CITTA' DI VENEZIA

Centro Previsioni
e
Segnalazioni Maree

P. Canestrelli, M. Mandich, P. A. Pirazzoli, A. Tomasin

Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1950 – 2000)

Wind, Depression and Seiches: Tidal Perturbations in Venice (1950 – 2000)

2001

Paolo Canestrelli
Centro Previsioni e Segnalazioni Maree
Comune di Venezia
pcanestrelli@tin.it

Matteo Mandich
Centro Previsioni e Segnalazioni Maree
Comune di Venezia
teoman255@tin.it

Paolo Antonio Pirazzoli
CNRS – Laboratoire de Géographie Physique
1 Place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex, France
pirazzol@cnrs-bellevue.fr

Alberto Tomasin
Università “Ca’ Foscari” e CNR-ISDGM, Venezia
tomasin@unive.it

Sommario *Contents*

Introduzione / Introduction **1**
12 novembre 1951 / November 12, 1951 ..... **9**
10 novembre 1957 / November 10, 1957 ..... **13**
13 dicembre 1957 / December 13, 1957 ..... **17**
15 ottobre 1960 / October 15, 1960 ..... **21**
4 novembre 1966 / November 4, 1966 ..... **25**
17 febbraio 1967 / February 17, 1967 ..... **29**
3 novembre 1968 / November 3, 1968 ..... **33**
26 novembre 1969 / November 26, 1969 ..... **37**
30 ottobre 1976 / October 30, 1976 ..... **41**
21 novembre 1977 / November 21, 1977 ..... **45**
15 novembre 1979 / November 15, 1979 ..... **49**
22 dicembre 1979 / December 22, 1979 ..... **53**
18 dicembre 1981 / December 18, 1981 ..... **57**
6 ottobre 1982 / October 6, 1982 ..... **61**
1 febbraio 1986 / February 1, 1986 ..... **65**
25 novembre 1990 / November 25, 1990 ..... **69**
9-10 dicembre 1990 / December 9-10, 1990 ..... **73**
24 novembre 1991 / November 24, 1991 ..... **77**
8 dicembre 1992 / December 8, 1992 ..... **81**
2 ottobre 1993 / October 2, 1993 ..... **85**
18 novembre 1996 / November 18, 1996 ..... **89**
20 dicembre 1997 / December 20, 1997 ..... **93**
6 novembre 2000 / November 6, 2000 ..... **97**
Conclusioni / Conclusions **101**
Ringraziamenti / Acknowledgements **104**
Bibliografia / References **105**

Introduzione

In questo lavoro, si presentano i fenomeni di "acqua alta" a Venezia in un modo particolare. Come breve chiarimento, bisogna ricordare che i livelli d'acqua che si osservano sono dovuti a due fattori piuttosto slegati fra loro: la normale marea astronomica (dovuta alla dinamica di terra-luna-sole) che, più o meno estesa nelle varie condizioni lunisolari, non è mai in grado di provocare inondazioni; poi, il contributo meteorologico ("storm surge", in inglese, ossia ondata di bufera), consistente nell'effetto del vento e della pressione atmosferica sull'acqua. Quest'ultimo effetto (di “rialzo marino” quando innalza il livello e analogamente di “ribasso” quando lo deprime) è più sfuggente dell'altro, in quanto prevedibile solo con grande impegno e con margini di tempo molto ridotti.
I due effetti (astronomico e meteorologico), nella realtà dei fatti, si sommano, per cui all'osservatore può capitare di misurare dei livelli eccezionali per origini diverse: una forte marea astronomica con un'aggiunta scarsa (ma sufficiente a provocare disagi) o viceversa, ovvero ambedue i fattori coalizzati. Poiché è il contributo meteorologico che merita (per la sua variabilità) la maggiore attenzione scientifica, per questo studio si sono individuati i casi di rialzi molto intensi, anche se la coincidenza con condizioni astronomiche può aver dato luogo ad "acque alte" più o meno intense, o addirittura a livelli osservabili di poco conto (caso di bassa marea astronomica).
La scelta qui effettuata, come si è detto, si spiega con l'interesse di analizzare le circostanze meteorologiche, ben note per la difficoltà di una previsione (e addirittura una descrizione) davvero puntuale.
Un altro aspetto potrebbe suscitare perplessità: se il mare, di anno in anno, varia di alcuni centimetri, in un senso o nell'altro, il suo livello medio (davanti alla laguna, ma anche in tutto l'Adriatico, e il Mediterraneo), se, poi, Venezia subisce variazioni altimetriche per fenomeni locali (la subsidenza), come si possono confrontare eventi diversi, a distanza di anni? Sono necessarie delle scelte, e qui si è deciso di confrontarsi con il livello medio del particolare anno considerato e non, ad esempio, con una media su lunghi periodi. Allora, il rialzo è definito, istante per istante, come il livello marino osservato meno il valore della marea astronomica riportata al livello medio di quell'anno, noto ovviamente solo a posteriori. Definita così la grandezza oggetto di studio, si sono considerati tutti i casi in cui i rialzi hanno raggiunto o superato i novanta centimetri, negli ultimi cinquant'anni (Tab. 1): novanta centimetri, quindi, tutti da attribuire alla particolare bufera e non all'abbassamento di Venezia o alle variazioni del livello medio a largo respiro.

Introduction

In this work, the phenomenon of "high water" in Venice (the exceptional level causing floods) is introduced with a particular point of view. In short, what is observed in the lagoon is due to two rather independent factors: the normal tide (due to astronomy, i.e. to the Earth-Moon-Sun dynamics), which, with a varying amplitude in time, cannot reach a flood level by itself, in any case; second, the meteorological contribution (storm surge), caused by wind and pressure effects.
The latter effect (which can act both to raise and to lower the water) is more whimsical, and it can be predicted only by large efforts and with a limited time lag.
Sea level measurements give the addition of the two factors, and an exceptionally high level can be reached in different conditions: a strong astronomical tide with a moderate surge (sufficient anyway to reach the alarm threshold), or vice versa, or with two substantial contributions at about the same time.
Since the meteorological contribution, due to its variability, is worth the greatest scientific attention, in the present study the most relevant surges have been selected, irrespective of the observed level, which may turn out to cause more or less heavy floods, or even not to show any relevance, depending on the astronomical tide that, at the time of the surge, is at any possible phase. The present choice is supported by the importance to analyze the weather scenario giving origin to a surge, since the forecast of the local, precise, atmospheric forcings (and even their hindcast) is challenging.
Another aspect of the present choice is important: since the yearly mean sea level changes by a few centimeters in either sense (in the lagoon, but also in the Adriatic and all over) and since Venice is subject to a varying subsidence, how can different surges be compared, if they occurred dozens of years apart? The choice has been adopted here to refer to the specific annual mean, and not (for example) to a long-period average.
Under these conditions, the surge value is defined, at every instant, as the observed sea level minus the astronomical tide embedding the mean sea level of that year (that was obviously not known at that time). Given this definition, all the events have been considered whose surge has reached or exceeded ninety centimeters, in the last fifty years (Table 1). These ninety centimeters (or more) were to be attributed, for what was said above, only to the particular surge and not to Venice subsidence or climatic sea level changes.

Studi precedenti (Dorigo, 1961, 1966, 1968; Ferla e Rusconi, 1994; Padoan e Dorigo, 1963; Rusconi, 1986) avevano già messo in relazione alcuni casi di "acqua alta" con le situazioni meteorologiche che avevano accompagnato il fenomeno. In questo lavoro si è cercato di considerare separatamente i vari fattori che contribuiscono al rialzo marino. Sommariamente, com'è noto, questi fattori sono costituiti dal vento (che con la sua azione superficiale può spingere le masse d'acqua) e dalle basse pressioni locali: dove l'atmosfera preme di meno, lì il mare tenderà a sollevarsi (effetto del barometro invertito). Ambedue i fattori sono invertibili, favorendo il ribasso, ma questo ora non interessa.
Com'è noto, osservando i grafici sia della marea osservata che di quella meteorologica (il rialzo marino) si nota un andamento oscillante: per la prima ciò è ovvio, pensando alla luna (o al sole) che prima si alza sull'orizzonte, poi si abbassa, con un moto chiaramente periodico. Per i rialzi, le oscillazioni qui presenti sono invece un fenomeno particolare, legato a caratteristiche locali: dopo un impulso dovuto ad una bufera, tutto l'Adriatico è coinvolto nelle "sesse", le oscillazioni caratteristiche di un bacino quasi chiuso com'esso è. Esse sono importanti per il possibile realizzarsi di acque alte (magari quando il tempo si è tranquillizzato da giorni) e sono state messe in evidenza. Per ogni periodo considerato, sono state anche filtrate via dai rialzi le sesse principali dell'Adriatico, che hanno un periodo di quasi 22 ore, e le sesse secondarie, il cui periodo avvicina le 11 ore. Quello che rimane è il "residuo", che può essere considerato come il rialzo medio (dopo deduzione delle oscillazioni delle sesse).
In maggiore dettaglio, va chiarito che l'operazione che mette in evidenza le sesse è necessariamente imperfetta: esse sono infatti oscillazioni libere, che andrebbero considerate in completa assenza di vento e di spinte dovute alla pressione, cosa irrealizzabile. Ci si affida così ad una procedura numerica che esalta le periodicità (già note) delle sesse, ma in modo forzatamente grezzo (con le oscillazioni che talvolta sembrano cominciare prima della bufera...). Essendo questa la procedura, si assegna una certa ampiezza alla sessa osservata, pur conoscendo i limiti di una simile affermazione. Com'è noto, si ricordi a questo proposito che l'ampiezza è sempre la metà dell'escursione tra colmo e cavo. Quanto poi al residuo (una volta tolte le sesse), si può avere una buona immagine del suo significato nel modo seguente: un vento (o un effetto depressivo) che inizia e perdura poi per lungo tempo determina un innalzamento stabile del livello (una media temporanea) attorno al quale oscillano le sesse. Ecco allora il residuo, destinato ad annullarsi con il tranquillizzarsi della situazione.

Previous studies (Dorigo, 1961, 1966, 1968; Ferla and Rusconi, 1994; Padoan and Dorigo, 1963; Rusconi, 1986) have already correlated a few cases of Venice floods to the meteorological situations that had caused them. In this work the different forcings that contribute to the surge have been separated. It is well known that these factors are the wind, that moves water with its surface stress, and the local low-pressure: where the atmosphere presses the sea with less intensity than in other places, there the sea will rise ("inverted barometer" effect). Both factors can occasionally act in a reverse way, giving low level, but this will not be considered here.
A glance at the observed tide record shows an oscillating behaviour, and this is true also for the graph of the pure meteorological contribution: for the former this is expected, due to the daily periodicity (for a fixed observer) of the Sun and the Moon in their rising and descending. But for surges this is a peculiar aspect, connected with local conditions: after a pulse due to a storm, the whole Adriatic is involved in "seiches", the oscillations of a semi-closed basin, as it is. They are important for the possible occurrence of floods, maybe when the weather has already improved for one or two days: the seiches are considered and plotted separately for each case.
This means that, in each event, a filter has extracted from the surge curve the main seiche of the Adriatic, with a well-known period close to 22 hours, and the secondary one, with 11-hour returns. By subtracting these oscillations from the meteorological contribution, a residual curve is obtained, to be considered as a temporary mean level due to the surge, around which the seiches oscillate.
In better detail, the procedure evidencing seiches is necessarily vulnerable: they are in fact free oscillations, to be measured in absence of wind and any other forcing (like pressure gradients), which is usually not realistic.
One relies on a numerical procedure enhancing periodicities (for the known "tones") related to seiches, but in a necessarily questionable way (with oscillations that sometime seem to originate before any storm...). With the convention of this procedure, one estimates a certain amplitude for the observed seiche, keeping in mind the limits of a similar statement. By the way, it is stressed here that amplitude is one half of the total range (crest to trough).
At this point a clear image is available of the residual (after excluding seiches): a wind (or a low-pressure effect) that begins and then persists for a certain time, causes, for that time, a stable rise of the level (a temporary mean), around which seiches swing. This is the residual, which is bound to peter out when the weather becomes better.

Per i casi qui presentati, scelti secondo il criterio sopra esposto, l'aspetto meteorologico è quello più sviluppato in dettaglio, dovendo mostrare il meccanismo che ha portato al rialzo in questione. Si dà, per ciascun caso, un'informazione descrittiva (a parole) dell'evoluzione del fenomeno, accompagnata dalle mappe meteorologiche relative (scelte in modo significativo per l'evoluzione stessa). Si tratta di carte dell'epoca, con uno stile tutt'altro che unitario. Inoltre, (ed è tutt'altro che una ripetizione) si mostrano in modo continuo, o più esattamente ogni tre ore, le grandezze atmosferiche più importanti (la pressione e il vento) di alcune stazioni, nei giorni interessati dal fenomeno (dove e quando si sono reperiti i dati). Oltre a Tessera o al Lido (che rappresentano la situazione vicino a Venezia), le altre stazioni meteorologiche utilizzate sono Trieste o Ronchi per l'alto Adriatico, Rimini o Ancona o Falconara (aeroporto di Ancona) per il medio Adriatico e Termoli o Bari o Brindisi o Leuca per il basso Adriatico.
Sotto forma di tabella unificata, si dà anche un'informazione di tipo estremo: quando la ricostruzione è stata possibile, si è riportata la raffica di vento più forte, in ciascuna stazione, nel giorno in cui si è verificato il rialzo studiato (Tab.2). Con una grandezza come il vento, sfuggente ad una misura precisa (tutti ne abbiamo esperienza), questa ulteriore documentazione è assai valida.
Una considerazione circa il riferimento temporale: nel mondo scientifico si tende ad osservare sia la meteorologia che i fenomeni marini con una visione d'insieme, con una scala che normalmente scavalca i fusi orari. Per questo si usa il tempo universale (TU), quello del meridiano di Greenwich. Esso mostra un'ora in meno che nell'Europa centrale (trascurando le ore legali). Non ci si stupisca quindi di trovare una certa acqua alta, poniamo, alle 12, quando altri testi la riportano alle 13.
Sempre parlando dei tempi, si noti che le elaborazioni si fondano sistematicamente su valori osservati allo scadere di ogni ora: confronti, medie, la stessa scelta dei rialzi maggiori di 90 centimetri seguono questo criterio. Solo nel riportare il livello massimo osservato in ciascun caso si è precisato il minuto ed il livello effettivamente raggiunto, per una specie di rispetto storico di quanto si legge nelle tabelle ufficiali.
Si considerino ora le diverse grandezze meteorologiche riportate. La pressione, misurata in hPa (o in millibar, nella vecchia dizione), sarà sempre in diminuzione al passaggio della perturbazione che causa il fenomeno, ma con modalità diverse lungo l'Adriatico, il che (assieme al vento) determina la varietà dei casi. Si è già ricordato che la diminuzione di pressione determina l'aumento locale del livello del mare, con tutte le oscillazioni che questo può innescare.
La rappresentazione del vento richiede di più, dovendosi dare direzione e velocità. La direzione è quella di provenienza e si indica in gradi: 90° da est, 360° da nord, e così via, mentre la direzione 0° indica calma di vento.

For the events considered here, using the selection explained above, the meteorological aspect is the most developed in detail, with the aim to explain the dynamics that gave origin to the particular surge.
For each case, a verbose description of the phenomenon is given, supported by weather maps, chosen as the most significant for the evolution. The maps were drawn at the time of the event and they are obviously not unitary in style.
Further - and it is not a repetition - the most relevant meteorological variables (pressure and wind) are shown for a few stations, in a continuous, or better three-hourly, graph, for the days surrounding the event (when and where data were available).
In addition to Tessera and Lido (that give the situation close to Venice), the other weather stations used were Trieste or Ronchi for the northern Adriatic, Rimini or Ancona or Falconara (the airport of Ancona) for the central Adriatic, and Termoli or Bari or Brindisi or Leuca for the south.
Using a unified table, the information about the extreme has been reported: when possible, the maximum gust has been shown, for each station, on the day of the surge peak (Table 2). This is quite significant since wind is very difficult to measure in a stable way, as we all know from our experience.
There is an important remark about time reckoning: in scientific terms, both meteorological and marine phenomena are observed synoptically, with a view that disregards time zones. For this reason the universal time (UT) is used, in fact the Greenwich mean time. It is one hour late with respect to central Europe (forgetting daylight-savings corrections), so that a certain event may be reported here as occurred at noon, while in other texts one finds 1 PM.
Another problem related to time concerns the fact that our processing refers to recordings taken at exact hourly values: comparisons, averages and even the 90 cm threshold for surges to be considered here, all obey this criterion.
Only while reporting the maximum level really reached in each case, the precise minute and the connected value are given, for a kind of historical respect for the content of the official tables.
A few comments about the meteorological variables considered here. Air pressure, measured in hPa (corresponding to the old-fashioned millibar), is expected to drop at the arrival of the storm, but this occurs differently along the Adriatic. This causes (together with wind) the variety of the events. Pressure decrease, as explained above, implies the local rise of sea level, with all the following oscillations.
Representing wind requires more, since both speed and direction are expected. Direction refers to the origin of the wind and is given in degrees: 90 from the east, 360 from the north and so on, while zero means calm. Speed is given in knots.

La velocità è in nodi. La direzione, si noti, è scritta lungo il bordo del cerchio rappresentativo, mentre i vari raggi del cerchio (ossia il procedere circolare, orario) determinano il giorno e l'ora dell'osservazione. I dati mancanti si identificano dalla mancanza di direzione, abbinata ad una fittizia velocità zero. L'importanza del vento è dominante: lo scirocco, vento di sud-est, ha a disposizione tutto l'Adriatico per trascinare l'acqua verso il bordo chiuso ed alzare cosi` il livello a Trieste e Venezia. Minore effetto ha la bora, vento di nord-est, che soffia trasversalmente all'asse del mare. Siccome è frequente il caso di bora a Trieste e a Venezia, mentre lo scirocco soffia sul medio e basso Adriatico, un osservatore locale, al nord, tende a considerare la bora colpevole delle inondazioni, ma questo è inesatto.
Ancora circa il vento, così importante e così sfuggente: esso viene praticamente sempre misurato da stazioni costiere, mentre i valori efficaci sarebbero da cercare in mare aperto. Ricordiamo, tra tanti studi, quello che valuta il vento rivierasco come ridotto del 40% rispetto a quello marino nel basso Adriatico (Nania, 1969) ed anche dell'80% nel medio e alto Adriatico (Accerboni e Manca, 1973). Ricordiamo pure, a questo proposito, i molti progetti e tentativi per avere misure di vento da piattaforme od apposite boe. Attualmente, la piattaforma oceanografica del CNR (che sostiene anche attrezzature del Centro Maree di Venezia) è la più continua risposta a questa necessità.
Sempre per completezza di informazione, bisogna considerare che i livelli osservati sono riferiti allo zero mareografico del 1897 (ossia, per dire rozzamente, ad un certo livello immutabile rispetto a Venezia e alle sue costruzioni: se Venezia affonda sembra che il mare si alzi). I valori di livello, inoltre, sono tratti dal mareografo di Punta della Salute (o Punta della Dogana) a Venezia. Si ricorderà che l'onda mareale giunge a Venezia attraverso le bocche di porto e questo passaggio (con tutta la dinamica interna della laguna) implica piccole deformazioni e ritardi. Ci si domanda se fossero da preferire le registrazioni prese sul mare, come al mareografo di Diga sud Lido. Non è così: queste ultime, specie negli eventi di forte intensità qui considerati, si presentano assai meno affidabili per la loro esposizione e soggette ad effetti locali.

I dati di marea osservati provengono dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Venezia (già Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque), mentre i dati e le carte meteorologiche provengono dal Servizio Meteorologico dell'aeronautica Militare e dal Servizio Meteorologico Tedesco.

To be noted that the direction is written close to the circumference of the circle drawn, while the rays (i.e. the circular, clockwise advancing) determine the time of the observation. Missing data are recognized by the lack of any direction number, with a fictitious zero speed.
The practical importance of the wind for our surges is prevailing: sirocco, the south-easterly wind, can act on a large part of the Adriatic to drag water towards the dead end, and this way it raises the level in Trieste and Venice.
Bora, the north-easterly wind, has a smaller effect, since it blows at a right angle with the axis of the sea. Since it is frequent to observe bora in Trieste and Venice, while sirocco is blowing on the central and the southern Adriatic, a local observer, in the north, tends to consider bora the main cause of the flood, but this is incorrect.
More about wind, very important and very elusive: almost all the times it is measured in coastal stations, while effective values should be obtained over the open sea. Among many studies, we quote the one that estimates the shore wind as reduced by 40% with respect to the offshore magnitude in the southern Adriatic (Nania, 1969) and even 80% in the middle and northern Adriatic (Accerboni e Manca, 1973).
In this sense, there are many projects and attempts to have wind measurements from platforms or buoys. At present, the CNR oceanographic platform (where also instruments of the Centro Maree of Venice are operating) is the most effective fulfilment of this demand.
For a precise interpretation of the data reported here, the observed levels are referred to the mean sea level of 1897 (considered, roughly speaking, as a zero that never changes with respect to Venice: if the town sinks, the sea seems to rise).
Moreover, the water levels come from the tide gauge of Punta della Salute (or Punta della Dogana) in Venice. It is well known that the tidal wave reaches Venice passing through the inlets and this transfer, together with the complex dynamics of the lagoon, implies deformations and delays.
The question arises whether the records taken on the sea (like at Diga Sud Lido) were to be preferred. It is not so: these latter observations, particularly in the violent conditions considered here, turn out to be less reliable due to the scarce protection of the instruments and to local distortions.

The observed values of the sea level are due to the Ufficio Idrografico e Mareografico of Venice (formally Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque), while meteorological data and maps come from the Servizio meteorologico dell'aeronautica Militare Italiana and the Deutscher Wetterdienst.

Tabella 1 - Eventi di marea a Venezia con contributo meteorologico ≥ 90 cm (1951-2000)

Table 1 – Tide events in Venice with surge contribution ≥ 90 cm (1951-2000)

n°	**data** *date*	**osservata (cm)** *observed (cm)*	**ora T.U.** *hour T.U.*	**contr. meteo (cm)** *surge contr. (cm)*	**ora T.U.** *hour U.T.*
1	12 Nov. 51	151	7.05	109	2.00
2	10 Nov. 57	120	12.00	98	14.00
3	13 Dec. 57	98	3.05	94	20.00
4	15 Oct. 60	145	6.55	93	6.00
5	04 Nov. 66	194	17.00	185	17.00
6	17 Feb. 67	107	20.00	94	19.00
7	03 Nov. 68	144	6.30	93	5.00
8	26 Nov. 69	138	0.05	88*	0.00
9	30 Oct. 76	124	5.30	90	11.00
10	21 Nov. 77	120	21.20	93	22.00
11	15 Nov. 79	118	10.00	103	12.00
12	22 Dec. 79	166	8.10	120	8.00
13	18 Dec. 81	128	17.25	116	18.00
14	06 Oct. 82	132	12.35	96	15.00
15	01 Feb. 86	158	2.45	101	3.00
16	25 Nov. 90	116	14.00	99	14.00
17	10 Dec. 90	128	2.35	114	9 Dec. 90 20.00
18	24 Nov. 91	107	13.00	100	16.00
19	08 Dec. 92	142	9.10	108	13.00
20	02 Oct. 93	112	21.10	95	18.00
21	18 Nov. 96	134	6.25	93	8.00
22	20 Dec. 97	125	10.55	90	11.00
23	06 Nov. 00	144	19.35	118	21.00

(*) Questo evento è stato incluso in quanto il rialzo supera i 90 cm al momento del massimo anche se il valore alla scadenza oraria più prossima ne rimane inferiore (si veda la discussione nell'introduzione).

(*) This event has been included since the surge is greater than 90 cm at the time of its maximum, even if at the clousest hour the value remains lower (see the introduction).

Tabella 2 - Raffiche massime quotidiane [velocità in nodi (ora) direzione] in stazioni adriatiche per giorni di rialzi ≥90 cm a Venezia (Punta della Salute)

Table 2 - Maximum daily gusts [speed in knots (hour) direction] at Adriatic stations in days of surges ≥90 cm at Venice (Punta della Salute)

Maximum surges	Trieste	Ronchi	Lido	Tessera	Rimini	Falconara	Termoli	Bari	Brindisi	Leuca
15 Oct. 1960, h 5-7, 93 cm	40 120°				40 180°	42 200°			38 160°	
4 Nov. 1966, h 17, 182 cm	41 140°			52 140°	41 220°	47 130°		48 170°	58 140°	44 170°
3 Nov. 1968, h 5, 96 cm	37 (h 2) 120°		48 (h 4) 130°	45 (h 4) 140°	33 (h 7) 170°	33 (h 1) 140		38 (h 1) 180°	40 170°	39 (h 19) 210°
26 Nov. 1969, h 0, 88 cm	56 (h 1) 190°		44 (h 1) 260°	40 (h 13) 230°	41 (h 13) 220°			40 (h 10) 240°	39 210°	38 (h 1) 220°
30 Oct. 1976, h 11, 90 cm	53 (h 14) 240°	53 (h 14) 240°	37 (h 10) 120°	45 (h 10) 130°	33 (h 13) 160°	29 (h 7) 150°	53 (h 14) 240°	54 (h 4) 190°	48 140°	44 (h 8) 150°
21 Nov. 1977, h 22-23, 93 cm	40 (h 17) 130°	38 (h 22) 170°		23 (h 17) 40°	30 (h 16) 120°	23 (h 16) 150°	30 (h 22) 170°	25 (h 16) 200°	20 150°	31 (h 19) 180°
15 Nov. 1979, h 12, 103 cm	27 (h 10) 120°	37 (h 10) 140°		32 (h 10) 170°	34 (h 10) 200°	31 (h 16) 210°	37 (h 10) 140°	26 (h 5) 200°	38 180°	39 (h 17) 190°
22 Dec. 1979, h 8, 120 cm	33 (h 4) 60°	40 (h 8) 80°		42 (h 7) 60°	41 (h 14) 160°	38 (h 5) 130°	40 (h 8) 80°	40 (h 10) 170°	48 360°	47 (h 4) 130°
18 Dec. 1981, h 18, 116 cm	38 (h 16) 110°	49 (h 19) 160°		30 (h 16) 50°	35 (h 16) 150°	30 (h 13) 130°	49 (h 19) 160°	29 (h 10) 200°	44 170°	32 (h 16) 150°
6 Oct. 1982, h 15, 96 cm	35 (h 13) 180°	48 (h 13)		35 (h 16) 220°	43 (h 19) 210°	32 (h 22) 200°	48 (h 13)	35 (h 11) 180°	45 250°	34 (h 10) 130°
1 Feb. 1986, h 2, 101 cm		42 (h 2) 90°		43 (h 2) 70°	19 (h 1) 210°	34 (h 1) 130°	42 (h 2) 90°	57 (h 2) 160°	27 140°	
25 Nov. 1990, h 14, 99 cm	45 (h 13) 90°			46	36 (h 17) 170°				14 140°	
9 Dec. 1990, h 20, 114 cm	29 (h 14) 110°				27 (h 19) 130°				28 120°	42 (h 22) 170°
10 Dec. 1990, h 2, oss: 126 cm	34 150°	35 (h 10) 180°			47 (h 7) 190°		35 (h 10) 180°			51 (h 8) 180°
24 Nov. 1991, h 16, 100 cm	59 (h 14) 50°	42 (h 14) 70°		41 (h 13) 30°	46 (h 13) 60°	49 (h 8) 20°	42 (h 14) 70°		36 140°	58 (h 10) 230°
8 Dec. 1992, h 12-13, 108 cm	58 (h 19) 50°				33 (h 22) 60°				35 130°	37 (h 16) 210°

Nota: Le raffiche massime sono qui riportate per i casi in cui sono state reperite. Nell'evento del dicembre 1990 si sono considerati i due giorni contigui, interessati rispettivamente dal rialzo massimo e dal massimo livello osservato.

Note: The maximum daily gusts given here refer only to the cases where they were available. In the event of December 1990 the two successive days have been considered, that respectively refer to the maximum surge and to the maximum observed level.

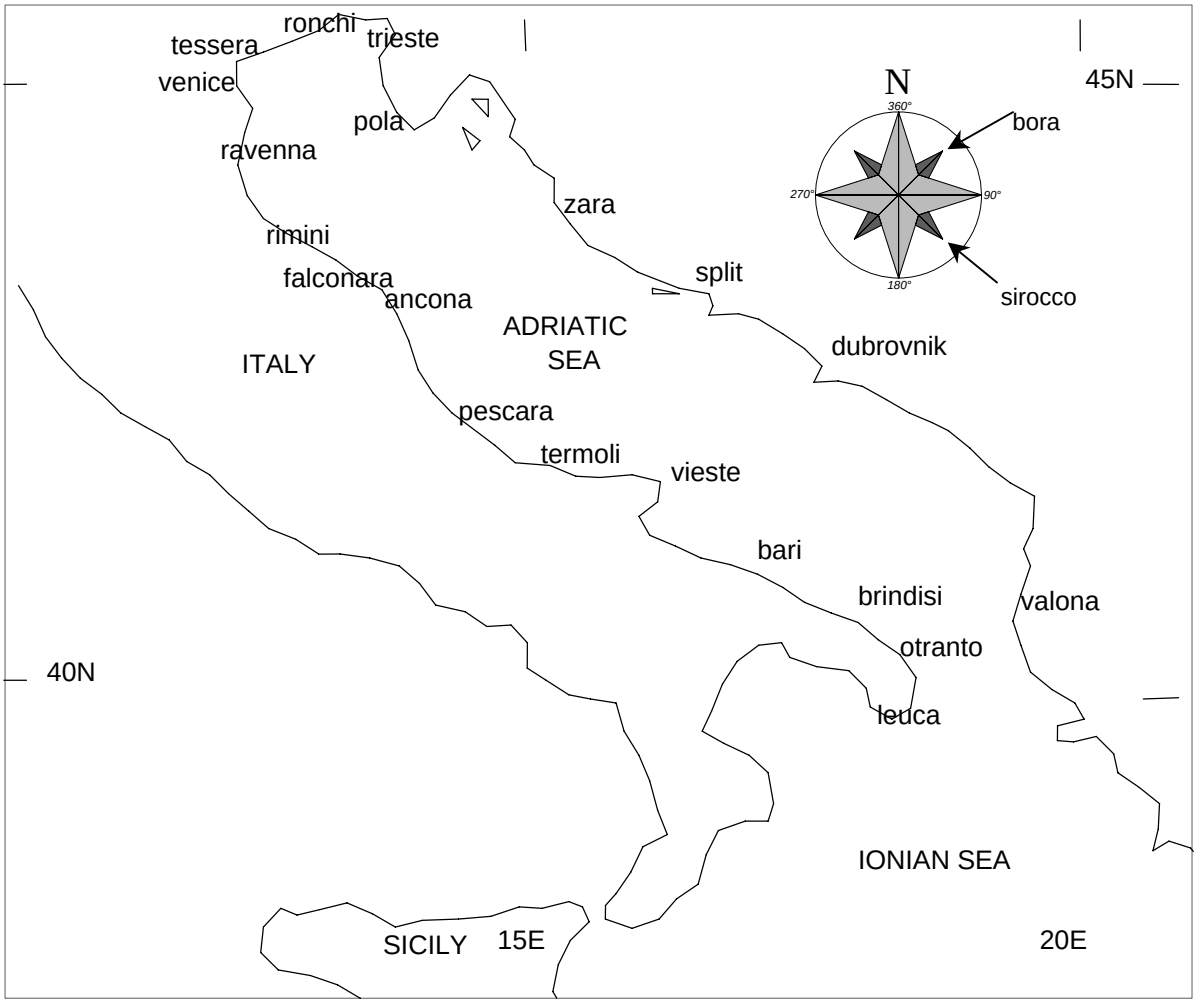


Fig. 1: Carta di localizzazione

Fig. 1: Location map

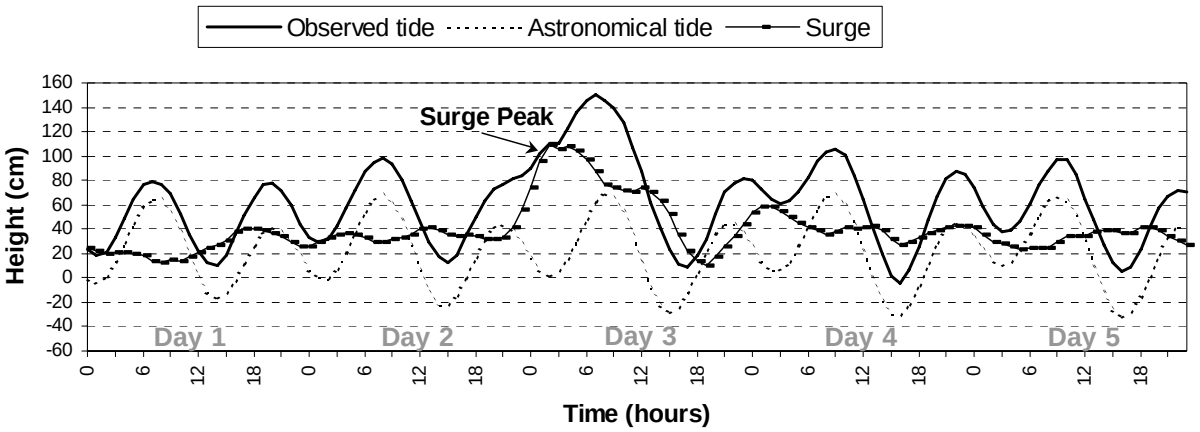
12 novembre 1951

Nei giorni precedenti il 12 novembre si era assistito, sull'Adriatico, al passaggio di una sequenza di perturbazioni. Esse erano di origine atlantica, passavano veloci e davano maltempo ma non avevano grandi effetti sui livelli marini. Quello che invece ha provocato i disagi a Venezia è stato il formarsi di una depressione sul Mar Ligure, fenomeno frequente e di interesse scientifico (Speranza, 1975): si può vedere dalle carte come la pressione a Genova da circa 1008 hPa del giorno 10 sia scesa a 984 (si noti l'errore di stampa sulla mappa originale) del giorno 12. Le carte dei giorni successivi mostrano la permanenza in loco dello stesso "buco" depressionario, che si colma lentamente, a differenza delle altre strutture che notoriamente si spostano verso oriente. Ecco invece nell'area tra i Balcani e la Russia un campo di pressione tra i 1008 e i 1012 hPa sia il 10 che il 12 novembre: l'Adriatico, di conseguenza, è diventato sede di un violento gradiente di pressione (ossia di una differenza tra una costa e l'altra), origine di forti venti lungo il suo asse maggiore. È noto infatti (e nel seguito sarà scontato) che per effetto della rotazione terrestre il vento non soffia (come ci si aspetterebbe) dall'alta alla bassa pressione, ma viene deviato verso destra (nell'emisfero nord), in modo da procedere quasi parallelo alle isobare (le linee di eguale pressione), con l'alta pressione a destra.
Si confronti ora la meteorologia a grande scala con le registrazioni dettagliate delle varie stazioni: la pressione mostra che l'alto Adriatico ha risentito drasticamente del calo di cui si parlava (centrato sul Mar Ligure). Il fatto che ciò non sia avvenuto sul basso Adriatico è denso di conseguenze: poca pressione a Venezia, normale invece a Leuca, ed ecco che il mare si gonfia al nord, proprio per la spinta differenziata. In più, il vento: è visibile, ad Ancona e a Leuca, il passaggio delle perturbazioni con venti meridionali (i lobi della figura). Nella notte che precede il giorno 12, con qualche differenza oraria, tutte le stazioni mostrano venti meridionali, provocando l'alta marea eccezionale a Venezia.
Si noti che la marea astronomica e il contributo meteorologico (il rialzo) si sono presentati fortunatamente fuori fase. Un ritardo di cinque ore degli effetti meteorologici avrebbe dato a Venezia un risultato superiore anche di trenta centimetri a quello osservato. Ma già così il livello di 110 cm, considerato pericoloso per Venezia, è rimasto superato per nove ore. Il livello residuo (che come si è detto può essere visto come un'inclinazione persistente del mare) è stato notevole e si è abbassato lentamente, rimanendo quasi 24 ore oltre i 50 cm: è chiaro che, più che il vento, la differenza di pressione tra sud e nord lo ha mantenuto lungamente.

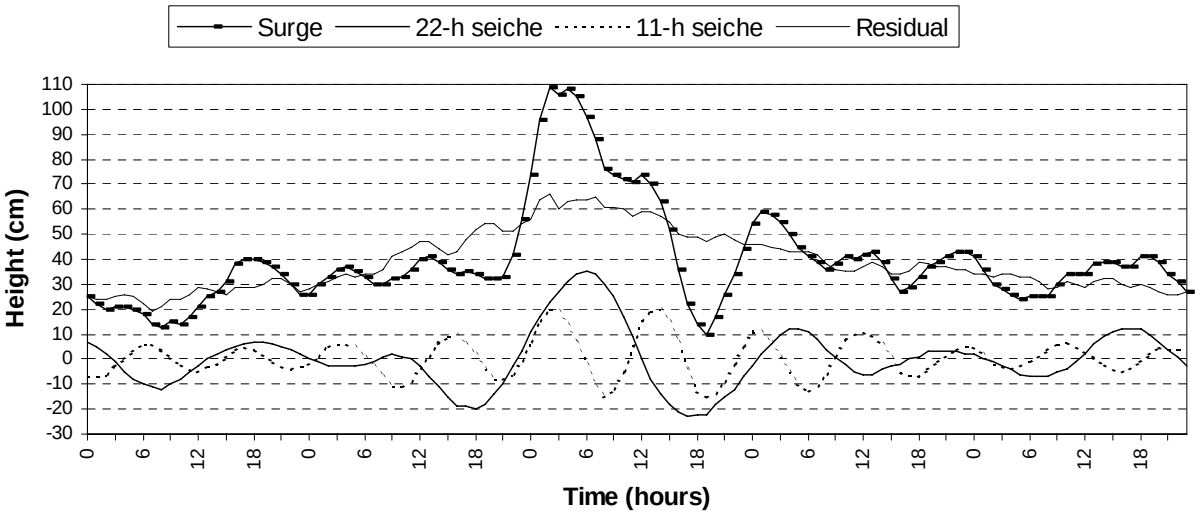
November 12, 1951

In the days preceding November 12, a sequence of fronts had been observed, originating first over the Atlantic and pushing across the Adriatic. They moved fast, produced inclement weather but not remarkable effects on the sea level.
Instead, what produced problems in Venice was the low-pressure forming over the Ligurian Sea, which is a frequent and characteristic phenomenon of the area (Speranza, 1975): looking at the weather maps, in Genoa the pressure dropped from about 1008 hPa on November 10 to 984 hPa on November 12 (note the misprint on the original map).
The charts of the following days would show the above low-pressure slowly disappearing in the same place, different from the other structures moving eastward. On the contrary, the pressure over eastern Europe remains in the range from 1008 to 1012 hPa in the same period. As a consequence, the Adriatic hosts a strong pressure gradient, a large difference sideways, and this causes strong winds along its major axis.
Indeed, it is well-known (and this will always be understood in what follows) that, due to the Earth's rotation, wind does not blow, as one would expect, from high to low pressure, but it is deviated rightward (in the Northern Hemisphere), going almost parallel to the isobars (lines of equal air pressure), obviously keeping the high pressure to its right.
Large scale meteorology can now be compared with the detailed records of the Adriatic stations.
The pressure plots show that the northern Adriatic was strongly influenced by the aforementioned drop centered over the Ligurian Sea.
Since this phenomenon did not occur in the south, an immediate consequence was a low pressure area over Venice, a normal one over Leuca, and a "forcing" which pushed the sea causing it to rise in the north.
Then observing the wind in Ancona and Leuca, there was a passage of perturbations, already mentioned, with southerly winds (the lobes in the figure). With little delay, on the night of the 12th, all meteorological stations show southerly winds, causing the exceptional flood in Venice.
It was lucky that the astronomical tide and the meteorological contribution (surge) were out of phase. Should the latter have occurred five hours later, the flood would have been 30 cm higher.
Nevertheless, the flooding in Venice exceeded the official danger level of 110 cm for about nine hours. The residual level, which is some way associated with a steady sea slope, had been remarkable and very slowly went down, but remaining over 50 cm for the next 24 hours. More than the wind, the cause of all this was the lack of balance between the pressure in the north and that in the south.

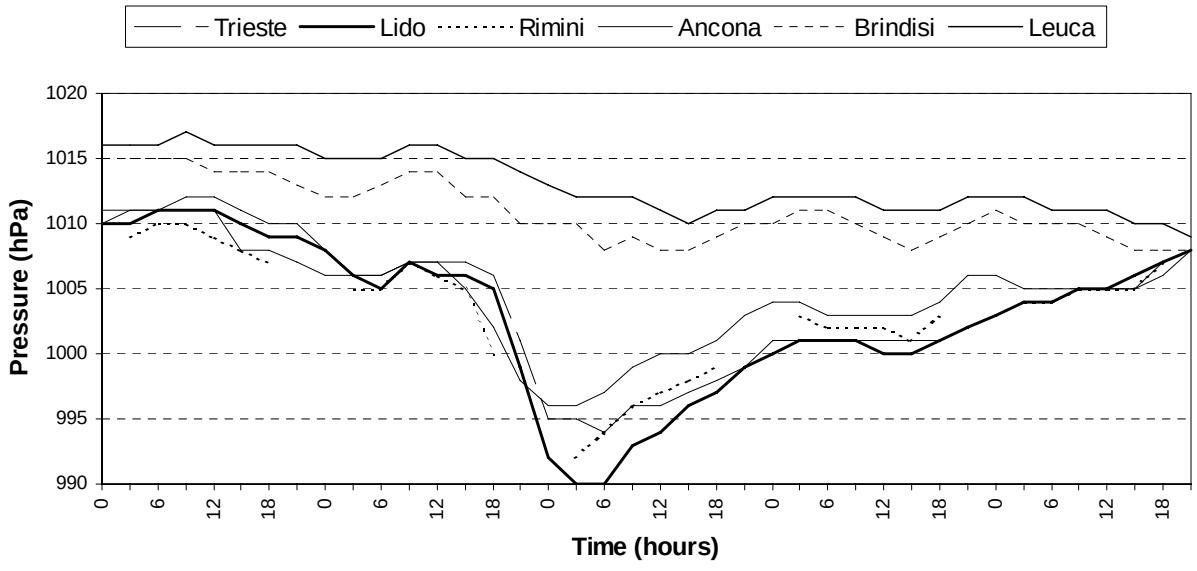
Tide and surge levels at Venice (PDS): 10-14 Nov. 1951



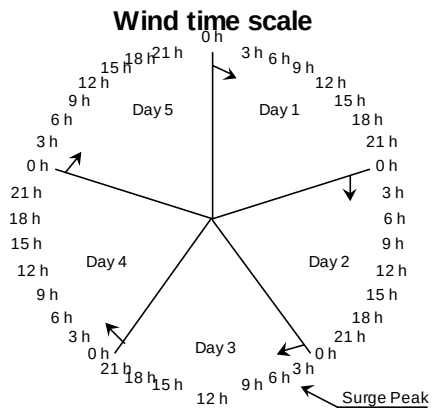
Surge and seiche levels at Venice : 10-14 Nov. 1951



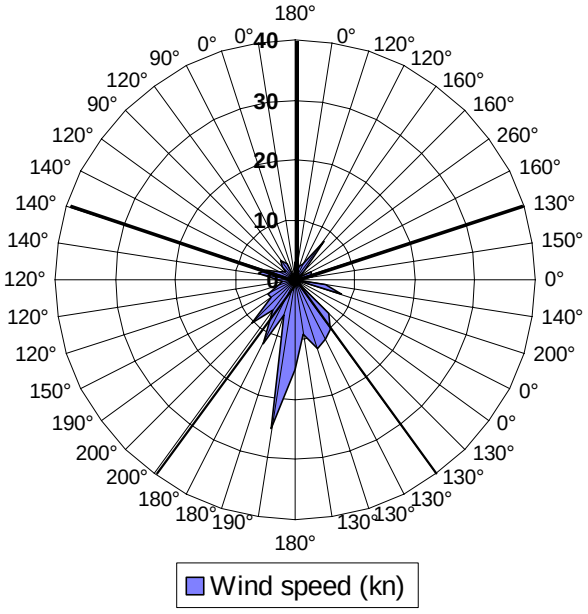
MSL air pressure: 10-14 Nov. 1951



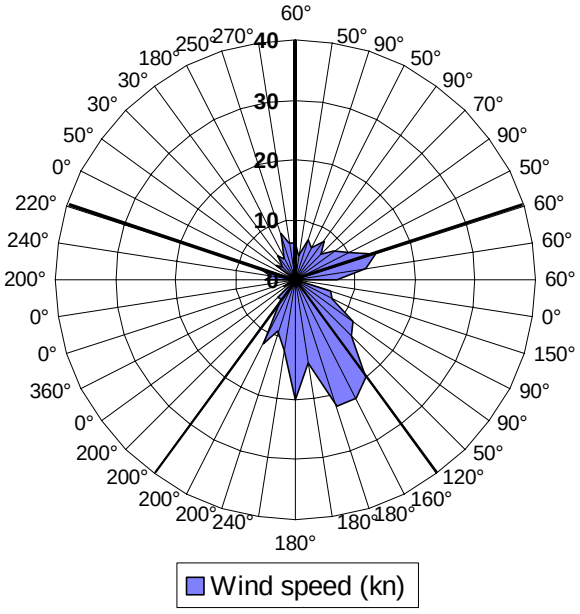
10-14 Nov. 1951



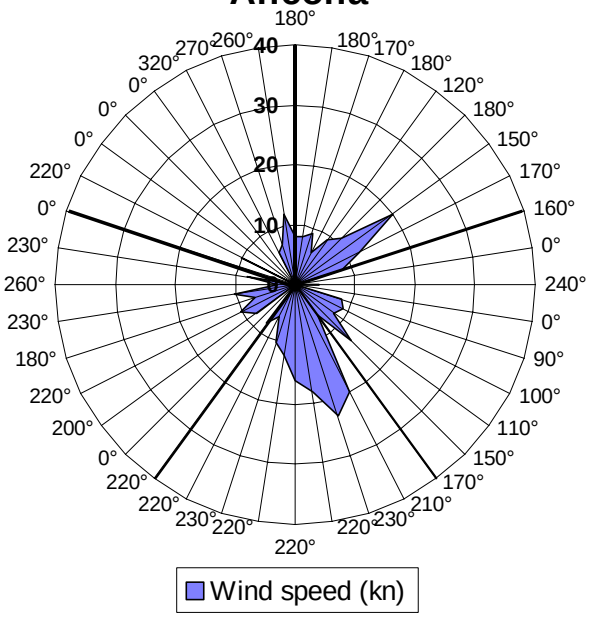
Trieste



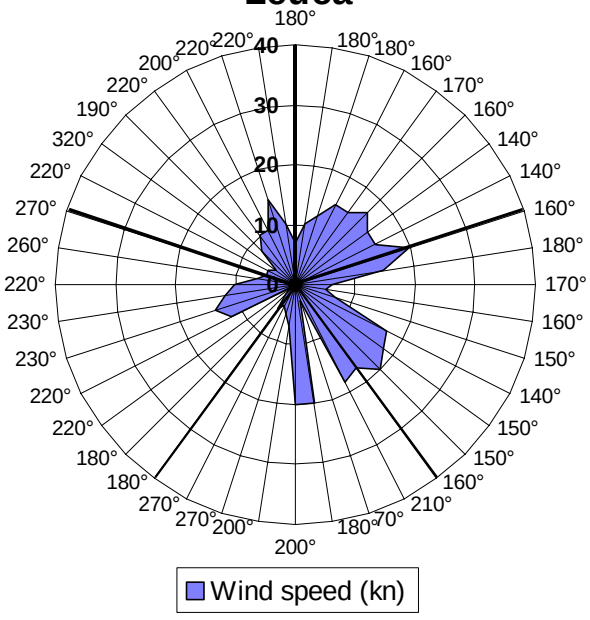
Lido

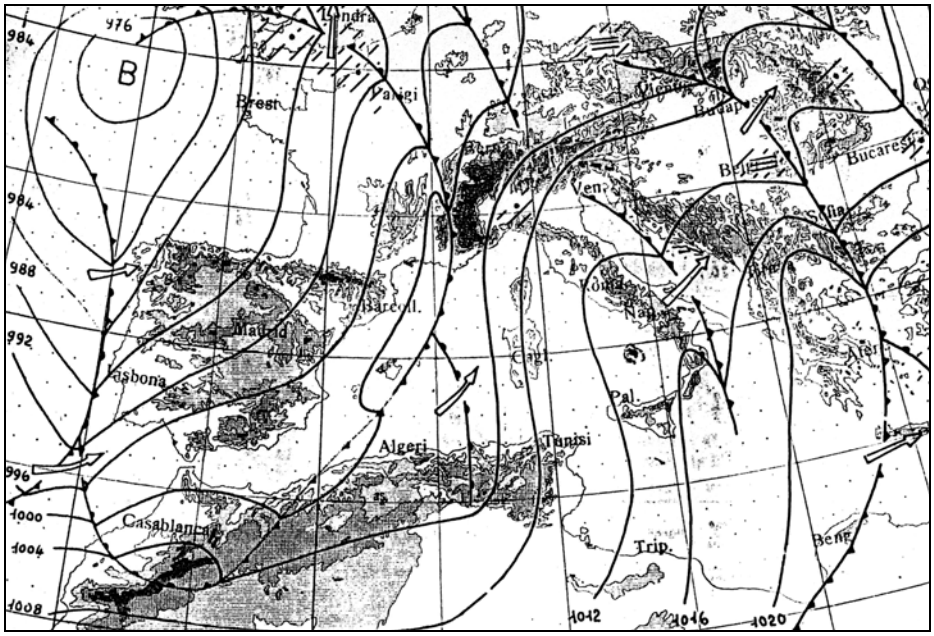


Ancona

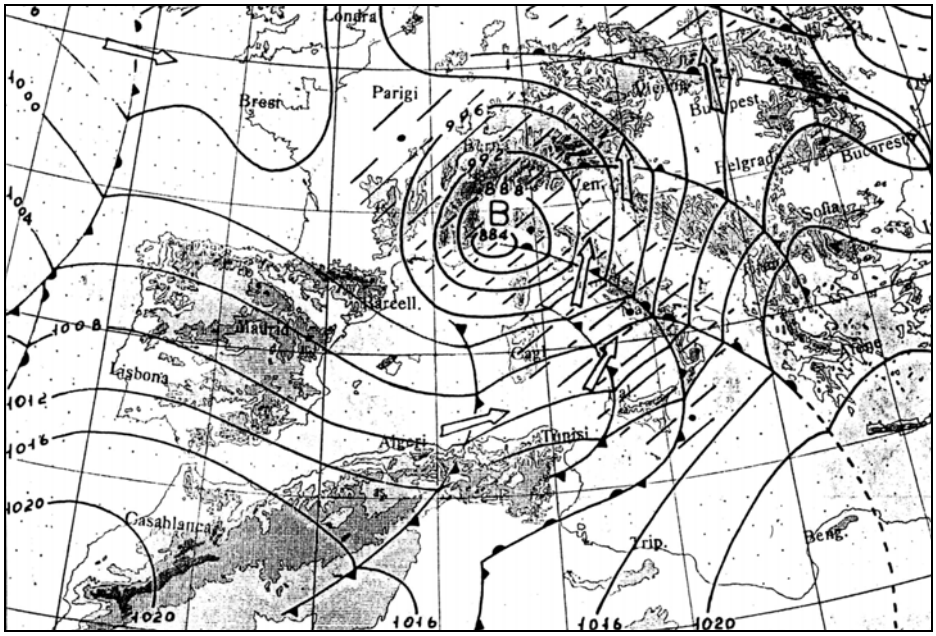


Leuca

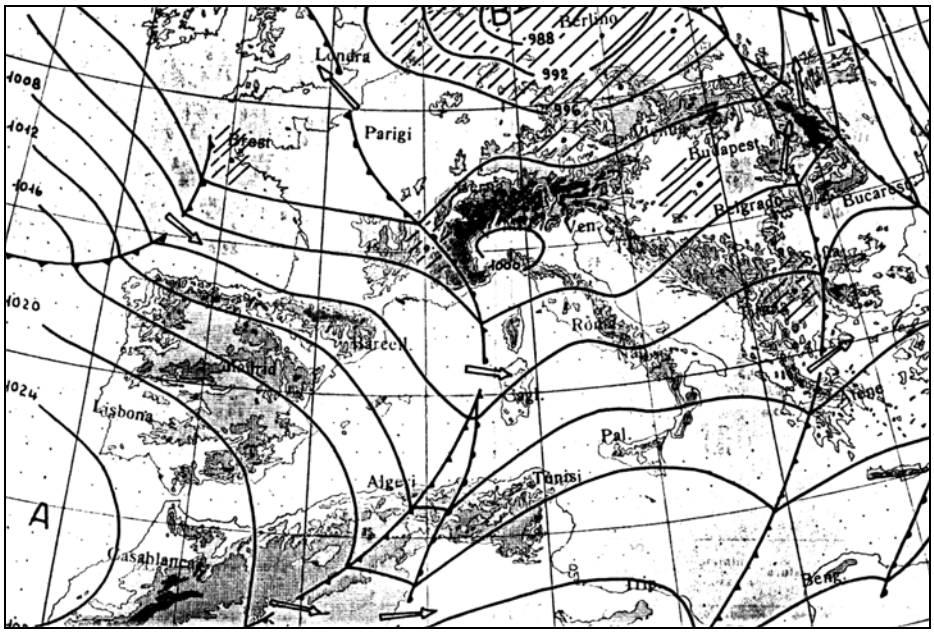




h. 0.00, Nov. 10, 1951



h. 0.00, Nov. 12, 1951



h. 0.00, Nov. 13, 1951

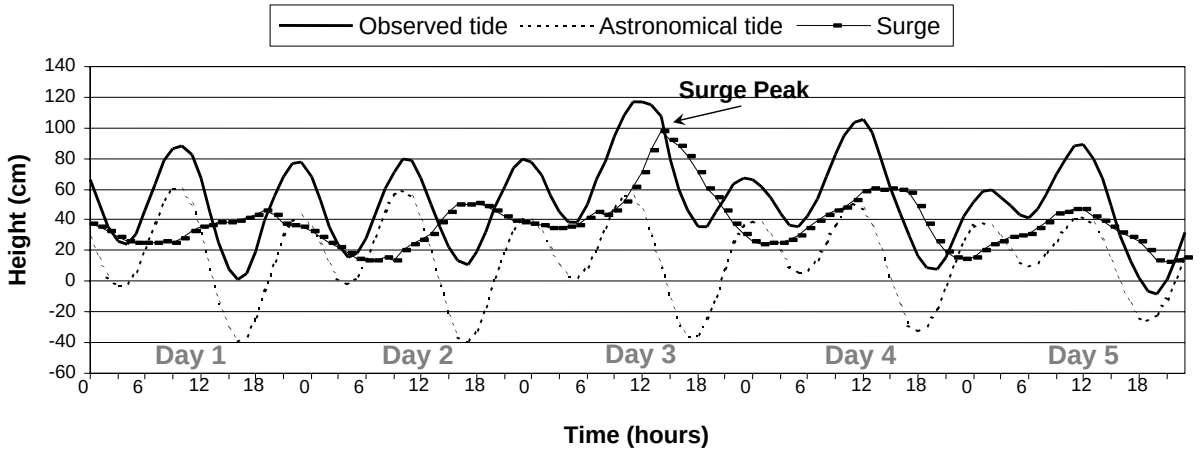
10 novembre 1957

Vale la pena di notare le molte differenze rispetto all'evento precedente (del 1951). Intanto il fenomeno meteorologico è piuttosto isolato e non fa parte di una catena di eventi. Il minimo di pressione si sposta (non staziona sul Mar Ligure) e la sua testata (il fronte) è di tipo occluso. Ossia: si ha un fronte freddo quando avanza dell'aria fredda, il contrario con il caldo. Si ha allora una struttura verticale dell'atmosfera piuttosto netta (l'aria fredda ovviamente avanza in basso, essendo più pesante; viceversa la calda). Spesso però (ed è la situazione più temibile) due fronti diversi si raggiungono, dando luogo appunto all'occluso. L'atmosfera è allora particolarmente instabile e fornisce le manifestazioni più violente.
Il fronte occluso, nelle prime ore del 10 novembre, è bene allineato con l'Adriatico. Ecco allora che la pressione crolla su tutte le stazioni e possiamo immaginare un violento richiamo d'acqua dal Mediterraneo.
Il vento, invece, è ingannevole: niente scirocco a nord (così qualche veneziano giura che non è il vento di sud-est a causare l'acqua alta), scirocco invece a lungo su Ancona, mentre su Leuca il vento è genericamente meridionale, particolarmente violento la mattina del 10.
Come si vede, le oscillazioni di sessa esistevano già nei giorni precedenti, la burrasca le ha solo rinforzate.
Un'osservazione sul livello osservato a Venezia: l'acqua è rimasta per cinque ore sopra i 100 cm, che è un livello di disagio ma non ancora "acqua alta" ufficiale. Viene voglia di pensare alle bocche di porto, le entrate della laguna: nelle condizioni dei secoli passati, quando esse erano poco profonde e meno raddrizzate dai moli foranei, la marea entrava più lentamente e più frenata. Facilmente, se il caso meteorologico in esame si fosse verificato allora, all'interno della laguna la marea sarebbe giunta tranciata a livelli meno pericolosi.

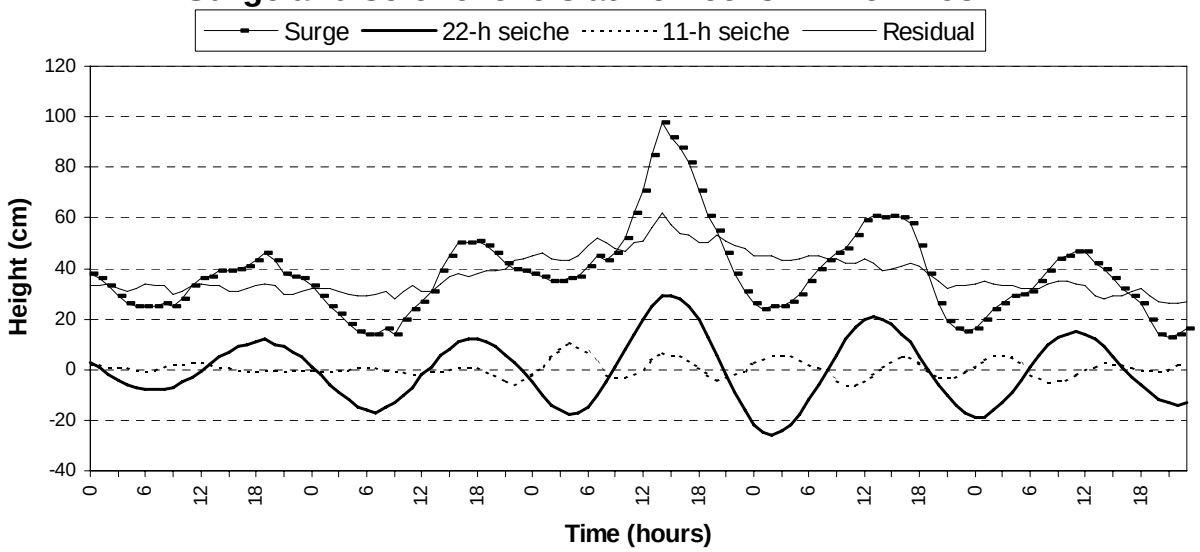
November 10, 1957

It is worth noticing the different elements with respect to the previous (1951) case.
First, the meteorological event is rather isolated, it is not part of a chain of perturbations. The low-pressure center moves (it does not remain over the Ligurian Sea) and the front associated with it is an occluded one. In other words: there is a cold front when cold air moves, the opposite for the warm case. Under these conditions, the vertical structure of the atmosphere is well defined: the heavier cold air advances keeping low, while the lighter warm air makes the opposite.
But frequently a front of one kind overtakes a different one, and an occlusion occurs: the atmosphere is particularly unstable and the most violent effects appear.
The occluded front, in the first hours of November 10, is well lined with the Adriatic: the pressure drops in all the stations of the coast and we can guess a strong call of water from the Mediterranean.
Wind is deceiving: there is no sirocco in the north (for this reason, certain Venetians are convinced that it is not the south-easterly wind that causes floods).
Instead, sirocco is blowing at Ancona, while at Leuca the wind is generally from south, particularly strong the morning of the 10th.
One can see that the seiches were already active on the preceding days and the storm only strengthened them.
A remark on the level observed in Venice: water remained for five hours over 100 cm, which is a disturbing level but not yet formally a flood. If one thinks of the lagoon inlets, in their conditions of the past centuries, when they were shallower and not straightened by the present piers, the tides had to enter the lagoon more slowly and were retained by friction. Presumably, for a similar storm in those days the tide would have been cut to a less dangerous level.

