



# REGIONE LOMBARDIA

DIREZIONE GENERALE TERRITORIO E URBANISTICA  
UNITÀ ORGANIZZATIVA TUTELA E VALORIZZAZIONE DEL TERRITORIO

## PROGETTO DEFINITIVO

RIASSETTO IDROGEOLOGICO E MITIGAZIONE DEI RISCHI  
NATURALI PRESENTI IN VAL TORREGGIO  
Comune di Torre S.Maria (SO)

DICEMBRE 2006

TITOLO

RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITÀ DEI VERSANTI

A.T.I.:

MANDATARIA

**STUDIO PAOLETTI**  
INGEGNERI ASSOCIATI  
20133 MILANO - via Bassini, 23 - tel.(02) 26681264  
fax (02) 26681553 - E-Mail: Studiopaoletti@etatec.it

MANDANTE

**ETATEC** S.R.L.  
SOCIETÀ DI INGEGNERIA  
20133 MILANO - via Bassini, 23 - tel.(02) 26681264  
fax (02) 26681553 - E-Mail: ETATEC@ETATEC.IT

MANDANTE

**Prof. Geol. Lamberto Griffini**

20149 MILANO - via E. Pagliano, 37 - tel.(02) 61298369  
fax (02) 61296490 - E-Mail: griffinil@tin.it

Prof. Ing. ALESSANDRO PAOLETTI  
Dott. Ing. GIOVANNI BATTISTA PEDUZZI

CONSULENTI:

ASPETTI NATURALISTICI E VEGETAZIONALI :  
Dott. Agr. GIANPAOLO GUZZETTI

NOME

FIRMA

DATA

REDAZIONE

ALTAIR

VERIFICA

G.B. Peduzzi

APPROVAZIONE

A. Paoletti

TIPOLOGIA

PD

COMMITTENTE

122

COMMESSA

06/03

DOCUMENTO

RG

NUMERO

B.05.01

SCALA:

-

## INDICE

1. PREMESSA.....	1
2. ANALISI DEGLI EVENTI FRANOSI.....	3
2.1 GENERALITÀ.....	3
2.2 FRANA ZONA A ED APPENDICE ORIENTALE AV.....	4
2.2.1 Descrizione generale .....	4
2.2.2 Evoluzione della frana dal 1987 ad oggi .....	7
2.2.3 Analisi dei dati rilevati alla rete di monitoraggio in zona frana “A” .....	11
2.3 FRANA ZONA B.....	15
2.3.1 Generalità .....	15
2.3.2 Osservazioni eseguite alla rete distometrica.....	18
2.4 DISSESTI ZONE C, D ED E .....	18
3. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ .....	20
3.1 GENERALITÀ.....	20
3.2 FRANA “A” PRINCIPALE .....	21
3.2.1 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica.....	21
3.2.2 Verifiche di stabilità .....	39
3.3 SPARTIACQUE CON IL T.ARCOGLIASCO .....	42
3.3.1 Caratterizzazione Geotecnica e Geomeccanica.....	42
3.3.2 Verifiche di stabilità .....	42
3.4 FRANA B.....	43
3.4.1 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica.....	43
3.4.2 Verifiche di stabilità .....	45

## **RELAZ. GEOTECNICA E ANALISI DI STABILITÀ DEI VERSANTI**

### **1. PREMESSA**

La presente relazione riguarda l'analisi delle caratteristiche dei movimenti franosi principali della media e bassa Val Torreggio, eseguita definendo sia i parametri geotecnici e geomeccanici fondamentali degli ammassi, sia i meccanismi di franamento che si sono sviluppati nel corso dell'evento alluvionale del 1987 e la loro possibile evoluzione nelle condizioni attuali e in quelle di progetto.

Allo scopo di analizzare la possibile evoluzione dei dissesti si è proceduto, innanzitutto, ad una attenta analisi dei dati disponibili circa le misure effettuate ai diversi sistemi di monitoraggio strumentale installati a partire dal 1988 ad oggi, i risultati delle indagini geognostiche effettuate (campagna di sondaggi ed indagini geofisiche del 1987 – 1988 e risultati delle indagini 2006 solo parzialmente completate), i dati di rilievi e misure originali effettuate dagli scriventi nella zona sin dal giugno 1987 – ossia poche settimane prima dell'evento parossistico del luglio dello stesso anno. In questo modo si sono potuti elaborare modelli geometrici e geotecnici dei fenomeni franosi attendibili e basati quanto più possibile su dati oggettivi.

Benchè la mole di dati l.s. disponibile sia notevole in quantità e qualità, in fase di progettazione preliminare si è evidenziata la necessità di studi di approfondimento, soprattutto riguardanti le caratteristiche idrogeologiche, geotecniche e geomeccaniche e stratigrafiche, allo scopo di verificare le ipotesi di progetto ed i modelli geotecnici elaborati. Allo stato attuale sono stati

completati i rilevamenti di superficie (rilievi di dinamica geomorfologica, rilievi geomeccanici di dettaglio, rilievi delle sorgenti), mentre le indagini geognostiche e l'installazione di nuova strumentazione geotecnica sono ancora in corso e, quindi, sono disponibili solo parzialmente; in ogni caso, i dati non ancora acquisiti non sono indispensabili ai fini della progettazione definitiva ma saranno necessari per la definizione di dettaglio delle caratteristiche dimensionali degli interventi progettati.

Le analisi delle condizioni di stabilità nelle diverse fasi di evoluzione (stato al momento del collasso, stato attuale e stato di progetto) sono stati condotti mediante l'utilizzo di una base topografica realizzata mediante una ripresa aerofotogrammetrica del bacino, appositamente eseguita, a cura del raggruppamento di progettazione, in data 11 ottobre 2001 con restituzione cartografica in scala 1:1'000; ciò ha consentito il paragone con le analoghe cartografie reperite e riferite alle situazioni ante 1987, post 1987 e al 1990 e pertanto una raffinata interpretazione degli eventi succedutesi nel tempo e dei fenomeni geodinamici in atto. Questa nuova cartografia ha permesso, inoltre, l'elaborazione di analisi a ritroso (back-analysis) dei fenomeni franosi e, quindi, la valutazione dei parametri geotecnici caratteristici che hanno governato i fenomeni di frana, nonché l'analisi delle possibili evoluzioni dei dissesti, consentendo di sviluppare diversi scenari di pericolosità e collasso.

## **2. ANALISI DEGLI EVENTI FRANOSI**

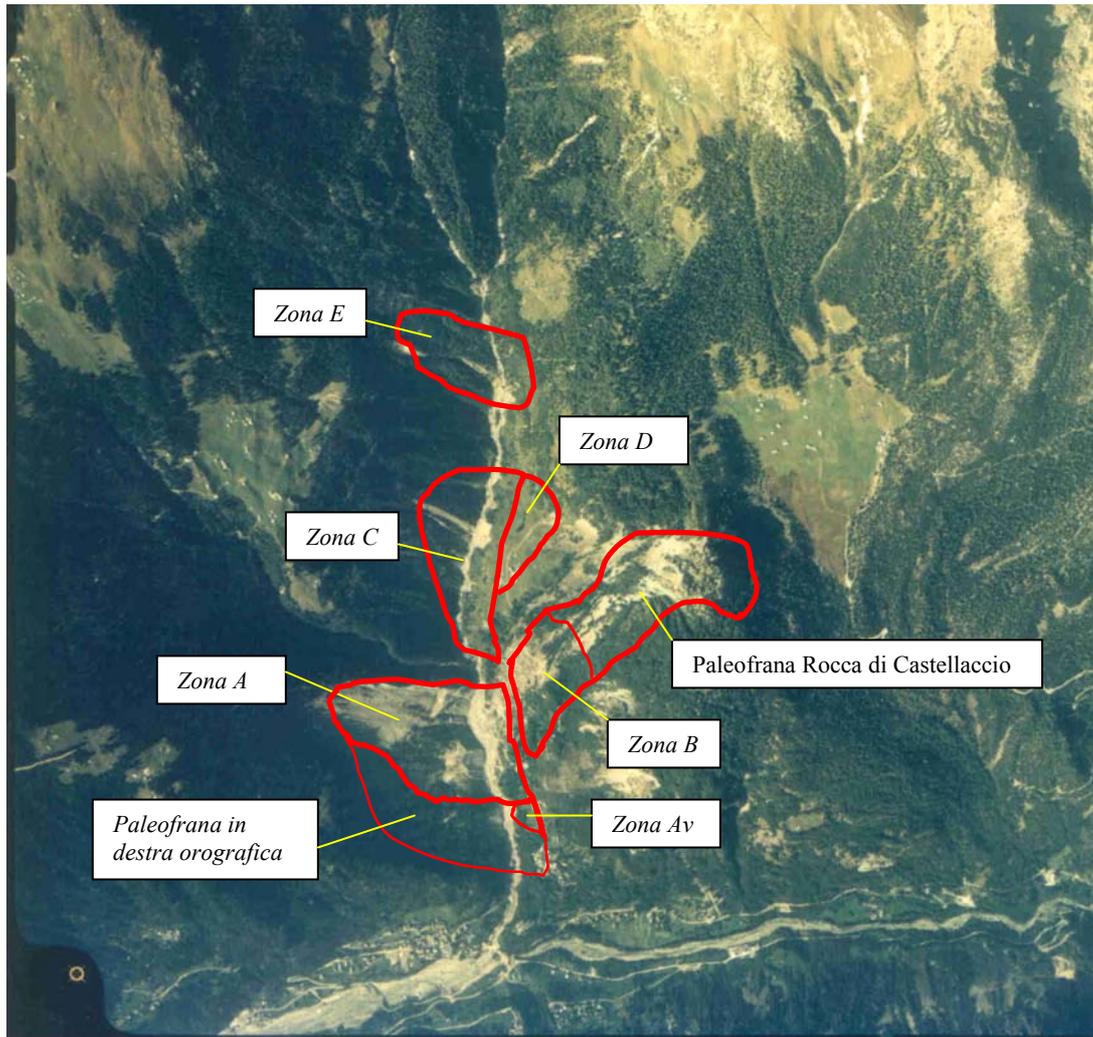
### **2.1 GENERALITÀ**

Di seguito vengono descritti in dettaglio i principali movimenti franosi che interessano la valle del Torreggio; nella descrizione verrà utilizzata la medesima nomenclatura utilizzata nella documentazione Regionale, con la ulteriore suddivisione della frana , cosiddetta “A” – ossia della frana principale in destra idrografica – in una zona “A” propriamente detta, corrispondente alla porzione di paleofrana interessata dal collasso del 1987, ed una zona “Av” corrispondente alla propaggine orientale della frana “A”, mobilizzatasi a partire dal 1988 e collassata nel 1991.

Nella foto aerea che segue sono schematicamente indicate le diverse zone, ossia:

- frana A in destra idrografica con l’appendice di valle Av mobilizzatasi nel 1988;
- frana B in sinistra e ad entrambe i lati dell’abitato di Masoni;
- frana C in destra idraulica a monte dell’Arcogliasco;
- frana D in sinistra a fronte frana C;
- frana E in loc. Acquabianca in destra e sinistra.

Figura 1 - Aree in frana



## 2.2 FRANA ZONA A ED APPENDICE ORIENTALE AV

### 2.2.1 Descrizione generale

Si tratta della grande paleofrana in sponda destra idrografica della Val Torreggio, con piede in fondovalle lungo l'alveo del torrente Torreggio nel tratto compreso tra il T. Arcogliasco ad Ovest e quota 900 circa ad Est; la sommità del coronamento della frana attuale è situata circa a quota 1'560 m s.m.

**Figura 2 - Panoramica della Frana “A” (foto del 01\_06\_2006)**



La paleofrana è ben definita nei suoi contorni dai lineamenti tettonici principali della zona (cfr. Relazione Geologica – atto B.03.01); in particolare la Linea tettonica Val Dagua-Scermendone e le sue vicarianti sono tutte orientate con direzione ovest-est e lungo questi allineamenti si sono impostati sia il corso del T.Torreggio ed il piede della frana, sia i suoi limiti superiori, sia ancora, alcuni significativi allineamenti posti nella porzione medio-superiore della nicchia.

Tra questi, sono ben evidenti:

- l’allineamento tettonico che delimita il ripiano morfologico di Braccia del Maulino a q. 1'350 m s.m. circa e che costituisce il coronamento della porzione orientale della frana;

- il brusco cambio di direzione del T.Arcogliasco circa a q. 1'300 m s.m..

Anche i fianchi della nicchia di frana si sviluppano secondo allineamenti tettonici minori disposti con direzione circa NordNordEst-SudSudOvest.

La paleofrana è, con ogni probabilità, da attribuire ad un fenomeno gravitativo profondo che si è facilmente impostato su di un substrato roccioso particolarmente debole costituito da gneiss granitici o granodioritici (Ortogneiss di Monte Canale) e paragneiss filladici; entrambi i litotipi sono frequentemente cataclastici o, comunque, intensamente fratturati.

**Figura 3 - Affioramento dell'ammasso roccioso in prossimità del coronamento di frana A: si noti l'intenso stato di fratturazione, connesso anche alla presenza di una piega a basso raggio**



L'intenso stato di fratturazione è stato confermato dai risultati dei sondaggi geognostici eseguiti nel 1988 che mostrano potenti spessori di rocce con valori

di RQD inferiori al 20%; in particolare nel sondaggio S2, eseguito a q. l'140 m s.m. sul ripiano che costituisce il principale corpo alloctono della paleofrana, sono stati perforati complessivamente 113,5 m di cui 23,5 m di depositi sciolti eterometrici con ciottoli e trovanti in matrice sabbiosa, quindi, altri 71 m (94,50 m da p.c.) di ammasso roccioso estremamente fratturato con RQD variabile tra 0 e 20% circa ed, infine, 9 metri di a.r. di qualità da discreta a buona con RQD compreso tra 45% e 90%.

### **2.2.2 Evoluzione della frana dal 1987 ad oggi**

Come mostrato nella fotografia che segue (Figura 4) ripresa da uno degli scriventi nel giugno del 1987, ossia prima del collasso del luglio successivo, il grande accumulo che costituisce il gradino morfologico di quota l'170÷l'200 m s.m. era già presente, all'incirca nella posizione attuale, precedentemente all'evento del luglio 1987. Si tratta, pertanto, di un grosso corpo alloctono, relitto della paleofrana originaria, costituito in parte anche da roccia molto fratturata, ricoperto da un boschetto di abeti; come si può osservare dalla fotografia, l'attuale nicchia della frana A, benché ricoperta quasi completamente da vegetazione – più giovane di quella circostante – era già ben individuabile.

Questo accumulo era significativamente più grande di quello residuo dopo l'evento del luglio '87, così come si può rilevare sia dalla documentazione fotografica (Figura 4 e Figura 5) sia dalla sovrapposizione dei documenti cartografici precedenti e successivi alla frana (cfr. Tav. B.05.04 – Sezione A1); il volume mancante dal “gradino relitto” tra lo stato ante frana '87 e lo stato attuale può essere stimato in almeno 1,5 milioni di m<sup>3</sup>.

Figura 4 - Zona A, giugno 1987

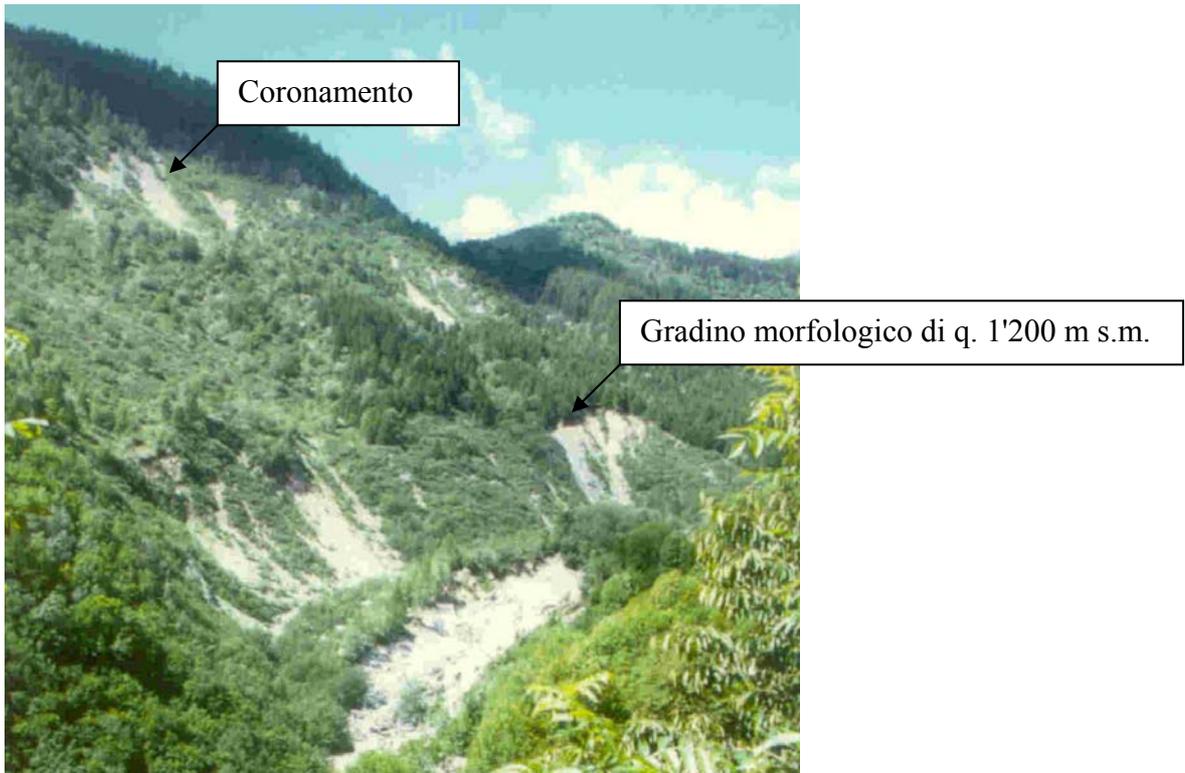


Figura 5 - Zona A – foto del 08.10.2001



Questo aspetto del meccanismo di franamento è particolarmente significativo per la previsione della possibile evoluzione futura del dissesto e, quindi, per la progettazione di opere coerenti con la reale pericolosità dell'area.

Si possono sottolineare i seguenti aspetti principali relativi all'evento del luglio 1987:

- la frana principale si è sviluppata per erosione al piede, da parte del T.Torreggio in piena, del “gradino relitto”; questo è collassato, con un movimento di scivolamento lungo il preesistente piano di movimento della paleofrana, andando a sbarrare il corso del Torreggio. Come detto, il volume di materiale franato – soltanto da questa zona - e poi eroso e trasportato violentemente a valle dal torrente, è stimabile in circa 1,5 milioni di m<sup>3</sup>;

**Figura 6 - Trasporto in massa del 19 luglio 1987 attraverso l'abitato di Torre S. Maria**



- nella parte superiore della nicchia della paleofrana si è verificato il crollo di porzioni di ammasso roccioso che costituivano il vecchio coronamento, con conseguente arretramento dello stesso; i materiali

franati hanno percorso la nicchia di frana esistente erodendo e trasportando verso valle i depositi superficiali, secondo un meccanismo di valanga di roccia (Rock fall avalanche). Questo fenomeno si è sviluppato in episodi ripetuti e non nella sola fase parossitica dell'evento del 1987 e, nel suo complesso – dal 1987 ad oggi – ha mobilizzato volumi di roccia e detrito stimabili in circa 250'000÷300'000 m<sup>3</sup> che, tuttavia, si sono depositati in gran parte sulla contropendenza appena a monte del “gradino relitto”. È importante sottolineare che i crolli in zona coronamento hanno realizzato una riprofilatura naturale del pendio eliminando molte delle asperità e corpi aggettanti che preesistevano (cfr. ad esempio le Sezioni A1 ed A2 in Tav. B.05.04 allegata). Peraltro, le ultime rilevazioni mostrano ancora un modesto arretramento di alcune porzioni del limite del coronamento principale, dietro al quale sono visibili trincee e contropendenze che indicano la possibilità di un'ulteriore evoluzione retrograda;

- la circolazione idrica sotterranea è governata da una rilevante alimentazione a monte del coronamento verso la nicchia di frana. Nella zone di coronamento e, soprattutto, nella zona di Braccia del Mulino sono state rilevate alcune sorgenti, allineate secondo i trend strutturali principali, che nei periodi di maggiore piovosità forniscono portate rilevanti. Anche nella parte occidentale della frana vi sono emergenze d'acqua ben visibili che, con ogni probabilità, sono alimentate direttamente dal T.Arcogliasco; queste acque permeano attraverso lo sperone che divide la nicchia di frana dall'impluvio dell'Arcogliasco,

probabilmente secondo zone cataclastiche corrispondenti ai lineamenti tettonici di cui si è detto (in particolare l'allineamento che devia bruscamente l'alveo dell'Arcogliasco a q. 1'300 m s.m. circa).

**Figura 7 - Trincea di trazione a q. 1590 m s.m.**

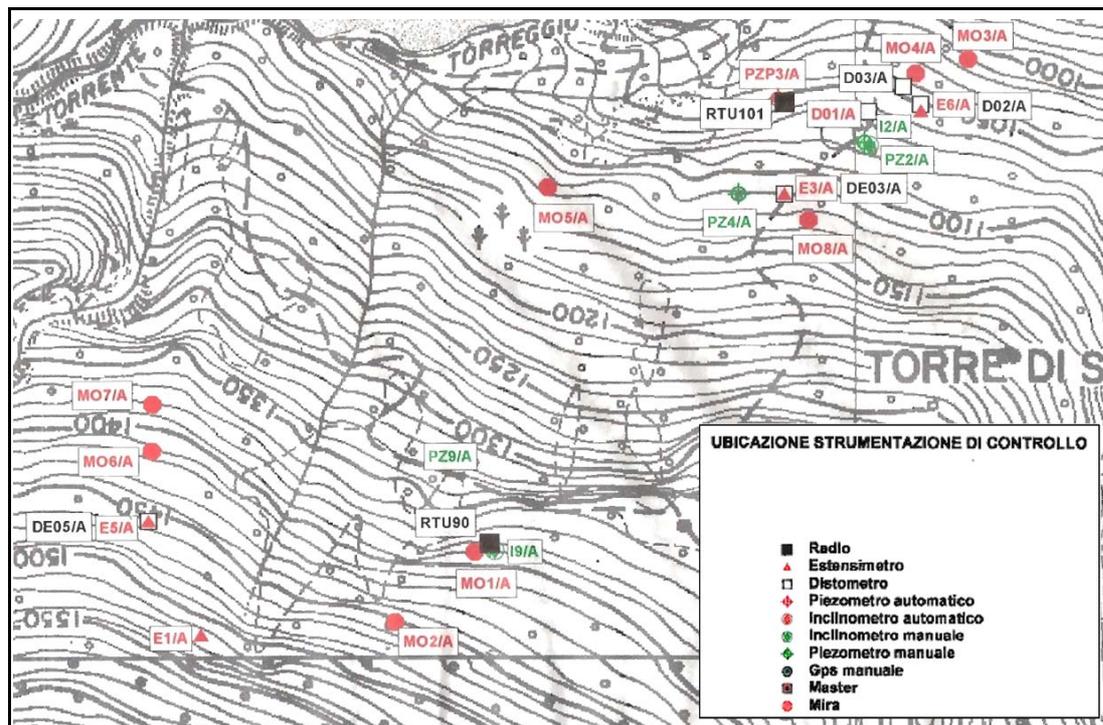


### **2.2.3 Analisi dei dati rilevati alla rete di monitoraggio in zona frana “A”**

#### **2.2.3.1 Generalità**

L'analisi è riferita agli strumenti che risultano più significativi per descrivere l'evoluzione del dissesto; si sono considerati i dati disponibili sino al 2005. Nello schema planimetrico riportato di seguito è indicata l'ubicazione degli strumenti installati nella zona di frana “A”.

Figura 8 - Schema planimetrico rete monitoraggio frana "A"



### 2.2.3.2 Osservazioni eseguite alla rete piezometrica

I dati relativi alla rete piezometrica, hanno evidenziato la presenza modelli di circolazione idrica sotterranea diversi per le diverse aree, che, pertanto, non sono tra loro correlabili, se non a livello strettamente locale. Solo con le successive misure, ancora in corso, si potrà elaborare uno schema di circolazione idrica sotterranea realistico. Allo stato attuale i dati rilevati sono stati utilizzati solo per la verifica delle condizioni di stabilità nelle condizioni di massima saturazione pregressa.

### 2.2.3.3 Osservazioni eseguite alla rete estensimetrica.

Per l'analisi dei dati sono stati considerati soltanto gli estensimetri che mostrano un trend deformativo non influenzato da fattori locali, ossia:

- l' estensimetro E/1A, ubicato a monte del coronamento della nicchia

principale;

- l'estensimetro E5/A posizionato sulla parete a quota 1'450 m s.l.m. nel fianco destro della frana.

Il grafico relativo alle deformazioni cumulate totali relative al periodo 2000-2005 (Figura 9) mostra che l'estensimetro E1/A non ha subito spostamenti significativi fino all'autunno del 2002, ha infatti registrato in 3 anni movimenti di circa 12 mm, mentre nel triennio successivo ha subito spostamenti dell'ordine di circa 100 mm. L'estensimetro E5/A (Figura 10) ha invece evidenziato un movimento progressivo nel corso del quinquennio, senza picchi significativi se non un aumento delle deformazioni nella seconda metà del mese di novembre del 2002, per uno spostamento complessivo pari a circa 360 mm.

**Figura 9 - Grafico degli spostamenti dell'estensimetro E1/A nel periodo 2000 - 2005**

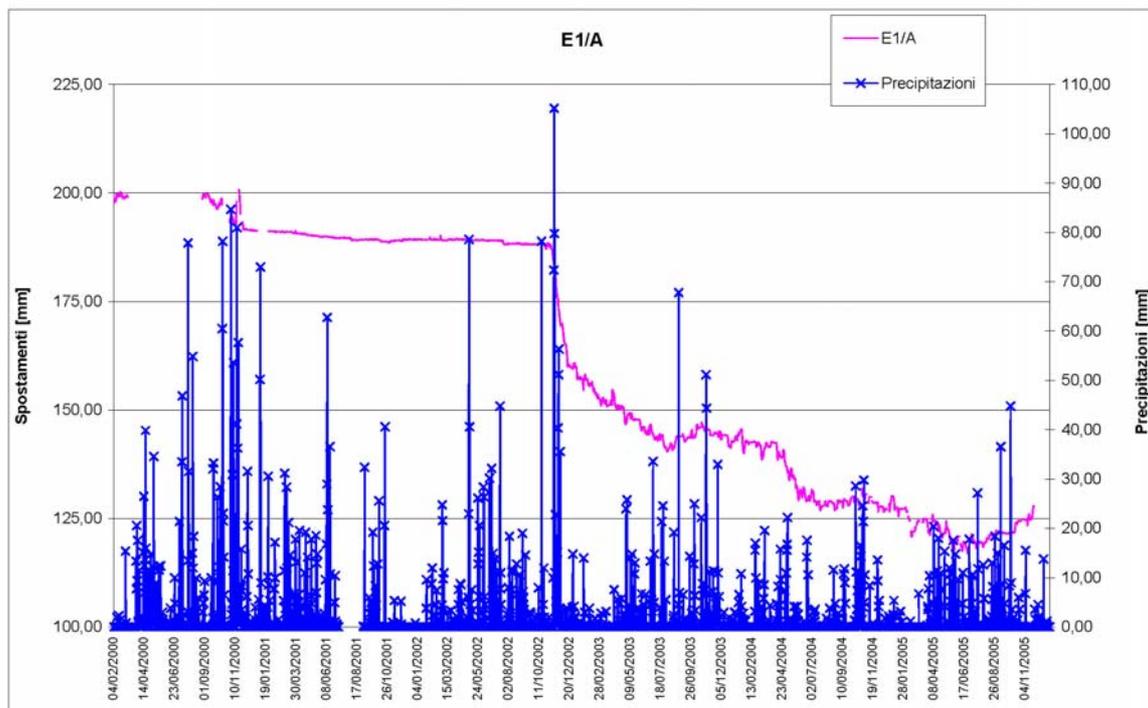
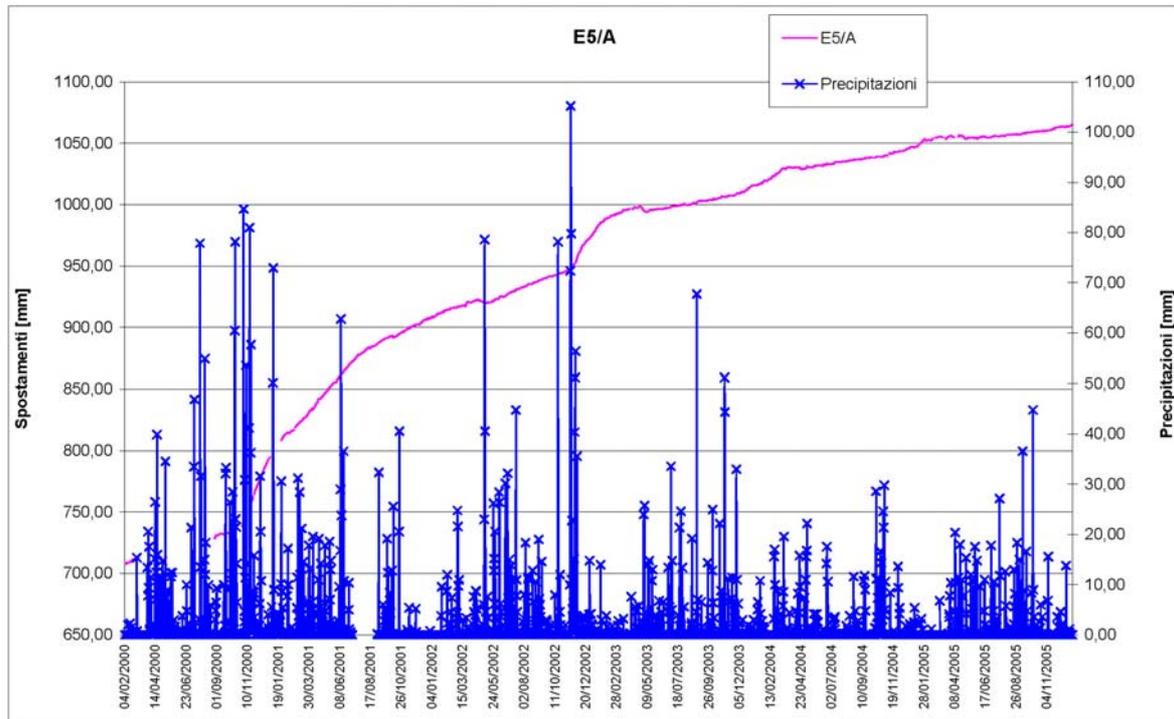


Figura 10 - Grafico degli spostamenti dell'estensimetro E5/A nel periodo 2000 - 2005



#### 2.2.3.4 Osservazioni eseguite alla rete distometrica.

L'analisi relativa alla rete distometrica è stata effettuata sugli strumenti D1/A, D2/A, D3/A, tutti nella parte bassa dell'area e a valle del "gradino relitto" (zona frana AV); il distometro DE3/A, ubicato nella parte sommitale del gradino relitto sempre nella parte Est e lo strumento DE5/A nella zona di coronamento verso ovest.

