativamente certi (ingl. certain), oppure se sono piuttosto incerti (ingl. uncertain) perché l'estensione del movimento di masse non è chiara, viene definita nell'attributo «delimitation». Un'estensione incerta viene di norma registrata quando, con le basi disponibili, più del 50% dei bordi non è localizzabile, lo è a malapena o lo è solo in modo molto impreciso. L'attributo «uncertain» viene utilizzato anche quando la copertura spaziale dell'indicazione di velocità è incerta o variabile. Nei corpi detritici, nelle rocce friabili e nelle formazioni rocciose fortemente fessurate sono diffusi movimenti spazialmente diversi. Nei processi di subsidenza su larga scala, i movimenti di assestamento ai margini sono spesso infinitesimali e quindi difficili da delimitare.

Tabella 2: Attributi e metadati nell'inventario originale dei movimenti di masse.

| Attributo | Denominazione in italiano | Unità | Calcolo, definizione, descrizione |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|---|
| uid | ID poligono | | Numero di identificazione generato casualmente |
| bafu_id | ID frana | | Numero di identificazione composto dall'abbreviazione del cantone, dalle coordinate e dalla versione dell'inventario |
| velocity_class_org | Classe di velocità originale | cm/anno | Classe di velocità assegnata manualmente nell'inventario originale. Dati provenienti da diverse fonti e basati su diversi metodi. L'inventario funge da riferimento storico. |
| process | Processo | | Definizione del processo (processo di scivolamento, ecc.) |
| delimitation | Delimitazione | | Delimitazione geografica del movimento di masse: certa o incerta |
| first_cartographic_version | Prima registrazione | Anno | Anno della prima registrazione cartografica del movimento di masse |
| latest_review | Ultima revisione, ultima modifica | Anno | Anno dell'ultimo aggiornamento/revisione del poligono / del movimento di masse. Revisioni e adeguamenti degli attributi, dati poligonali con modifiche spaziali (incl. intersezioni, aggregazioni). |

1.5 Aggiornamento dell'inventario originale

L'inventario originale viene integrato e aggiornato manualmente. L'aggiornamento viene documentato indicando l'anno dell'aggiornamento (latest_review).

Nota: la procedura per l'aggiornamento manuale nell'inventario originale differisce sostanzialmente dall'aggiornamento automatico con dati di velocità calcolati dai dati puntuali InSAR (vedi a questo proposito la parte B).

Parte B

Analisi InSAR con dati puntuali

2 Panoramica dell'analisi InSAR con dati puntuali

L'elaborazione di numerose immagini radar genera un'enorme quantità di dati, con miliardi di punti e valori di raster. Per la gestione dei pericoli sono quindi necessarie sintesi e prodotti specifici che consentano un utilizzo semplice e chiaro. In quest'ottica, l'UFAM ha creato quattro prodotti principali da pubblicare sulla Piattaforma comune di informazione sui pericoli naturali (GIN), che si basano l'uno sull'altro (figura 3).

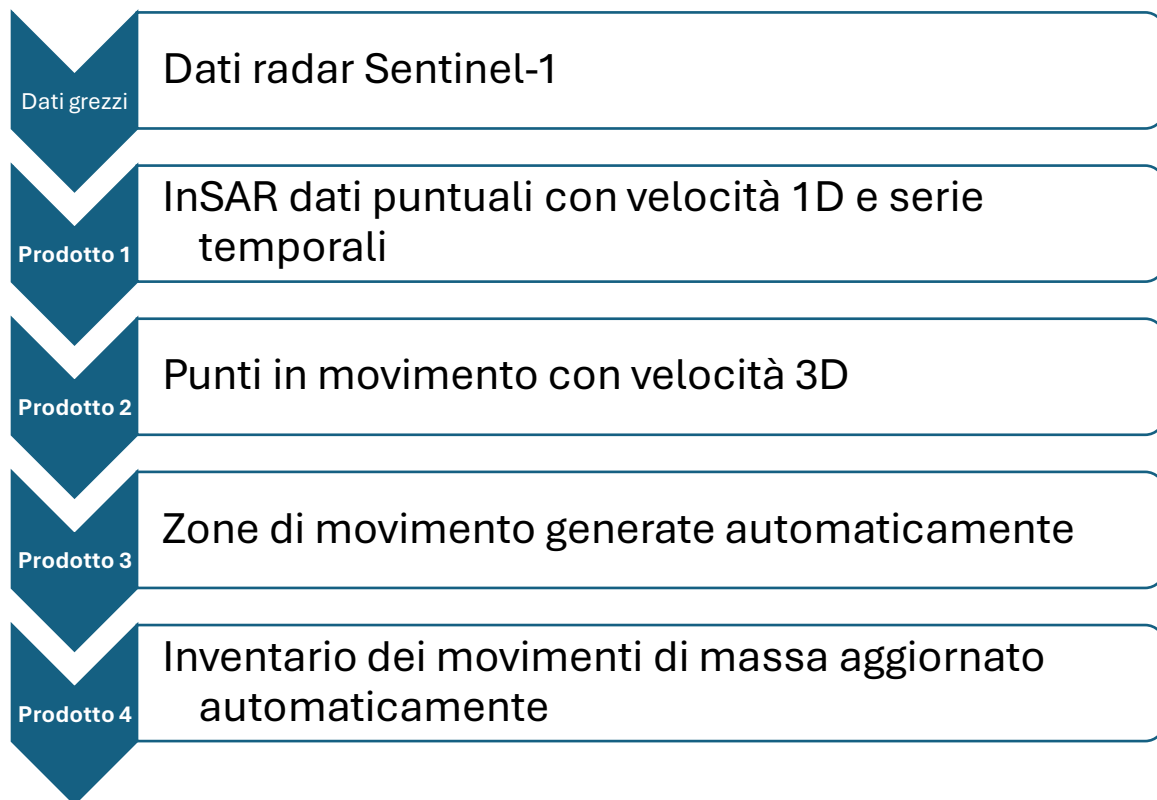


Figura 3: Schema riassuntivo della procedura di analisi InSAR con dati puntuali.

Panoramica dei prodotti georeferenziati disponibili per la GIN, derivati dall'analisi InSAR con dati puntuali, e breve descrizione:

- **Prodotto 1 (P1): InSAR dati puntuali con velocità 1D e serie temporali**
Il set di dati contiene punti InSAR in movimento e non in movimento, nonché una serie temporale per punto a partire dal 2015 (vedi capitolo 3). Le velocità in 1D: questa indicazione di velocità è espressa nella geometria della direzione di misurazione del radar satellitare (in Line of Sight).
- **Prodotto 2 (P2): Punti in movimento con velocità 3D**

Questo set di dati contiene punti in movimento derivati automaticamente da P1 tramite analisi statistiche. Viene rappresentata la velocità degli ultimi sei anni (periodo di analisi), convertita in movimento 3D (vedi capitolo 4).

- **Prodotto 3 (P3): Zone di movimento generate automaticamente**
Si tratta di un'aggregazione spaziale dei punti in movimento in aree contigue con modelli di movimento comuni (ad es. tramite clustering; vedi capitolo 5). Viene rappresentata la velocità mediana degli ultimi sei anni (periodo di analisi), convertita in movimento 3D.
- **Prodotto 4 (P4): Inventario dei movimenti di masse aggiornato automaticamente**
Calcolo automatico delle velocità per i poligoni dell'inventario originale, basato sui dati puntuali InSAR. Informazioni dettagliate e spiegazioni sono disponibili nel capitolo 6.

I prodotti consentono di quantificare sistematicamente i movimenti del suolo. Grazie all'automazione è possibile effettuare un calcolo regolare della velocità.

3 Dati puntuali InSAR con serie temporale

Il prodotto 1 costituisce la base per ulteriori analisi. È costituito dai dati puntuali InSAR, che contengono la cronologia dei movimenti di 46 milioni di punti di misurazione ricavati dagli interferogrammi di Sentinel-1. La prima versione copre il periodo compreso tra marzo 2015 e novembre 2024. Successivamente, il set di dati verrà aggiornato ogni anno.

L'UFAM riceve questi dati puntuali dal fornitore incaricato TRE-ALTAMIRA. L'elaborazione dei dati avviene secondo standard internazionali, così come è stata eseguita per l'European Ground Motion Service ([EGMS](#)) (Constantini et al., 2021). L'UFAM importa i dati puntuali forniti, li valuta, li converte in un formato utilizzabile e li rende accessibili in GIN.

3.1 Orbite satellitari e direzione di acquisizione

I satelliti raccolgono i dati grezzi da diverse orbite: **ascendente** (Ascending) e **discendente** (Descending). Questa distinzione è fondamentale per l'interpretazione dei risultati di misurazione:

- **Orbita ascendente:** il satellite sorvola la Svizzera da sud a nord (direzione di volo circa 350°). Poiché il sensore radar (nel caso di Sentinel-1) guarda verso destra, rileva il suolo da una direzione di osservazione orientale (East-looking). L'intera Svizzera è coperta da due tracce orbitali: T015A per la parte orientale e T088A per la parte occidentale (Figura 4).
- **Orbita discendente:** il satellite sorvola la Svizzera da nord a sud (direzione di volo circa 190°). Con la sua direzione di osservazione verso destra, rileva il suolo da una prospettiva occidentale (West-looking). L'intera Svizzera è coperta da tre tracce orbitali. T066D per la parte centrale, T168D per la parte orientale e T139D per la parte occidentale (Figura 4).

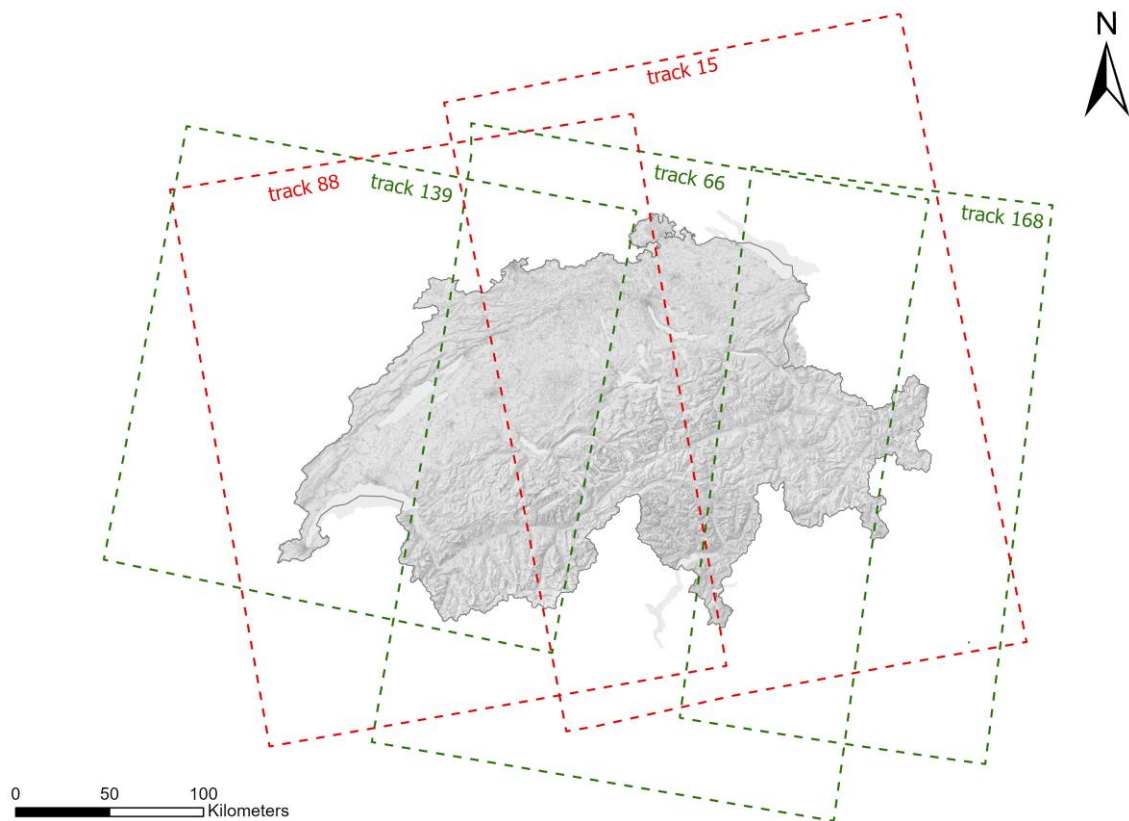


Figura 4: Panoramica della copertura delle singole tracce orbitali. Rosso: tracce orbitali ascendenti; verde: tracce orbitali discendenti. Figura tratta da [Reinders et al., 2023 \(preprint\)](#).