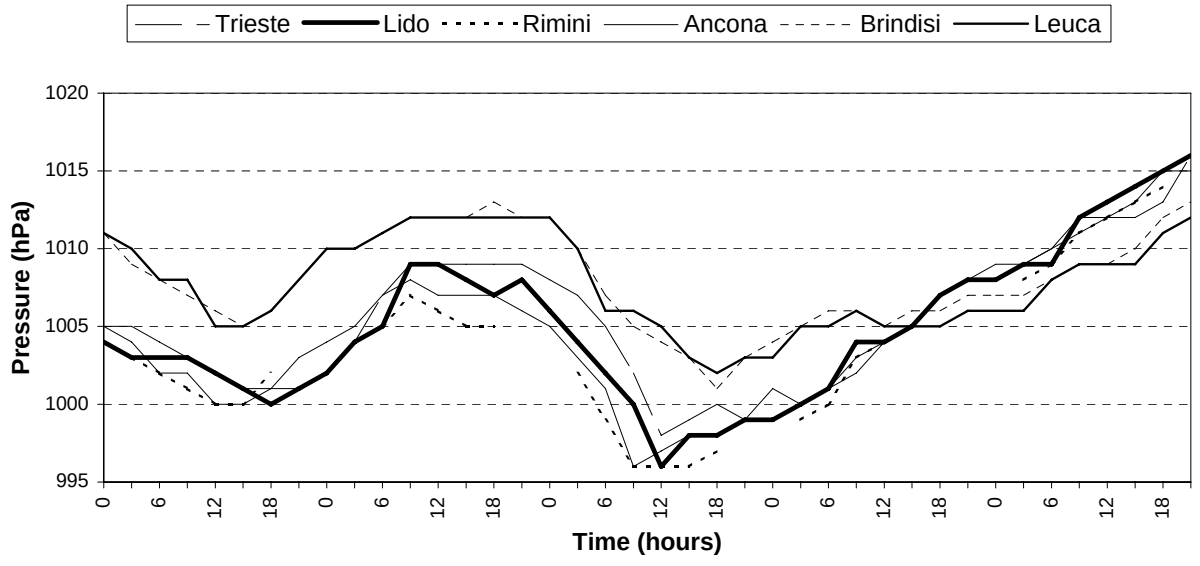
Tide and surge levels at Venice (PDS): 8-12 Nov. 1957



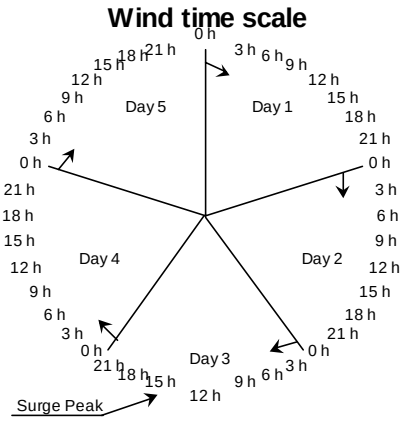
Surge and seiche levels at Venice: 8-12 Nov. 1957



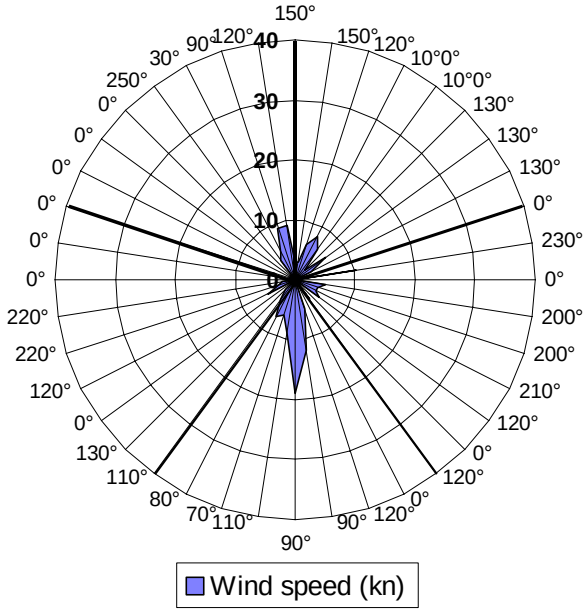
MSL air pressure: 8-12 Nov. 1957



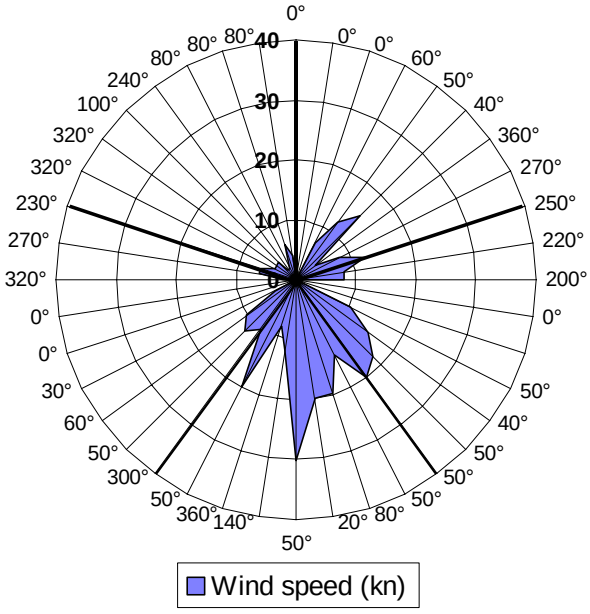
8-12 Nov. 1957



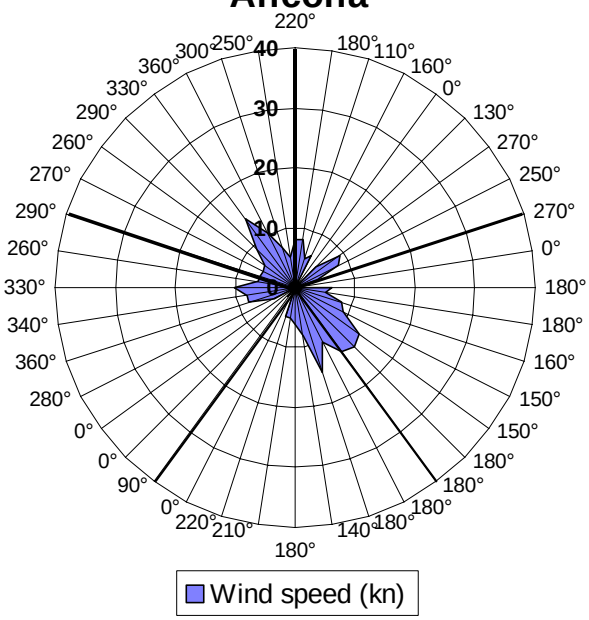
Trieste



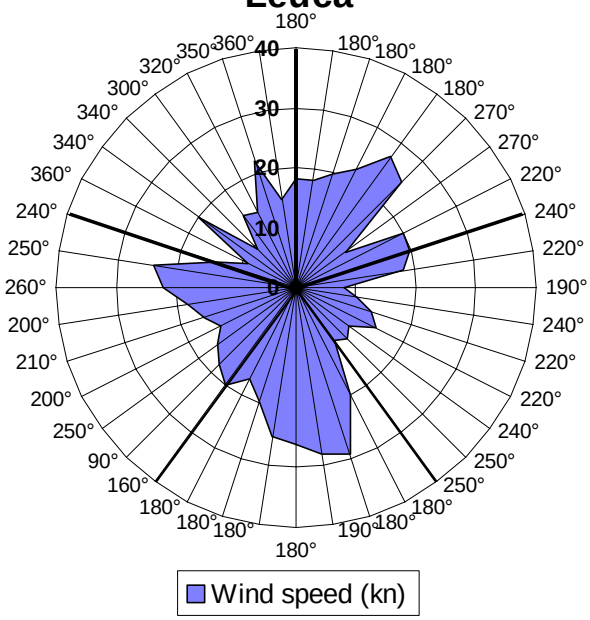
Lido

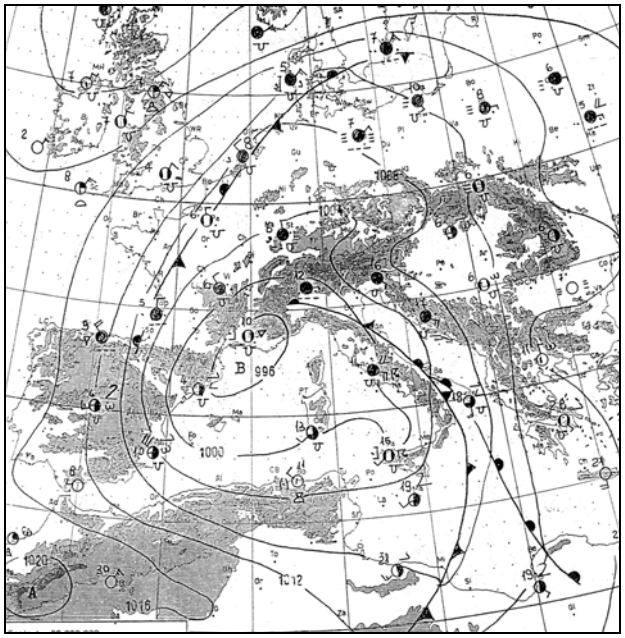


Ancona

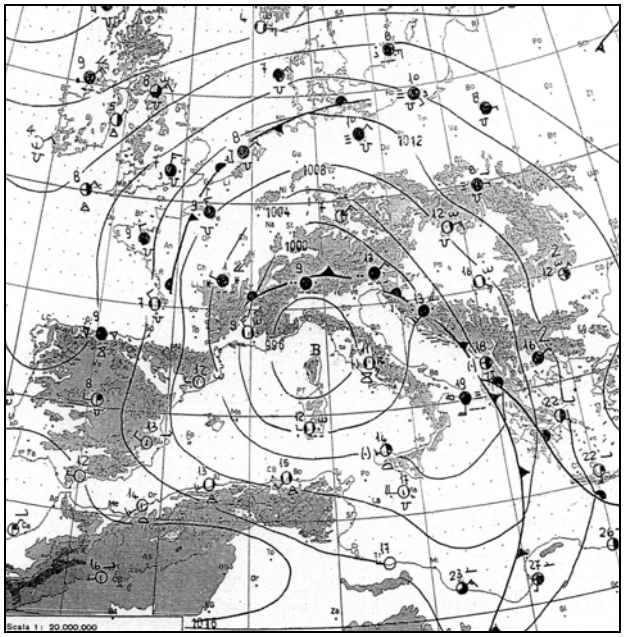


Leuca





h. 06.00, Nov. 10, 1957



h. 18.00, Nov. 10, 1957

h. 06.00, Nov. 11, 1957

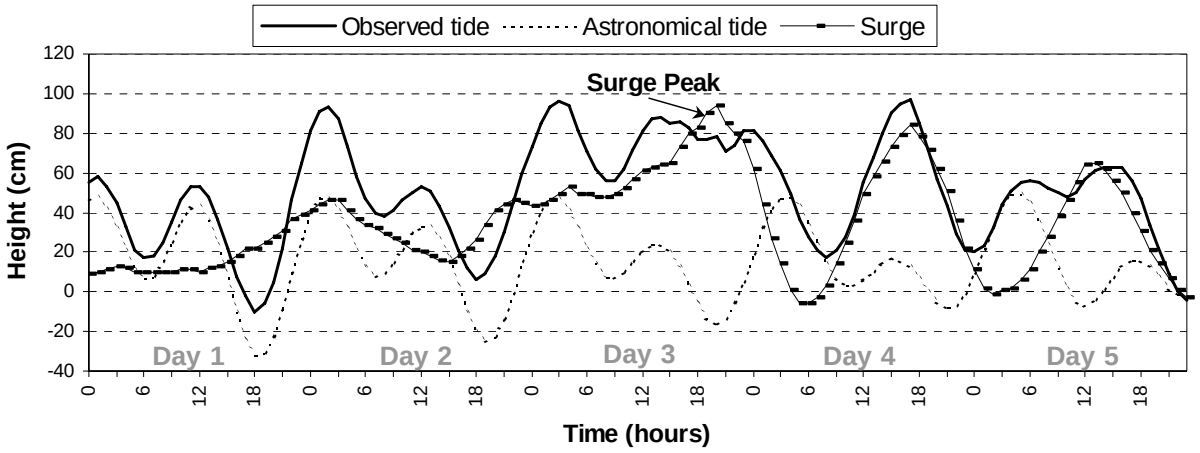
13 dicembre 1957

Il veneziano che osserva il livello dell'acqua rimane, in questo caso, piuttosto confuso. Come si vede dal grafico, si susseguono tre, forse quattro condizioni di marea preoccupante, anche se non c'è alcuna "acqua alta" da registrare. Ebbene, il primo picco, nelle prime ore del 12 dicembre, era stato provocato da un rapido colpo di vento il cui effetto era coinciso, casualmente, con l'alta marea astronomica. Il secondo è un ritorno di sessa sempre con alta marea astronomica.
Ma quello che qui interessa e non manca di stupire è che il rialzo eccezionale del 13 dicembre è coinciso con la bassa marea astronomica: conclusione, nei canali di Venezia l'acqua ha quasi ristagnato per dieci ore attorno agli ottanta centimetri. Per i giorni successivi, forti ritorni di sessa (fino a 90 cm di escursione!). Ecco quindi un bel caso di rialzo nascosto, fortunatamente senza conseguenze.
La meteorologia ha un suo aspetto specifico in un fronte freddo che passa veloce (in dodici ore, il giorno 13, dalla Sardegna occidentale alla Croazia): il giorno dopo le isobare si "distendono", segno di venti trascurabili. È abituale vedere arrivare le perturbazioni da ovest o semmai da nord-ovest (Artegiani, 1971).
Per le modalità di arrivo del fronte, la pressione scende solo al centro-nord dell'Adriatico, mentre il vento è molto forte solo nel sud. Niente bora al nord, niente inganni tra bora e scirocco. Da notare che il minimo depressionario, spesso ben definito e preoccupante (l'occhio del ciclone), è qui vago e difficilmente localizzabile.
A quest'ultima osservazione si può collegare la scarsa rilevanza della sessa di 11 ore, il secondo modo di oscillazione dell'Adriatico: essa è facilmente pronunciata quando un punto attivo, com'è un forte centro depressionario, attraversa il mare (sempre verso oriente). Un impulso così localizzato ha buone probabilità di provocare le oscillazioni di alta frequenza.

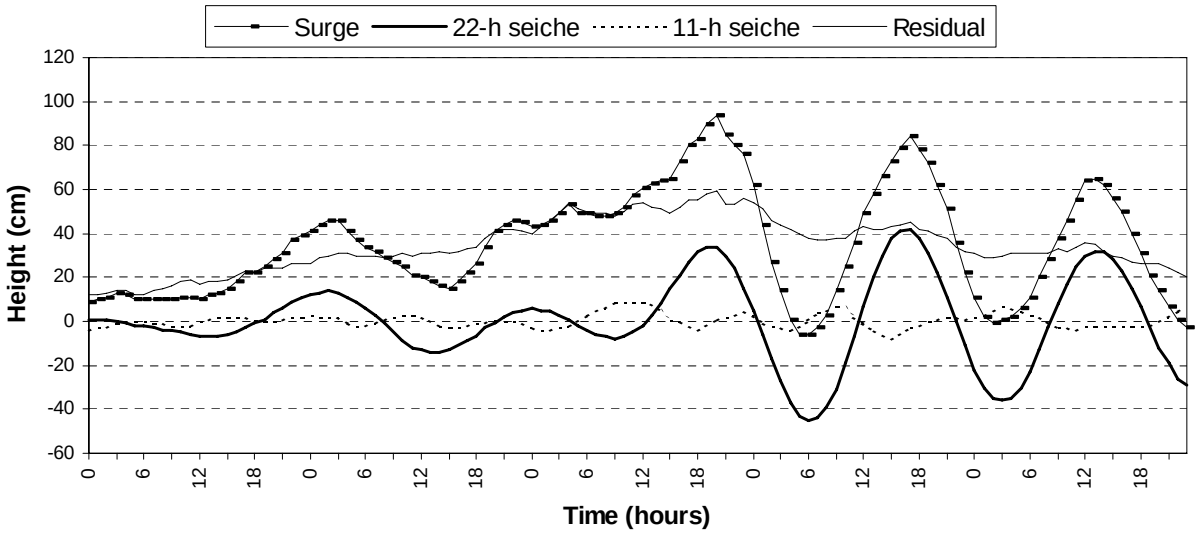
December 13, 1957

A Venetian observing the sea level would be rather astonished in this case. As shown in the plots, three and maybe four conditions of alarming level occur, but not any "acqua alta" to enter records.
The first peak, early on December 12, originated from a sudden wind gale in phase with high tide. The second one is a seiche return, again in agreement with astronomy.
But what matters now, and surprises us, is that the conspicuous surge of December 13 came with ebb astronomical tide: for all this, in the Venice canals water was almost idle for ten hours around 80 cm level. For the following days, a performance of strong seiches (up to 90 cm range!).
This is a nice case of hidden surge, happily without consequences.
Meteorology has its specific features in a fast moving cold front (in 12 hours, the 13th, from west Sardinia to Croatia): the day after, the isobars "stretch", which means only light winds. In general, it is customary that the meteorological perturbations come from west or maybe northwest (Artegiani, 1971).
With the advancing front, pressure decreases only over the central and nothern Adriatic, while the wind is very strong only in the south: no northeasterly bora in the north, hence no tricks with bora and sirocco.
In this case, a pressure minimum, normally well defined and rather frightening (the center of a hurricane), is rather vague and difficult to locate. This can be connected with the actual little relevance of the secondary seiche (11-hour period). One can expect it to be strong when an active point moving eastward (like a deep cyclonic center) acts on the sea. A pulse well-defined in space has a good chance to stimulate high frequency.

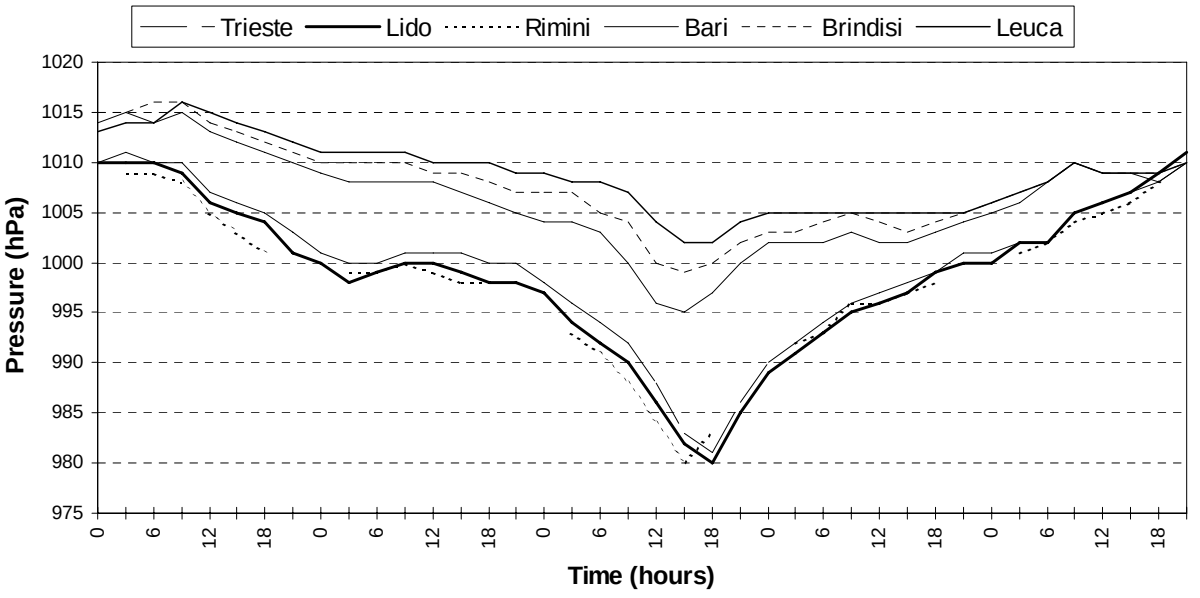
Tide and surge levels at Venice (PDS): 11-15 Dec. 1957



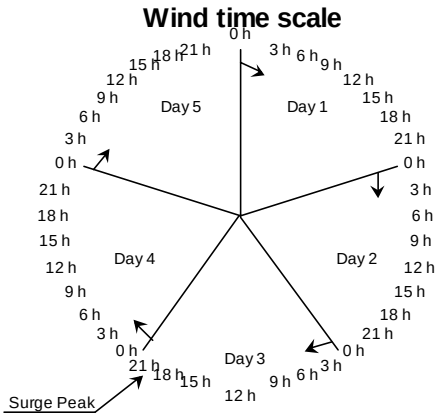
Surge and seiche levels at Venice: 11-15 Dec. 1957



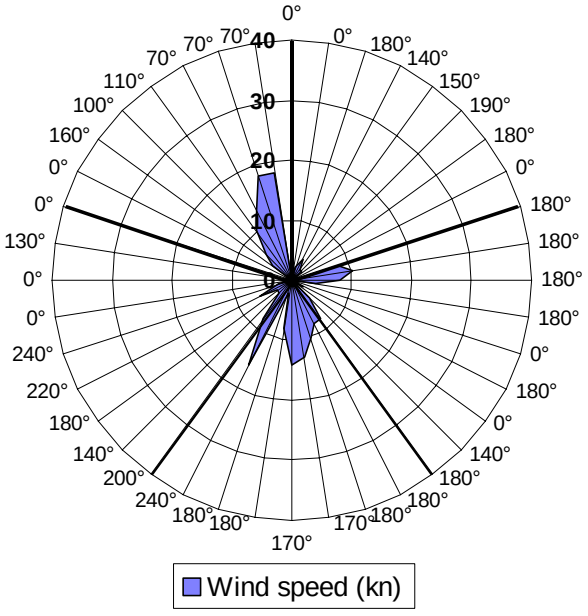
MSL air pressure: 11-15 Dec. 1957



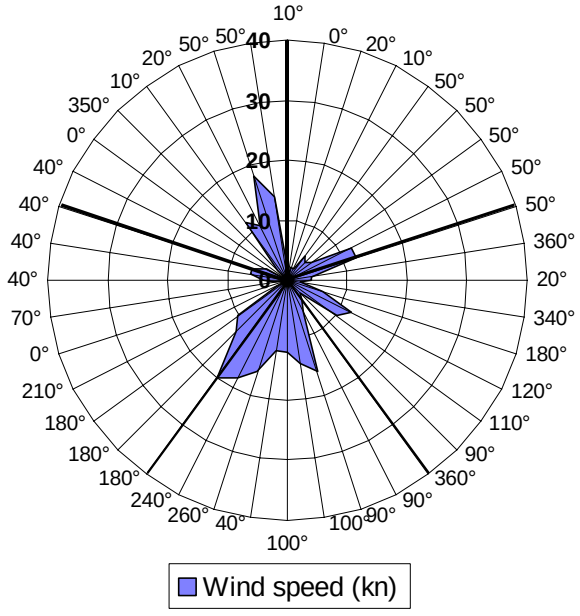
11-15 Dec. 1957



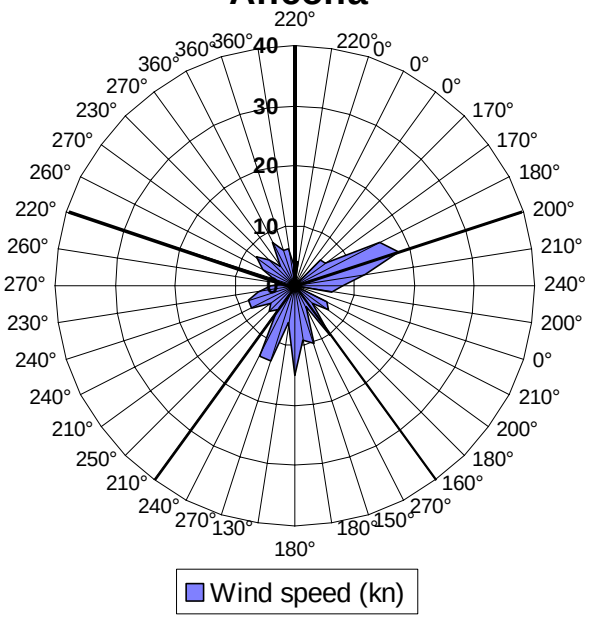
Trieste



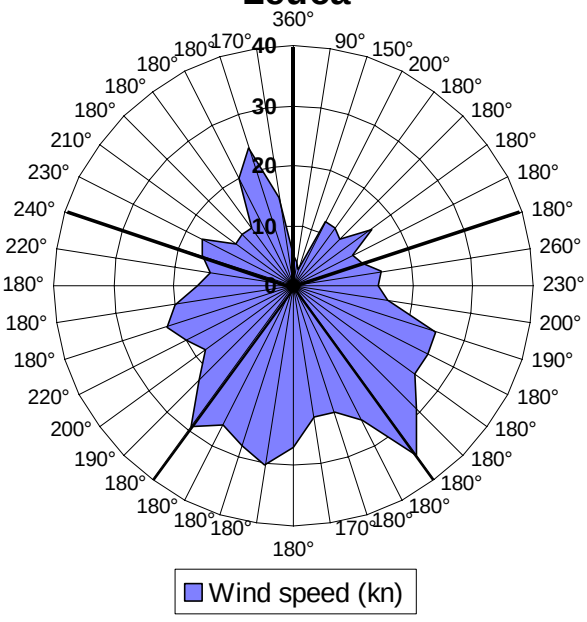
Lido

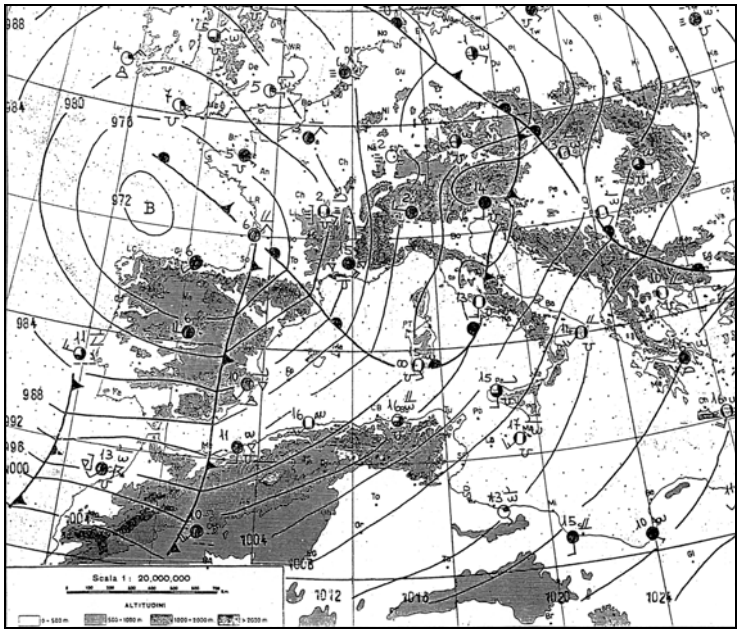


Ancona

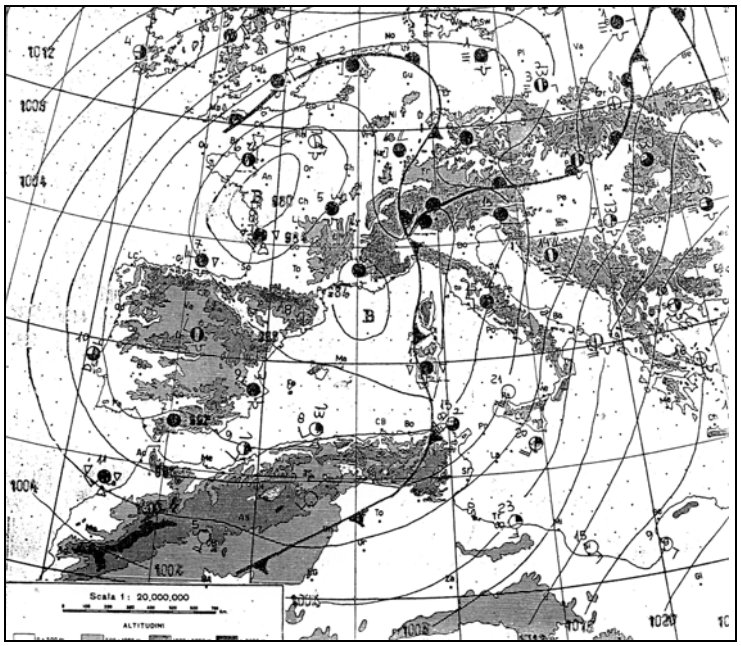


Leuca

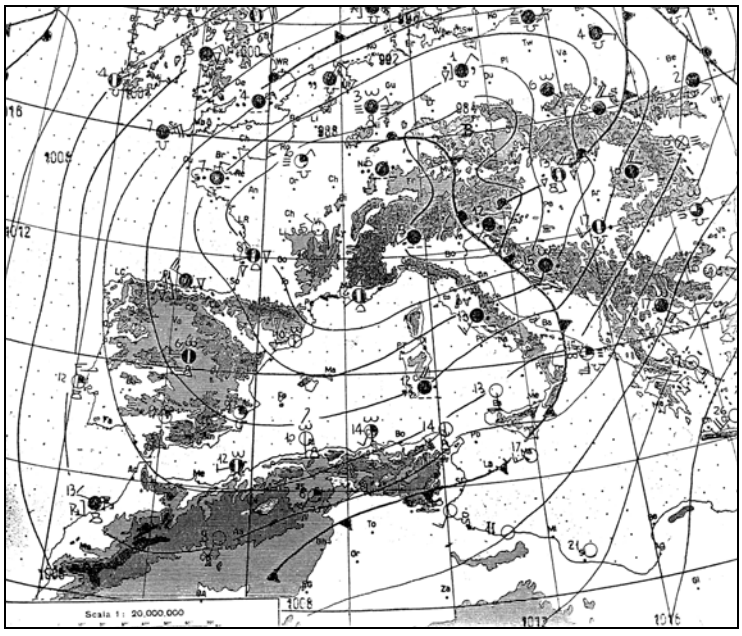




h. 7.00, Dec. 12, 1957



h. 7.00, Dec. 13, 1957



h. 19.00, Dec. 13, 1957

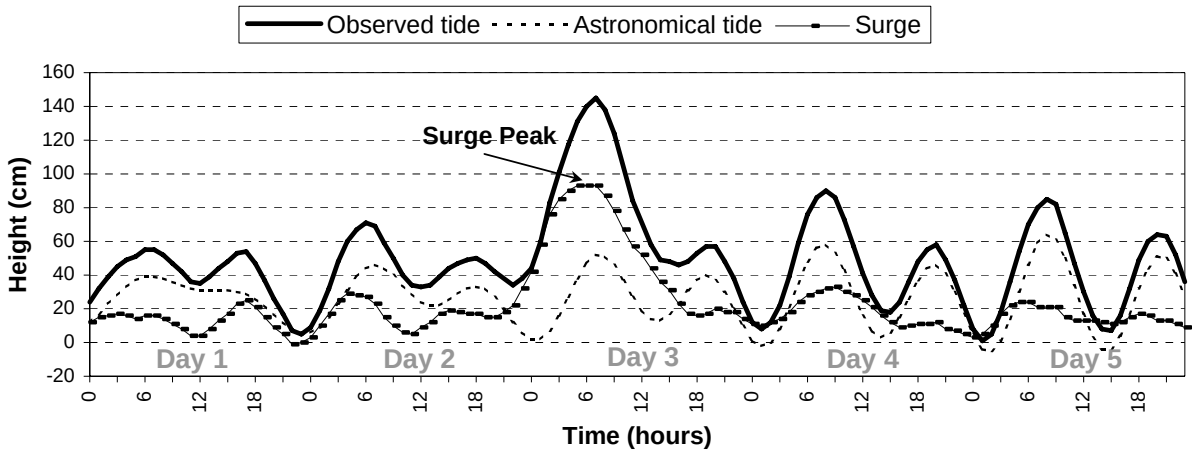
15 ottobre 1960

In questo evento, il protagonista meteorologico è un minimo depressionario che, formatosi sulle Baleari per una perturbazione atlantica, si dirige lentamente proprio sull'alto Adriatico, dove in seguito si colmerà. Oltre che le mappe, conviene guardare l'evoluzione della pressione nelle varie stazioni: Venezia-Lido subisce chiaramente la caduta più vistosa, mentre, come accade spesso, il basso Adriatico rimane quasi stabile.
Il vento, com'è da attendere in questi casi, si presenta a Venezia come bora nelle ore precedenti il colmo di acqua alta (che coincide con il rialzo). Si è già parlato più volte di questo inganno del vento: è ormai chiaro che, oltre alla pressione già considerata, bisogna rivolgersi allo scirocco, persistente nel basso Adriatico. Ci informano molto le raffiche massime (vedasi la tabella 2): 40 nodi a Trieste sono assai di più dei 20-25 nodi dei valori triorari, riportati sui grafici circolari.
È particolare il comportamento della sessa fondamentale, normalmente dominante: in pratica, questa volta essa non esiste, non si vede alcun ritorno rilevante. Ciò si spiega con il meccanismo di creazione delle oscillazioni, o meglio con la durata della spinta (del vento o della depressione). È facile vedere, anche per analogia con un pendolo, che è diverso un impulso secco alla massa che si deve muovere, rispetto ad una spinta continuativa, nel quale caso la durata è critica. Si può trovare la situazione in cui il sistema si ferma definitivamente, al cessare degli sforzi esterni: in questo caso, non si ha sessa successiva (Tomasin e Pirazzoli, 1999).
È particolare anche la sessa di 11 ore, già forte in partenza (per precedenti impulsi), disturbata e di fatto ridotta dalla bufera che ci interessa. Anche in questo caso, guardando la cuspide della marea osservata, viene da pensare all'ipotetica riduzione del disagio per Venezia qualora gli impulsi del mare fossero stati frenati da bocche di comunicazione meno ampie.

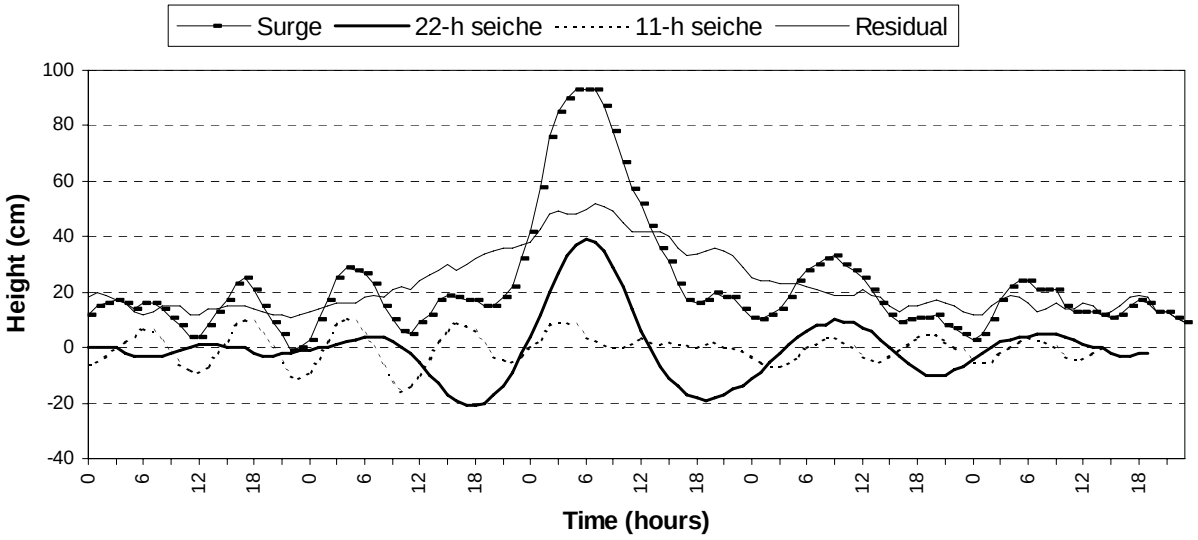
October 15, 1960

In this event, who stars in meteorology is a pressure minimum, formed over the Baleares by an Atlantic front and slowly moving toward the northern Adriatic, where it will peter out.
After looking at the maps, it is convenient to consider the pressure evolution in the various stations: Venice-Lido shows the most evident drop, while the south remains almost stable, as often occurs.
As one should expect in these conditions, a bora wind blows in Venice in the hours preceding the flood (that coincides with the surge peak). This illusive mechanism of wind has already been mentioned: in addition to the pressure effects, one should focus his attention on the sirocco blowing in the south, not too strong but persistent. In the north, maximum wind gusts are another important information (see table 2): 40 knots in Trieste are a lot more than the 20-25 knots recorded in the three-hourly circular plot.
The behaviour of the fundamental seiche, usually dominant, is rather peculiar: it practically does not exist, since no relevant return is noted.
This is related to how these oscillations are created, and more precisely to the duration of the stimulation (by the wind or the pressure). A simple comparison to a pendulum shows the difference between a well peaked pulse to the mass to be moved and a long, continuous push, in which case duration is critical. One finds a situation where the system stops definitely when the external force ceases: in this case there is no further seiche (Tomasin and Pirazzoli, 1999).
The 11-hour seiche is also interesting, since it was active at the beginning (due to previous pulses) and the storm disturbs it and in fact diminishes it.
Also in this case, looking at the peak of the observed tide, one is forced to think of the presumable mitigation of the damage to Venice, should the sea pulses be retained by narrower inlets.

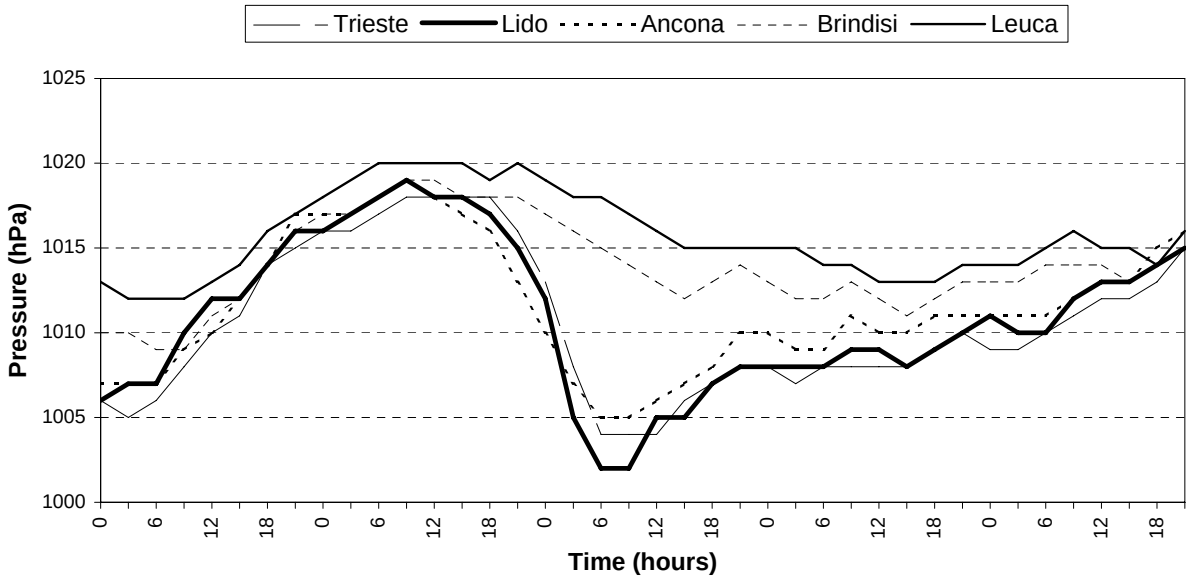
Tide and surge levels at Venice (PDS): 13-17 Oct. 1960



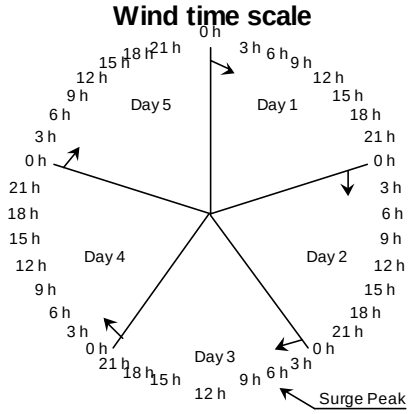
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 13-17 Oct. 1960



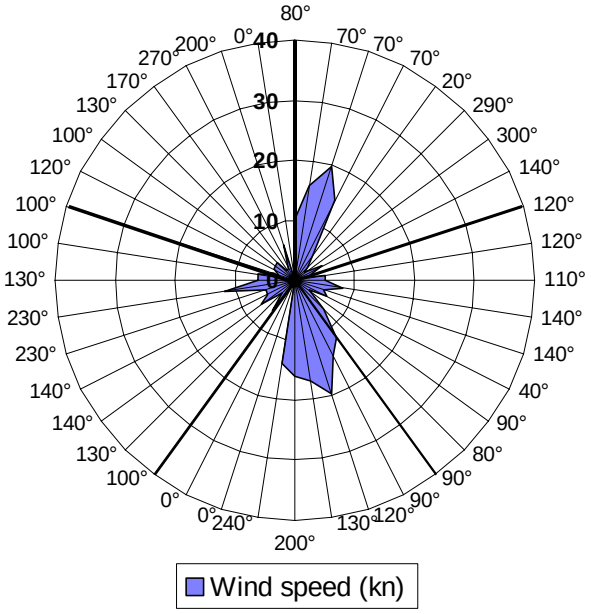
MSL air pressure: 13-17 Oct. 1960



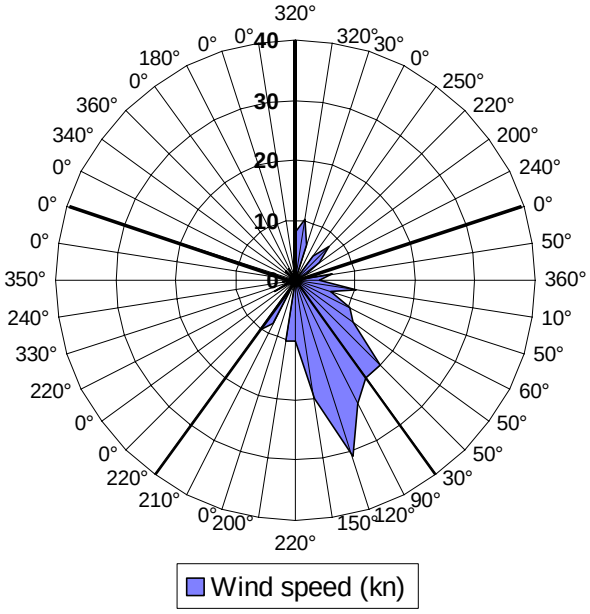
13-17 Oct. 1960



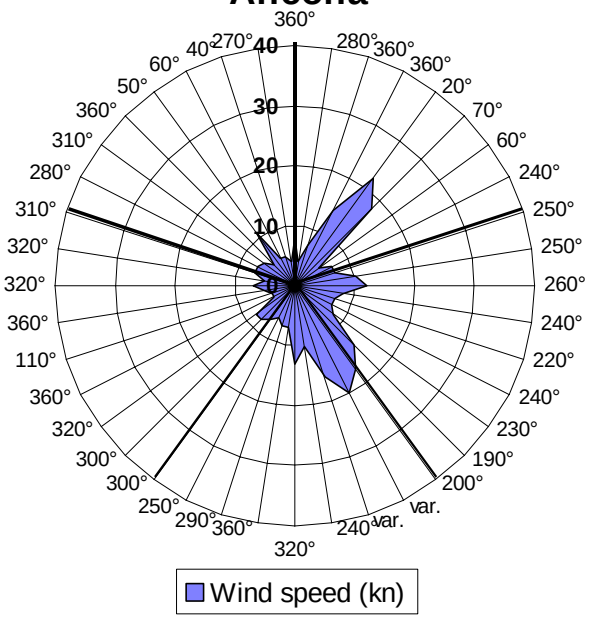
Trieste



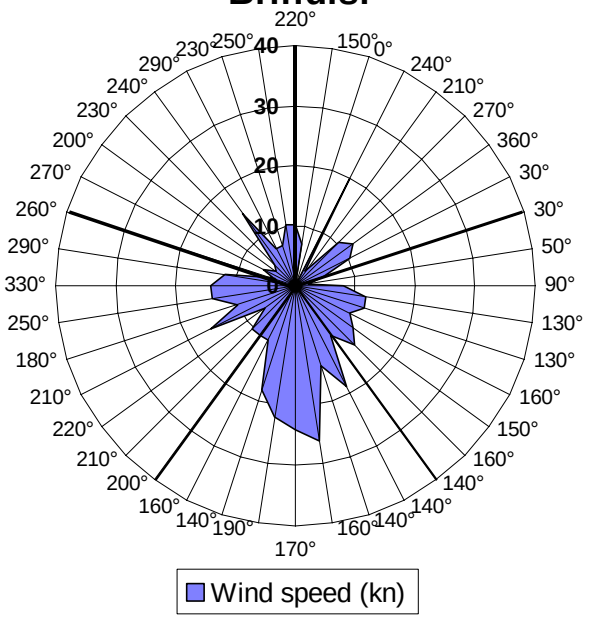
Lido

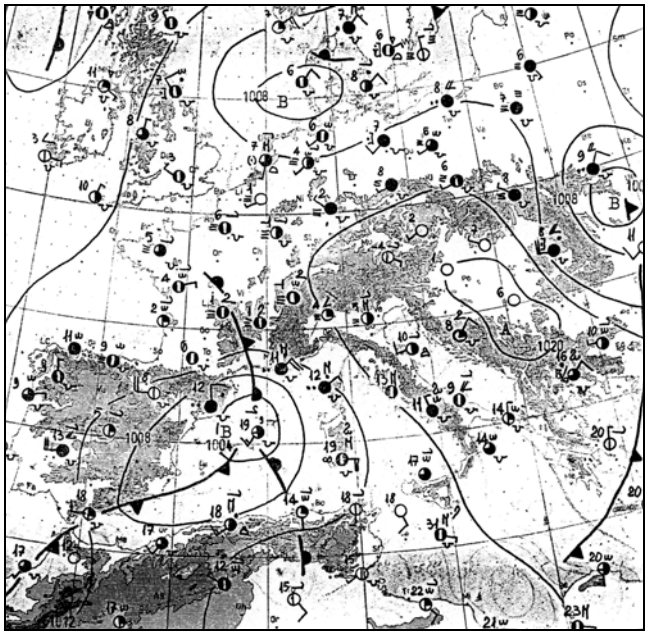


Ancona

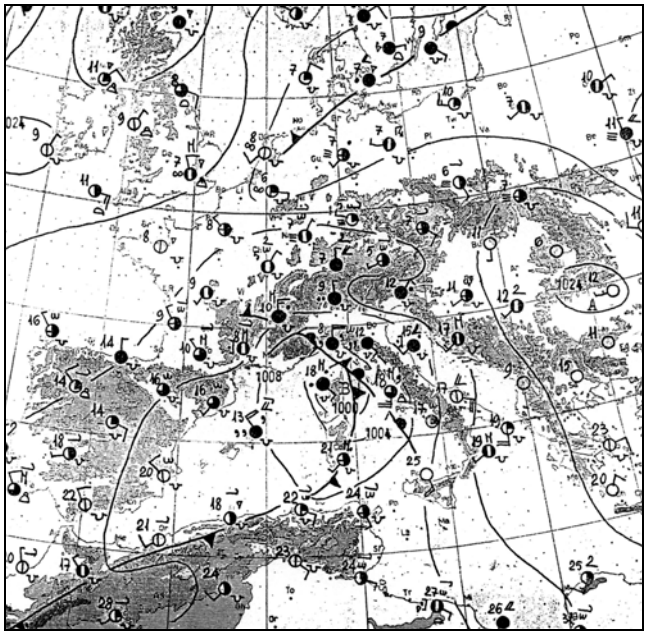


Brindisi

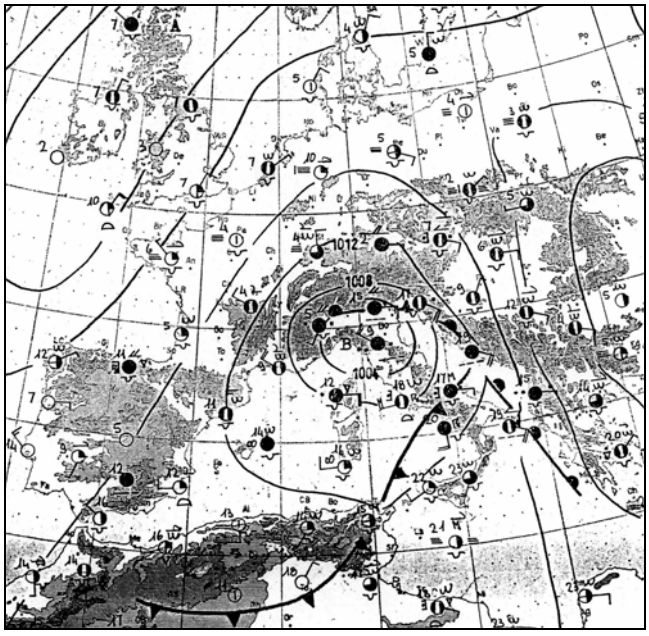




h. 06.00, Oct. 14, 1960



h. 18.00, Oct. 14, 1960



h. 06.00, Oct. 15, 1960

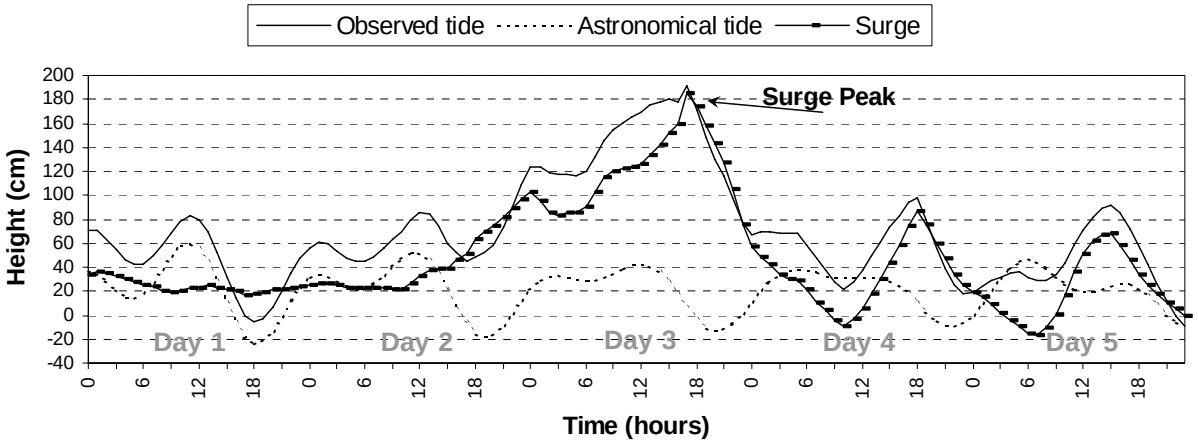
4 novembre 1966

Questo è il caso più noto e clamoroso. È stato raggiunto il livello storicamente più alto, 194 cm, a parte l'impossibile confronto con le descrizioni qualitative dei secoli lontani.
Purtroppo l'uniformità di inquadrature costringe ad una scala più ridotta e il lettore non viene colpito (come sarebbe giusto) dalla corposità del fenomeno: si osservi bene quindi la scala dei livelli.
Il rialzo (ciò che interessa il presente lavoro) è stato ancora più impressionante se si osserva che al massimo livello osservato il contributo astronomico è stato solo di pochi centimetri. Quindi, una condizione meteorologica eccezionale che ha provocato, tra l'altro, immensi danni civili e idrogeologici (dall'inondazione di Firenze alla devastazione delle montagne).
Brevemente, possiamo individuare sulle carte due fronti occlusi (della cui pericolosità si è già parlato), ravvicinati fino a fondersi e lenti nel movimento. Sull'Adriatico, e in particolare in quello settentrionale, le curve isobariche si stringono, a denotare dei venti meridionali molto intensi. Si noti, a proposito dei grafici del vento, il fondo scala a 40 nodi per poter contenere il tracciato: scirocco fortissimo e persistente a Venezia, appena minore ma comunque allineato altrove. Le raffiche massime danno un'ulteriore suggestione con i 52 nodi di Venezia-Tessera e i 58 di Brindisi, sempre rigorosamente da scirocco. Lunga caduta della pressione: 30 hPa in 48 ore a Venezia, fatto non unico ma notevole.
Circa il mare, nominiamo intanto la mareggiata che ha sfondato in più punti i famosi murazzi, e ritorniamo ai livelli. L'inondazione è stata estremamente estesa nel tempo: al contrario di altri casi, anche se le bocche di porto fossero state più ridotte, il mare avrebbe comunque avuto il tempo per invadere a lungo la laguna. Infatti, per 22 ore il livello è rimasto sopra i 110 cm, mentre il residuo ha superato per oltre 10 ore il metro e per una quarantina di ore i 50 cm. Il fenomeno delle sesse è ovviamente scatenato sulle varie frequenze: sono presenti anche oscillazioni "rare", di frequenza maggiore, che qui non sono separate ma si intravedono nel residuo.

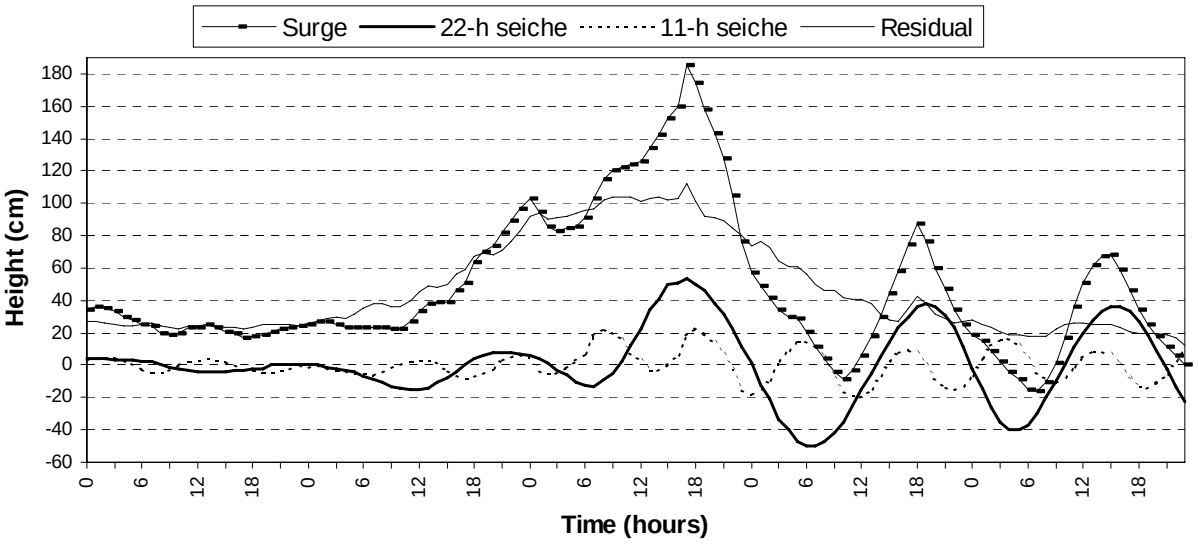
November 4, 1966

This event is the most famous and impressive. The level was the highest recorded, 194 cm, forgetting impossible comparisons with the qualitative descriptions of the past centuries.
Unfortunately, due to the compulsory reduction in the size of the graph to fit the frame, the reader is not shocked by the relevance of the phenomenon: the axis of the levels should be considered carefully.
The surge (what matters in this work) is even more impressive, if one notices that the astronomical contribution to the observed peak was less than its mean level, so it was negative.
Hence, it was an exceptional meteorological condition that had caused, among other things, extensive civil and hydrogeological damage and loss (from to devastation in the mountains to flooding Florence).
In short, the maps show two occluded fronts (and it is already clear how dangerous they are), slightly apart at the beginning, then merging, moving slowly. Over the Adriatic (particularly over the northern part) the isobars get closer, showing strong southerly winds. Notice the scale of the wind plots, ending at 40 knots in order to cope with the entry numbers: sirocco is strong and persistent in Venice, just less but anyway aligned in the other places. The maximum gusts are impressive too, with 52 knots in Venice-Tessera and 58 in Brindisi. The pressure slopes down for a long time (30 hPa in two days, in Venice, a remarkable drop, though not unique).
On the Lido seacoast, mention is made of the wave storm that broke in many points the famous "murazzi" (seawalls), and we turn to the levels. The flood has been extremely long in time: unlike other cases, hypothetically reduced inlets would not have deprived the sea of the time required to fill the lagoon. Indeed, for 22 hours the level remained over 110 cm, and the residual was over one meter for more than 10 hours and for about 40 hours over 50 cm.
The seiche activity is obviously raging on the various harmonics: also unusual oscillations are present, of higher frequencies, that are not put into evidence here (but are seen in the residual).