Tutti i quattro distometri posti in zona Av (D1/A, D2/A, D3/A), o comunque ad est del canalino che delimita il gradino relitto (DE3/A), mostrano deformazioni complessive cumulate dal settembre 2002 al dicembre 2005, comprese tra 8 e 30 mm con un gradiente compreso tra 2.4 e 9.2 mm/anno (per un raffronto si ponga attenzione al fatto che i grafici allegati hanno scala verticale differenziata in funzione delle misure complessive). Le deformazioni sembrano

seguire un andamento stagionale sostanzialmente correlato alle precipitazioni con fasi di aumento delle deformazioni e fasi di regresso; solo per il distometro D3/A si nota una progressiva diminuzione degli spostamenti (raccorciamento delle letture). Nel complesso, comunque, le osservazioni indicano per questa zona e per la limitrofa zona di frana AV una sostanziale stabilizzazione dei movimenti conseguente alle opere già eseguite, con solo locali assestamenti.

Il distometro DE5/A, situato in zona coronamento, indica che le deformazioni di maggiore entità si sono sviluppate nel periodo 2000÷2002 con complessivi 238 mm ed un gradiente pari a circa 95 mm/anno, mentre nel successivo periodo settembre 2002 – dicembre 2005 gli spostamenti cumulati sono pari a 157 mm cui corrisponde un gradiente di 48 mm/anno.

Come si può osservare, benché si stia producendo una progressiva diminuzione degli spostamenti, il gradiente deformativo, in zona coronamento, rimane ancora rilevante.

## **2.3 FRANA ZONA B**

### **2.3.1 Generalità**

La zona si trova in sponda sinistra del Torreggio e costituisce la porzione inferiore della grande paleofrana di Rocca di Castellaccio.

Il dissesto coinvolge l'accumulo di detrito della paleofrana ed è sufficientemente conosciuto nei suoi caratteri generali, grazie alle indagini eseguite, soprattutto a partire dall'evento del 1987.

La frana si è rimobilizzata nel periodo 1987÷1993, con evidenziazione di una ampia frattura di tensione a q. 1'280 m s.m. circa e fenomeni di basculamento

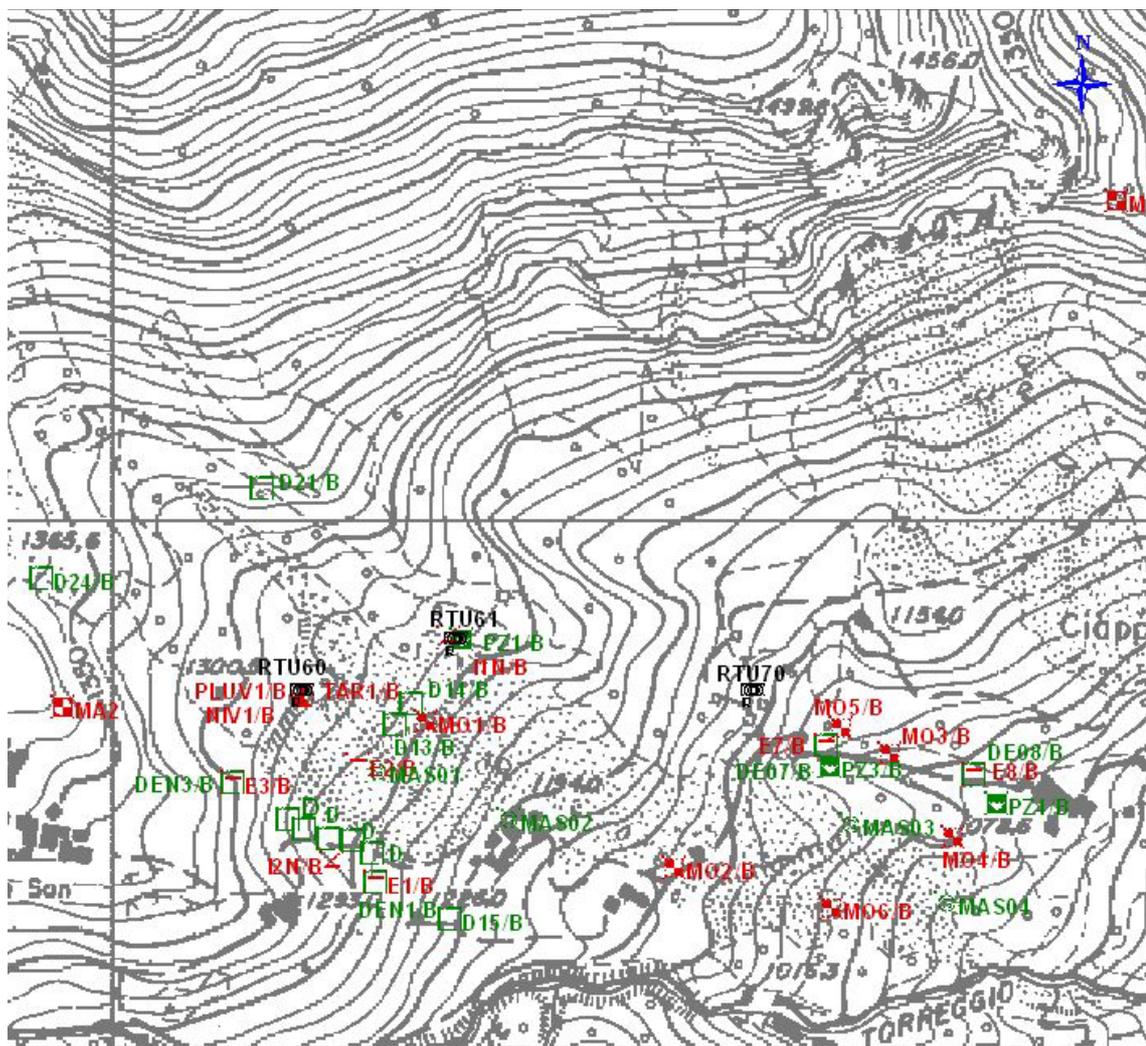
verso monte evidenziati dalle fratture presenti nelle baite e dai movimenti registrati agli inclinometri.

Si tratta, come detto, di un movimento progressivo e lento che occasionalmente, per fattori esterni (principalmente la saturazione dei terreni in occasione di prolungate precipitazioni piovose), viene accelerato; i dati del sistema di monitoraggio indicano deformazioni locali anche dell'ordine di alcuni metri all'anno.

Gli estensimetri presi in considerazione, ad oggi funzionanti sono i seguenti: EN1/B, EN2/B, EN3/B, E7B ed E8B, la cui ubicazione è riportata nello stralcio della seguente Figura 11.

Tutti gli strumenti mostrano deformazioni graduali e continue, con un picco successivo alle piogge concentrate dell'autunno del 2002; tuttavia l'entità del movimento è significativamente diversa: mentre gli strumenti E7/B, E8/B (ubicati nella zona più a valle verso Ciappanico e al margine sinistro idrografico dell'area in frana) mostrano deformazioni comprese fra 136 e 167 mm nei sei anni considerati, con un gradiente compreso a 23 e 28 mm/anno; gli strumenti EN1/B ed EN3/B (posizionati nella zona di monte ed al margine destro dell'area in frana) registrano spostamenti rispettivamente di 786 e 857 mm nello stesso periodo, con un gradiente rispettivamente di 65.5 mm/anno e 71.45 mm/anno; nella stessa zona si trova l'estensimetro EN2/B che, tuttavia, mostra spostamenti nettamente inferiori, pari a 203 mm complessivi, pari ad un gradiente di 17 mm/anno.

Figura 11 - Schema planimetrico rete monitoraggio frana “B”



Le misure mostrano, a parte anomalie locali come quella di EN2/B, un sostanziale movimento progressivo più accentuato nella parte sommitale che in quella inferiore.

La direzione di movimento principale della massa detritica segue, sostanzialmente, l’asse della paleofrana che è orientato secondo una direzione convergente, con un angolo di circa 30°, verso l’impluvio del Torreggio. Questa direzione prevalente subisce, al suo fronte, espansioni laterali che deviano le direzioni locali e giustificano il rallentamento rispetto alla porzione

sommitale.

Gli scavi eseguiti per la cava di prestito delle opere di bonifica realizzate dopo il 1987, sembrano aver comportato una leggera deviazione della direzione di movimento che, attualmente risulta più divergente rispetto al torrente. Questa osservazione, tuttavia, manca di riscontri oggettivi e dovrà essere accertata con lo scopo di verificare la reale pericolosità di questo fenomeno franoso.

Attualmente, la frana è considerata quiescente ma con possibilità reale di riattivazione in seguito all'azione delle acque sotterranee che, oltre a saturare i terreni e ad innalzare il livello piezometrico comportano anche la lubrificazione dei livelli deboli di argilla e limo argilloso che costituiscono i piani preferenziali di movimento.

### **2.3.2 Osservazioni eseguite alla rete distometrica.**

L'analisi relativa alla rete distometrica è stata effettuata sugli strumenti D1/B, D2/B, DEN1/B, DEN3/B, DE7/BDE8/B, D13B, D14/B, D15/B, D16/B, D17/B, D21/B, D22N1/B, D24/B, D25/B e D26/B.

L'analisi dei dati relativi al periodo 2000÷2005 indica spostamenti gradualmente nel tempo, di entità estremamente diversa, variabile fra 50 mm e 1000 mm nel periodo considerato (6 anni). Solo gli strumenti D2/B e D17/B mostrano spostamenti discontinui con rientri della deformazione con valori assoluti pari a circa 30 mm nei sei anni considerati.

## **2.4 DISSESTI ZONE C, D ED E**

I dissesti che interessano queste aree hanno carattere prevalentemente corticale e si sviluppano sotto forma di colate detritiche che si orientano secondo la

massima pendenza dei versanti con andamento pressoché rettilineo.

I fenomeni sono – o sono stati – in genere innescati da processi di erosione al piede e, in molti casi tendono a stabilizzarsi naturalmente. Ciò è testimoniato, ad esempio nella zona C, dalla ricolonizzazione molto evidente e diffusa da parte delle vegetazione spontanea di tutte le aree interessate dai dissesti del 1987.

Sulla base di queste considerazioni, come detto nei documenti progettuali, si è ritenuto opportuno evitare interventi puntuali e realizzare, solo localmente, opere di protezione dall'erosione superficiale mediante interventi di ingegneria naturalistica.

La scelta progettuale comporta la necessità di un'attenta osservazione dell'evoluzione delle aree ed, eventualmente, di verifiche della potenziale presenza di dissesti di genesi e meccanismi diversi, soprattutto per quanto riguarda la zona C, dove vi sono alcune forme che presuppongono un controllo geostrutturale della dinamica dei versanti.

### **3. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ**

#### **3.1 GENERALITÀ**

Poiché le zone interessate dai fenomeni franosi (frana “A” e sue appendici e frana “B”) sono molto differenti tra loro sia come caratteristiche stratigrafiche sia come caratteristiche geotecniche e, conseguentemente, come meccanismi di franamento, di seguito si descrivono, per ciascuna area omogenea, le caratteristiche geotecniche dei materiali e le verifiche condotte.

In considerazione della complessità dei meccanismi di deformazione e collasso che interessano le diverse aree, tutte le analisi e verifiche sono state condotte implementando una serie di modelli di calcolo alle differenze finite, utilizzando un apposito codice di calcolo (FLAC , Rel 5.0).

Le analisi sono state condotte in condizioni di deformazione piana; i modelli sono generati con elementi a quattro nodi, per ciascuno dei quali si procede alla risoluzione diretta delle equazioni di equilibrio e di moto sino a raggiungere condizioni di equilibrio in termini di tensioni e spostamenti.

Il processo di calcolo comporta le seguenti fasi:

- definizione del modello geometrico e fisico da analizzare (dimensioni e geometria della regione da analizzare, maglia degli elementi costitutivi e numerazione dei nodi ed elementi, condizioni al contorno);
- scelta delle leggi costitutive e dei criteri di resistenza dei materiali;
- definizione dello stato tensionale iniziale;
- elaborazione del modello con variazioni e modifiche delle diverse condizioni da analizzare.

Le calcolazioni sono state condotte adottando un modello di comportamento elasto-plastico ideale con superficie di plasticizzazione definita dalla curva di involuppo alla Mohr-Coulomb.

Le condizioni al contorno sono state definite imponendo:

- alle superfici laterali dei modelli un vincolo agli spostamenti orizzontali (carrelli),
- al limite inferiore l'impedimento a spostamenti in direzione verticale (carrelli)
- agli spigoli inferiori, necessariamente, vincoli agli spostamenti sia verticali che orizzontali (cerniere).

La superficie superiore è stata lasciata libera. I modelli sono stati estesi lateralmente e verticalmente a sufficienza affinché gli effetti dei vincoli imposti al contorno fossero di entità trascurabile per le zone di interesse.

## **3.2 FRANA “A” PRINCIPALE**

### **3.2.1 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica**

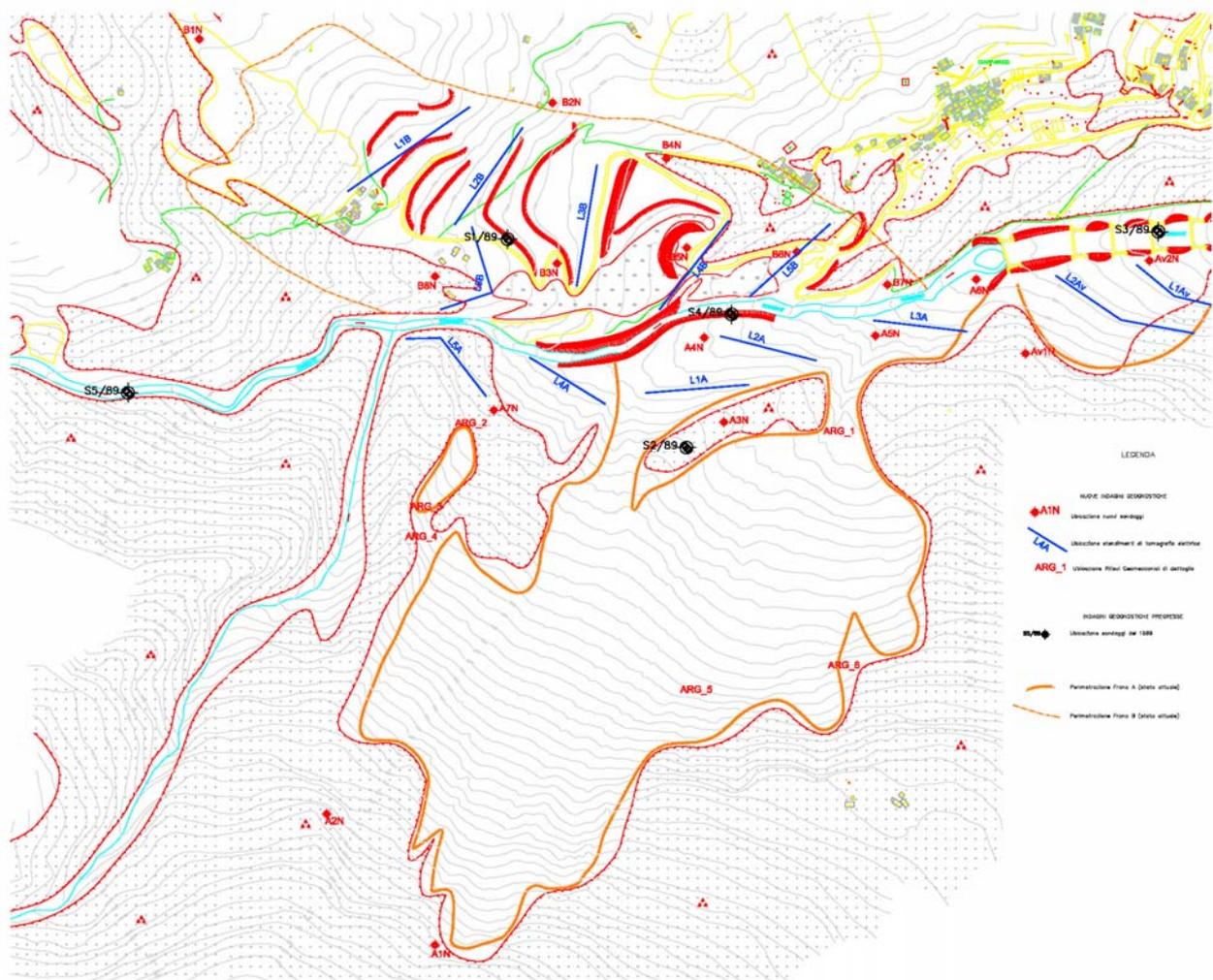
I parametri geotecnici fondamentali necessari per eseguire le analisi numeriche sono stati definiti confrontando i dati ricavati dalle indagini eseguite nel corso delle diverse campagne geognostiche (1989 e 2006 – campagna in corso) con quelli ricavati mediante back-analysis dell'evento franoso del 1987.

A causa della composizione granulometrica, prevalentemente grossolana, le prove di laboratorio eseguite sui terreni sciolti, costituenti i depositi di copertura, sono state condotte su campioni rimaneggiati; per questo motivo le prove meccaniche per la definizione dei parametri di resistenza al taglio di

questi materiali sono state eseguite su provini ricostituiti alla densità naturale e, pertanto, i risultati devono ritenersi sottostimati per l'assenza della frazione granulometrica più grossolana.

Nella schema planimetrico riportato alla pagina seguente è indicata l'ubicazione sia dei sondaggi del 1989 sia le indagini della nuova campagna in corso.

Figura 12 – Ubicazione dei sondaggi e delle indagini



Nella Tabella 1 che segue sono riportati i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui materiali di copertura

**Tabella 1 – Risultati delle prove di laboratorio**

Campione	Profondità	W [%]	$\gamma_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\gamma_{nat}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	$c'$ [kPa]	Frazioni granulometriche caratteristiche					Limiti consistenza	
								C [%]	G [%]	S [%]	M [%]	C [%]	LL [%]	LP [%]
S2 <sub>89</sub> /B	10,3÷10,5	10,4	2,101	2,32	2,680	30	11		52	28	18	2	30,3	
S2 <sub>89</sub> /C	15,8÷16,0	7,2	2,046	2,195	2,626	24	22	7	46	25	20	2	28,8	22
S3 <sub>89</sub> /A	1,0	9,7	1,773	1,945	2,680	36	-		43	34	31	2	27,6	
S3 <sub>89</sub> /B	4,4	13,7	1,826	2,076	2,626	35	-		37	34	26	3	28,2	
S4 <sub>89</sub> /A	1,8÷2,0	4,9	2,221	2,331	2,618	34	31		49	24	23	4	26,4	
S4 <sub>89</sub> /B	5,0÷5,3	11,1	2,063	2,290	2,624	20	3		37	32	26	5	25,9	21
S4 <sub>89</sub> /C	22,7÷23,0	5,1	2,100	2,207	2,682	-	-		60	20	11	1	24,2	

Per quanto riguarda gli ammassi rocciosi, si è proceduto alla caratterizzazione geomeccanica sulla base dei parametri di resistenza della matrice roccia e in base ai risultati di rilievi geomeccanici appositamente eseguiti sui litotipi del substrato (cfr. ubicazione ARG\_nn nello schema planimetrico riportato alla Figura 12). I rilievi geomeccanici di dettaglio sono stati eseguiti secondo la procedura standard proposta dall'ISRM.

Complessivamente sono stati effettuati n.6 rilievi geomeccanici (RGD), i cui risultati di sintesi, insieme alle schede di elaborazione della classificazione RMR89, sono indicati nelle apposite schede riportate di seguito.

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1090 – Margine Est "Gradino Relitto"					
Data	28/07/2004						
RGM n.	1						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss intensamente fratturato e localmente alterato Dimensioni ammasso: 10x10 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 20x20x20 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 4 cm; verticale 7 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W2 Condizioni di umidità dell'ammasso: tracce							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	330/70						
Sc	150/40	>10	14	1.0-2.5	Wd2	9	coesivo discontinuo
K1	120/80	5	30	1.0-2.5	Wd2	10	coesivo discontinuo
K2	320/90	3	25	1.0-2.5	Wd2	10	coesivo discontinuo
K3	40/75	-	-	1.0-2.5	Wd2	-	coesivo discontinuo
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	51 (III – Mediocre)			GSI	51		
							

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1180 – Margine W frana					
Data	09/08/2004						
RGM n.	2						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss a biotite e muscovite. Foliatura millimetrica, leggermente ondulata Dimensioni ammasso: 6x20 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 30x30x30 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 6 cm; verticale 6 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W2 Condizioni di umidità dell'ammasso: tracce							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	090/80						
Sc	184/47	>20	13	>5	Wd2	11	granulare continuo
K1	316/56	5	37,5	>5	Wd2	8	granulare continuo
K2	095/90	5	24	>5	Wd2	10	granulare continuo
K3	010/80	3	15	>5	Wd2	10	granulare continuo
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	43 (III – Mediocre)			GSI	43		
							

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1240 – Margine W					
Data	09/08/2004						
RGM n.	3						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss intensamente fratturato e localmente alterato. Fratturato in blocchi decimetrici; poco alterato Dimensioni ammasso: 15x5 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 30x30x30 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 20 cm; verticale 10 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W2 Condizioni di umidità dell'ammasso: tracce							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	085/80						
Sc	165/55	>15	8	1.0-2.5	Wd2	8	granulare continuo
K1	092/84	5	12	1.0-2.5	Wd2	12	granulare continuo
K2	015/75	5	14	1.0-2.5	Wd2	14	granulare continuo
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	34 (IV – Scadente)			GSI	34		
							

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1280 – Margine W					
Data	09/08/2004						
RGM n.	4						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss a biotite e muscovite, intensamente fratturato e localmente alterato. Dimensioni ammasso: 10x4 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 50x50x50 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 7 cm; verticale 8 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W2 Condizioni di umidità dell'ammasso: tracce							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	020/70						
Sc	138/42	>10	7	1.0-2.5	Wd1	9	granulare discontinuo
K1	296/65	4	12,5	1.0-2.5	Wd1	9	granulare discontinuo
K2	27/75	4	11	1.0-2.5	Wd1	9	granulare discontinuo
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	41 (III – Mediocre)			GSI	41		
							

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1240 – Zona centro-orientale					
Data	10/08/2004						
RGM n.	5						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss grigio verde, intensamente fratturato e localmente alterato. Presenza di livelli quarzosi Dimensioni ammasso: 10x10 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 5x5x2 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 5 cm; verticale 2 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W3 Condizioni di umidità dell'ammasso: umido-stillicidio							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	000/70						
Sc	230/27	>10	4	<1.0	Wd1	7	granulare discontinuo
K1	120/70	10	3	<1.0	Wd1	8	assente
K2	330/75	5	3	<1.0	Wd1	11	assente
K3	030/67	5	8	<1.0		11	assente
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	36 (IV – Scadente)			GSI	39		
							

<b>RILIEVO GEOMECCANICO DI DETTAGLIO</b>							
Committente	REGIONE LOMBARDIA						
Commessa	FRANA di Val Torreggio						
Località	Frana "A"	q. 1230 – Margine Est					
Data	10/08/2004						
RGM n.	6						
Litologia e descrizione geologica generale: Gneiss a biotite e muscovite, intensamente fratturato e localmente alterato. Dimensioni ammasso: 10x40 m Volume roccioso unitario (dimensione e forma): medio 20x30x20 cm Intercetta delle discontinuità misurata su due metri [cm]: orizzontale 10 cm; verticale 8 cm Grado di alterazione dell'ammasso: W3 Condizioni di umidità dell'ammasso: umido-stillicidio							
<b>CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>							
Set	Giacitura	Persistenza	Spaziatura	Apertura	Alterazione	JRC	Riempimento
	[°]	[m]	[cm]	[mm]	[W1-W5]	[0-20]	[tipo]
Fronte	310/80						
Sc	238/26	>40	9	2,5-5,0	Wd3	11	granulare discontinuo
K1	320/88	20	8	2,5	Wd3	8	coesivo discontinuo
K2	110/70	10	7	2,5	Wd3	10	gcoesivo discontinuo
K3	220/87	10	12,5	2,5	Wd3	10	granulare discontinuo
<b>CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIA</b>							
Indice di resistenza al point-load test [MPa] :					-		
Resistenza a compressione monoassiale Co[MPa]					45		
Indice di anisotropia [-] :							
<b>CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO (Bieniawski, 1989)</b>							
RMR <sub>base</sub>	28 (IV – Scadente)			GSI		31	
							

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Comessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Margine E q. 1090  
 Data: lug-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 1

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

		S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
		valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa											45	4,6
RQD	%											67	13,8
Spaziatura	m	0,14	7	0,3	10	0,25	9						7,2
Persistenza	m	10,00	1	5,00	3	3,00	3						1,2
Apertura	mm	1	4	1,5	4	1,5	4						4,0
Rugosità	JRC	9	3	10	3	10	3						3,0
Riempimento	-	dc	2	dc	2	dc	2						2,0
Alterazione	Wn	w2	5	w2	5	w2	5						5,0
												dry RMR 41	
												GSI 51	
Condizioni idriche	-	u	10	u	10	a	15	a	15	a	15		10,0
												BasicRMR 51	
												B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 51	
												Classe di Bieniawski = III	
												Qualità dell'ammasso = mediocre	

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Comessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Margine w q. 1180  
 Data: ago-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 2

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

		S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
		valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa											45	4,6
RQD	%											67	13,7
Spaziatura	m	0,13	7	0,375	10	0,24	9	0,15	5				5,0
Persistenza	m	20,00	0	6,00	2	5,00	3	3,00	3				0,0
Apertura	mm	5	0	5	0	5	0	5	0				0,0
Rugosità	JRC	11	3	8	3	10	3	10	3				3,0
Riempimento	-	cg	2	cg	2	cg	2	cg	2				2,0
Alterazione	Wn	w2	5	w2	5	w2	5	w2	5				5,0
												dry RMR 33	
												GSI 43	
Condizioni idriche	-	u	10	u	10	a	15	a	15	a	15		10,0
												BasicRMR 43	
												B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 43	
												Classe di Bieniawski = III	
												Qualità dell'ammasso = mediocre	

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Commessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Margine w.q. 1240  
 Data: ago-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 3

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

		S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
		valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa											45	4,6
RQD	%											23	3,0
Spaziatura	m	0,08	6	0,12	7	0,14	7						5,9
Persistenza	m	15,00	0	5,00	3	5,00	3						0,5
Apertura	mm	5	0	5	0	5	0						0,0
Rugosità	JRC	8	3	12	5	14	5						3,0
Riempimento	-	cg	2	cg	2	cg	2						2,0
Alterazione	Wn	w2	5	w2	5	w2	5						5,0
												<b>GSI</b>	<b>34</b>
												<b>dry RMR</b>	<b>24</b>
Condizioni idriche	-	u	10	u	10	a	15	a	15	a	15		10,0
												<b>BasicRMR</b>	<b>34</b>

B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 34  
 Classe di Bieniawski = IV  
 Qualità dell'ammasso = scadente

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Commessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Margine w.q. 1280  
 Data: ago-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 4

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

		S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
		valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa											45	4,6
RQD	%											11	3,0
Spaziatura	m	0,07	6	0,125	7	0,11	7						5,6
Persistenza	m	10,00	1	4,00	3	4,00	3						1,2
Apertura	mm	2	4	2	4	2	4						4,0
Rugosità	JRC	9	3	9	3	9	3						3,0
Riempimento	-	dg	4	dg	4	dg	4						4,0
Alterazione	Wn	w1	6	w1	6	w1	6						6,0
												<b>GSI</b>	<b>41</b>
												<b>dry RMR</b>	<b>31</b>
Condizioni idriche	-	u	10	u	10	a	15	a	15	a	15		10,0
												<b>BasicRMR</b>	<b>41</b>

B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 41  
 Classe di Bieniawski = III  
 Qualità dell'ammasso = mediocre

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Comessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Zona centro-orinetale q. 1240  
 Data: ago-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 5

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

	S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
	valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa										45	4,6
RQD	%										0	3,0
Spaziatura	m	0,04	5	0,03	5	0,03	5	0,08	6			5,0
Persistenza	m	10,00	1	10,00	1	5,00	3	5,00	3			1,2
Apertura	mm	0,5	5	1	4	1	4	1	4			4,0
Rugosità	JRC	7	1	8	3	11	3	11	3			1,0
Riempimento	-	dg	4	a	6	a	6	a	6			4,0
Alterazione	Wn	w1	6	w1	6	w1	6	w1	6			6,0
											<b>GSI</b>	<b>39</b>
											<b>dry RMR</b>	<b>29</b>
Condizioni idriche	-	b	7	u	10	u	10	u	10	u	10	7,0
											<b>BasicRMR</b>	<b>36</b>

B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 36  
 Classe di Bieniawski = IV  
 Qualità dell'ammasso = scadente

CLASSIFICAZIONE RMR di BIENIAWSKI (1989)

Committente: REGIONE LOMBARDIA  
 Comessa: Frana "A" Val Torreggio  
 Località: Margine Est q. 1230  
 Data: ago-04

Oggetto: RMR classification  
 ARG: 6

Determinazione di Dry RMR, Basic RMR e GSI

	S		k1		k2		k3		k4		GLOBALE	
	valore	rating	valore	rating(*)								
UCS	MPa										45	4,6
RQD	%										0	3,0
Spaziatura	m	0,09	6	0,08	6	0,07	6	0,125	7			5,6
Persistenza	m	40,00	0	20,00	0	10,00	1	10,00	1			0,0
Apertura	mm	5	0	4	1	4	1	2,5	4			0,0
Rugosità	JRC	11	3	8	3	10	3	10	3			3,0
Riempimento	-	dg	4	dc	2	dc	2	dg	4			2,0
Alterazione	Wn	w3	3	w3	3	w3	3	w3	3			3,0
											<b>GSI</b>	<b>31</b>
											<b>dry RMR</b>	<b>21</b>
Condizioni idriche	-	b	7	u	10	u	10	u	10	u	10	7,0
											<b>BasicRMR</b>	<b>28</b>

B.RMR rappresentativo dell'ammasso = 28  
 Classe di Bieniawski = IV  
 Qualità dell'ammasso = scadente

I parametri geomeccanici di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso sono stati ricavati dalle indagini geostrutturali e dalle risultanze delle prove di laboratorio condotte sui medesimi materiali prelevati in sito. Tutti i dati ricavati sono stati utilizzati congiuntamente in modo da definire le curve di involuppo della resistenza limite sia della "roccia integra" sia dell'ammasso roccioso che costituisce il fronte.