La distinzione tra le orbite dei satelliti è fondamentale, poiché il radar satellitare misura solo i movimenti lungo la linea di vista (Line of Sight, LOS). Un versante orientato verso ovest viene quindi generalmente rilevato meglio dall'orbita discendente, mentre un versante orientale viene rilevato meglio dall'orbita ascendente. Per lo stesso motivo, a seconda dell'orbita, possono verificarsi valori di velocità negativi o positivi. Nell'orbita ascendente, ad esempio, l'oggetto si allontana dal satellite, mentre nell'orbita discendente lo stesso oggetto si avvicina al satellite (cfr. punti rossi e blu nella Figura 5 A/B).

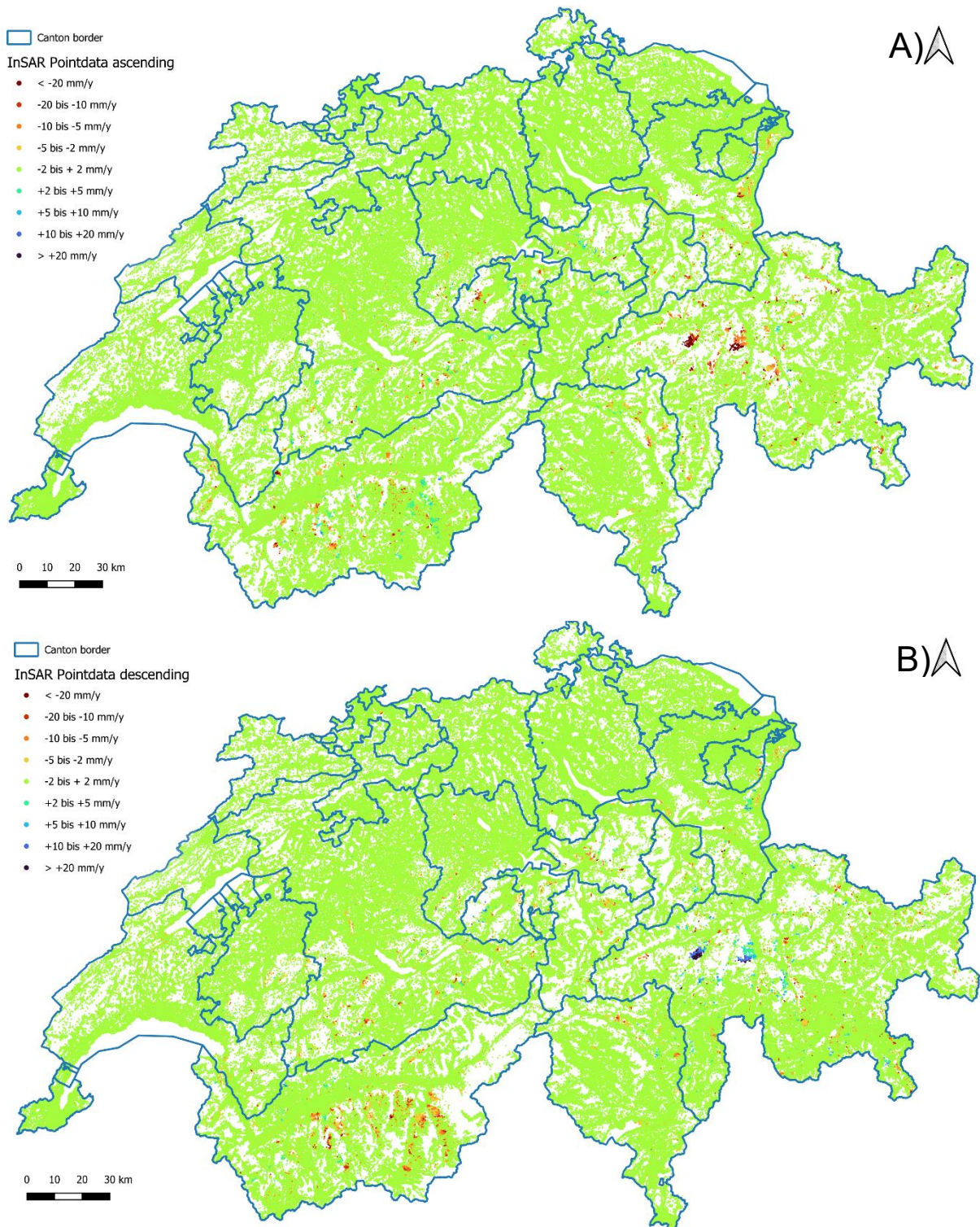


Figura 5: Visualizzazione dei dati puntuali InSAR. A) Orbita ascendente, B) Orbita discendente.

3.2 Distribuzione e densità dei punti

Il set di dati relativo agli anni dal 2015 al 2024 comprende complessivamente circa 46 milioni di punti e copre l'intera Svizzera. Alcune classi di suolo, ad esempio corsi d'acqua e ghiacciai, non sono coperte, poiché si perde la coerenza tra le singole immagini. Allo stesso modo, il metodo presenta difficoltà nelle

aree boschive. Le possibilità di calcolo con i dati puntuali InSAR hanno quindi dei limiti nelle aree con abbondante vegetazione e crescita vegetale: erba alta, terreni agricoli, foreste fitte, ecc. L'attenzione si concentra sulle aree urbane e suburbane, nonché su quelle rocciose con scarsa vegetazione. La densità media dei punti su tutta la Svizzera è di 1132 p/km², mentre nelle aree urbane (tessuto urbano continuo) è ad esempio di 21747 p/km². La figura 6 visualizza la densità dei punti per km² in Svizzera. La tabella 3 mostra la distribuzione dei punti in base alla classe di uso del suolo.

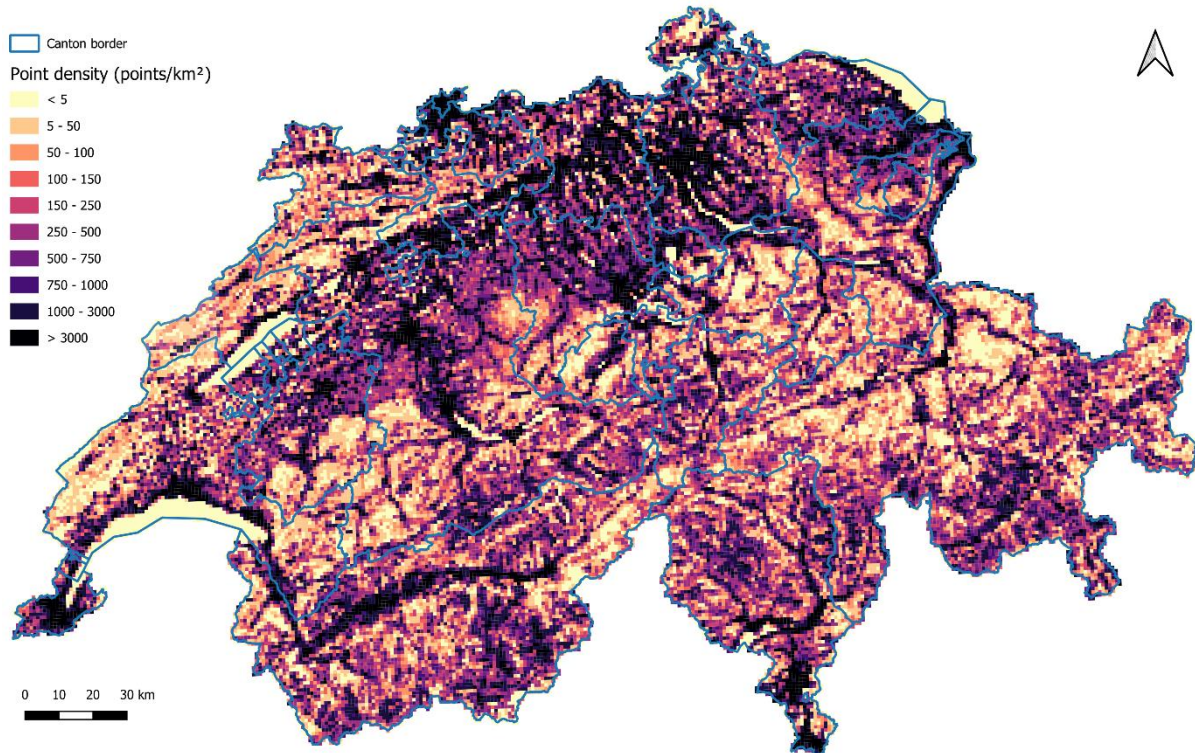


Figura 6: Visualizzazione della densità di punti per km². In blu i confini cantonali.

Tabella 3: Panoramica della distribuzione dei punti in base alla classe di utilizzo del suolo e per l'intera Svizzera.

| Uso del suolo | Numero punti | di Superficie (km ²) | Densità dei punti (p/km ²) |
|---|-------------------|----------------------------------|--|
| Tessuto urbano continuo | 491'316 | 22,6 | 21'747,1 |
| Struttura urbana discontinua | 14'968'260 | 1'502,0 | 9'965,6 |
| Unità industriali o commerciali e strutture pubbliche | 1'244'361 | 108,8 | 11'438,5 |
| Roccia nuda | 2'762'035 | 3'665,5 | 753,5 |
| Aree scarsamente ricoperte di vegetazione | 1'510'266 | 1928,1 | 783,3 |
| Altro | 25'754'884 | 34'057,8 | 756,2 |
| Totale | 46'731'122 | 41'284,8 | 1'131,9 |

3.3 Distinzione tra direzione di misurazione e direzione di movimento

Un concetto fondamentale per la comprensione dei dati è la direzione di misurazione. La tecnologia InSAR misura le differenze di distanza lungo la cosiddetta "Line of Sight" (LOS), ovvero la direzione di osservazione diretta del satellite. La direzione di osservazione o di misurazione è sempre in direzione ovest o est con un angolo verticale compreso tra 25 e 48 gradi (incidenza).

Nella maggior parte dei casi, i pendii in scorrimento non si muovono esattamente in questa direzione di misurazione. Pertanto, il satellite misura solo un vettore parziale dello spostamento reale. Ciò comporta che i valori LOS (P1) siano solitamente inferiori alla velocità puntuale effettiva (vedi V_{real} nella Figura 7). Il valore LOS si discosta in modo particolarmente marcato quando il movimento del pendio è trasversale alla direzione di misurazione.

Per consentire una stima più realistica della velocità di scorrimento nella pratica, nel prodotto 2 viene effettuata una **proiezione geometrica**. In questo modo, il movimento misurato viene trasferito alla direzione di movimento più probabile – nel caso dei pendii, ciò corrisponde di norma alla linea di scorrimento (diretta verso il basso). Questa ipotesi costituisce la base per il cosiddetto valore 3D (maggiori informazioni sul calcolo della velocità 3D nel capitolo 4.6).

Gli utenti dei dati devono tenere presente che questa ipotesi sulla direzione del movimento (lungo la linea di pendenza) può discostarsi dalla realtà, in particolare in caso di processi profondi o strutture geomeccaniche complesse. È quindi indispensabile verificare questa ipotesi nelle valutazioni dei pericoli e nelle analisi dei rischi.