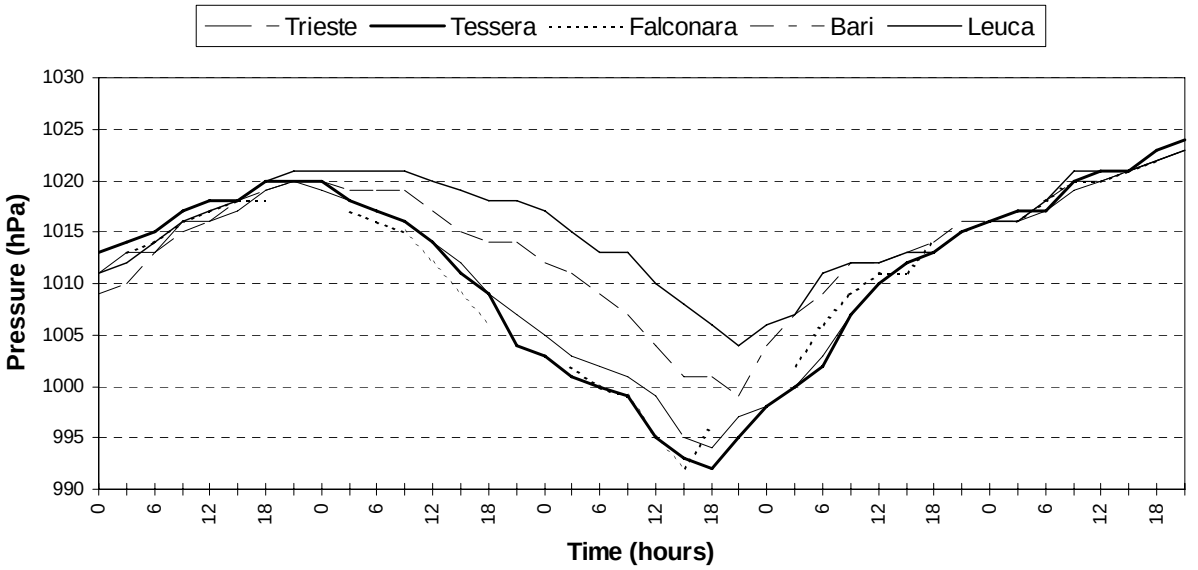
Tide and surge levels at Venice (PDS): 2-6 Nov. 1966



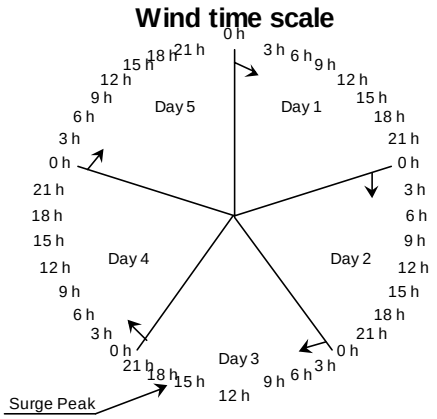
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 2-6 Nov. 1966



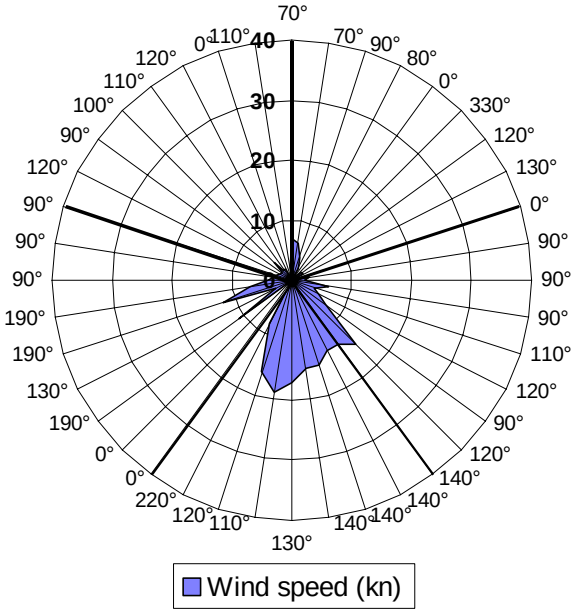
MSL air pressure : 2-6 Nov. 1966



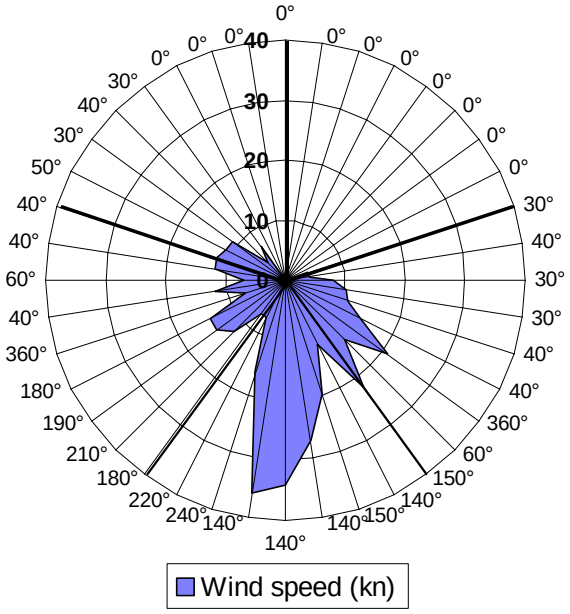
2-6 Nov. 1966



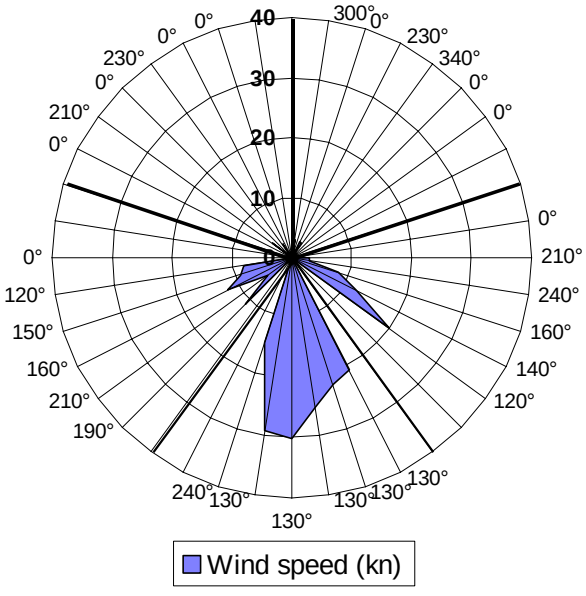
Trieste



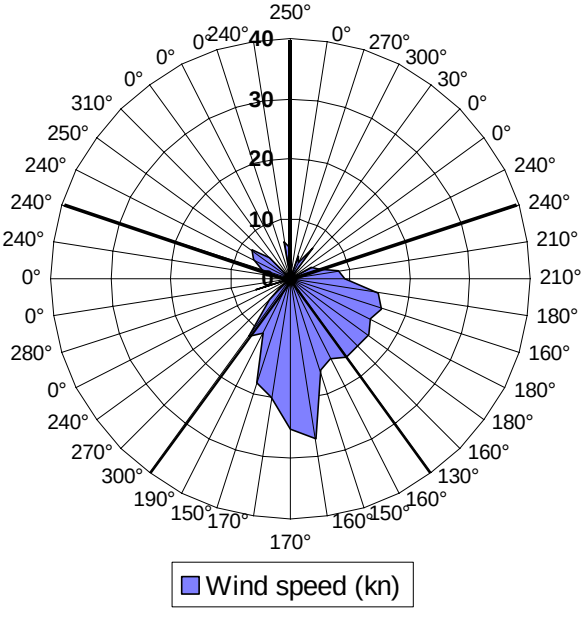
Tessera

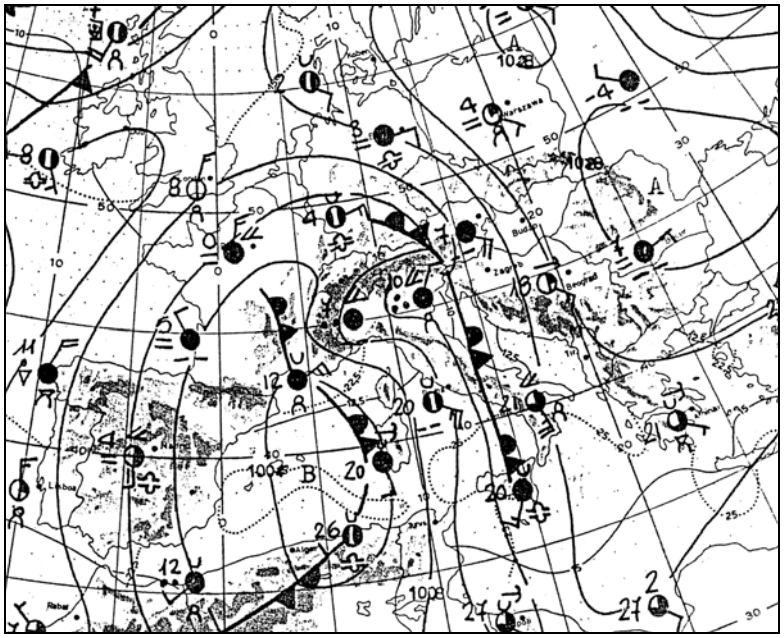


Falconara

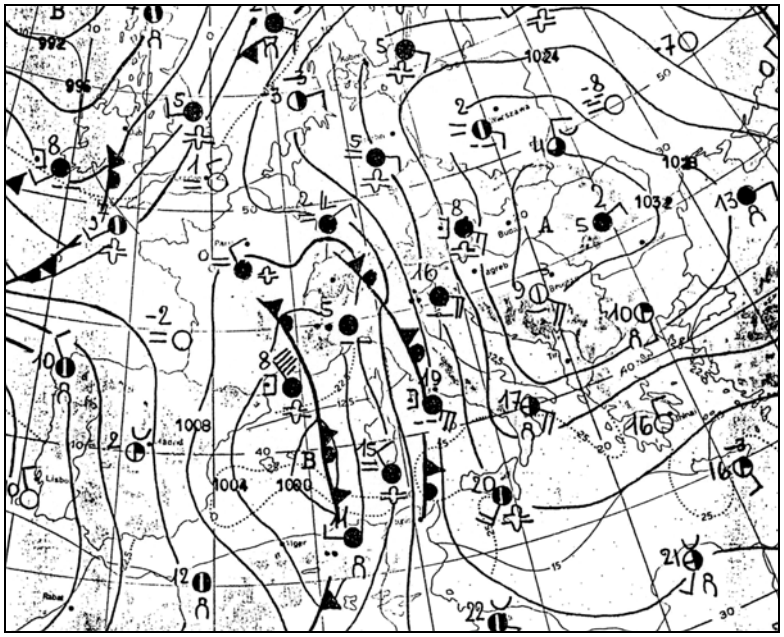


Bari

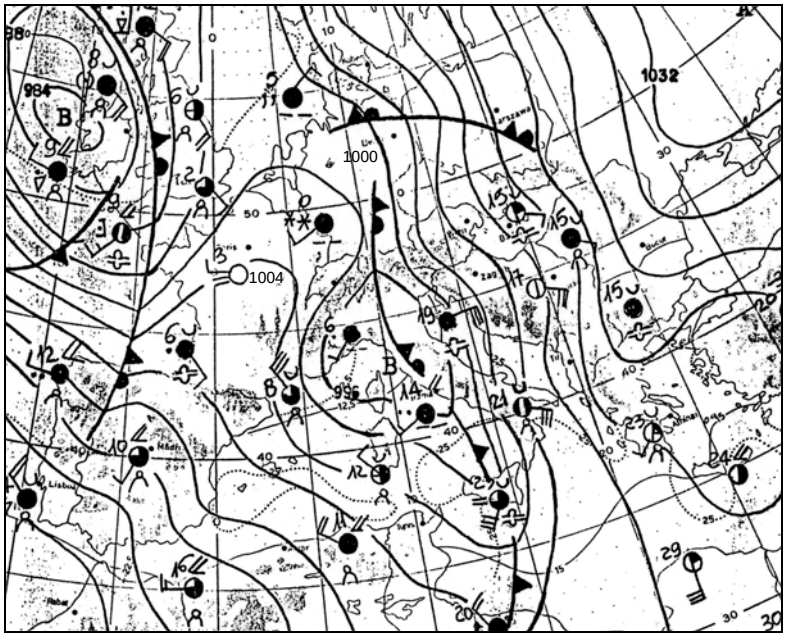




h. 12.00, Nov. 3, 1966



h. 0.00, Nov. 4, 1966



h. 12.00, Nov. 4, 1966

17 febbraio 1967

Ecco un altro caso di "acqua alta" fortunatamente mancata. A causa del contributo irrisorio della marea astronomica, nonostante il notevole rialzo (che partiva, si noti, da valori negativi) non si è arrivati, per poco, al livello tecnico dei 110 cm. Il fenomeno è stato piuttosto impulsivo, generatore di sesse di 22 ore (circa 80 cm di escursione, ai primi rimbalzi) nonostante il veloce rientro del livello medio (il residuo).

Dal punto di vista meteorologico, conviene guardare innanzitutto l'alta pressione ben radicata a oriente. Il maltempo che arriva dall'Atlantico vi si infrange contro, a spese delle nostre regioni. Un primo fronte lento viene raggiunto da una struttura dinamica. Si crea di colpo una depressione sui mari occidentali italiani con venti molto forti sul basso Adriatico e Jonio (si noti la scala delle velocità del vento che si è dovuto adottare).

Un'osservazione sulle isobare di forma particolare sulle Alpi, come un cuneo di alta pressione che resiste ai fronti: ciò ci ricorda la rilevanza delle rugosità della superficie terrestre. Sarebbe importante (per lo studio approfondito della meteorologia e delle sue relazioni con l'orografia) la struttura verticale dell'atmosfera, che qui non è rappresentata.

La caduta della pressione è contenuta (anche qui si noti la scala) e poiché le isobare sono abbastanza allineate con il mare non si crea un'eccessiva differenza tra nord e sud.

Il rialzo, in questo caso, sembra dunque decisamente da attribuire al vento sull'Adriatico meridionale.

February 17, 1967

Here is another case of a fortunate flood... that did not occur. Due to the exiguous contribution of the astronomical tide, in spite of the remarkable surge (which, by the way, developed from an initial negative value) the level of official flood, 110 cm, was barely not reached.

The event was a sharp pulse, creating fundamental seiches (about 80 cm range, at the first returns), with a quick normalization of the mean level (the residual).

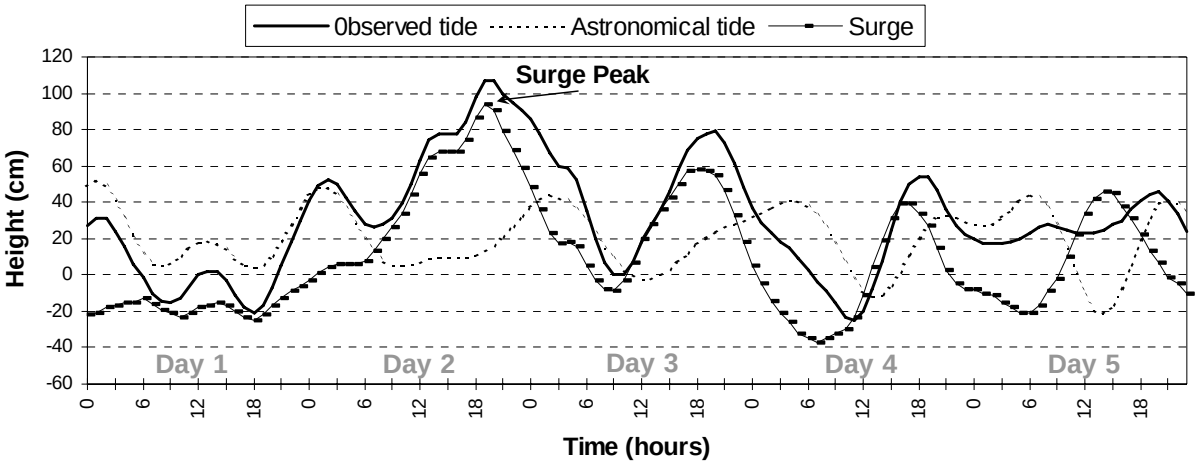
Meteorologically speaking, let us first observe the stable high pressure over eastern Europe. The storms from the Atlantic clash with it, and our regions suffer the damages.

A slow front is reached by a more dynamic structure. A sudden depression appears over western Italian seas, with strong winds in the southern Adriatic and Ionian seas (note the wind scale adopted).

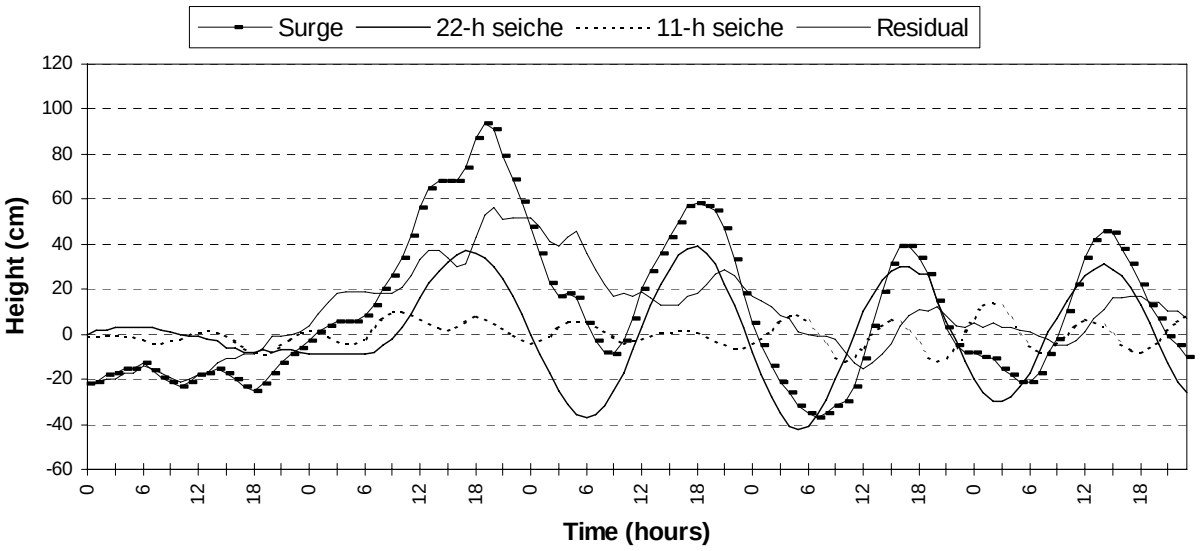
A comment on isobars is made, for the special shape they assume over the Alps, like a wedge of high pressure resisting the fronts: it reminds us of the relevance of the surface roughness. It would be important, for a detailed study of meteorology and its dependence on orography, to know the vertical structure of the atmosphere (not considered here).

The pressure drop is limited (see the scale) and since the isobars are rather aligned with the sea, the difference between north and south is small. Clearly, the surge for this event is to be attributed to the wind, mostly in the southern Adriatic.

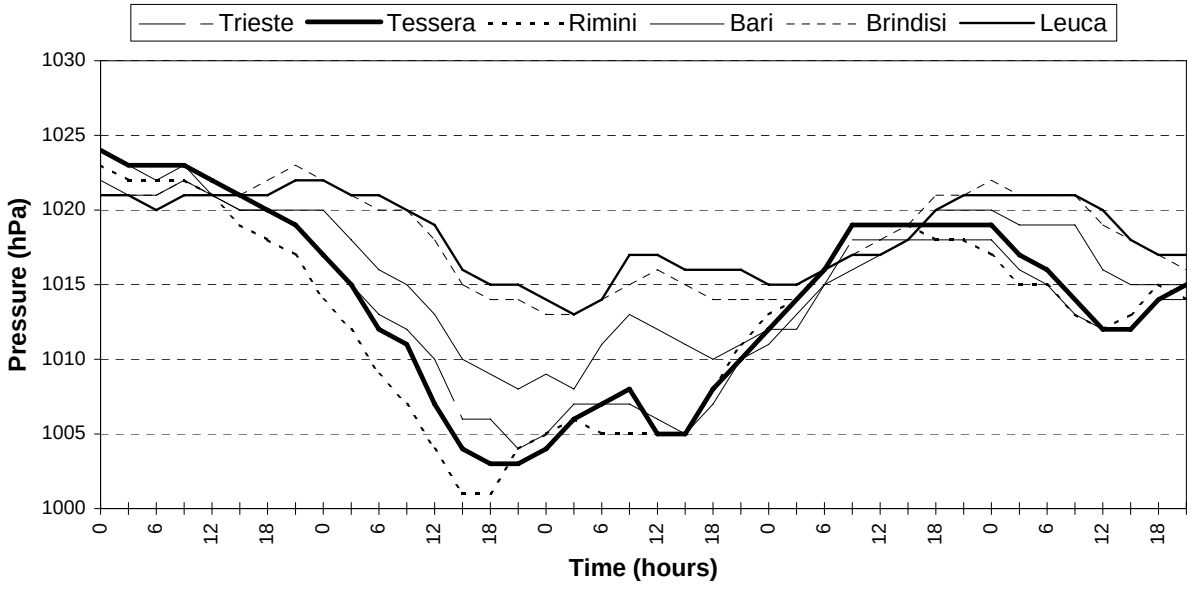
Tide and surge levels at Venice (PDS): 16-20 Feb. 1967



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 16-20 Feb. 1967

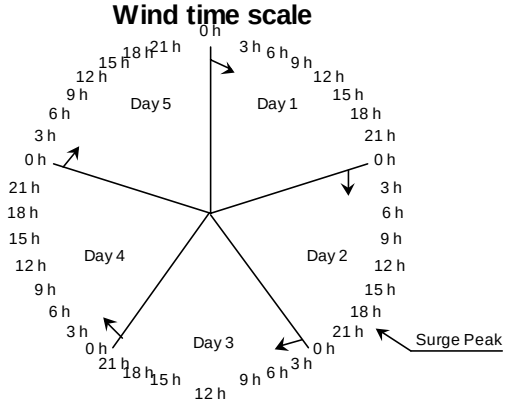


MSL air pressure: 16-20 Feb. 1967

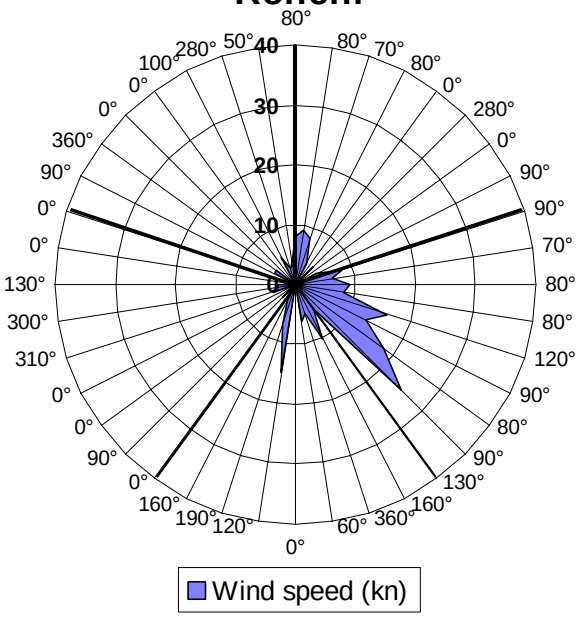


16-20 Feb. 1967

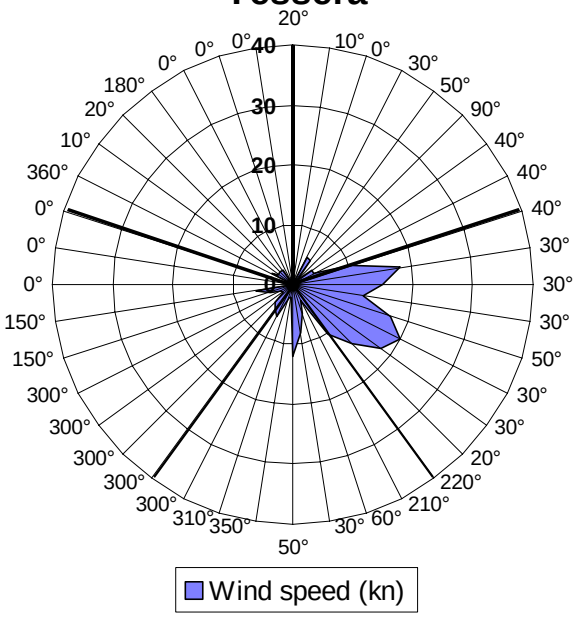
Wind time scale



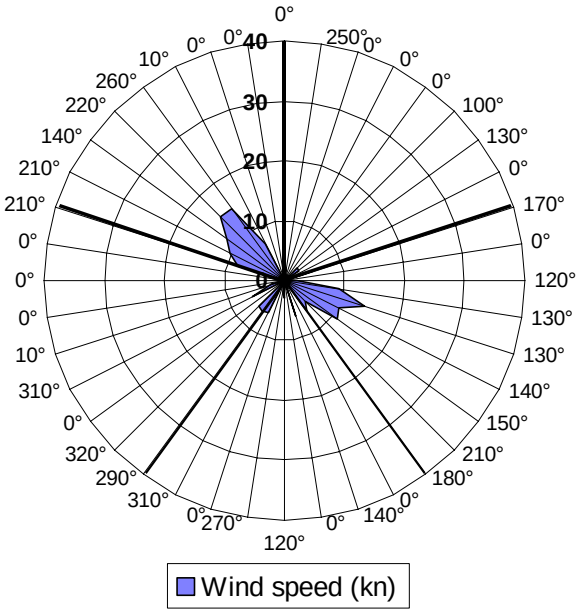
Ronchi



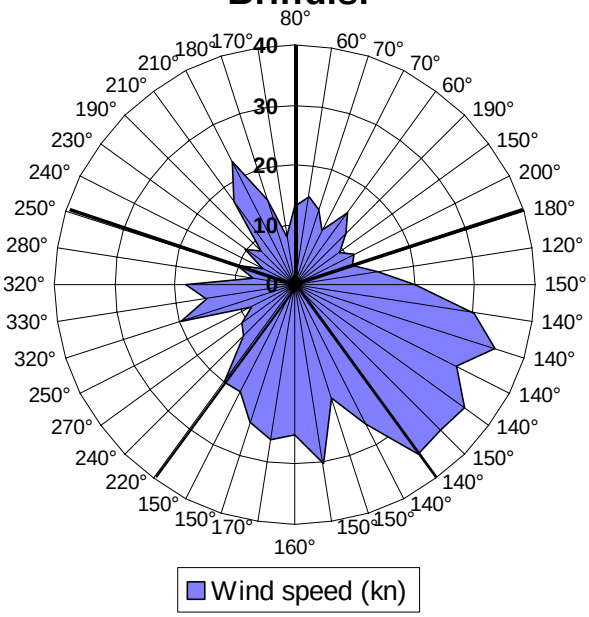
Tessera

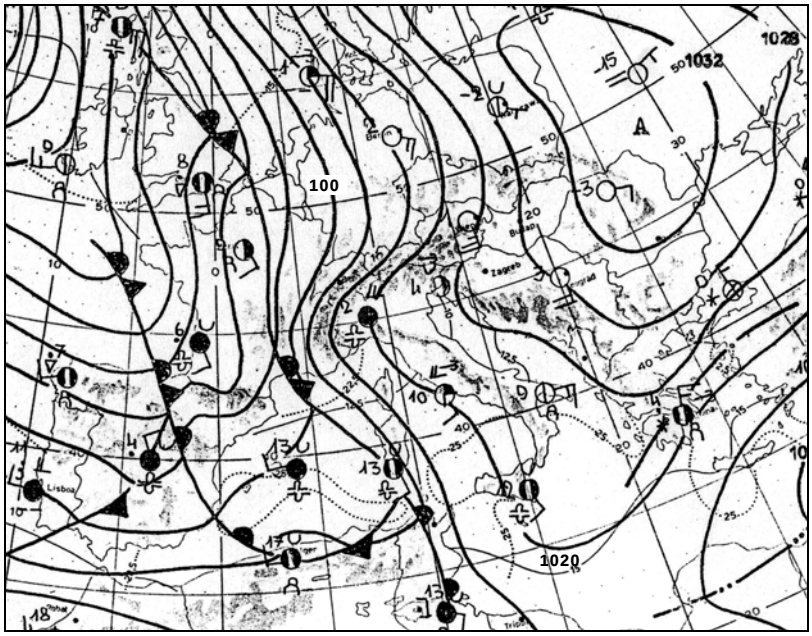


Rimini

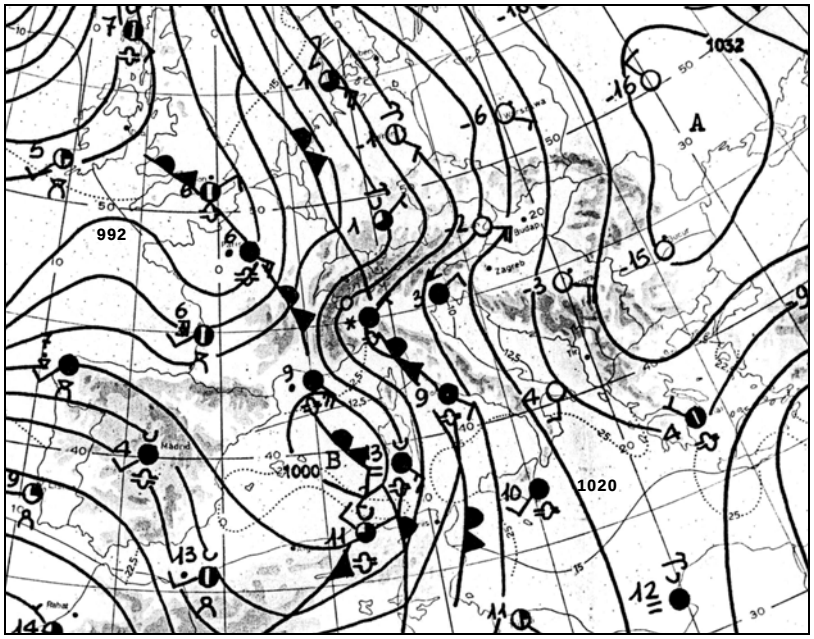


Brindisi

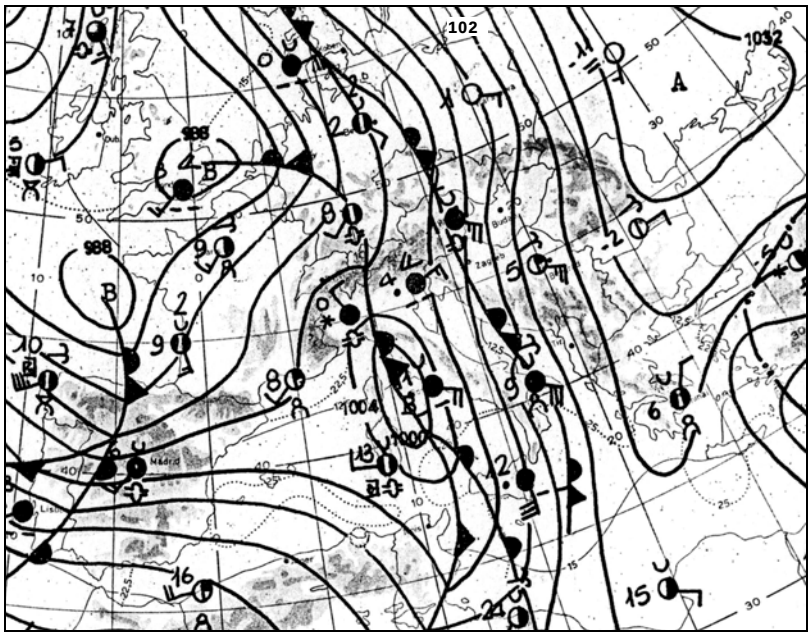




h. 12.00, Feb. 16, 1967



h. 0.00, Feb. 17, 1967



h. 12.00, Feb. 17, 1967

3 novembre 1968

Possiamo partire, per questo evento, dall'osservazione del rialzo marino e dalla sua forma a piramide. La marea osservata mantiene quindi le regolari gobbe di ogni giorno, peraltro sollevate e poi riabbassate progressivamente. Non avendo un aspetto impulsivo, il rialzo è stato costruito metodicamente, in due giorni, da un insieme di azioni atmosferiche che si riconoscono dalle mappe: si vede un fronte molto esteso che avanza lentamente, mentre a oriente le masse d'aria resistono. Ciò determina nelle nostre zone la caduta graduale della pressione a partire da valori alti e livellati, e la persistenza di venti meridionali dovunque, anche sullo Jonio. I centri depressionari invece non si avventurano mai sul Mediterraneo.

Sulle carte meteorologiche i piccoli cerchi si riferiscono alle principali stazioni di osservazione. Il numero alla loro sinistra, in alto, indica la temperatura. Si notino i valori, piuttosto elevati per la stagione, per le aree colpite dal vento meridionale: questa è una peculiarità che a Venezia viene ricordata in collegamento con molte grandi inondazioni. Le curve meteo delle stazioni adriatiche riservano altre osservazioni.

Se si guardano le pressioni, si può vedere che, al passaggio della perturbazione, i valori sono regolarmente decrescenti dal basso Adriatico in su (Leuca, Bari, Termoli, Falconara) salvo poi crescere nella parte alta (Tessera, Ronchi). Come dire che la depressione è passata localizzandosi su Ancona. Ed ecco un riscontro sulle sesse che seguono: la frequenza di 11 ore (la seconda sessa) è anche stavolta bene sviluppata, in accordo con una certa concentrazione di energia in una zona intermedia. Giova osservare anche qui la barriera opposta dalle Alpi al movimento delle perturbazioni (flessione delle isobare).

November 3, 1968

For this event, one starts observing the surge and its peculiar, pyramid-like shape. As a consequence, the observed levels maintain the usual sinusoidal pattern, but first with a gentle trend upwards, then downwards. Since the surge is not a pulse, it had been progressively developing for two days due to a combined meteorological action to be found in the weather charts. A very extended front is seen to progress slowly, while to the east the air masses resist. Due to it, the pressure in our area gradually decreases from a flat, high-value distribution, while southerly winds blow all over, even in the Ionian sea. Instead, low-pressure centers never enter the Mediterranean.

On the weather maps, the small circles refer to the main measuring stations. The small numbers, on their top left, give the temperature.

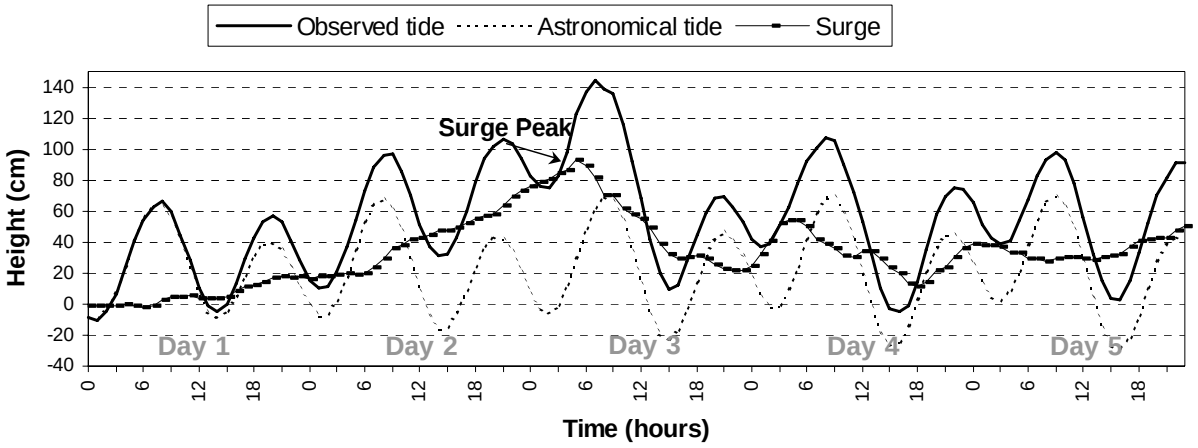
There are rather high values, considering the season, for places where a southerly wind blows: Venetians easily remember the warm air frequently connected to big floods.

The meteorological graphs for the Adriatic stations merit further considerations. Pressure shows that, on arrival of the perturbation, the values are regularly decreasing from the southern Adriatic northward (Leuca, Bari, Termoli, Falconara), but they increase in the northern part (Tessera, Ronchi).

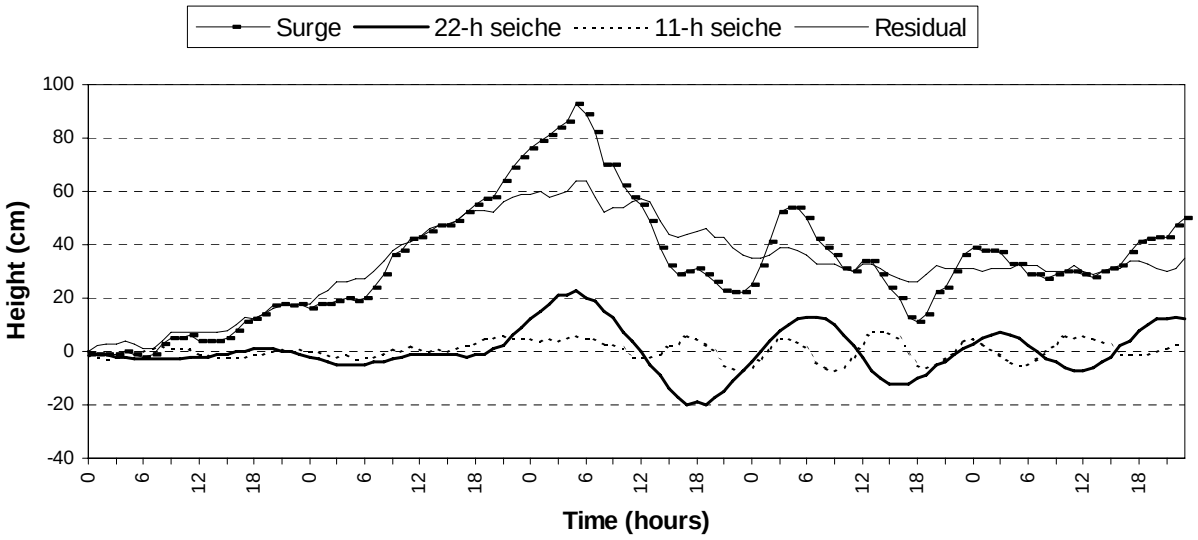
In other words, the low-pressure center was localised over Ancona-Falconara: the seiches that follow confirm it. The 11-hour oscillation (the second frequency) also in this case is well developed, which is normally related to a certain concentration of energy in an intermediate point.

It is helpful to observe also in this case the barrier effect of the Alps on frontal movements (the wedge of isobars).

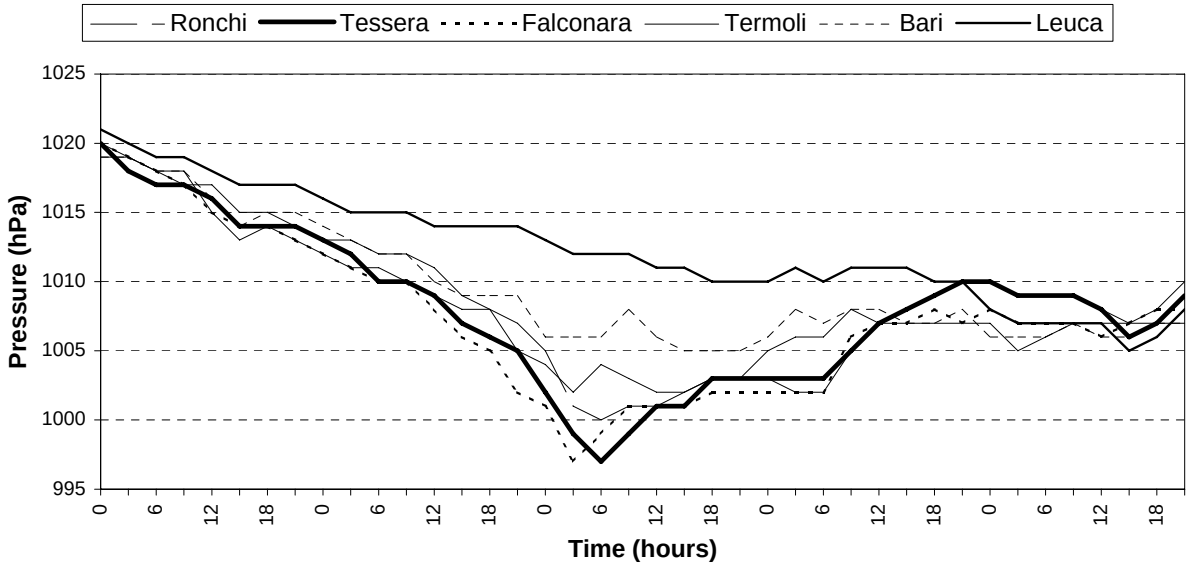
Tide and surge levels at Venice (PDS): 1-5 Nov. 1968



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 1-5 Nov. 1968

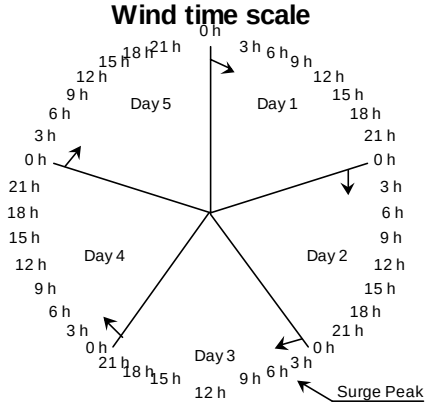


MSL air pressure: 1-5 Nov. 1968

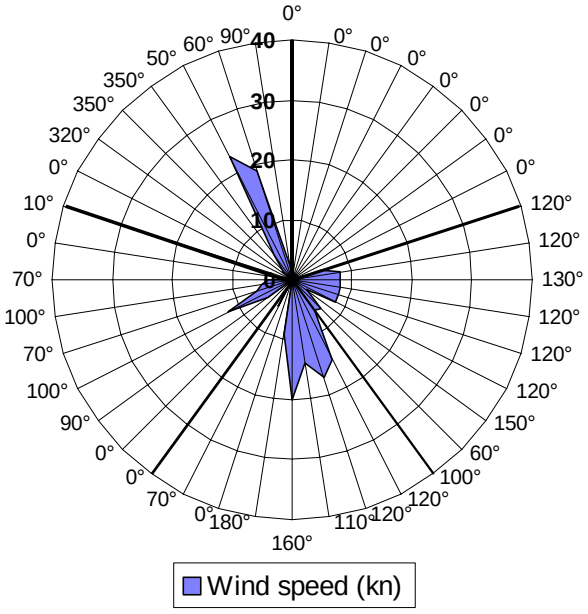


1-5 Nov. 1968

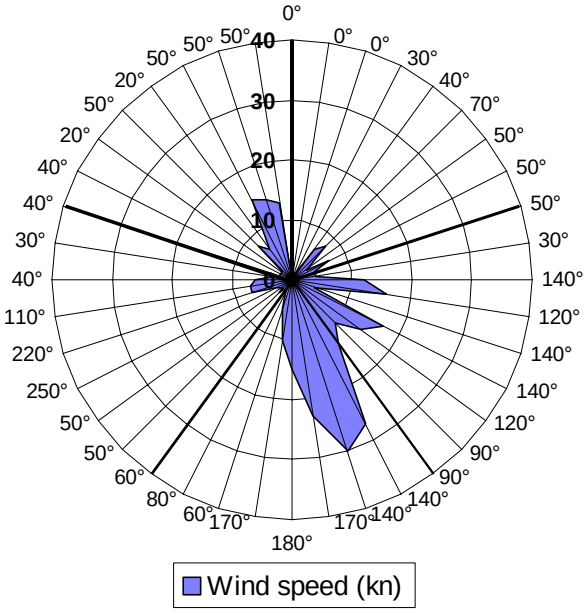
Wind time scale



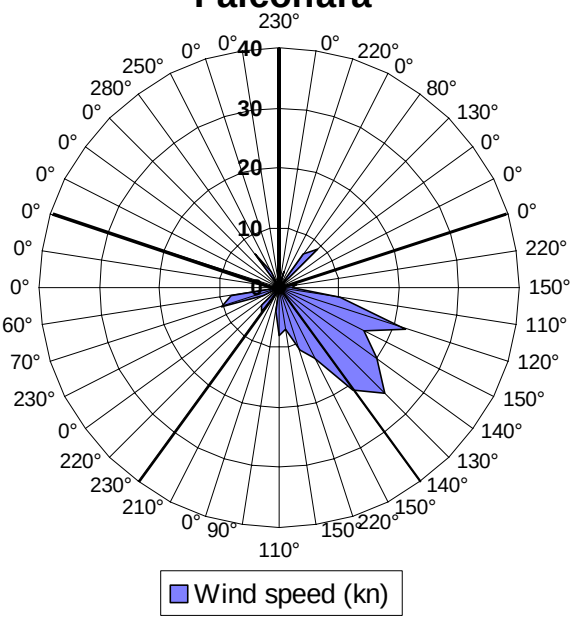
Ronchi



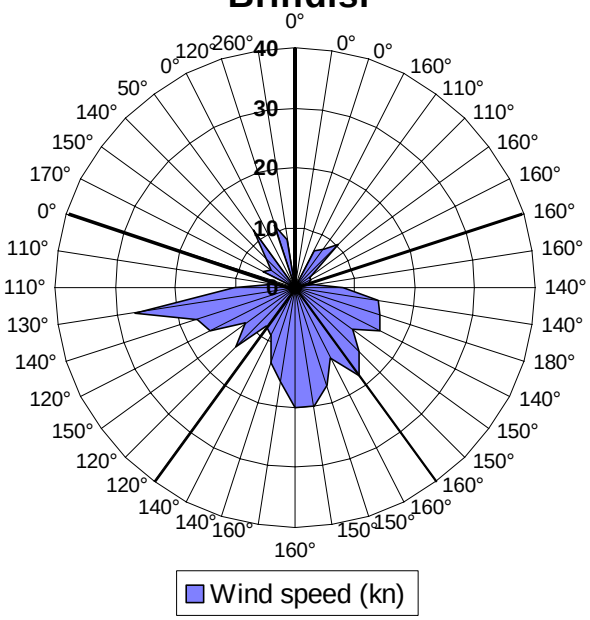
Tessera

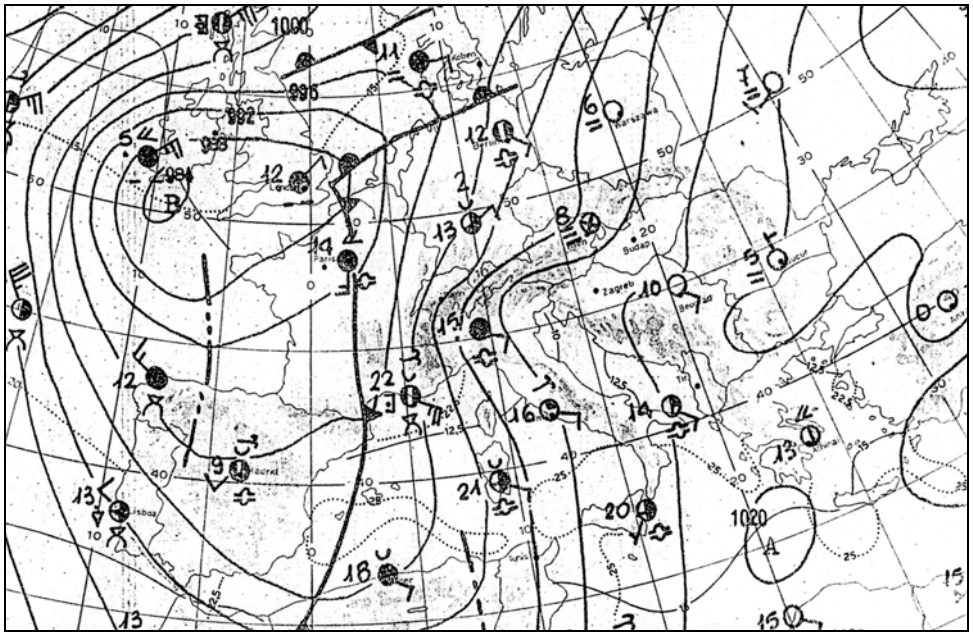


Falconara

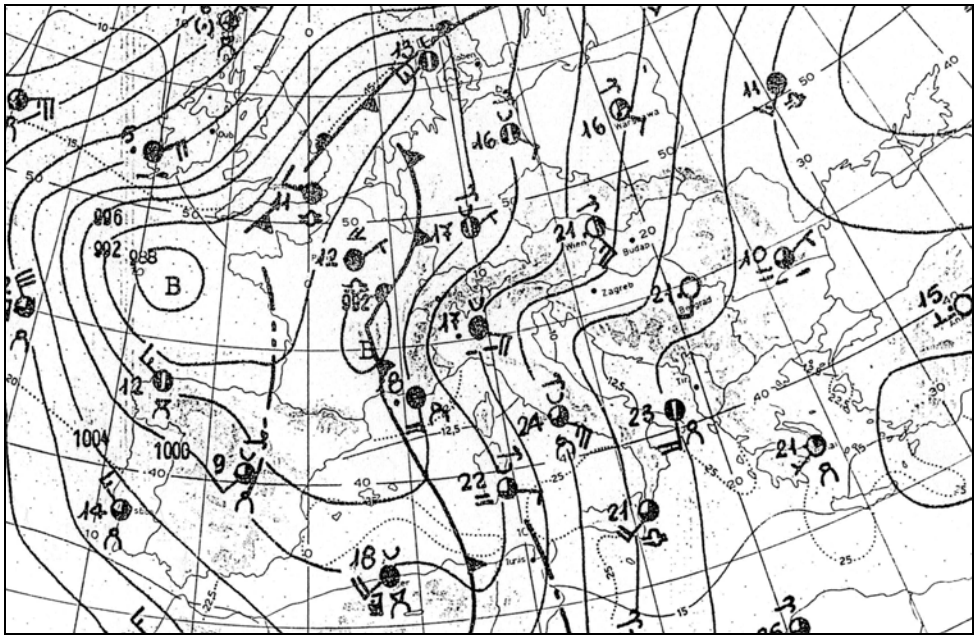


Brindisi

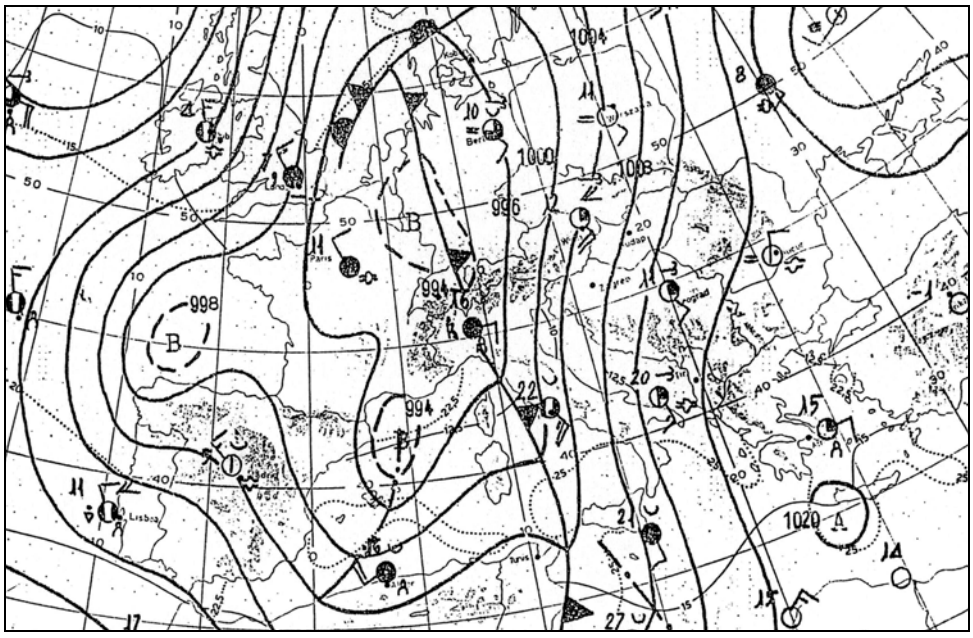




h. 0.00, Nov. 2, 1968



h. 12.00, Nov. 2, 1968



h. 0.00, Nov. 3, 1968

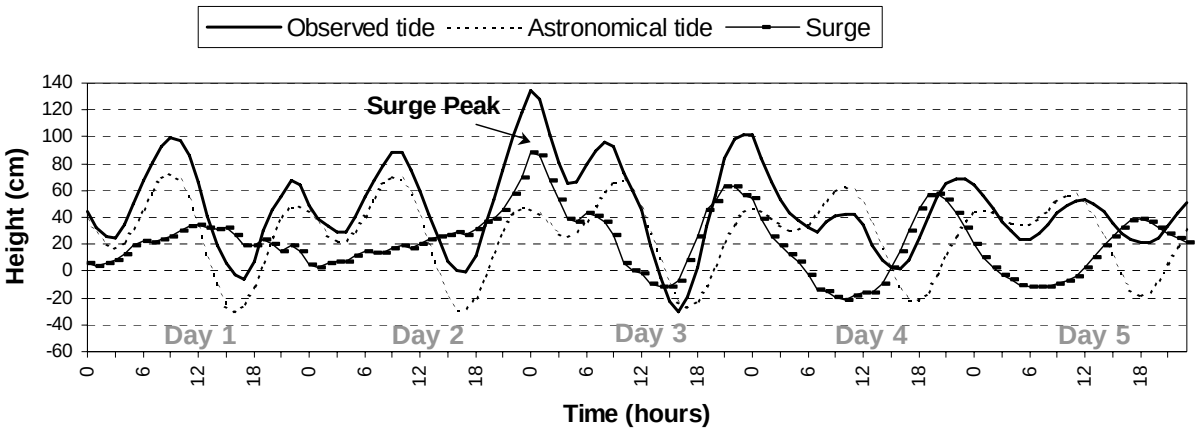
26 novembre 1969

Il caso del 1969 è particolarmente complesso ed interessante: si vede un minimo depressionario che da Gibilterra percorre il Mediterraneo occidentale, con un suo corteggio (strano, anche se non unico) di due fronti opposti (come posizione e come temperatura). Esso si proietta dritto verso l'alto Adriatico, dove, a peggiorare la situazione, incontra un fronte freddo proveniente da nord. E l'impulso sul mare è forte e veloce.
Un campo meteorologico così agitato può fare sorgere una domanda. Ma perché, intanto, avviene in novembre la maggior parte delle "acque alte"? Situazioni dinamiche e confuse come la presente si possono sempre presentare, ma in novembre-dicembre (per dire in due parole) si sta formando nelle regioni artiche la massa d'aria invernale e ai suoi margini (per noi, sulla Groenlandia, dato che tutto poi si sposta secondo certe traiettorie) si forma il fronte polare, che si sfrangia, nelle sue discese, su forti differenze di temperatura (terre e soprattutto mari ancora caldi): ecco quindi la maggiore frequenza di questi fenomeni.
Tornando all'evento in questione, un osservatore dell'alto Adriatico avrebbe potuto capire anche senza conoscenze esterne di essersi trovato in una buca di pressione (e non semplicemente sul percorso di un fronte), dal fatto che per qualche ora, localmente, il vento è di fatto cessato (Rimini, Tessera, Trieste), mentre prima e dopo i venti, meridionali, erano sostenuti (ben 56 nodi di raffica a Trieste); e l'impressione psicologica di questa calma era tutt'altro che rassicurante.
Per il resto dell'Adriatico lo scirocco era comunque robusto. Il rialzo marino, a Venezia, è stato fulmineo, così come la successiva discesa. La condizione è ideale per la sessa fondamentale (22 ore), più che notevole, e c'è un certo spazio anche per le sesse successive, anche per quelle che qui non sono evidenziate (ma le si può notare nel residuo). Un'osservazione ripetuta più volte sulla forma impulsiva della marea osservata: se le bocche di porto avessero avuto una maggiore capacità frenante, il danno per Venezia sarebbe stato, in questo caso, assai minore.
Ancora un'osservazione tutt'altro che nuova sull'ora di arrivo del rialzo: esso è giunto in concomitanza con un massimo di marea astronomica, ma poteva andare peggio. I due massimi di marea giornalieri sono infatti diversi ("ineguaglianza diurna"), e se il rialzo fosse giunto dodici ore prima (e se ha senso parlare di "se") si sarebbero avuti oltre venti centimetri in più.

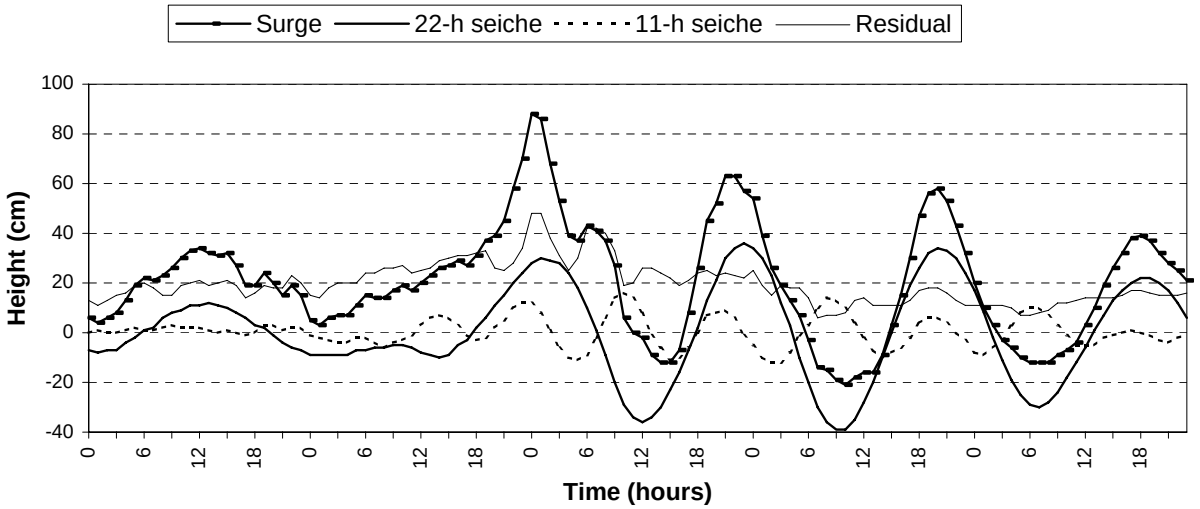
November 26, 1969

This event is rather complex and interesting: a low-pressure center is seen, moving from Gibraltar along the western Mediterranean, connected with two fronts, opposite in position and temperature. This pattern is curious, but not unique.
The center runs straight towards the northern Adriatic, where, to worsen things, it meets a cold front coming from north: the pulse on the sea is strong and quick. Such a turbulent scenario suggests the question of why most floods occur in November? Indeed, situations so active and confused can occur in whatever season, but, simply speaking, between November and December in the area close to the North Pole the winter air is forming. At its border the polar front is active (for us, in particular, over Greenland, since the typical trajectories will move from there to Europe) and in its southward movement the front breaks due to the strong temperature differences (over land but mainly over the sea). Whence the large frequency of these phenomena.
Getting back to the event, an observer on the northern Adriatic could detect the pressure center passing there (and not just the advent of a front) by observing that locally, for a few hours, the wind disappeared (Rimini, Tessera, Trieste), while before and after it had been strong, generally blowing from the south (56-knot gusts in Trieste!). The emotional effect of the calm was anything but relaxing.
For all the other places on the Adriatic, sirocco was strong all the time.
The surge, in Venice, rised quickly, and quickly dropped. The condition was ideal for the fundamental seiche, that turned out quite remarkable, leaving room also for the oscillations of other frequencies, including the ones that are not shown in our graphs (but can be seen in the residual).
Note again the sharp rise of the observed tide: reduced inlets could have reduced the damage for Venice, also in this case.
Now, another comment about timing - certainly not a new one. The surge onset came in phase with an astronomical flood tide: but things could have been worse. The two daily maxima of tide are different ("diurnal inequality"), and if the surge were to have come twelve hours earlier (but is it rightful to say "if"?), then the flood would have been greater by more than twenty centimetres.