I dati di resistenza e deformabilità disponibili sono stati elaborati per determinare i parametri caratteristici della curva di involuppo di rottura del materiale roccia secondo l'equazione proposta (e ormai universalmente adottata) da Hoek E., Brown E.T che assume la seguente forma generale:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c(m \cdot \sigma_3/\sigma_c + s)^a$$

dove:

- $\sigma_1$  ed  $\sigma_3$       tensioni principali massima e minima
- $\sigma_c$                 resistenza a compressione uniassiale del materiale roccia
- $m, s$  ed  $a$         parametri caratteristici di Hoek e Brown che dipendono dalle caratteristiche della roccia e dell'ammasso roccioso; per la roccia integra i valori di  $S$  ed  $a$  sono delle costanti indipendenti dal tipo e dalle caratteristiche della roccia e sono rispettivamente uguali a:

$$s = 1 ; a = 0,5$$

per cui, per la roccia integra, l'equazione diventa:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c(m \cdot \sigma_3/\sigma_c + 1)^{0,5}$$

I risultati delle elaborazioni sono riportati di seguito.

RGM	Litologia	mi [-]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	B.RMR <sub>(89)</sub> [-]	B.RMR <sub>(89)dry</sub> [-]	GSI [-]
RGM_1	Gneiss	10	45	51	41	51
RGM_2	Gneiss	10	45	43	33	43
RGM_3	Gneiss	10	45	34	24	34
RGM_4	Gneiss	10	45	41	31	41
RGM_5	Gneiss	10	45	36	29	39
RGM_6	Gneiss	10	45	28	21	31

con: **mi** parametro di Hoek & Brown caratteristico della roccia integra

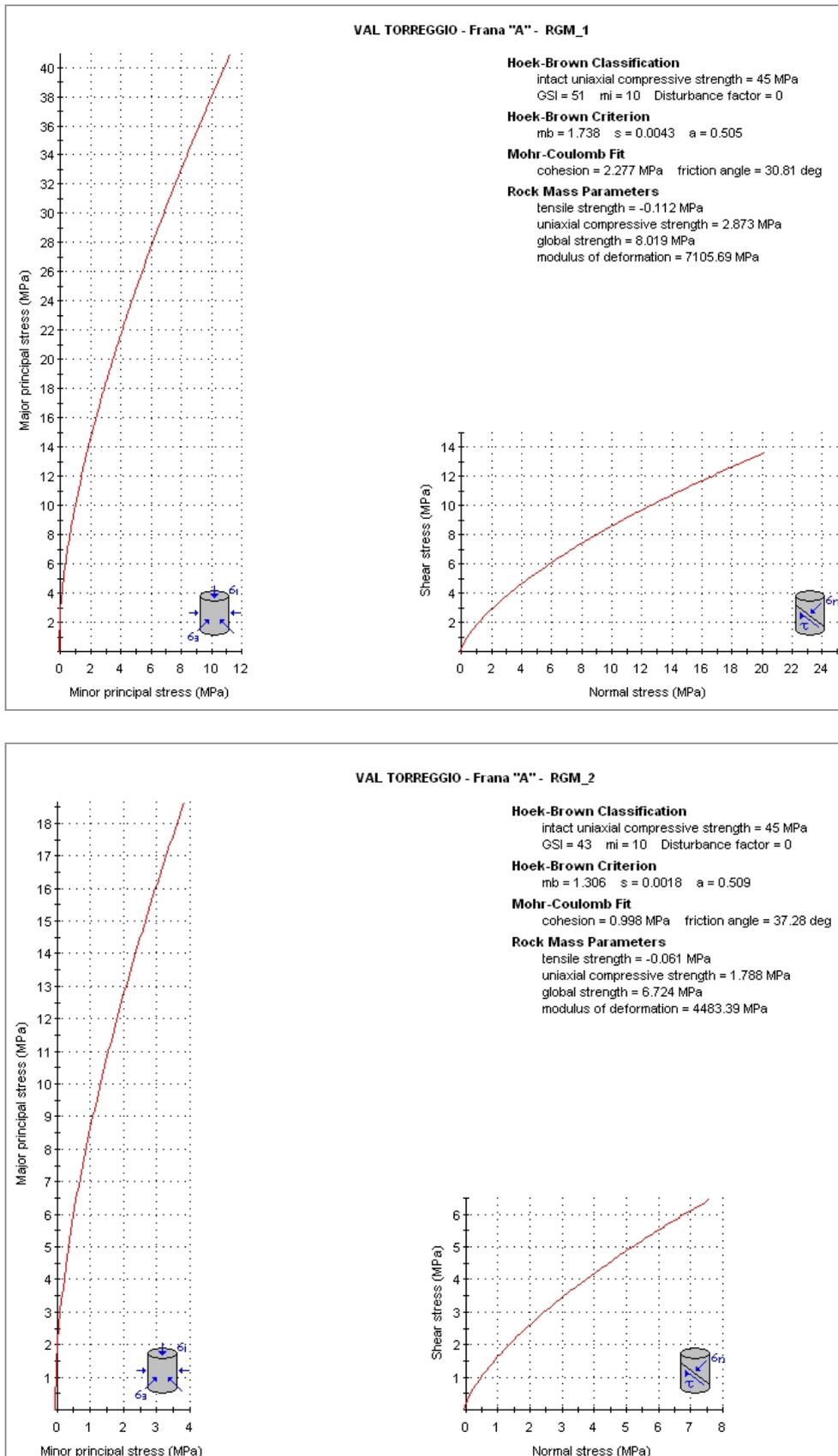
**$\sigma_{ci}$**  resistenza a compressione uniassiale della roccia integra

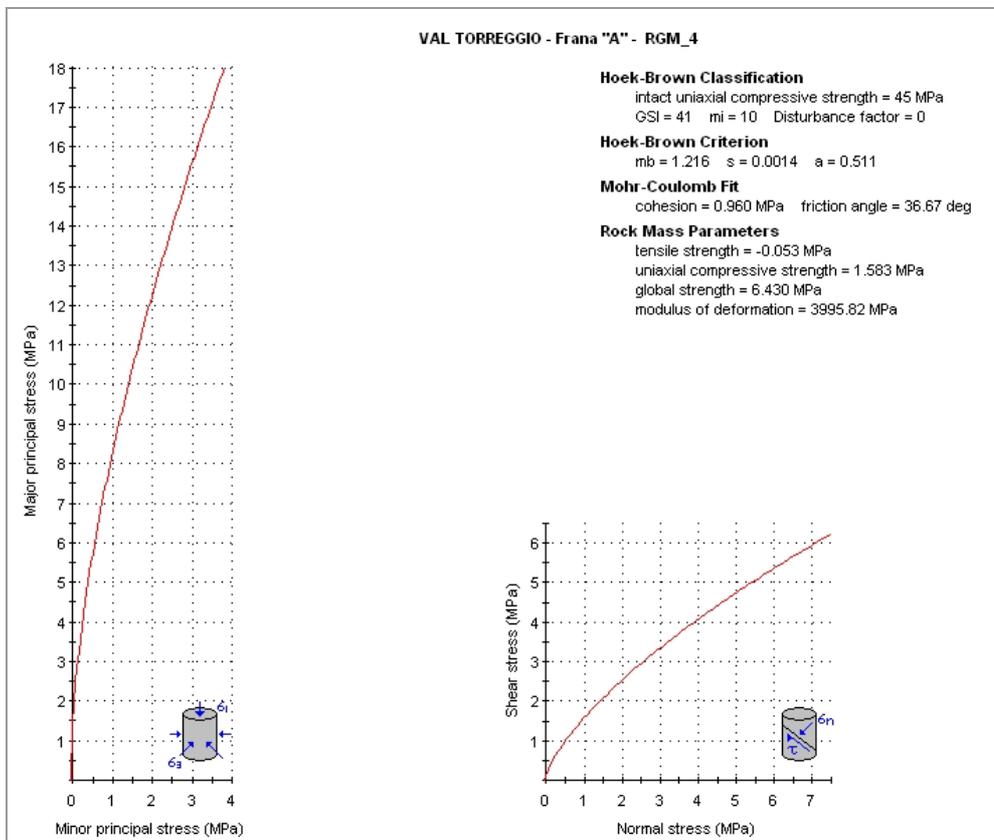
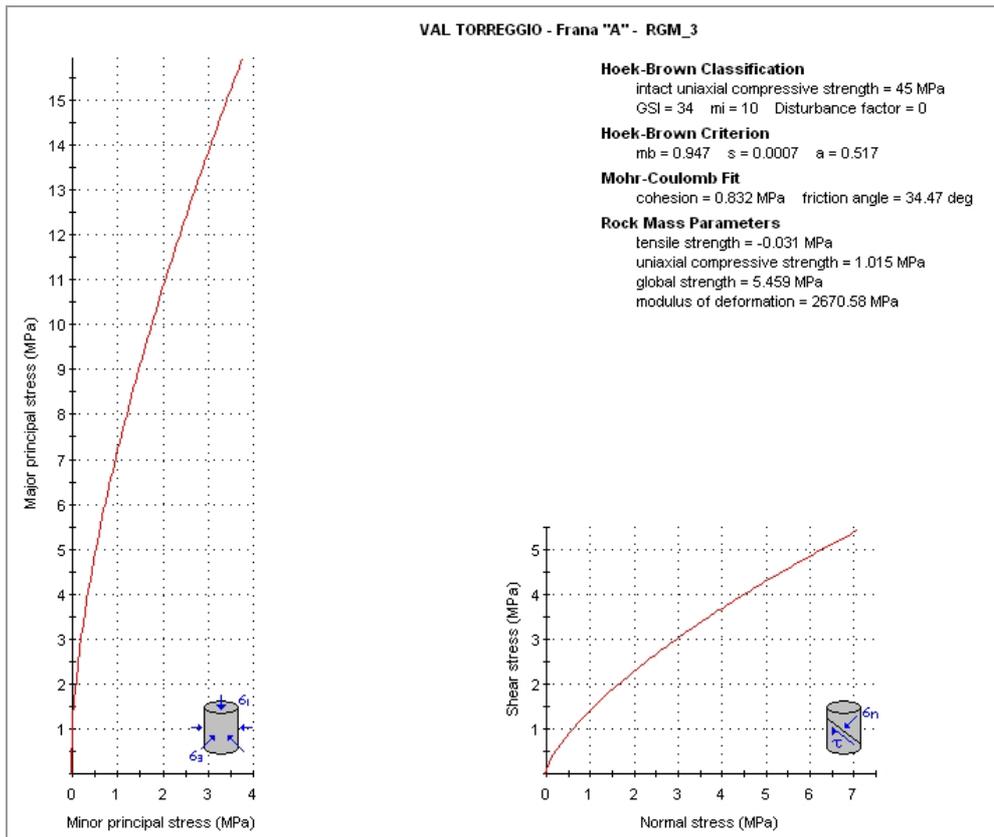
Sulla base dei risultati sopra esposti si è proceduto alla definizione dei parametri geomeccanici relativi all'ammasso roccioso delle zone interessate dal progetto.

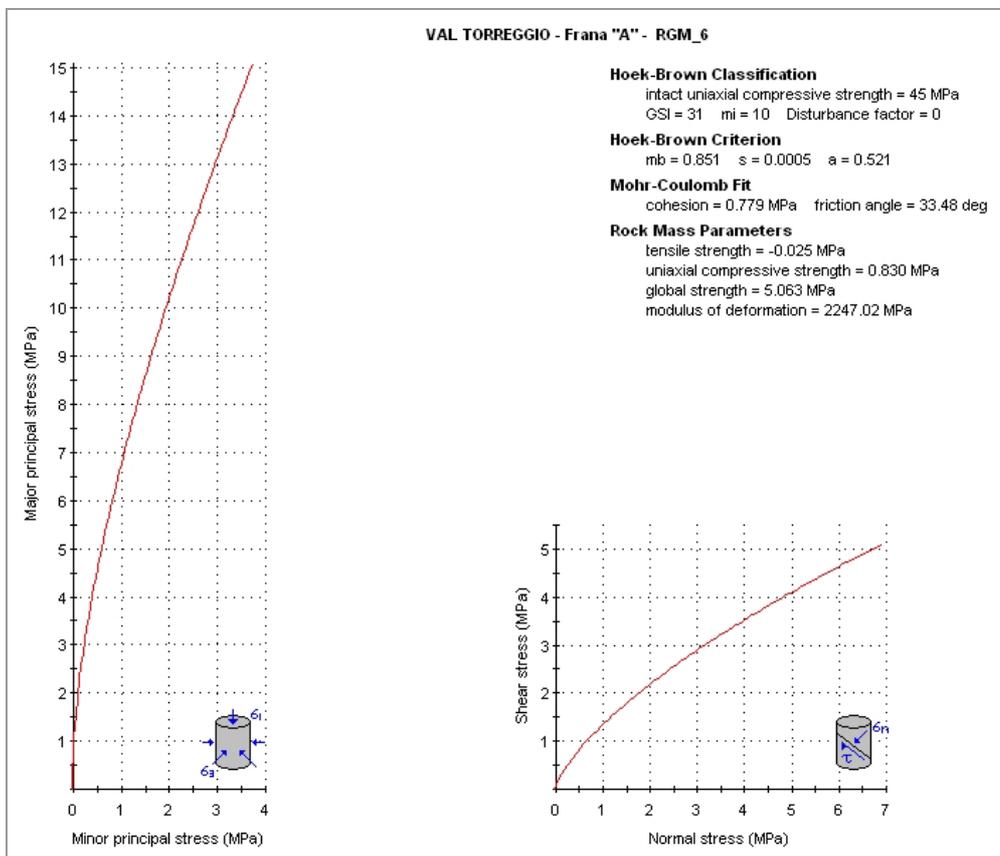
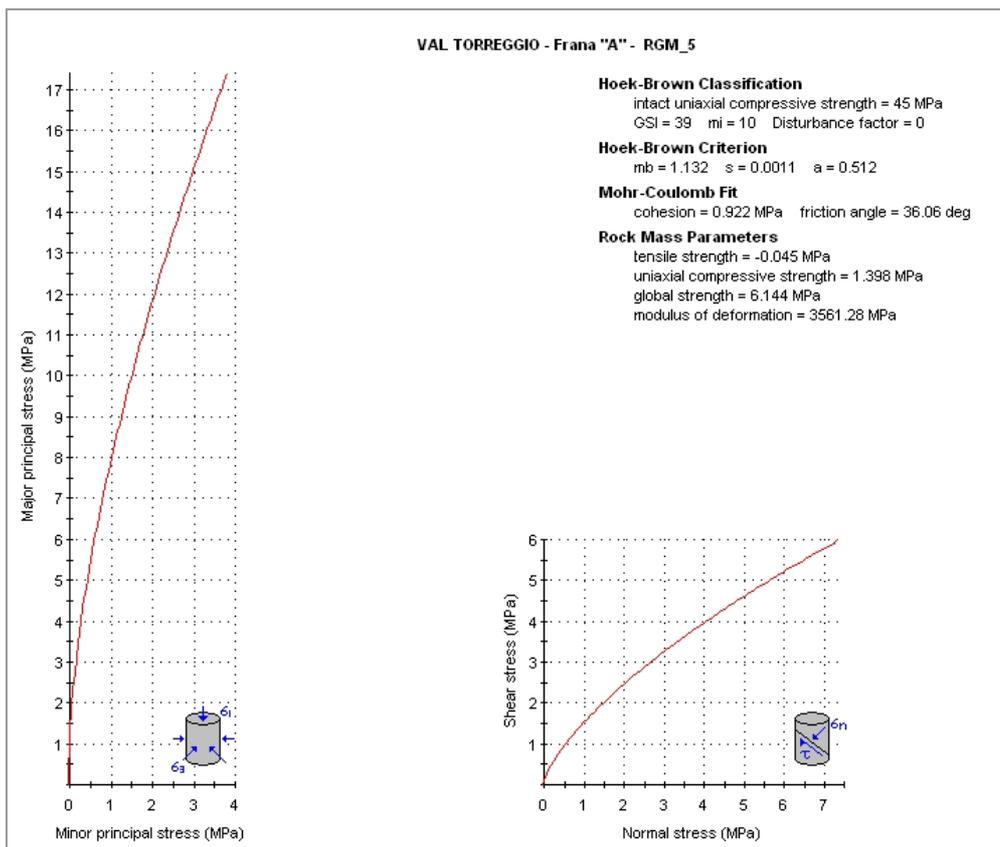
Per la definizione dei parametri d'ammasso si sono utilizzati i valori di qualità di ammasso B.RMR secco e di GSI (Geological Strength Index), ricavati dai rilievi geomeccanici di dettaglio, mediante elaborazione della curva di involuppo della resistenza di ammasso, secondo Hoek & Brown (1980-2000).

Di seguito vengono riportate le curve di involuppo per l'ammasso roccioso.

Figura 13 – Curve di involuppo per l'ammasso roccioso







Dai risultati delle prove e delle elaborazioni sopra descritte si sono, quindi, potuti definire i parametri caratteristici di resistenza e deformabilità delle diverse unità sia per quanto riguarda i parametri relativi alla matrice roccia sia per l'ammasso roccioso, distinto in due diverse facies: facies massiccia (profonda) e facies intensamente fratturata (corticale).

Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori caratteristici e rappresentativi delle diverse unità, così definiti.

I valori indicati sono quelli medi rappresentativi di ciascuna unità litotecnica.

**Tabella 2 – Frana A. Valori caratteristici e rappresentativi delle diverse unità**

Unità UG_1 - DEPOSITI DI FRANA	
Classificazione ASTM	GW GM GW-GC
Peso di volume naturale	20.0 ÷ 21.0 KN/mc
Peso di volume saturo	22.0 ÷ 22.5 KN/mc
Angolo d'attrito (sforzi efficaci) $\phi'$	42 ÷ 44°
Coesione (sforzi efficaci) $c'$	0.00 kPa
Limiti di consistenza (LL ; IP)	ND ; ND
Unità AR_1 - AMMASSO ROCCIOSO CORTICALE (FACIES INTENSAMENTE FRATTURATA)	
Peso di volume matrice roccia	27.5 KN/mc
Resistenza a compressione uniassiale matrice roccia	45.0 MPa
Parametro $m_i$ di H&B (matrice)	10.0
GSI	31 ÷ 39
Parametro $m_b$	0.85 ÷ 1.13
Parametro $s_b$	0.0005 ÷ 0.001
Resistenza a trazione rappresentativa di ammasso roccioso	0.0 MPa
Modulo di Young rappresentativo di ammasso roccioso	2.25 ÷ 3.55 GPa
Angolo d'attrito mobilizzabile d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	33.5 ÷ 36.0 °

Intercetta di resistenza (Coesione) rappresentativa d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	0.78 ÷ 0.92 MPa
<b>Unità AR_2 - AMMASSO ROCCIOSO PROFONDO (FACIES MASSICCIA)</b>	
Peso di volume matrice roccia	27.5 KN/mc
Resistenza a compressione uniassiale matrice roccia	45.0 MPa
Parametro $m_i$ di H&B (matrice)	10.0
GSI	41 ÷ 51
Parametro $m_b$	1.21 ÷ 1.73
Parametro $s_b$	0.0014 ÷ 0.0043
Resistenza a trazione rappresentativa di ammasso roccioso	0.05÷0.11 MPa
Modulo di Young rappresentativo di ammasso roccioso	4.00÷ 7.10 GPa
Angolo d'attrito mobilizzabile d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	31.0 ÷ 37.0 °
Intercetta di resistenza (Coesione) rappresentativa d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	0.96 ÷ 2.27MPa

### 3.2.2 Verifiche di stabilità

Allo scopo di analizzare le condizioni di stabilità dell'intero versante nelle diverse fasi di evoluzione (evento del 1987, stato attuale e condizioni di progetto) e in considerazione della complessità del processo d'instabilità, si è proceduto alla implementazione di un modello numerico elaborato secondo due sezioni, la prima delle quali si sviluppa circa in asse alla frana principale (Sez. A-1) e la seconda in asse allo sperone roccioso che divide la nicchia di frana dall'impiuvio del T. Arcogliasco (Sez. A-3). La scelta delle due sezioni è stata eseguita ricercando le peggiori condizioni geometriche del versante sia nelle condizioni attuali sia in prospettiva futura.

Il modello geotecnico è stato preparato sulla base delle conoscenze

stratigrafiche disponibili basate sui risultati delle indagini e prove eseguite e, in parte, ancora in corso, (sondaggi geognostici, delle indagini geofisiche) e sulla base dei dati del sistema di monitoraggio strumentale.

Il calcolo è stato eseguito simulando i seguenti scenari:

Fase 0 :     equilibratura del modello nelle condizioni antecedenti la frana del 1987;

Fase 1 :     condizioni di simulazione del collasso del 1987 con saturazione pressochè totale dei depositi sciolti superficiali e dell'ammasso roccioso fratturato e simulazione della asportazione di materiale al piede per simulare l'erosione del Torreggio; questa fase di analisi è stata condotta facendo variare i parametri geotecnici fondamentali di resistenza al taglio sino ad ottenere le condizioni limite (back-analysis) e, in questo modo, definire il valore medio dei parametri di resistenza al taglio mobilizzati e mobilizzabili nelle medesime condizioni di sollecitazione;

Fase 2 :     condizioni attuali con saturazione dei depositi superficiali e dell'ammasso roccioso fratturato;

Fase 3 :     condizioni di progetto con la simulazione dell'abbattimento del livello di saturazione mediante i dreni profondi;

I risultati delle analisi con simulazione dell'evento del 1987, mostrano una buona rispondenza con lo schema di evoluzione indicato al paragrafo precedente.

Per ciascuna delle fasi analizzate (stato al momento del collasso del 1987, stato attuale con ipotesi di saturazione dei depositi superficiali e dell'ammasso

roccioso fratturato e condizioni finali di progetto con abbattimento del livello di saturazione mediante l'installazione di batterie di tubi drenanti (suborizzontali) sono riportati nelle Tavole B.05.05, B.05.06 e B.05.07, i seguenti grafici:

- distribuzione dei vettori velocità di deformazione riferita all'intero modello del versante – i vettori velocità rappresentano un ottimo indicatore del permanere di condizioni di instabilità, in quanto, in caso di riequilibrio delle tensioni, tendono ad azzerarsi;
- curve di involuppo della componente orizzontale delle deformazioni (indice degli spostamenti “instabilizzanti”), rappresentate in dettaglio mediante due “finestre” relative, la prima al piede della frana, ossia alla zona del “gradino relitto”, la seconda alla zona di coronamento.

I grafici relativi alla back-analysis dell'evento parossistico del 1987 mostrano in modo evidente che le deformazioni hanno interessato – sino al collasso – il gradino relitto, un movimento generalizzato di tutta la coltre detritica della nicchia della paleofrana e deformazioni sino a collasso del gradino morfologico che si trovava circa a quota 1'450 m s.m. ÷ 1'480 m s.m..

Le verifiche nelle condizioni attuali, come detto, sono state condotte ipotizzando un livello di saturazione molto elevato, quale è possibile attendersi – senza interventi specifici – in occasione di precipitazioni intense e prolungate. In queste condizioni, le analisi numeriche indicano ancora la possibilità di mobilitazione del gradino relitto sino al collasso di porzioni rilevanti di materiale; si evidenzia, ancora la possibilità di mobilitazione dei detriti accumulati nella porzione centrale della nicchia che, tuttavia, si

accumulerebbero, nella gran parte, a monte del gradino morfologico di quota 1'100÷1'200 m s.m..

Da queste osservazioni si conferma come gli interventi di messa in sicurezza della frana A, così come sono stati sviluppati in progetto, debbano concentrarsi sulla stabilizzazione del gradino relitto che permetterebbe anche di realizzare un presidio naturale contro le colate detritiche che si possono sviluppare nella parte centrale della nicchia e gli ulteriori crolli dalla zona di coronamento.

Le analisi eseguite sul modello che simula le condizioni di progetto sono state condotte imponendo l'abbattimento del livello di saturazione del versante, così come si otterrà mediante l'installazione del sistema drenante di progetto. In questo caso, le verifiche numeriche indicano, come zona di possibile mobilizzazione di materiale, soltanto la zona centrale della nicchia di frana, dove si potrebbero formare colate di detrito che, come detto, verrebbero però trattenute dal gradino morfologico di q. 1'100÷1'200 m s.m.. L'ipotesi di progetto verificata, prevede anche la difesa del piede contro possibili fenomeni di erosione concentrata da parte del Torreggio.

### **3.3 SPARTIACQUE CON IL T.ARCOGLIASCO**

#### **3.3.1 Caratterizzazione Geotecnica e Geomeccanica**

I parametri geotecnici fondamentali necessari per eseguire le analisi numeriche sono i medesimi utilizzati per la frana "A" e, pertanto, si rimanda al paragrafo 3.2.1 per i dettagli.

#### **3.3.2 Verifiche di stabilità**

Le analisi in questa zona sono state eseguite con lo scopo di verificare un'area

che, benché non sia stata interessata dall'evento franoso del 1987 ma soltanto da modesti fenomeni di erosione al piede, presenta indici di pericolosità elevati in conseguenza delle infiltrazioni di acqua che derivano dall'impluvio dell'Arcogliasco e che attraversano questo sperone misto di detriti e ammasso roccioso fratturato creando, con ogni probabilità, fenomeni di sovrappressione delle acque interstiziali e, forse, effetti di pressione idrodinamica.

L'analisi è stata eseguita in modo del tutto analogo a quello descritto per la sezione A1, ossia mediante implementazione di un modello a differenze finite. Le verifiche hanno riguardato le condizioni attuali simulando una saturazione pressoché totale dell'ammasso e le condizioni di progetto con il drenaggio profondo delle acque e la protezione del piede.

Nella Tavola B.05.06 sono riportati i grafici dei vettori velocità di spostamento e le curve di involuppo delle componenti orizzontali delle deformazioni.

I risultati confermano la necessità di intervenire mediante le opere previste in progetto.

### **3.4 FRANA B**

#### **3.4.1 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica**

Analogamente a quanto svolto per la frana della zona "A", anche in questo caso si è proceduto alla definizione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici fondamentali necessari per eseguire le analisi numeriche mediante i dati ricavati dalle indagini eseguite nel corso delle diverse campagne geognostiche (1989 e 2006 – campagna in corso). Per quanto riguarda i parametri relativi all'ammasso roccioso che costituisce il bedrock della zona di frana "B" si sono assunti i valori definiti per l'ammasso roccioso compatto

della frana “A”, in considerazione della scarsa rilevanza dei parametri del substrato in un meccanismo di mobilitazione che interessa esclusivamente i depositi di copertura.

Dai risultati delle prove e delle elaborazioni condotte si sono, quindi, potuti definire i parametri caratteristici di resistenza e deformabilità delle diverse unità; nelle tabelle che seguono sono riportati i valori rappresentativi delle diverse unità, così definiti. I valori indicati sono quelli medi rappresentativi di ciascuna unità litotecnica.

**Tabella 3 – Frana B. Valori caratteristici e rappresentativi delle diverse unità**

<b>Unità UG_1 - DEPOSITI DI FRANA</b>	
Classificazione ASTM	GW GM GW-GC
Peso di volume naturale	19.0 ÷ 20.0 KN/mc
Peso di volume saturo	22.0 ÷ 22.5 KN/mc
Angolo d'attrito (sforzi efficaci) $\phi'$	42 ÷ 44°
Coesione (sforzi efficaci) $c'$	0.00 kPa
Limiti di consistenza (LL ; IP)	ND ; ND
<b>Unità UG_2 - DEPOSITI MORENICI</b>	
Classificazione ASTM	GW GM GW-GC
Peso di volume naturale	19.5 ÷ 20.5 KN/mc
Peso di volume saturo	21.0 ÷ 22.0 KN/mc
Angolo d'attrito (sforzi efficaci) $\phi'$	32 ÷ 34°
Coesione (sforzi efficaci) $c'$	20 ÷ 30 kPa
Limiti di consistenza (LL ; IP)	25 ; ND
<b>Unità UG_3 - LENTI LIMOSO-SABBIOSE, DEBOLMENTE ARGILLOSE</b>	
Classificazione ASTM	ML
Peso di volume naturale	19.5 ÷ 20.5 KN/mc
Peso di volume saturo	21.0 ÷ 22.0 KN/mc
Angolo d'attrito (sforzi efficaci) $\phi'$	26 ÷ 28°
Coesione (sforzi efficaci) $c'$	40 ÷ 60 kPa
Limiti di consistenza (LL ; IP)	25 ÷ 34 ; 5 ÷ 9

<b>Unità AR_2 - AMMASSO ROCCIOSO</b>	
Peso di volume matrice roccia	27.5 KN/mc
Resistenza a compressione uniassiale matrice roccia	45.0 MPa
Parametro $m_i$ di H&B (matrice)	10.0
GSI	41 ÷ 51
Parametro $m_b$	1.21 ÷ 1.73
Parametro $s_b$	0.0014 ÷ 0.0043
Resistenza a trazione rappresentativa di ammasso roccioso	0.05÷0.11 MPa
Modulo di Young rappresentativo di ammasso roccioso	4.00÷ 7.10 GPa
Angolo d'attrito mobilizzabile d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	31.0 ÷ 37.0 °
Intercetta di resistenza (Coesione) rappresentativa d'ammasso roccioso (retta regressione Mohr-Coulomb)	0.96 ÷ 2.27MPa

### 3.4.2 Verifiche di stabilità

Anche in questo caso, la verifica delle condizioni di stabilità è stata condotta elaborando un modello numerico alle differenze finite.