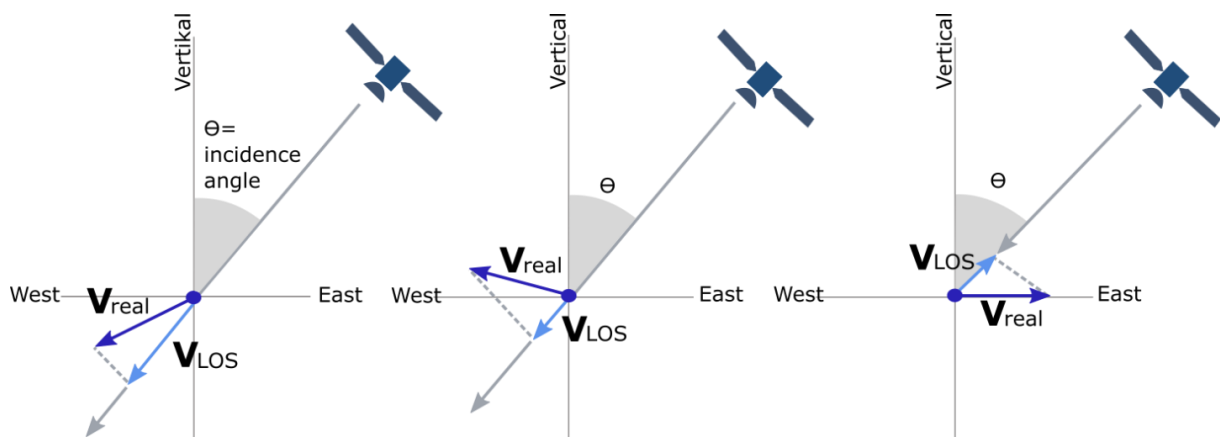


Figura 7: Visualizzazione della relazione tra il movimento LOS e il movimento reale (NGU).

3.4 Intervallo di acquisizione e creazione del grafico della serie temporale

Dall'entrata in servizio di Sentinel-1B nell'aprile 2016, ogni traccia orbitale viene sorvolata ogni sei giorni insieme a Sentinel-1A (entrato in servizio nel 2014) (Figura 8). Tuttavia, Sentinel-1B è uscito di servizio alla fine del 2021 ed è stato sostituito solo alla fine del 2024 da Sentinel-1C. In questo periodo era quindi attivo un solo satellite ed era possibile solo un ciclo di dodici giorni. Nel periodo compreso tra la fine del 2016 e la fine del 2021, sebbene il ciclo di sei giorni non sia stato sempre garantito, è stato comunque presente per un lungo periodo. Ciò garantisce una copertura dei dati complessivamente sufficiente per la Svizzera. Nel novembre 2025 è stato lanciato Sentinel-1D, che in futuro sostituirà Sentinel-1A, garantendo così la continuità dei dati.

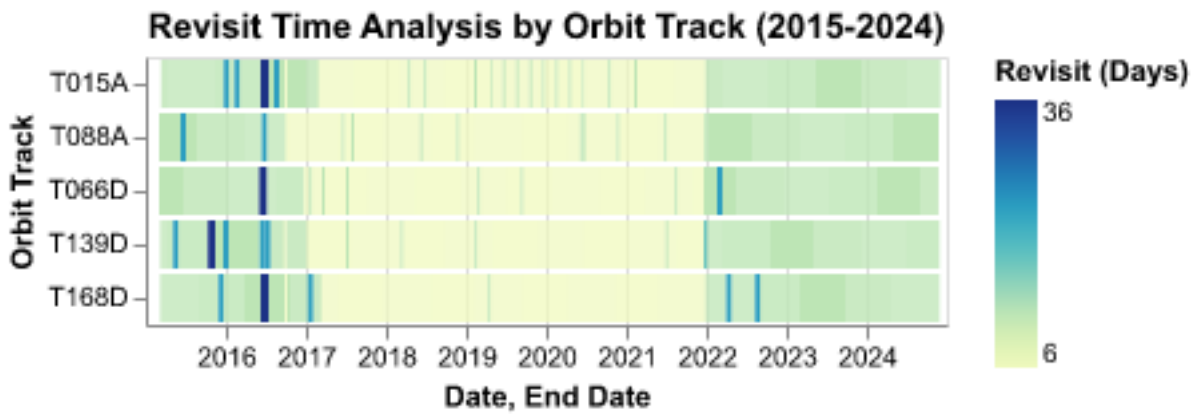


Figura 8: Periodicità delle acquisizioni codificata a colori in base alla traiettoria orbitale. Più scuro è il colore, più lungo è l'intervallo di tempo. Si tratta sempre di un multiplo di sei.

In GIN è disponibile la funzione per creare un grafico della serie temporale. Ciò avviene cliccando su un punto e selezionando l'opzione «Crea grafico». Il grafico della serie temporale (Figura 9) mostra per ogni punto la deformazione o lo spostamento assoluto (cumulativo) in millimetri rispetto alla prima acquisizione (Master Scene). La velocità puntuale ($v_{los_provider}$) viene determinata mediante una tendenza lineare dei valori di deformazione nell'intero arco di tempo.

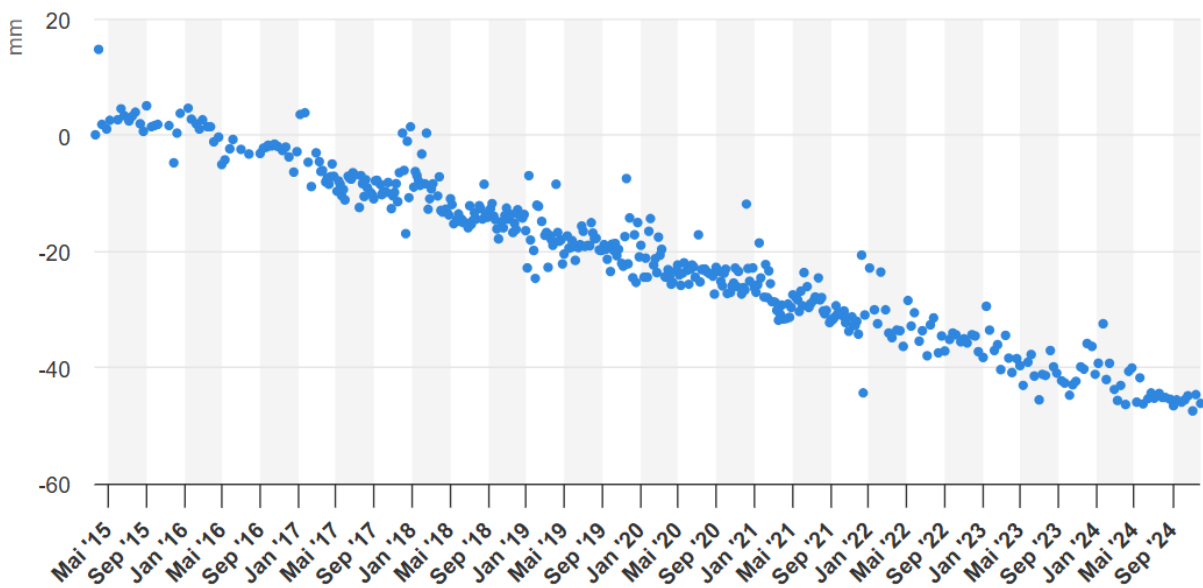


Figura 9: Esempio di una serie temporale di un punto InSAR.

3.5 Attributi dei dati dei punti InSAR

Gli attributi dei dati dei punti InSAR contengono informazioni aggiuntive e metadati (Tabella 4). In GIN è possibile richiamare importanti informazioni aggiuntive cliccando su un punto: ID, velocità, incidenza, azimut, ecc. Altri metadati sono più rilevanti per l'elaborazione digitale o la rappresentazione GIS (easting, northing, ecc.).

Tabella 4: Attributi dei dati puntuali InSAR con serie temporale (prodotto 1).

| Attributo | Denominazione in italiano | Unità | Calcolo, definizione, descrizione |
|-----------|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| uid | ID del punto | | Identificatore del punto |

| | | | |
|---------------|------------|----------|---|
| vlos_provider | Velocità | mm/anno | Velocità media in LOS sull'intera serie temporale (2015-2024) |
| easting | Posizione | LV95 [m] | Coordinata longitudinale |
| northing | Località | LV95 [m] | Coordinata latitudinale |
| elevation | Altitudine | s.l.m. | Altitudine del punto di misurazione InSAR |
| orbit_track | N. traccia | | Numero di identificazione dell'orbita, ad es. T088A, dove A sta per Ascending (ascendente) e D per Descending (discendente) |
| incidence | Incidenza | [°] | Angolo tra lo zenit e la direzione di osservazione del satellite |
| azimuth | Azimut | [°] | Direzione di osservazione del satellite. |

4 Punti InSAR in movimento

Il prodotto 2 contiene punti in movimento. Si tratta di punti di misurazione selezionati dal prodotto 1 che, con elevata probabilità, indicano movimenti reali del terreno. Questi punti costituiscono la base per la derivazione di zone di movimento generate automaticamente (prodotto 3) e per l'aggiornamento dell'inventario dei movimenti di masse (prodotto 4). Per i calcoli, le velocità sono state convertite in 3D, ove possibile: Si presume che un movimento di scorrimento avvenga lungo il pendio e che l'inclinazione locale corrisponda approssimativamente all'angolo di movimento. Una velocità 3D corrisponde di norma meglio al movimento reale del terreno, ovvero all'attività di scorrimento (per pendenze a partire da circa 10°). Le spiegazioni relative ai calcoli seguono nei capitoli 4.6 e seguenti.

Per identificare in modo affidabile i punti mobili (in inglese Moving Points) nei dati InSAR, viene applicata una procedura in più fasi. Il processo consiste nelle seguenti fasi principali:

1. Analisi dei cluster e controllo di qualità
2. Preselezione statistica
3. Analisi ottimizzata degli hotspot
4. Analisi di vicinato
5. Calcolo della velocità 3D
6. Filtraggio geometrico

Le spiegazioni dettagliate relative a queste fasi principali sono riportate nei sottocapitoli seguenti.

4.1 Analisi dei cluster e controllo di qualità dei punti

Come primo passo viene eseguita un'analisi dei cluster. Ciò serve a ridurre il numero di punti in uno spazio ristretto, a condizione che presentino la stessa velocità. In questo modo vengono automaticamente individuati accumuli di punti superflui, che vengono raggruppati in un unico punto rappresentativo. Ciò riduce la quantità di dati senza perdere informazioni.

Nella seconda fase viene verificata la qualità dei dati nelle aree stabili. A tal fine, tutti i punti che si trovano nell'attuale inventario dei movimenti di masse dell'UFAM, o in un poligono dell'inventario,

vengono rimossi dal set di dati. Successivamente vengono filtrati anche i valori statistici anomali che indicano errori di misurazione. L'analisi statistica viene effettuata sui punti rimanenti, poiché, secondo l'ipotesi, dopo il filtraggio il set di dati contiene prevalentemente punti immobili o stabili. La dispersione (deviazione standard) dei punti rimanenti funge da misura del rumore: minore è questa dispersione, più precisi sono i valori misurati per la velocità.

4.2 Preselezione statistica dei punti

In una prima fase di selezione viene effettuata una preselezione globale dei punti sull'intero set di dati. La base per questa operazione è costituita dalla media (μ) e dalla deviazione standard (σ) delle velocità, già calcolate nella fase precedente per le aree stabili. Tutti i punti che presentano una velocità significativamente elevata (velocità negativa, ovvero movimento lontano dal satellite) vengono preselezionati direttamente come "potenzialmente in movimento".

Il criterio è:

$$v \leq \mu - 2.58 \cdot \sigma$$

- v : velocità del singolo punto
- μ : media delle velocità nelle aree stabili
- σ : deviazione standard delle velocità nelle aree stabili
- 2,58: valore soglia per un livello di confidenza del 99%

A questi punti preselezionati viene assegnata la classe GI 1 (probabilità di movimento molto elevata) e vengono saltati nella successiva analisi degli hotspot.

4.3 Analisi ottimizzata degli hotspot

Tutti i punti che non sono già stati preselezionati vengono sottoposti a un controllo statistico spaziale. L'obiettivo è distinguere il rumore casuale dai veri cluster di movimento. Il procedimento verifica la vicinanza spaziale (formazione di cluster) in due fasi:

1. Global Moran's I: verifica se i punti vicini tra loro presentano velocità simili e determina la distanza ottimale per l'analisi (da 20 m a 180 m). Maggiori informazioni sul metodo sono disponibili ai seguenti link:
 - [Autocorrelazione spaziale \(Morans I\) \(Statistiche spaziali\)—ArcGIS Pro | Documentazione](#)
 - [Funzionamento dell'autocorrelazione spaziale \(Global Moran's I\)—ArcGIS Pro | Documentazione](#).
2. *Getis-Ord Gi**: calcola per ogni punto se fa parte di un cluster statisticamente significativo ("Coldspot" = gruppo di punti con velocità negativa. Riferimento: [Lu et al. 2019](#)).