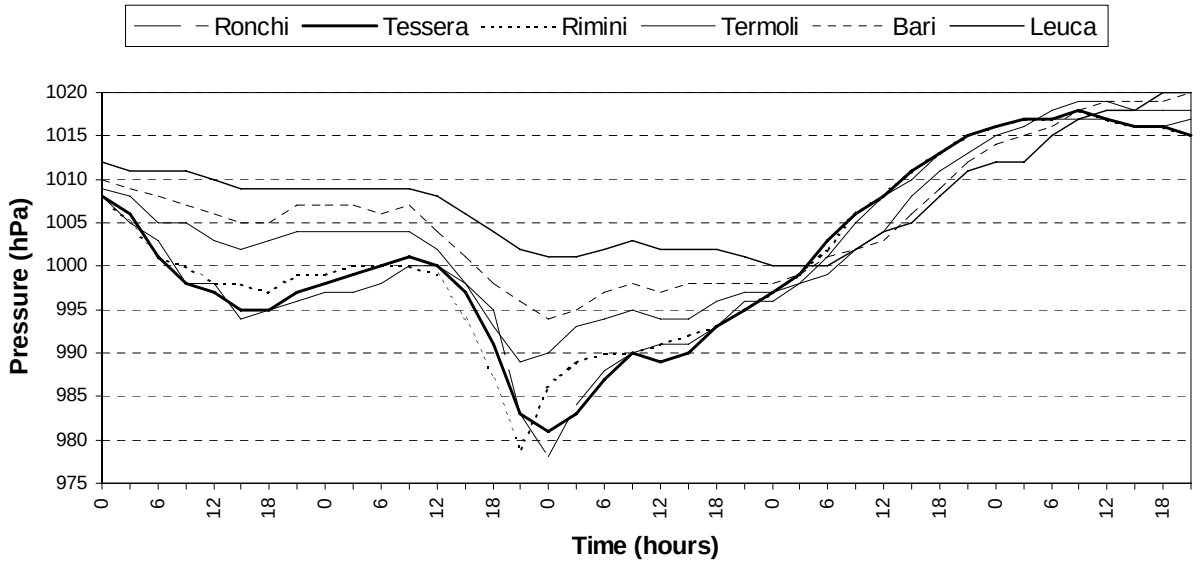
Tide and surge levels at Venice (PDS): 24-28 Nov. 1969



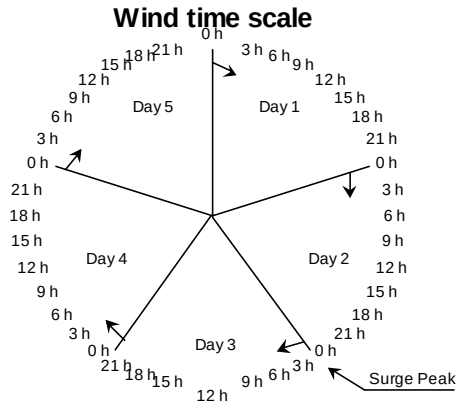
Surge and seiche levels at Venice : 24-28 Nov. 1969



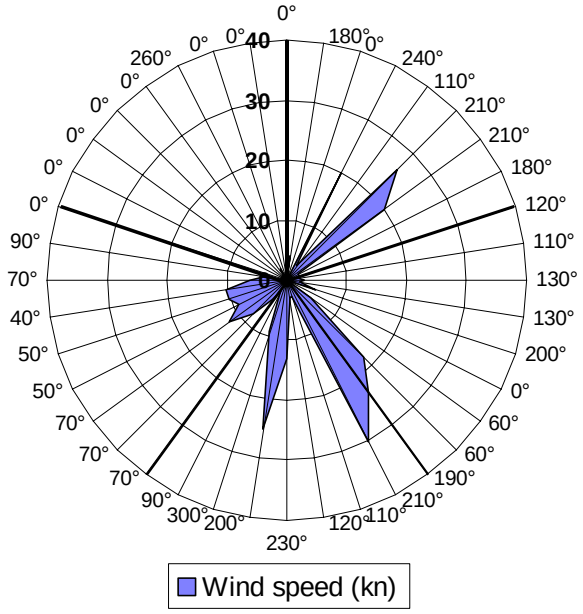
MSL air pressure: 24-28 Nov. 1969



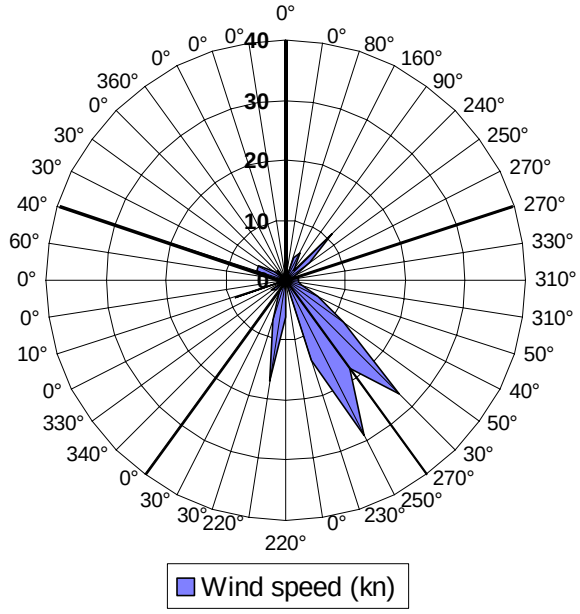
24-28 Nov. 1969



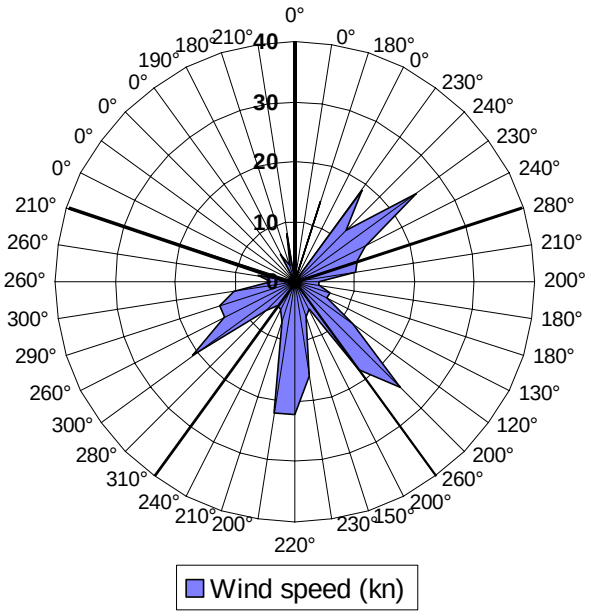
Trieste



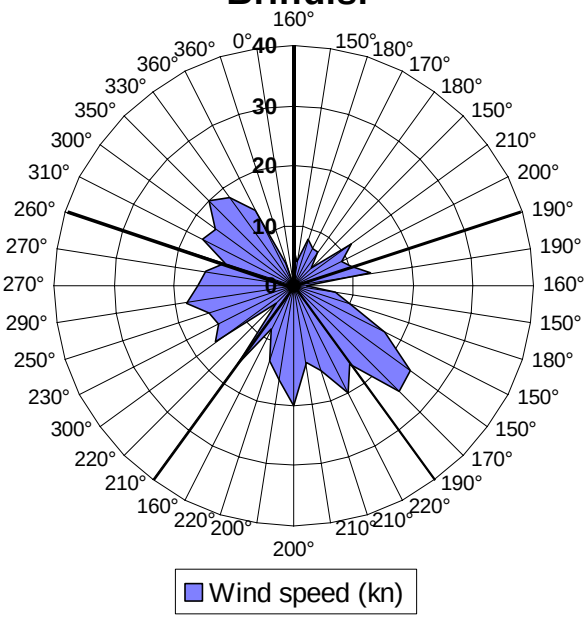
Tessera

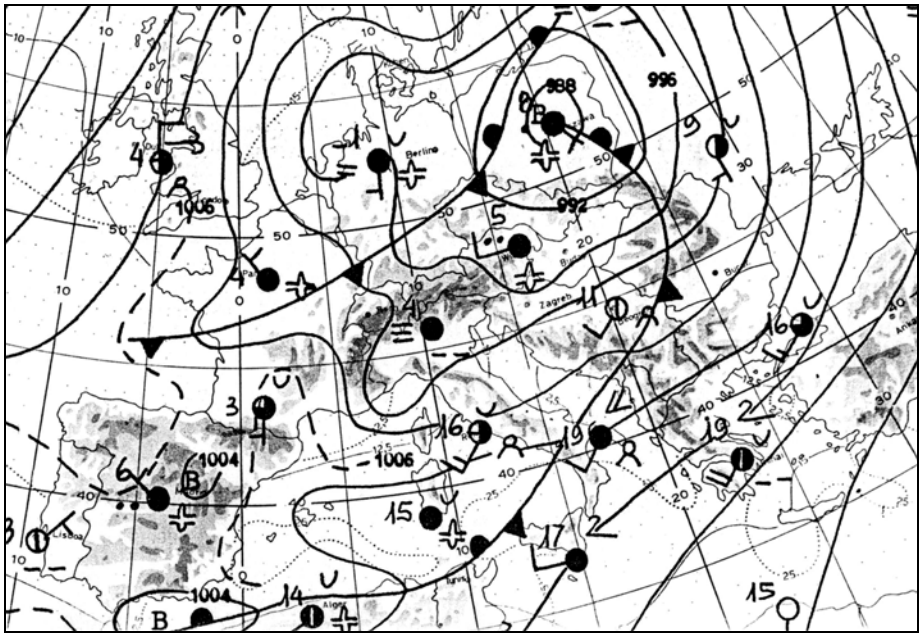


Rimini

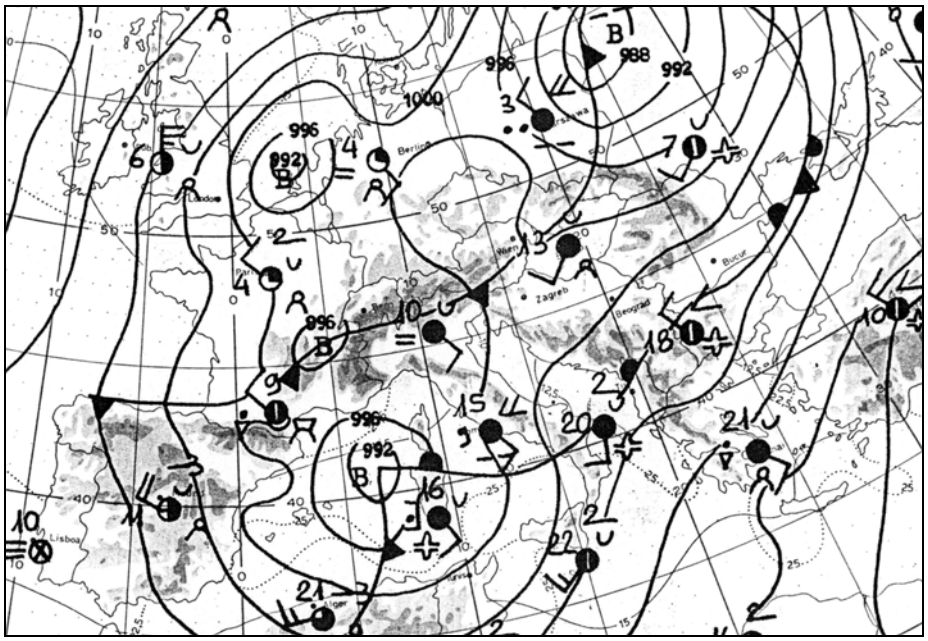


Brindisi

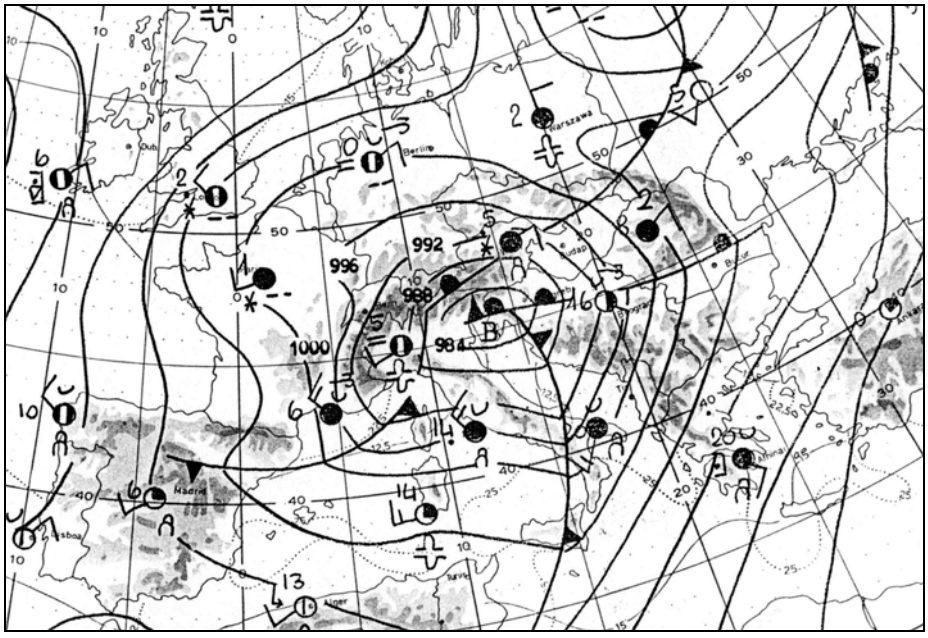




h. 0.00, Nov. 25, 1969



h. 12.00, Nov. 25, 1969



h. 0.00, Nov. 26, 1969

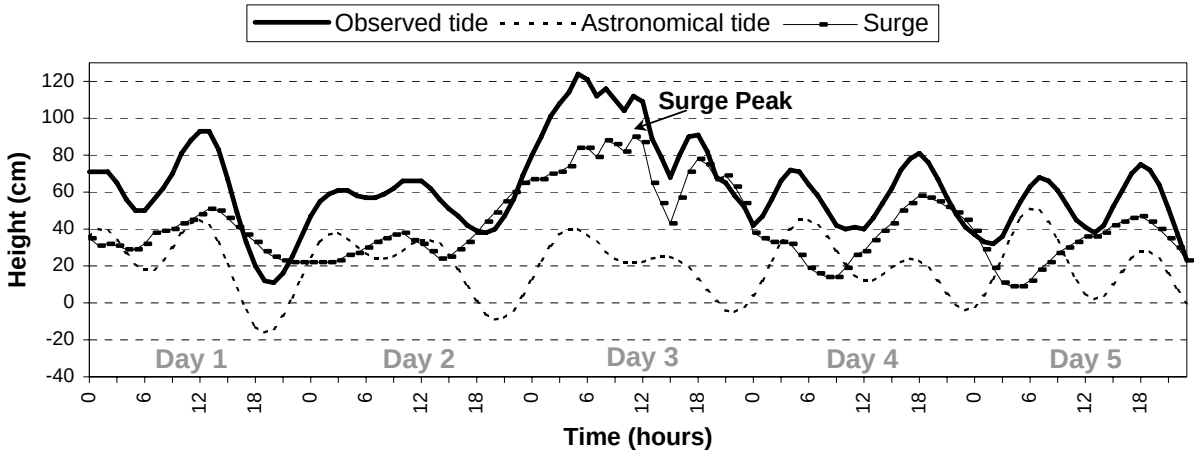
30 ottobre 1976

Il rialzo massimo (90 cm, ore 11) cade 7 ore dopo il massimo principale della giornata della marea astronomica (40 cm, ore 4) e in coincidenza del minimo (22 cm), facendo registrare una marea di 112 cm. In coincidenza col massimo principale è stata misurata una marea di 124 cm, dovuta ad un contributo meteo di 84 cm.
La pressione, il 28 ottobre, ha un valore di 1000-1005 hPa su tutto l'Adriatico, con valore più alto al sud. Da qui sale raggiungendo un valore tra i 1015-1020 hPa per poi calare nuovamente: a nord scende fino ai 995 hPa in contemporanea al massimo rialzo, mentre al sud si misura un valore di 1012 hPa. Il gradiente barico si annulla il giorno dopo quando la pressione al nord risale e al sud scende ulteriormente.
Tutto ciò fa registrare un vento di scirocco di circa 25 nodi a Tessera - Venezia per circa sei ore a cavallo del rialzo e a Brindisi per un periodo più esteso, con raffiche di 54 nodi a Bari e di 45 nodi a Tessera.
La sessa di 22 ore ha un'ampiezza molto bassa (20 cm) rispetto ai simili eventi di marea, mentre quella da 11 ore ha un massimo poco prima del massimo rialzo (20 cm) per poi diminuire fino ad estinguersi il giorno dopo l'evento. Da notare che il residuo raggiunge un massimo di 75 cm e rimane superiore a 50 cm per 19 ore consecutive.
Le carte meteorologiche del 28 ottobre mostrano un'area ciclonica principale posizionata sul Golfo di Biscaglia (985 hPa) e una minima depressionaria secondaria sul nord Adriatico. Nei giorni successivi l'area ciclonica si allarga estendendosi sul Mediterraneo occidentale e portando i valori minimi di pressione intorno ai 1000 hPa. Il giorno dell'evento (30 ottobre) si instaura un minimo di 1005 hPa centrato sull'Italia centro-settentrionale che produce un richiamo di vento di scirocco sull'Adriatico.

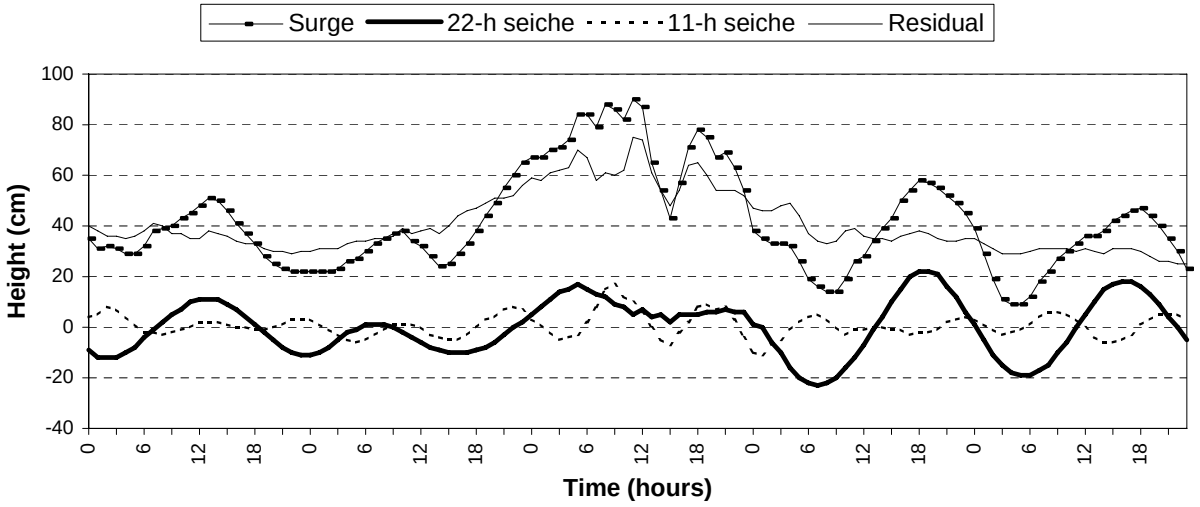
October 30, 1976

The surge peak (90 cm at 11 AM) occurs seven hours after the daily maximum for the ordinary tide (40 cm at 4 AM), at the time of the minimum (22 cm), giving a measured value of 112 cm. But at 4 AM a level of 124 cm had been reached, since the surge was at 84 cm.
The pressure, on October 28, was spreading between 1000 and 1005 hPa over the whole Adriatic, with higher values to the south. Pressure values rose to 1015-1020 hPa, then dropped back: in the northern part they reached 995 hPa at the time of the surge peak, while in the south it was 1012 hPa. The gradient disappeared the day after when the pressure in the north increases and in the south it kept decreasing.
All this gave a sirocco wind of 25 knots at Venice-Tessera for about six hours around the surge maximum, and even longer in Brindisi, with gusts of 54 knots at Bari and of 45 knots at Tessera.
The 22-hour seiche is weak (20 cm amplitude) with respect to similar events, while the 11-hour one has a maximum slightly before the surge peak (around 20 cm), bound to decrease and vanish the following day. Notice that the residual reaches the top of 75 cm and remains over the 50 cm for 19 hours.
The weather maps of October 28 show a principal cyclonic area centered over the Gulf of Lion (985 hPa) and a secondary minimum over the northern Adriatic. On the following days, the cyclone widens over the western Mediterranean, shifting the minimum value to about 1000 hPa.
The day of the surge (the 30th) a minimum of about 1005 hPa is seen over northern and central Italy, causing sirocco to blow over the Adriatic.

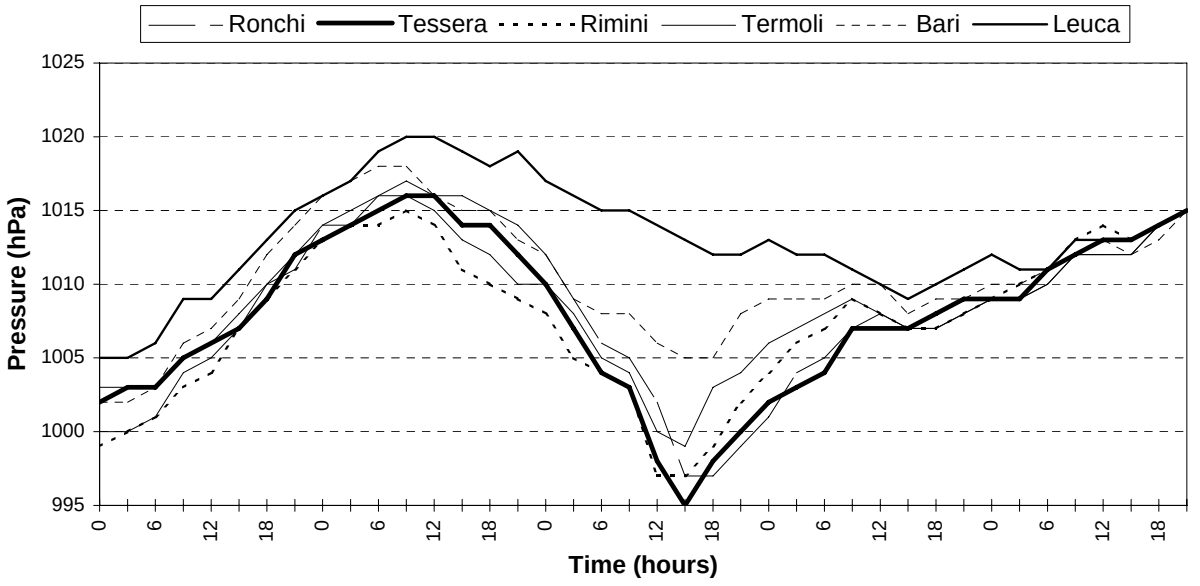
Tide and surge levels at Venice (PDS): 28 Oct.-1 Nov. 1976



Surge and seiche levels at Venice (PDS):28 Oct.-1 Nov. 1976

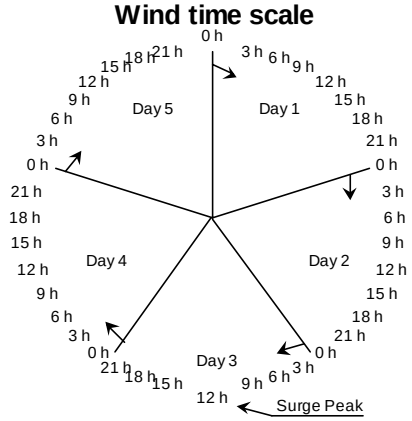


MSL air pressure: 28 Oct.-1 Nov. 1976

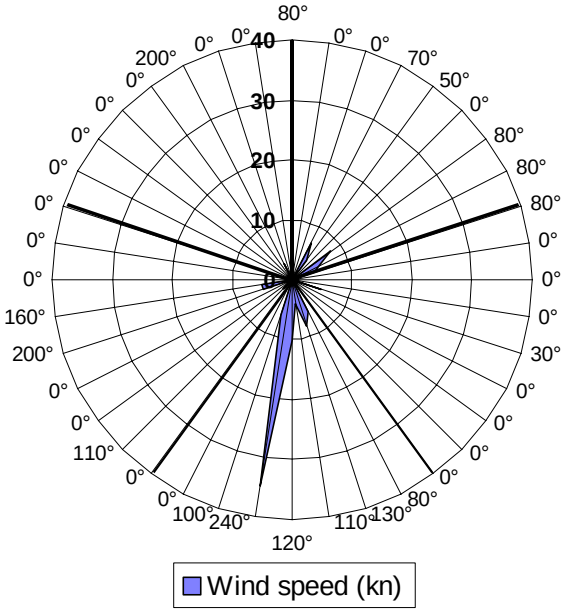


28 Oct.- 1 Nov. 1976

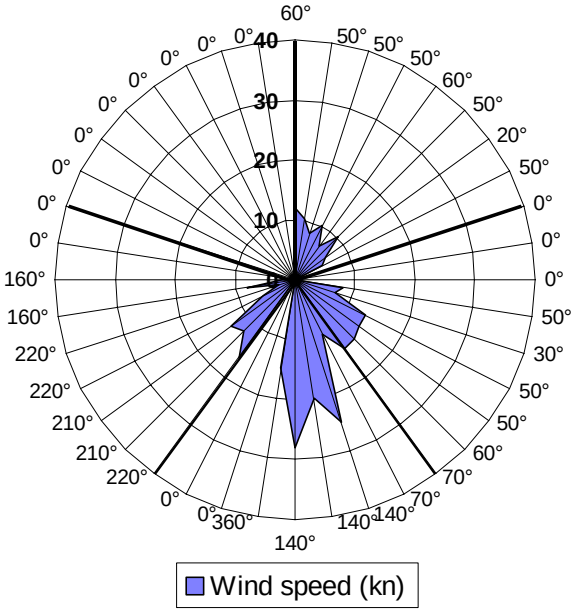
Wind time scale



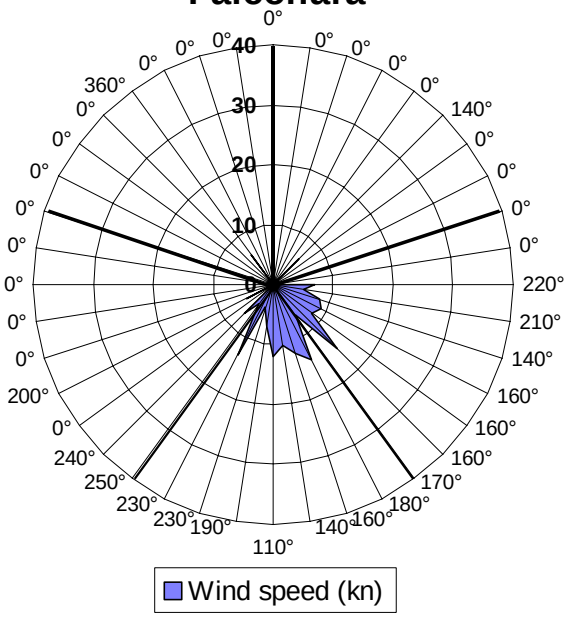
Ronchi



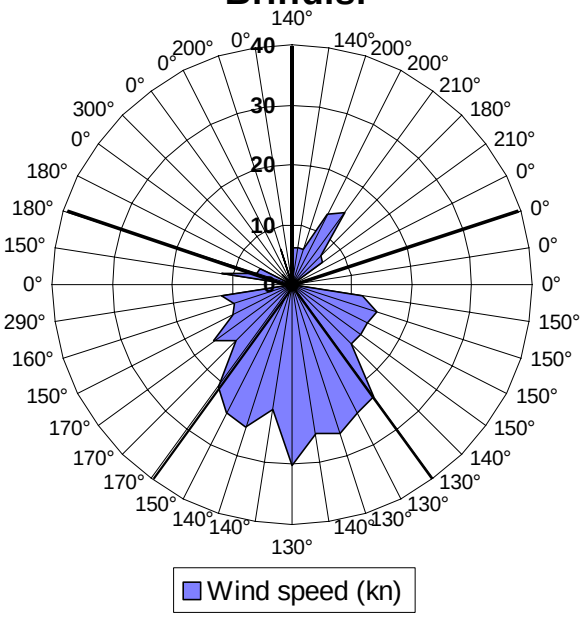
Tessera

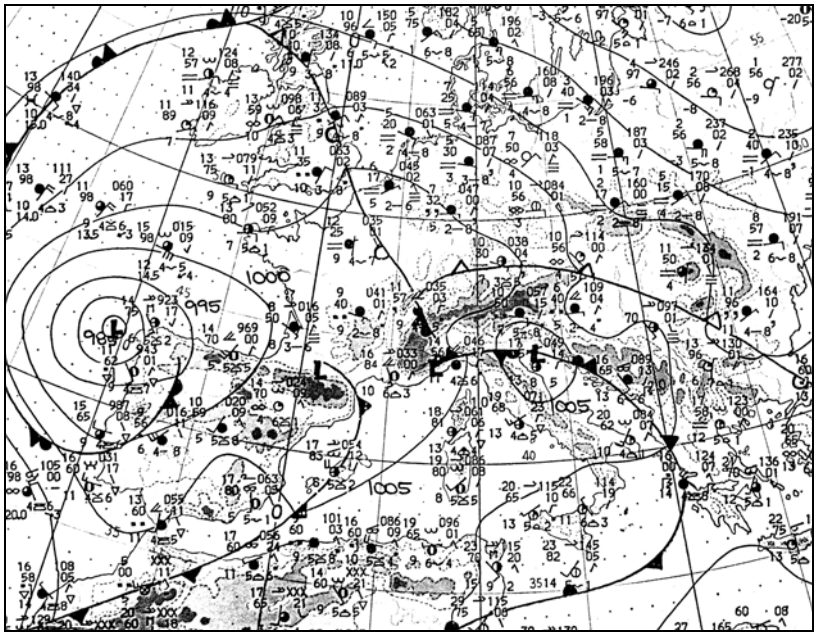


Falconara

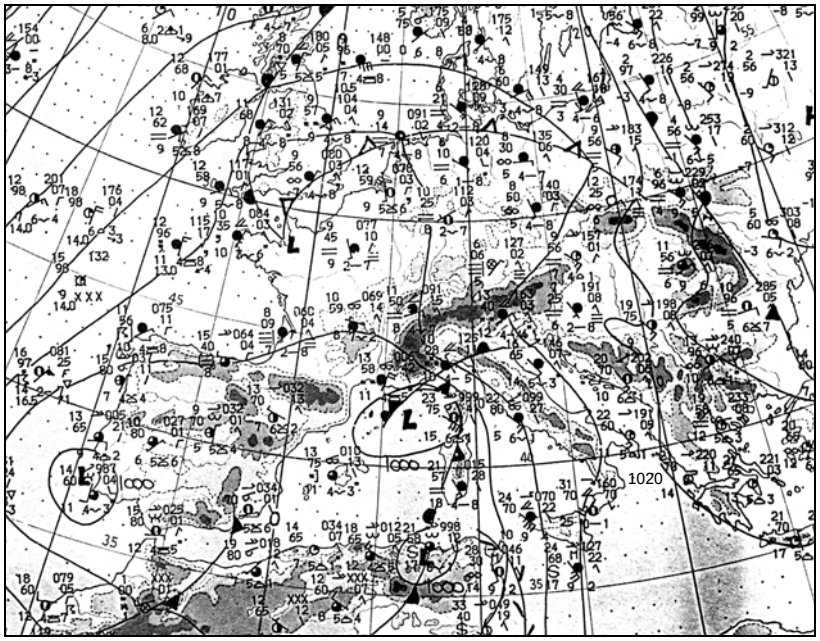


Brindisi

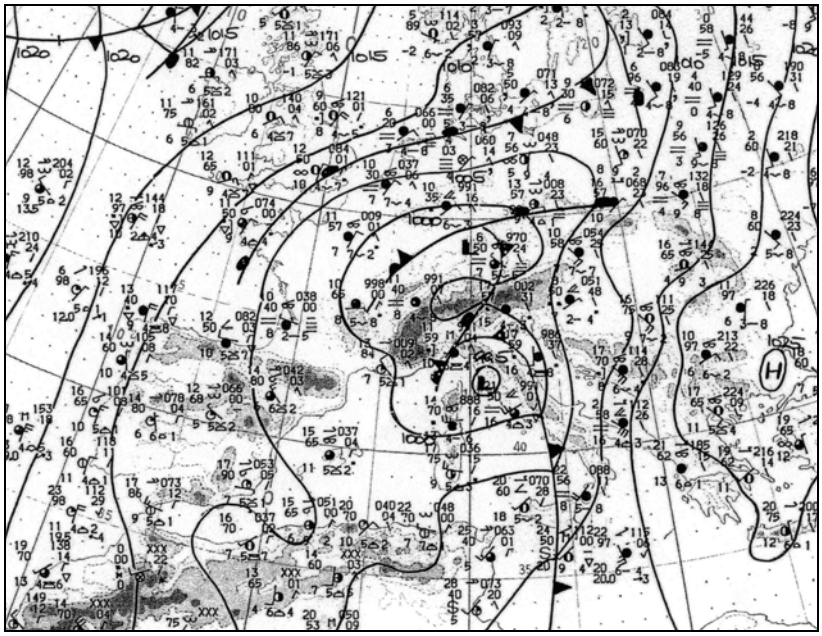




h. 12.00, Oct. 28, 1976



h. 12.00, Oct. 29, 1976



h. 12.00, Oct. 30, 1976

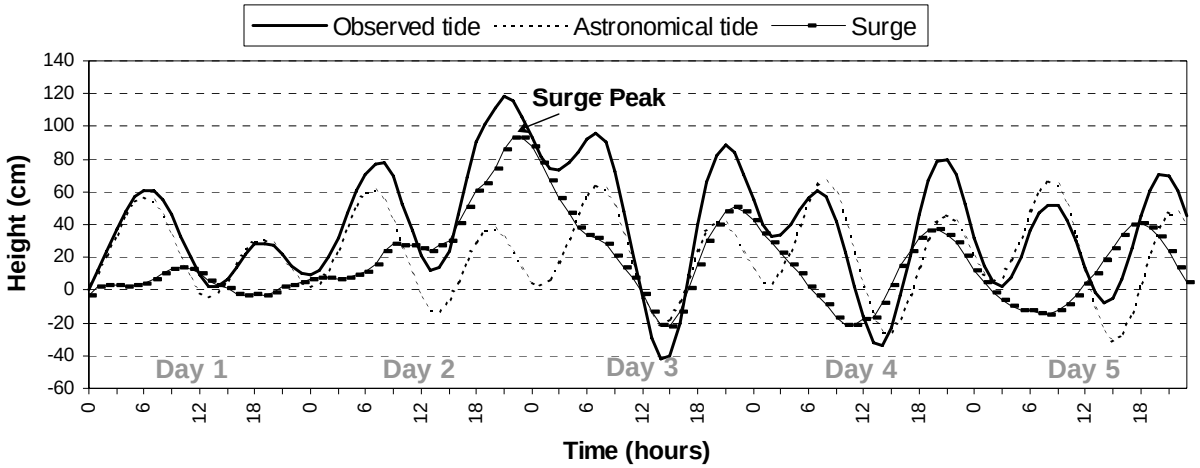
21 novembre 1977

Il rialzo massimo (93 cm) viene registrato dagli strumenti sia alle ore 22 che alle ore 23. Il massimo astronomico (37 cm) cade invece alle ore 20: questo fa sì che si registri una marea complessiva (118 cm) in mezzo tra il rialzo e il valore astronomico, alle 21. Da qui il rialzo comincia a calare facendo registrare, in concomitanza col massimo astronomico successivo (64 cm, ore 7.00), un valore di 96 cm.
Le pressioni registrate nel centro-alto Adriatico, a partire dal giorno prima, subiscono un crollo brusco di 20-25 hPa. Al sud, invece, la pressione perde 5 hPa e così il gradiente barico ruota di 180 gradi. In tal modo si vede come sul nord Adriatico il vento è praticamente nullo (quel poco che c'è è vento di Tramontana), mentre a Termoli si registra vento di scirocco con intensità intorno ai 15 nodi. Il giorno dopo l'evento, mentre a nord resta nullo, il vento a Termoli gira portandosi prima in direzione nord e poi a ovest.
La sessa di 22 ore ha un'ampiezza di 34 cm, mentre quella di 11 ore ha un'ampiezza che è la metà. Il massimo rialzo viene quasi a coincidere con le massime ampiezze delle due sesse (quella di 11 ore è leggermente in anticipo rispetto a quella da 22), mentre il colmo successivo cade quasi in prossimità del massimo della sessa da 22 ore, mentre quella da 11 non dà praticamente contributo. Il residuo ha un massimo di 46 cm.
Le cartine meteo mostrano un minimo di pressione sulla penisola greca che si sposta verso il sud Italia nel giorno dell'evento. Successivamente il minimo torna verso nord-est e va a porsi sopra il mar Nero. Altrettanto influente un minimo che dal nord Europa estende la sua influenza sull'alta Italia.

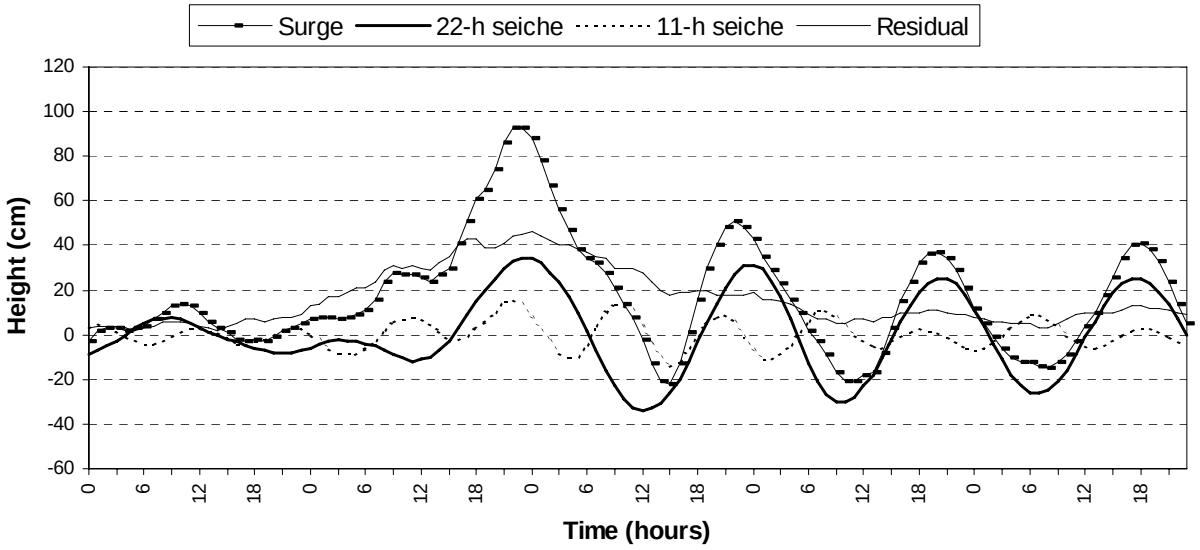
November 21, 1977

Since hourly values are analyzed here, the surge maximum (93 cm) appears both at 10 and 11 PM. Since the astronomical crest (37 cm) was expected at 8 PM, the observed level gave 118 cm between the surge and the expected flood tide peaks, at 9 PM. The surge then decreases causing, at the time of the following astronomical maximum (64 cm, 7 AM) an effective value of 96 cm.
The atmospheric pressure over the northern and central Adriatic drops sharply, starting the previous day, by 20-25 hPa. To the south, instead, it decreases by 5 hPa, so giving a gradient opposite to the previous one. In the northern Adriatic there is practically no wind (just a feeble "tramontana", northerly wind), while at Termoli sirocco is recorded, about 15 knots. The day following the event, wind remains zero in the north, while it changes direction at Termoli: first from the north, then from the west.
The 22-hour seiche has about 34 cm amplitude, whilst the secondary, 11-hour one, is about one half of it. The surge peak approximately coincides with the maxima of the two oscillations (the 11-hour is slightly ahead of the other). The next tidal maximum is aided by the 22-hour one, the secondary gives practically nothing. The residual reaches 46 cm.
Meteorological maps show a minimum on the Greek peninsula, moving to the south of Italy on the day of the surge. Afterwards, it moves north-east and reaches the Black Sea. An analogous influence is given by the low-pressure based over northern Europe and acting also on northern Italy.

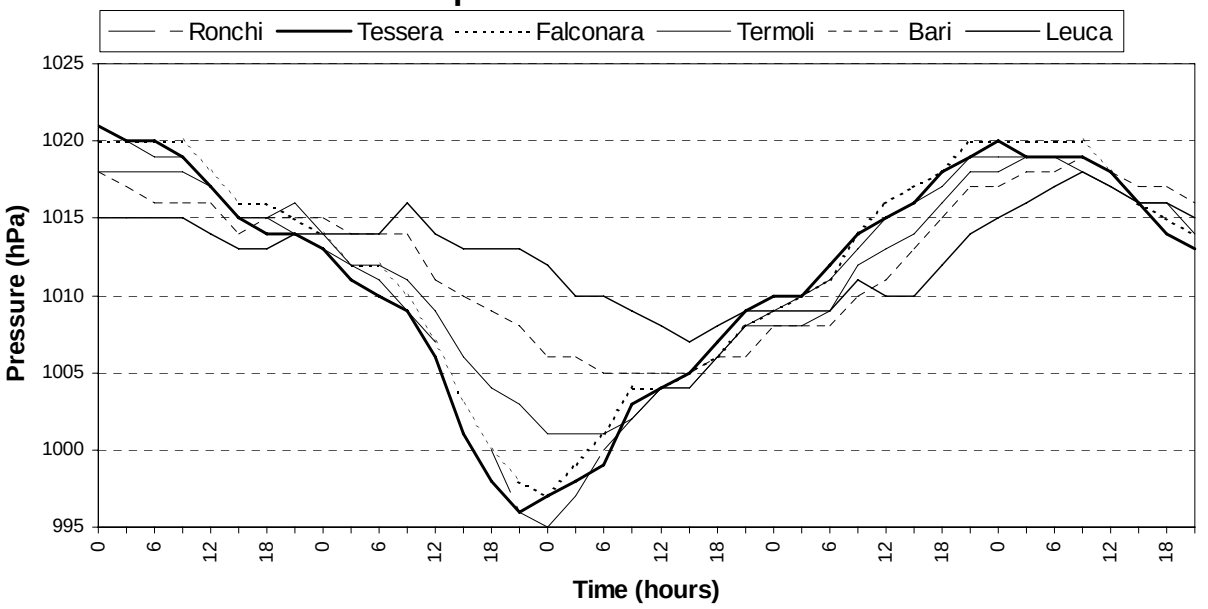
Tide and surge levels at Venice (PDS): 20-24 Nov. 1977



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 20-24 Nov. 1977

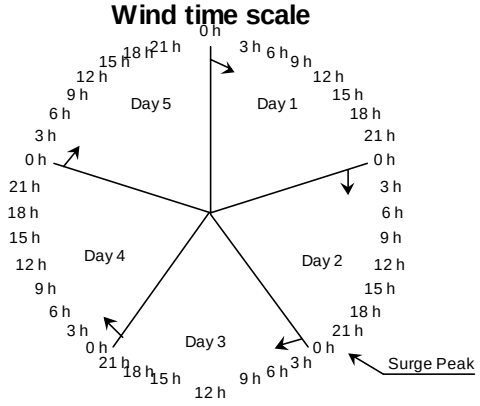


MSL air pressure: 20-24 Nov. 1977

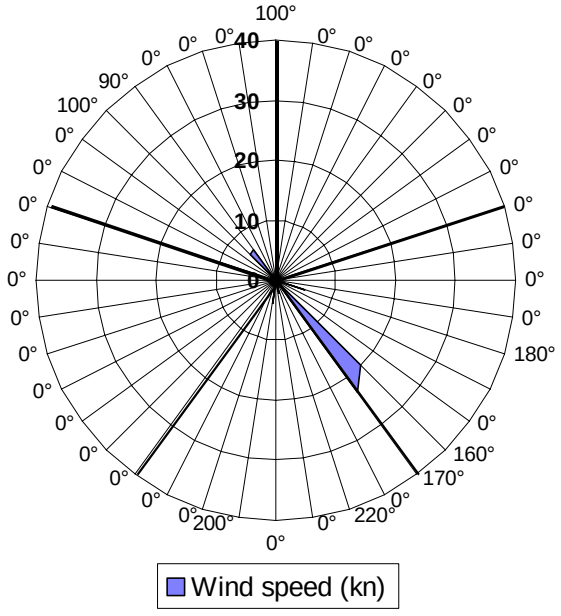


20-24 Nov. 1977

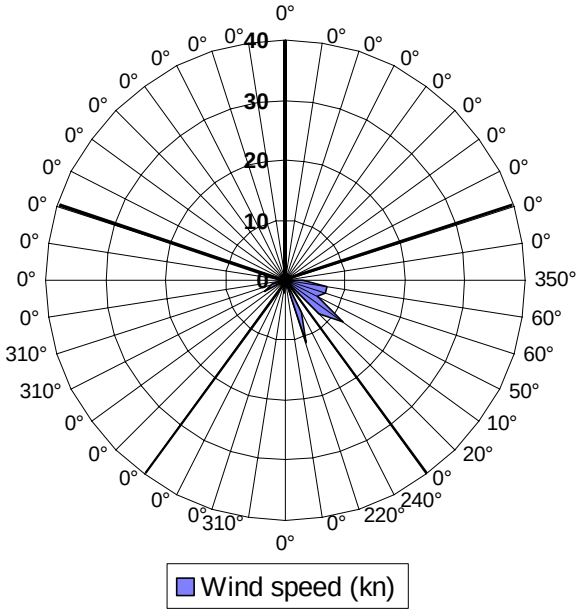
Wind time scale



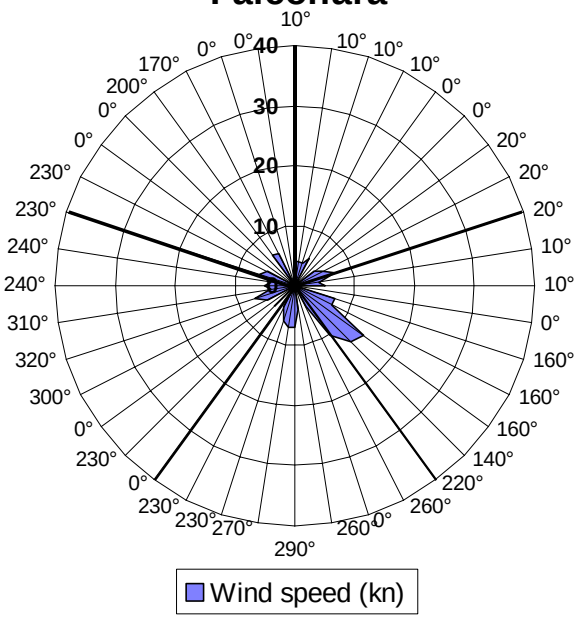
Ronchi



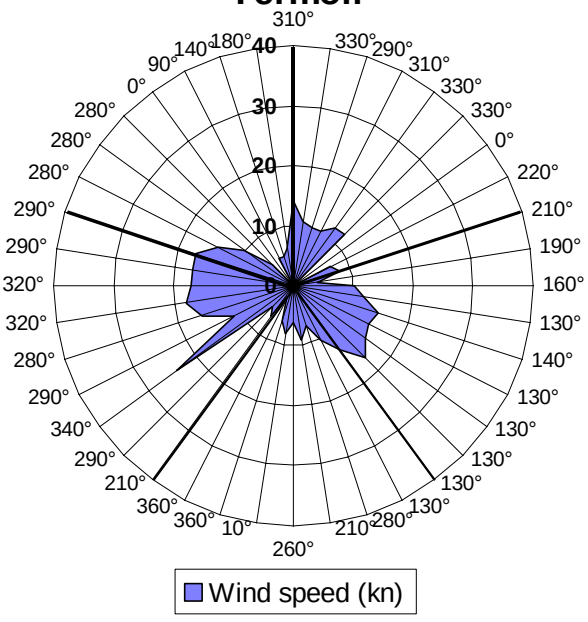
Tessera

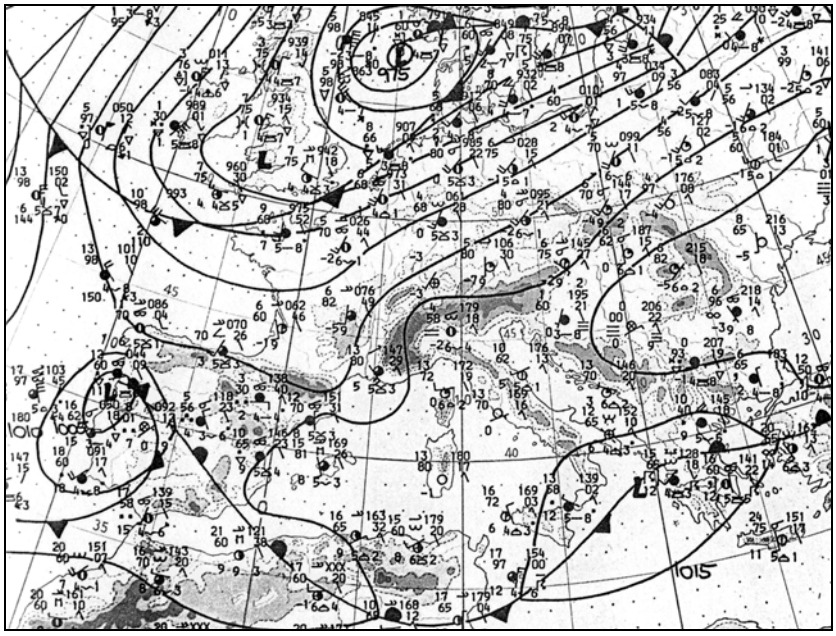


Falconara

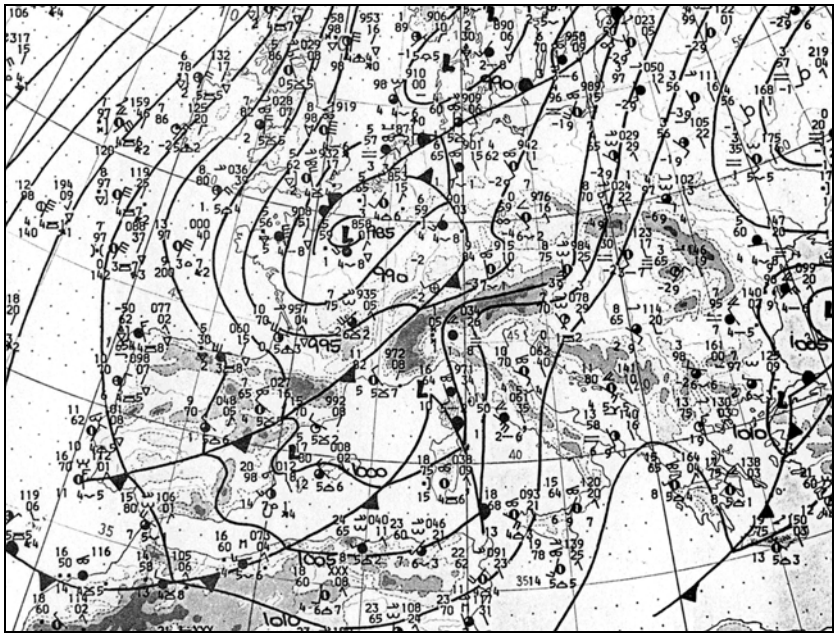


Termoli

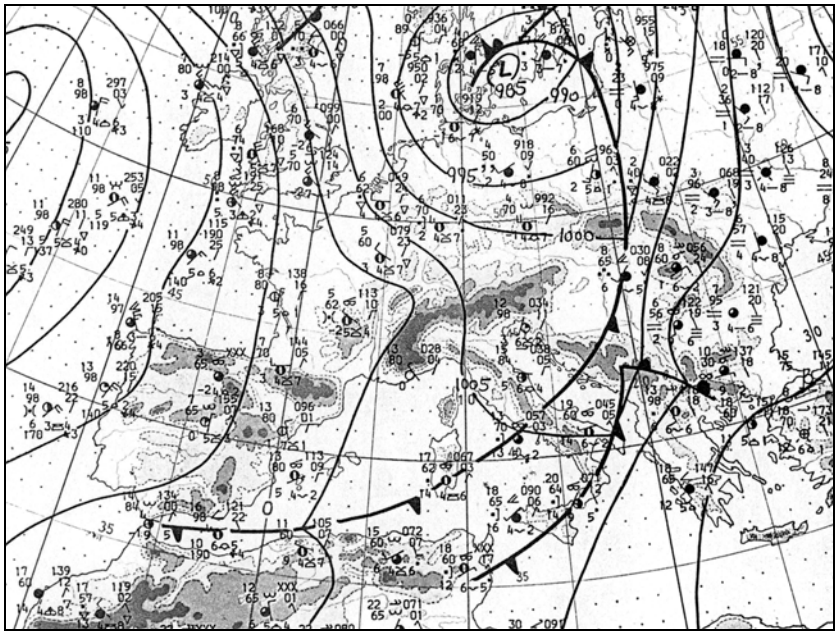




h. 12.00, Nov. 20, 1977



h. 12.00, Nov. 21, 1977



h. 12.00, Nov. 22, 1977

15 novembre 1979

Il massimo rialzo (103 cm alle ore 12) avviene poco prima della bassa marea astronomica, sicché la marea osservata mostra due colmi, uno a marea calante (118 cm, ore 10) ed uno durante la successiva marea crescente (110 cm, ore 17). La sessa di 22 ore, principale causa delle oscillazioni dei rialzi nei giorni successivi, raggiunge 94 cm di escursione e poi si smorza progressivamente. La sessa di 11 ore (17 cm) si trova dapprima in opposizione di fase rispetto alla sessa di 22 ore, ma, il 18 novembre, i colmi delle due sesse quasi coincidono, mantenendo un rialzo di circa mezzo metro al momento dell'alta marea astronomica, il che provoca, alle ore 8, ben tre giorni dopo il massimo rialzo, un'acqua alta di 122 cm. Il residuo rimane moderato, superando brevemente e di poco i 50 cm il 15 novembre.

La massima differenza di pressione tra Leuca e Tessera (19 hPa) coincide con il momento del massimo rialzo, poi tende rapidamente ad annullarsi ed è insignificante al momento dell'acqua alta del 18 novembre. Poco prima del massimo rialzo il vento sull'Adriatico è irregolare, ma prevalentemente di scirocco, con raffiche massime comprese fra 30 e 40 nodi.

La situazione atmosferica è stata dominata dall'arrivo di un fronte occluso sulla regione alpina il 13 novembre, che vi ha poi creato un minimo depressionario, mentre il fronte, prima di spostarsi verso SE, è rimasto localizzato nei due giorni seguenti tra l'alto Adriatico e il canale di Sicilia.

November 15, 1979

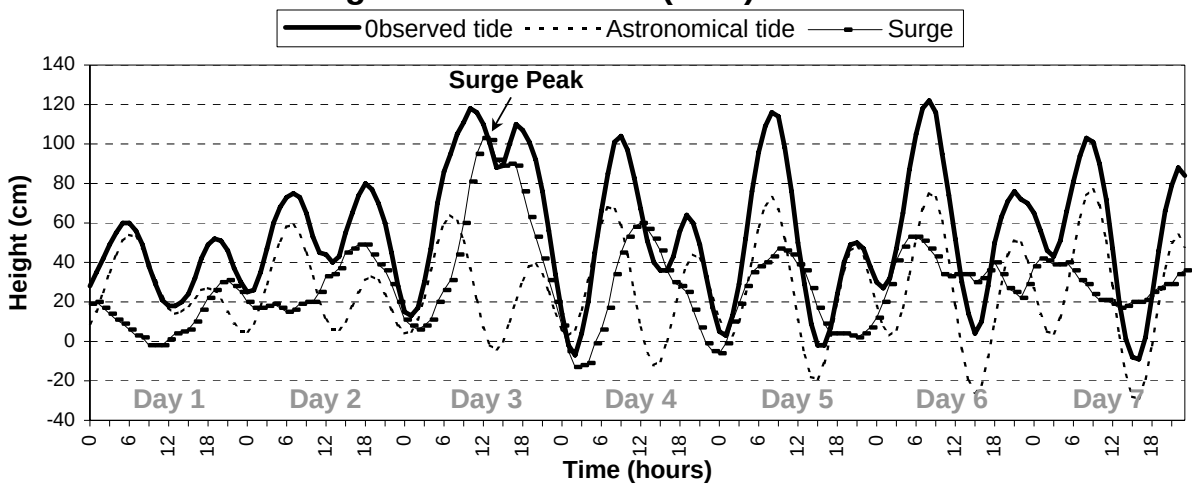
The surge maximum (103 cm at 12 noon) occurs slightly ahead of the expected minimum tide, so in fact the observed level has two peaks, the first (118 cm, 10 AM) corresponding to the ebb astronomical tide ("dosana", in lagoon jargon), the other to flood (110 cm at 5 PM). The 22-hour seiche, the major factor of perturbation in the following days, reaches a range of 94 cm, then slowly dissipates. The phase of the secondary seiche (17 cm) is found first opposite to the main one, but on November 18 the maxima of the two waves almost coincide. This way, they add about 50 cm to the astronomical maximum tide and surprisingly give an effective flood of 122 cm at 8 AM, three days after the real surge! The residual remains moderate, just touching 50 cm on November 15.

The largest pressure difference between Leuca and Tessera (19 hPa) occurs at the time of the surge maximum, then it quickly tends to vanish, and, at the time of the late flood (three days later) it is practically zero.

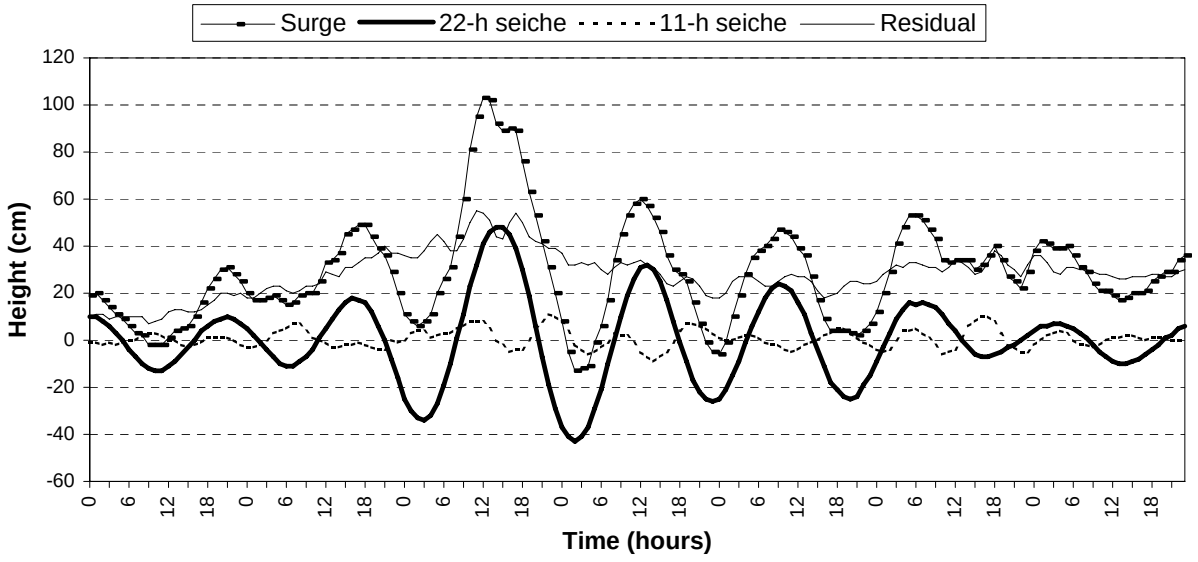
Wind is irregular, before the surge time, but sirocco prevails, with gusts between 30 and 40 knots.

The large scale meteorology is dominated by an occluded front over the Alps on November 13 and creating a pressure minimum. The front idled two days, extending from the northern Adriatic to the Strait of Sicily, then moved south-east.

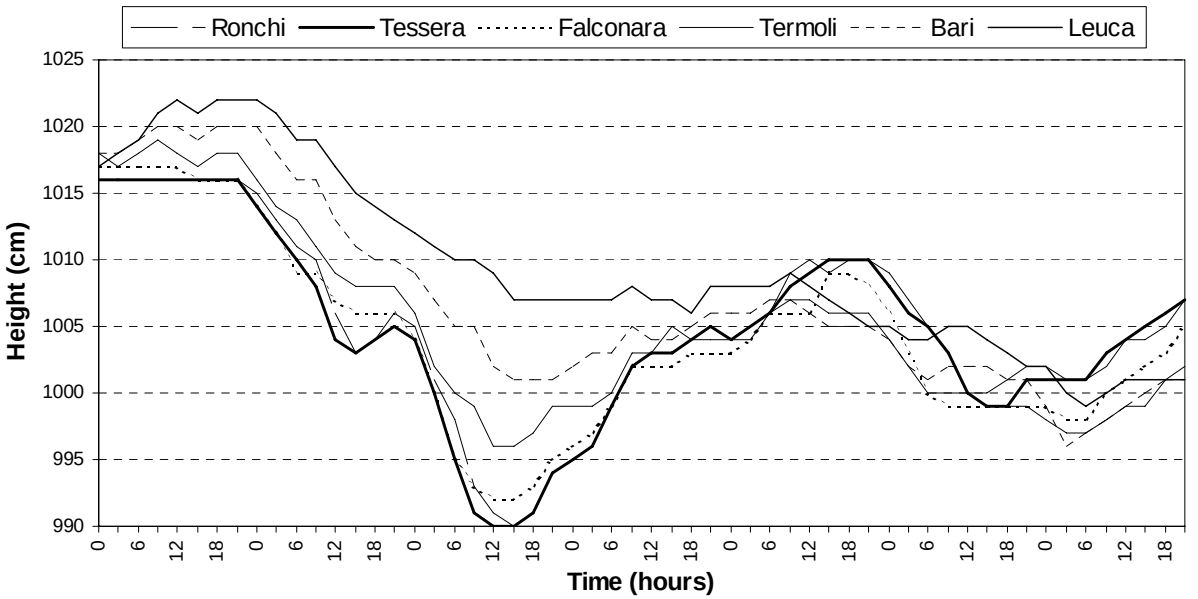
Tide and surge levels at Venice (PDS): 13-19 Nov. 1979



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 13-19 Nov. 1979

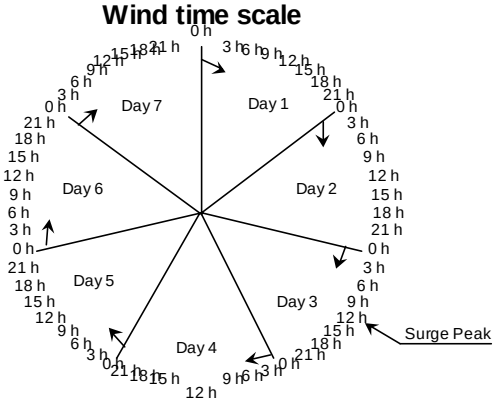


MSL air pressure: 13-19 Nov. 1979

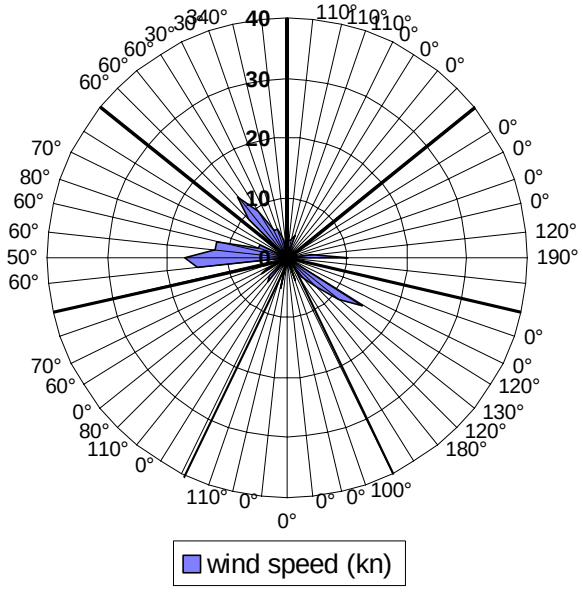


13-19 Nov. 1979

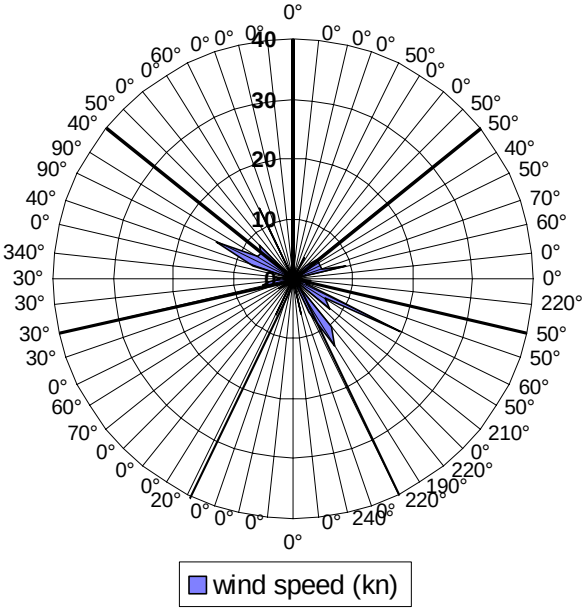
Wind time scale



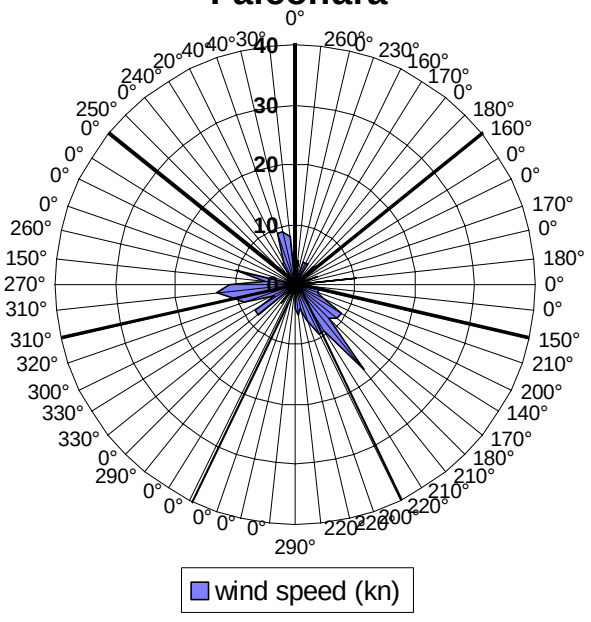
Trieste



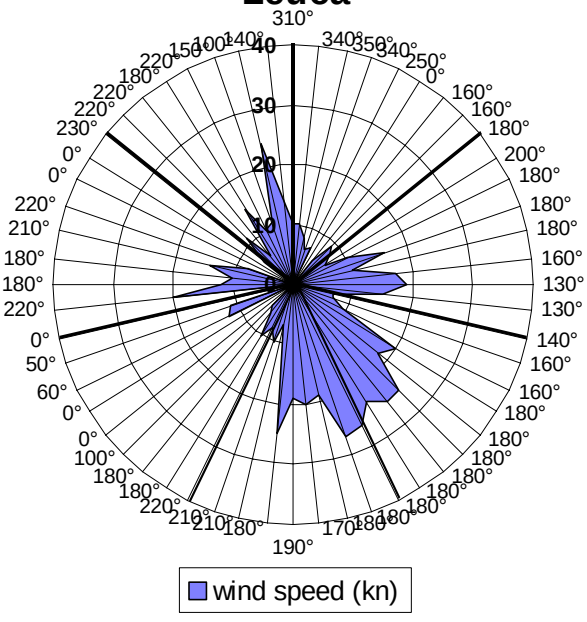
Tessera

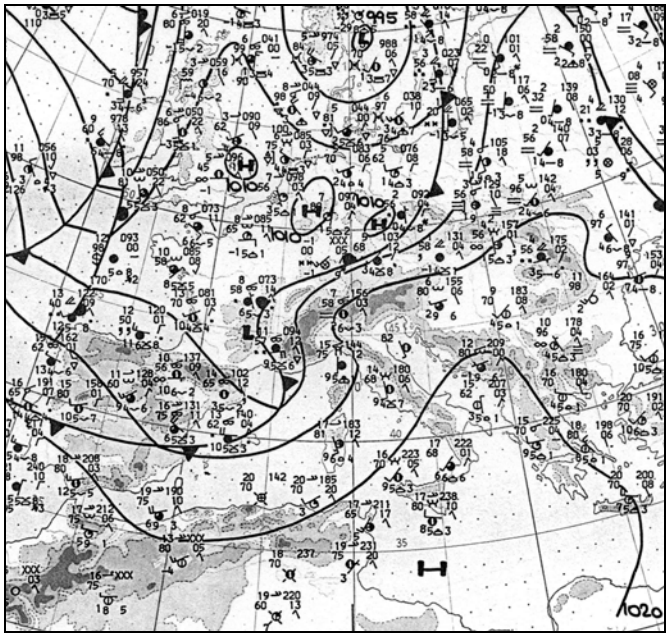


Falconara

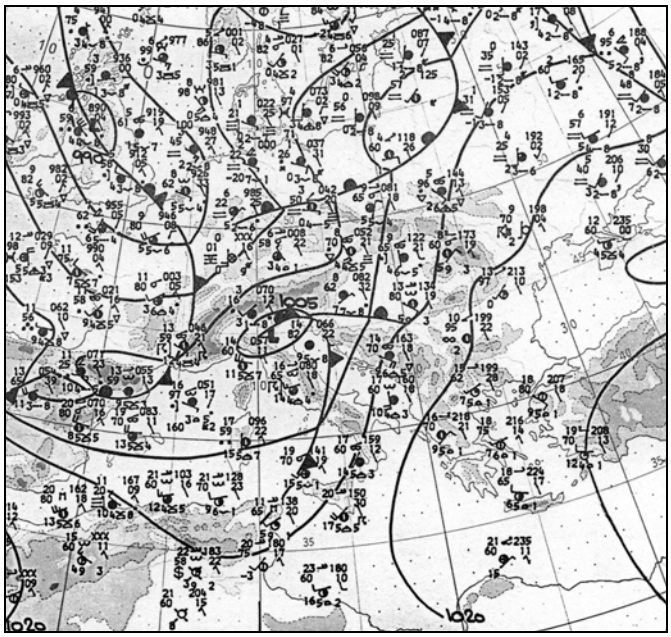


Leuca

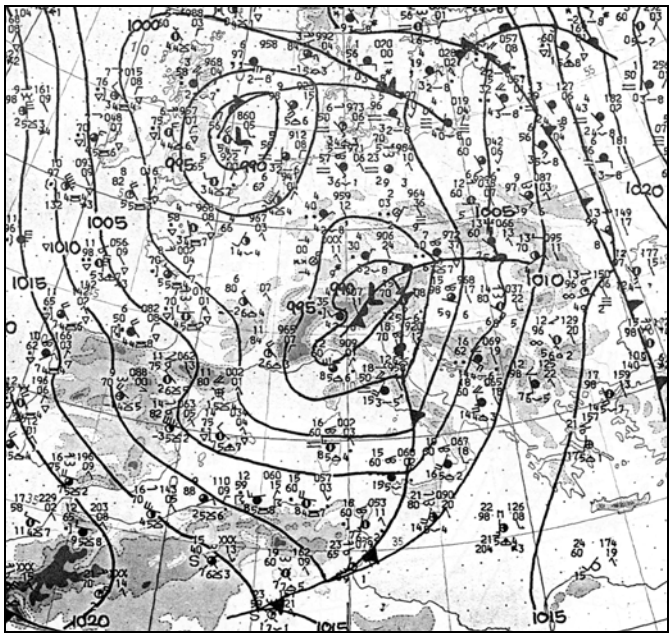




h. 12, Nov. 13, 1979



h. 12, Nov. 14, 1979



h. 12, Nov. 15, 1979

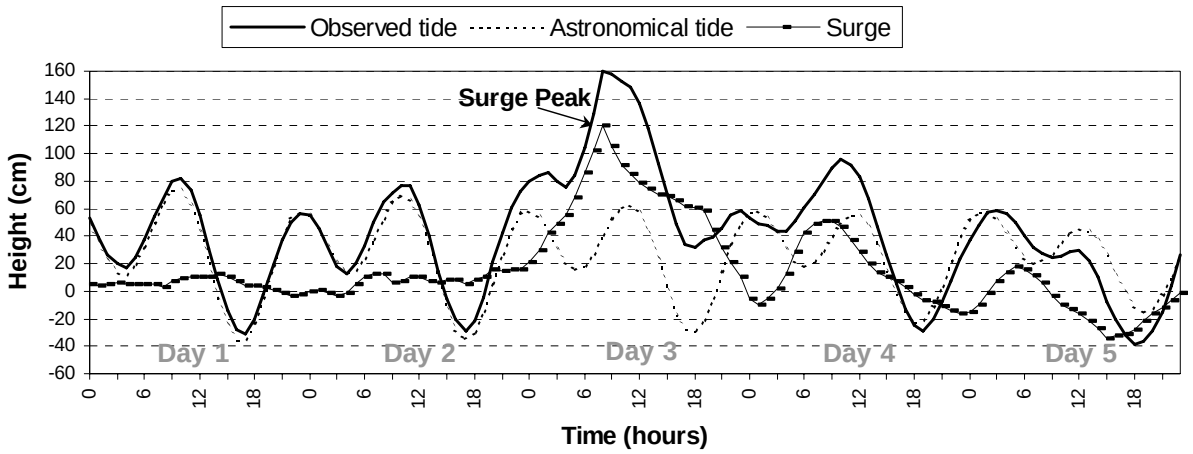
22 dicembre 1979

Benché il massimo rialzo (120 cm, ore 8) sia stato di breve durata e sia avvenuto tre ore prima dell'alta marea astronomica, esso ha provocato una notevole acqua alta (160 cm), che è rimasta al di sopra di 110 cm per ben 7 ore consecutive. La sessa di 22 ore, inizialmente di 64 cm di escursione, ha compiuto varie oscillazioni, smorzandosi lentamente. Essa si è trovata in un certo accordo di fase con la sessa di 11 ore (33 cm) per i primi due colmi e per il cavo intermedio, contribuendo così ad una forte oscillazione del rialzo, ma si è però presto smorzata, senza provocare nuove acque alte. Il residuo è rimasto al disopra di 50 cm per sole 3 ore nella mattina, poi per altre 4 ore nel pomeriggio.
La pressione atmosferica non appare come il fattore principale del rialzo a Venezia, dato che la differenza di pressione è stata forte soprattutto tra l'Adriatico meridionale e l'Adriatico centrale (16 hPa di differenza tra Leuca e Falconara), mentre il minimo di Tessera (1001 hPa) è stato leggermente meno pronunciato che a Falconara o a Rimini (999 hPa) e presenta inoltre un ritardo di varie ore rispetto al massimo rialzo. Più determinante è stato invece il ruolo del vento, con una tipica, anche se breve, situazione di "scontraura": vento di scirocco con raffiche massime spesso superiori a 40 nodi sull'Adriatico centrale e meridionale, mentre sull'alto Adriatico prevaleva la bora con raffiche di 42 nodi a Tessera.
La situazione meteorologica corrisponde, il 20 e 21 dicembre, ad un centro depressionario situato sulla costa algero-tunisina e collegato verso NE ad un fronte caldo che attraversa l'Adriatico centrale. Il 22 dicembre il centro della depressione si sposta sul mar Ligure mentre un fronte occluso si estende lungo tutta la penisola italiana. Il 23 dicembre lo spostamento del fronte verso i Balcani permette al gradiente di pressione sull'Adriatico di diminuire rapidamente, poi di invertirsi il 24 dicembre.