La modellazione è stata eseguita simulando le condizioni attuali ed imponendo un livello di saturazione circa corrispondente al massimo rilevato nei tubi piezometrici e, successivamente, simulando l'azione drenante delle opere previste in progetto.

I risultati (cfr. Tav B.05.07) indicano, anche in questo caso, come la scelta di agire in maniera principale sull'abbattimento dei livelli di saturazione comporta i migliori risultati ai fini della stabilizzazione dei movimenti franosi dell'area. In questo caso, tuttavia, proprio le caratteristiche viscosse dei movimenti non consentono di garantire la totale stabilizzazione del fenomeno

ma, quantomeno, di rallentare il movimento in modo significativo e sul lungo periodo, anche in occasione di intense precipitazioni e, comunque, di evitare fenomeni di collasso potenzialmente pericolosi.

Milano, dicembre 2006

#### I PROGETTISTI

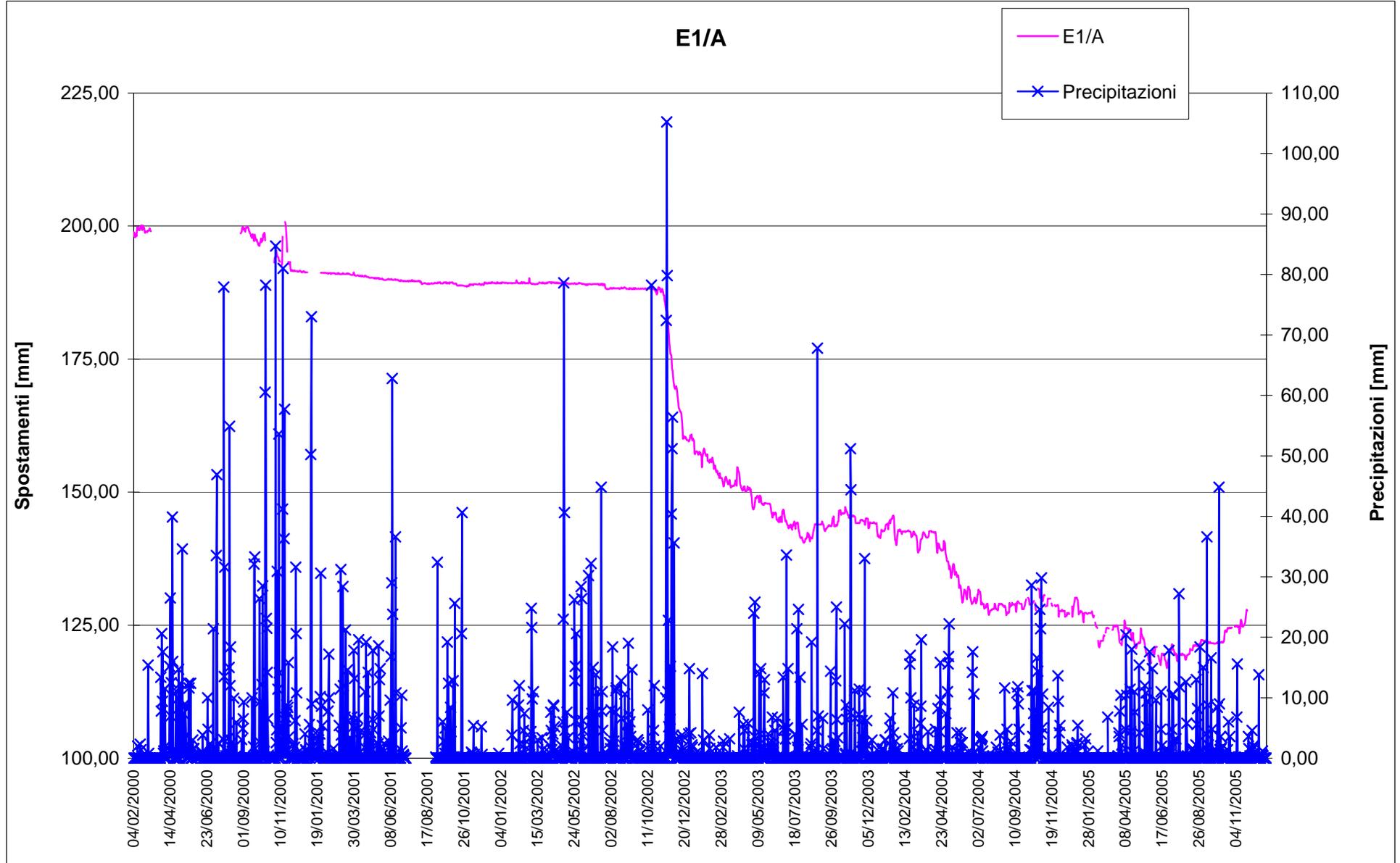
Prof. Ing. Alessandro Paoletti

Dott. Ing. Giovanni Battista Peduzzi

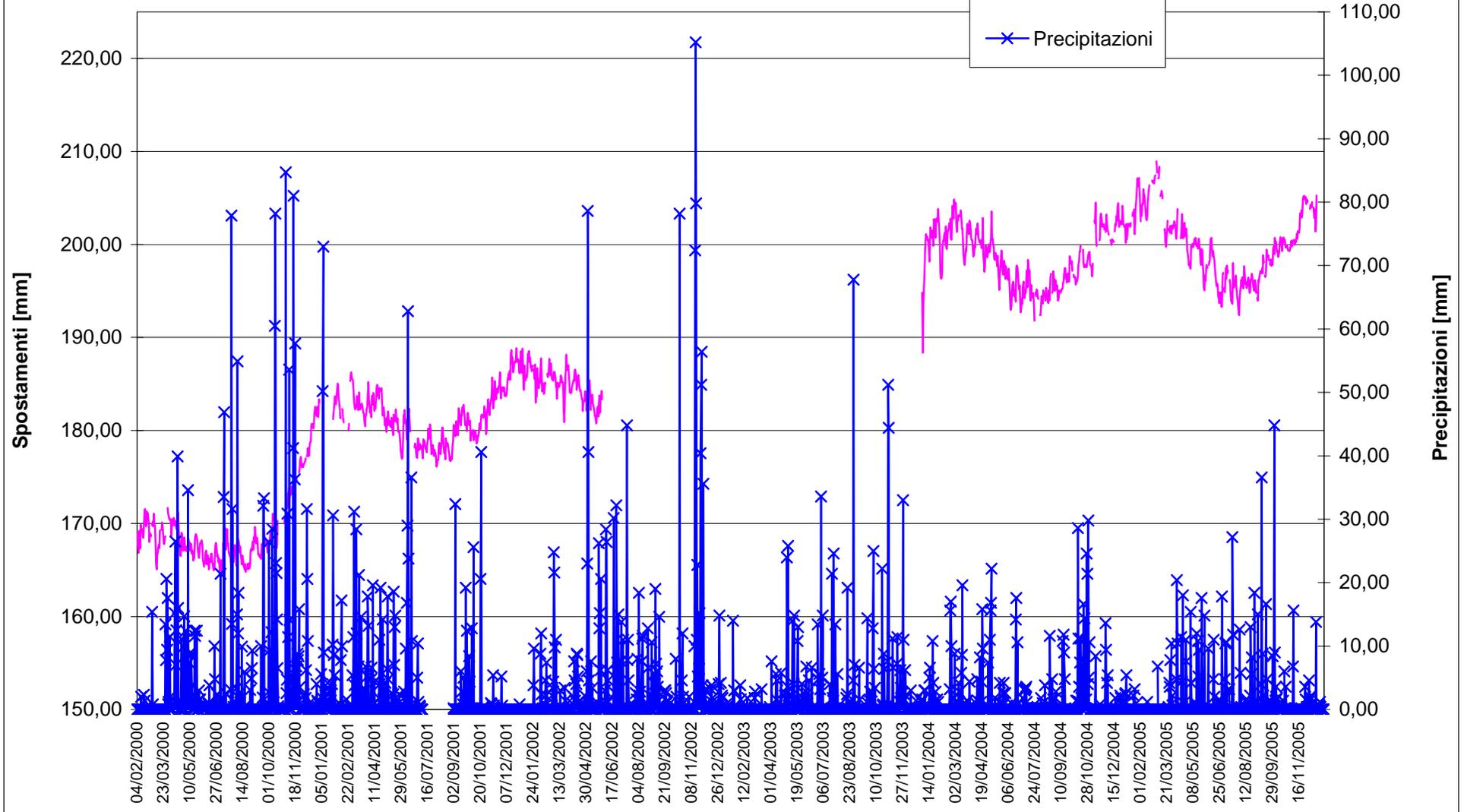
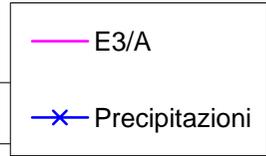
Dott. Geol. Lamberto Griffini

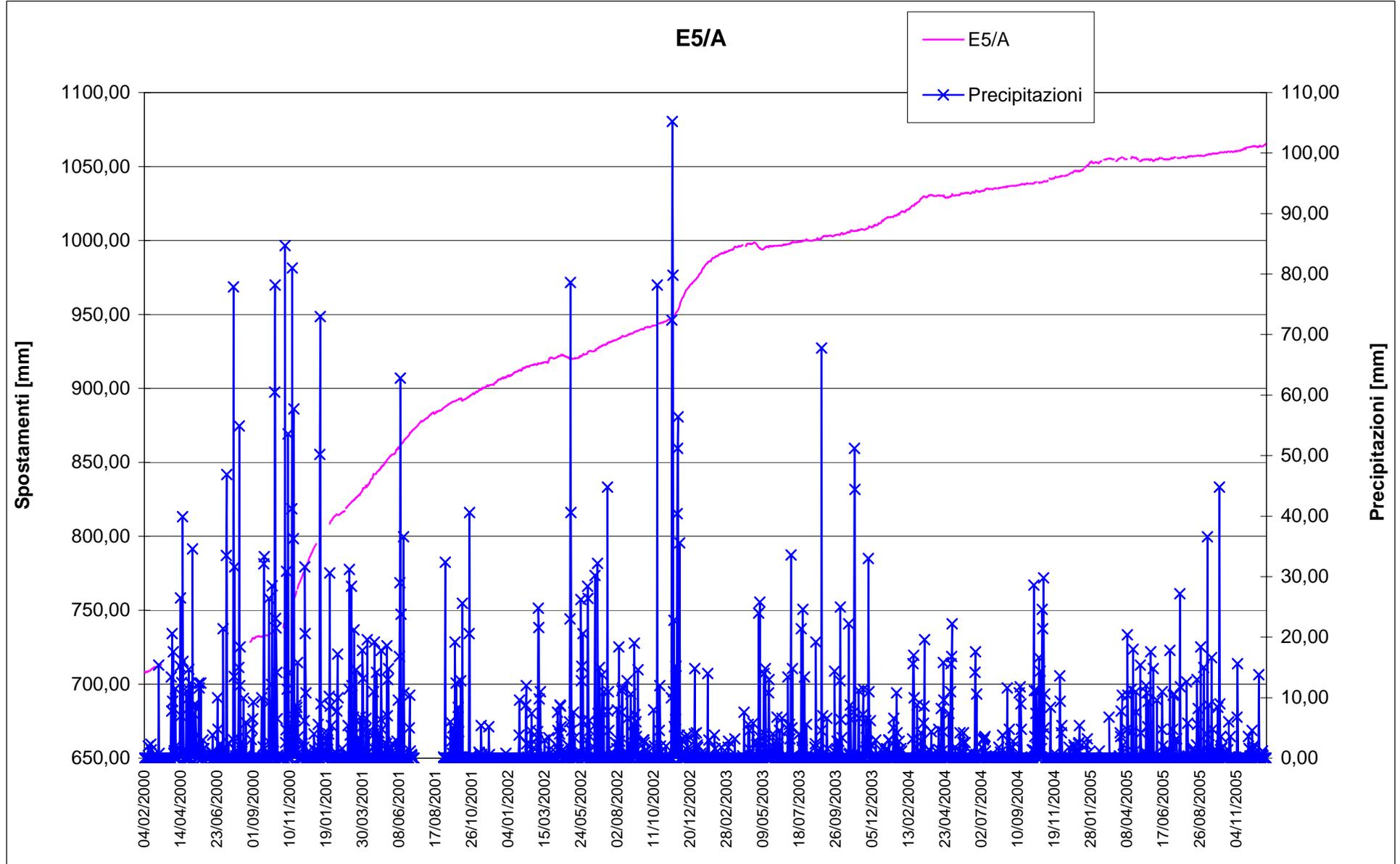
**ESTENSIMETRI ZONA A**

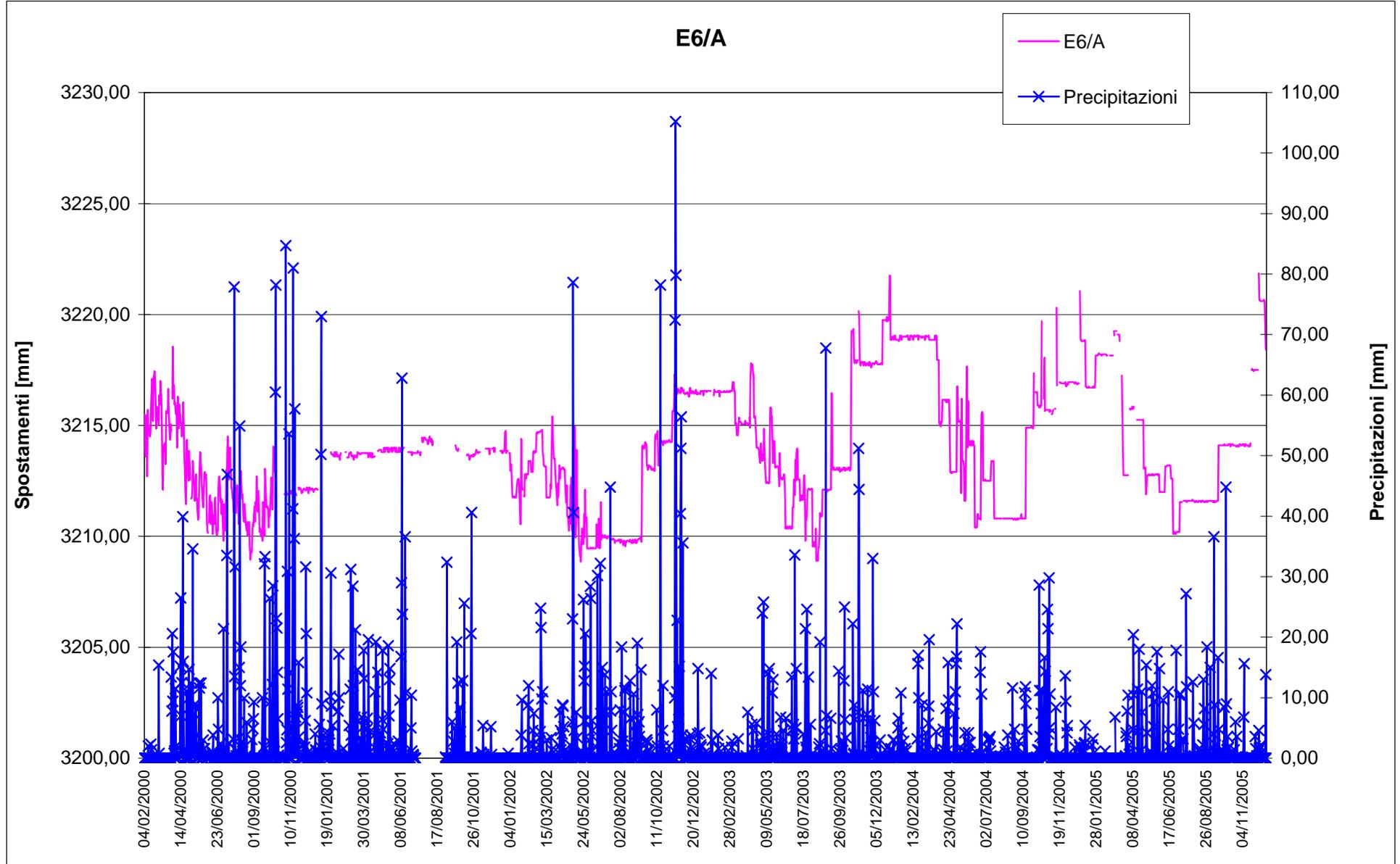
# E1/A



### E3/A

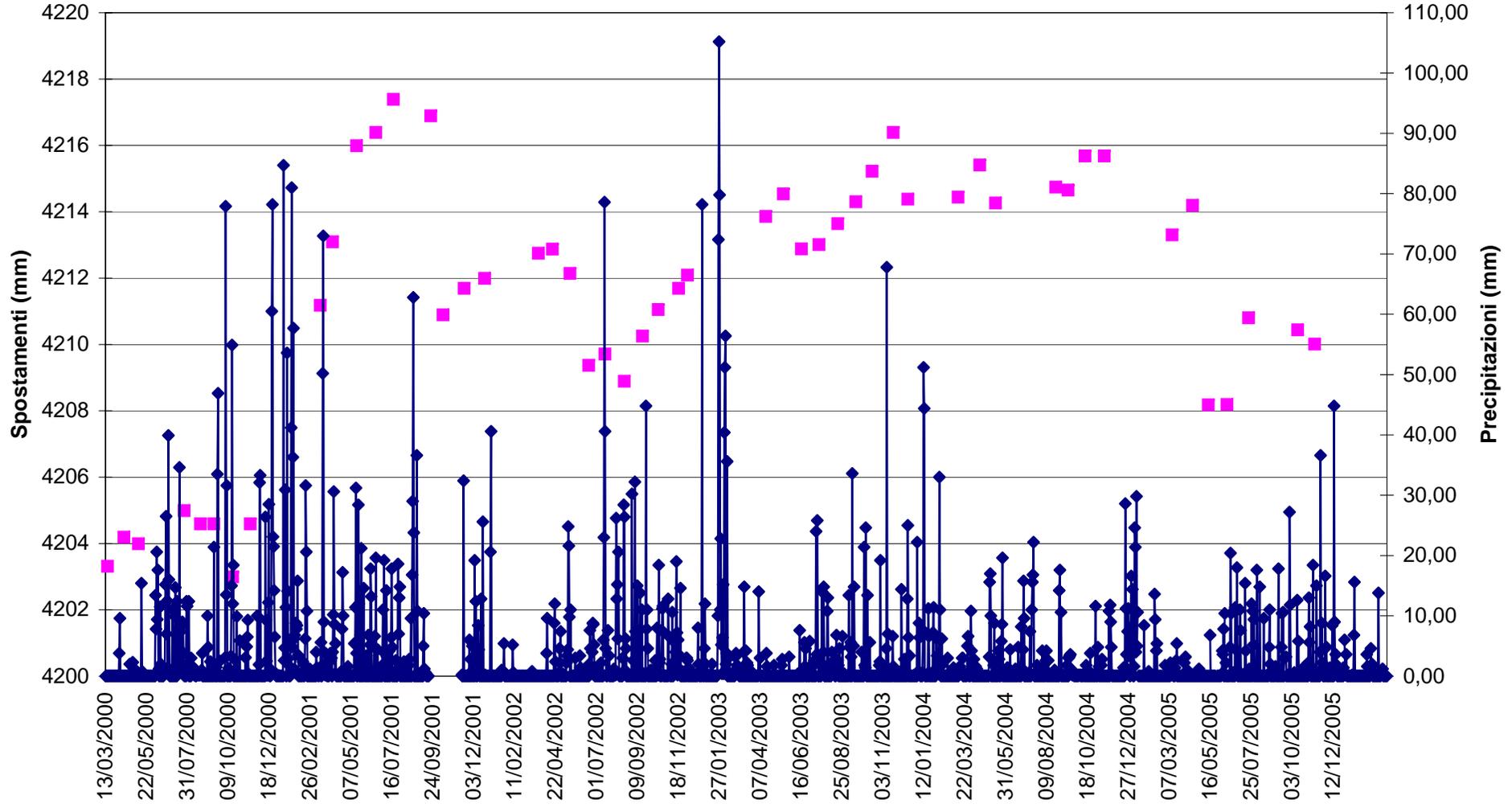
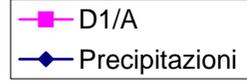




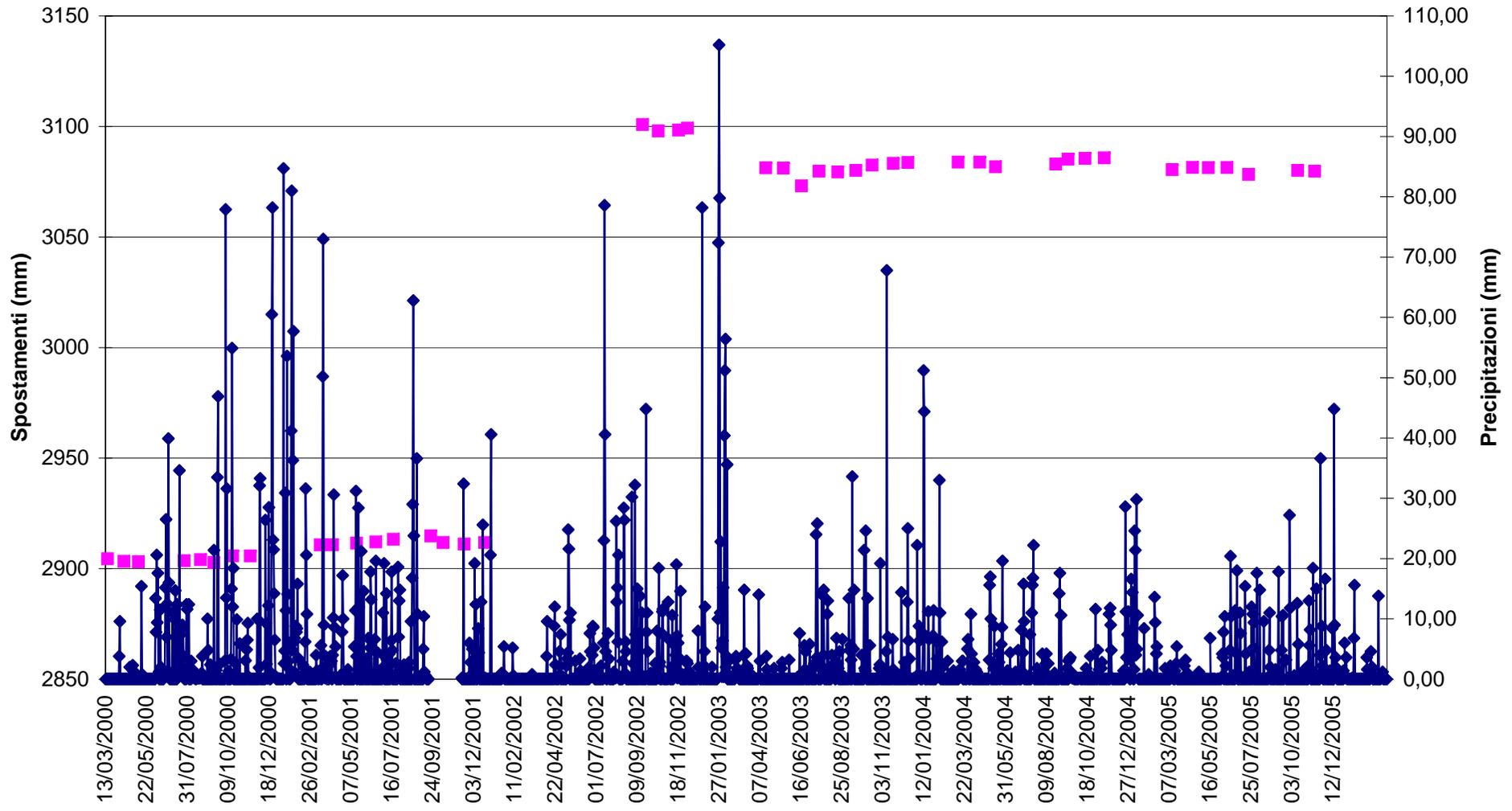


**DISTOMETRI ZONA A**

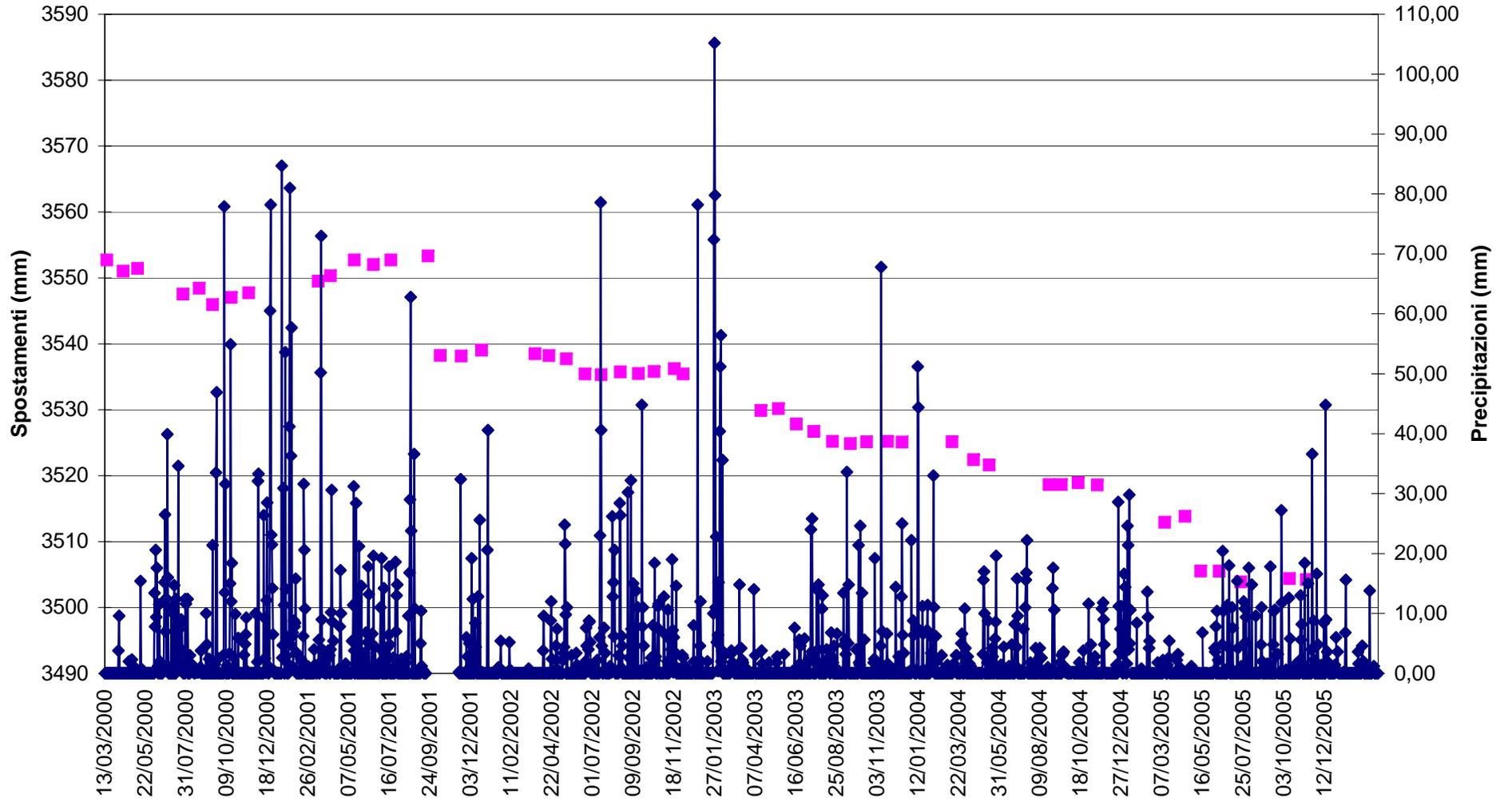
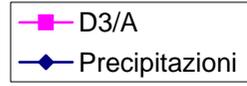
# D1/A