In questa fase, un punto viene classificato come in movimento (classe GI 2) se è moderatamente veloce ($v \leq \mu - 1.96 \cdot \sigma$, con un livello di confidenza del 95%) e allo stesso tempo fa parte di un cluster significativo ($G_i^* \geq 2,58$, con un livello di confidenza del 99%). Solo i punti delle classi GI 1 (dalla fase 1) e GI 2 (dalla fase 2) vengono presi in considerazione per la fase successiva. Tutti gli altri punti sono considerati non significativi (GI 3-5) e vengono scartati.

4.4 Analisi di vicinato

I candidati rimanenti (GI 1 e GI 2) vengono ora verificati con i punti circostanti per rimuovere i singoli valori anomali.

1. Definizione del vicinato: per ogni punto viene definito un vicinato individuale. Questo si basa sulla "Slope Unit" (unità geomorfologica) circostante, secondo la metodologia di Alvioli et al.

(2020) e l'inventario dell'UFAM dei movimenti di masse permanenti. Per ottenere risultati validi anche in aree con bassa densità di punti, il vicinato viene adattato in modo da comprendere sempre almeno 15 e al massimo 100 dei punti più vicini.

2. Un punto viene considerato un punto mobile (classe NH 1) solo se soddisfa entrambi questi criteri (doppia conferma come condizione):
 - Il punto stesso è veloce (ad es. $v \leq \mu - 1.96 * \sigma$).
 - Almeno il 75% dei suoi vicini è anch'esso veloce, ovvero in movimento ($vq_{75} \leq \mu - 1.96 * \sigma$).

I dati che ottengono questa doppia conferma (classe NH 1) sono considerati statisticamente significativi e vengono utilizzati ulteriormente.

4.5 Periodo di riferimento e periodo di analisi

Per poter quantificare meglio le variazioni di velocità, l'intero periodo di tempo viene suddiviso in un periodo di riferimento e in un periodo di analisi. I calcoli sono concepiti in modo tale da ottenere dati di velocità molto affidabili, in cui le fluttuazioni stagionali non hanno alcuna influenza o ne hanno una minima e in cui sono riconoscibili gli sviluppi a medio e lungo termine. Per il periodo di analisi, che rappresenta il momento più recente possibile ed è visualizzato in GIN, viene utilizzata una serie temporale di sei anni. Per la prima pubblicazione dei dati InSAR all'inizio del 2026, vengono esaminate le seguenti serie temporali:

- per il periodo di riferimento, l'intervallo dal 2015 al 2021.
- per il periodo di analisi, il periodo dal 2019 a novembre 2024

Con i futuri aggiornamenti dei dati, i periodi saranno adeguati di conseguenza.

4.6 Calcolo della velocità 3D

Per la conversione della velocità in 3D viene presa in considerazione la topografia locale (pendenza e direzione del pendio). Questi parametri vengono calcolati dal modello digitale di elevazione SwissAlti3D leggermente livellato. Il livellamento serve a compensare le morfologie su piccola scala che potrebbero falsare il risultato del movimento del pendio su larga scala.

In una prima fase, i punti selezionati (NH 1) vengono controllati per individuare eventuali artefatti di misurazione, che possono derivare da una geometria di acquisizione satellitare sfavorevole o da terreni ripidi. Per i punti idonei, la velocità LOS viene convertita, con l'ausilio di un fattore di correzione $3DC_f$, nella velocità lungo la linea di pendenza (v_{slope}) (chiamata anche velocità «reale»):

$$v_{slope} = v_{LOS} * C_f$$

Per il calcolo del fattore vengono utilizzati modelli diversi a seconda della pendenza del pendio.

4.6.1 Aree pianeggianti (pendenza < 5°)

In aree molto pianeggianti si presume che il movimento misurato avvenga principalmente in senso puramente verticale (ad es. cedimenti o sollevamenti dovuti a variazioni delle acque sotterranee). In questo caso viene applicato un modello di movimento verticale. Il fattore di correzione dipende esclusivamente dall'angolo di incidenza (θ):

$$C_{f,vert} = \frac{1}{\sin\theta}$$

Per gli angoli di incidenza tipici di Sentinel-1 (da circa 30° a 45°), ne risulta un fattore di correzione di circa 1,3. Poiché il terreno è pianeggiante, la direzione del pendio (esposizione) e la direzione di volo del satellite non hanno un'influenza significativa sulla proiezione in questo modello.

4.6.2 Zona di transizione e pendii poco inclinati (inclinazione da 5° a 10°)

Per evitare salti bruschi nei fattori o nei valori di velocità nel passaggio dal modello verticale al modello di movimento del pendio, in questa zona viene eseguita un'interpolazione lineare (ponderazione).

- Con inclinazione di 5°: il fattore di correzione corrisponde al 100% al modello verticale ($C_{f,vert}$).
- Con inclinazione di 10°: il fattore di correzione corrisponde al 100% al modello in pendenza ($C_{f,slope}$ lungo la linea di pendenza).
- Nel caso intermedio: i fattori vengono ponderati linearmente. Ad esempio, con un'inclinazione di 7,5°, entrambi i modelli contribuiscono al risultato finale al 50%.

4.6.3 Calcolo su pendii (inclinazione > 10°)

A partire da una pendenza di 10°, si presume che il movimento segua la forza di gravità e avvenga quindi esclusivamente lungo la linea di pendenza (in inglese: fall-line, along slope). In questo caso si applica il metodo di Cascini et al. (2010), che tiene conto dell'intera geometria di raccolta:

$$C_{f,slope} = \frac{1}{\sin\theta * \cos\psi_{sat} * \cos\varphi * \sin\alpha_{asp} - \sin\theta * \sin\psi_{sat} * \cos\varphi * \cos\alpha_{asp} + \cos\theta * \sin\varphi}$$

In questo caso:

- ψ_{sat} : azimut del satellite, direzione di volo del satellite.
- θ : Angolo di incidenza, angolo tra lo zenit e la direzione dello sguardo.
- α_{asp} : direzione del pendio, direzione della linea di pendenza.
- φ : Pendenza del versante, inclinazione della linea di pendenza.

4.6.4 Filtraggio e controllo qualità

Successivamente, i punti vengono filtrati per rimuovere valori anomali e non realistici:

- vengono esclusi i punti con un fattore di correzione superiore a 5,
e
- i punti con un fattore di correzione compreso tra 2,5 e 5 vengono esclusi se la velocità 3D (vslope) è superiore a 150 mm/anno (vslope maggiore di +150 mm/anno o vslope minore di -150 mm/anno).

Un punto viene infine classificato come punto mobile se ha superato con successo tutte le fasi di filtraggio:

1. Ha una velocità significativamente elevata (GI 1).
2. Fa parte di un cluster di movimento statistico (GI 2).
3. È confermato dai suoi vicini e non è un singolo outlier (NH 1).
4. Possiede una geometria di misurazione affidabile e non viene filtrato durante la conversione in velocità 3D (vslope).

4.7 Output e utilizzo

I punti in movimento indicano aree che quasi certamente si stanno spostando. Viene visualizzata la velocità lungo la linea di pendenza (vslope_bafu) degli ultimi sei anni (periodo di analisi) (Figura 10) e la velocità media (LOS) sull'intero periodo di tempo è reperibile nei metadati (finestra informativa). Una lista degli attributi, comprese le spiegazioni, è riportata nella Tabella 5.

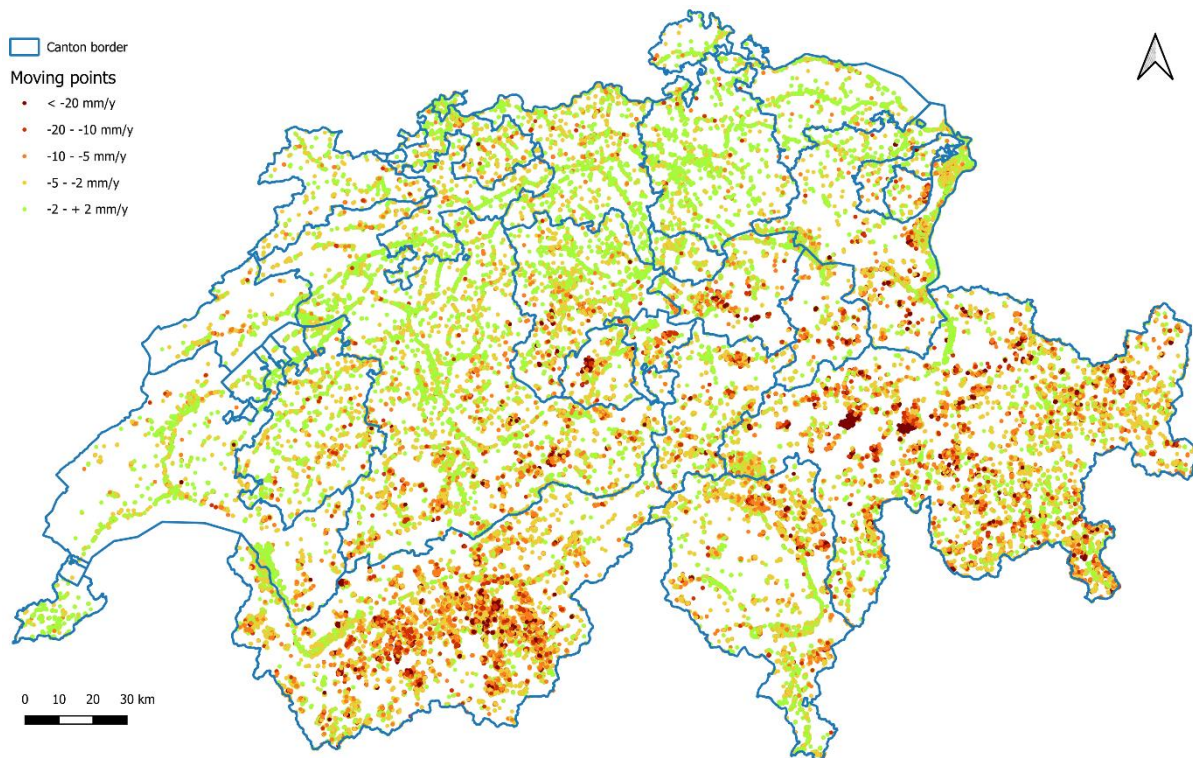


Figura 10: Panoramica dei punti in movimento in Svizzera.

Tabella 5: Attributi dei punti in movimento (prodotto 2).

| Attributo | Denominazione in italiano | Unità | Calcolo, definizione, descrizione |
|-------------------|-------------------------------------|----------|---|
| uid | ID punto | | Numero di identificazione |
| easting | Località | m | Coordinata longitudinale in LV95 |
| northing | Località | m | Coordinata di latitudine in LV95 |
| elevation | Altitudine | m s.l.m. | Altitudine del punto di misurazione InSAR |
| vlos_provider | Velocità | mm/anno | Velocità media LOS sull'intera serie temporale (2015-2024) |
| correction_factor | Fattore di correzione | | Fattore di correzione per correggere la velocità dalla direzione LOS (vlos) alla direzione di pendenza locale (vslope). |
| vslope_bafu | Velocità lungo la linea di pendenza | mm/anno | Velocità puntuale degli ultimi sei anni nella direzione di pendenza locale (2019-2024) |
| aspect | Esposizione | Gradi | Valore di esposizione estratto dal modello altimetrico livellato. |
| slope | Pendenza | Gradi | Valore di pendenza estratto dal modello altimetrico livellato. |

5 Zone di movimento generate automaticamente

5.1 Introduzione

Le zone di movimento generate automaticamente (in inglese Active Deformation Areas o ADA) rappresentano aree contigue ricavate dai punti in movimento. Queste superfici riflettono potenziali

movimenti attivi del pendio. A differenza dei singoli punti, le ADA consentono un'analisi su vasta scala dei modelli di movimento e costituiscono quindi un anello di congiunzione fondamentale tra le misurazioni basate sui punti e l'inventario dell'UFAM. La derivazione di tali aree avviene sulla base dell'analisi spaziale dei cluster e dell'idoneità orbitale ed è integrata da metriche quali la densità dei punti e il numero di punti.