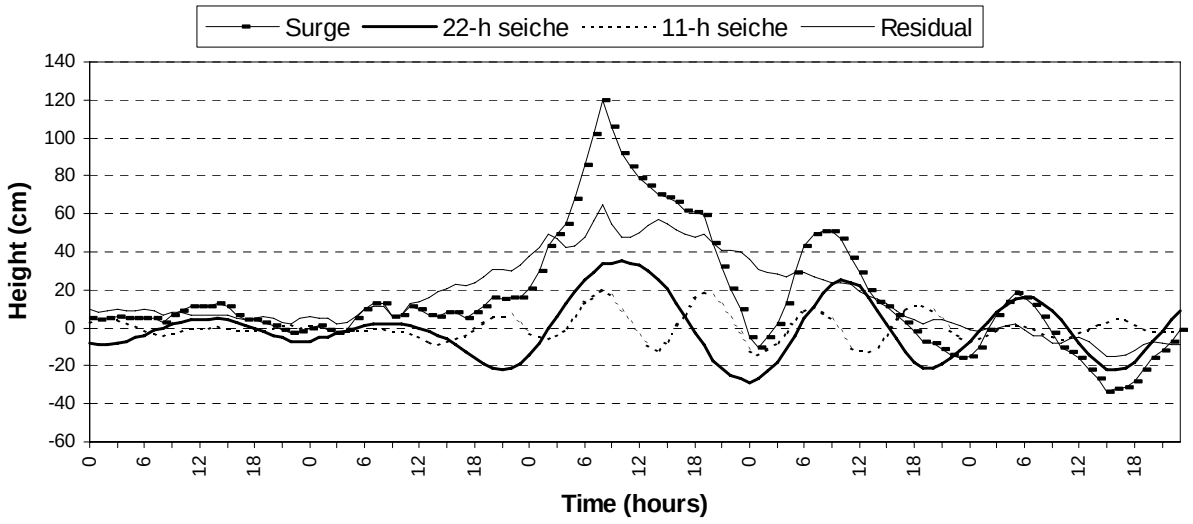
December 22, 1979

The surge peak (120 cm at 8 AM) did not last too much and came three hours before the astronomical maximum: nevertheless, it caused a remarkable flood (160 cm), remaining over 110 cm for seven solid hours. The pricipal seiche, with 64 cm range, bounced many times, damping slowly.
It happened to be in phase with the 11-hour one (33 cm) in the first two crests and the intermediate trough, causing strong oscillations of the meteorological tide, that dissipated without causing floods.
The residual remained over 50 cm only for three hours in the morning, then four more hours in the afternoon.
The atmospheric pressure does not seem to be the main factor for the surge, since the most evident difference appeared between the southern and the central part (16 hPa between Leuca and Falconara), while the minimum value at Tessera (1001 hPa) has been slightly better than at Falconara or Rimini (999 hPa) and occurred a few hours after the peak.
Wind, instead, had a crucial role, showing a typical (though short-lived) situation of "scontraura". Indeed, there was sirocco blowing over central and southern Adriatic with gusts over 40 knots, but in the north bora prevailed, with 42-knot gusts in Tessera.
On December 20 and 21 the weather situation was dominated by a cyclonic center over the Algerian and Tunisian coasts, connected at the Northeast to a warm front crossing central Adriatic. On December 22 the low-pressure center moves to the Ligurian Sea, while an occluded front spans the whole Italian peninsula. On December 23 the movement of the front towards the Balkans allows the pressure gradient over the Adriatic to decrease quickly, then to reverse on December 24.

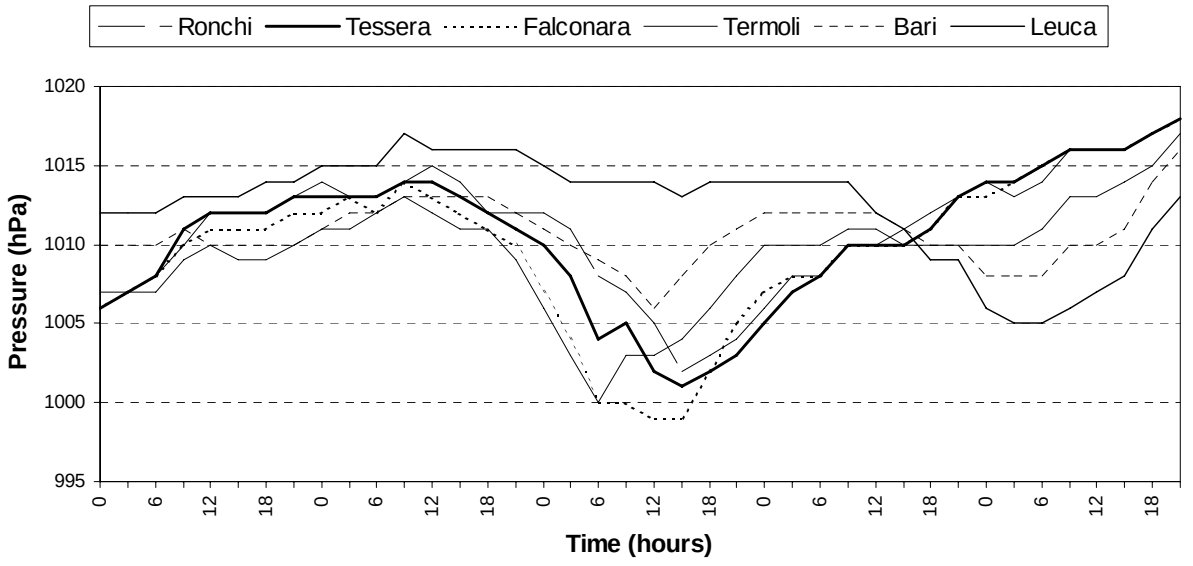
Tide and surge levels at Venice (PDS): 20-24 Dec. 1979



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 20-24 Dec. 1979

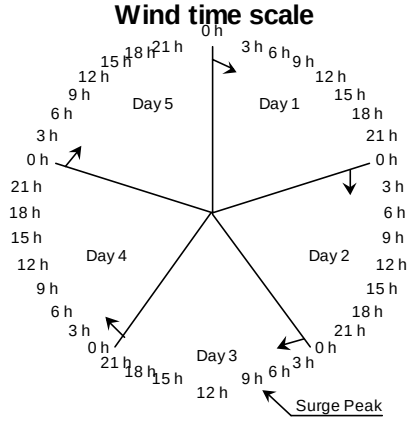


MSL air pressure: 20-24 Dec. 1979

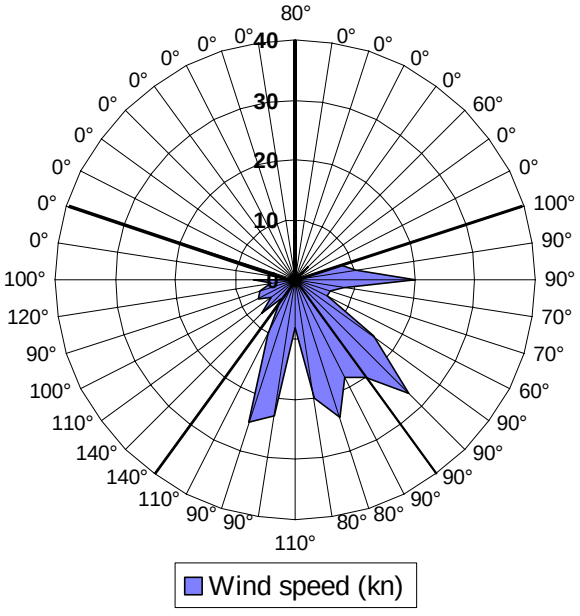


20-24 Dec. 1979

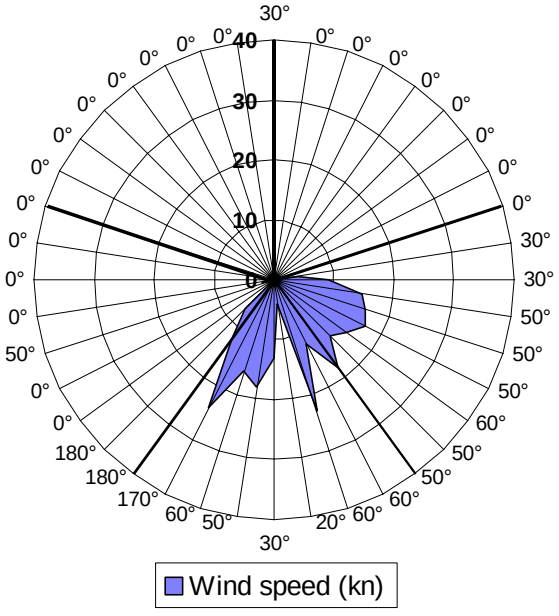
Wind time scale



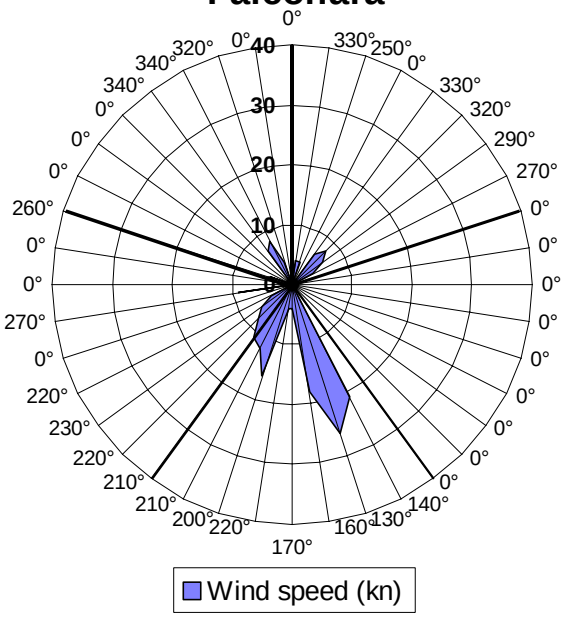
Ronchi



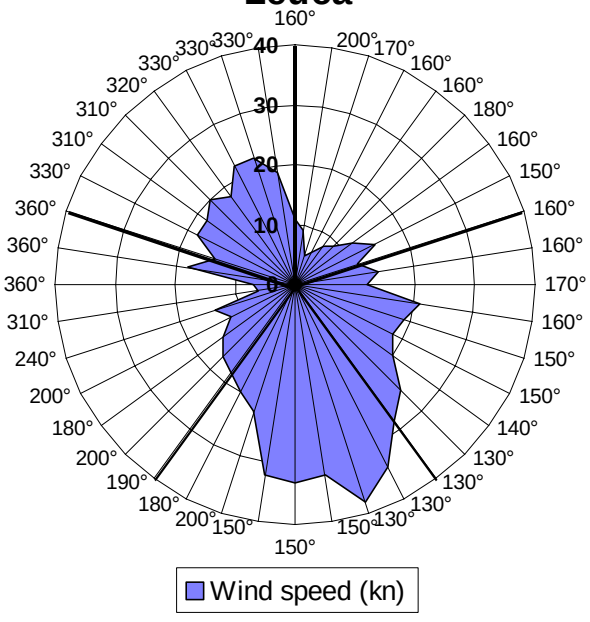
Tessera

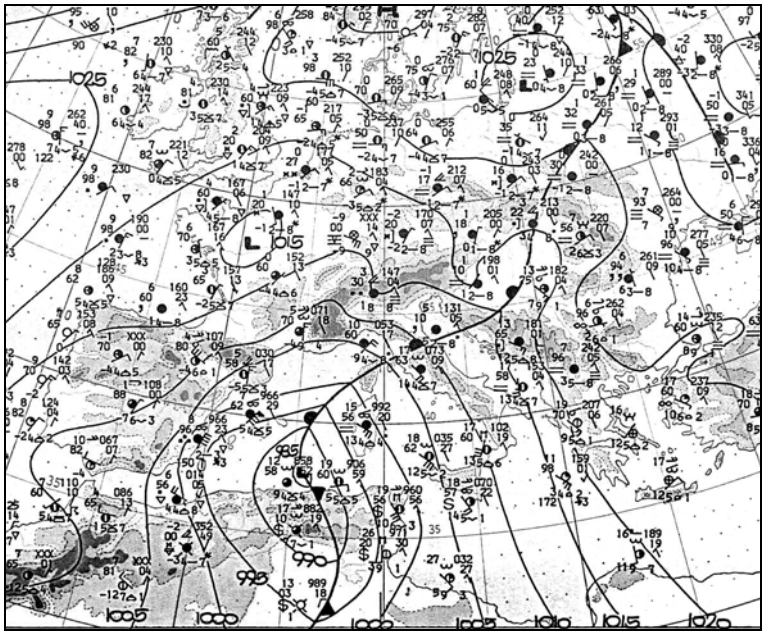


Falconara

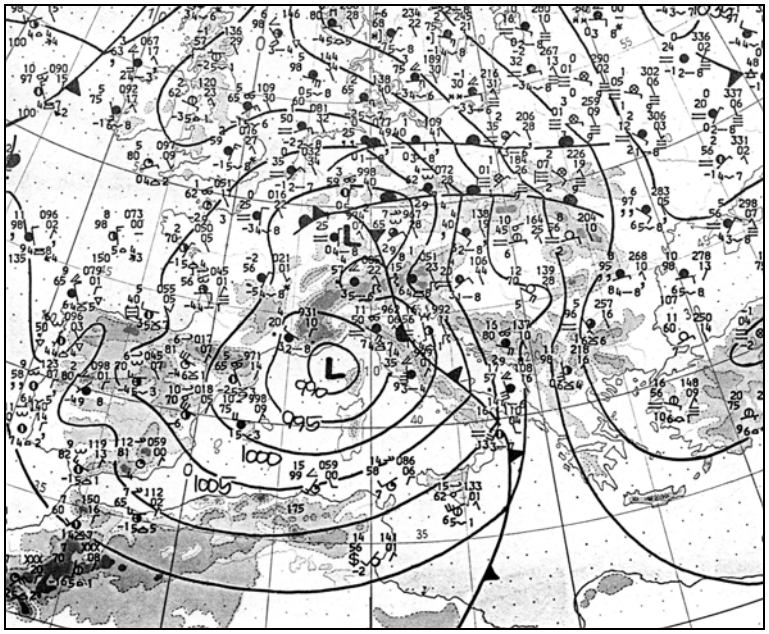


Leuca

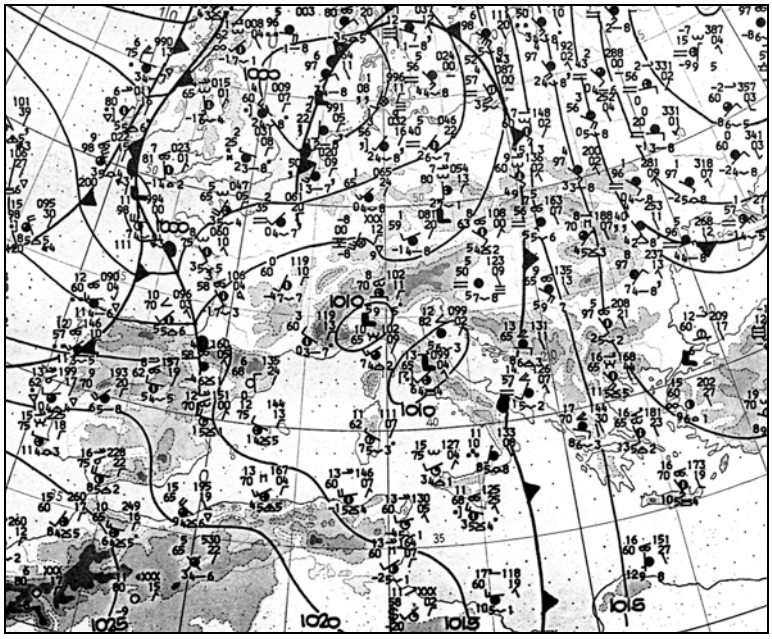




h. 12.00, Dec. 21, 1979



h. 12.00, Dec. 22, 1979



h. 12.00, Dec. 23, 1979

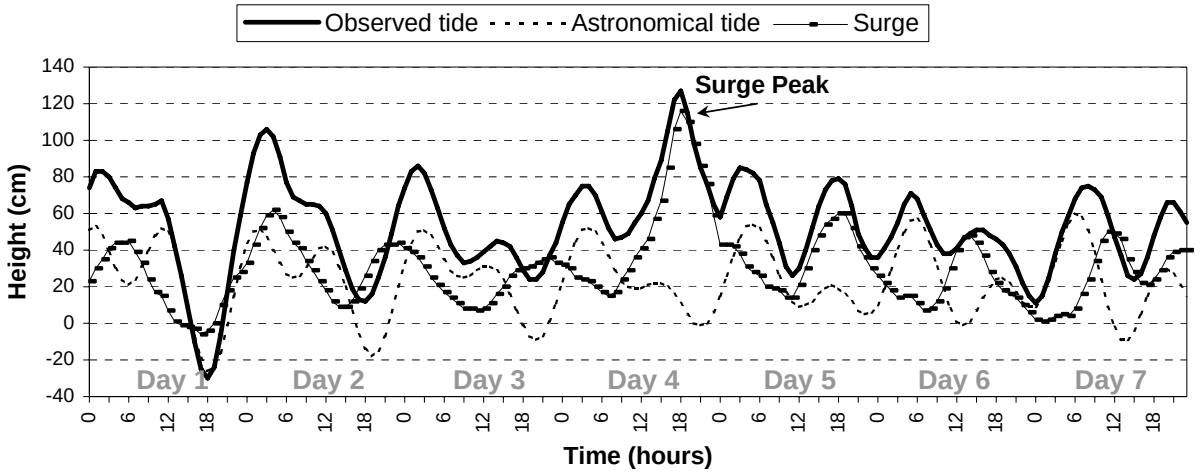
18 dicembre 1981

Il massimo rialzo marino (116 cm) è coinciso (ore 18) con il colmo della sessa di 22 ore, già attiva da qualche giorno, producendo un'acqua alta di 127 cm. Fortunatamente, il colmo è avvenuto in un periodo di morto d'acqua (marea astronomica: 11 cm) e la sessa, benché riattivata (69 cm di escursione) si è trovata nei giorni seguenti in quasi opposizione di fase rispetto alla marea astronomica. La sessa di 11 ore è rimasta di escursione limitata (inferiore a 30 cm). Il residuo ha superato i 50 cm per sole 4 ore il 18 dicembre e per un'ora il 19 dicembre.
La pressione atmosferica sull'Adriatico mostra una notevole serie di oscillazioni e di inversioni di gradiente: dapprima (16 dicembre) una differenza tra l'Adriatico meridionale e l'Adriatico centrale, poi (17 dicembre) dovunque una crescita con pressione uniforme. Il 18 dicembre, al momento del massimo rialzo, la differenza tra Leuca e Tessera raggiunge 19 hPa, per poi diminuire rapidamente (19 dicembre) ed invertirsi (20 dicembre). Poco prima del massimo rialzo il vento prevalente è di bora nell'alto Adriatico (con raffiche di 30 nodi a Tessera), ma soprattutto di scirocco più a sud (con raffiche spesso superiori a 30 nodi e di quasi 50 nodi a Termoli), ossia in situazione di "scontraura".
L'evoluzione meteorologica nel periodo considerato è complessa e ciò si rispecchia nell'osservazione che, in quel dicembre, si sono verificate ben quattro "acque alte" codificate. Le mappe precedenti il giorno 18 confermano e mostrano sistemi frontali e minimi depressionari dall'Atlantico in sequenza, con la situazione in continuo movimento. L'analisi non deve essere stata facile, in quei giorni, per gli stessi meteorologi, visto il dinamismo di spostamento ed evoluzione dei sistemi frontali.
L'atmosfera sembra formare delle onde, come già rilevato dal grafico delle pressioni, e nella situazione del giorno 18 esse combinano il massimo disturbo: medio e basso Adriatico, con lo Jonio, si allineano nello scirocco, una forte situazione depressionaria interessa l'alta Italia e le conseguenze non si fanno attendere.
Vale, per l'ennesima volta, l'osservazione del picco di marea che verosimilmente non avrebbe raggiunto simili valori con delle bocche di porto meno spalancate sul mare.

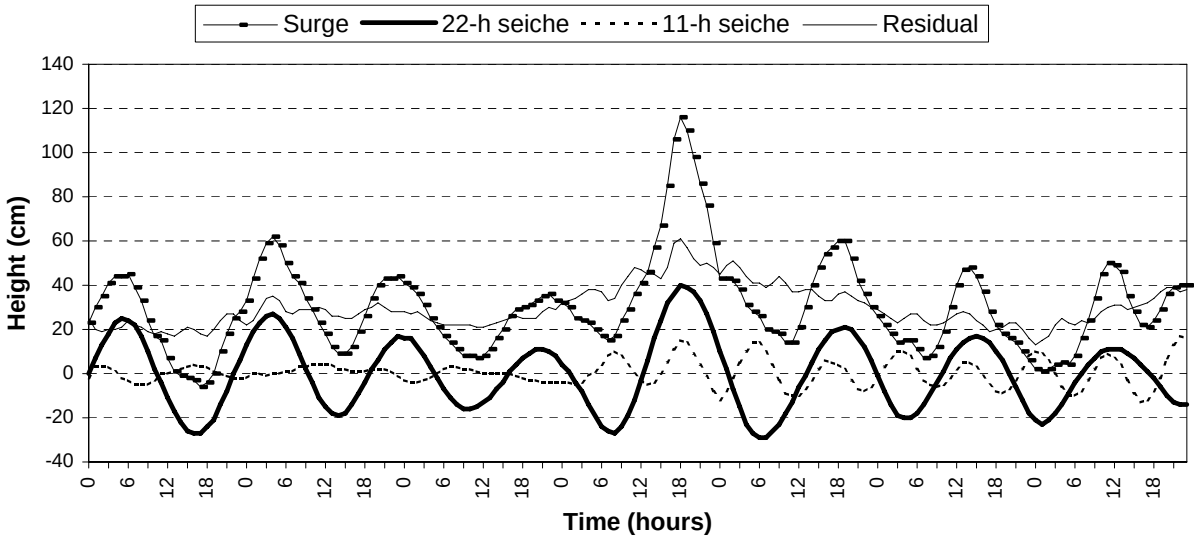
December 18, 1981

The surge peak (116 cm) comes at 6 PM at the time of maximum primary seiche, already active on the previous days, giving Venice a level of 127 cm. Fortunately, it happened with only 11 cm of astronomical tide, and the seiche, though increased to a 69 cm range, appeared opposite in phase on the following days. The 11-hour seiche kept a limited range (less than 30 cm). The residual was over 50 cm for only four hours on December 18 and for one hour the 19.
The atmospheric pressure over the Adriatic shows many oscillations and gradient reversals: first (December 16), a difference between central and southern Adriatic, then (the 17th) a general increase and a flat distribution. The 18th, at the time of the surge maximum, the difference between Leuca and Tessera reaches 19 hPa, then it decreases the 19th and reverses the 20th. Slightly before the surge peak, wind is prevailingly bora in the northern Adriatic (with 30-knot gusts at Tessera), but mainly sirocco more south (with even gusts stronger than 30 knots and close to 50 knots at Termoli): a typical situation of "scontraura".
Weather evolution in this time span was complex, and this had a resonance in the fact that, in the same month, four "acque alte" were recorded. The maps preceding the 18th show fronts and cyclonic centers coming sequentially from the Atlantic, with a disturbed evolution. Weather analysis had not been easy, in those days, even for meteorologists, considering speed and change of the systems.
The atmosphere seems to host waves, as observed in the pressure plots, and on December 18 they cause the maximum damage: central and southern Adriatic, together with the Ionian Sea, align on sirocco, while a deep low-pressure structure involved northern Italy: the effects are immediate.
For this event too, the remark holds concerning the tidal peak and the shape of the inlets: a reduction of both could be conjectured.

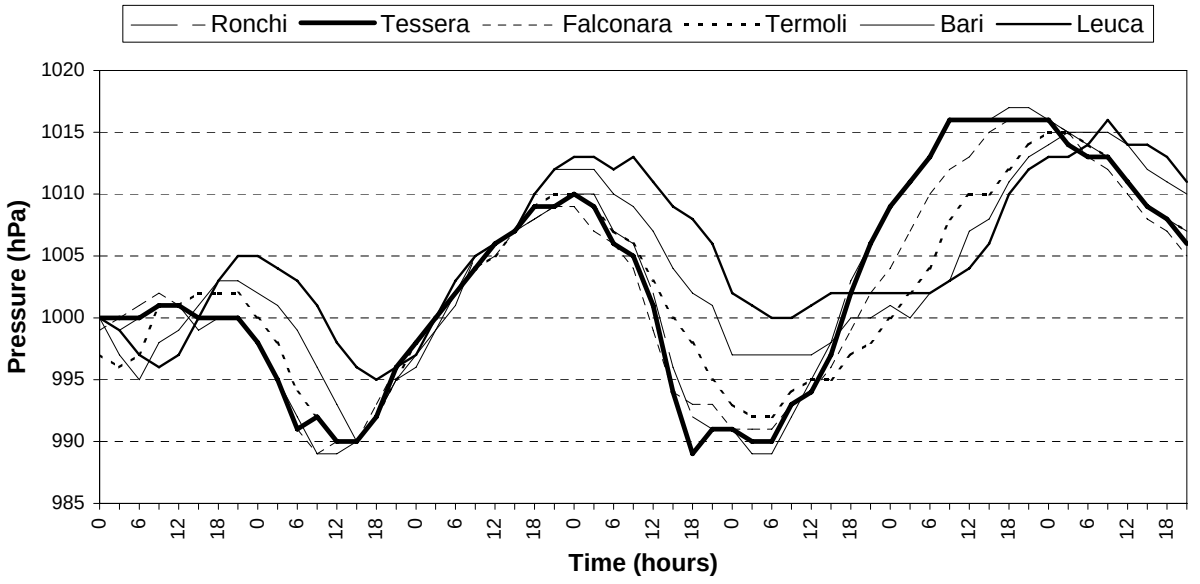
Tide and surge levels at Venice (PDS): 15-21 Dec. 1981



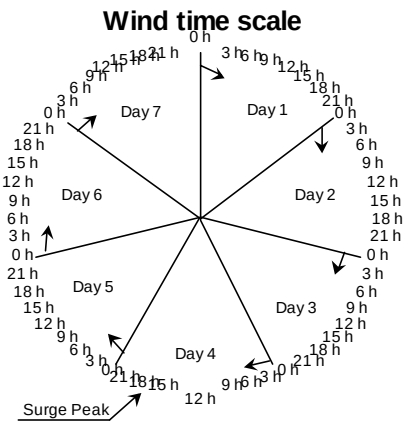
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 15-21 Dec. 1981



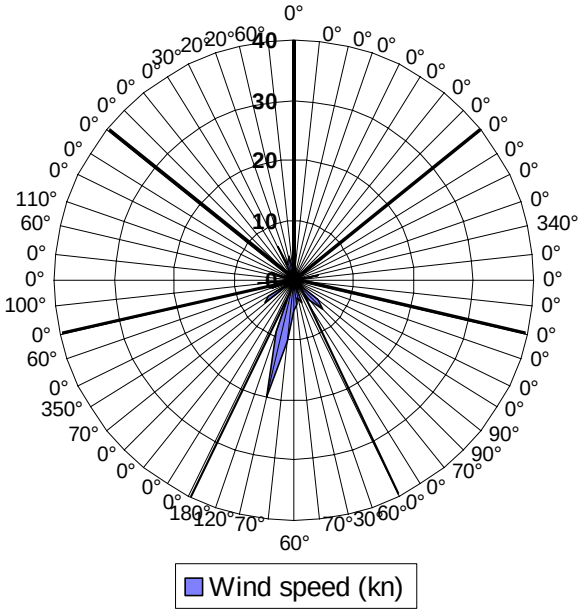
MSL air pressure: 15-21 Dec. 1981



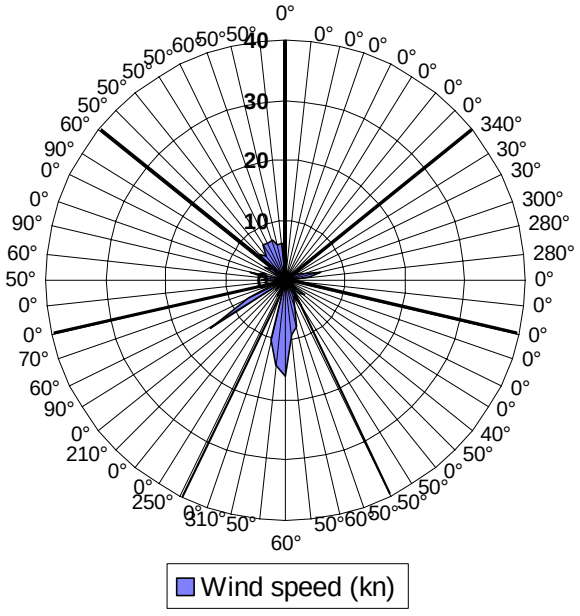
15-21 Dec. 1981



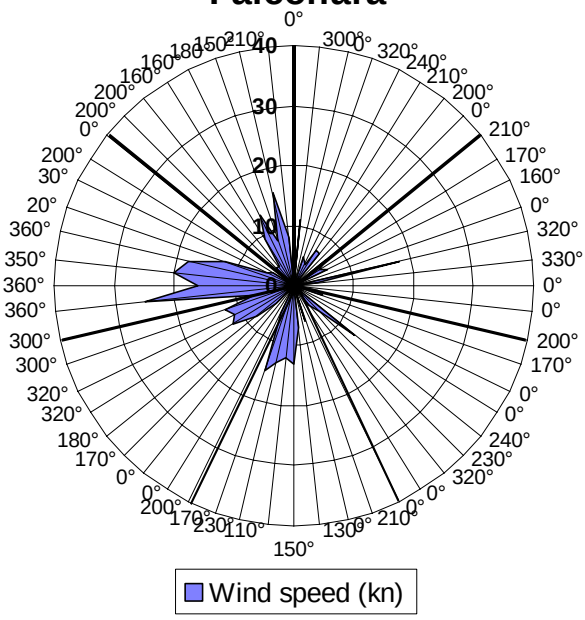
Ronchi



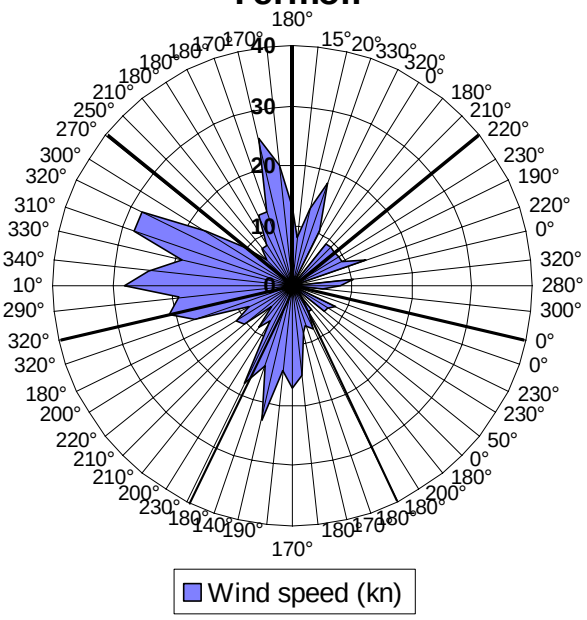
Tessera

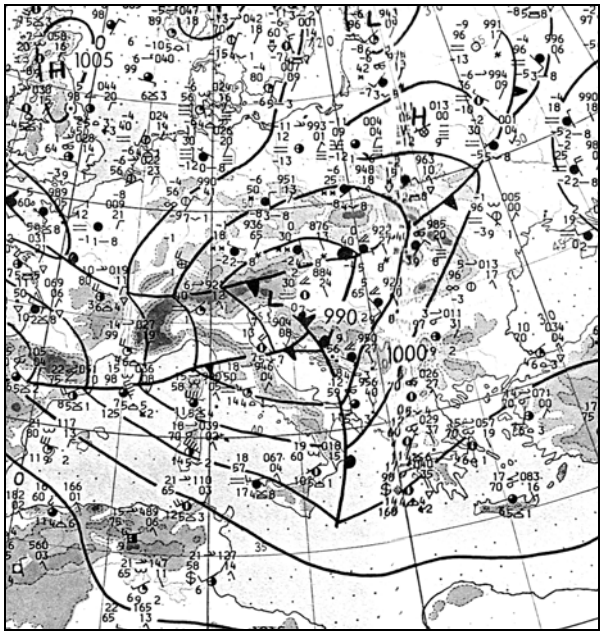


Falconara

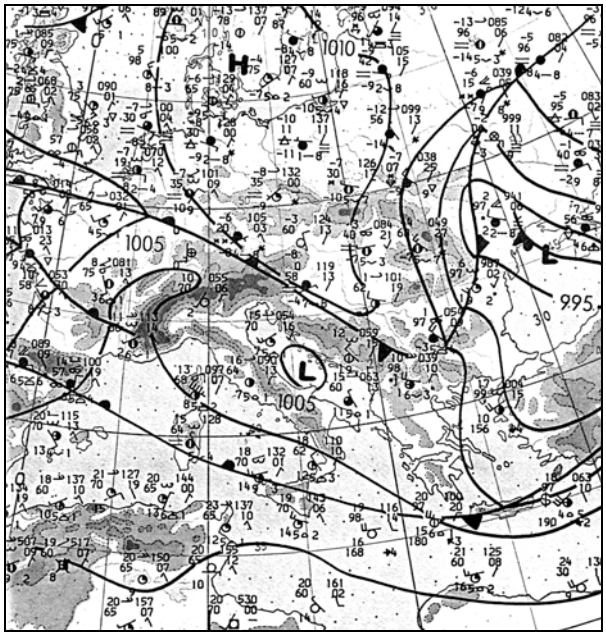


Termoli

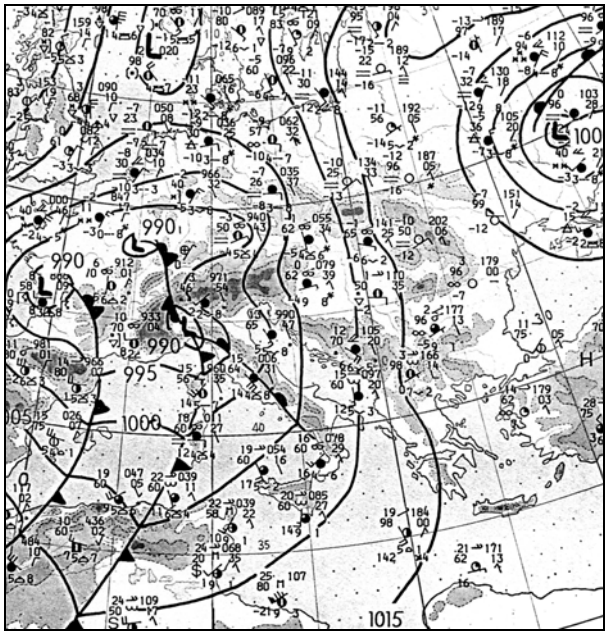




h. 12.00, Dec. 16, 1981



h. 12.00, Dec. 17, 1981



h. 12.00, Dec. 18, 1981

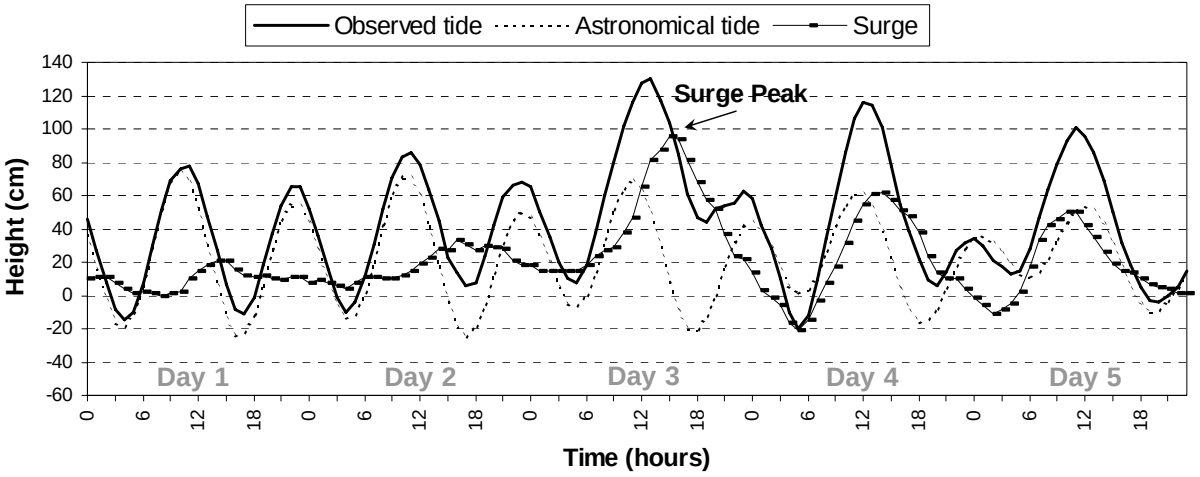
6 ottobre 1982

Al momento del massimo rialzo (96 cm, ore 15) la marea osservata non supera la quota di 104 cm. Infatti, il massimo rialzo si è prodotto a marea calante (marea astronomica: 8 cm), con due ore di ritardo rispetto alla massima marea osservata (130 cm), che è avvenuta quando la marea astronomica (già calante) era di 49 cm ed il rialzo di 81 cm.
Le due sesse di 22 ore (escursione di 84 cm) e di 11 ore (20 cm), quasi in fase, provocano nei due giorni seguenti oscillazioni del rialzo con ritardo decrescente rispetto all'alta marea astronomica, provocando un'altra acqua alta di 116 cm il 7 ottobre ed un'alta marea osservata di 101 cm l'8 ottobre. Il residuo rimane sempre inferiore a 50 cm.
La pressione atmosferica mostra una notevole fluttuazione sull'alto Adriatico, mentre rimane pressoché stabile a Leuca. Poco prima del massimo rialzo, la differenza tra Leuca e Tessera è di 14 hPa, ma diminuisce poi gradualmente. Il 6 ottobre, prima del colmo del rialzo, il vento è prevalentemente di scirocco sull'Adriatico meridionale e di leggera bora sull'alto Adriatico. Subito dopo tende però ad essere rimpiazzato, sull'alto e medio Adriatico, da vento da SW, il che contribuisce ad attenuare i rialzi ed a limitare il residuo.
Le carte sinottiche mostrano l'arrivo, il 5 ottobre, di un fronte freddo, che si estende dalla Spagna al mare del Nord, passando per il Mediterraneo nord-occidentale e la pianura padana. Il 6 ottobre la parte orientale del fronte, molto attiva, si è spostata sul medio Adriatico ed il 7 ottobre la si trova sullo Jonio. Essa lascia dietro di sè un centro depressionario nell'Europa centrale, il cui influsso è ben risentito nelle nostre regioni.

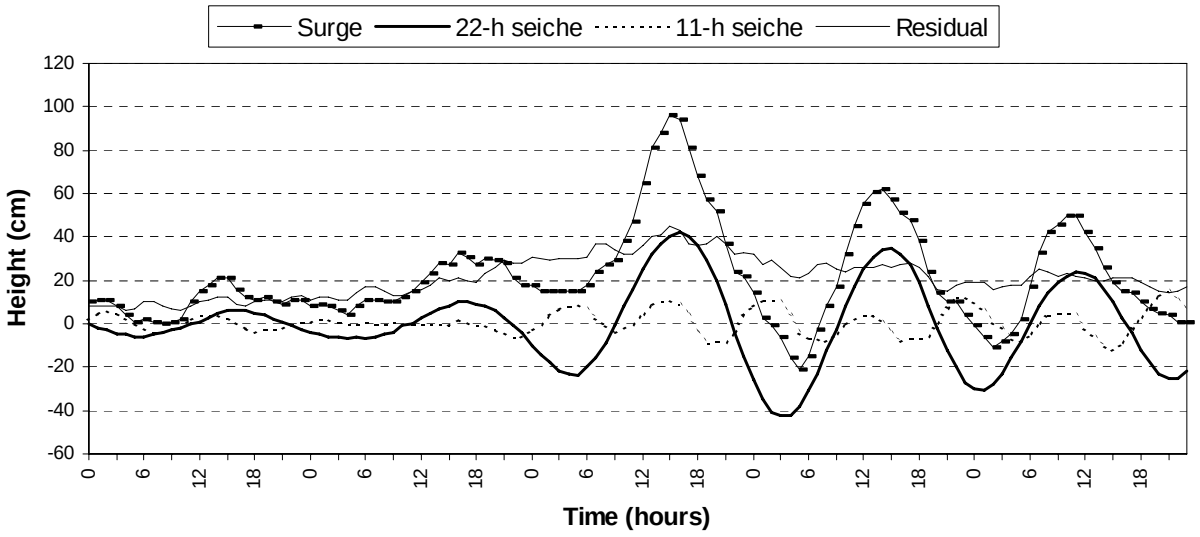
October 6, 1982

At the time of the surge maximum (3 PM, with 96 cm), the recorded level was 104 cm.
Indeed, the ordinary tide (8 cm) was decreasing; two hours earlier, water had reached 130 cm: the astronomical tide, already decreasing, was 49 cm and the surge 81 cm. On the next two days, the two seiches, the 22-hour one (84 cm range) and 11-hour (20 cm), almost in phase, give oscillations of the surge closer and closer to the astronomical maxima, causing another flood (116 cm) on October 7 and a higher level of 101 cm on the 8. The residual remains always under 50 cm.
The atmospheric pressure shows a noticeable fluctuation over the northern Adriatic, while it remains almost stable at Leuca. Slightly before the surge maximum, the difference between Leuca and Tessera is 14 hPa, but afterwards it decreases progressively. On October 6, before the surge peak, wind is mostly sirocco over the southern Adriatic, and light bora in the north. But after the maximum it tends to be replaced, on the north and middle Adriatic, by south-easterly winds, so that the surge decreases and the residual remains limited.
The synoptic maps show the arrival, on October 5, of a cold front, extending from Spain to the North Sea via the NW Mediterranean and the Po Valley.
On October 6, the easternmost part of the front, which is very active, has moved over the central Adriatic and on October 7 it is found over the Ionian Sea. It leaves a low-pressure center over Central Europe, extending its influence over our regions.

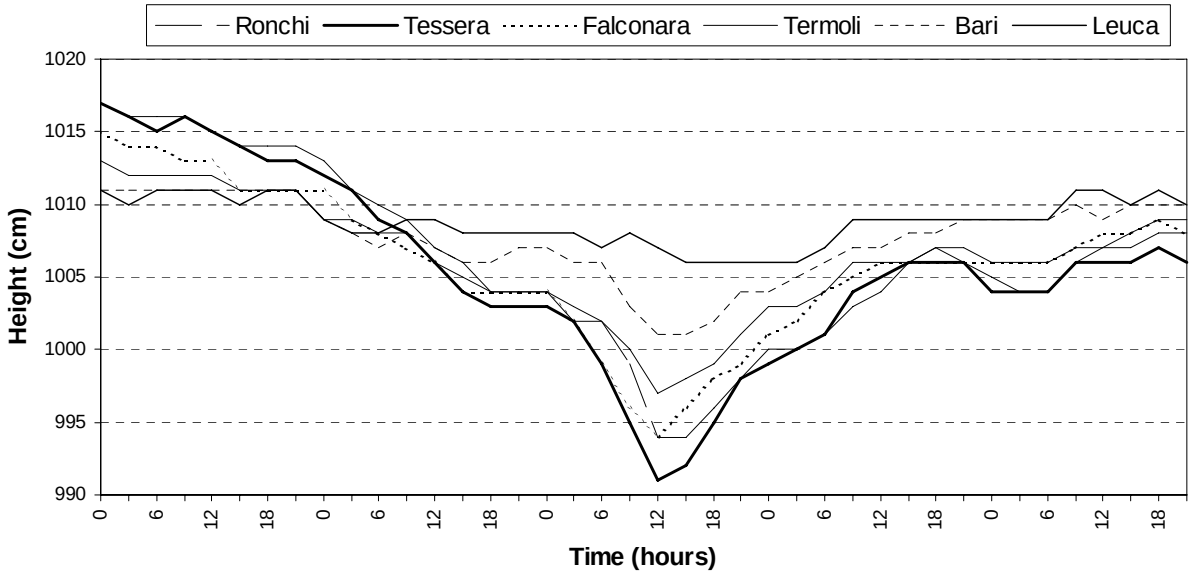
Tide and surge levels at Venice (PDS): 4-8 0ct. 1982



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 4-8 Oct. 1982

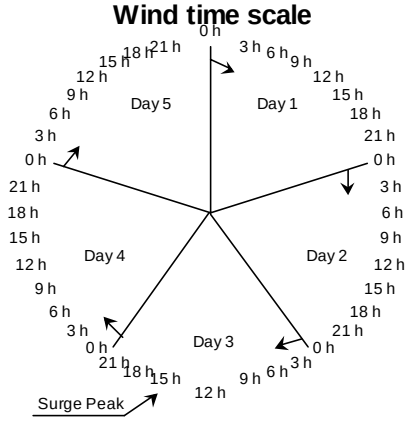


MSL air pressure: 4-8 Oct. 1982

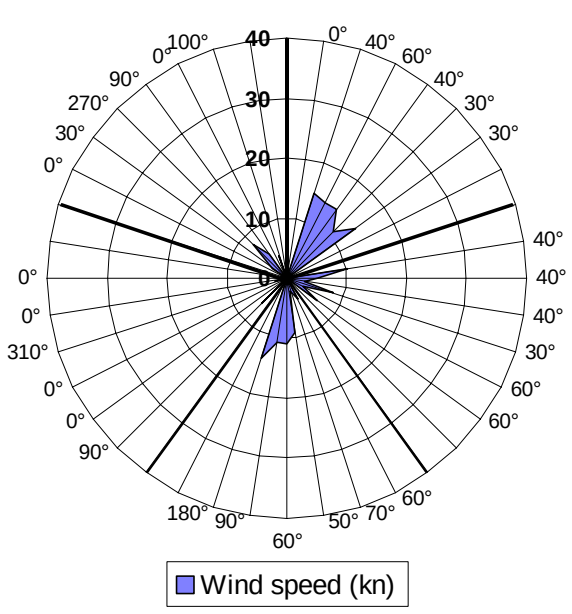


4-8 Oct. 1982

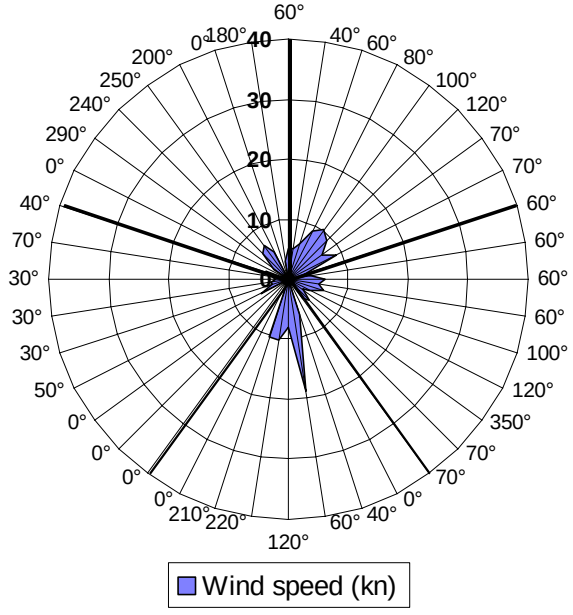
Wind time scale



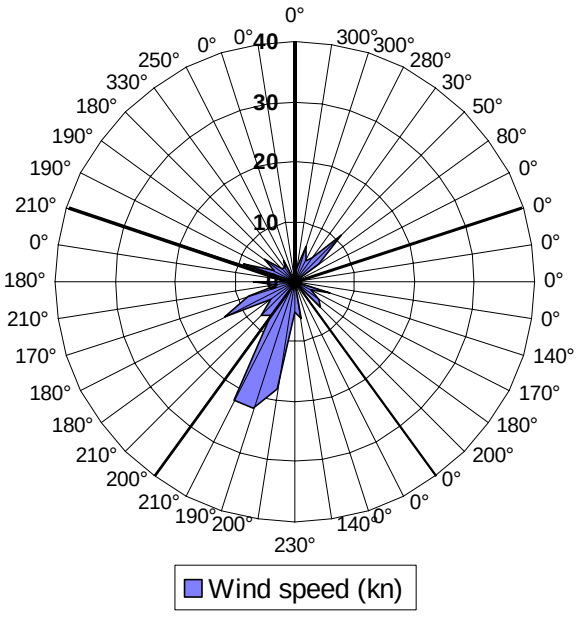
Trieste



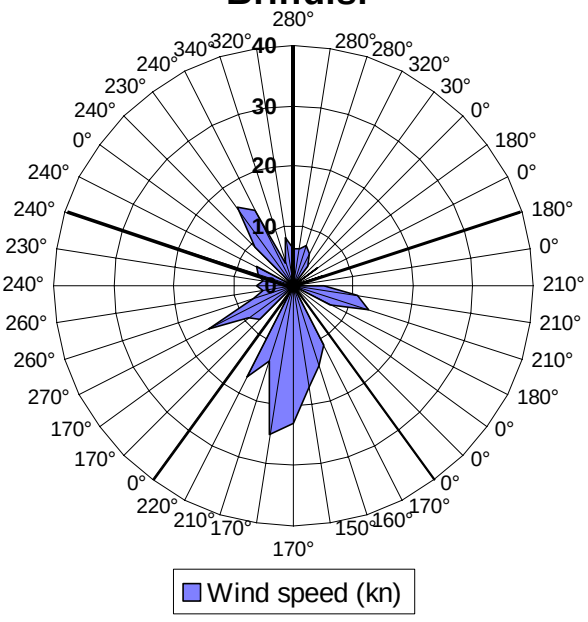
Tessera

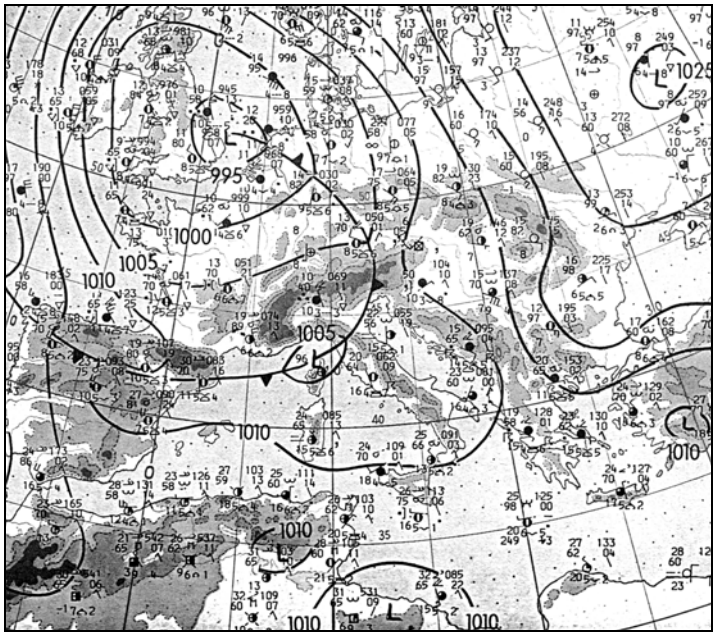


Rimini

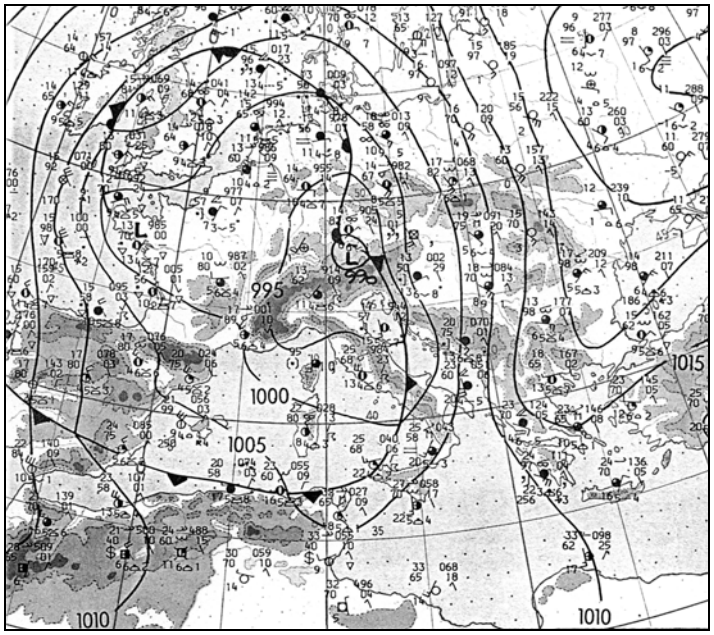


Brindisi

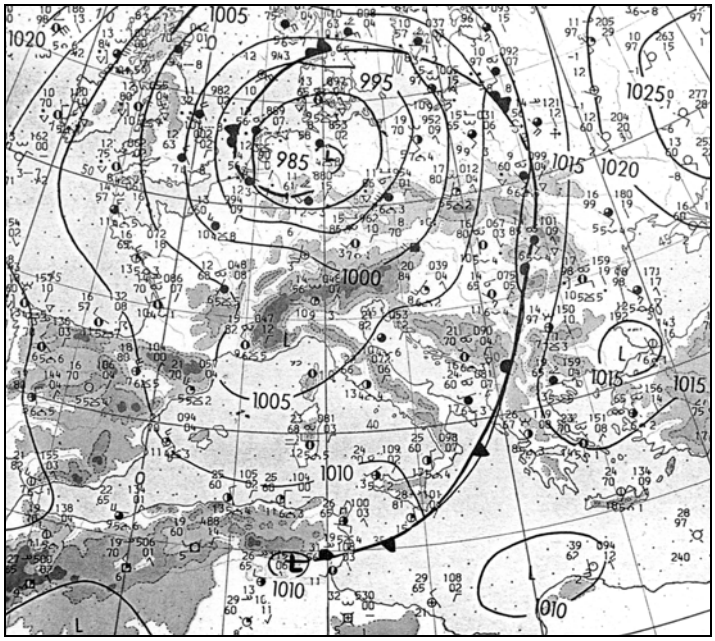




h. 12.00, Oct. 5, 1982



h. 12.00, Oct. 6, 1982



h. 12.00, Oct. 7, 1982

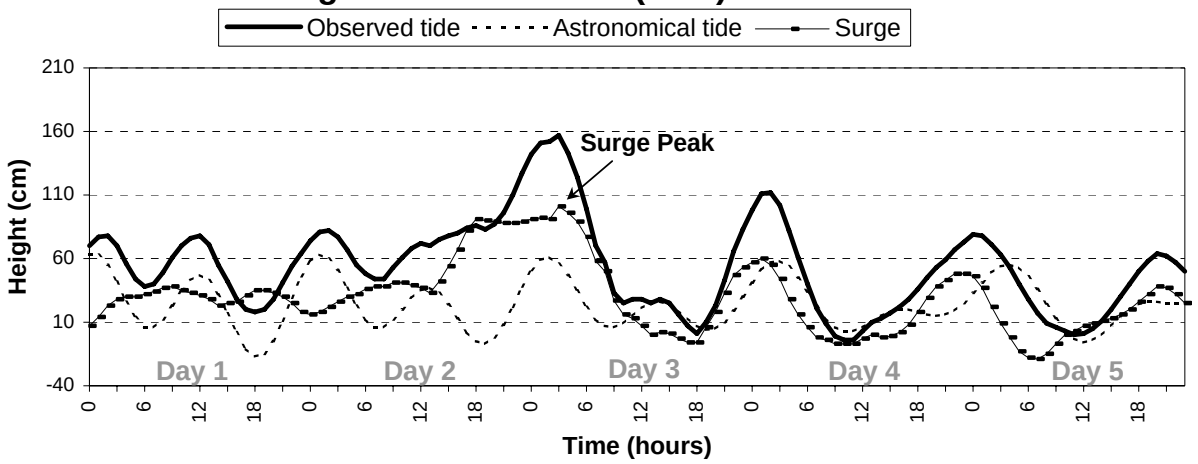
1 febbraio 1986

Il rialzo (101 cm, ore 4) cade un'ora dopo il massimo di marea astronomica (66 cm, ore 3) facendo misurare un livello del mare di 157 cm. Il contributo meteo supera i 90 cm fin dalle ore 19 del giorno prima e ci resta fino alle 6 del 1 febbraio, per un totale di 11 ore consecutive.
Fin dal 30 gennaio si nota un gradiente barico lungo l'Adriatico, con il nord più basso di quasi 5 hPa. Il giorno precedente l'evento a Leuca si misura un brusco innalzamento della pressione, che fa raddoppiare il valore del gradiente, seguito da un graduale abbassamento generalizzato in tutto l'Adriatico. La pressione raggiunge il suo minimo (a Venezia si misurano 991 hPa, mentre a Leuca 1002 hPa) in coincidenza con il massimo rialzo, per poi risalire più velocemente a Venezia che nel basso Adriatico. In tal modo il gradiente barico risulta essere dimezzato fin dalla tarda serata dello stesso giorno per poi praticamente annullarsi il giorno dopo.
Tale andamento della pressione favorisce un vento di scirocco a Leuca intorno ai 20 nodi nei giorni precedenti l'evento e con punte di 57 nodi a Bari in concomitanza dell'evento stesso. Nell'alto Adriatico il vento risulta essere di poco inferiore di velocità (raggiunge a Venezia-Tessera punte di 43 nodi) ma di direzione NE.
Le sesse dovute al fenomeno hanno un'ampiezza di quasi 40 cm quella da 22 ore, e di circa 10 cm quella da 11 ore. Al momento dell'evento le due sesse risultano sfasate: il giorno successivo, trovandosi in fase, generano una marea di 114 cm, dove il contributo astronomico è di quasi 60 cm. Il residuo ha un valore di circa 60 cm nelle ore precedenti il massimo rialzo marino, per poi calare e attestarsi intorno ai 10-15 cm il giorno successivo.
Le carte meteorologiche mostrano un minimo depressionario centrato sulle coste franco-spagnole del mar Mediterraneo durante gli ultimi giorni di gennaio. Tale minimo nei giorni successivi si allarga andando ad interessare buona parte dell'Europa meridionale e si sposta centrandosi sopra la Corsica il 1 febbraio.