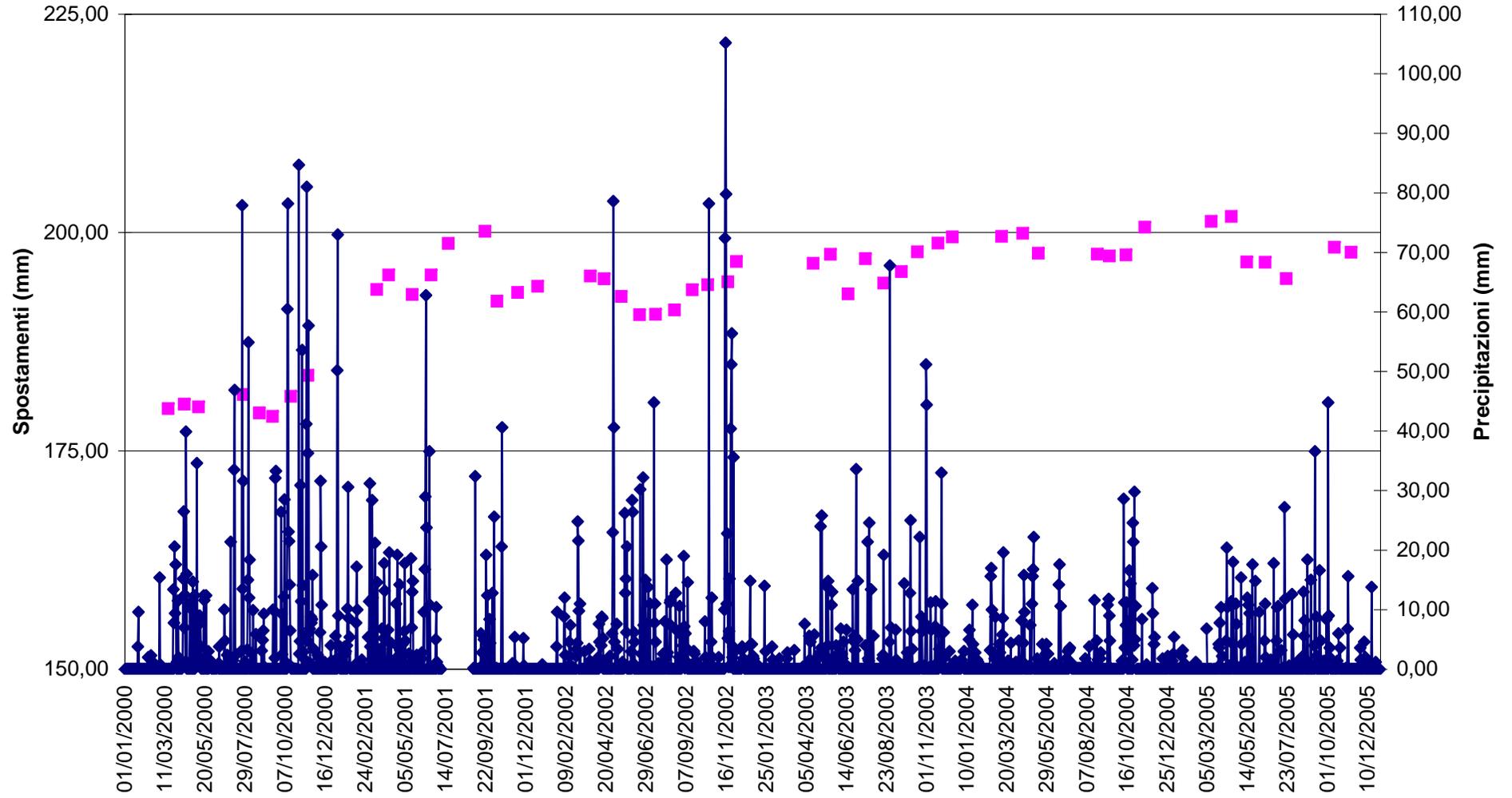
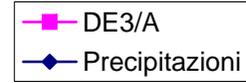
# D2/A



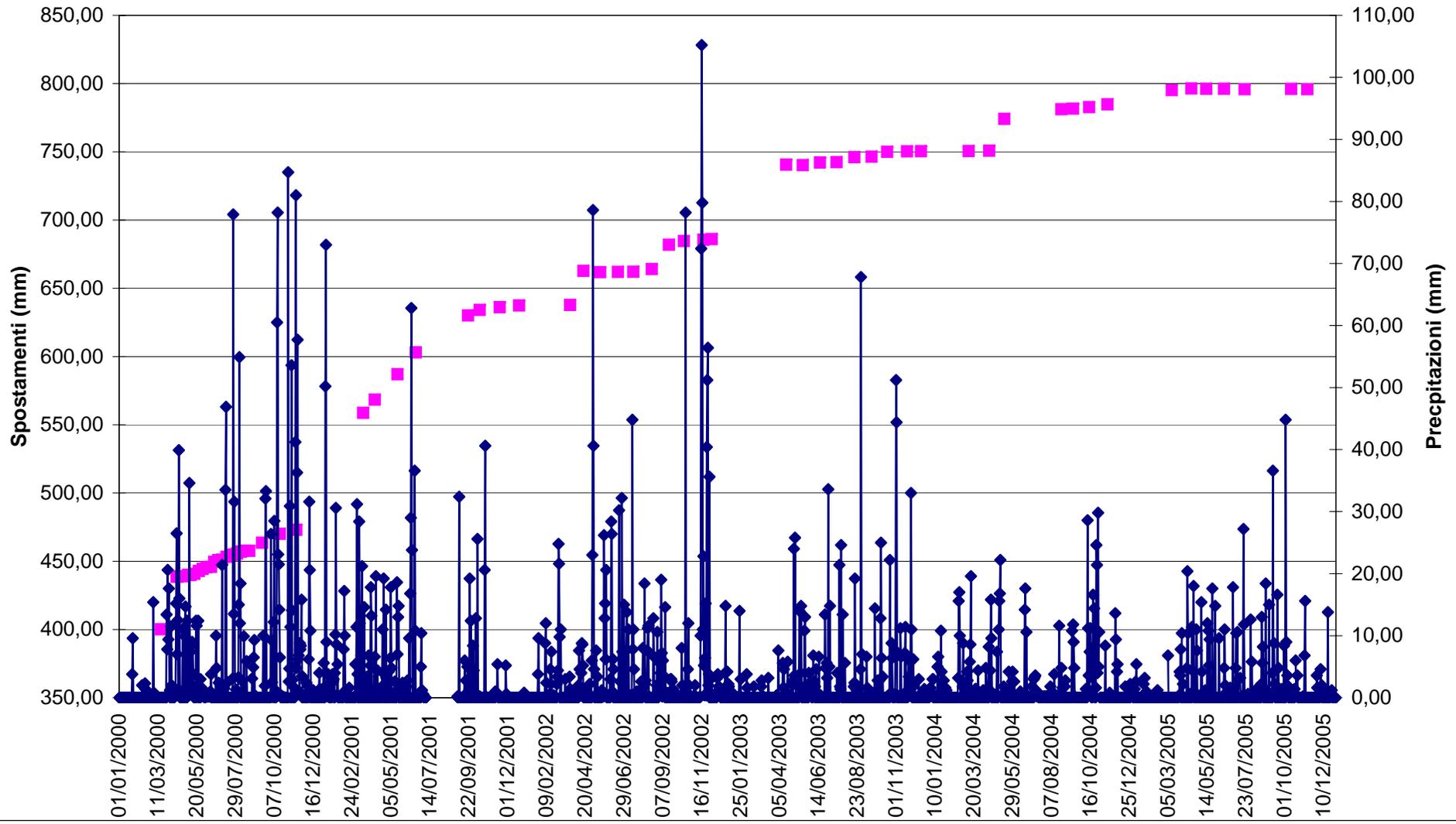
### D3/A



# DE3/A

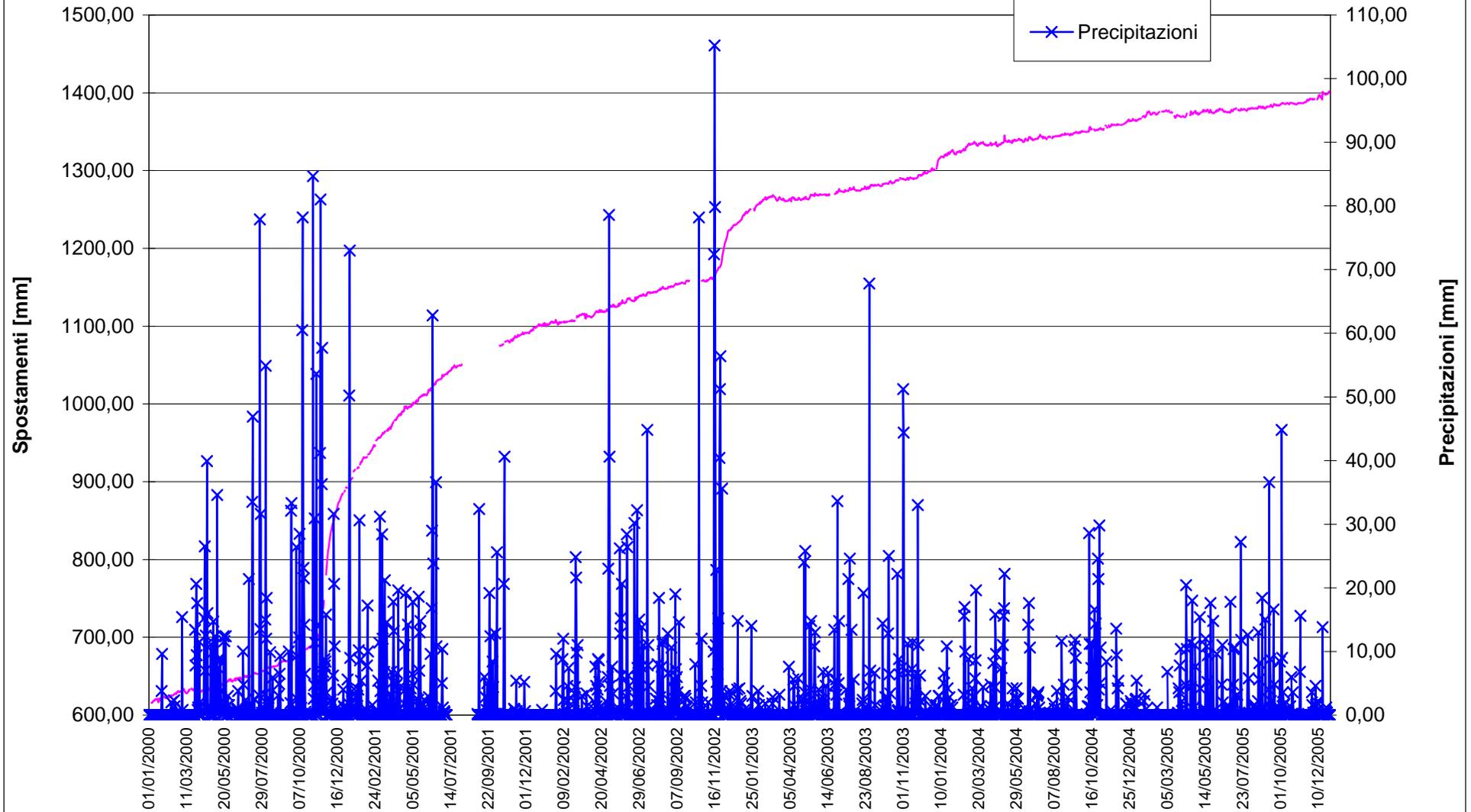
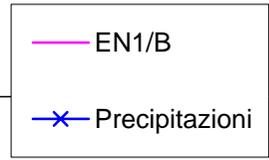


# DE5/A

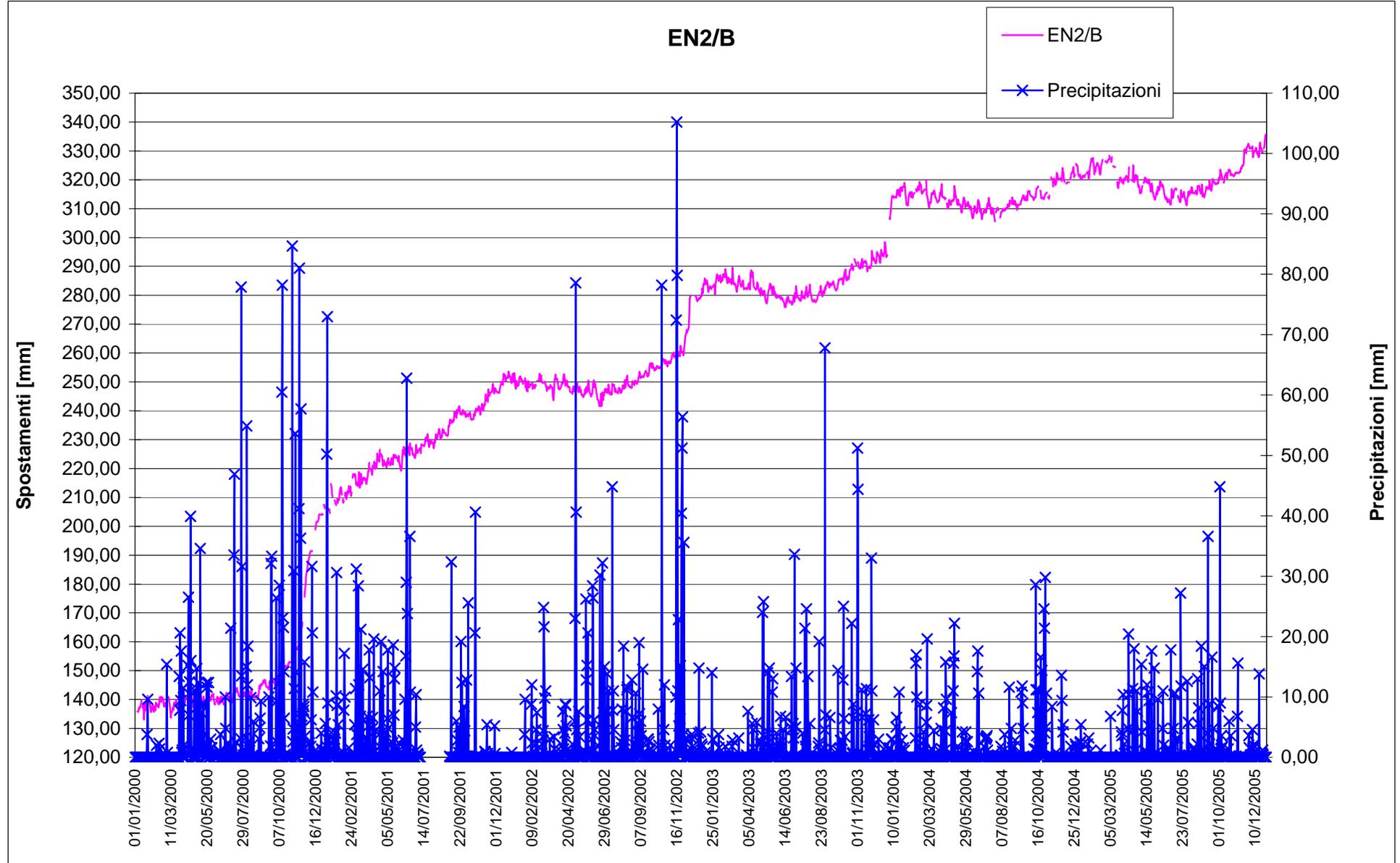


**ESTENSIMETRI ZONA B**

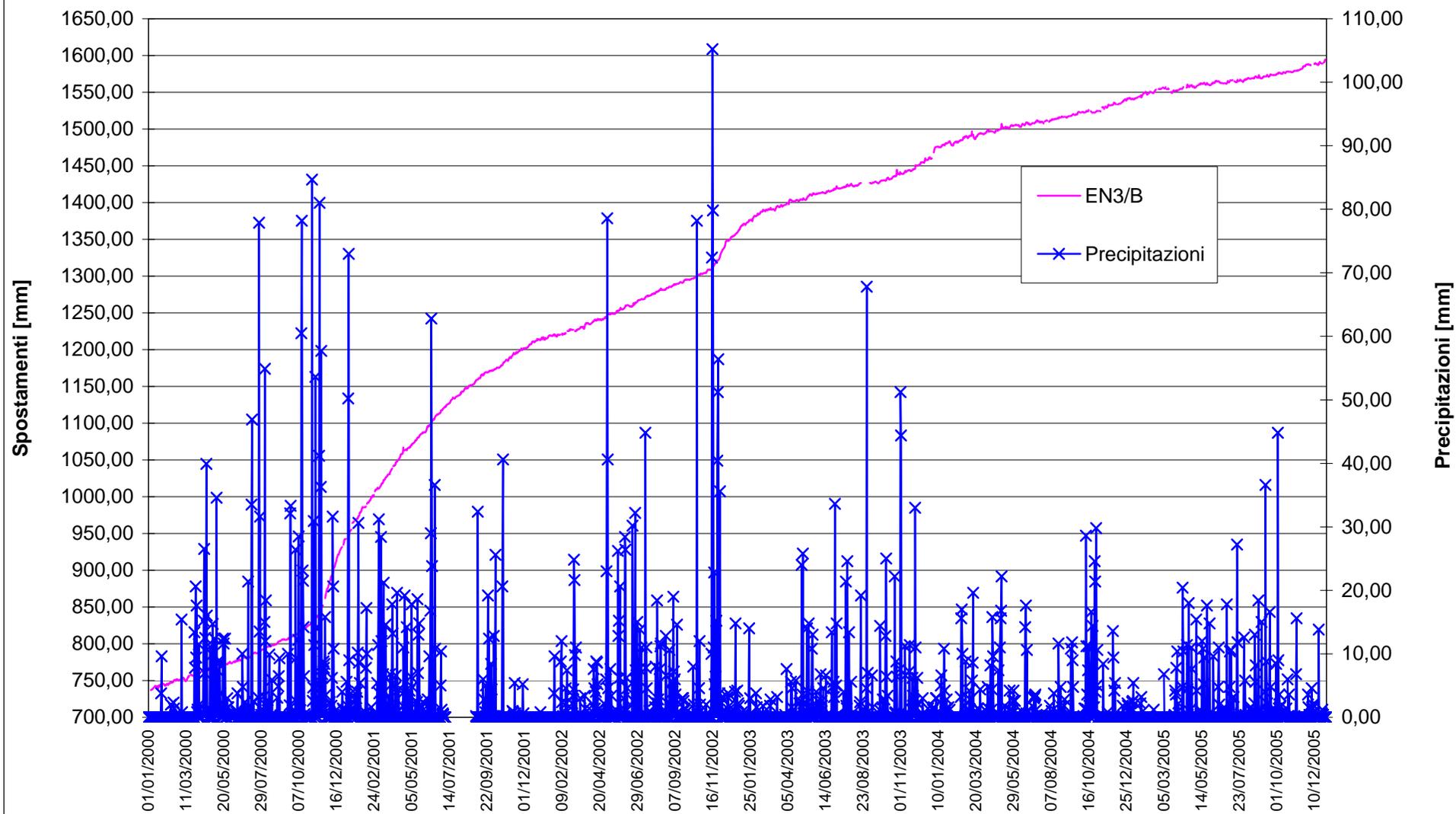
# EN1/B



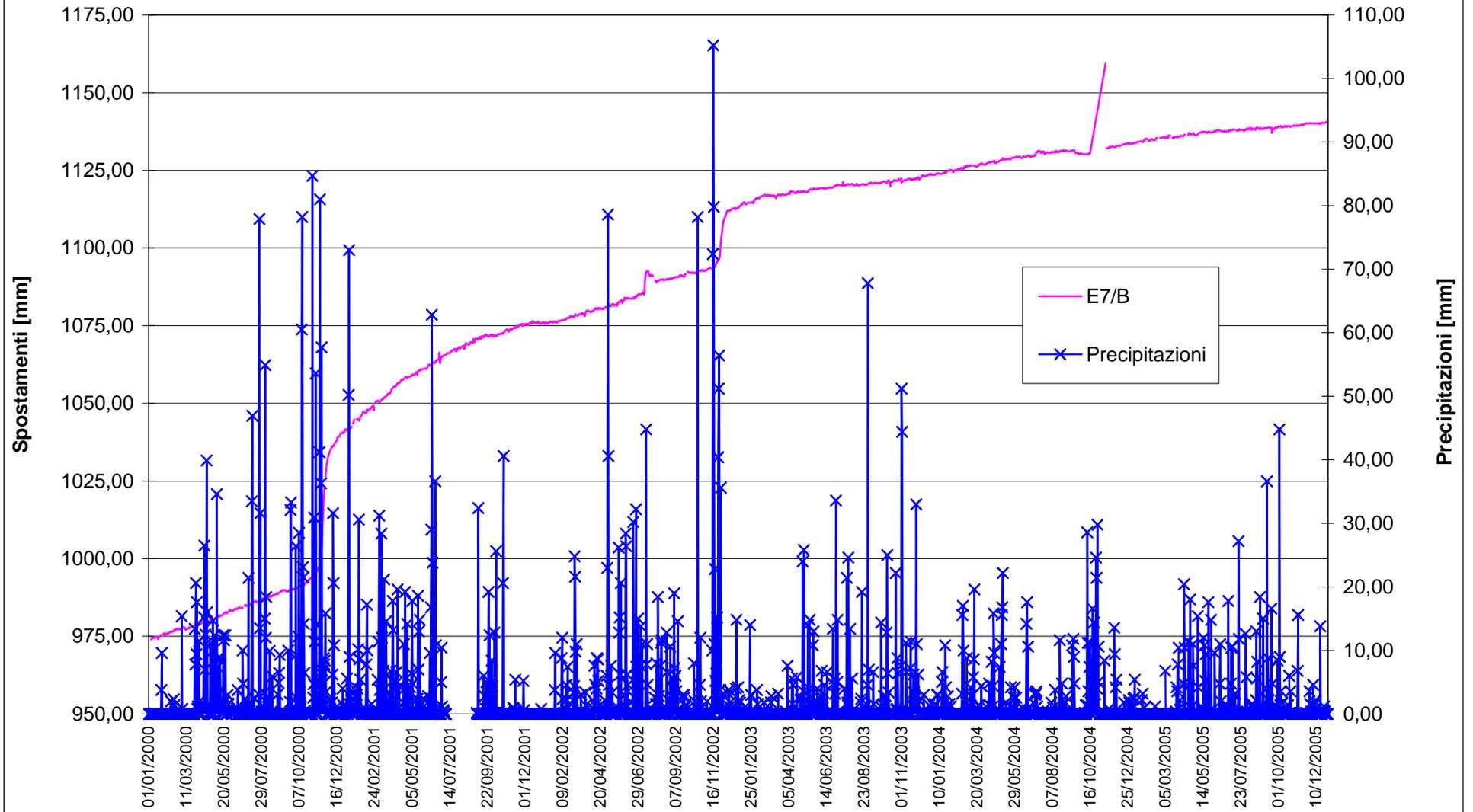
# EN2/B

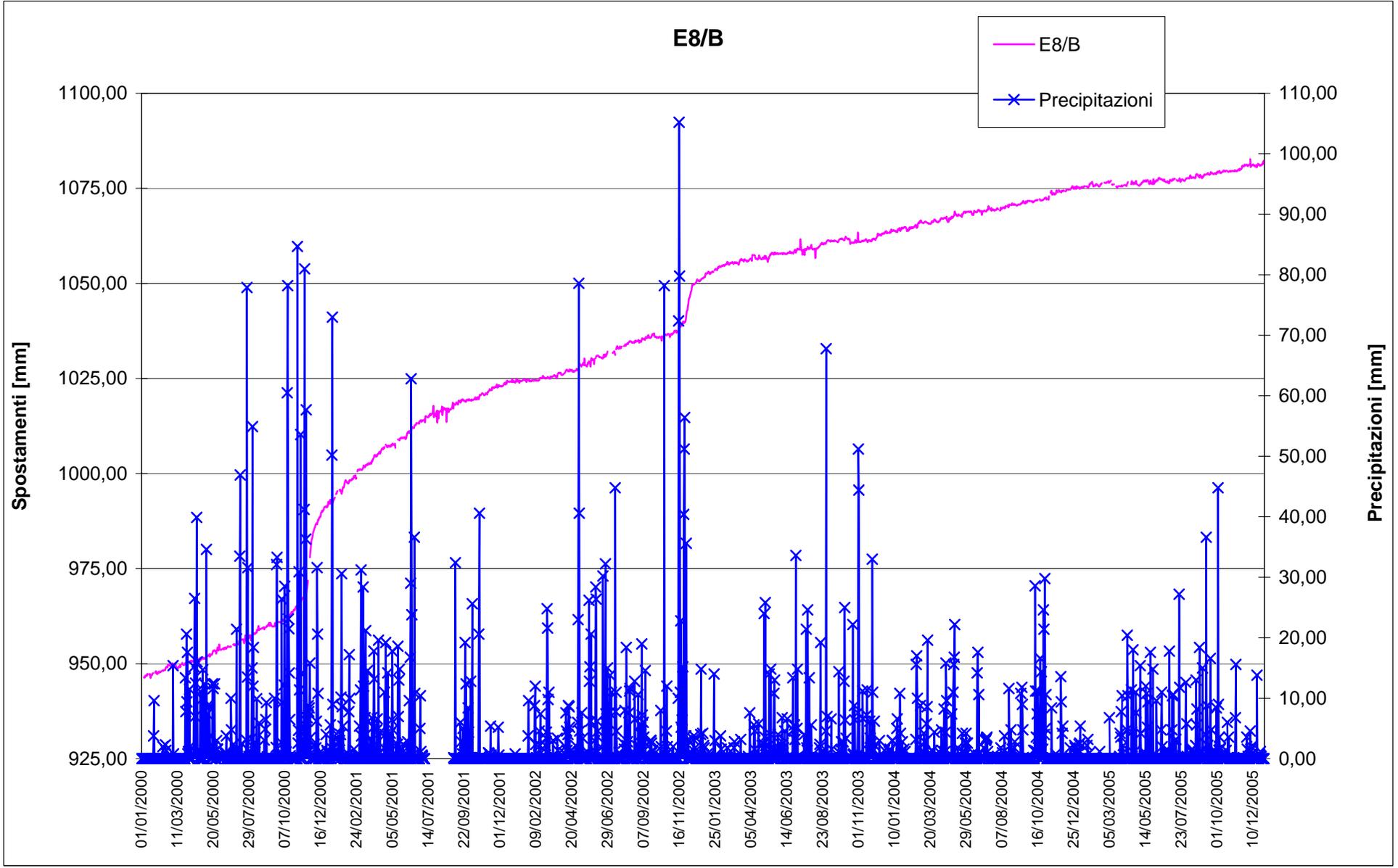


### EN3/B



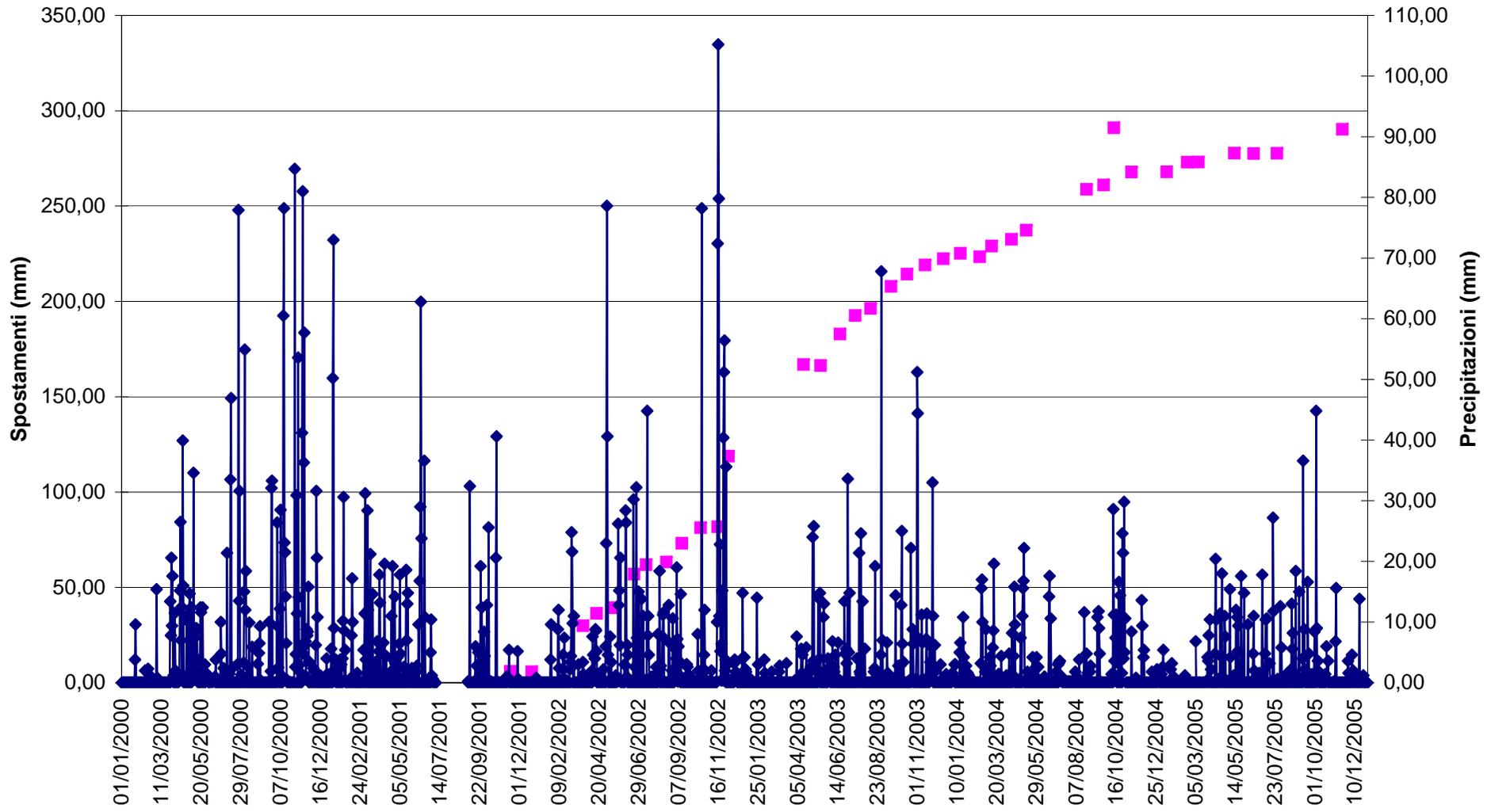
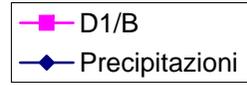
### E7/B