5.2 Metodologia per la derivazione delle aree in movimento

L'identificazione degli ADA avviene in più fasi:

1. Definizione del raggio d'influenza: attorno a ciascun punto mobile viene definito un raggio d'influenza di 30 m, analogamente a quanto proposto da Barra et al. 2017.
2. Formazione di cluster: con il metodo di clustering (Sander et al., 1998) vengono identificati gruppi di punti i cui membri non distano più di 60 m l'uno dall'altro.
3. Generazione di buffer e formazione di aree: attorno a ciascun punto viene creato un buffer circolare con il raggio d'influenza. I buffer sovrapposti o contigui vengono fusi in aree contigue (poligoni).
4. Vengono utilizzati solo gli ADA con almeno 3 punti.
5. Derivazione degli attributi per poligono ADA (Tabella 6):
 - Velocità mediana dei punti in movimento all'interno di un ADA, per l'intero periodo di tempo in LOS (`median_vlos_provider`) e in 3D lungo la linea di pendenza degli ultimi sei anni (`median_vslope_bafu`)
 - Numero di punti in movimento contenuti (`ada_point_number`)
 - Densità dei punti in movimento in punti per chilometro quadrato (`ada_point_density`)
6. Attributi interni aggiuntivi (non visibili su GIN) per le fasi successive di elaborazione:
 - Idoneità per orbita ascendente o discendente (`orbit_suitability`). 1: entrambe, 2: ascendente, 3: discendente, 4: nessuna (Figura 11).
 - Classe di oggetti che descrive la percentuale relativa di superficie degli ADA rispetto all'inventario dell'UFAM (`cover class`): 1: >60%; 2: 40-60%; 3: 20-40%; 4: 10-20%, 5: 0,0001-10%; 6: <0,0001%

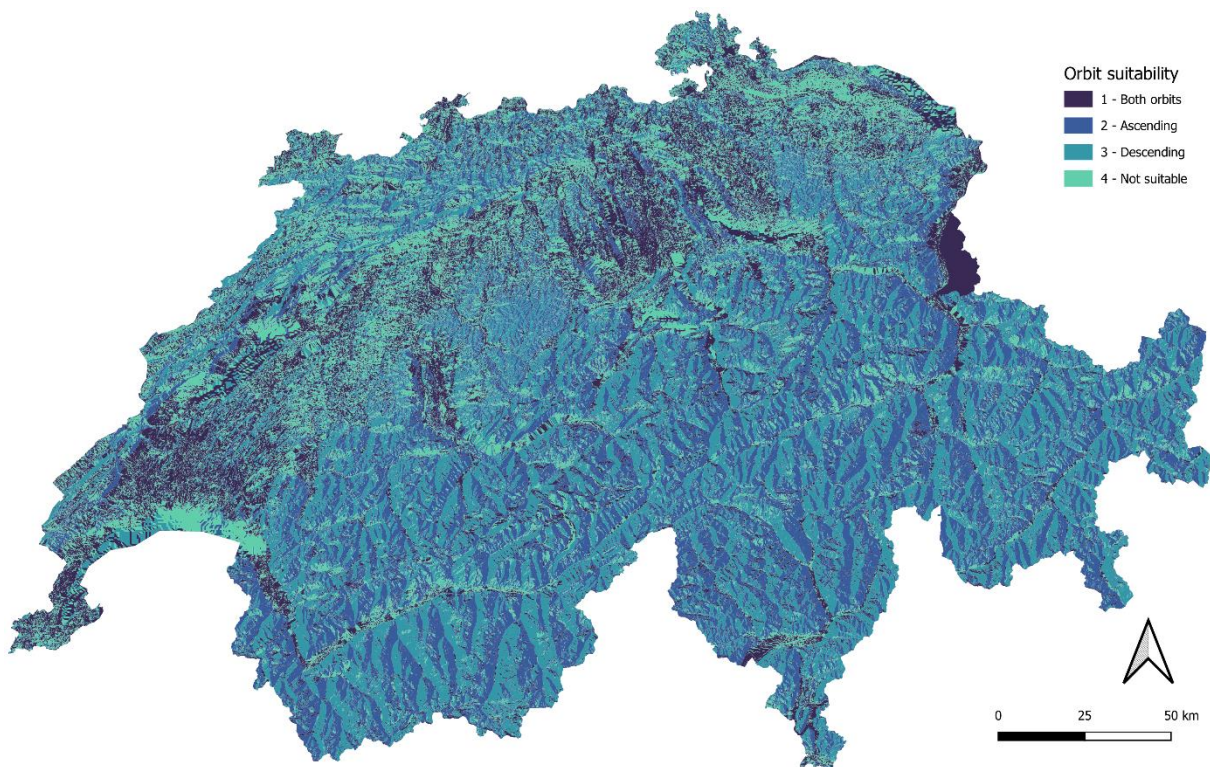


Figura 11: L'idoneità di un'orbita (`orbit suitability`) dipende dalla geometria di acquisizione, dall'esposizione del versante e dalla pendenza. I versanti esposti a sud e a nord sono i meno adatti.

Gli attributi ADA «orbit suitability», «cover class», «point number» e «point density» forniscono informazioni sull'idoneità di un oggetto al calcolo della sua velocità. Migliore è la distribuzione dei punti all'interno di un oggetto e migliore è l'idoneità dell'orbita (a seconda della pendenza e dell'orientamento del versante), tanto più l'oggetto è adatto al calcolo della velocità. Questi attributi confluiscono nell'analisi della qualità (quality_index) del prodotto 4.

5.3 Visualizzazione delle zone di movimento

In GIN le zone di movimento generate automaticamente vengono visualizzate sulla base della velocità mediana dei punti in movimento degli ultimi sei anni (periodo di analisi) lungo la linea di pendenza (vslope_bafu) (Figura 12). Le velocità sono classificate per colore. In caso di aree molto estese, la significatività è minore a causa delle differenze spaziali nei valori di velocità.

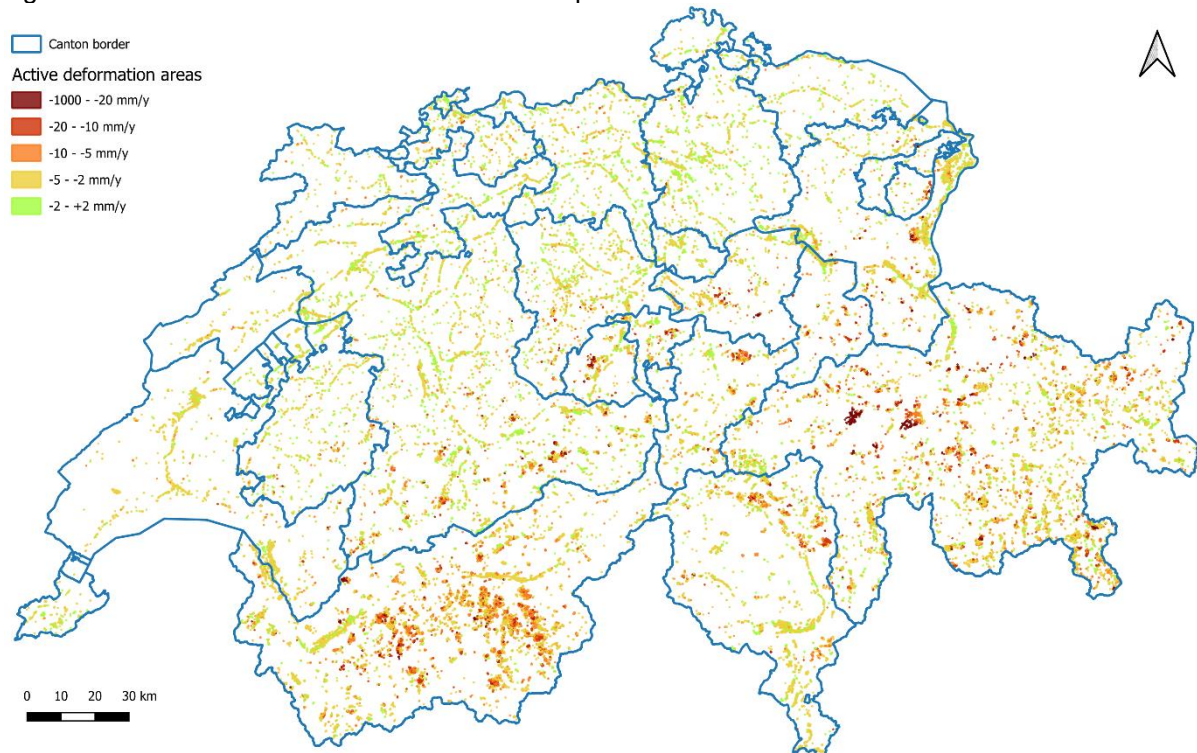


Figura 12: Panoramica delle zone di movimento generate automaticamente in Svizzera.

Tabella 6: Attributi delle zone di movimento generate automaticamente (prodotto 3).

| Attributo | Denominazione in italiano | Unità | Calcolo, definizione, descrizione |
|----------------------|---|----------|--|
| uid | ID punto | | Numero di identificazione |
| easting | Località | m | Coordinata longitudinale in LV95 |
| northing | Località | m | Coordinata di latitudine in LV95 |
| elevation | Altitudine | m s.l.m. | Altitudine del punto di misurazione InSAR nel sistema di riferimento altimetrico WGS84 |
| median_vlos_provider | Velocità mediana | mm/anno | Mediana della velocità di deformazione in linea di vista (LOS) sull'intero periodo di tempo |
| median_vslope_bafu | Velocità mediana lungo la linea di pendenza | mm/anno | Mediana della velocità puntuale nella direzione locale di pendenza degli ultimi sei anni |
| point_number_in_ada | Numero di punti | | Numero di punti in movimento all'interno di una zona di movimento generata automaticamente |
| point_density_in_ada | Densità dei punti | | Densità dei punti in movimento all'interno di una zona di movimento generata automaticamente |

6 Inventario dei movimenti di masse aggiornato automaticamente

6.1 Metodo di calcolo per l'inventario aggiornato automaticamente

L'inventario originale (cfr. capitolo 1) funge da base per l'inventario con velocità e classi calcolate automaticamente. Le velocità dei movimenti di masse dell'inventario originale vengono calcolate automaticamente utilizzando i dati puntuali InSAR. Ciò avviene per una selezione di movimenti di masse che si prestano al calcolo automatico (cfr. figura 13). Per motivi metodologici, con i dati puntuali è possibile calcolare bene velocità fino a 30 o 50 mm all'anno, purché non vi siano grandi variazioni. In rari casi e in presenza di variazioni di velocità minime, è possibile calcolare velocità puntuali superiori al valore di 50 mm all'anno. Attualmente i movimenti più rapidi non possono ancora essere valutati automaticamente con i dati puntuali InSAR. A tal fine sono necessari interferogrammi estesi che, a intervalli brevi, consentano il calcolo di velocità fino a circa 5'000 mm all'anno. Ciò avviene finora manualmente e per singolo oggetto, ovvero non su tutta la superficie (cfr. inventario originale; capitolo 1).

I poligoni dell'inventario originale non sono inclusi nel prodotto «Inventario dei movimenti di masse aggiornato automaticamente» (P4B-CURRENT) se non è stato possibile calcolare una velocità automatica con i dati puntuali. Ciò vale per la maggior parte degli oggetti dell'inventario originale (P4A-ORG). Per i poligoni, la classe di velocità del periodo di analisi attuale (dati Sentinel dal 2019 al 2024) viene visualizzata in GIN (attributo: `velocity_class_current`). I dati del 2025 saranno aggiunti al prossimo aggiornamento.

Per poter individuare le tendenze, le velocità vengono calcolate separatamente per due periodi, come per gli altri prodotti:

- Periodo di riferimento: per la prima versione, definisce i primi sette anni della serie temporale: dal 2015 al 2021. Il periodo di riferimento serve a determinare la velocità di riferimento (`v_ref`).
- Periodo di analisi: definisce gli ultimi sei anni della serie temporale. Nella prima versione si tratta degli anni dal 2019 al 2024. Il periodo di analisi serve a determinare la velocità attuale (`v_current`).

6.1.1 Controllo di qualità per il calcolo della velocità

Non è possibile calcolare automaticamente una velocità affidabile per ogni poligono dell'inventario. Affinché un poligono sia considerato «calcolabile», deve soddisfare criteri statistici riassunti nell'indice di qualità (da A a E) (tabella 7).