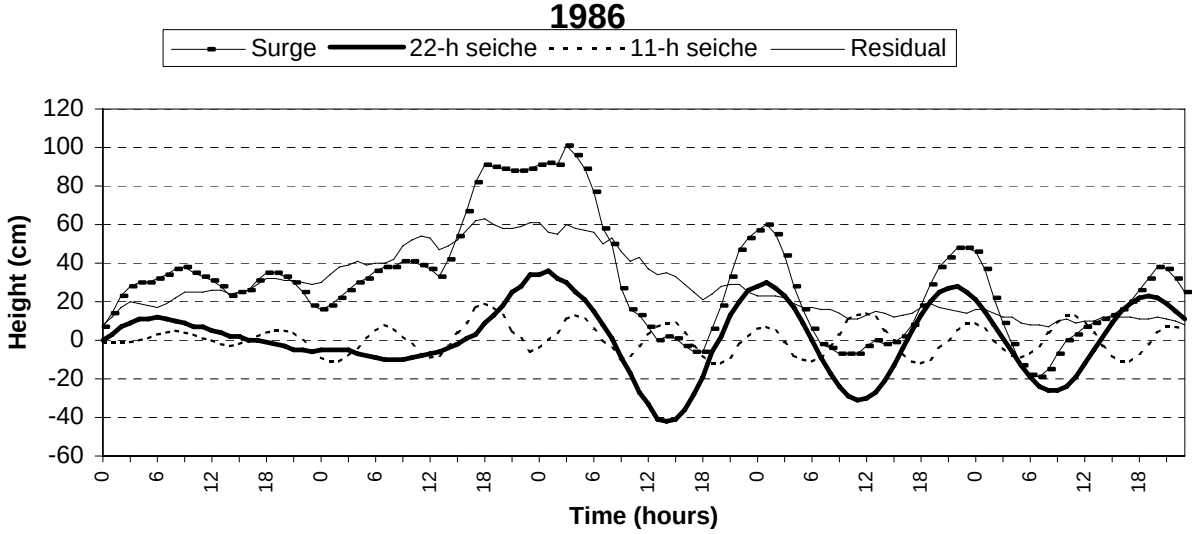
February 1, 1986

The surge peak (101 cm, at 4 AM) occurs an hour after the astronomical maximum (66 cm, 3 AM) and gives a flood of 157 cm. The meteorological contribution exceeds 90 cm since 7 PM of the previous day and maintains that till 6 AM, February 1st, reaching 11 solid hours.
Since January 30 a pressure difference between southern and northern Adriatic slightly less than 5 hPa is noticed, the latter being lower. The day before the event a sharp pressure rise is recorded at Leuca, so that the difference doubles, then values progressively decrease over the whole Adriatic. At the time of the maximum surge the pressure minimum is reached (991 hPa at Venice, 1002 at Leuca), then it rises more quickly in Venice than in the south. This way, the pressure gradient is halved in the evening of the same day and in fact it vanishes the following day.
This behaviour of pressure favours sirocco wind at Leuca, about 20 knots in the days preceding the surge and spikes of 57 knots at Bari at the time of the maximum. In the north, wind velocity is slightly less (in Venice-Tessera it goes occasionally to 43 knots) but from NE.
The seiches related to the phenomenon have an amplitude of about 40 cm (the 22-hour one) and 10 cm (11-hour).At the time of the event they are out of phase, but the following day they are not and cause an "acqua alta" of 114 cm, with a meteorological contribution of about 60 cm. The residual is about 60 cm in the hours preceding the surge maximum, then it decreases and remains at 10-15 cm the following day.
The weather maps show a minimum on the Mediterranean coasts of Spain and France in the last days of January. This depression widens, on the following days, invading a large part of southern Europe, and moves over Corsica on February 1st.

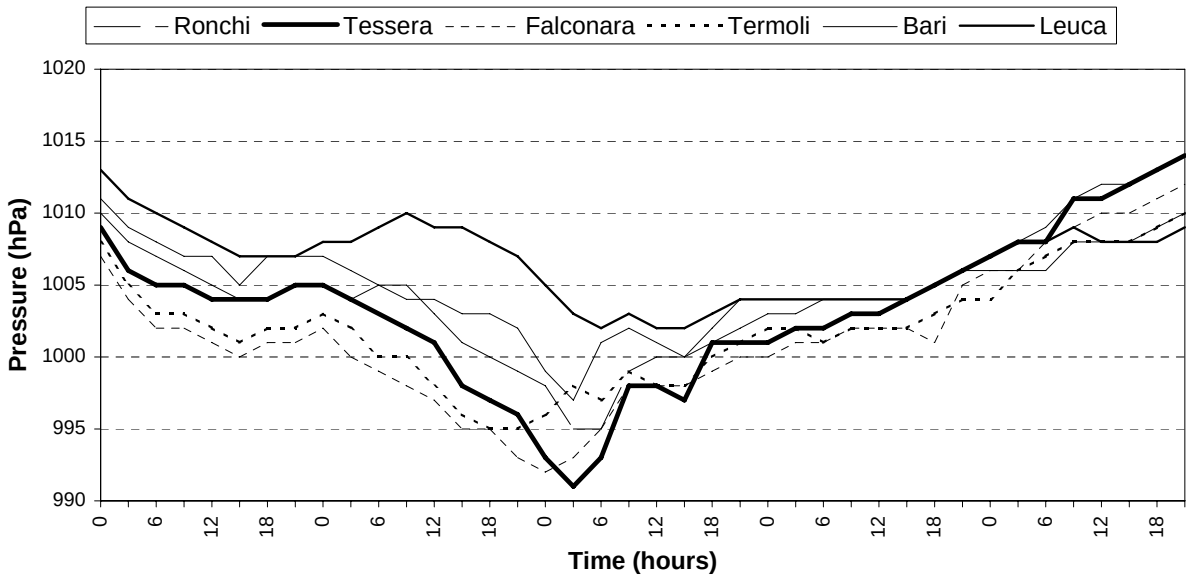
Tide and surge levels at Venice (PDS): 30 Jan.-3 Feb. 1986



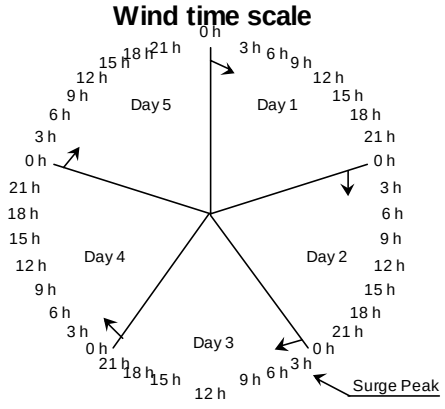
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 30 Jan.-3 Feb. 1986



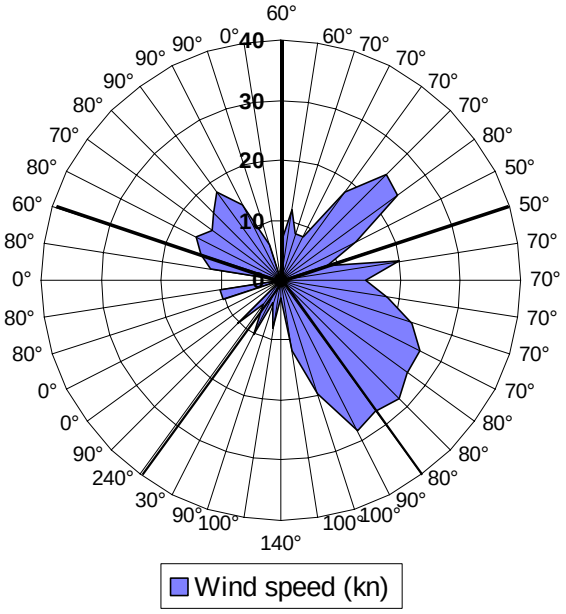
MSL air pressure: 30 Jan.-3 Feb. 1986



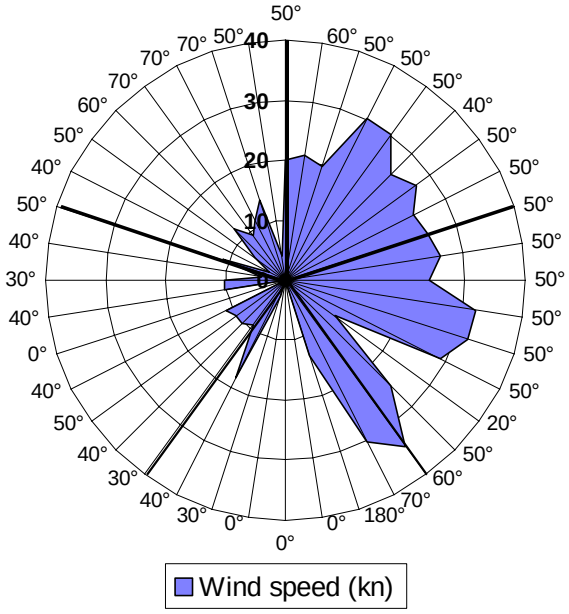
30 Jan.-3 Feb. 1986



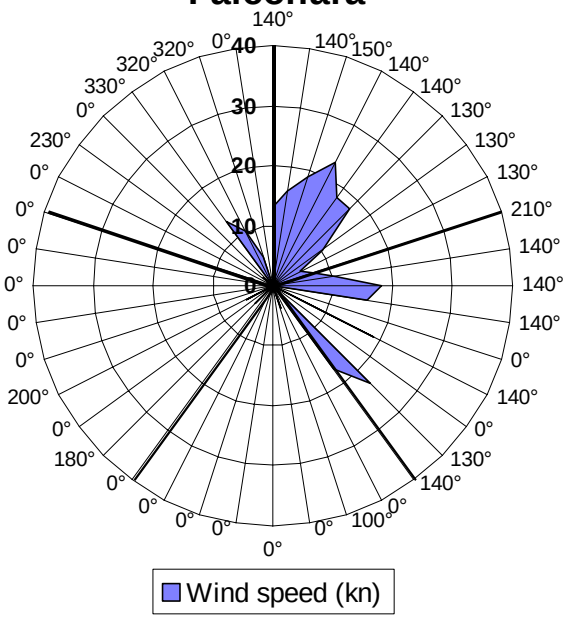
Ronchi



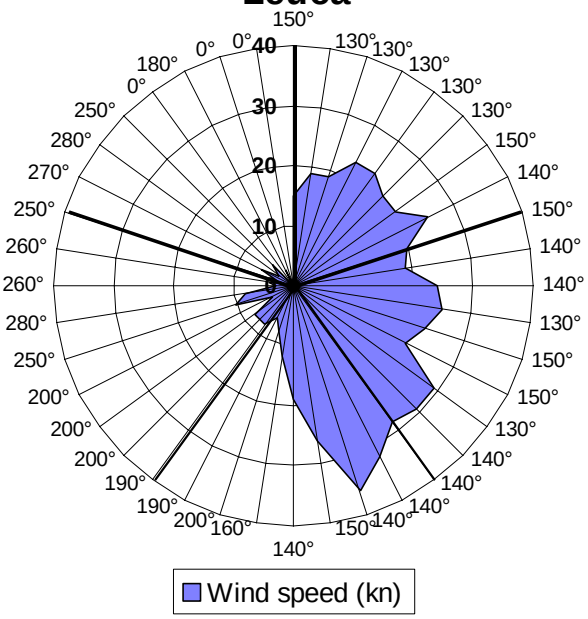
Tessera

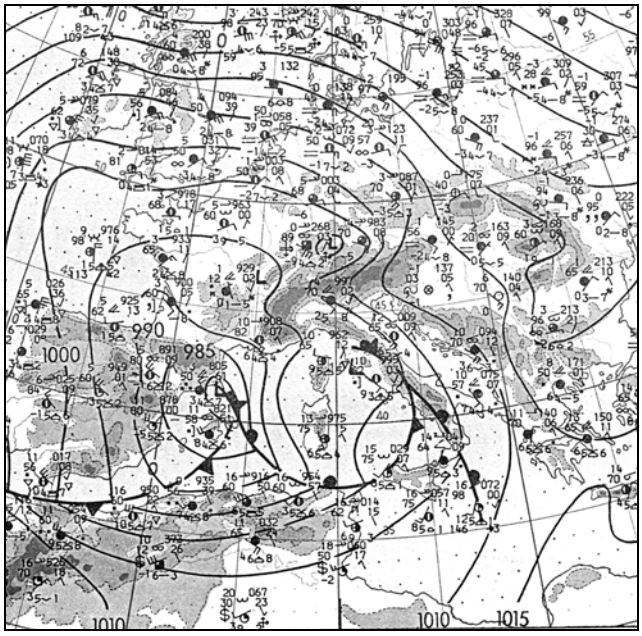


Falconara

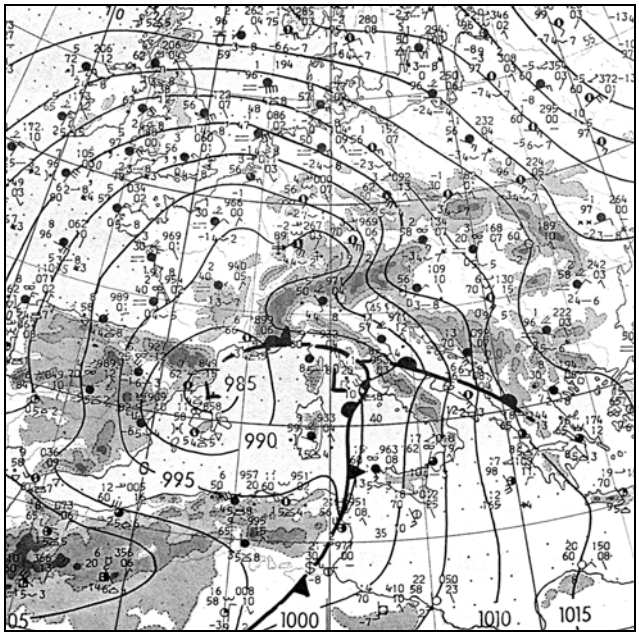


Leuca

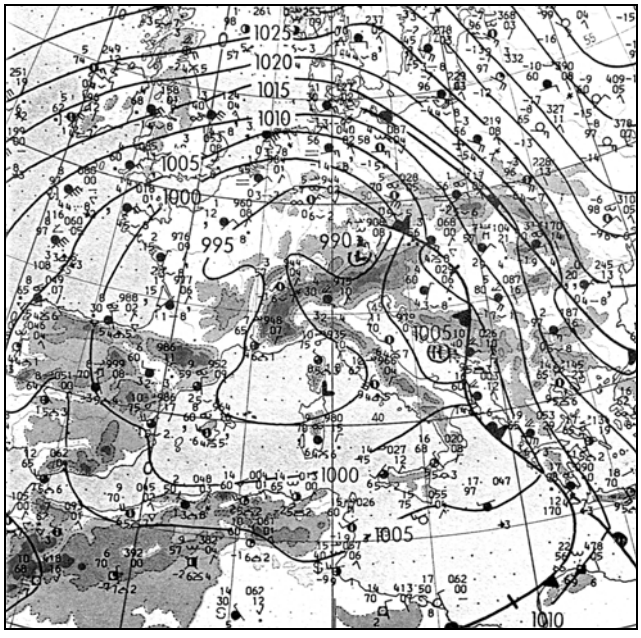




h. 12.00, Jan. 30, 1986



h. 12.00, Jan. 31, 1986



h. 12.00, Feb. 1, 1986

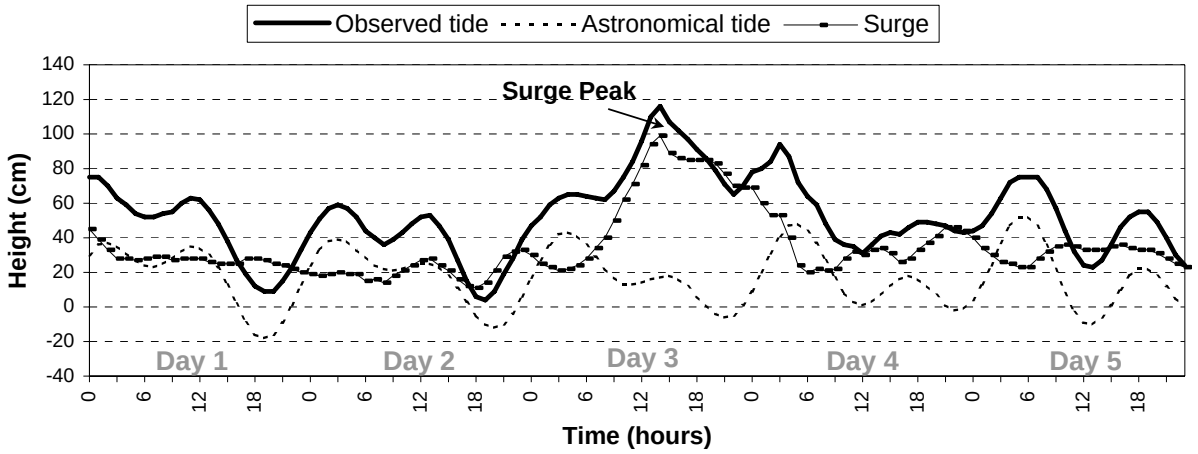
25 novembre 1990

Il rialzo (99 cm, ore 14), perdura al disopra di 80 cm per ben 9 ore, ma coincide fortunatamente con un periodo di morto d'acqua (marea astronomica di 17 cm al momento del colmo), per cui la marea osservata supera per sole due ore il livello di 110 cm, culminando a 116 cm (ore 14).
La pressione atmosferica era ancora praticamente uniforme sull'Adriatico all'inizio della giornata, ma una differenza di 15 hPa tra Leuca-Brindisi ed il golfo di Venezia si è stabilita nella mattinata, mantenendosi poi quasi invariata nel pomeriggio ed in serata. Ciò ha favorito lo sviluppo di un moderato vento di scirocco sull'Adriatico meridionale, con tendenza all'aumento nell'Adriatico centrale (raffiche di 36 nodi a Rimini) e, a Venezia, una breve punta trioraria di circa 30 nodi, ma con raffiche massime di 46 nodi. A Trieste, invece, la direzione del vento è leggermente più orientale (raffiche di 45 nodi da 90° alle ore 13).
Le sesse che seguono il rialzo sono moderate (45 cm di escursione per la sessa di 22 ore, 21 cm per la sessa di 11 ore), tendono a smorzarsi rapidamente e, il 27 novembre, i loro effetti sui rialzi sono praticamente annullati dall'opposizione di fase. Il residuo è superiore a 50 cm per 19 ore consecutive, con un massimo di 64 cm al momento del colmo.
Le carte meteorologiche mostrano l'arrivo di una depressione atlantica che si affievolisce avvicinandosi alla Manica. Al momento dell'acqua alta, il 25 novembre, il centro della depressione si stava allargando ed attenuando sulla Francia e l'Europa centrale, mentre un gradiente di pressione favoriva lo sviluppo dello scirocco sul Mediterraneo centrale. Il 26 novembre, lo spostamento della perturbazione verso l'Italia centrale tendeva a spianare il campo delle pressioni ed a limitare il vento sull'alto Adriatico.

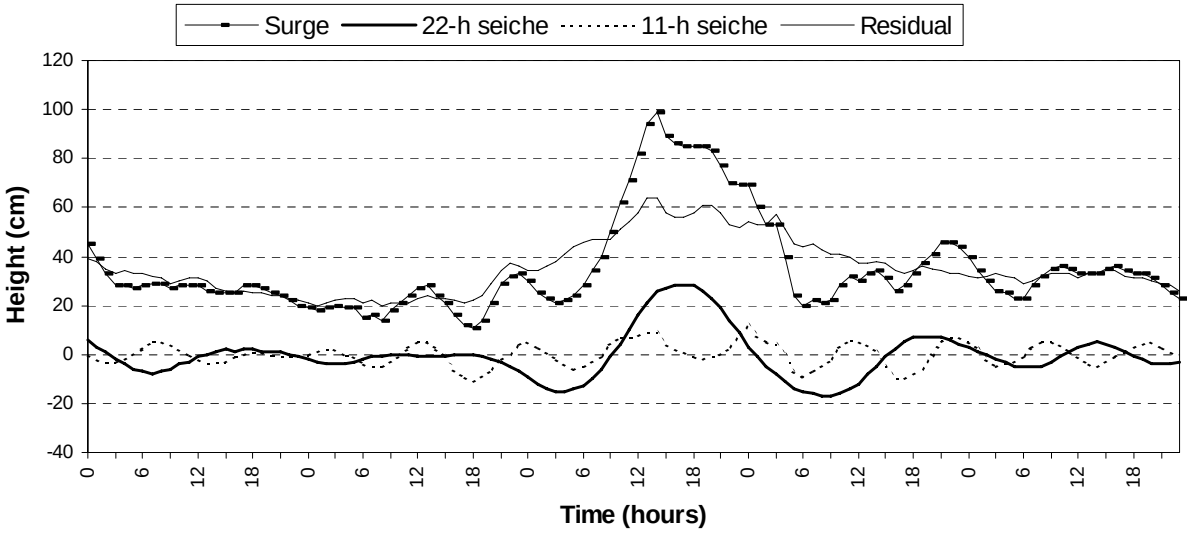
November 25, 1990

The surge (reaching 99 cm at 2 PM) remains over 80 cm for 9 hours, but, fortunately, with a very feeble astronomical tide (17 cm at the peak time), so the observed tide exceeds 110 cm for only two hours, with a maximum of 116 (at 2 PM). At the beginning of the day, the atmospheric pressure was still flat over the Adriatic, but during the morning a difference of 15 hPa between Leuca-Brindisi and the Gulf of Venice was established, which persisted for the rest of the day. This favoured a moderate sirocco over the southern Adriatic, with a certain increase in the central part (gusts of 36 knots at Rimini) and, at Venice, a three-hourly peak of about 30 knots, but with extreme gusts of 46 knots.
At Trieste, instead, wind direction slightly changed towards the east (gusts of 45 knots from 90 degrees at 1 PM).
The seiches following the initial surge are moderate (45 cm range for the main one, 21 cm for the other one), they tend to damp quickly, and, on November 27, their effect is cancelled by the phase opposition. The residual stays over 50 cm for 19 hours, giving 64 cm at the time of the
surge maximum. The meteorological maps show the arrival of an Atlantic low-pressure, weakening while approaching the English Channel. At the time of the flood, on November 25, the depression center was widening over France and central Europe, and a pressure gradient was favouring sirocco over central Mediterranean. On November 26, the perturbation, moving towards central Italy, was gradually flattening the pressure field and limiting winds over the northern Adriatic.

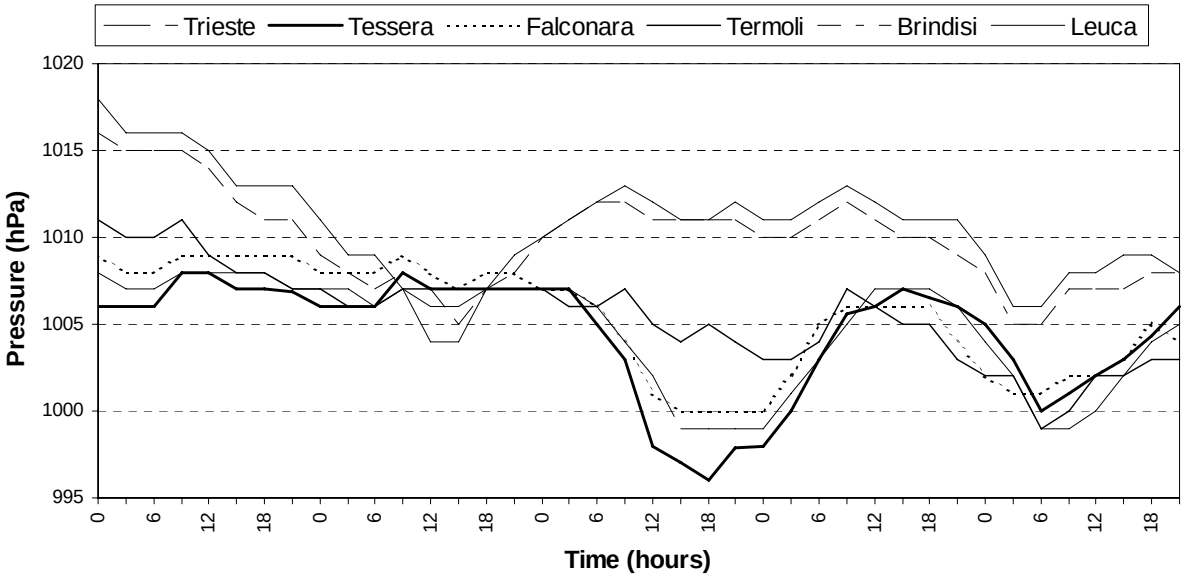
Tide and surge levels at Venice (PDS): 23-27 Nov. 1990



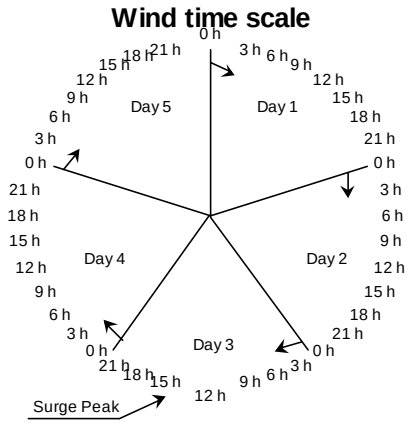
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 23-27 Nov. 1990



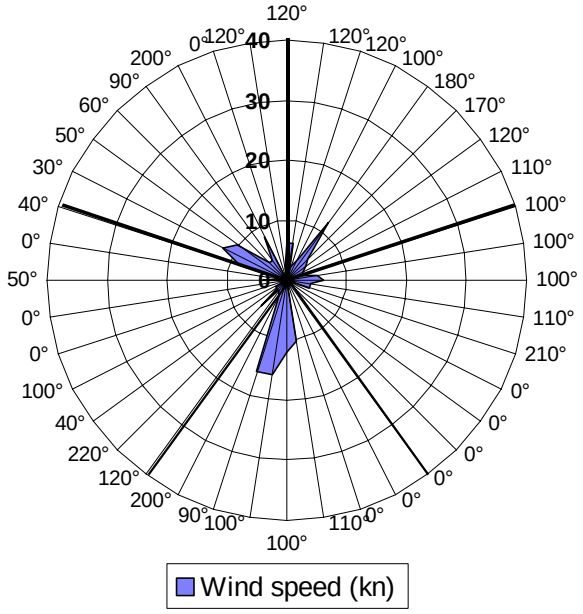
MSL air pressure: 23-27 Nov. 1990



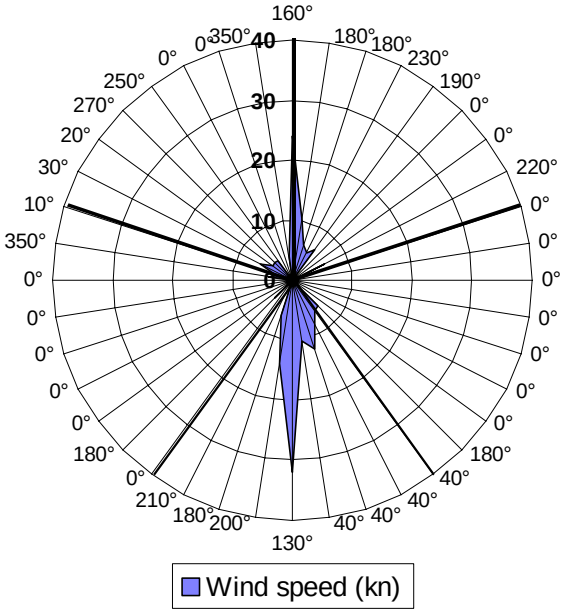
23-27 Nov. 1990



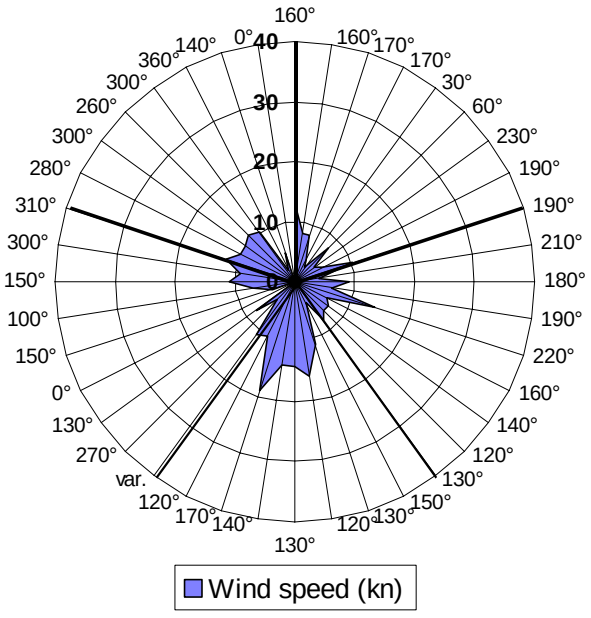
Trieste



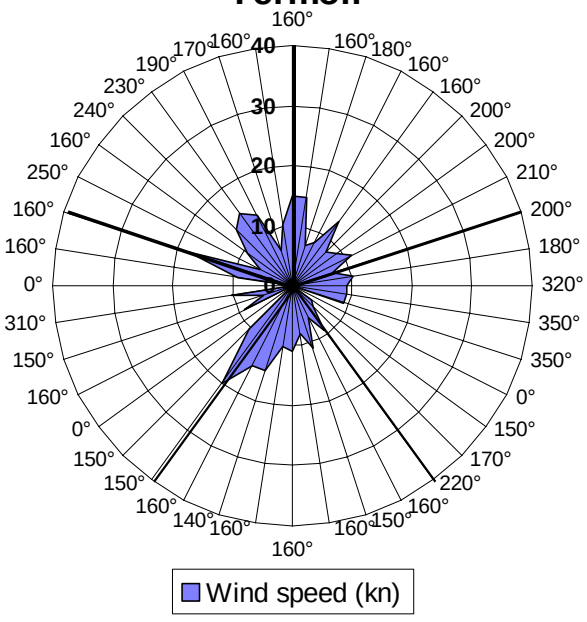
Tessera

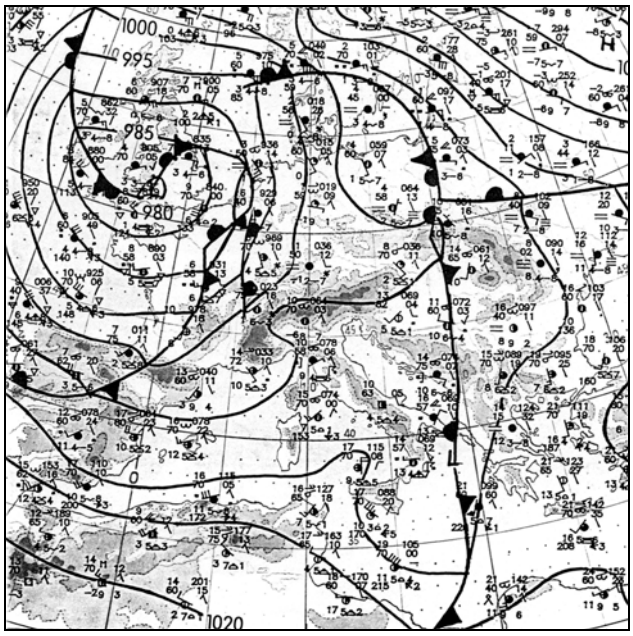


Rimini

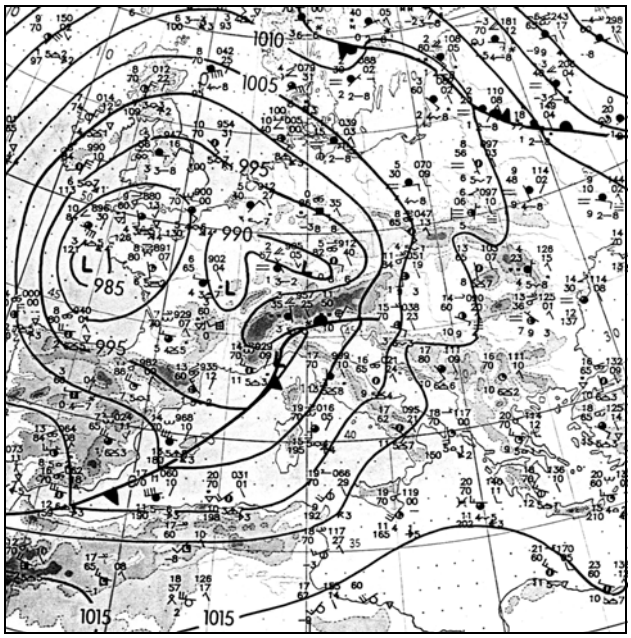


Termoli

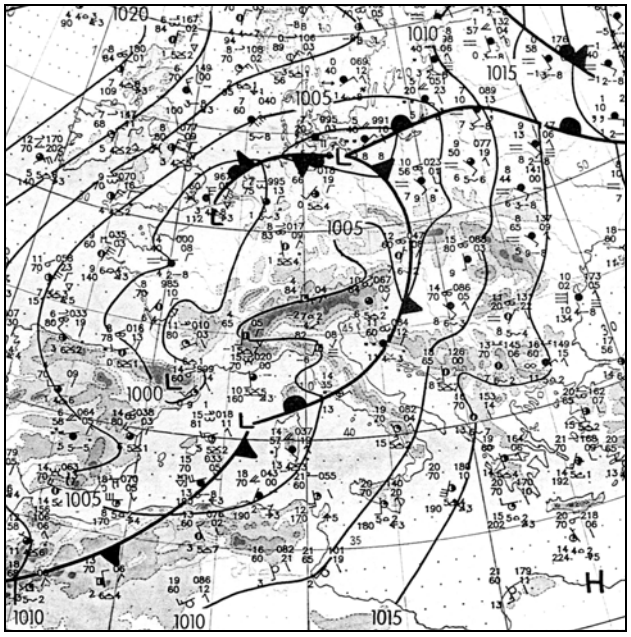




h. 12.00, Nov. 24, 1990



h. 12.00, Nov. 25, 1990



h. 12.00, Nov. 26, 1990

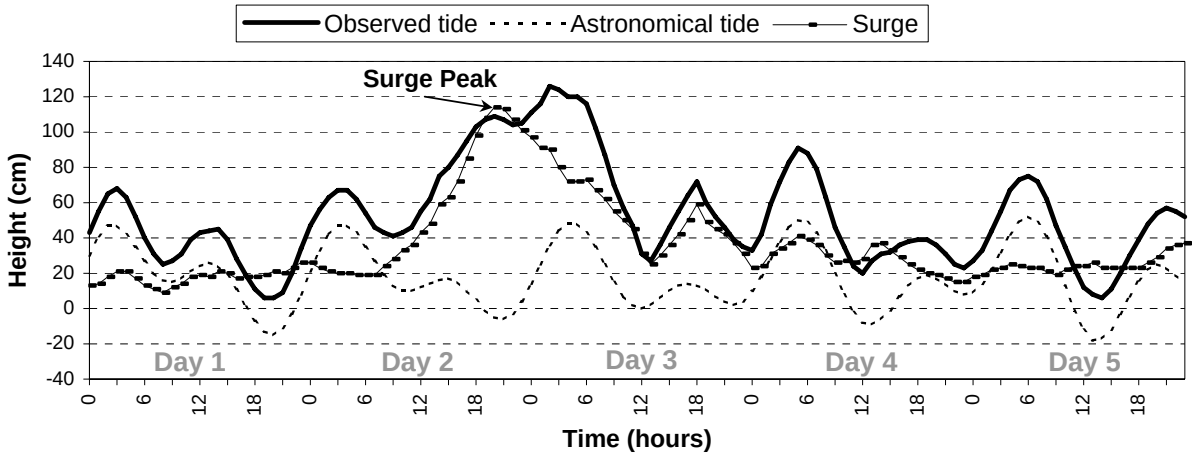
9-10 dicembre 1990

Al momento del massimo rialzo (114 cm, 9 dicembre, ore 20), essendo bassa la marea astronomica (-5 cm), il livello di marea osservato non supera 109 cm. Il 10 dicembre alle ore 2, invece, mentre il rialzo è già diminuito a 90 cm, si ha, prima del colmo della marea astronomica, una massima marea osservata di 126 cm. La sessa di 22 ore comincia ad amplificarsi fin dalla mattina dell'8 dicembre, raggiunge un'escursione di 52 cm al momento del massimo rialzo, poi si smorza rapidamente. La sessa di 11 ore (27 cm di escursione), invece, oscilla più a lungo; però, benché i suoi colmi coincidano con quelli della marea astronomica, è insufficiente per provocare nuovi casi di acqua alta. Il residuo rimane superiore a 50 cm per 25 ore consecutive ed a 60 cm per 14 ore, con un massimo di 74 cm al momento della massima marea osservata. Una leggera differenza di pressione si è formata rapidamente, l'8 dicembre, tra l'Adriatico meridionale e quello centro-settentrionale e si è mantenuta quasi inalterata il 9 dicembre, malgrado una diminuzione generale della pressione. Il minimo (988 hPa) è stato raggiunto a Venezia alle ore 6 del 10 dicembre, quando il rialzo era già sceso a 73 cm. Poi la pressione atmosferica è aumentata progressivamente ed il gradiente sull'Adriatico si è annullato l'11 dicembre.
Una sciroccata generale si è manifestata sull'Adriatico fin dal 9 dicembre, mantenendo velocità triorarie superiori a 10 nodi durante circa 40 ore, con raffiche massime a 40-50 nodi. Le carte meteorologiche indicano l'8 dicembre lo sviluppo, lungo un sistema frontale che attraversa la Spagna, di un'onda atmosferica collegata ad una depressione localizzata sul mare del Nord. Il 9 dicembre il centro depressionario si allarga sulla Francia, mentre un secondo centro si approfondisce sul mar Ligure, per estendersi poi il 10 sull'Italia del nord, mentre il sistema frontale attraversa l'Adriatico.

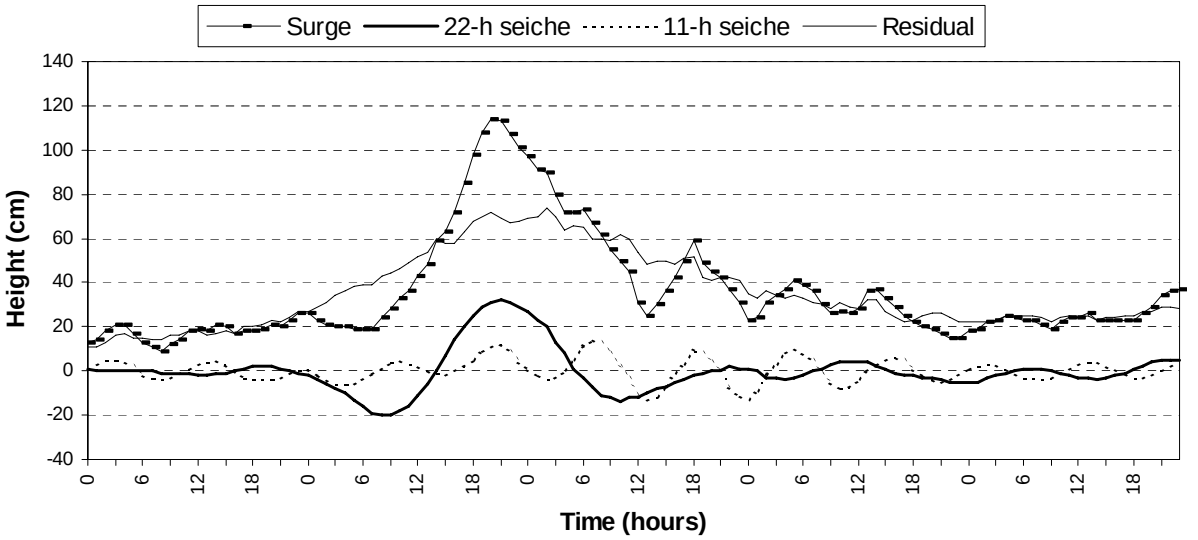
December 9-10, 1990

At the time of maximum surge (114 cm at 8 PM of December 9), since the astronomical tide is low (-5 cm), the observed water level does not exceed 109 cm. Instead, on December 10 at 2 AM, when the surge has decreased to 90 cm, a maximum level is observed of 126 cm, even though the ordinary tide is not yet at its peak. The main, 22-hour seiche starts to grow since the morning of December 8, it reaches a range of 52 cm at the moment of maximum surge, then it quickly fades. Instead, the 11-hour seiche (27-cm range) keeps oscillating longer: its crest coincides with the ones of the tide but this is not enough to determine floods. The residual remains over 50 cm for 25 hours, exceeding the level of 60 cm for 14 hours, with a maximum of 74 at the time of the maximum flood.
A slight pressure difference suddenly originated, on December 8, between the southern Adriatic and the rest of it. It did not change too much the 9th, in spite of a general decrease of values. The minimum (988 hPa) was reached over Venice at 6 AM on December 10, when the surge was already reduced to 73 cm. Later, the pressure progressively increased and the gradient along the Adriatic vanished on December 11.
A general field of sirocco appeared over the Adriatic since December 9, keeping three-hourly speeds over 10 knots for about 40 hours, with gusts of 40-50 knots. The meteorological maps of December 8 show the development of an atmospheric wave, along a frontal system crossing Spain, connected with a depression located on the North Sea. On December 9 the low-pressure center widens over France, while a second center deepens on the Liguria Sea and influences, on the 10th, northern Italy, while the front crosses the Adriatic.

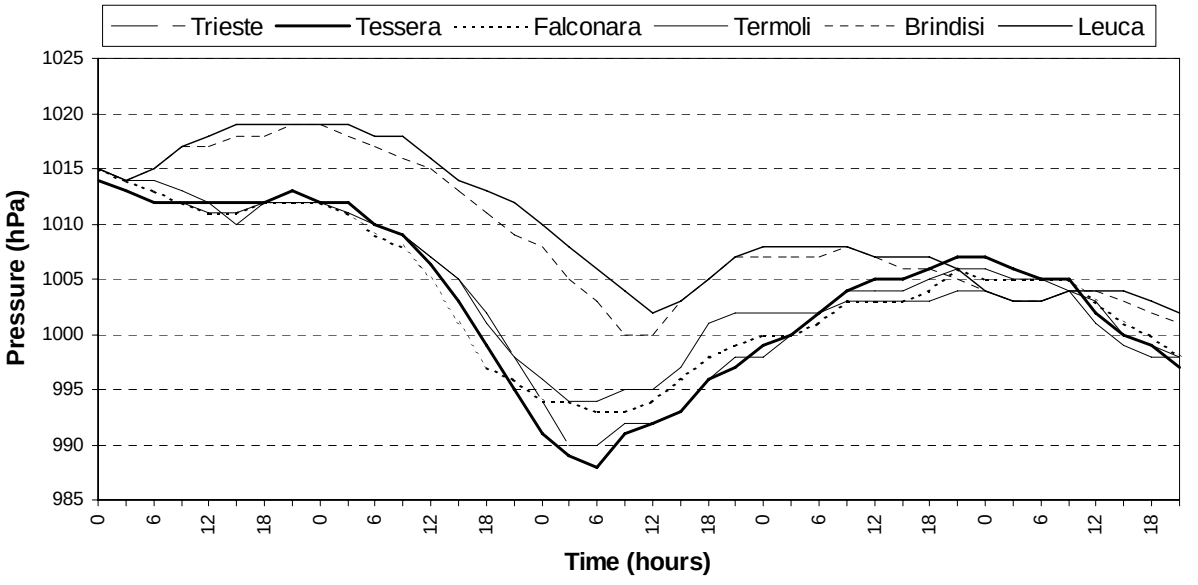
Tide and surge levels at Venice (PDS): 8-12 Dec. 1990



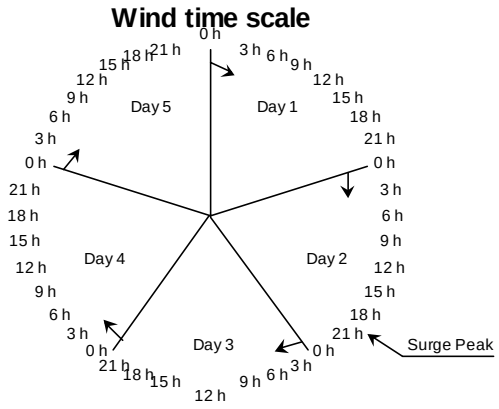
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 8-12 Dec. 1990



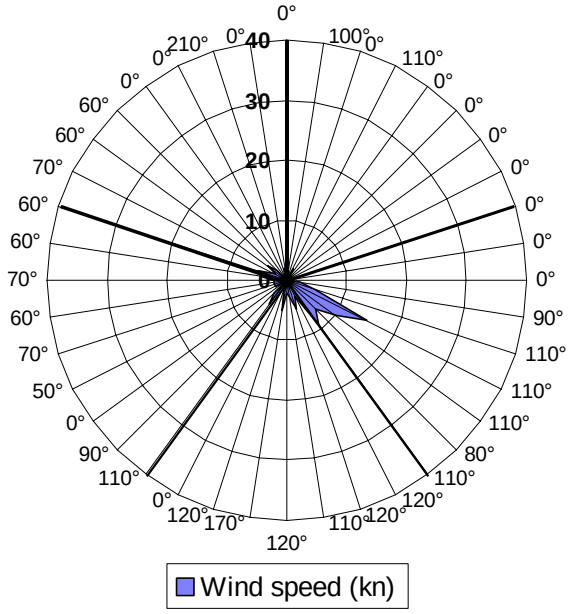
MSL air pressure: 8-12 Dec. 1990



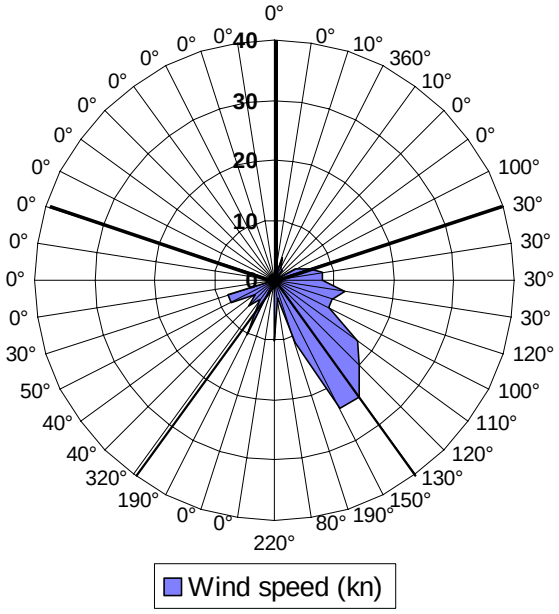
8-12 Dec. 1990



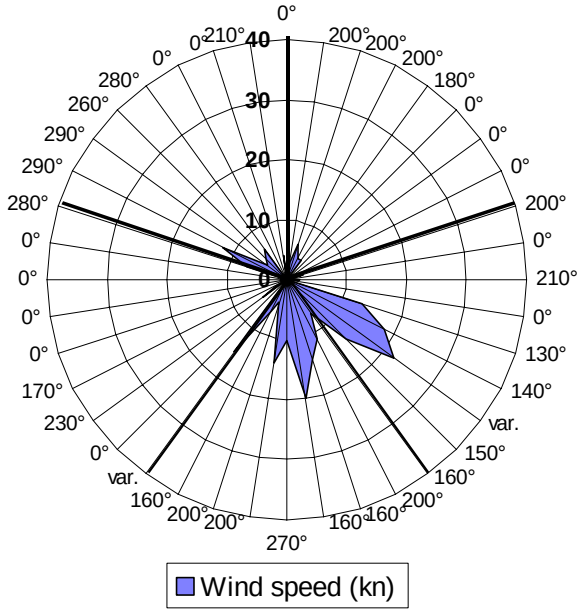
Trieste



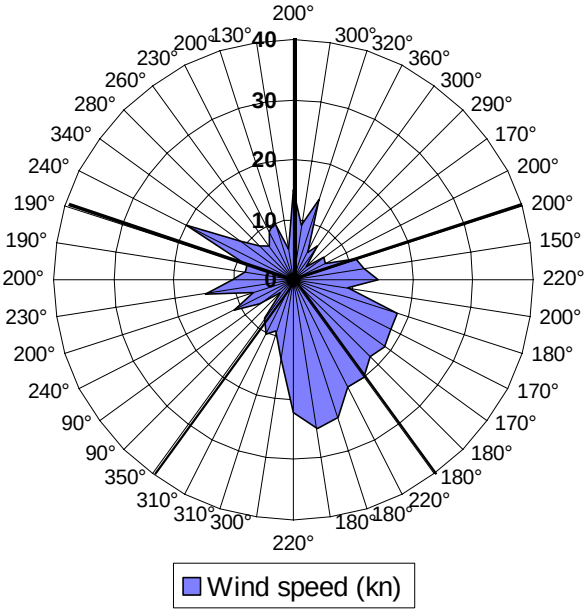
Tessera

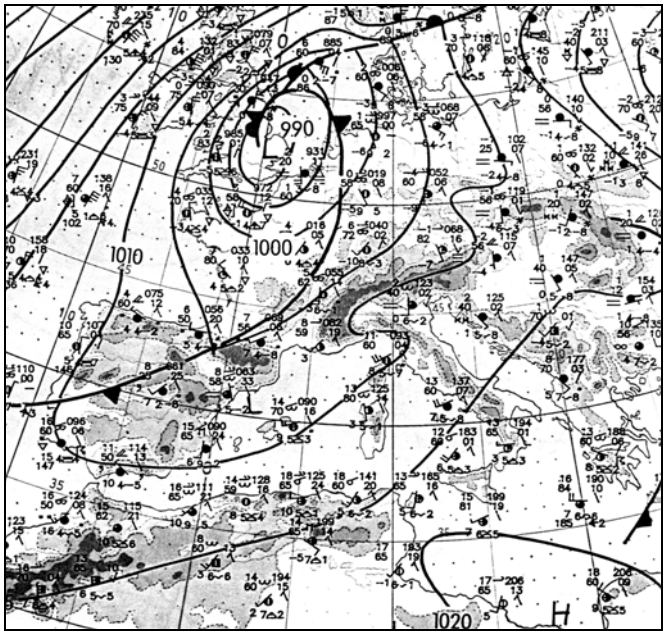


Falconara

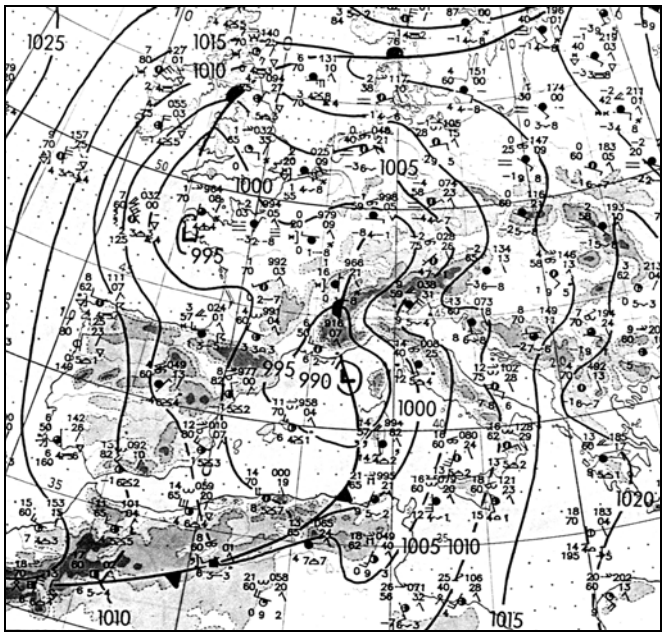


Leuca

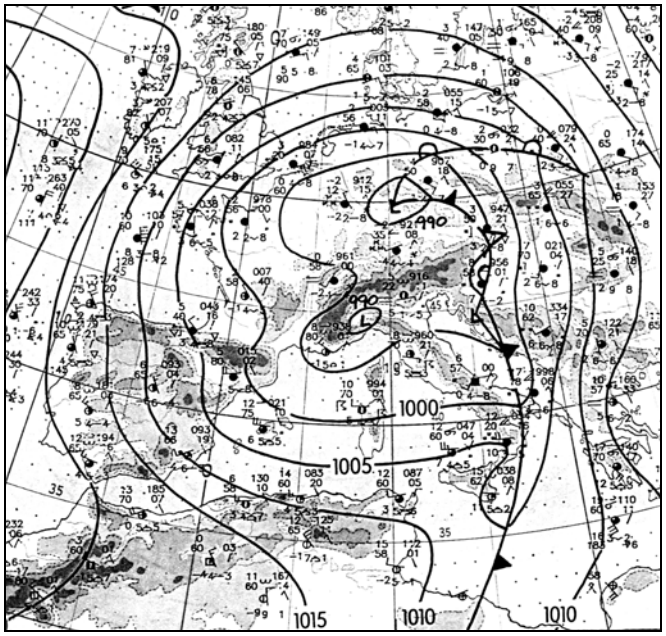




h. 12.00, Dec. 8, 1990



h. 12.00, Dec. 9, 1990



h. 12.00, Dec. 10, 1990

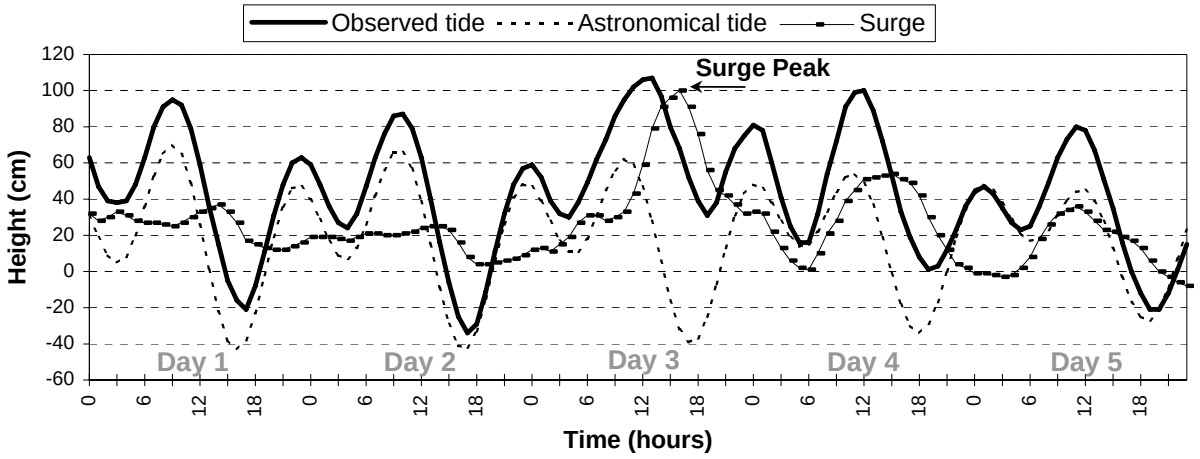
24 novembre 1991

Il rialzo inizia a crescere in modo significativo successivamente al massimo astronomico (62 cm, ore 11) raggiungendo il valore più elevato di 100 cm alle ore 17, poco prima del minimo astronomico (-39 cm, ore 18). La marea massima osservata è quindi stata di appena 107 cm alle ore 14.
Le carte meteorologiche mostrano il giorno precedente l'evento una leggera depressione sull'area centrale mediterranea che si approfondisce fino a raggiungere il minimo il giorno dell'evento con 995 hPa. La sua posizione centrata sul Tirreno meridionale provoca la formazione di venti meridionali dal nord Africa al basso medio Adriatico (Brindisi raggiunge la velocità di 26 nodi da sud est). A causa della posizione dell'area ciclonica, nell'alto Adriatico i venti si dispongono dal primo quadrante raggiungendo a Trieste poco più dei 35 nodi (ma con una raffica massima di ben 59 nodi!).
Viene quindi a instaurarsi il noto fenomeno della "scontraura" determinato da venti di scirocco nel basso e medio Adriatico e venti di bora nell'alto, che causa il massimo accumulo di masse d'acqua all'altezza della laguna veneta.
La sessa principale di 22 ore ha registrato circa 60 cm di escursione in progressiva dissipazione nel tempo. Anche la sessa di 11 ore presenta un valore di altezza significativa di quasi 20 cm in corrispondenza al massimo contributo meteorologico, mentre contemporaneamente il valore residuo registrava il suo massimo di 50 cm.
La pressione atmosferica uniformemente distribuita intorno a 1018 hPa su tutto l'Adriatico il giorno precedente l'evento, si abbassa bruscamente ad iniziare dalle regioni meridionali: la stazione di Leuca raggiunge infatti il valore minimo di 1004 hPa circa 12 ore in anticipo rispetto a Tessera (Venezia) che non scende al di sotto dei 1006 hPa. Il valore più basso dell'Adriatico viene raggiunto a Termoli con 995 hPa.

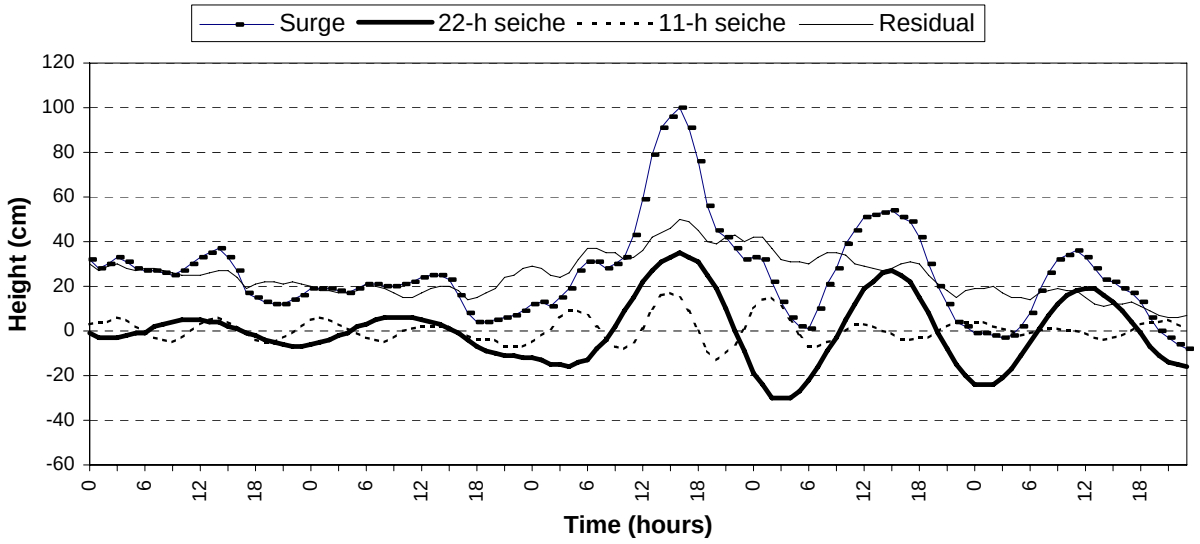
November 24, 1991

The surge begins a significant rise after the astronomical maximum (62 cm at 11 AM) reaching its peak of 100 cm at 5 PM, just before the astronomical minimum (-39 at 6 PM). As a consequence, only 107 cm were measured at 2 PM.
The weather maps show, the day before the event, a moderate depression over the central Mediterranean, getting deeper and deeper and reaching its minimum, the day of the surge, with 995 hPa. Being located on the southern Tyrrhenian Sea, it causes southerly winds from northern Africa to central and southern Adriatic (Brindisi reaches the speed of 26 knots from southeast). Due to the cyclone position, in the northern Adriatic winds blow from the first quadrant and in Tessera they reach 35 knots (but with maximum gusts of 59!).
Clearly the frequent situation of "scontraura" is created, with sirocco in the central and southern part of the Adriatic, and bora in the north: they all focus the maximum amount of water in the western part of the Gulf of Venice.
The principal seiche of 22-hour period was recorded with about 60 cm range, progressively attenuating. Also the secondary seiche is significant, with about 20 cm corresponding to the maximum surge, when also the residual was maximum at 50 cm.
The atmospheric pressure equally distributed around 1018 hPa on the sea, the day preceding the event, lowers sharply, beginning from south: at Leuca a minimum of 1004 hPa is reached about 12 hours before than at Tessera (Venice), where it never goes under 1006 hPa. Termoli reaches the minimum of the Adriatic with 995 hPa.