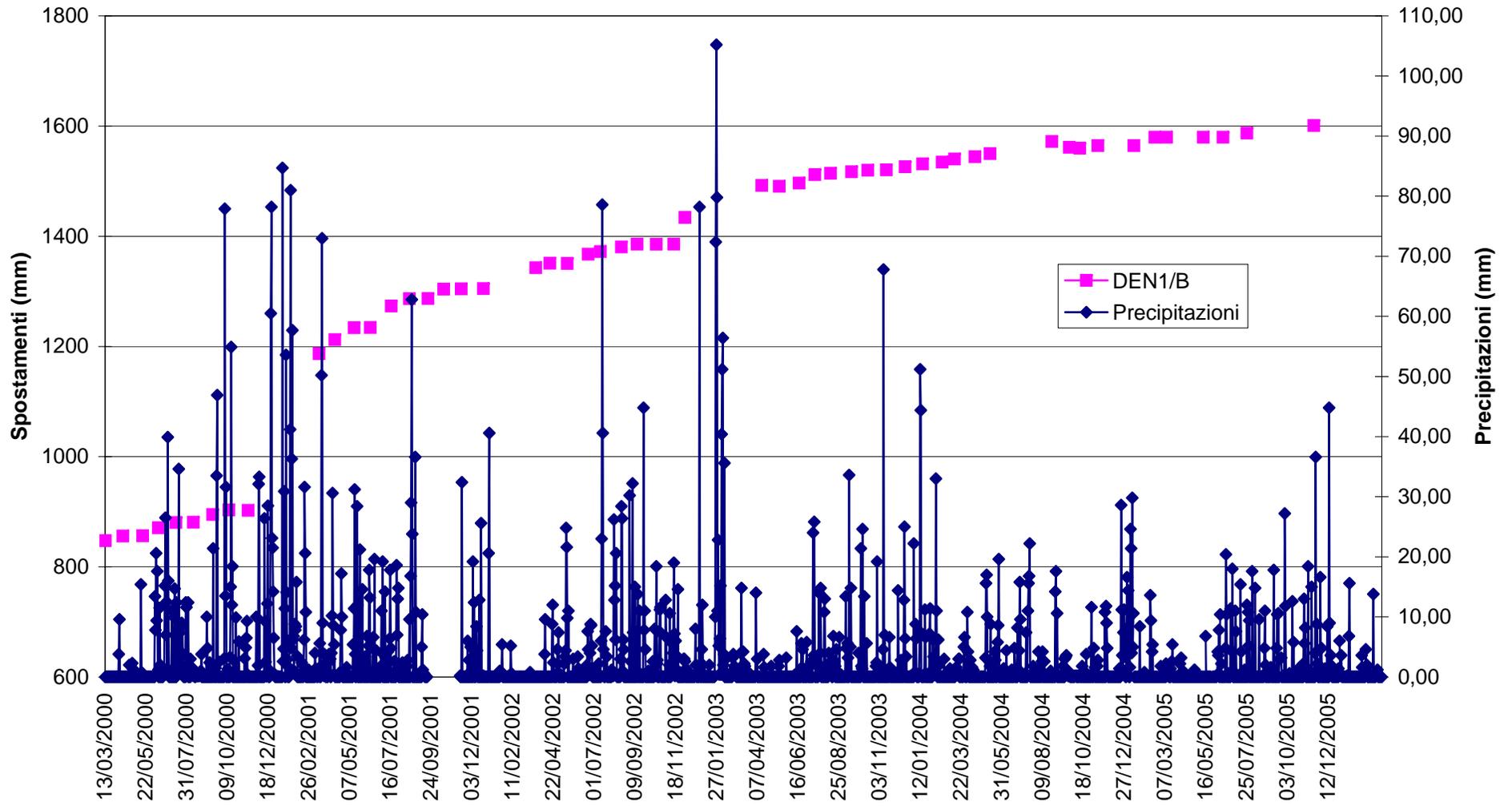


**DISTOMETRI ZONA B**

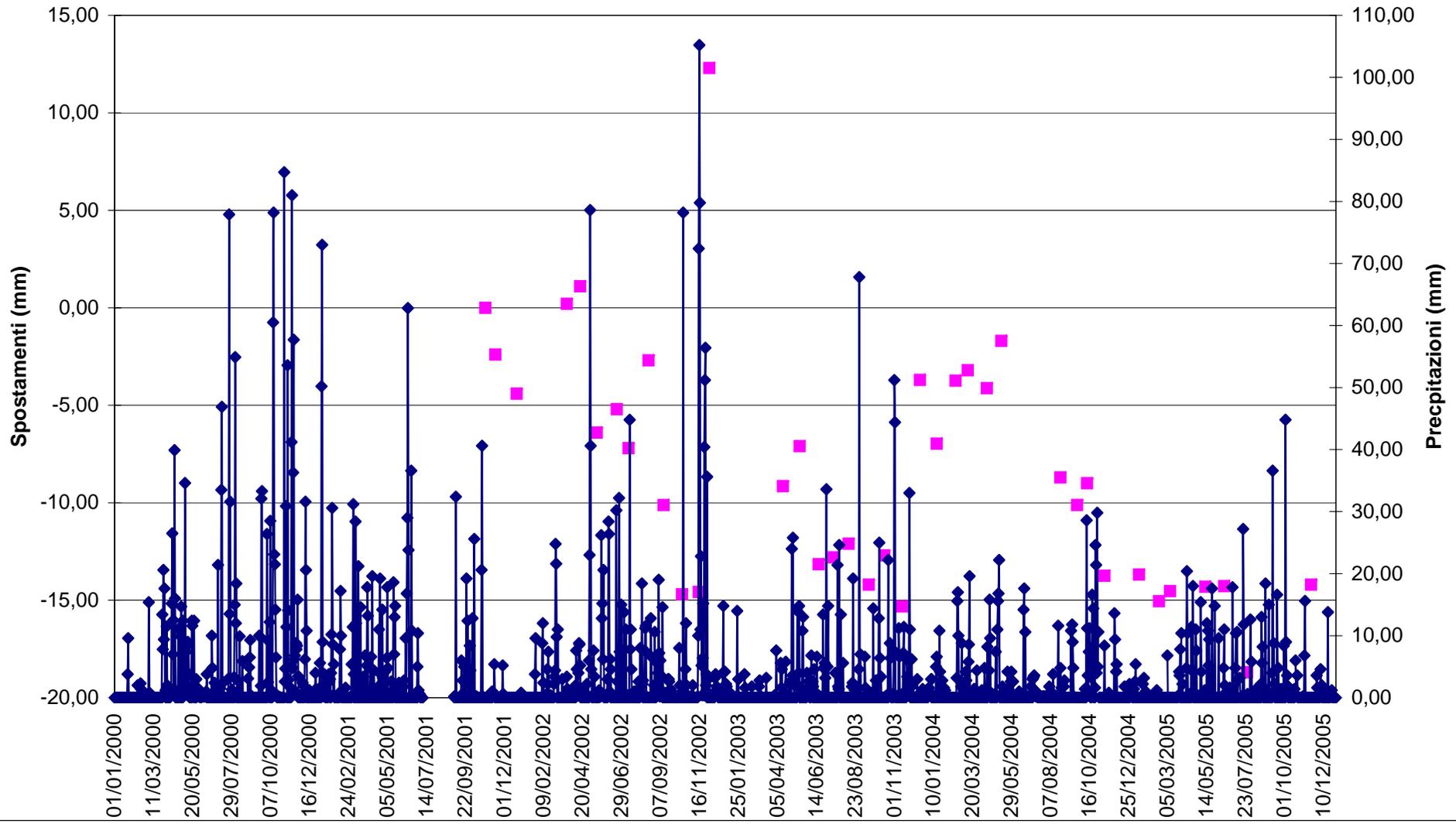
# D1/B



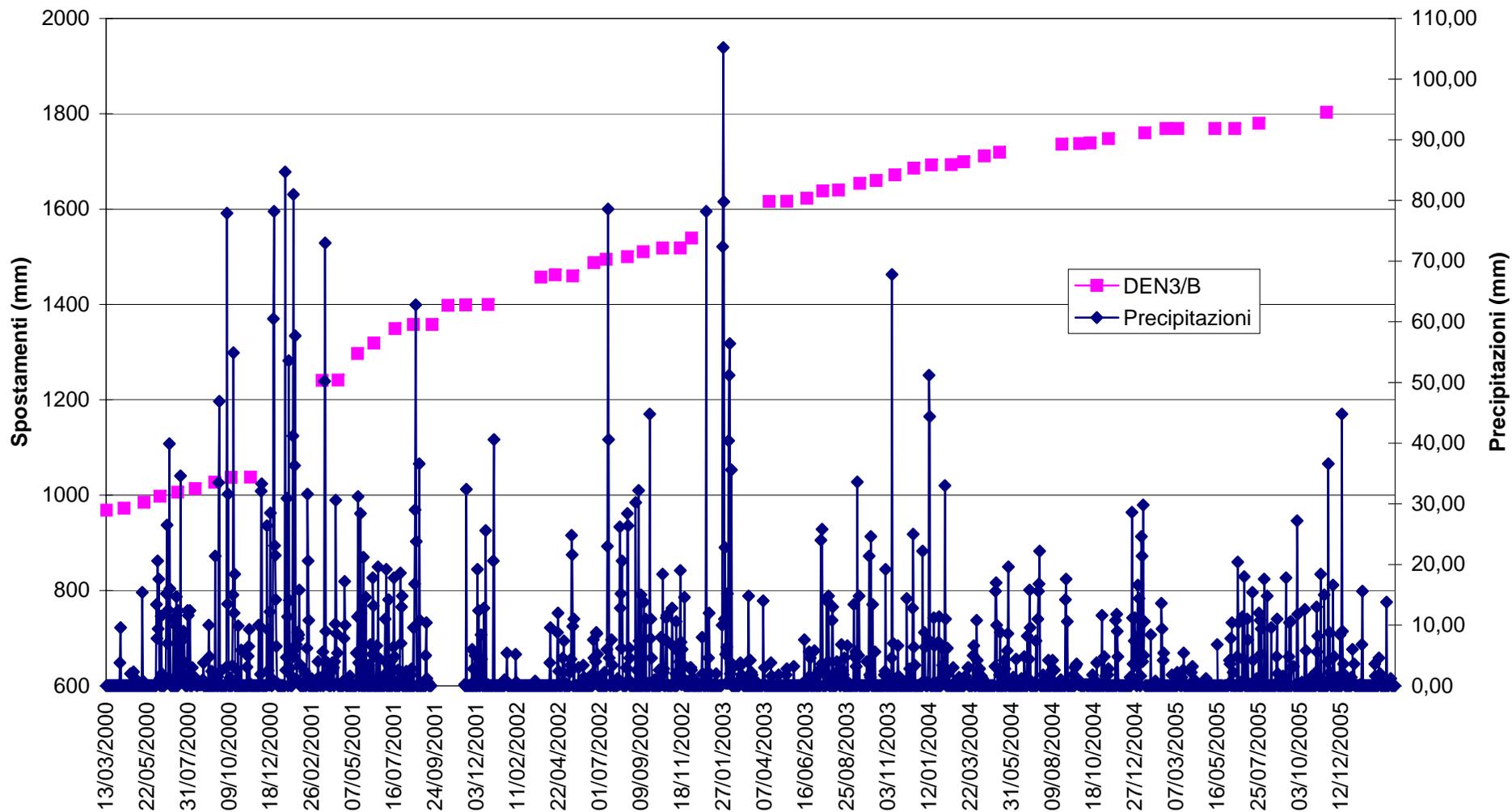
# DEN1/B



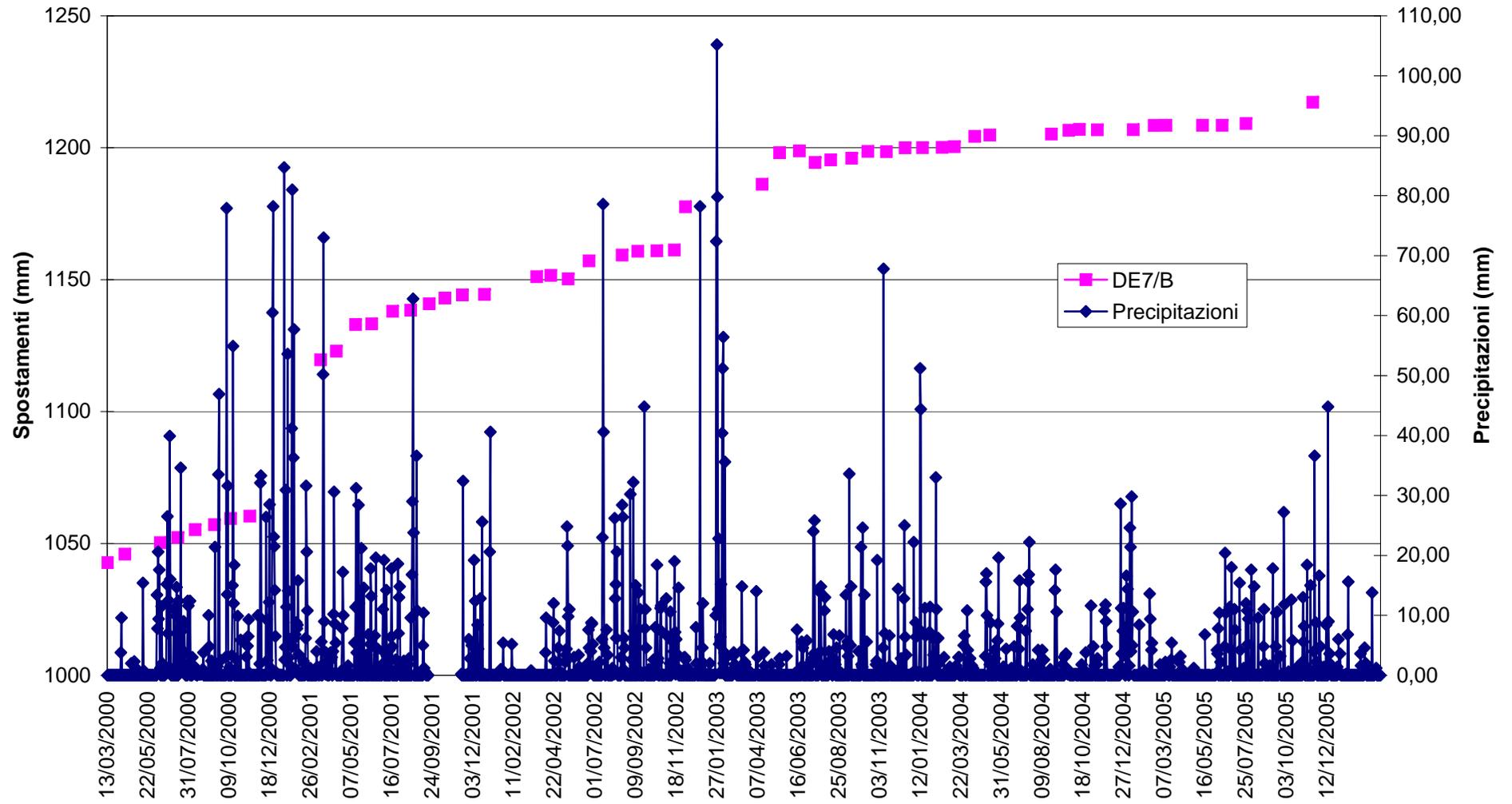
D2/B



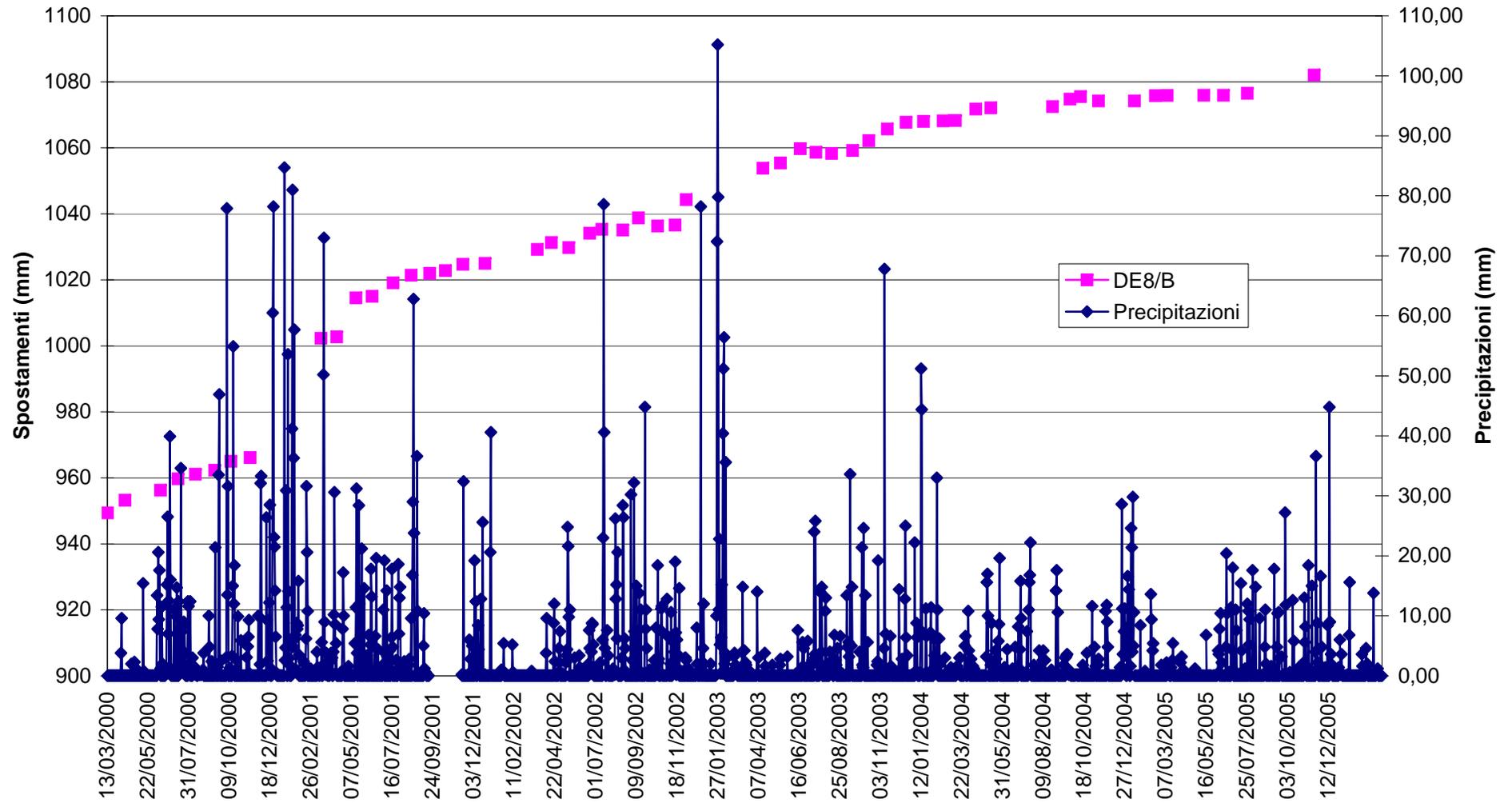
### DEN3/B



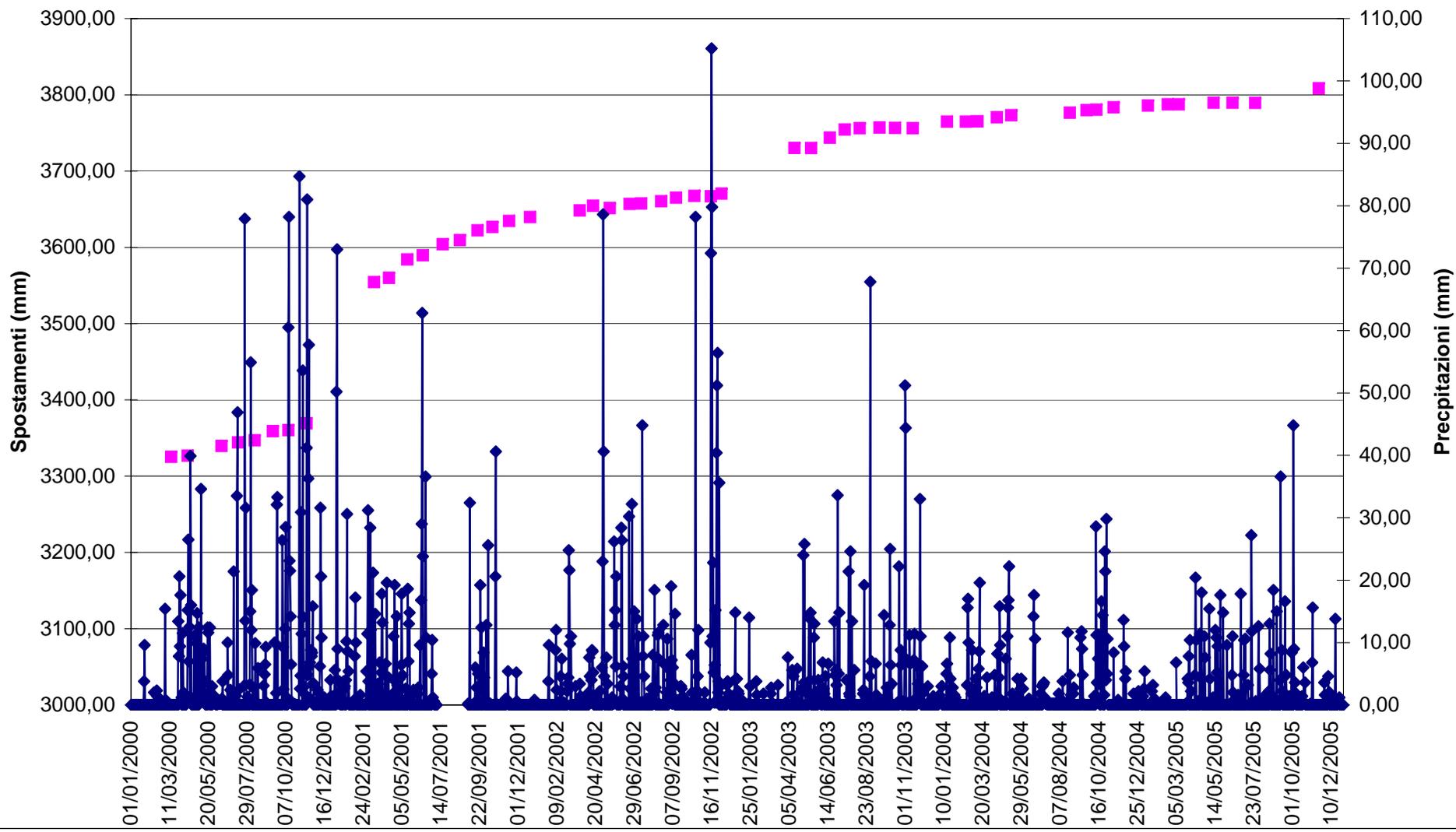
# DE7/B



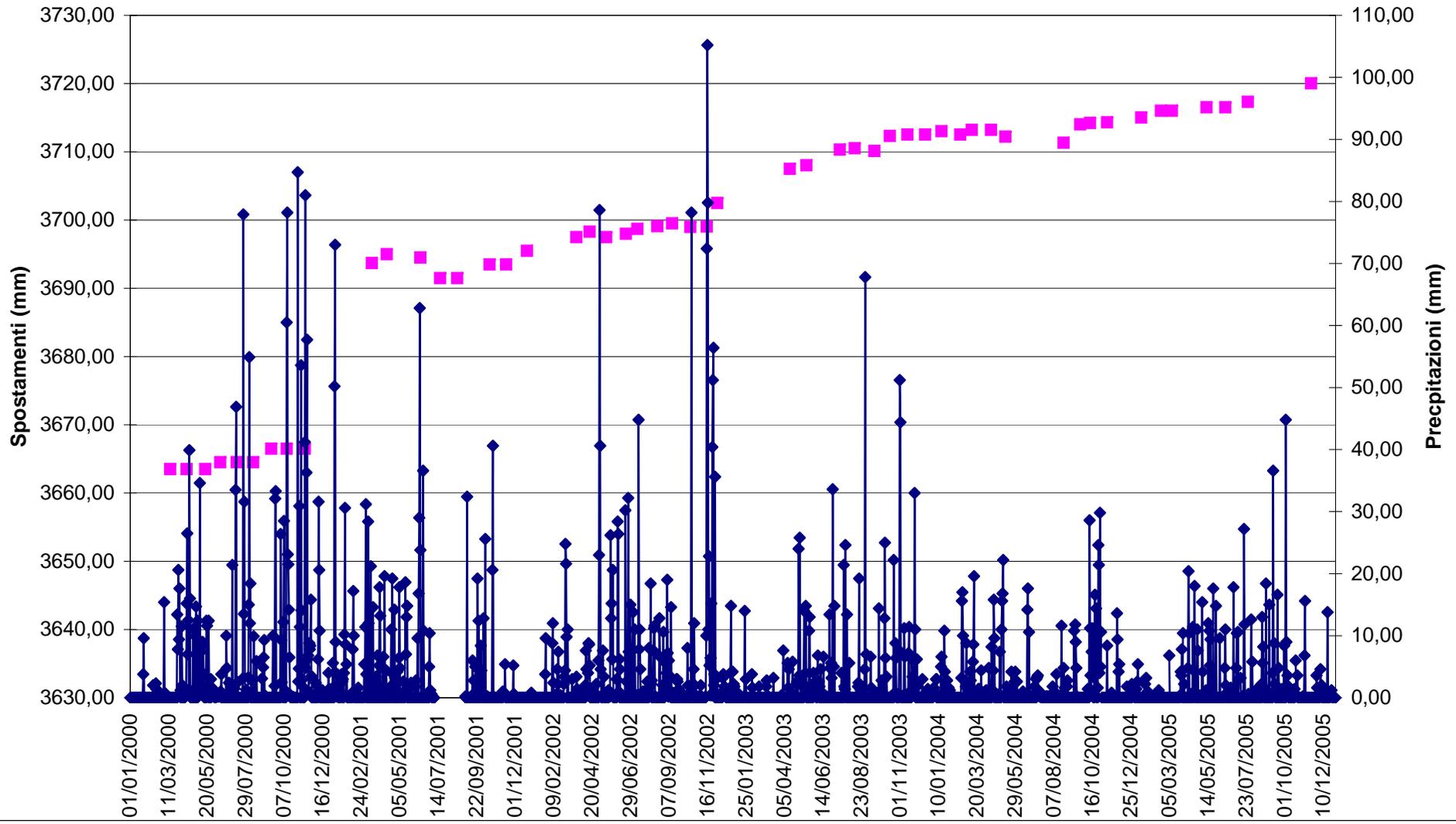
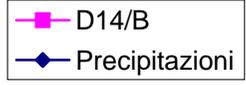
# DE8/B