I criteri più importanti per un calcolo (Indice A–D) sono:

- Numero minimo: almeno quattro punti in movimento all'interno del poligono.
- Distribuzione spaziale: i punti devono essere confermati come ben distribuiti tramite l'indice *Average Nearest Neighbor (ANN)*. I poligoni in cui i punti si trovano, ad esempio, solo in un angolo vengono filtrati.

I poligoni con dati insufficienti ricevono l'indice E. Per essi non viene riportato alcun nuovo valore di velocità, al fine di evitare interpretazioni errate.

Tabella 7: Descrizione degli indici di qualità.

| Indice di qualità | Gestione in caso di valutazione automatizzata |
|-------------------|---|
| A | Determinazione automatica della velocità possibile senza riserve. |

| Indice di qualità | Gestione in caso di valutazione automatizzata |
|-------------------|---|
| B | Determinazione automatizzata della velocità possibile senza riserve, verifica della velocità eventualmente necessaria in singoli casi. |
| C | Determinazione automatica della velocità possibile, si raccomanda la verifica della velocità per gli oggetti rilevanti (= poligoni dell'inventario). |
| D | Determinazione automatica della velocità possibile, i risultati devono essere interpretati con cautela. Si raccomanda vivamente una verifica della velocità per gli oggetti rilevanti. |
| E | Non è possibile la determinazione automatica della velocità in caso di dati insufficienti (con meno di 4 punti in movimento nell'area dell'oggetto o in caso di distribuzione spaziale inadeguata). È possibile una determinazione manuale della velocità, eventualmente in combinazione con altre tecniche di misurazione. |

6.1.2 Calcolo della velocità di scorrimento in 3D

Per i poligoni che superano il controllo di qualità, vengono aggregate le velocità dei punti contenuti. Il calcolo viene effettuato con la velocità 3D o, in caso di geometria di acquisizione scadente, con la velocità Line of Sight:

1. **Velocità 3D (vslope) in situazioni standard:** in linea di principio vengono utilizzati i valori 3D proiettati sulla linea di pendenza (vslope), poiché questi rappresentano al meglio il movimento reale del pendio. Per i movimenti di cedimento su terreno pianeggiante viene utilizzata solo la componente verticale del vettore 3D. Vedi anche il capitolo 4.6.
2. **Velocità Line of Sight (vlos) in casi eccezionali geometricamente sfavorevoli:** su pendii che si trovano in posizione molto sfavorevole rispetto alla direzione di misurazione del radar, la conversione 3D comporta elevate incertezze. Pertanto, per i pendii in cui il movimento LOS in entrambe le orbite rappresenta meno del 40% del movimento effettivo del pendio (fattore di correzione >2,5), il movimento LOS viene utilizzato per l'assegnazione alle classi di velocità. Un orientamento sfavorevole riguarda soprattutto i pendii esposti a sud e a nord, poiché i satelliti radar effettuano misurazioni in direzione est o ovest.

6.1.3 Analisi delle tendenze

Dal confronto tra il periodo di riferimento e quello di analisi si ricavano le tendenze. In questo modo vengono determinati tre valori diversi:

- **relative_change_percent:** la variazione relativa della velocità è espressa in percentuale (%) e il periodo di analisi viene confrontato con il periodo di riferimento. I valori negativi indicano un'accelerazione. Nessun calcolo per velocità comprese tra -1 e 1 mm/y.
- **change_detect_class:** un valore indice che quantifica il salto tra le classi di velocità (velocity_class_ref rispetto a velocity_class_current). I numeri positivi (da 1 a 4) indicano un'accelerazione (passaggio a una classe più veloce), i numeri negativi (da -1 a -4) un rallentamento e 0 una classe costante (vedi capitolo 6.2).
- **trend_class:** analizza la significatività statistica delle curve di accelerazione dei punti contenuti nel poligono all'interno del periodo di analisi (ad es. "in accelerazione = 1", "movimento costante = 0", "in decelerazione = -1"). Un valore di -10 indica che non è possibile formulare un'affermazione certa.

Può capitare che un poligono abbia subito un rallentamento nella media lineare (relative_change_percent positivo), ma che attualmente stia nuovamente accelerando (trend_class positivo). In questo caso è possibile che l'accelerazione non comporti un cambio di classe. Tuttavia, se più indicatori di accelerazione segnalano un'accelerazione, l'oggetto deve essere assolutamente esaminato più da vicino.

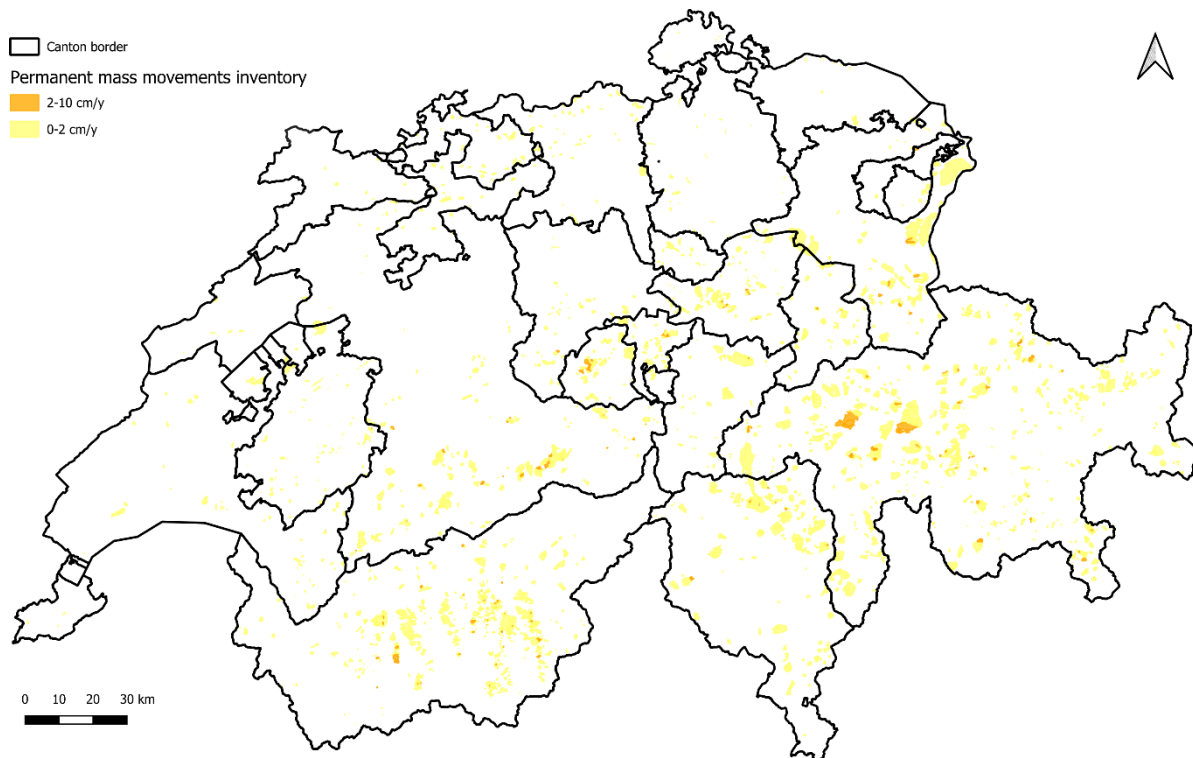


Figura 13: Velocità aggiornata automaticamente dei movimenti di masse permanenti.

6.2 Variazione della classe di velocità nell'inventario automaticamente

Con la mappa «Variazione della classe di velocità dell'inventario» (P4C-change) la dinamica (accelerazione/rallentamento) nell'inventario viene visualizzata in GIN con i colori rosso e blu (vedi figura 14). La variazione rappresenta il cambiamento di classe di velocità (change_detect_class) tra il periodo di riferimento e quello di analisi. I valori positivi indicano un passaggio a una classe più veloce, quelli negativi a una classe più lenta, mentre un valore pari a 0 indica che non è stato rilevato alcun cambiamento di classe.



Figura 14: Le aree di scorrimento con velocità costante sono in grigio-bianco, le aree rosse sono passate a una classe di velocità superiore, quelle blu a una inferiore.

6.3 Struttura dei dati dell'inventario dei movimenti di masse

L'inventario dei movimenti di masse contiene informazioni sul processo, valori di velocità e vari attributi aggiuntivi. Gli attributi della tabella 8 sono inclusi in tutte le rappresentazioni cartografiche GIN dell'inventario (prodotti 4ABC; inventario originale dei movimenti di masse, inventario dei movimenti di masse aggiornato automaticamente, variazione della classe di velocità dell'inventario).

Tabella 8: Attributi per l'inventario dei movimenti di masse (prodotto 4).

| Attributo | Denominazione in italiano | Unità | Calcolo, definizione, descrizione |
|--------------------|---|---------|---|
| uid | ID poligono | | Numero di identificazione generato casualmente |
| bafu_id | ID frana | | Numero di identificazione composto dall'abbreviazione del cantone, dalle coordinate e dalla versione dell'inventario |
| velocity_class_org | Classe di velocità originale | cm/anno | Classe di velocità assegnata manualmente da diverse fonti e basata su diversi metodi (ad es. dati InSAR dal 1991, dati topografici, fotogrammetria, dati sul campo, documentazione degli eventi, ecc. Dati e fonti utilizzati di norma a partire dal 1960 e, in casi specifici, con misurazioni di riferimento, prima del 1960). L'inventario funge da riferimento storico. |
| v_ref | Velocità media del periodo di riferimento | mm/anno | Velocità media di deformazione del periodo di riferimento (2015-2021) calcolata con dati puntuali. A seconda dell'idoneità in 3D o LOS. |

| | | | |
|----------------------------|---|---------|--|
| velocity_class_ref | Classe di velocità del periodo di riferimento | cm/anno | Classe di velocità del periodo di riferimento (2015-2021) calcolata dai punti InSAR. A seconda dell'idoneità, in 3D o LOS. |
| v_current | Velocità del periodo di analisi | mm/anno | Velocità media di deformazione del periodo di analisi (2019–2024) calcolata con i dati dei punti. A seconda dell'idoneità in 3D o LOS. |
| velocity_class_current | Classe di velocità del periodo di analisi | cm/anno | Classe di velocità del periodo di analisi (2019–2024) calcolata con dati puntuali. A seconda dell'idoneità, in 3D o LOS. |
| process | Processo | | Definizione del processo (processo di scorrimento, ecc.) |
| delimitation | Delimitazione | | Delimitazione geografica del movimento di masse (piuttosto) certa o incerta |
| quality_index | Indice di qualità | A-E | Indice di qualità relativo alla copertura di un poligono mediante zone di movimento generate automaticamente dal prodotto 3 |
| first_cartographic_version | Prima registrazione | Anno | Anno della prima registrazione cartografica del movimento di masse |
| latest_review | Ultima revisione, ultima modifica | Anno | Anno dell'ultima revisione del poligono / del movimento di masse. Revisioni e adeguamenti di attributi, dati poligonali con modifiche spaziali (incl. intersezioni, aggregazioni). |
| change_detect_class | Indice di cambio di classe | | Indice relativo al cambiamento della classe di velocità del periodo di analisi (velocity_class_current) rispetto al periodo di riferimento (velocity_class_ref) - accelerazione con numeri positivi (≥ 1) - Rallentamento con numeri negativi (≤ -1) - stessa classe di velocità con indice 0 |
| trend_class | Classe di tendenza | | Classificazione del trend 1: Accelerante -1: in rallentamento 0: movimento costante -10: impossibile formulare un'affermazione certa |
| relative_change_percent | Variazione relativa della velocità | % | Variazione relativa della velocità tra il periodo di riferimento e il periodo di analisi per ogni scivolamento. I valori negativi indicano un'accelerazione. Nessun calcolo per velocità comprese tra -1 e 1 mm/y. |

Parte C

7 Analisi InSAR con dati di superficie

L'analisi InSAR con dati di superficie, ovvero interferogrammi, non è ancora automatizzata e sono necessari ulteriori sviluppi con l'intelligenza artificiale. Per il monitoraggio dei movimenti di masse sono previste in futuro valutazioni automatizzate durante il funzionamento. Pertanto, la documentazione nella Parte C sarà redatta in un secondo momento.