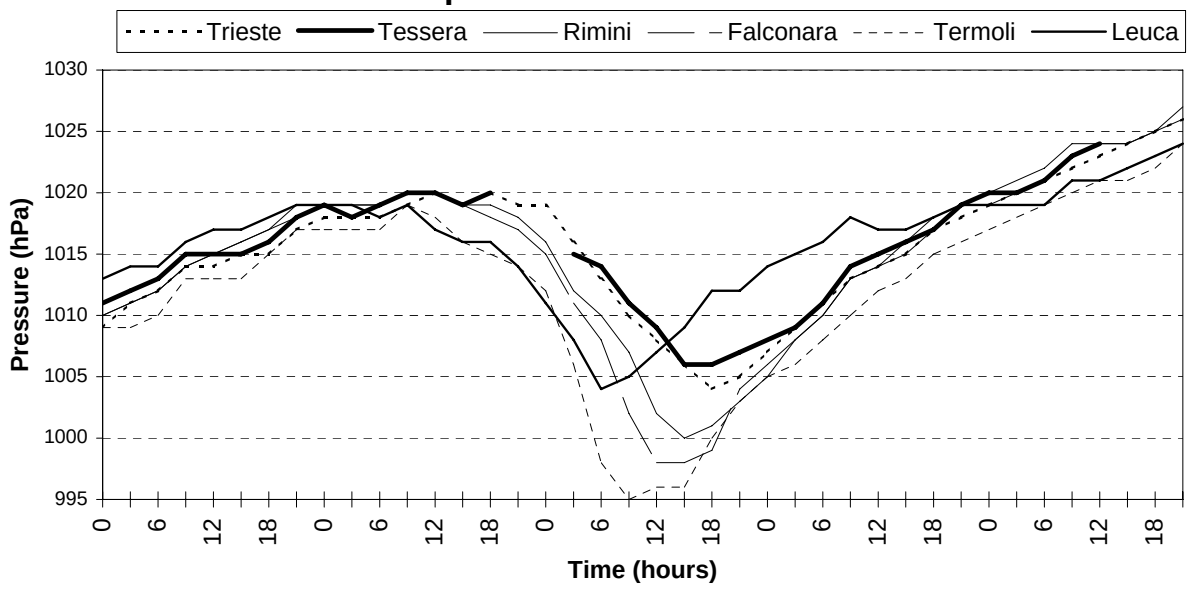
Tide and surge levels at Venice (PDS): 22-26 Nov. 1991



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 22-26 Nov. 1991

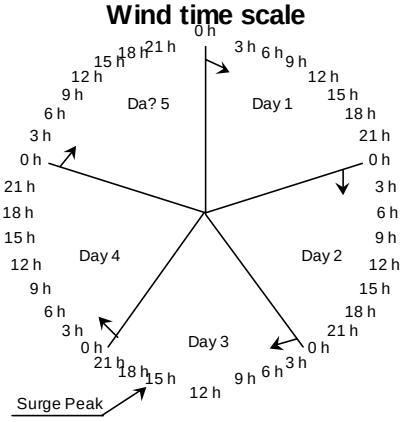


MSL air pressure: 22-26 Nov. 1991

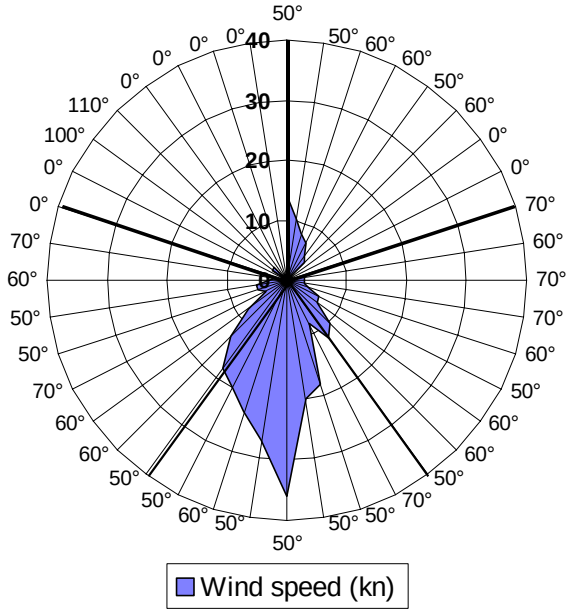


22-26 Nov. 1991

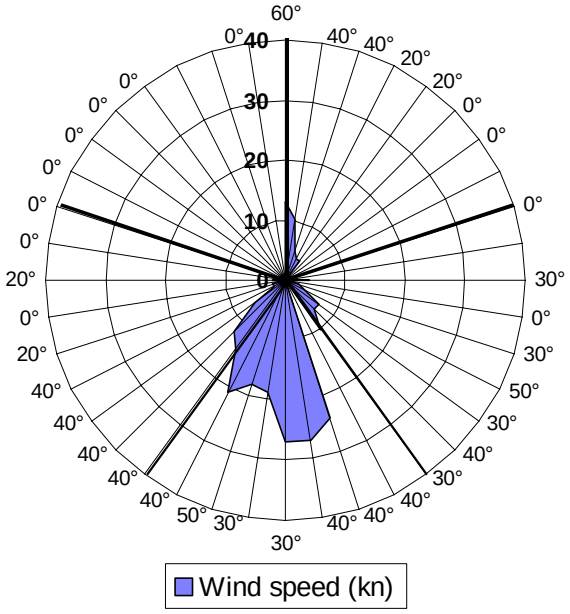
Wind time scale



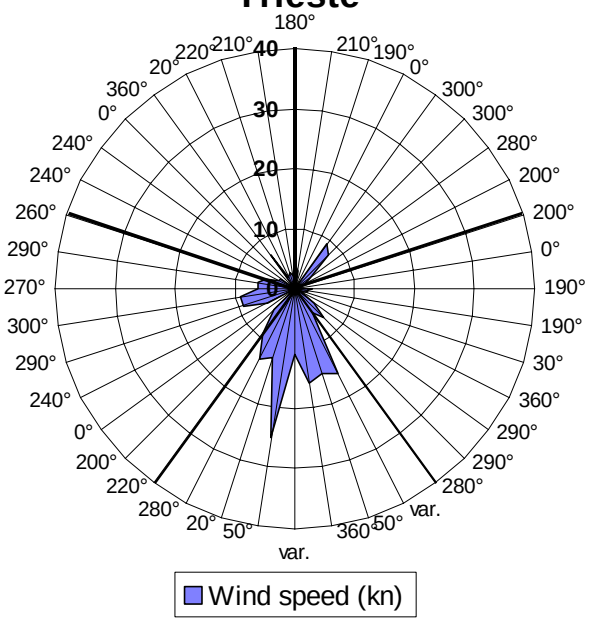
Trieste



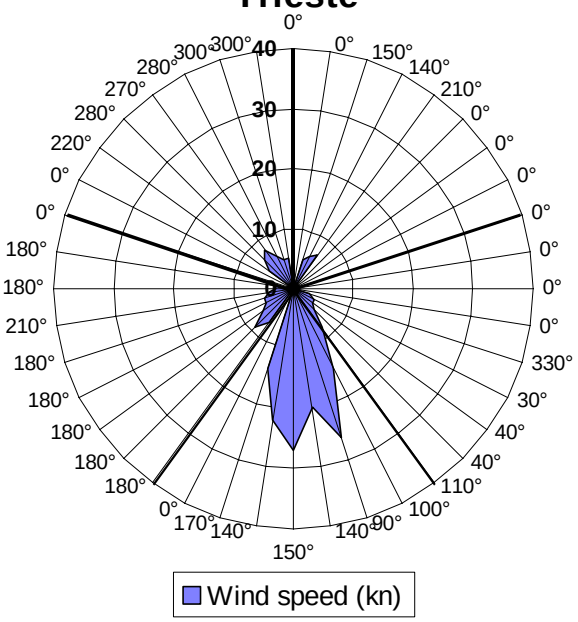
Trieste

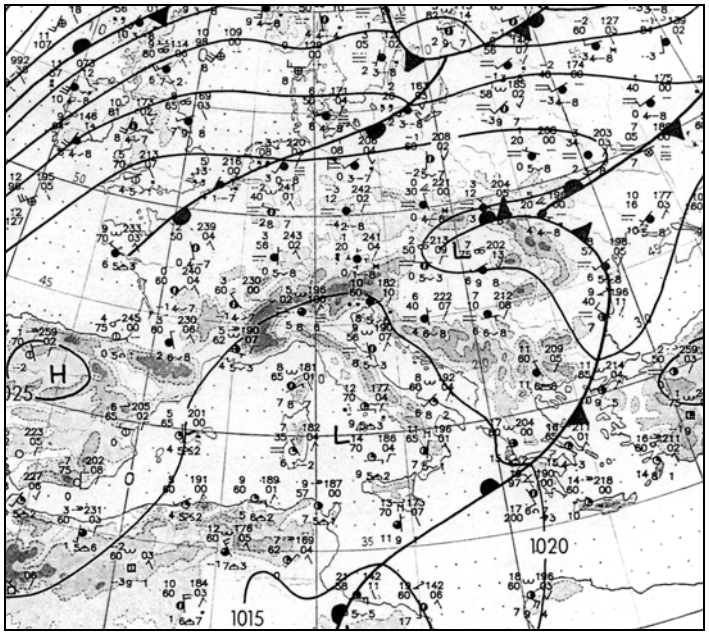


Trieste

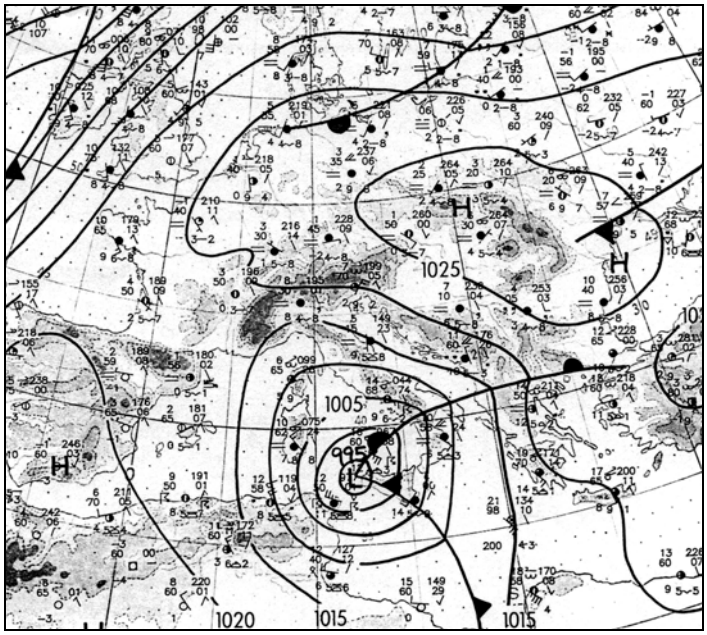


Trieste

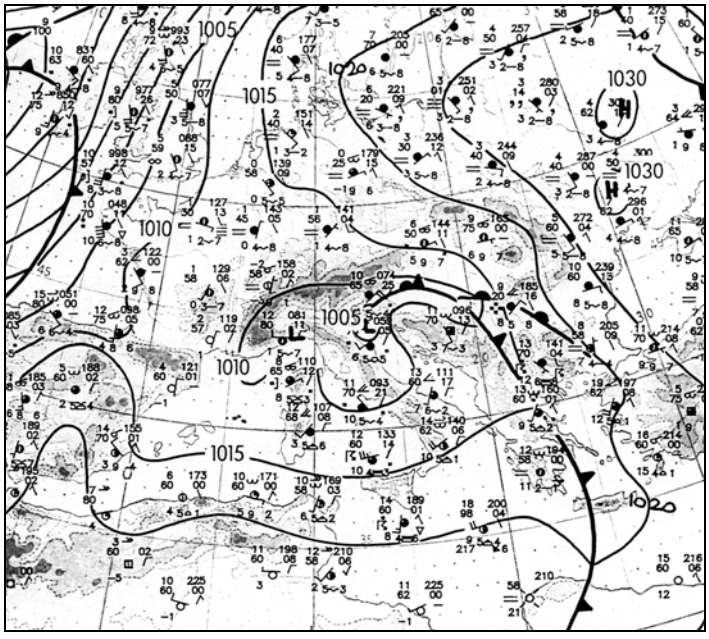




h. 12.00, Nov. 23, 1991



h. 12.00, Nov. 24, 1991



h. 12.00, Nov. 25, 1991

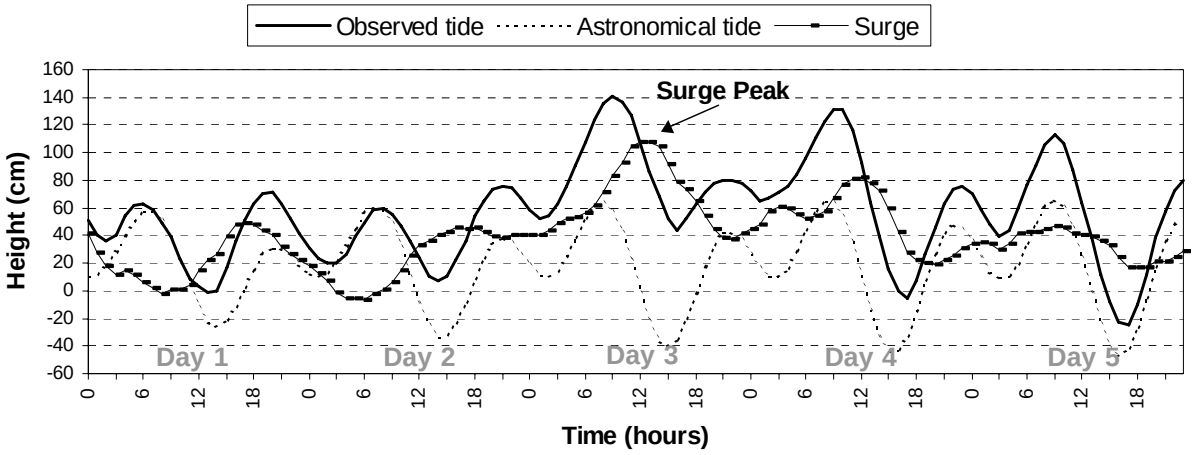
8 dicembre 1992

Il rialzo massimo (108 cm, ore 13) è quasi coinciso con una bassa marea (-22 cm) che ne ha fortemente attenuato l'effetto sulla marea osservata. Quattro ore prima, invece, al momento dell'alta marea astronomica, un rialzo di 83 cm è stato sufficiente per provocare un'acqua alta di 141 cm.
La sessa di 22 ore, già innescata da una precedente perturbazione meteorologica, raggiungeva un'escursione di circa 55 cm. Ad essa è venuta a sovrapporsi, l'8 dicembre, una leggera amplificazione della sessa di 11 ore. Le due si sono trovate in quasi concordanza di fase al momento del massimo rialzo, e poi di nuovo il 9 ed il 10 dicembre in ore vicine a quella dell'alta marea astronomica, causando due nuove acque alte (131 cm il 9 dicembre alle ore 9 e 10, e 113 cm il 10 dicembre, alle ore 9). Il residuo è rimasto superiore a 50 cm per 36 ore consecutive ed a 60 cm per 13 ore, raggiungendo un massimo di 71 cm al momento del massimo rialzo.
Un moderato gradiente di pressione atmosferica, che si era stabilito sull'Adriatico il 7 dicembre, è rimasto pressoché inalterato nei giorni seguenti, nonostante una forte oscillazione barometrica. Il minimo di pressione è coinciso col momento del massimo rialzo e del massimo residuo, in una situazione di "scontraura" (bora sull'alto Adriatico, con raffiche di ben 58 nodi a Trieste, e scirocco sul basso Adriatico). Le carte sinottiche indicano che un centro depressionario, proveniente dalle isole britanniche, si era installato sul mar Tirreno l'8 dicembre, ed un fronte occluso ad esso collegato si è rinforzato e diretto sull'Adriatico.

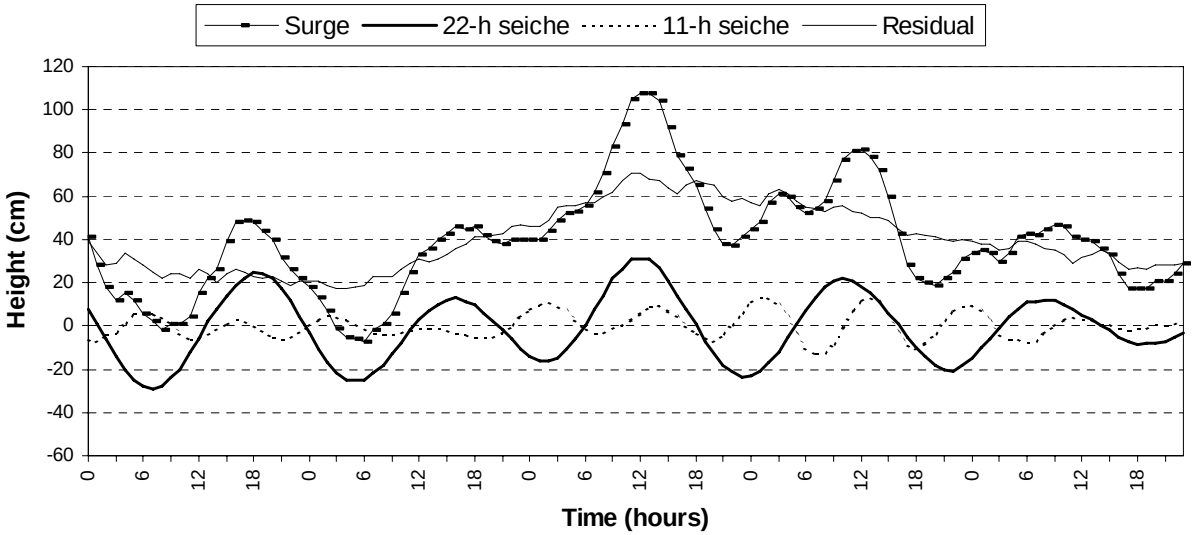
December 8, 1992

The maximum surge (108 cm at 1 PM) was approximately at the time of the minimum tide (-22 cm), so the effect was strongly attenuated in what concerns observed level. Four hours before, on the contrary, at the time of the maximum astronomical level, a surge contribution of 83 cm had been sufficient to give a remarkable flood of 141 cm.
The 22-hour seiche, already ignited by a preceding storm, reached a range of about 55 cm. On December 8 it merged with an 11-hour one, slightly amplified. At the time of the surge peak the two seiches turned to be almost in phase, and this occurred also on December 9 and 10, in hours close to the tidal maxima. This way two more floods were caused (131 cm on December 9 at 9.10 AM, and 113 cm on December 10, at 9 AM). The residual remained over 50 cm for 36 solid hours and over 60 for 13 hours, with a top of 71 cm at the time of the surge peak.
A moderate pressure gradient was established along the Adriatic on December 7, it remained almost stable for the following days, in spite of noticeable barometric oscillations. The pressure minimum coincided with the maximum surge and the maximum residual, in the frequent situation of "scontraura" (bora over the northern Adriatic, with 58-knot gusts in Trieste and sirocco over the south). The synoptic maps show that a low-pression center, originating over the British Isles, reached the Tyrrhenian Sea on December 8.
An occluded front, connected with it, was strengthen and moved over the Adriatic.

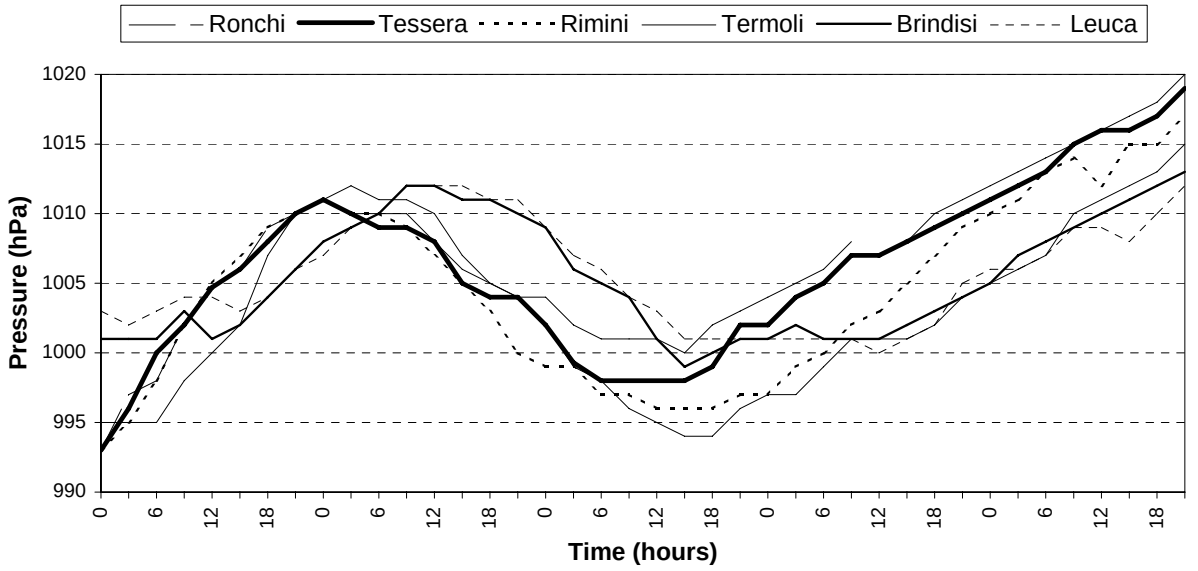
Tide and surge levels at Venice (PDS): 6-10 Dec. 1992



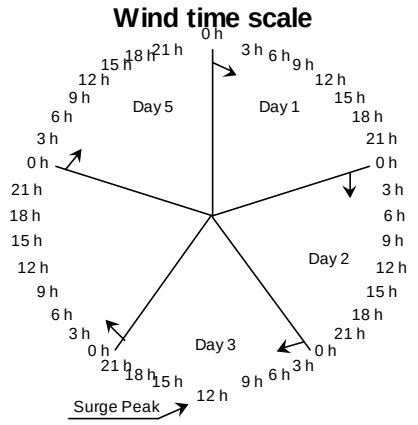
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 6-10 Dec. 1992



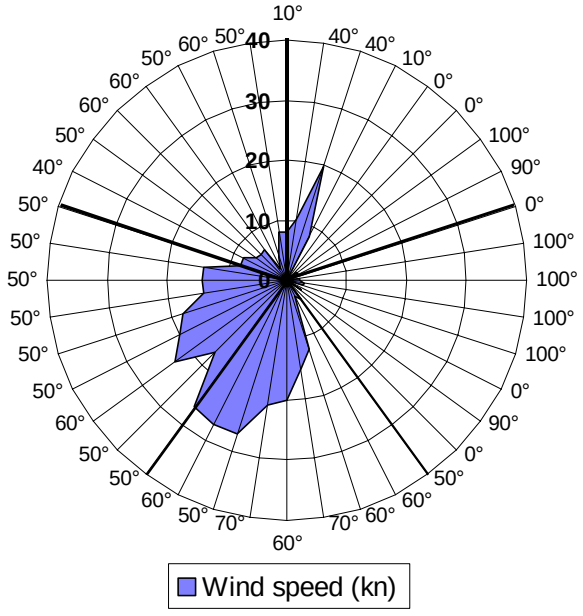
MSL air pressure: 6-10 Dec. 1992



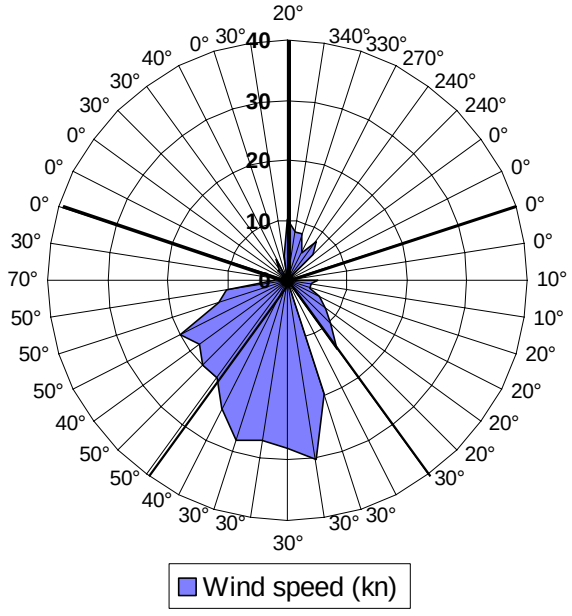
6-10 Dec. 1992



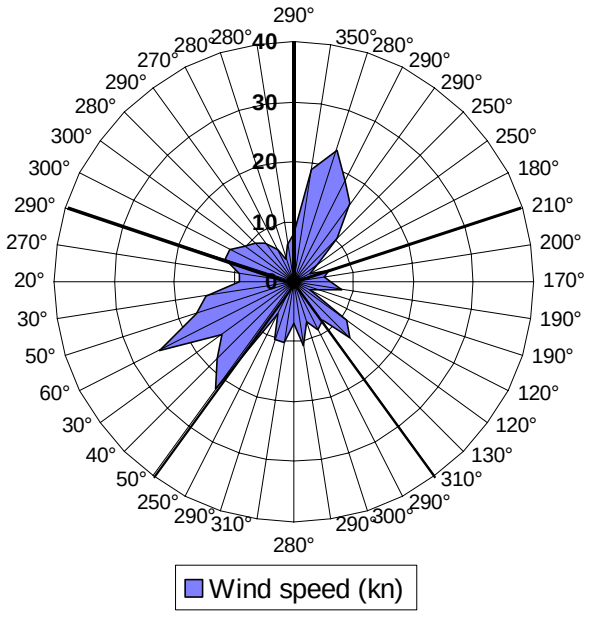
Trieste



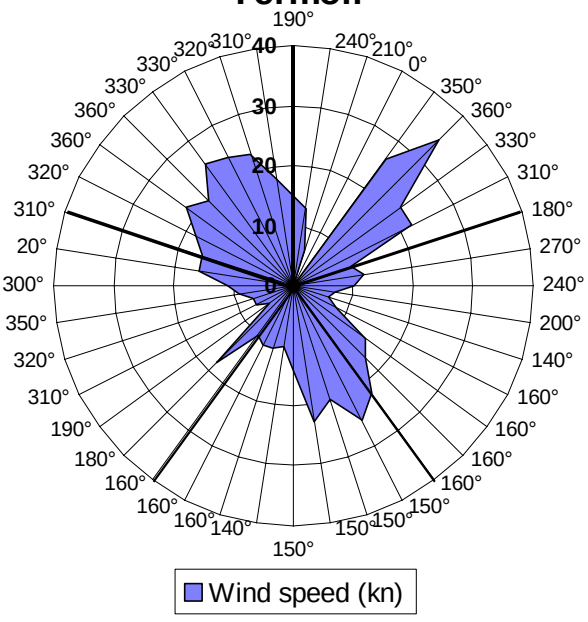
Tessera

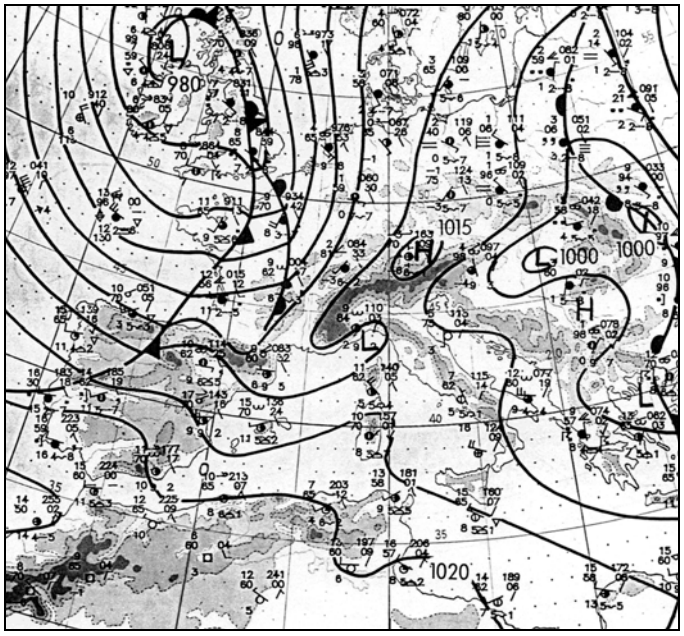


Rimini

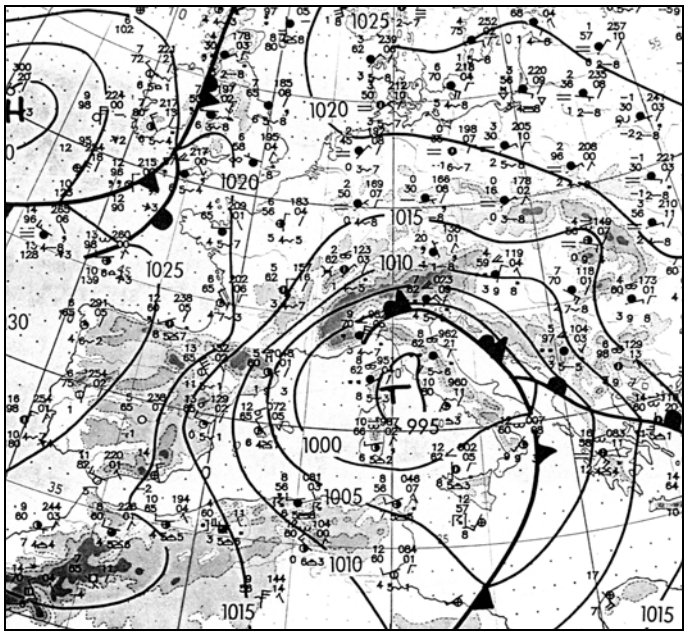


Termoli

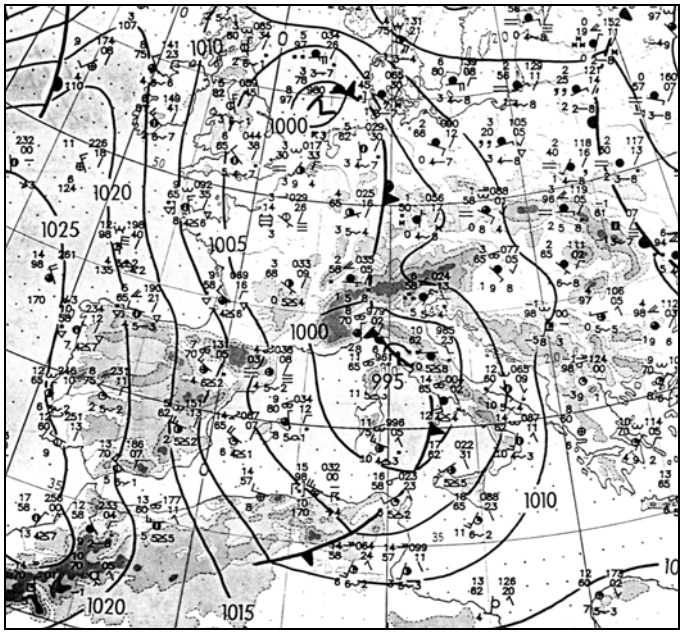




h. 0.00, Dec. 7, 1992



h. 0.00, Dec. 8, 1992



h. 0.00, Dec. 9, 1992

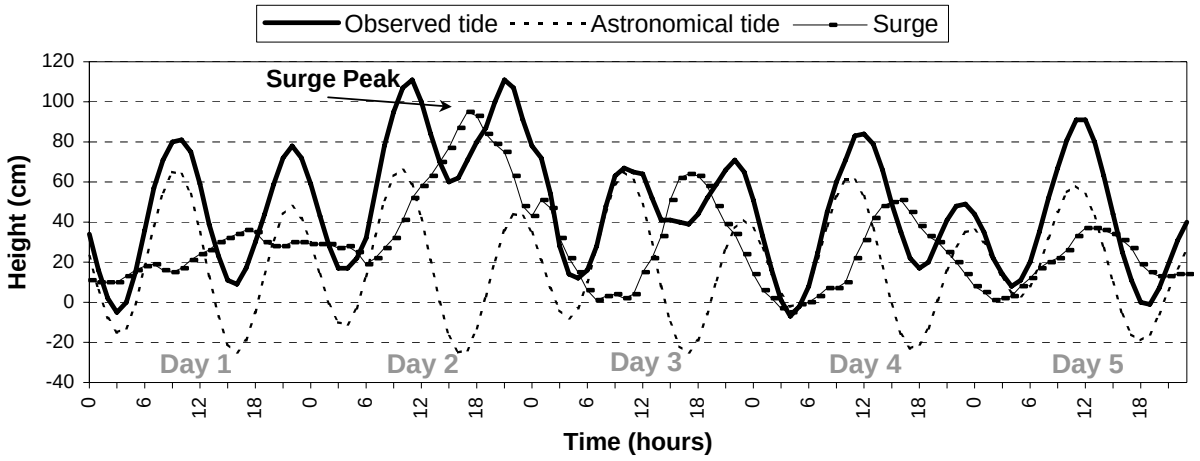
2 ottobre 1993

Il rialzo (95 cm, ore 18) cade pressoché, in fase con il minimo di marea astronomica più profondo (-24 cm, ore 17) del secondo giorno successivo al plenilunio, facendo registrate una marea osservata di modesta entità (71 cm, ore 18) nello stesso istante. Nonostante ciò si sono egualmente registrati due massimi, di 111 cm intorno alle ore 12 prima del massimo contributo e dopo di questo ancora con lo stesso valore alle ore 22.
La pressione atmosferica, attestata su tutto l'Adriatico tra 1016 e 1019 hPa il giorno precedente l'evento, subisce una caduta, in 36 ore, di circa 25 hPa a Venezia creando un gradiente barico tra alto e basso Adriatico di circa 15 hPa. A ciò si è associato lo sviluppo di moderati venti di scirocco intorno ai 20 nodi nell'alto e nel basso Adriatico con una attenuazione (circa 10 nodi) all'altezza di Rimini.
La sessa principale di 22 ore, che segue il rialzo, si smorza in modo progressivo dai poco più di 30 cm di ampiezza ai 10 cm tre giorni dopo l'evento, rimanendo fortunatamente sempre fuori fase rispetto ai massimi valori astronomici. La sessa di 11 ore oscilla intorno al valore zero con un'ampiezza di pochi centimetri. Il residuo raggiunge un massimo di oltre 50 cm in corrispondenza al massimo rialzo e scende in circa 24 ore ai 20 cm.
Le carte meteorologiche mostrano il giorno precedente il massimo rialzo la formazione di un minimo depressionario (980 hPa) a nord ovest delle isole britanniche che si sposta in direzione sud est invadendo il Mediterraneo con la sua parte meridionale, favorendo così venti meridionali su Jonio e Adriatico.

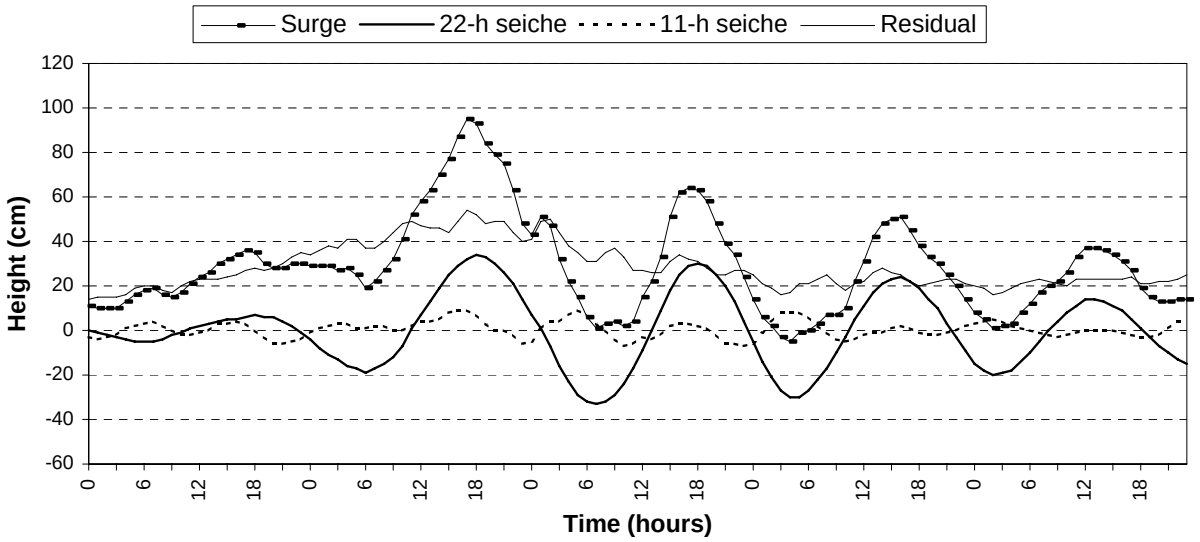
October 2, 1993

The surge (95 cm at 6 PM) is approximately in phase with the deepest minimum of astronomical tide of the second day following the full moon (-24 cm at 5 PM). For this reason, the observed level is not impressive at all (71 cm at 6 PM). Nevertheless, two maxima have been recorded, 111 cm around noon, before the surge peak, and the same level at 10 PM.
The atmospheric pressure was rather flat over all the Adriatic, the day before the event, between 1016 and 1019 hPa. It drops, in 36 hours, of about 25 hPa at Venice, determining a gradient along the sea of about 15 hPa. To this fact, sirocco winds of about 20 knots are added both in the northern and the southern part, attenuated only in Rimini (about 10 knots).
The main 22-hour seiche following the surge dissipates progressively from an initial amplitude slightly over 30 cm to 10 cm three days later, out of phase anyway with respect to the astronomical maxima. The 11-hour seiche oscillates around zero with a few centimeters of amplitude. The residual reaches a maximum over 50 cm at the time of the surge peak and decreases to 20 cm in 24 hours.
The weather maps show, the day preceding the maximum of the surge, the birth of a low-pressure center (980 hPa) NW of the British Isles, moving SE and invading the Mediterranean with its southernmost part, favoring this way southerly winds over the Ionian and the Adriatic Seas.

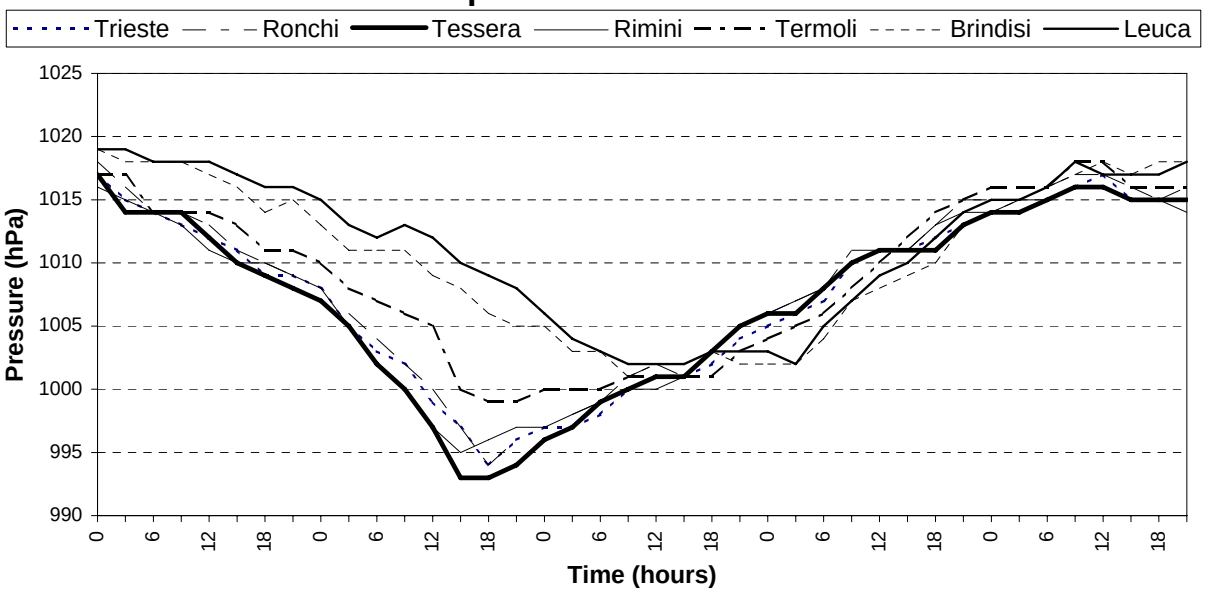
Tide and surge levels at Venice (PDS): 1-5 Oct. 1993



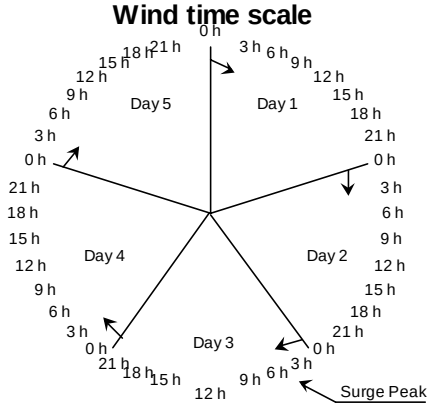
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 1-5 Oct. 1993



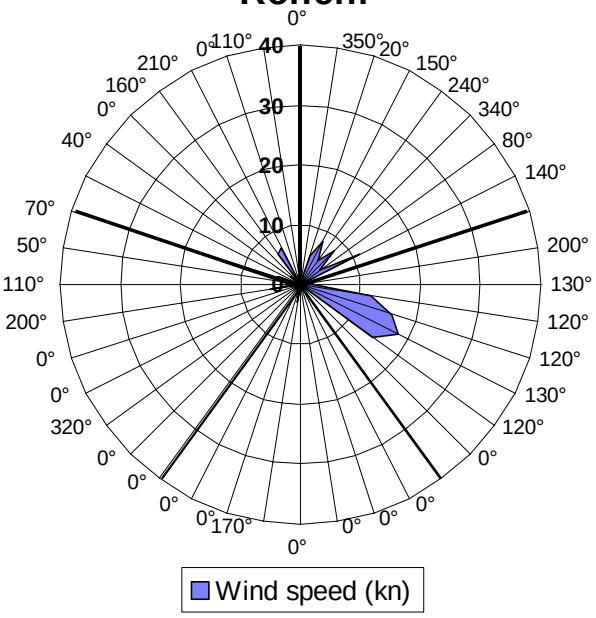
MSL air pressure: 1-5 Oct. 1993



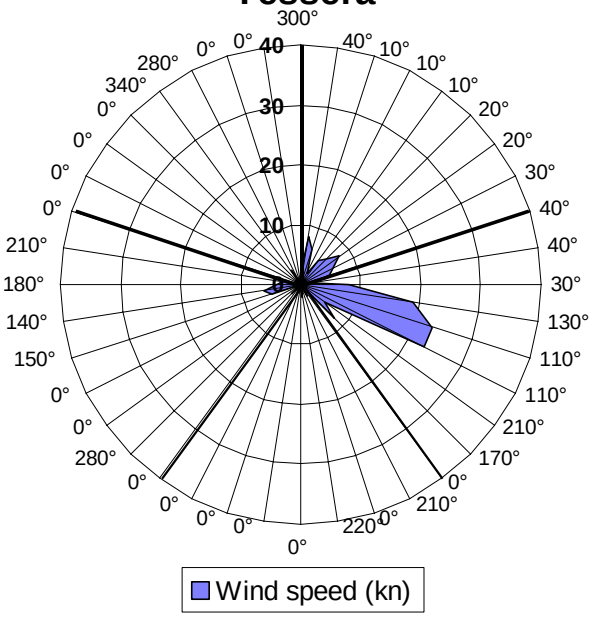
1-5 Oct. 1993



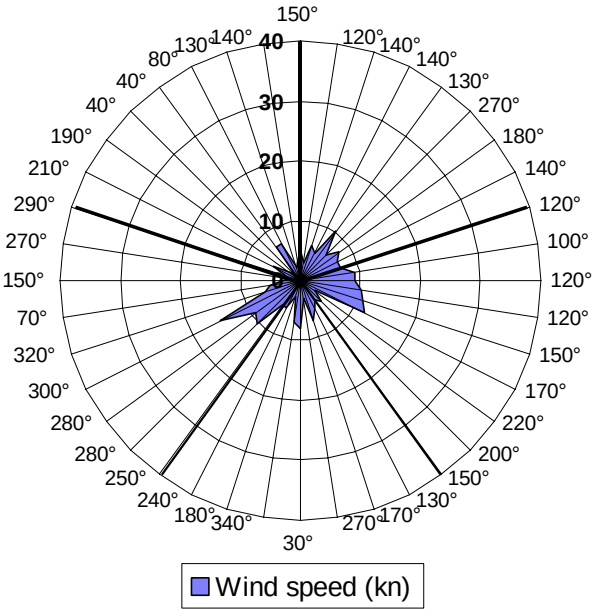
Ronchi



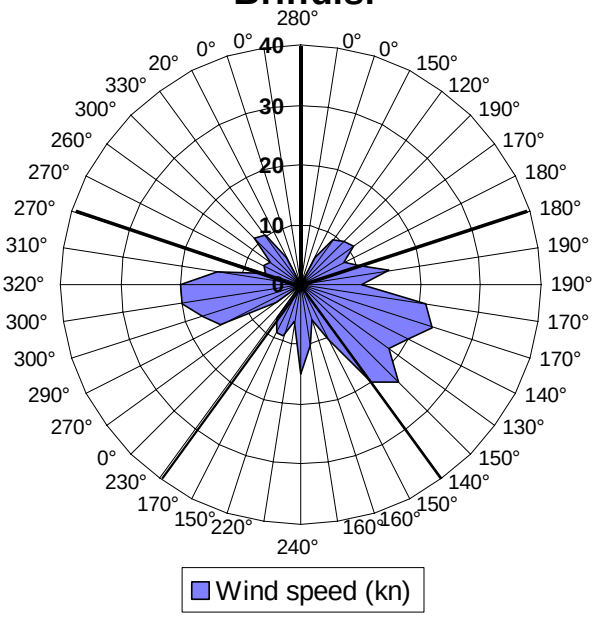
Tessera

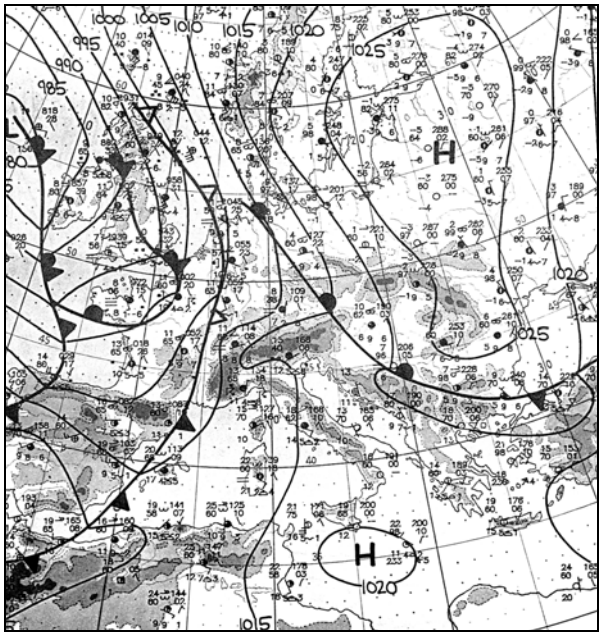


Rimini

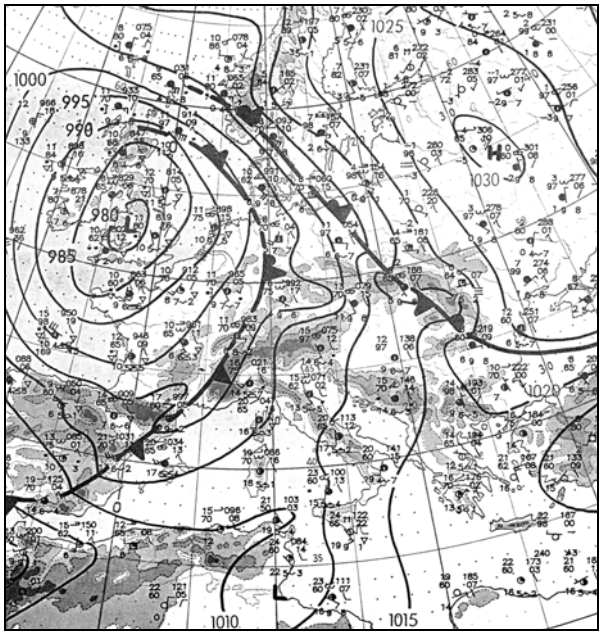


Brindisi

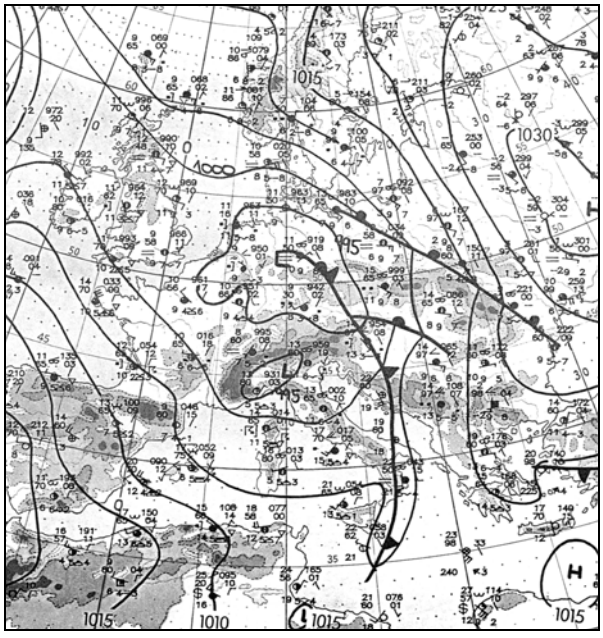




h. 0.00, Oct. 1, 1993



h. 0.00, Oct. 2, 1993



h. 0.00, Oct. 3, 1993

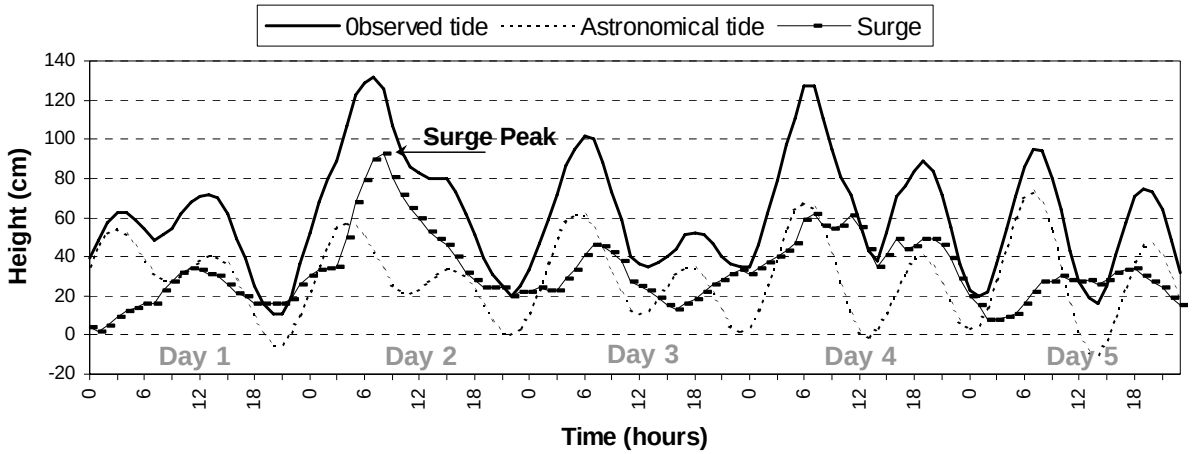
18 novembre 1996

In questo caso il rialzo (93 cm, ore 8) risulta essere sfasato di più di tre ore rispetto alla massima marea astronomica (50 cm ore 6) ma è egualmente sufficiente a far registrare un evento di alta marea pari a 126 cm. L'ora prima, comunque, la marea aveva raggiunto i 132 cm ma con un contributo meteo di "soli" 90 cm. La permanenza della quota del mare sopra la soglia di allarme (110 cm) è stata di circa cinque ore.
La pressione, che il giorno prima dell'evento segnava circa 1018 hPa in tutto l'Adriatico, ha un crollo di quasi 20 punti nell'alto Adriatico (Tessera, Rimini e Trieste), generando un gradiente non indifferente con il basso Adriatico in quanto a Leuca la pressione si mantiene sopra i 1010 hPa, a Bari è intorno ai 1007 e a Termoli appena sotto i 1004. Dopo una sua risalita (il giorno dopo) che praticamente annulla i gradienti nel medio-alto Adriatico e dimezza quello con Leuca, la pressione crolla di nuovo paurosamente il 20 novembre, facendo registrare un nuovo gradiente tra alto Adriatico e Leuca che questa volta supera i 20 hPa. Questo genera un nuovo evento di acqua alta (128 cm, ore 8.40) con un contributo meteo di 70 cm.
Durante questo periodo i venti sono stati praticamente nulli nell'alto Adriatico eccetto una punta intorno all'ora dell'evento (a Tessera 27 nodi di vento di scirocco). Nel basso Adriatico invece si è osservato un vento fisso da scirocco con punte fino ai 20 nodi durante il mattino del 18, per poi girare verso il terzo quadrante per rimanerci, con velocità che oscillano tra i zero e i 20 nodi, fino al 21 novembre.
I ritorni delle sesse sono di entità modesta, in quanto quella di 22 ore raggiunge una punta massima di 10 cm alle 6 del 19 novembre, mentre quella di 11 ore ha un massimo di 7 cm alle 19 del giorno dell'evento. Il residuo, invece, misura un valore di 53 cm e nei giorni successivi non scende mai sotto i 24 cm e torna a superare i 40 cm il 19 novembre.
Il giorno prima dell'evento si osserva una depressione sulle coste mediterranee della Spagna che si sposta verso nord-est passando sopra le coste francesi andando ad esaurirsi nel nord Italia. Si era all'interno di un'annata particolarmente fitta di rialzi e conseguenti inondazioni (Canestrelli, 1997).

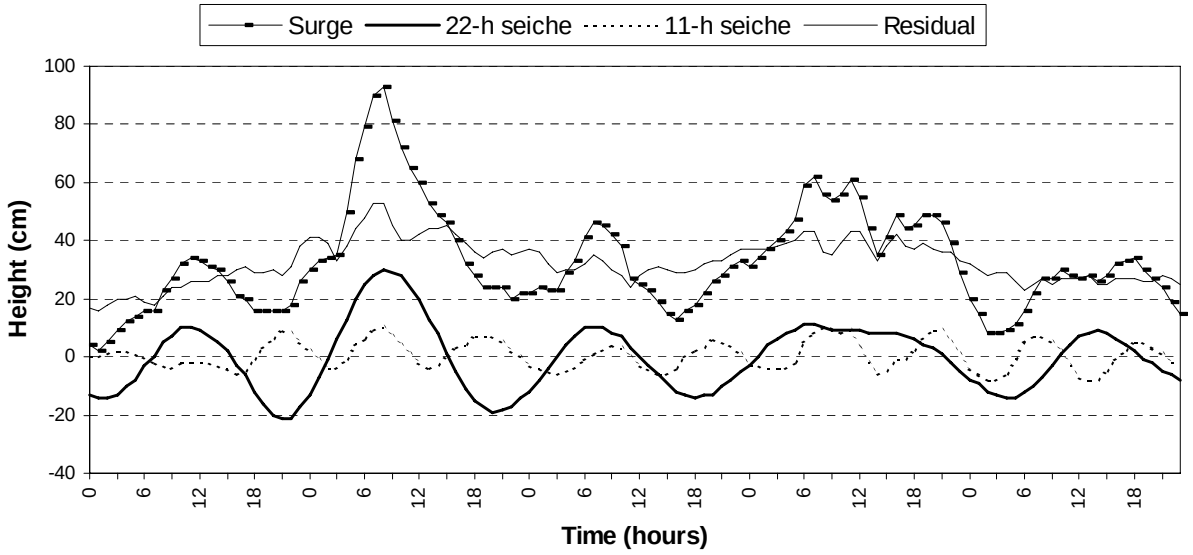
November 18, 1996

In this case the setup (reaching 93 cm at 8 AM) is out of phase by more than three hours with respect to the astronomical maximum (50 cm at 6 AM), but it is sufficient for a flood of 126 cm. An hour before, anyway, the level had been 132 cm, with a meteorological contribution of "only" 90 cm.
Water remained over the alarm threshold (110 cm) for about five hours.
The pressure, that the day before the event had been at 1018 hPa over the whole Adriatic, dropped by about 20 units in the north (Tessera, Rimini and Trieste), generating a remarkable gradient with the southern part, since at Leuca it remained over 1010 hPa, in Bari about 1007, in Termoli just lower than 1004.
The following day a pressure rise almost cancels the gradients in the northern and central areas, and halves the difference with Leuca. Then a new, impressive drop occurs on November 20, with south-north difference, this time, over 20 hPa.
This generates a new flood (128 cm, at 8.40 AM), with a surge share of 70 cm.
During this period, wind was not practically existing in the northern Adriatic, except a sirocco spike at the time of the event (27 knots in Tessera).
Instead, in the south a permanent sirocco was observed, reaching 20 knots in the morning of November 18, turning then from the third quadrant through November 21, with speed varying from zero to 20 knots.
Seiche returns were modest, since the main one reached 10 cm at 6 AM, November 19, and the 11-hour seiche has a maximum of 7 cm at 7 PM the day of the event. Instead, the residual has a value of 53 cm and in the days that follow never goes under 24 cm and surpasses again 40 cm on November 19.
The day before the event a depression is observed on the Mediterranean coasts of Spain, moving NE, passing over the French coast and ending over northern Italy.
It is not surprising that this year turned out to be particularly rich of surges and floods (Canestrelli, 1997).