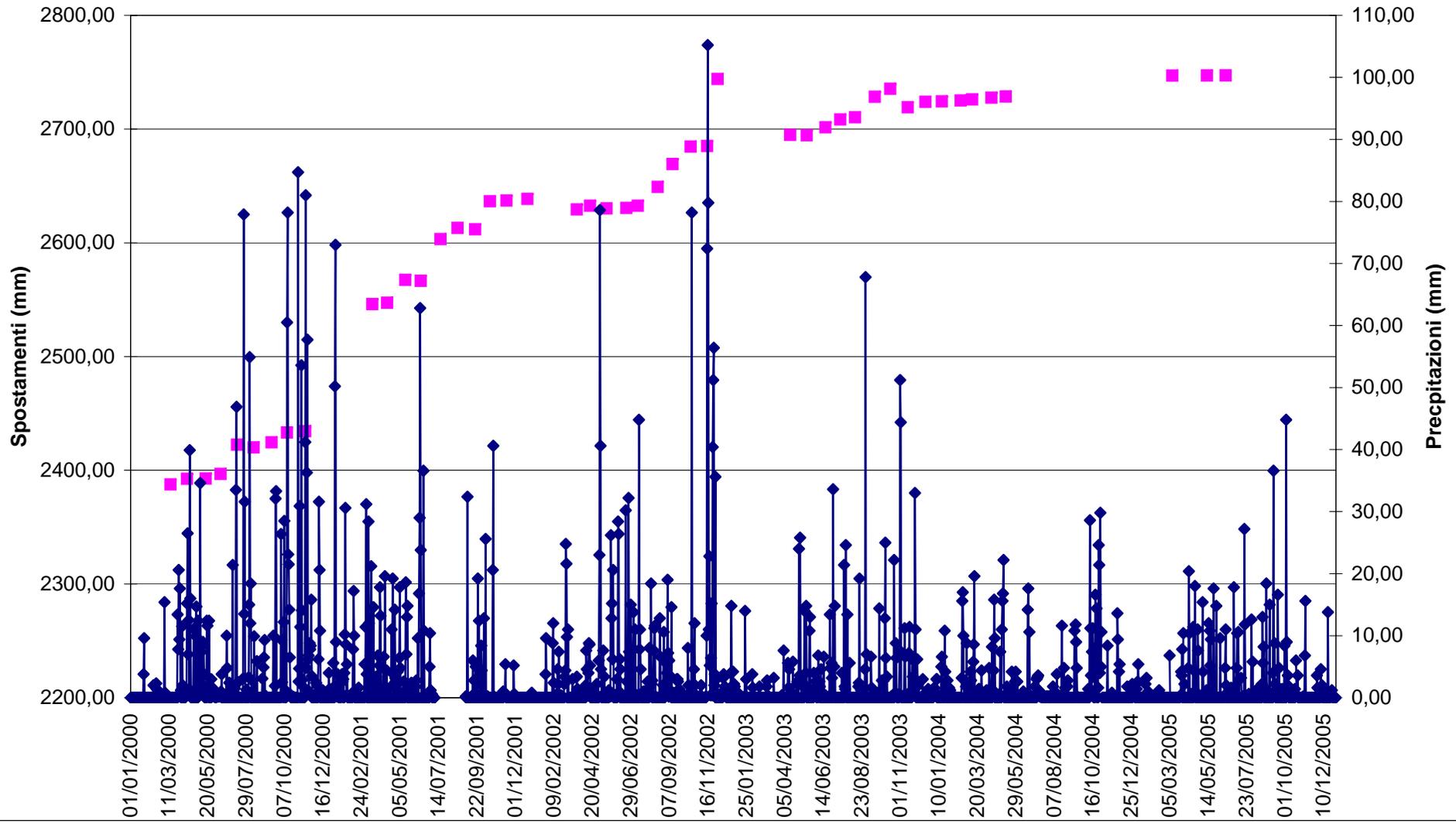
### D13/B



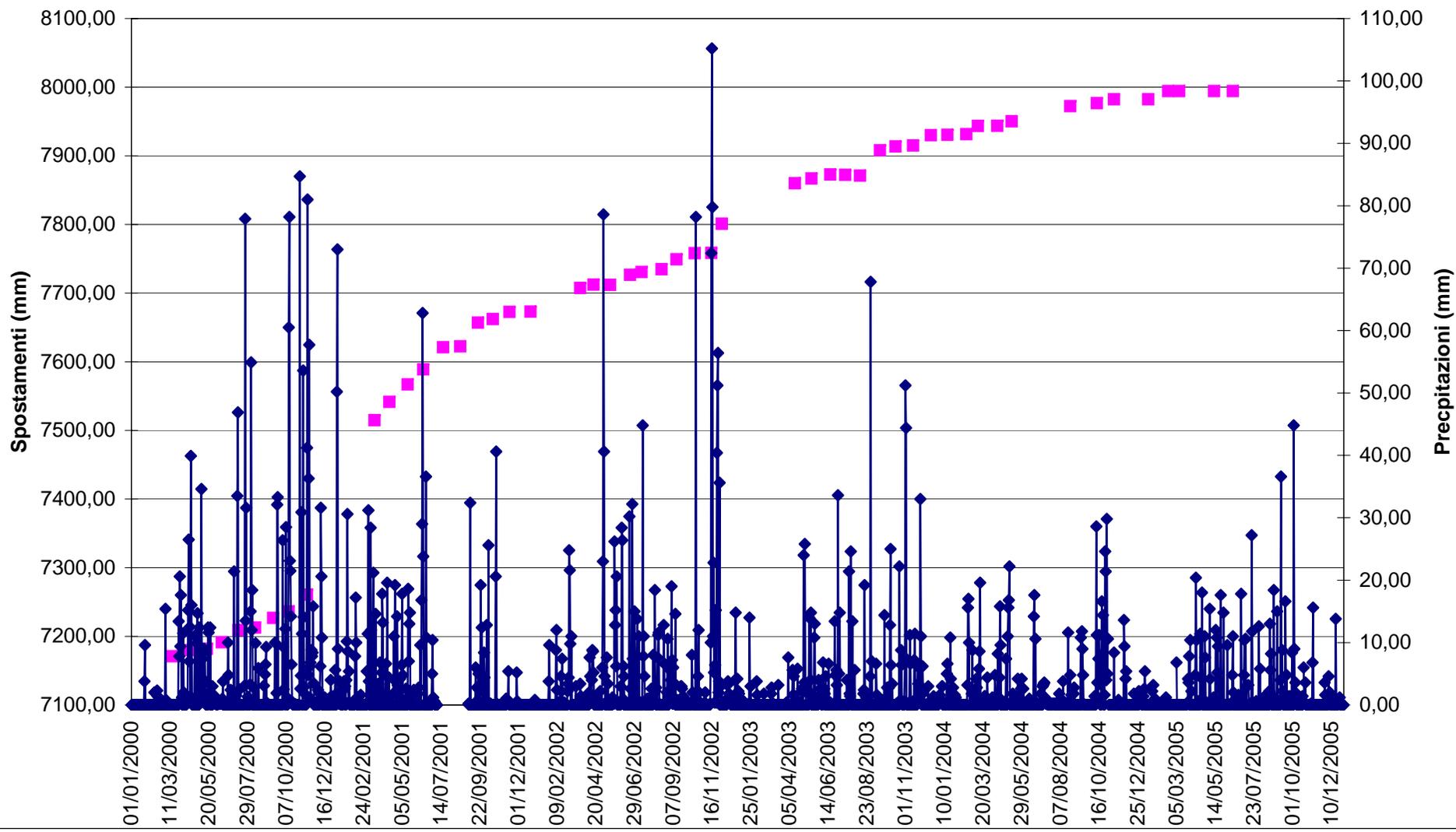
# D14/B



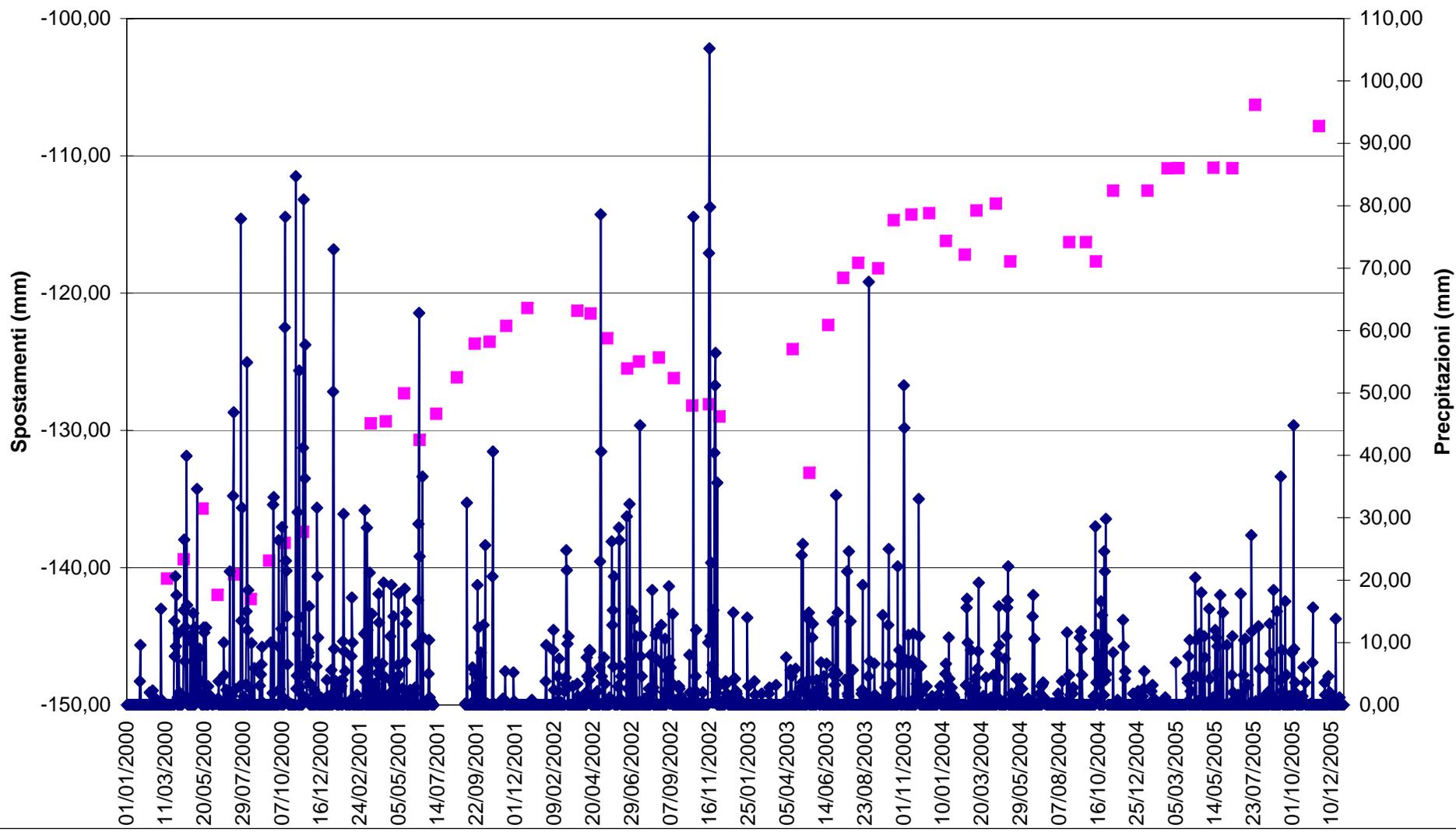
# D15/B



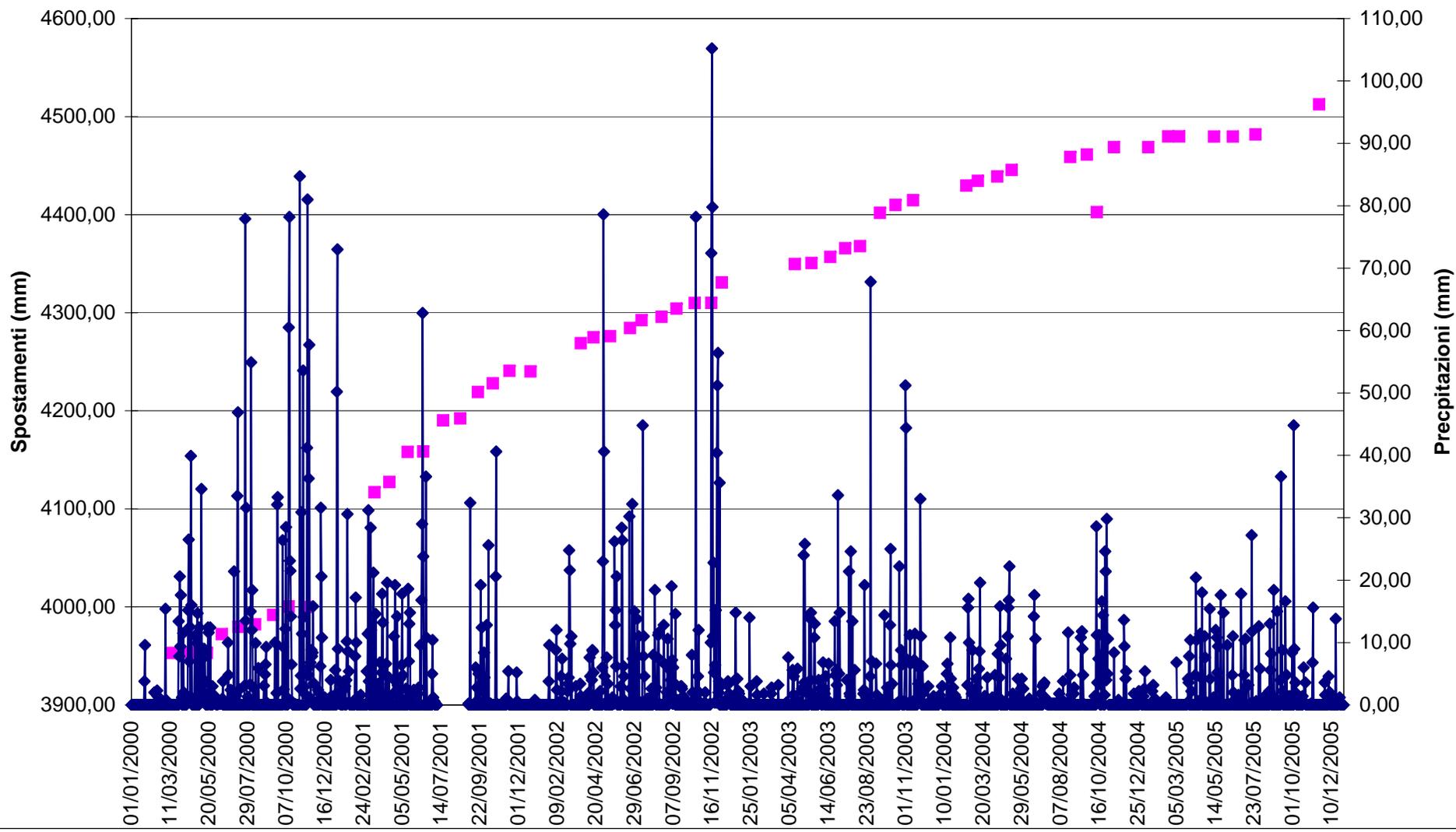
D16/B



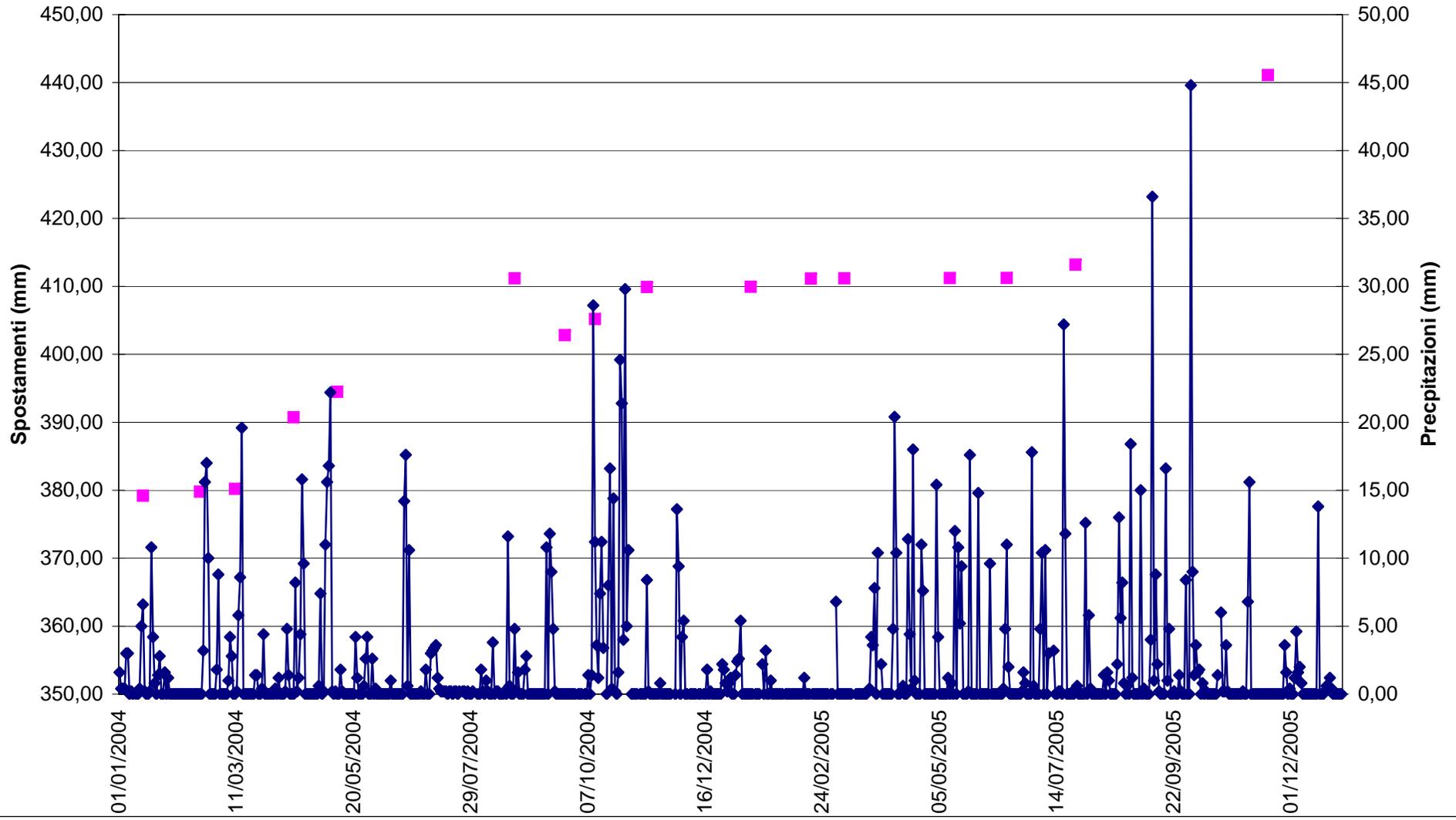
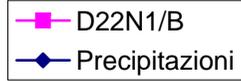
# D17/B



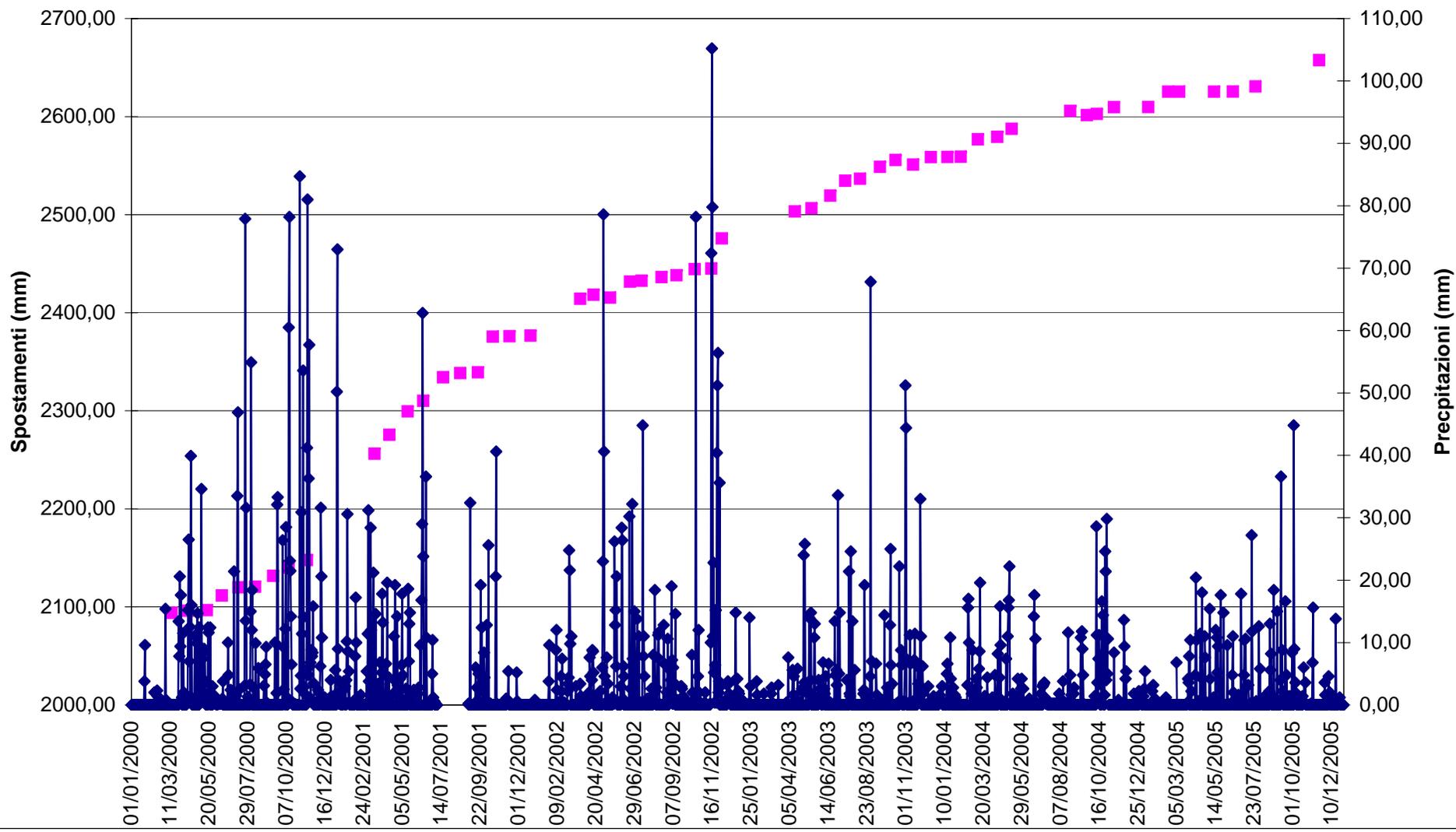
### D21/B



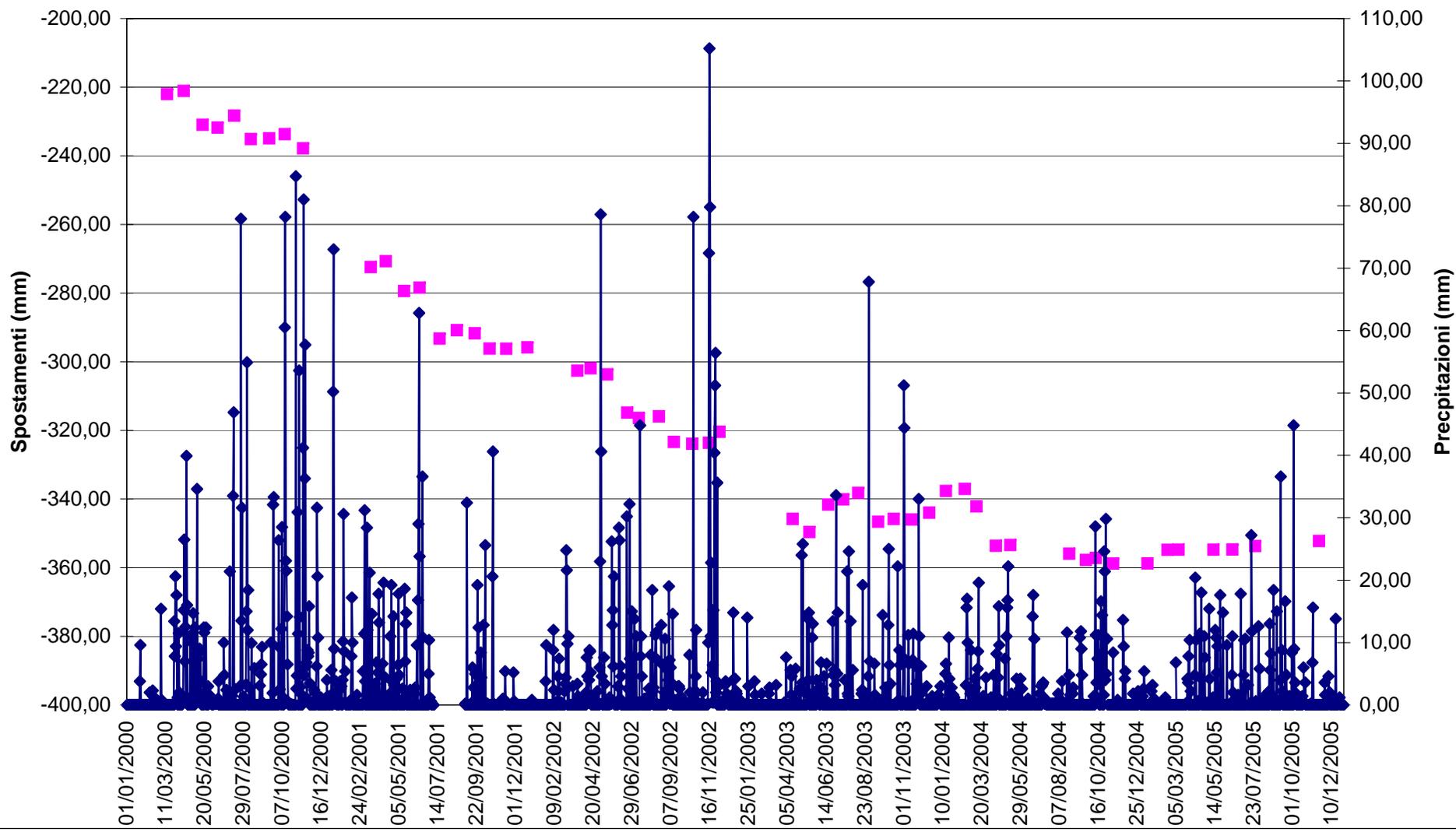
# D22N1/B



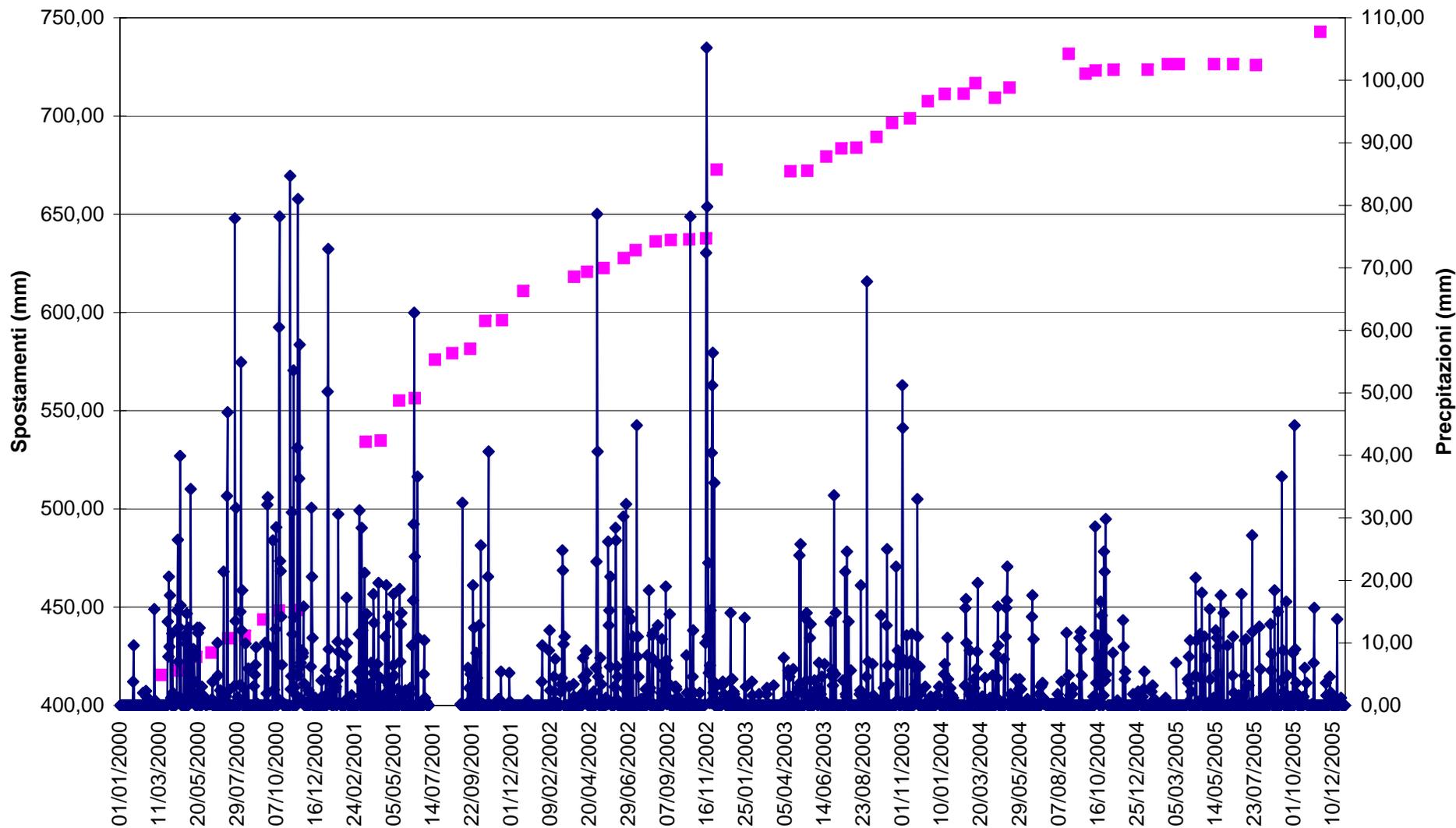
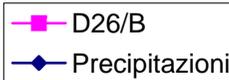
D24/B