Procedura attuale per le valutazioni dei dati di superficie: Attualmente vengono effettuate valutazioni manuali degli interferogrammi su singoli smottamenti. Si tratta di valutazioni puntuali con interferogrammi ricavati da dati delle bande X, C e L. I risultati vengono considerati nell'inventario originale dei movimenti di masse.

Parte D

Utilizzo dei dati InSAR, riferimenti e documentazione

8 Accesso ai dati InSAR

8.1 Messa a disposizione dei dati su GIN

I prodotti da 1 a 4 vengono messi a disposizione dei servizi cantonali competenti tramite la Piattaforma comune di informazione sui pericoli naturali (GIN) della Confederazione. L'obiettivo è una presentazione trasparente e facilmente accessibile dei dati rilevanti relativi ai movimenti di masse. La prima pubblicazione è prevista per il 2026. I dati sono disponibili nella GIN alla voce «Movimenti di masse». È possibile visualizzare contemporaneamente punti e aree. Si noti che la visualizzazione nel visualizzatore di mappe dipende dalla scala. Nella panoramica su larga scala, tutti i prodotti sono rappresentati come immagini raster. Queste servono per l'orientamento e non sono cliccabili. Solo ingrandendo l'immagine compaiono i dati vettoriali effettivi (punti e aree). Non appena questi sono visibili, vengono visualizzate le informazioni al passaggio del mouse e gli oggetti possono essere cliccati per visualizzare informazioni aggiuntive.

- URL di accesso www.gin.admin.ch
- Richiedere l'accesso: <https://www.info.gin.admin.ch/it/registrazione-e-login>

8.2 Accesso ai dati tramite API (interfaccia di programmazione)

Le informazioni sui singoli oggetti (punti o poligoni) possono essere richiamate direttamente tramite un'interfaccia di programmazione (API - Application Programming Interface). Ciò consente l'integrazione dei dati InSAR in applicazioni specialistiche e di terze parti e permette di effettuare ricerche mirate su singoli oggetti.

Requisiti:

- Accesso GIN attivo
- L'utente deve aver effettuato l'accesso a GIN nel browser affinché il recupero tramite API funzioni

Dettagli tecnici:

URL di base: <https://www.gin5.admin.ch/gin>

Documentazione API: Informazioni tecniche dettagliate sono disponibili all'indirizzo: <https://www.gin5.admin.ch/gin/swagger-ui.html#/>

Endpoint API dei prodotti:

Sostituire il segnaposto {uid} con l'ID oggetto corrispondente dalle tabelle degli attributi:

- **Prodotto 1 (dati puntuali InSAR) – Ascendente:**
<https://www.gin5.admin.ch/gin/api/insar/insar-points/{uid}/ascending>
ID di esempio: S9ZK4YA01
- **Prodotto 1 (dati puntuali InSAR) – Descendente:**

<https://www.gin5.admin.ch/gin/api/insar/insar-points/{uid}/descending>

ID di esempio: SLUG5H801

- **Prodotto 2 (punti in movimento):**

<https://www.gin5.admin.ch/gin/api/insar/moving-points/{uid}>

ID di esempio: ADTQMWT01

- **Prodotto 3 (Zone di movimento generate automaticamente - ADA):**

<https://www.gin5.admin.ch/gin/api/insar/active-deformation-areas/{uid}>

ID di esempio: BRCAA6Q01

- **Prodotto 4 (Inventario dei movimenti di masse permanenti):**

<https://www.gin5.admin.ch/gin/api/insar/landslide-inventory/{uid}>

ID di esempio: VS_89871c40-1e1c-4fb2-84c2-d07655118cf2

9 Utilizzo dei dati InSAR

9.1 Esempi di utilizzo dei dati InSAR

I dati InSAR possono essere utilizzati per la gestione dei rischi legati ai processi di movimento di masse. È inoltre possibile quantificare i movimenti del suolo e degli edifici. L'utilizzo è quindi molto vario. Nelle sezioni seguenti vengono illustrati alcuni casi tipici di gestione dei rischi legati ai processi di movimento di masse.

Esempio 1: Valutazione dei rischi di frana

- **Situazione iniziale:** un comune ha incaricato un ufficio specializzato di rivedere la mappa dei rischi.
- **Analisi con dati InSAR:**
 1. Nell'inventario è segnalato uno slittamento attivo in giallo: velocità di slittamento secondo la guida applicativa dell'UFAM 0-2 cm/anno.
 2. Per l'analisi viene caricato il **prodotto 2 (punti in movimento)**. Molti punti mostrano movimenti compresi tra 6 e 20 mm/anno. Tre punti distanti tra loro presentano valori compresi tra 21 e 28 mm/anno.
 3. Per un'analisi dettagliata viene caricato il **prodotto 1 (Tutti i punti)**. Molti punti mostrano movimenti da 3 a 29 mm/anno. Ai margini si trovano alcuni valori inferiori a 3 mm/anno (nel margine di incertezza).
 4. Il confronto con il **prodotto 4 (Inventario)** conferma l'inventario.
- **Risultato e possibile procedura:** i dati confermano una frana attiva con la velocità rilevata, mentre il margine è molto lento o inattivo. La mappa di pericolo viene così confermata e l'area della frana viene documentata con i dati InSAR.

Esempio 2: Valutazione di frane e altri pericoli naturali per la carta dei pericoli

- **Situazione iniziale:** un comune ha affidato l'incarico di revisione della mappa di pericolo a un ufficio specializzato. Per la valutazione dei pericoli di frana, colata detritica e colata di fango, l'ufficio consulta i principi di base InSAR.
- **Analisi con dati InSAR:**
 1. nell'inventario una frana è contrassegnata in blu: la velocità di scorrimento è «sconosciuta» («uncertain»), poiché finora non erano disponibili dati InSAR in questa zona di frana. Con la nuova elaborazione sono disponibili dati InSAR.

2. Per l'analisi viene caricato il **prodotto 2 (punti in movimento)**. Molti punti mostrano movimenti da 2 a 12 mm/anno. Poiché il movimento avviene in direzione sud-ovest, `v_slope` è stato corretto con un fattore.
 3. Per l'analisi dettagliata viene caricato il **prodotto 1 (Tutti i punti)**. Molti punti mostrano movimenti da 1 a 9 mm/anno nell'orbita ascendente. Sul bordo inferiore, dove si trovano le case, molti valori sono compresi tra 0 e 2 mm/anno (`v_LOS`, ovvero movimenti nell'intervallo di incertezza). Inoltre, vengono verificate le serie temporali.
 4. Le fasi di lavoro vengono elaborate anche per le colate detritiche e i rischi di colate detritiche, qualora siano stati mappati smottamenti e instabilità nel bacino idrografico o nella zona di origine.
- **Risultato e possibile procedura:** i dati confermano un movimento di scorrimento molto lento nella zona superiore (valore medio di 5 mm/anno; max. 12 mm/anno). Sul bordo inferiore il movimento è incerto. È opportuno suddividere il vecchio poligono di scivolamento in due poligoni (giallo/blu). La mappa di pericolo viene così integrata e viene esclusa una zona a basso rischio (zona gialla nella mappa di pericolo). Il servizio specializzato redige una documentazione e la comunica all'UFAM per l'aggiornamento dell'inventario.

Esempio 3: Individuazione di una nuova zona di frana

- **Situazione iniziale:** un comune segnala al servizio cantonale la formazione di crepe su una strada al di fuori delle zone di scivolamento registrate nel prodotto 4 (nessun poligono).
- **Analisi con dati InSAR:**
 1. Il servizio specializzato esamina il **prodotto 3 delle zone di movimento generate automaticamente (ADA)** in GIN. Constata che nell'area segnalata si trovano diverse ADA (poligoni).
 2. Per un'analisi dettagliata viene caricato il **prodotto 2 (punti in movimento)**. Si osservano gruppi di punti con `vslope_bafu` (velocità 3D) compresa tra -10 e -20 mm/anno.
 3. Il centro specializzato identifica diversi punti al centro del movimento e valuta la serie temporale (**dal prodotto 1**). Le serie temporali mostrano un movimento costante, che si è accelerato dal 2021. La distribuzione dei punti in movimento corrisponde alla mappatura sul campo nell'area di scorrimento.
- **Risultato e possibile procedura:** i dati confermano una zona di scorrimento attiva finora sconosciuta e non registrata. Il centro specializzato redige una documentazione, registra l'area di scorrimento come nuovo poligono e la segnala all'UFAM per l'aggiornamento nell'inventario.

Esempio 4: Rivalutazione di un movimento di masse con accelerazione

- **Situazione iniziale:** un servizio cantonale effettua la sua verifica annuale dei movimenti di masse noti.
- **Analisi con dati InSAR:**
 1. Il servizio specialistico apre il **prodotto 4 (inventario aggiornato)**.
 2. Individua oggetti con `trend_class = 1` o `change_detection_class > 0`.
 3. Viene identificata una zona di frana nota (`bafu_id = ...`) a monte del villaggio. Gli attributi indicano:
 - `vslope_ref (2015-2021) = -8,5 mm/anno`
 - `vslope_current (2019-2024) = -17,2 mm/anno`

- $relative_change_percent = -102\%$ (accelerazione)
- $quality_index = A$ (Il calcolo è molto affidabile grazie alla buona copertura dei dati. Esiste un gran numero di punti rilevanti, distribuiti molto bene nello spazio.)
- **Risultato e possibile approccio:** i dati InSAR forniscono una quantificazione oggettiva di una significativa accelerazione dell'intero corpo di scorrimento. Queste informazioni confluiscono direttamente nella rivalutazione dei pericoli e possono servire come base per misurazioni sul campo e monitoraggi (ad es. GNSS, inclinometri). Si sta valutando la creazione di un sistema di allerta precoce.
-

Esempio 5: Interpretazione dei movimenti in zone rocciose ripide

- **Situazione iniziale:** sulle pareti rocciose alpine ripide vengono spesso rilevati dei «punti mobili» (Prodotto 2). L'interpretazione di questi dati richiede tuttavia particolare cautela, poiché non ogni variazione di distanza misurata rappresenta un movimento di masse rilevante del corpo roccioso. Spesso sopra la roccia sono presenti strati di materiale sciolto, più o meno estesi. Il materiale sciolto (detriti, morene, ecc.) è spesso soggetto a processi superficiali, in particolare sui pendii ripidi. È necessario classificare i movimenti in relazione a un processo di movimento di masse: movimenti rocciosi, movimenti di materiale sciolto, processi di scorrimento, ribaltamento o cedimento, cinematica o altri processi? I movimenti rocciosi rappresentano di norma il pericolo maggiore.
- **Analisi delle velocità nella geometria satellitare e nella linea di pendenza:**
 - Si verifica la plausibilità della distribuzione dei punti e della cinematica. I punti si trovano su roccia in piedi o su terreno sciolto?
 - Le velocità in linea di vista (v_{los}) vengono prima verificate (prodotto 1, tutti i punti).
 - Il calcolo della velocità 3D ($vslope_bafu$) nel prodotto 2 si basa sull'ipotesi metodologica che il movimento avvenga parallelamente alla pendenza del versante (linea di pendenza). In caso di fattori di correzione elevati è necessaria cautela.
 - Viene verificata la plausibilità della direzione di movimento. Confronto dei movimenti delle rocce con i dati satellitari. Confronto del comportamento delle masse rocciose e dei materiali sciolti.
- **Raccomandazioni per la verifica della plausibilità:**

Per evitare interpretazioni errate, è opportuno eseguire le seguenti analisi aggiuntive:

- Eseguire l'analisi delle serie temporali (prodotto 1) sui punti rilevanti: verificare la dispersione e l'andamento nella serie temporale, nonché il comportamento dei punti nelle vicinanze. Grandi salti nella serie di dati sono un'indicazione di errori di elaborazione nei calcoli, condizioni atmosferiche complesse, stagionalità o altri problemi.
- Effettuare la verifica di plausibilità con altre basi: un confronto con ortofoto ad alta risoluzione aiuta a riconoscere se nell'area dei punti di misurazione sono visibili cambiamenti o forme di fratture recenti. Anche il modello altimetrico fornisce informazioni aggiuntive. Conoscenze preziose o informazioni aggiuntive possono derivare soprattutto dal confronto tra diversi momenti temporali di ortofoto e modelli altimetrici.
- Verificare la necessità di un sopralluogo: per chiarire se si tratta di un movimento reale e rilevante ai fini del rischio, è indispensabile una valutazione tecnica della geologia locale. I dati InSAR satellitari non sostituiscono le indagini geologiche sul campo e le misurazioni terrestri in loco!

9.2 Limiti nell'utilizzo dei dati InSAR

L'InSAR è di grande utilità per la gestione dei pericoli, ma presenta anche dei limiti, che vengono brevemente illustrati di seguito (elenco non esaustivo):

- L'inventario dei movimenti di masse è stato mappato manualmente da diverse persone. Le basi utilizzate variano notevolmente da una regione all'altra e, in casi specifici, sono state effettuate rilevazioni sul campo, che tuttavia rappresentano delle eccezioni e non la regola. Ne conseguono differenze a livello locale, regionale e cantonale. La standardizzazione verrà ulteriormente migliorata nell'ambito degli aggiornamenti.
- Va notato che il set di dati BAFU sarà reso disponibile per la prima volta nel 2026. È quindi possibile che i dati, nonostante i controlli di qualità, contengano ancora degli errori. I metodi di elaborazione vengono tuttavia continuamente perfezionati, per cui sono previsti miglioramenti.
- Nelle zone boschive fitte, sulle pareti rocciose ripide, nelle zone umide, sui ghiacciai e in presenza di copertura nevosa, nella maggior parte dei casi non è possibile generare punti InSAR (cfr. a questo proposito il capitolo 3.2).
- I movimenti rapidi del suolo, ovvero velocità superiori a circa 30 mm/anno (o circa 50 mm/anno in situazioni specifiche), di norma non vengono rilevati o lo sono in modo insufficiente con i dati puntuali. Per i movimenti rapidi, l'UFAM utilizza interferogrammi (dati raster delle bande X, C e L) ed effettua valutazioni manuali per l'inventario originale.
- Le immagini radar hanno una risoluzione spaziale compresa tra 10 e 30 m. Per valutazioni specifiche e molto locali è necessaria una risoluzione di griglia molte volte superiore. Di conseguenza, piccole aree di scivolamento, instabilità locali e cadute di massi non possono essere rilevate.
- La qualità della misurazione è influenzata, tra l'altro, dalle condizioni atmosferiche. I cambiamenti temporali, dinamici e spaziali dell'atmosfera influenzano la qualità dei dati di misurazione. Attualmente non è possibile eliminare in modo completo e sicuro le influenze atmosferiche. Pertanto, non si possono escludere deviazioni o valori errati.
- La deformazione Line of Sight (LOS) nel prodotto 1 misura il movimento solo lungo la direzione di osservazione del satellite. Questa misurazione 1D non corrisponde tuttavia al movimento effettivo. È quindi necessaria una conversione nella velocità reale lungo la linea di pendenza (3D) (vedi capitolo 4.6).
- La conversione da LOS a 3D presenta tuttavia dei limiti: dipende dalla geometria del pendio in relazione al satellite. Maggiore è il fattore di correzione, maggiori sono le incertezze (problema della moltiplicazione degli errori. Vedi capitolo 4.6).
- Si verificano spesso differenze stagionali nei tassi di deformazione (ad es. dovute all'umidità del suolo, al gelo, alla neve, ecc.). Queste sono talvolta reversibili e in questi casi non dovrebbero essere identificate come accelerazione. In questo lavoro ci si interessa principalmente agli sviluppi pluriennali (tendenze irreversibili).
- Gli attuali prodotti InSAR non costituiscono un sistema di allerta. I dati e i metodi utilizzati servono al monitoraggio a lungo termine e all'individuazione (precoce) dei movimenti del suolo (o all'individuazione di tendenze). Di norma non sono adatti a prevedere eventi improvvisi come le frane.

10 Domande frequenti (FAQ)

Perché le velocità dei punti in movimento (prodotto 2) sono spesso superiori ai dati puntuali InSAR del prodotto 1?

Nel prodotto 1 le velocità vengono registrate come «Line of Sight» (LOS), ovvero solo la componente di movimento lungo la direzione diretta di osservazione verso il satellite. Poiché ciò spesso rappresenta solo una parte della deformazione reale, nel prodotto 2 questi valori vengono convertiti nella velocità lungo la linea di pendenza (3D). Per la conversione, la velocità viene moltiplicata per un fattore di

correzione (correction factor). La conversione si basa sul presupposto che il movimento di scorrimento avvenga parallelamente al pendio, ovvero alla linea di pendenza. Questo presupposto rappresenta una semplificazione del movimento 3D, che nella realtà non è sempre valida e può portare a discrepanze, in particolare in caso di processi di scorrimento complessi. A causa della proiezione sull'inclinazione effettiva del pendio, il valore di velocità calcolato risulta nella maggior parte dei casi più elevato. Inoltre, nel prodotto 2 viene visualizzata la velocità degli ultimi sei anni (2019–2024) e nel prodotto 1 l'intero periodo (2015–2024). Già solo questo può determinare valori diversi.

Perché non vedo punti in movimento in caso di scivolamenti rapidi?

Il metodo dei punti InSAR presenta dei limiti fisici in caso di movimenti troppo rapidi. La situazione ideale per la determinazione delle velocità è una buona riflessione e movimenti costanti e uniformi compresi tra 1 e 30 mm all'anno. I movimenti più rapidi comportano la perdita di coerenza tra le immagini satellitari, motivo per cui spesso non è possibile calcolare dati per tali aree. Un intervallo di tempo più breve tra le immagini satellitari o l'utilizzo di altri dati satellitari (banda L) potrebbero eventualmente migliorare la situazione. Per la registrazione nell'inventario originale dei movimenti di masse (P4A-ORG), la determinazione delle velocità a partire da circa 30 mm all'anno è stata effettuata in aggiunta o esclusivamente tramite l'analisi di interferogrammi (classi di velocità 2-10 e 10-50 cm all'anno e tutte le velocità > 50 cm all'anno). Tale analisi viene effettuata manualmente e per singolo oggetto (non è ancora stata automatizzata).

Perché nelle aree forestali o sui ghiacciai ci sono pochissimi punti di misurazione?

L'InSAR richiede riflettori stabili al suolo. Nelle aree con vegetazione fitta (boschi), acqua o superfici mutevoli come ghiacciai o frane in rapida evoluzione, si perde la coerenza tra le immagini. Le aree urbane, le infrastrutture, le zone rocciose o scarsamente ricoperte di vegetazione sono più adatte all'elaborazione dei dati puntuali (vedi capitolo 3.2).

Qual è la differenza tra «Ascending» e «Descending»?

Questi termini descrivono la traiettoria del satellite (vedi capitolo 3.1).

- **Ascending (ascendente):** il satellite vola da sud a nord e guarda verso est (azimut 80). Rileva quindi particolarmente bene i versanti orientali.
- **Descending (discendente):** il satellite vola da nord a sud e guarda verso ovest (azimut 280). Rileva in modo ottimale i versanti occidentali.

Per un'analisi completa, idealmente dovrebbero essere prese in considerazione entrambe le geometrie.

Perché l'inventario (prodotto 4) mostra talvolta un'«accelerazione» (Trend Class 1), sebbene la percentuale di variazione (relative_change_percent) indichi un rallentamento?

Ciò è dovuto ai diversi metodi di calcolo (vedi capitolo 6.1.3).

- **Variatione relativa (relative_change_percent):** confronta le velocità medie lineari del periodo di riferimento con quelle del periodo di analisi. Se la velocità nel periodo di analisi è in media inferiore, ciò viene visualizzato come un rallentamento relativo (valore positivo).
- **Classe di tendenza (trend_class):** analizza se all'interno dell'attuale periodo di analisi si verifica un'accelerazione non lineare statisticamente significativa (una curva nella serie temporale).

Parte E

Glossario, abbreviazioni, bibliografia

11 Glossario e abbreviazioni

- ADA (Active Deformation Area): zone di movimento generate automaticamente. Si tratta di aree contigue (superfici) derivate dai "punti in movimento" (Prodotto 2) che riflettono potenziali movimenti attivi del versante.
- ANN (Average Nearest Neighbor Index)
- Ascending Orbit (orbita ascendente): un'orbita satellitare in cui il satellite sorvola la Svizzera da sud a nord. A causa della direzione di osservazione laterale (a destra) del sensore, esso rileva il suolo da una direzione di osservazione orientale.
- UFAM (Ufficio federale dell'ambiente): l'autorità che pubblica questo documento e gestisce l'inventario dei movimenti di masse permanenti.
- DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise): un metodo di clustering utilizzato per l'identificazione di gruppi di punti (cluster). Viene utilizzato nel prodotto 3 per formare aree contigue (ADA) a partire dai «punti in movimento» (prodotto 2).
- DS (Distributed Scatterer): Diffusore distribuito. Si tratta di dati puntuali InSAR che consentono un'analisi su vasta scala, oggettiva e ripetibile delle deformazioni.
- Descending Orbit (Orbita discendente): un'orbita satellitare in cui il satellite sorvola la Svizzera da nord a sud. A causa della direzione di osservazione laterale (a destra), il suolo viene rilevato da una prospettiva occidentale.
- EGMS (European Ground Motion Service): il servizio europeo di monitoraggio dei movimenti del suolo. L'elaborazione dei dati per il prodotto 1 avviene secondo gli standard internazionali applicati anche per l'EGMS.
- Getis-Ord GI*: un indice statistico utilizzato nell'analisi degli hotspot (prodotto 2). Determina se singoli punti fanno parte di un cluster di velocità statisticamente significativo (i cosiddetti hotspot o coldspot).
- GIN (Piattaforma comune di informazione sui pericoli naturali): attraverso questa piattaforma di geoinformazione, i prodotti InSAR vengono messi a disposizione degli uffici cantonali competenti.
- InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar): una tecnologia radar utilizzata per il rilevamento e il monitoraggio sistematico dei movimenti di masse permanenti. Misura le differenze di distanza lungo la linea di vista diretta (LOS) del satellite.
- LOS (Line of Sight): la linea di vista diretta del satellite. InSAR misura le deformazioni solo lungo questa linea, ovvero se un punto si avvicina o si allontana dal satellite. Ciò non corrisponde necessariamente all'effettivo movimento a valle.
- LV95 (Rilevamento nazionale 1995): «punto zero» a Berna: Est = 2'600'000 m; Nord = 1'200'000
- Parquet: un formato di dati utilizzato per la distribuzione dei prodotti, al fine di ridurre al minimo le dimensioni dei file.
- PS (Persistent Scatterer / Permanent Scatterer): diffusori permanenti. Si tratta di dati puntuali InSAR che consentono un'analisi su vasta scala, oggettiva e ripetibile delle deformazioni.
- Slope Unit (Unità di pendenza): unità spaziali utilizzate nell'analisi di vicinato (Prodotto 2) per verificare se i punti circostanti si comportano in modo simile.

12 Bibliografia

- Alvioli M., Guzzetti F., & Marchesini I. (2020). Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy. *Geomorphology*, 358, 107124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107124>
- BAFU 2016 Schutz vor Massenbewegungsgefahren, Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/ovEWt8H8yGE0/schutz_vor_massenbewegungsgefahren.pdf
- Barra A., Solari L., Béjar-Pizarro M., Monserrat O., Bianchini S., Herrera G., Corsetto M., Sarro R., González-Alonso E., Mateos R., Ligüerzana S., López C. & Moretti S. (2017). A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 9(10), 1002. doi: <https://doi.org/10.3390/rs9101002>
- Cascini, L., Fornaro G., & Peduto D. (2010). Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 111(1-4), 19-42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.003>.
- Constantini M., *et al.* (2021) European Ground Motion Service (EGMS). IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pp. 3293-3296, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553562.
- Cruden D. & Varnes D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75.
- Lu P., Bai S., Tofani V. & Casagli N. (2019). Landslides detection through optimized hot spot analysis on persistent scatterers and distributed scatterers. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156(10), 147-159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.004>.
- Reinders, K. J., Verhoeven, G. F., Sartorelli, L., Hanssen, R., & Manconi, A. (2023). Exploring the use of Sentinel-1 to monitor spatial and temporal evolution of permafrost in the Swiss Alps. *EGU sphere* [Preprint]. doi: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2321>
- Sander, J., Ester, M., Kriegel, H. P. *et al.* (1998). Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and Its Applications. *Data Mining and Knowledge Discovery* 2, 169–194 doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009745219419>
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report* 176.11-33.