### D25/B

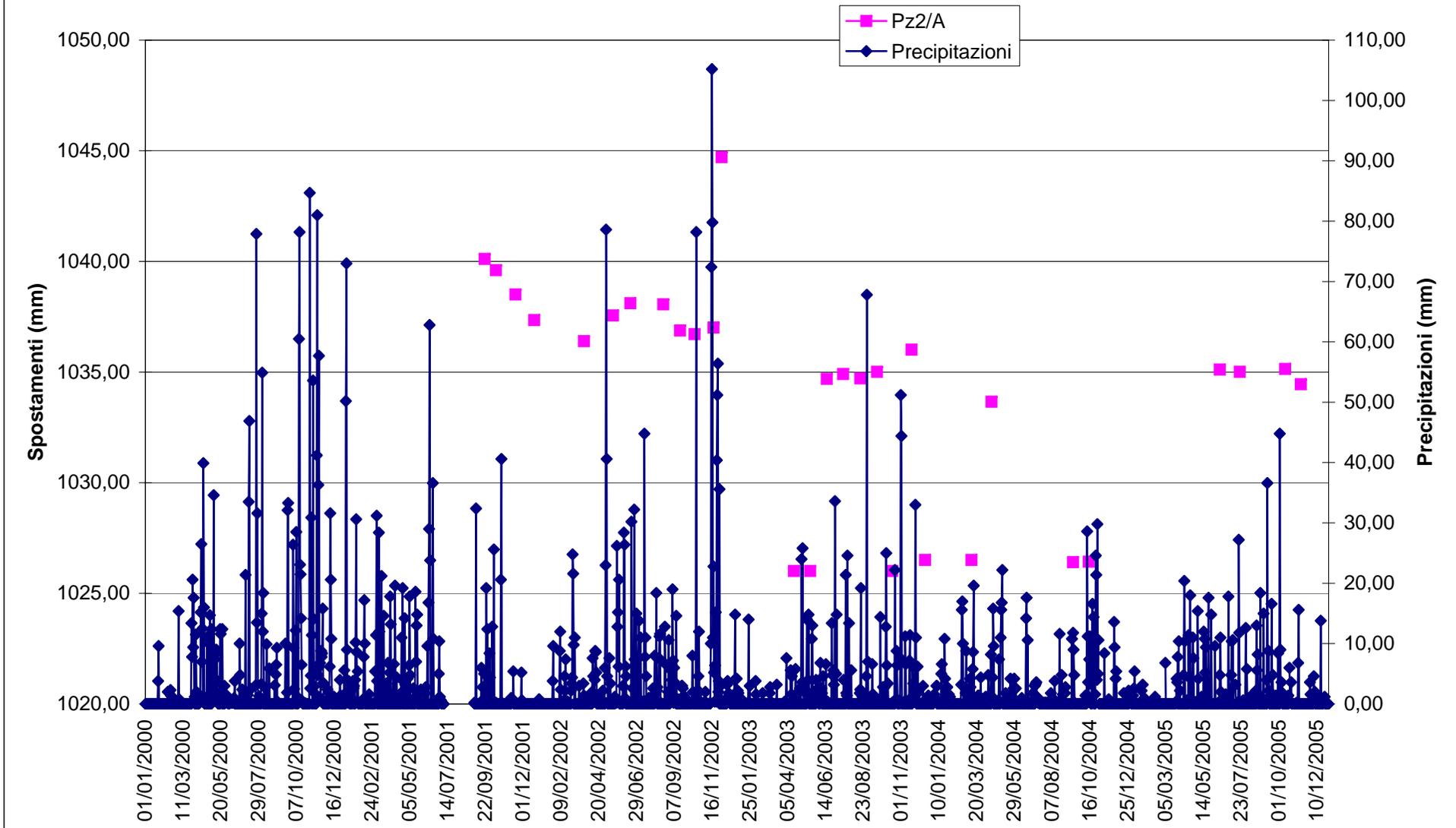


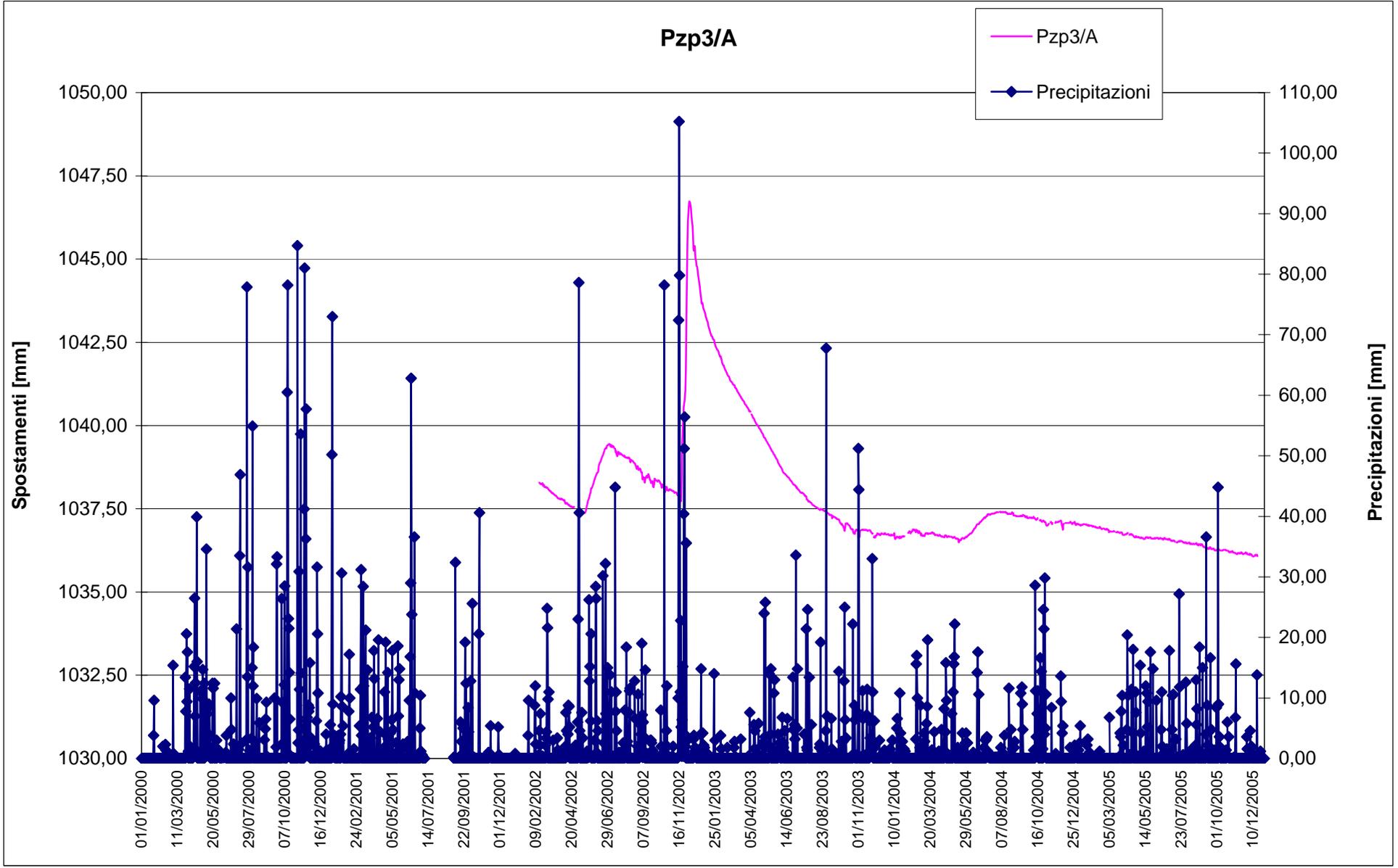
D26/B



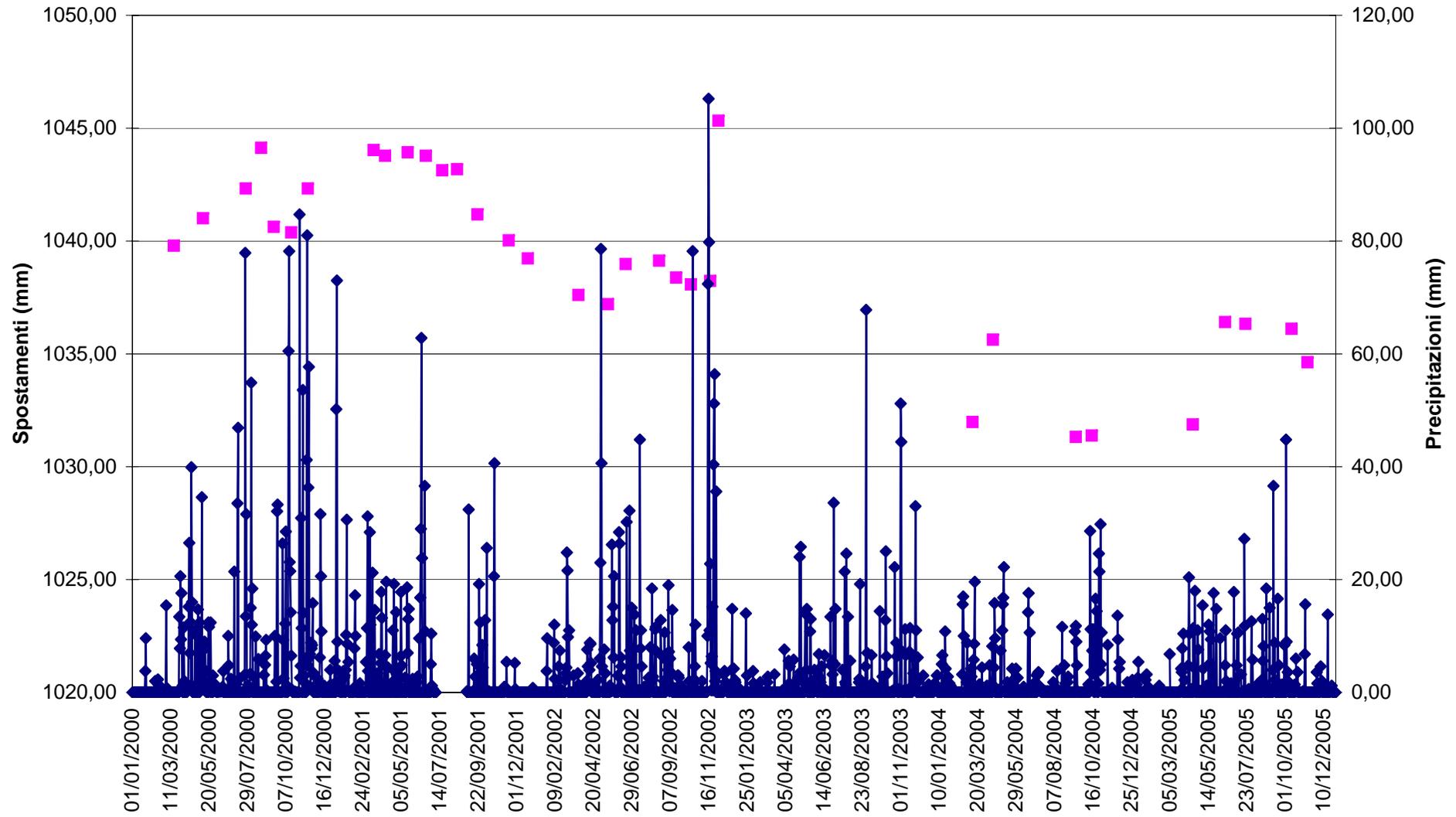
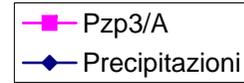
**PIEZOMETRI**

### Pz2/A

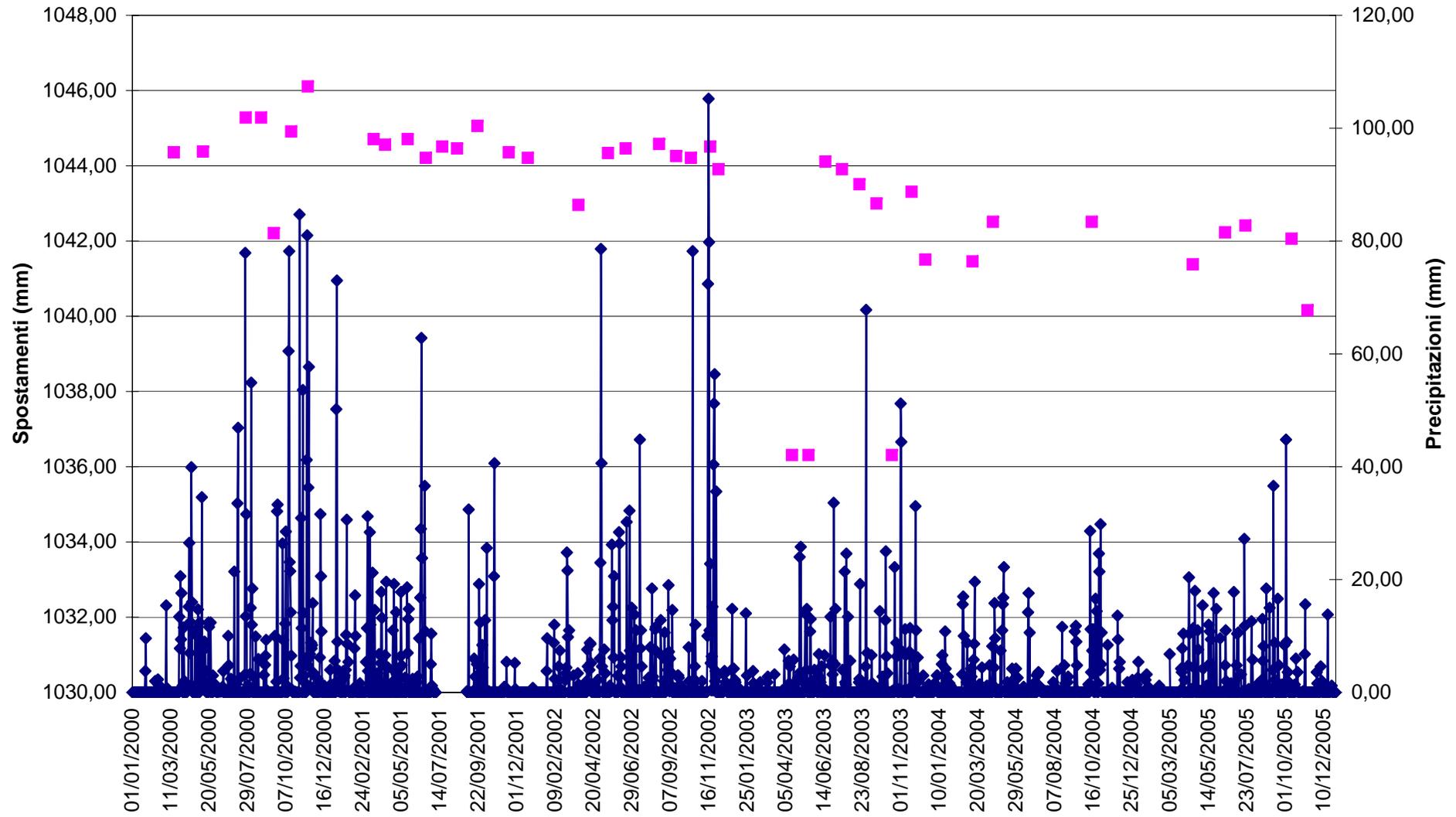
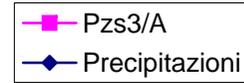




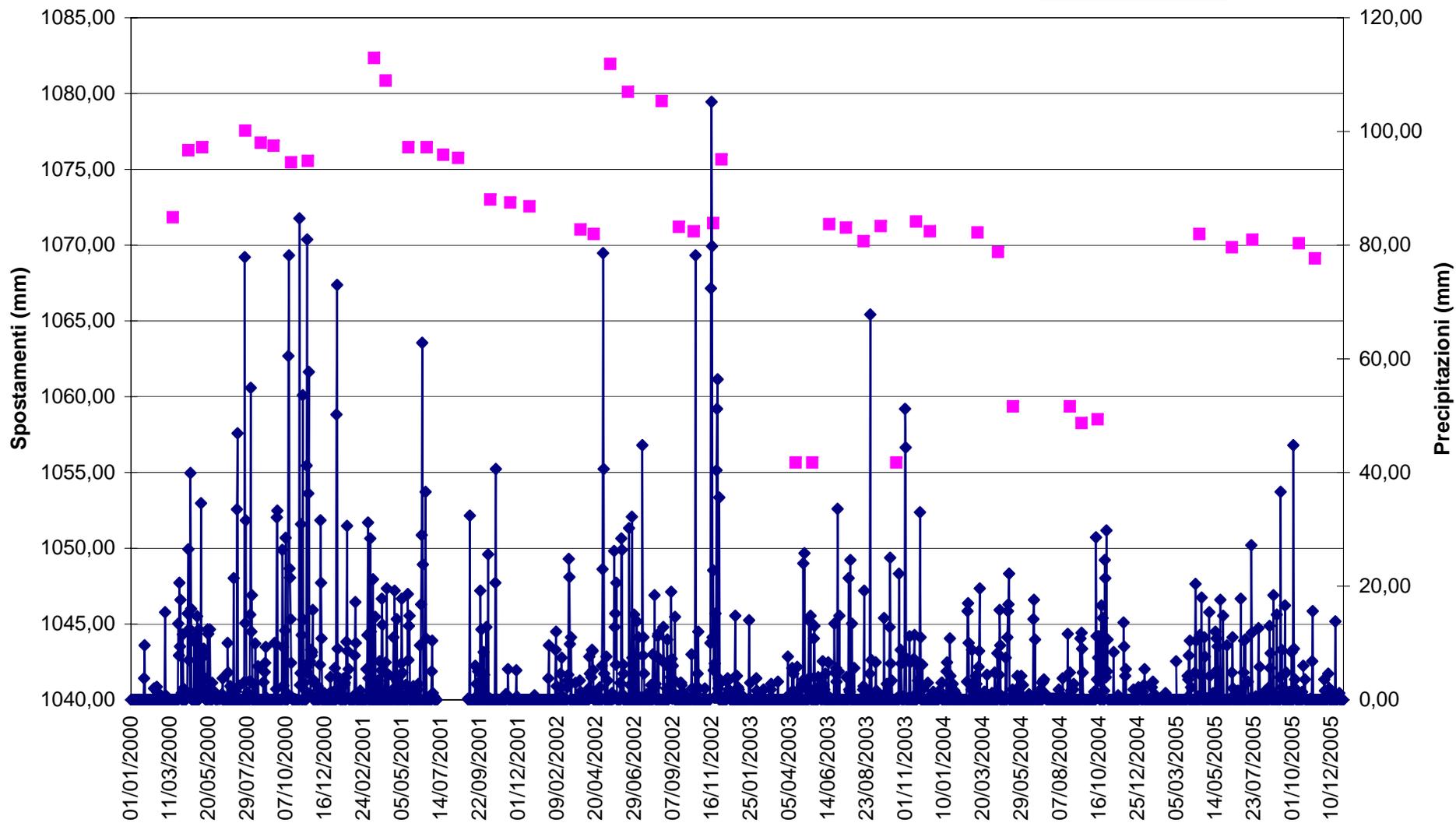
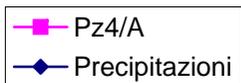
### Pzp3A manuale



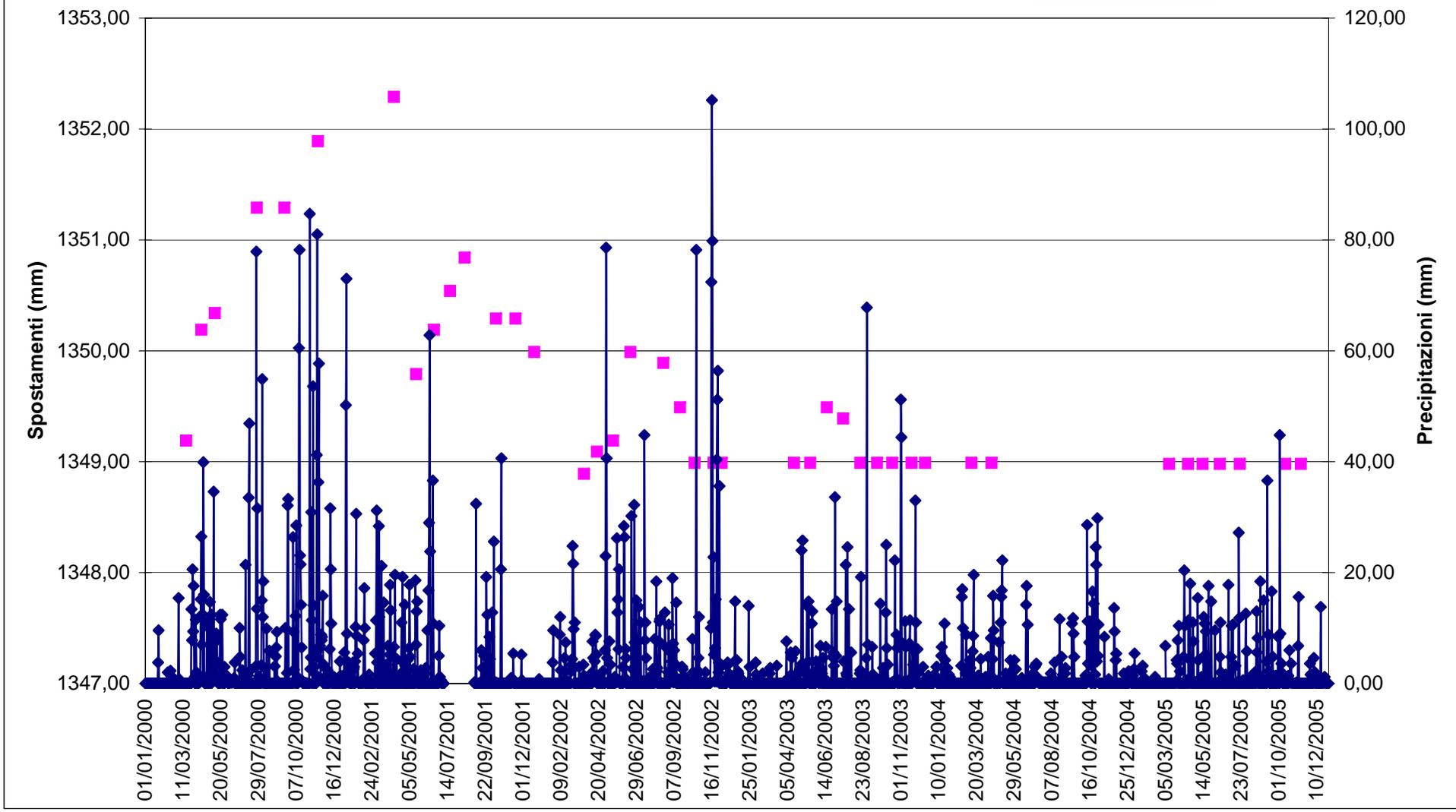
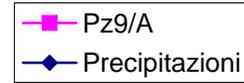
### Pzs3A manuale



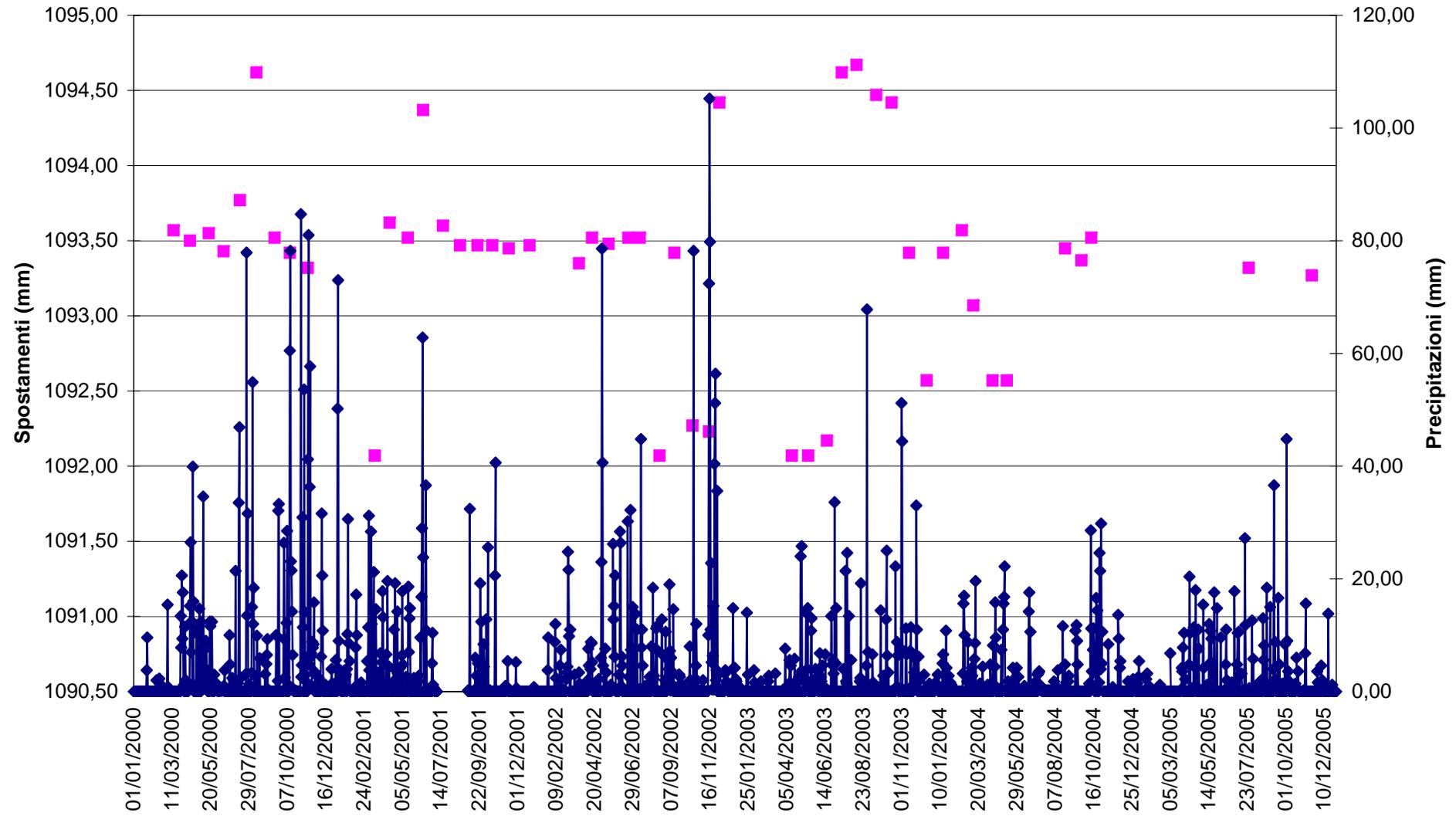
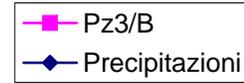
# Pz4A



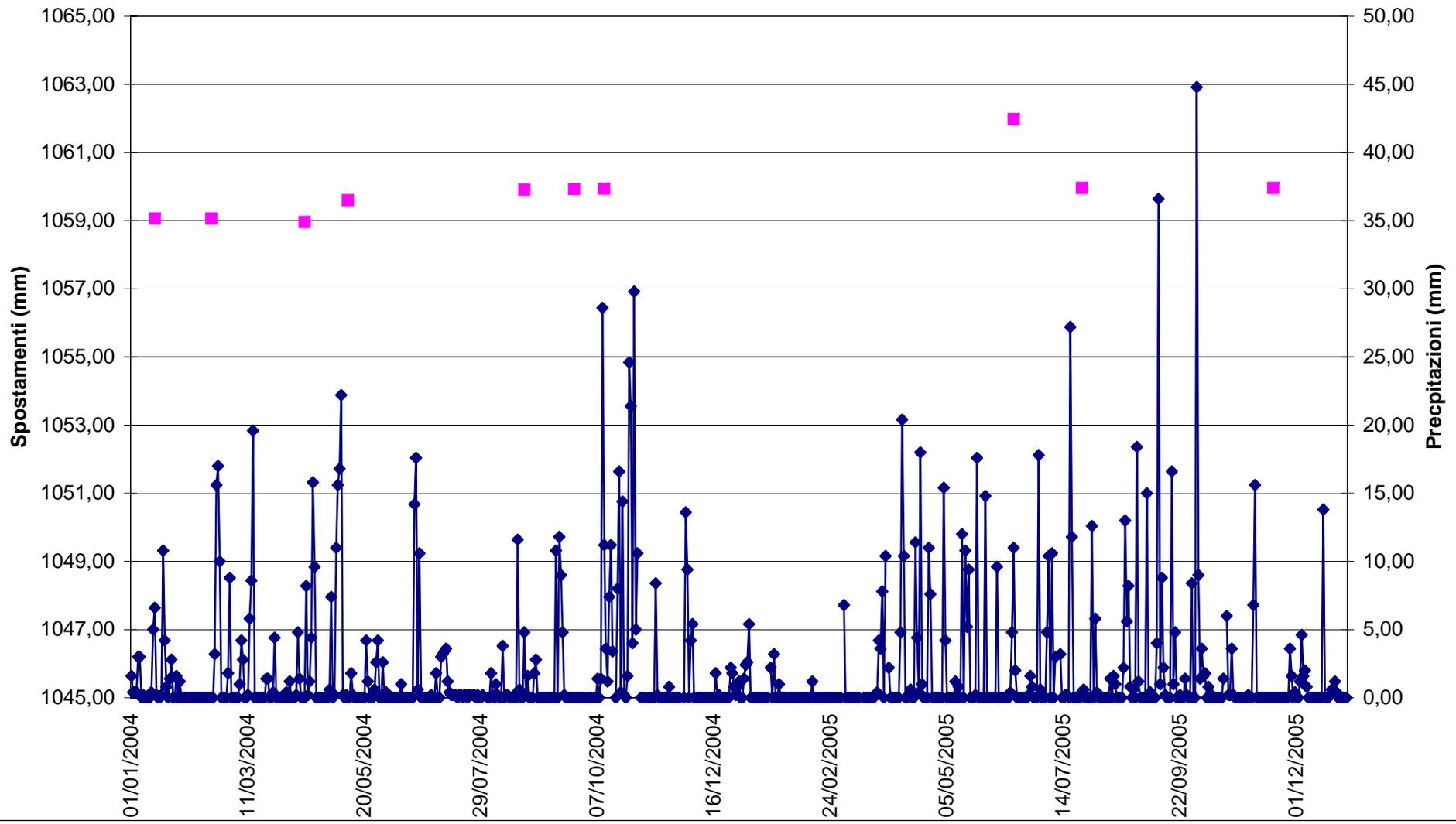
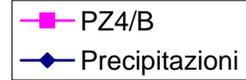
Pz9/A



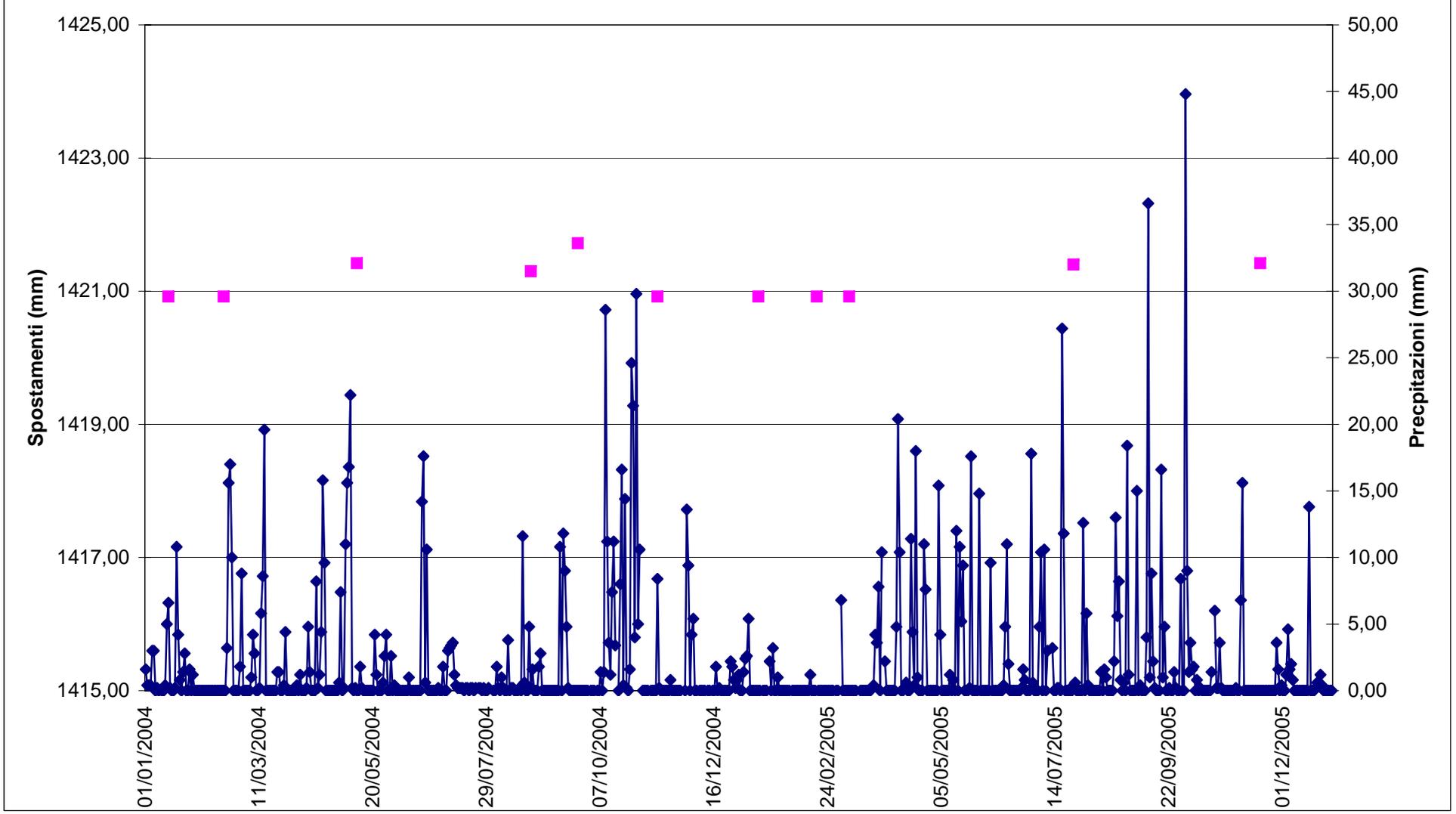
Pz3/B



Pz4/B



Pz1/C



Pz3/C