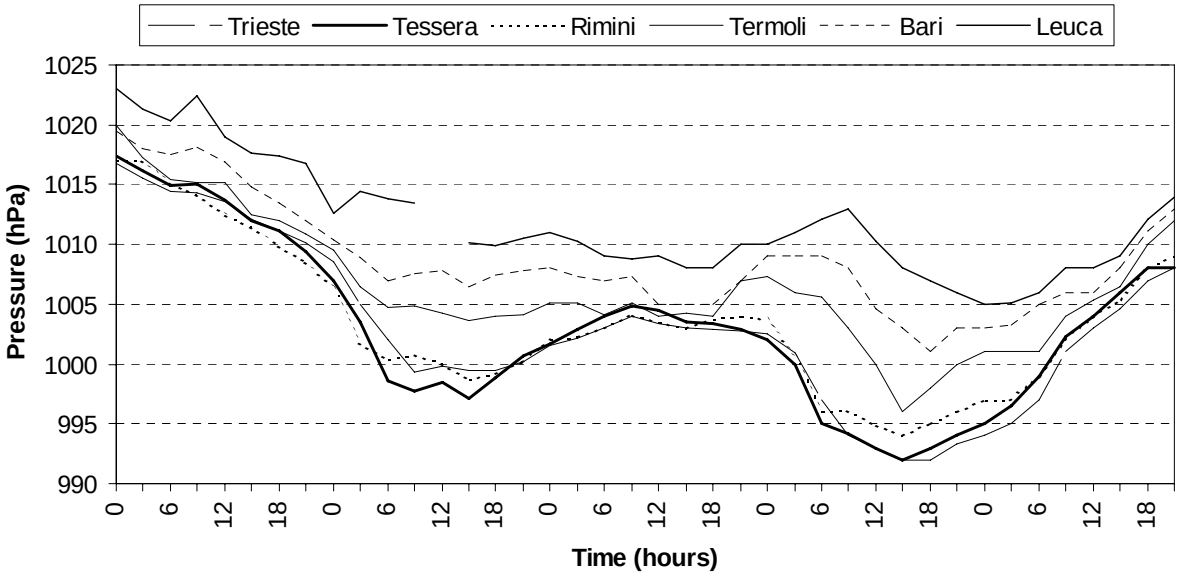
Tide and surge levels at Venice (PDS): 17-21 Nov. 1996



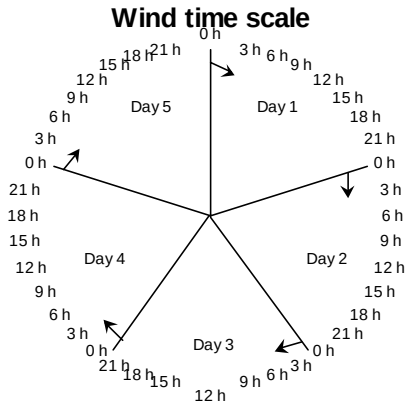
Surge and seiche levels at Venice (PDS): 17-21 Nov. 1996



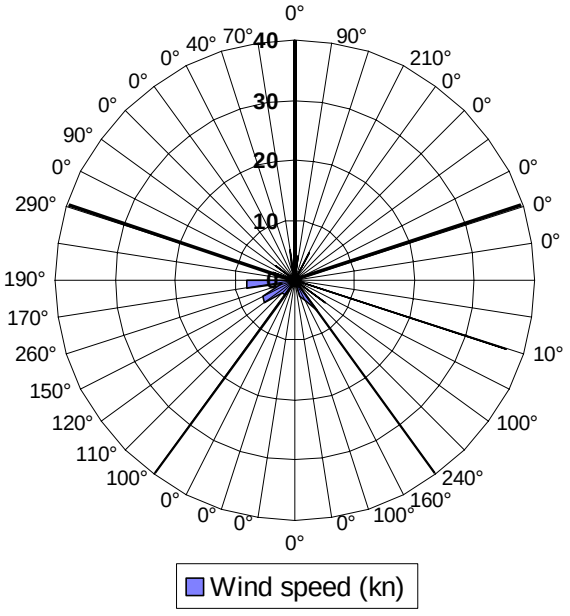
MSL air pressure: 17-21 Nov. 1996



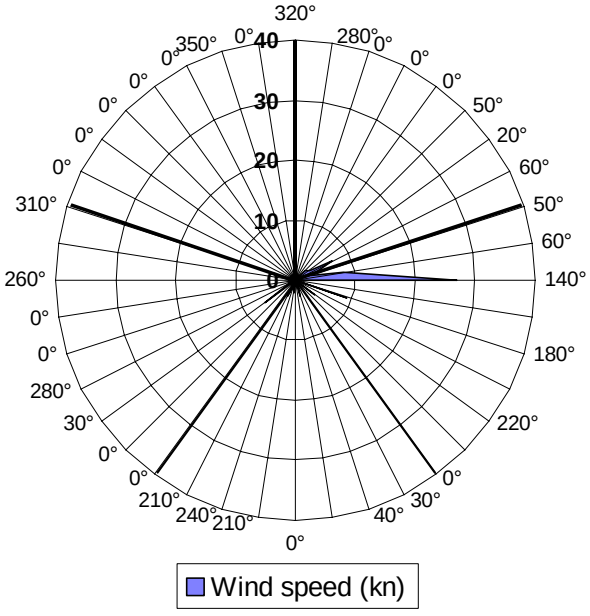
17-21 Nov. 1996



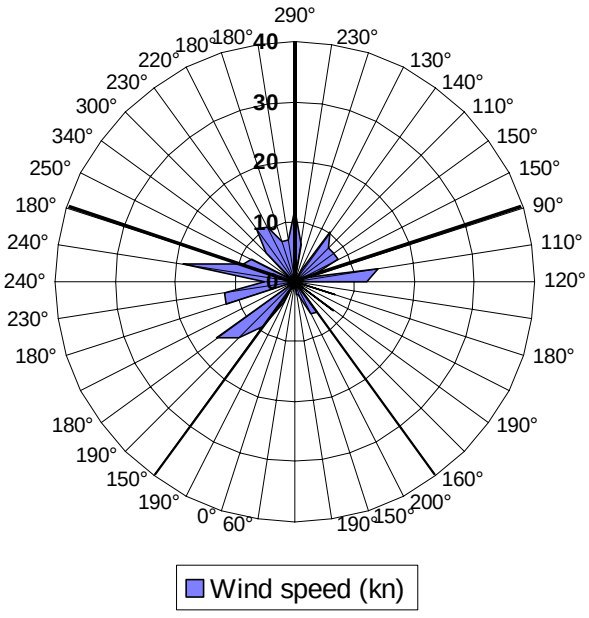
Trieste



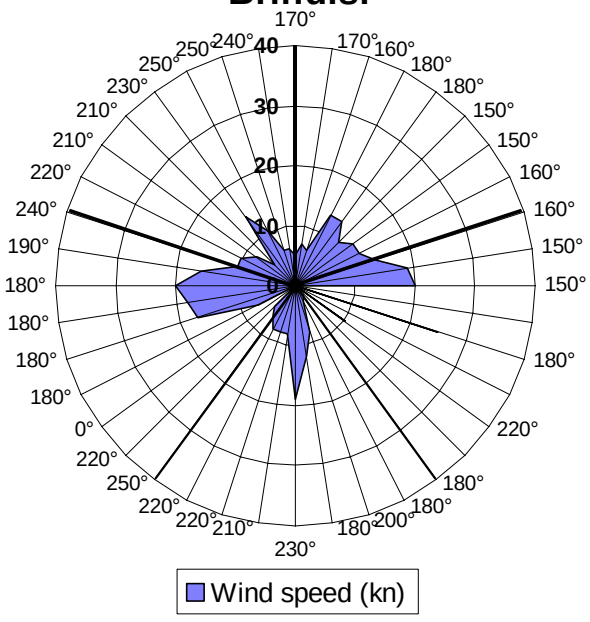
Tessera

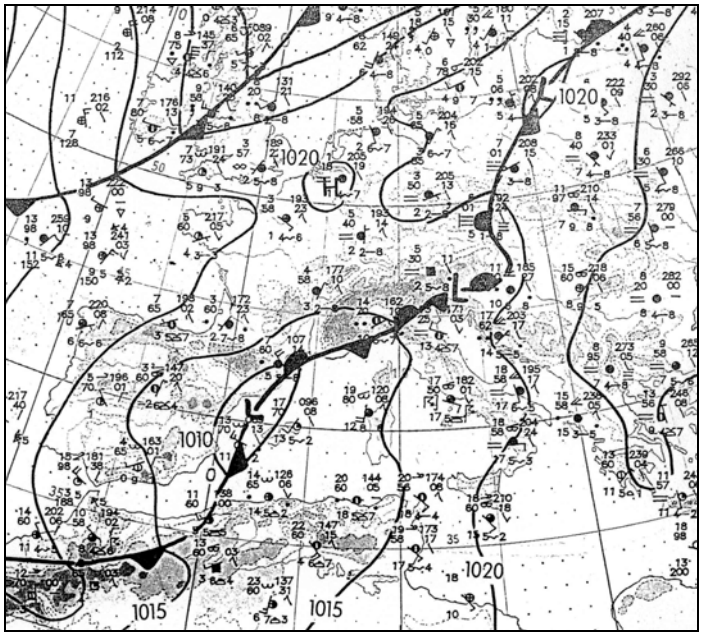


Rimini

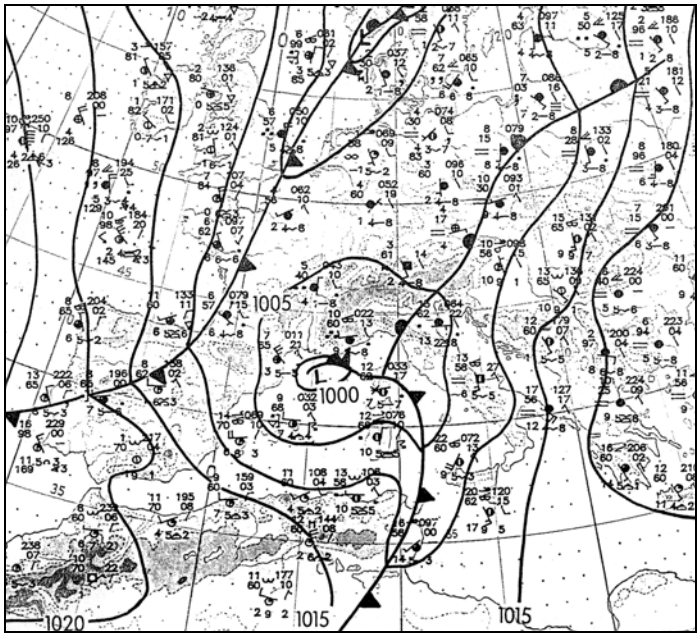


Brindisi

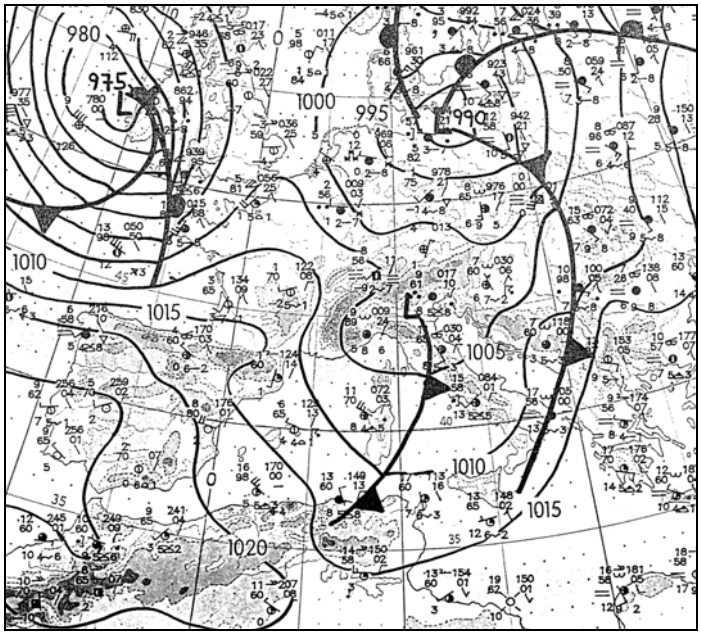




h. 0.00, Nov. 17, 1996



h. 0.00, Nov. 18, 1996



h. 0.00, Nov. 19, 1996

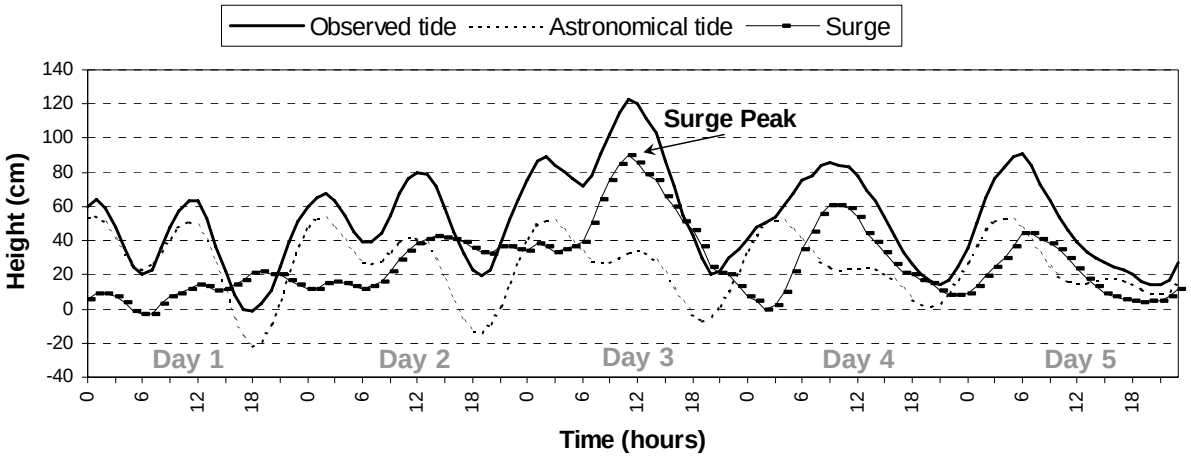
20 dicembre 1997

Il sovralzo più elevato (90 cm, ore 11) è stato registrato quasi in coincidenza con il massimo relativo di marea astronomica (33 cm, ore 12), fortunatamente di modesta entità in quanto la situazione astronomica era prossima all'ultimo quarto di luna (morto d'acqua). Il contributo meteo porta comunque il valore della marea osservata a 123 cm. La permanenza della marea sopra il livello di 110 cm è stata di 3 ore e 45 min.
La pressione atmosferica sull'Adriatico era pressoché livellata intorno ai 1025 hPa a circa 48 ore di anticipo sul livello massimo di marea registrato.
Successivamente si è instaurato un gradiente barico, tra le estremità dell'Adriatico, crescente con il passare del tempo. Si instaura conseguentemente un moderato vento di scirocco dapprima soltanto nel basso Adriatico e, via via che aumenta il gradiente barico, anche nel medio Adriatico. A Venezia il vento rimane pressoché proveniente dalla stessa direzione all'interno del primo quadrante con una velocità non superiore ai 10 nodi.
Nell'Adriatico le velocità del vento più elevate si sono registrate a Leuca e a Brindisi, con valori superiori ai 20 nodi fin dalla tarda serata del giorno precedente. Nel medio Adriatico si registravano contemporaneamente valori del vento intorno ai 14-16 nodi, di provenienza da secondo quadrante, con prevalenza da sud - est.
Le sesse che seguono i rialzi si presentano di entità modesta (23 cm di ampiezza quella di 22 ore, pochi centimetri per quella di 11 ore e un residuo intorno ai 50 cm) e si smorzano regolarmente nei giorni successivi ma, 48 ore dopo, esse sono in fase con la marea astronomica portando la marea osservata ad un valore di oltre 90 cm.
Due giorni prima dell'evento le carte meteorologiche mostrano una profonda depressione ad ovest delle isole britanniche che successivamente allunga una sua propaggine meridionale verso il mar Tirreno. Si forma così sul golfo di Biscaglia una cellula depressionaria minore con un minimo intorno ai 1000 hPa il giorno dell'evento. Nel frattempo la circolazione su Jonio e Adriatico è nettamente meridionale.

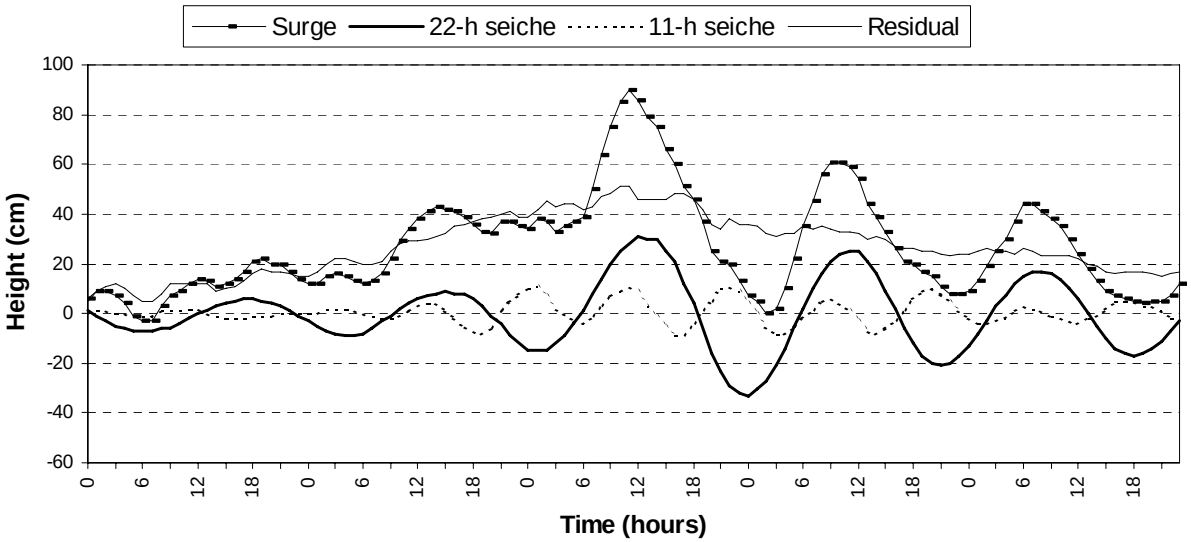
December 20, 1997

The surge peak (90 cm at 11 AM) was recorded almost coinciding with a feeble maximum tide (33 cm, at midday). Good for Venice, the astronomical situation was favourable, being close to the last quarter of Moon (neap tide). The flood is obtained anyway, with 123 cm. For 3 hours and 45 minutes water remained over 110 cm.
Approximately two days before the event, the atmospheric pressure over the Adriatic was almost equalised around 1025 hPa. Later, a pressure gradient between the ends of the Adriatic took place, growing with time. A moderate sirocco blows, first in the southern Adriatic, then also in the central part, as long as the gradient grows. In Venice, wind remains from the first quadrant, with speeds never exceeding 10 knots.
The maximum wind speeds on the Adriatic were recorded at Leuca and Brindisi, with values over 20 knots since the last hours of the previous day. In the central Adriatic there were velocities around 14-16 knots, mostly from the second quadrant and mostly south-east.
The seiches that follow the surges appear modest, with an amplitude of 23 cm for the 22-hour one, a few centimetres for the secondary one and a residual around 50 cm. The oscillations damp regularly in the days that follow, but, 48 hours later, they are in phase with the astronomical tide and bring the observed level over 90 cm.
Two days before the event the maps show a deep depression west of the British Isles, that later develops a southern prong towards the Tyrrhenian Sea. As a consequence, over the Gulf of Lions a depressionary cell forms, with a minimum around 1000 hPa, the day of the maximum surge. In the same time, the circulation over the Ionian and Adriatic Seas is definitely oriented from the south.

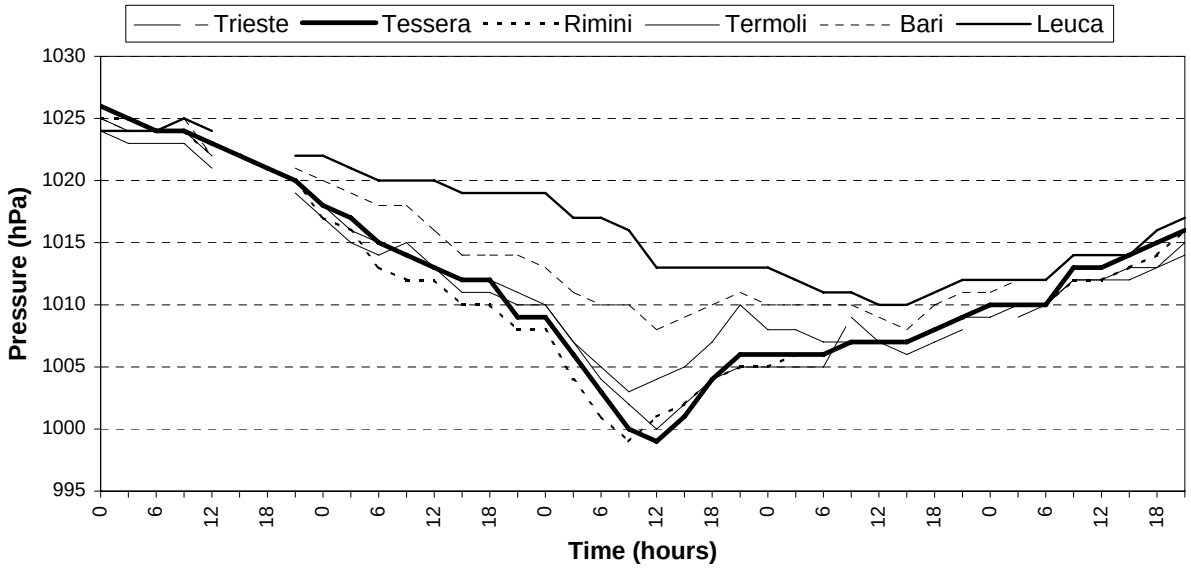
Tide and surge levels at Venice (PDS): 18-22 Dec. 1997



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 18-22 Dec. 1997

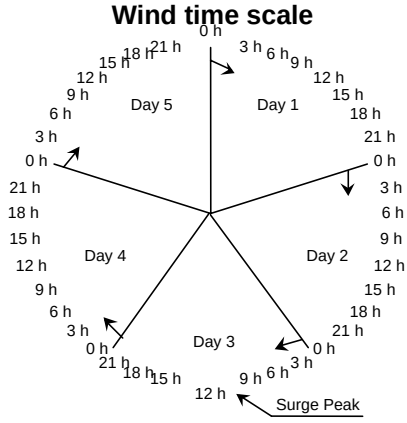


MSL air pressure (18-22 Dec. 1997)

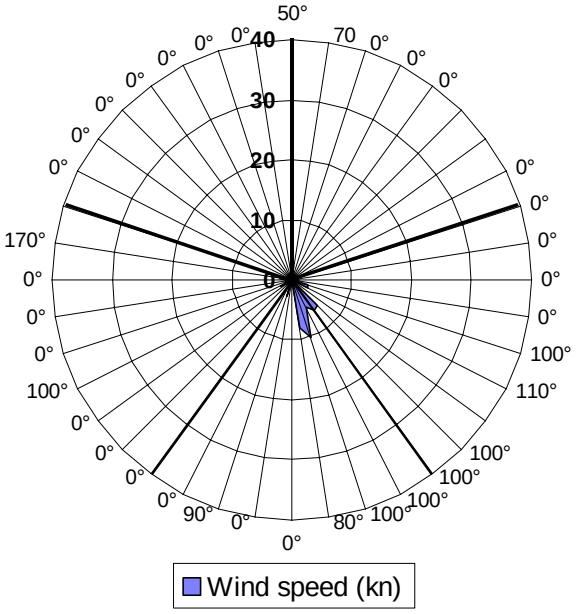


18-22 Dec. 1997

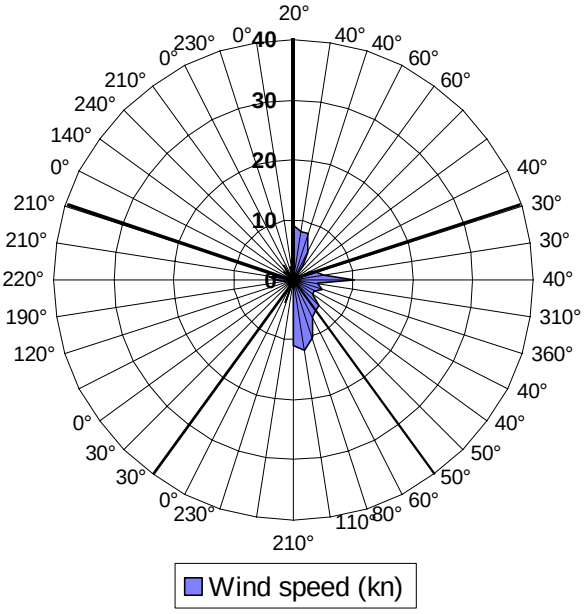
Wind time scale



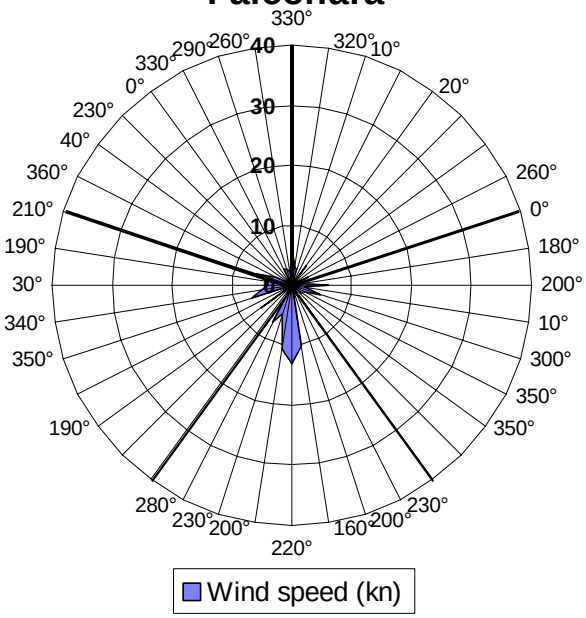
Trieste



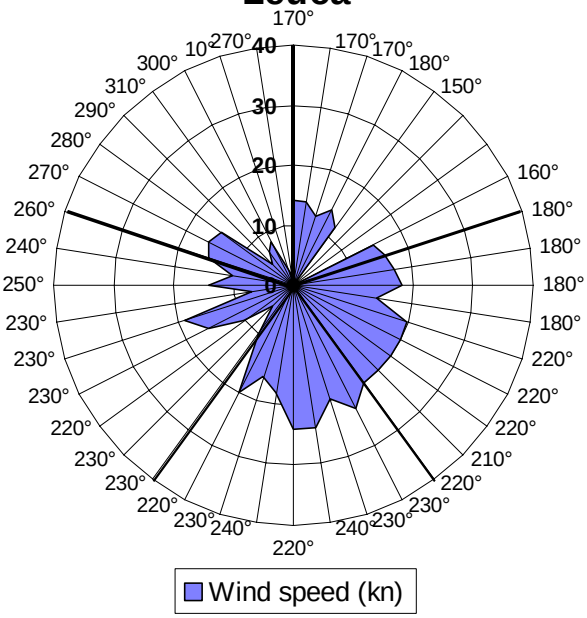
Tessera

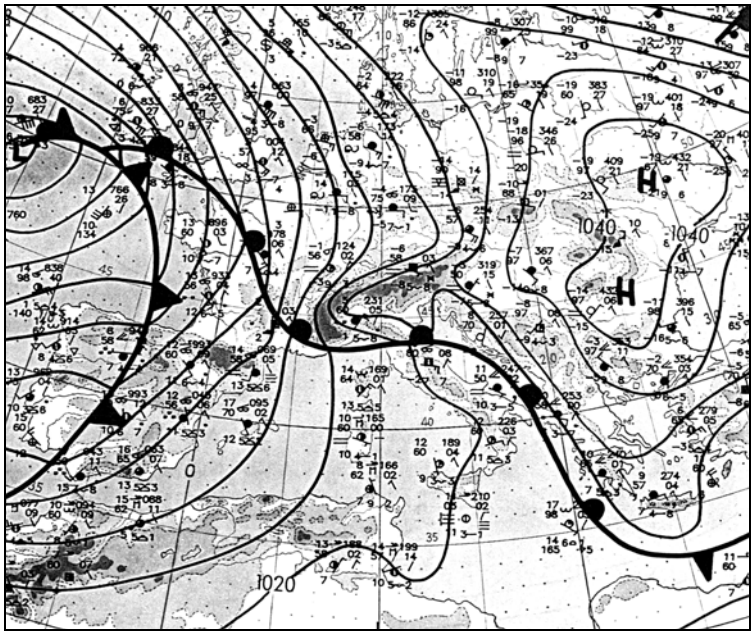


Falconara

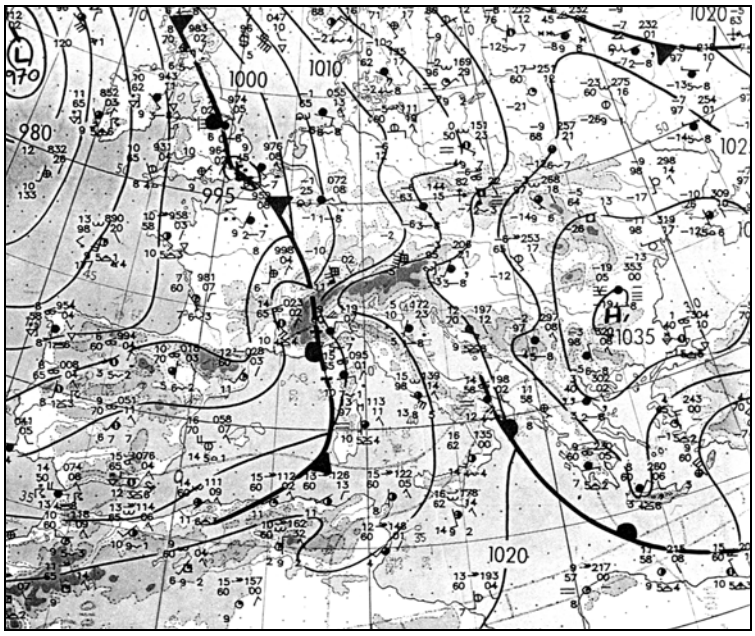


Leuca

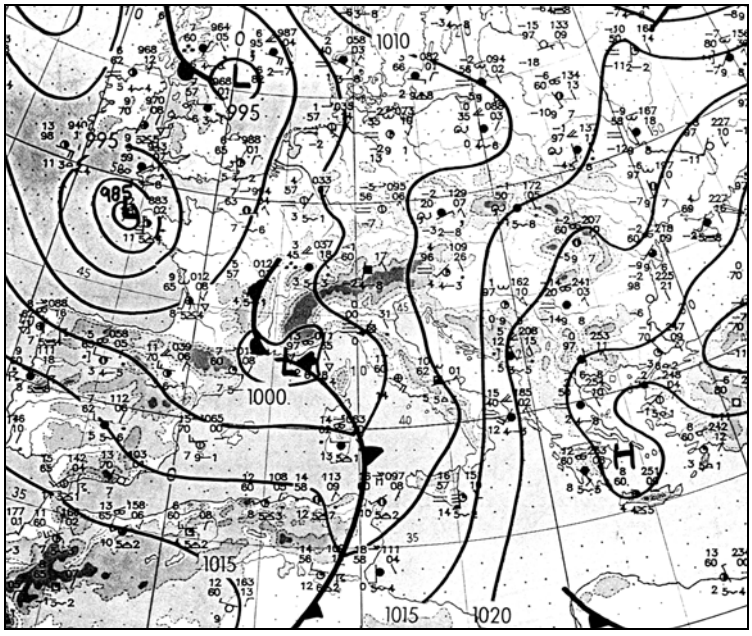




h. 0.00, Dec. 18, 1997



h. 0.00, Dec. 19, 1997



h. 0.00, Dec. 20, 1997

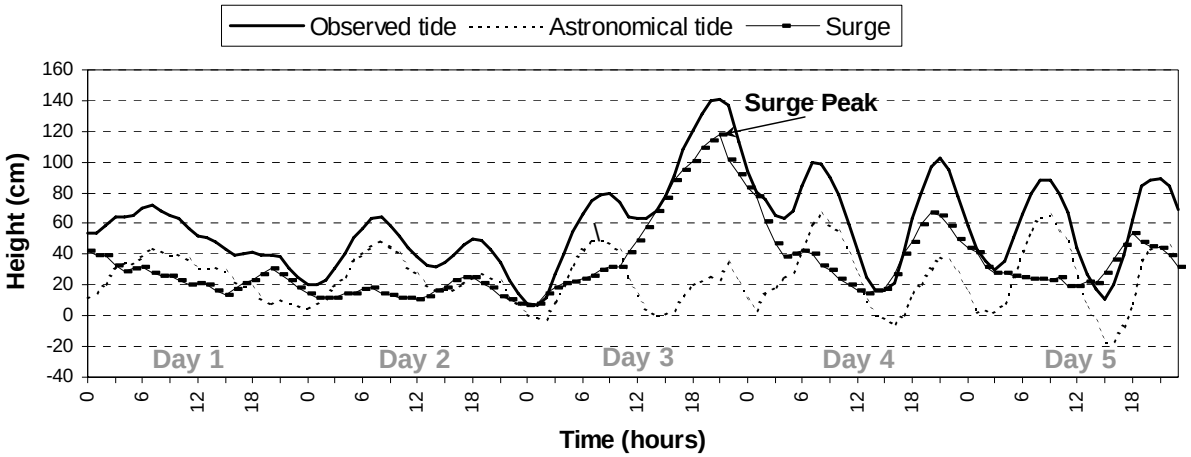
6 novembre 2000

Un caso molto severo per Venezia, con il livello (osservato) di 144 cm, che non è da primato ma che non si vedeva da 14 anni. Il rialzo, 118 cm alle 21, è stato molto acuminato, per così dire, ma il gioco, con una pur debole marea di quadratura, ha dato luogo ad una fastidiosa permanenza dell'acqua sopra i 100 cm di oltre sette ore.
Al solito, un'ondata così netta è stata seguita da oscillazioni di sessa, principalmente di 22 ore, ma ben visibili anche sulle alte frequenze (si osservi il residuo). Il rialzo partiva da valori trascurabili, all'inizio del 6 novembre, essendo già stati smaltiti gli effetti di precedenti forzature (si veda l'inizio del grafico delle pressioni).
Vediamo finalmente le cause meteorologiche: l'evoluzione del tempo mostra un punto di depressione all'altezza del canale della Manica (le carte dei giorni precedenti lo mostrerebbero già lì da un pezzo) e dei sistemi frontali che viaggiano verso oriente facendo perno su di esso.
Si può vedere un piccolo fronte caldo, seguito da uno freddo ed esteso. Al di là delle Alpi i due fronti si raggiungono e creano un fronte occluso, mentre la parte meridionale mantiene la propria natura. Altre registrazioni riportano, a Venezia, un violento temporale all'ora del passaggio (tardo pomeriggio), e questo è coerente con la natura di un fronte freddo. Proprio l'avanzata di questo fronte è la causa di tutto: la pressione a Venezia cade di 27 hPa in 24 ore, creando un forte gradiente tra nord e sud. Ancora più grave è il vento, massimo a Venezia (si osservi la scala delle velocità) con direzioni meridionali, tale da creare difficoltà alla navigazione lagunare nei tratti esposti. È inutile rilevare la breve durata di questo vento, in accordo con il picco ristretto del conseguente rialzo.

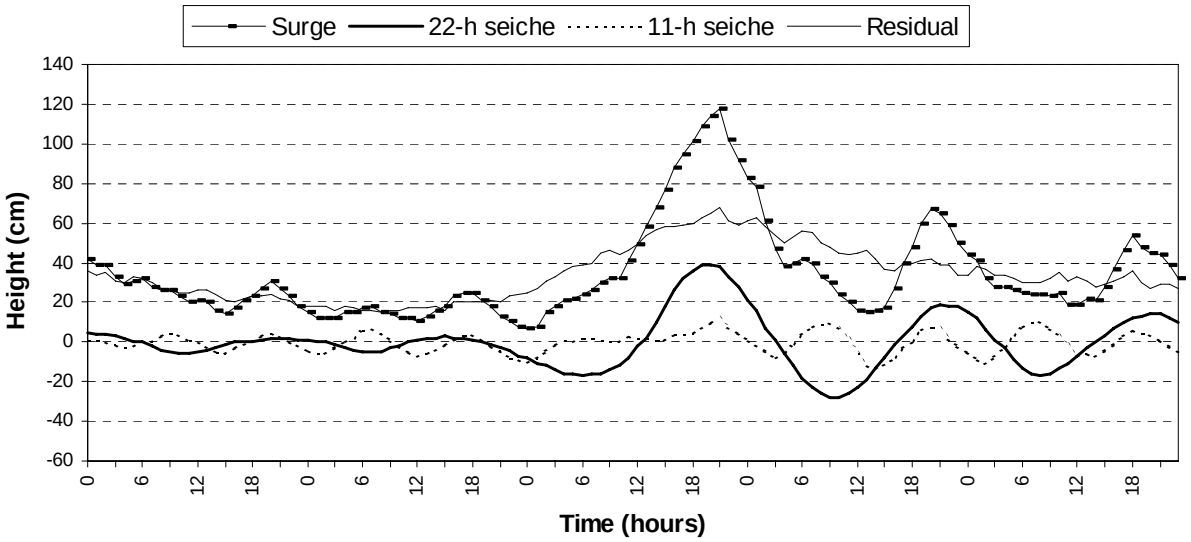
November 6, 2000

This case was quite severe for Venice, with an observed level of 144 cm, which is not a leading one, but never seen in the last 14 years. The surge onset (118 cm at 9 PM) looks pulse-like, but the interplay with neaptide, though feeble, gave origin to a troublesome permanence of water over 100 cm for more than seven hours.
As usual, such a sharp surge left after strong seiche oscillations, mainly of 22-hour period, but easily revealed also on the other frequencies (the residual should be observed). The surge started, at the beginning of November 6, from values close to zero, since the effect of previous forcings had already been cancelled (consider the first part of the pressure graph).
Looking at the meteorological causes, one sees a low-pressure center close to the English Channel (and the maps of the previous days would show it there since a certain time). Also, some fronts travelling eastwards using the above depression as pivot.
One can see a small warm front, followed by another one, cold and quite long. Beyond the Alps the two fronts merge and give an occluded one, while the southern part keeps its original aspects.
Other records mention, in Venice, a strong thunderstorm, late in the afternoon, consistent with the arrival of a cold front.
The progress of this front is the cause of the phenomena: the pressure in Venice drops by 27 hPa in 24 hours, determining a strong difference with the south.
Wind causes even more concern, with maximum figures at Venice (the scale of the velocities should be considered), coming generally from south: it created difficulties to ship traffic in the open lagoon.
The short duration of the wind storm is obviously consistent with the sharpness of the surge.

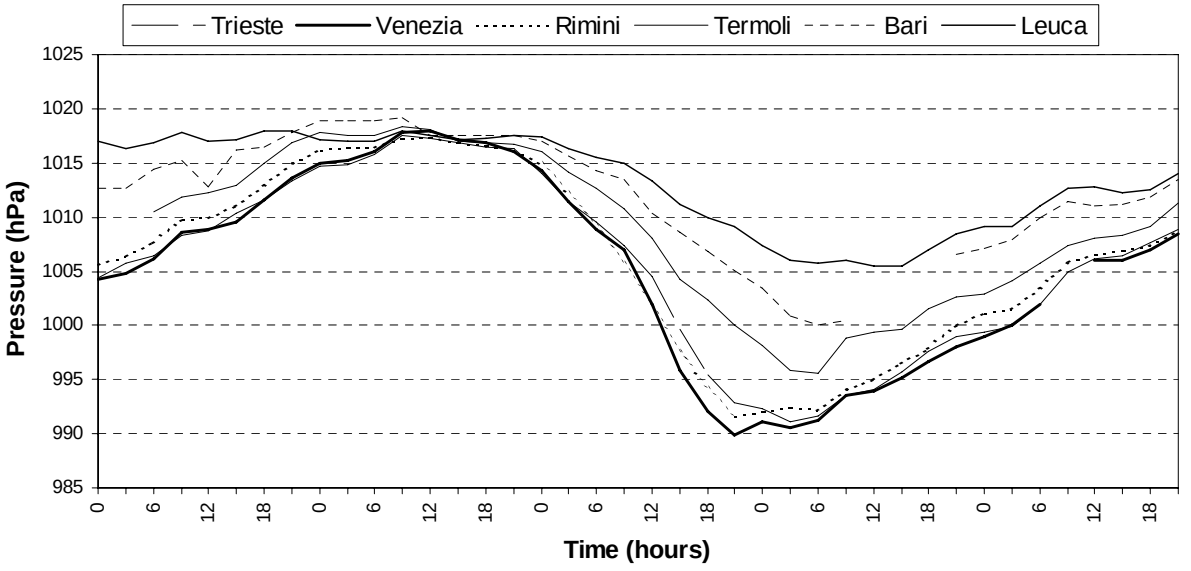
Tide and surge levels at Venice (PDS): 4-8 Nov. 2000



Surge and seiche levels at Venice (PDS): 4-8 Nov. 2000

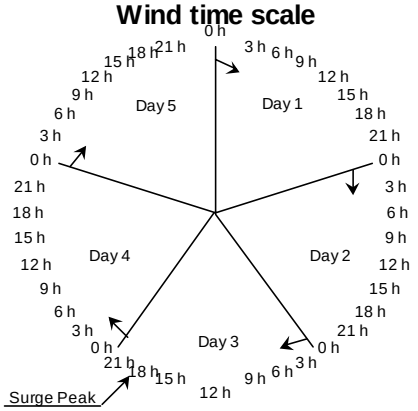


MSL air pressure (4-8 Nov. 2000)

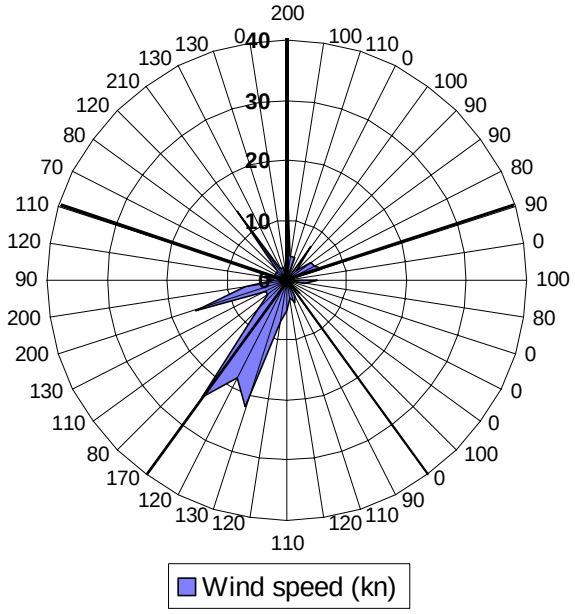


4-8 Nov. 2000

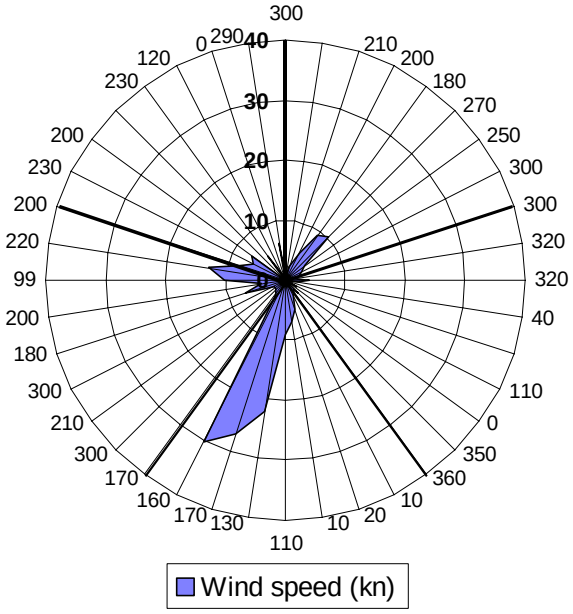
Wind time scale



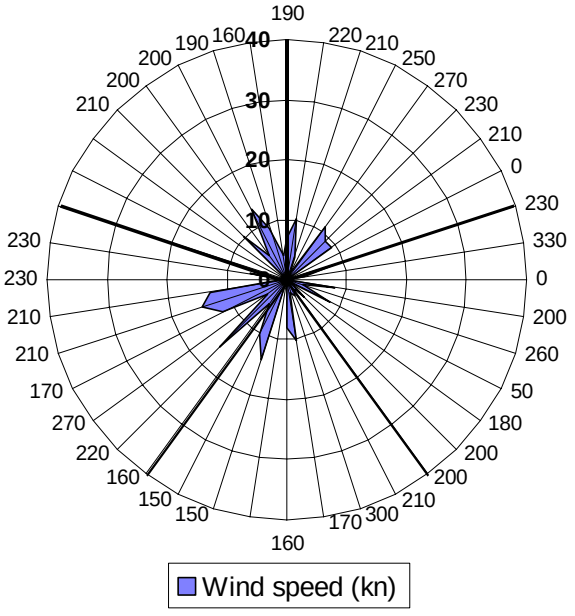
Trieste



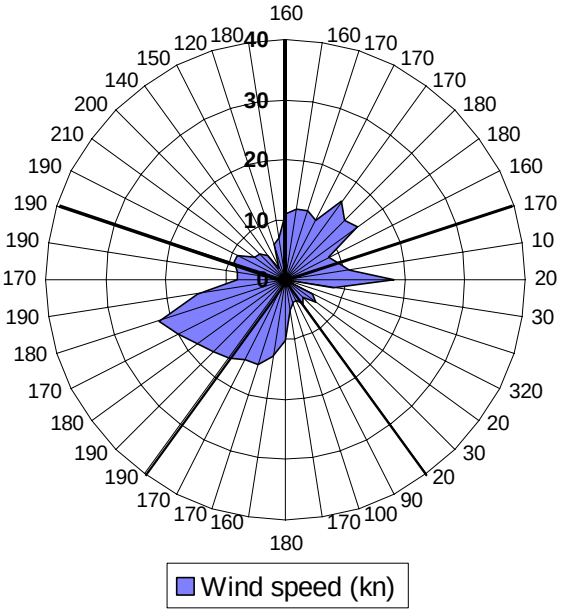
Venezia

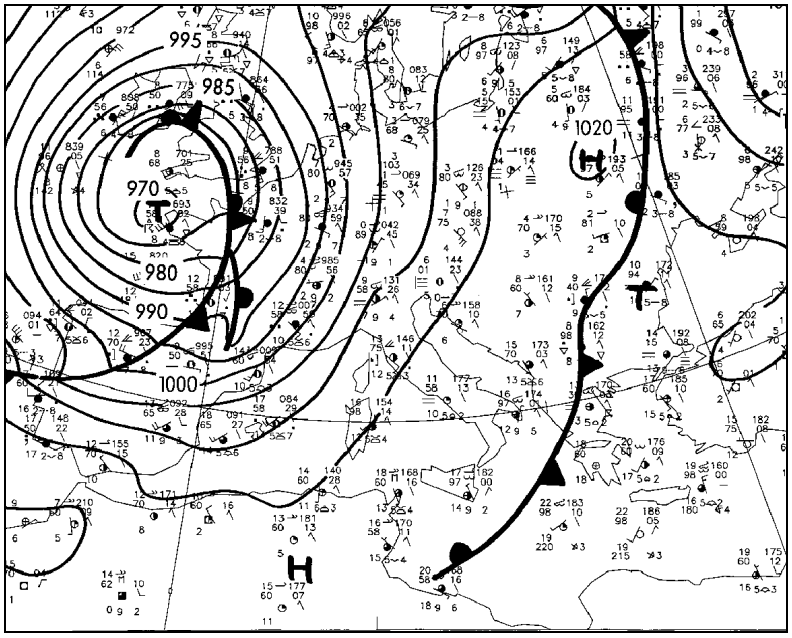


Falconara

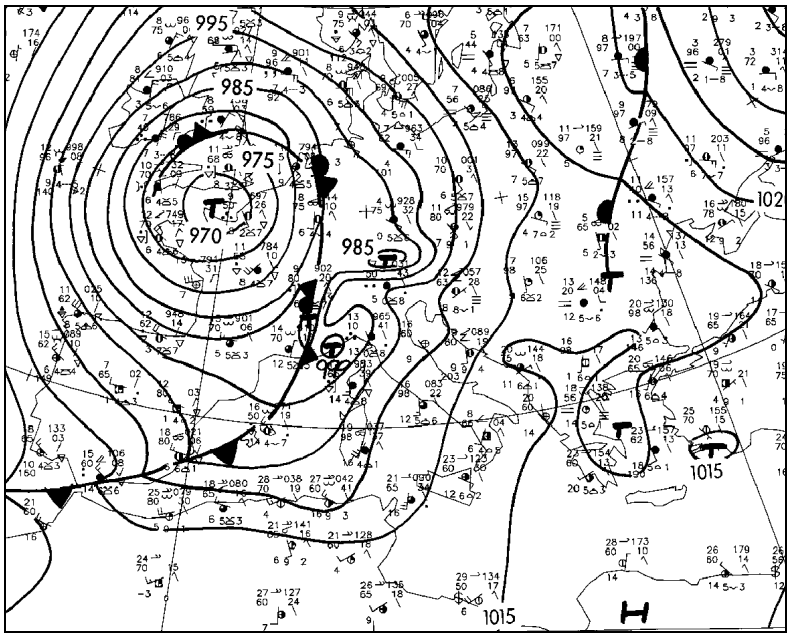


Leuca

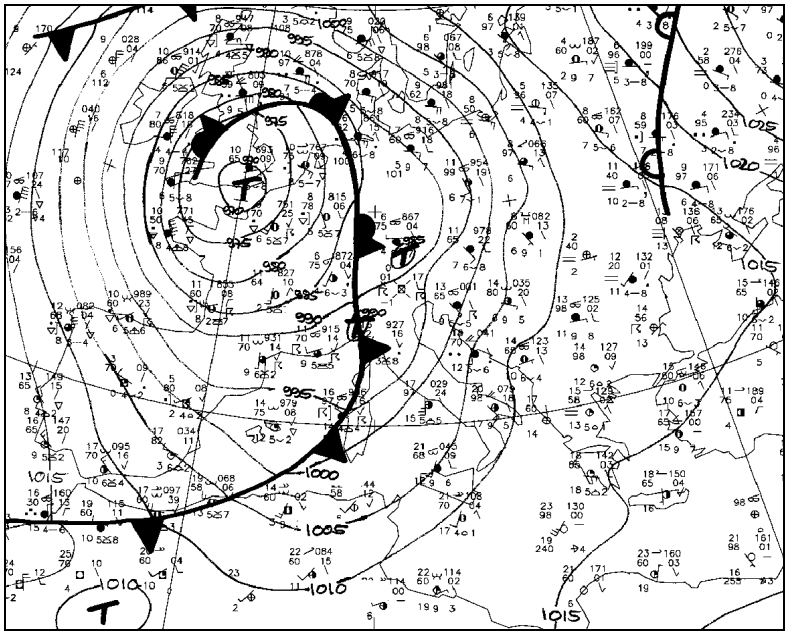




h. 0.00, Nov. 6, 2000



h. 12.00, Nov. 6, 2000



h. 18.00, Nov. 6, 2000

Conclusioni

Riprendendo i concetti iniziali, il fatto di avere selezionato i rialzi marini a Venezia, riferendosi di volta in volta al livello annuo ed eliminando la parte astronomica, fornisce un criterio scientificamente oculato per indagare su mezzo secolo di mareografia.
È ormai evidente che il realizzarsi di un'inondazione a Venezia e negli altri centri lagunari dipende in modo casuale dal maggiore o minore accordo tra la marea astronomica (regolarissima) e il rialzo meteorologico (che, forse ingiustamente, chiamiamo casuale).
Analizziamo dunque i rischi pratici che ne derivano.
I rialzi sono, come si è già accennato, un fenomeno nettamente autunnale (essenzialmente tra ottobre e dicembre, con quasi la metà dei casi in novembre), ma rialzi di almeno 90 cm si sono prodotti occasionalmente (due casi su 23) anche in febbraio.
In numerosi casi i momenti di massimo rialzo non coincidono con quelli di un'alta marea astronomica sostenuta, il che attenua gli effetti potenziali di allagamento causato dalla perturbazione meteorologica.
Ma si tratta di casi fortunati ed è comunque necessario rendersi conto del rischio che si è corso. Per esempio, se il massimo rialzo del novembre 1966 fosse avvenuto in corrispondenza ad un'alta marea di sizigia, invece che al momento di una marea calante di quadratura, l'acqua alta registrata (+194 cm) avrebbe potuto essere ancora più alta di alcuni decimetri.
Un altro fattore importante è la durata della perturbazione, che aumenta la probabilità che vari fattori negativi possano addizionare i loro effetti.
Con l'eccezione dei casi del novembre 1977 e dell'ottobre 1982, il residuo (ossia il rialzo medio, senza tener conto delle oscillazioni delle sesse) raggiunge sempre almeno 50 cm (con un massimo di 112 cm nel novembre 1966) e può rimanere al disopra di questa quota anche durante qualche decina di ore consecutive (41 ore nel novembre 1966, 36 ore nel dicembre 1992). Ciò aumenta le probabilità che gli effetti di una perturbazione meteorologica coincidano con un'alta marea astronomica sostenuta, aggravando gli effetti dell'allagamento.
Quanto alla permanenza dei livelli di marea osservati al disopra della quota critica di +110 cm rispetto allo zero del 1897, si può osservare che essa supera in più casi la durata di sei o sette ore, ossia del tempo che intercorre, normalmente, tra una bassa ed un'alta marea astronomica. In questi casi, soprattutto se ci si trova in periodo di sizigia, aumenta il rischio di un allagamento importante.
Una domanda cruciale, stante la preoccupazione per le pratiche conseguenze di questi rialzi, riguarda la tendenza del fenomeno, temendo una possibile accelerazione.

Conclusions

Returning to the introductory conceptions, we recall the selection adopted for the anomalous water levels in Venice.
Since, the for each case, the yearly mean has been used for reference by including it in the astronomical part, which had been separated, a reliable criterion is available for the analysis of fifty years of hydrography.
It is clear that a flood occurrence in Venice (and in neighboring centers) has a random dependence on the relative timing of the tide (which is regular) and the surge (that we assume random).
The practical risks deriving from this must be considered.
Surges, as it has been pointed out, are a typical phenomenon of autumn (between October and December, with almost one half of the cases in November), but events of at least 90 cm have been observed (two out of 23) also in February.
In many cases the surge peak does not coincide with a strong high tide, and this damps the potential flooding effects of a meteorological perturbation.
But being lucky cannot nullify our concern for risk. For example, should the surge of November 1966 have occurred at the time of a spring tide, instead of an ebb neap tide, the recorded level (194 cm) could have been higher by dozens of centimeters.
Another important element is the duration of the perturbation, which can increase the probability that unpleasant factors can add their effects.
Except for the cases of November 1977 and October 1982, the residual (i.e. the average surge, eliminating the seiche oscillations) always reaches at least 50 cm (with a maximum of 112 cm in November 1966) and can remain over this level continually for dozens of hours (41 hours in 1966, 36 in December 1992). This increases the probability that the effects of a meteorological perturbation coincide with a very high flood tide, producing substantial damage.
Considering the permanence of the observed level over the critical 110 cm (using the 1897 Datum), it exceeds in many cases six or seven hours, which is the time usually separating the ordinary high and low extremes. In these cases, particularly corresponding to spring tide, the risk of a dangerous flood is increased.
A vital question, due to the concern for the practical consequences of the surges, is the trend of the phenomenon, keeping in mind the possible increase of it.

Se si guarda dunque la frequenza, si nota che i cinque decenni che coprono il periodo ricevono i seguenti numeri: quattro casi ciascuno i primi tre, poi cinque casi, poi sei. Aumento nel tempo? Chiunque conosca la statistica rileva che i numeri sono troppo piccoli per confermare questa conclusione.
Se, all'interno di ogni decennio, si calcola l'altezza media dei rialzi (che, ripetiamo, sono tutti non minori di 90 cm), si ha una sequenza piuttosto casuale (in cm): 98,5 - 114,25 - 102,25 - 105,4 - 100,66.
Tornando alle frequenze, si trova che, raggruppando in modi vari gli eventi considerati, si ottiene sempre una tendenza all'aumento nel tempo. Infatti, il modo più sbrigativo per avere numeri ricchi, e quindi statisticamente più stabili, è quello di dividere in due parti uguali il cinquantennio, e si ottengono così otto casi nella prima metà contro i quindici della seconda. Se si preferisce dire così, i primi trent'anni (1951-80) hanno lo stesso numero di casi dei successivi vent'anni (1981-2000).
Ancora, sospettando l'influenza dei cicli solari di undici anni (cui si attribuiscono effetti climatici) si possono prendere solo quattro periodi di tale lunghezza (1953-63, 1964-74,...) e si lasciano perdere così il primo e l'ultimo caso. Si ottengono allora delle frequenze (3, 4, 6 e 7) la cui successione, anche se sempre con numeri piccoli, porta ancora nel senso della crescita temporale. Si può ricordare che ciò è in accordo con l'osservato aumento del vento di scirocco sul medio Adriatico, che ha chiaramente incrementato la frequenza dei rialzi di almeno 10 cm e di quelli di almeno 20 cm, soprattutto in mare aperto (Pirazzoli e Tomasin, 1999) ed è stimolo agli studi attualmente rivolti all'evoluzione della "burrascosità" (storminess).
Coerentemente con una precedente osservazione, se si controlla l'altezza media dei rialzi nei vari periodi, si ottiene ad esempio, nella partizione in venticinque e venticinque anni, 106,4 e 102,7 cm: va sempre osservato che il valore fuori classe del 1966 rende sempre dominante il periodo in cui cade.
Altre considerazioni riassuntive riguardano la presenza di venti di bora nettamente presenti almeno nelle ore che precedono il rialzo massimo: se ne possono isolare sette casi (su 23 in totale) con altri quattro male definiti, e nel complesso nessuna tendenza evolutiva.
Il più ripido fronte di salita dei rialzi è quello del primo caso considerato (novembre 1951) con una crescita media di oltre 17 cm per ora su tutta l'impennata. Si è accennato (più esattamente, per la marea osservata) che in questo caso, come in vari altri caratterizzati da un impulso meteorologico rapido, un aumento delle resistenze idrauliche nelle bocche di porto potrebbe tranciare la cuspide della marea, come recentemente dimostrato da Umgiesser (1999), attenuando notevolmente la gravità degli allagamenti. Nondimeno si è segnalato che in alcuni casi ciò non si applica.

Then, if the frequency is observed, the five decades in our time span have the following numbers: four cases in each of the firs three periods, then five events, then six. Is it an increase in time? An elementary knowledge of statistics suggests that the abundancies are too small for any conclusion.
If, within each decade, the mean height of surges is computed, a random-looking sequence is obtained (in cm): 98.5, 114.25, 102.25, 105.4, 100.66 .
Getting back to frequencies, grouping the events in various ways, a constant tendency to increase in time is obtained. Indeed, the fastest way to have abundant numbers (hence a more credible statistics) is to divide our fifty years into two equal parts. Eight cases are obtained in the first half and fifteen in the second. Another way to express the result is that the same number of cases has occurred in the first thirty years (1951-80) as in the remaining twenty.
To maintain the sequence adopted above, the mean height of surges is reported for the partition of two 25-year periods: 106.4 and 102.7 cm are found. The exceptional surge of 1966 makes the interval in which it falls dominant in all cases.
Additionally, considering the influence of the eleven-year solar cycles (that should have climatic effects), one can consider only four periods of this length (1953-63, 1964-74,...) and disregard the first and last cases. The frequencies obtained (3, 4, 6 and 7) are again tending, even if small numbers, to a time increase.
All this is consistent with the observed increase of the sirocco over the central Adriatic, causing an increment in the frequency of the surges that exceed 10 cm and the ones above 20 cm., mainly offshore (Pirazzoli and Tomasin, 1999). Studies on this observed "storminess" are developing.
Other compendious considerations concern the presence of bora (NE wind) blowing at least in the hours preceding the surge peak: seven out of 23 occurrences are found, with, in addition, four questionable cases, and in general no apparent trend is observed.
The steepest rise of a surge was observed in the first event (November 1951) with an average increase of more than 17 cm per hour for the whole rise time.
It was observed (more precisely, for the observed levels) that in many cases like the one of 1951, showing a quick meteorological pulse, an increase in the hydraulic resistance at the lagoon inlets could cut the top of the tidal curve, as it was recently demonstrated by Umgiesser (1999), making floods less severe. Nevertheless, other events have shown, where this intervention would have no effect.

Con attribuzioni qualitative, si è cercato di ripartire tra vento e depressioni la causa dei rialzi studiati: in nove eventi le due cause sembrano equilibrarsi, mentre per il resto il vento ha il doppio di casi attribuiti rispetto alle depressioni.
L'escursione della sessa di 22 ore, che è compresa tra 43 e 104 cm nei casi considerati, con una media di 66 cm, risulta essere dello stesso ordine di grandezza dell'escursione della marea astronomica.
L'escursione più elevata (104 cm nel novembre 1966) non è però un massimo assoluto, dato che un valore di 112 cm è stato raggiunto il 12 marzo 1958 (Tomasin e Pirazzoli, 1999, Fig. 9), un evento che qui non è riportato non avendo le caratteristiche richieste. Da notare anche che in cinque dei casi qui considerati la sessa raggiunge il massimo valore nella parte negativa, mentre va ricordato l'evento relativamente fortunato dell'ottobre 1976, nel quale la sessa di 22 ore manifesta la sua massima ampiezza con netto ritardo rispetto al momento del massimo rialzo.
La sessa di 11 ore mostra, in tutti i casi esaminati, un'escursione più limitata, compresa tra 15 e 41 cm, con una media di 24 cm. Il massimo valore registrato (41 cm, di nuovo nel novembre 1966) è però ancora inferiore al massimo assoluto che è stato raggiunto il 13 dicembre 1967 con 46 cm (Tomasin e Pirazzoli, 1999, Figure 6 e 10), ancora un caso non riportato qui. In quella circostanza, l'ampiezza della sessa di 11 ore è risultata più che doppia rispetto a quella della sessa di 22 ore. Ciò è sorprendente se si pensa che nei casi qui considerati l'oscillazione principale è essa stessa come minimo doppia (approssimativamente) di quella di 11 ore, fino ad essere circa dieci volte superiore (dicembre 1957).
Con uno sguardo al futuro e riprendendo le precedenti considerazioni sul rischio derivante dalla durata delle perturbazioni, si rileva che essa non è trascurabile per l'eventuale progettazione di opere di protezione della laguna di Venezia contro l'acqua alta, soprattutto nel caso di un aumento eustatico del livello marino. Infatti, l'ultimo rapporto pubblicato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), prevede che, in seguito all'aumento in atto dell'effetto serra, l'innalzamento del livello marino globale sarà compreso tra 20 e 86 cm, con un valore centrale di 49 cm (senza tener conto di eventuali effetti locali di subsidenza) per il 2100 (Warrick et al., 1996). Si può prevedere quindi che nei prossimi decenni gli effetti della marea astronomica e delle perturbazioni si svilupperanno attorno ad un livello medio marino più elevato dell'attuale.

Qualitatively, a separation between wind and low-pressure was sought as the cause of the surges considered here: in nine of the events both factors seem to be responsible, whilst, in the residual sample, wind has twice the number of predominances with respect to depression.
The range of the 22-hour seiche, spanning between 43 and 104 cm in the cases included here, is of the same order of magnitude of the tidal range. But the largest occurrence (104 cm in November 1966) is not an absolute maximum, since a 112-cm event was recorded on March 12, 1958 (Tomasin and Pirazzoli, 1999, fig.9), a case not considered here since it did not fulfill the conditions.
It is remarkable that in five of the present cases the principal seiche reaches its maximum value in the negative side, and the peculiar fact of October 1976 is worth noticing, when fortunately the 22-hour seiche deploys its largest amplitude well behind the maximum surge.
The 11-hour seiche shows, in all events considered, a smaller range, between 15 and 41 cm, with an average of 24 cm. The maximum value occurred here (41 cm, again in November 1966) does not reach the historical maximum, recorded on December 13, 1967, with 46 cm (Tomasin and Pirazzoli, 1999, fig. 6 and 10), another case not considered here.
In this latter event, the amplitude of the secondary seiche was more than twice the principal one: this is surprising, considering that in all the situations shown in the present work, the 22-hour seiche is at least twice (in the usual approximations) the 11-hour one, reaching a ratio close to 10:1 (December 1957).
Looking to the future and keeping in mind the risk posed by the duration of the perturbations, its relevance is stressed when planning possible protections of the lagoon from floods, particularly in case of eustatic increase of sea level. Indeed, the report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), due to the rise caused by greenhouse effect, warns that the global increase will be between 20 and 86 cm, with a medial value of 49 cm (forgetting local subsidence phenomena) for 2100 (Warrick et al., 1996). What we can expect for the next decades is that tides, surges and seiches will develop around a mean sea level higher than the present one.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ufficio Idrografico e Mareografico di Venezia, l'Osservatorio dell'Istituto Cavanis di Venezia nella persona del compianto Padre Giulio Avi, il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, il Servizio Meteorologico Tedesco, il Sistema bibliotecario dell'Università Ca' Foscari di Venezia nella persona delle signore L. Tagliapietra e A. Zorzi e infine Ms. J. Frankenfield Zanin del CNR (ISDGM, Venezia).
La pianificazione dell'attività e la realizzazione di questo lavoro è stata sostenuta dal programma congiunto di ricerca franco – italiano "Galileo" e da un progetto del CoRiLa per il controllo dei cambiamenti climatici nell'area veneziana.

Acknowledgements

We express our gratitude to the Ufficio Idrografico e Mareografico di Venezia; the Osservatorio dell'Istituto Cavanis, Venice, particularly remembering the late Father Giulio Avi; the Servizio Meteorologico of the Italian Air Force; the Deutscher Wetterdienst, Offenbach; the library service of the Università Ca' Foscari of Venice, in particular Ms. L. Tagliapietra and Ms. A. Zorzi; Ms. J. Frankenfield Zanin of the Italian CNR (ISDGM, Venice).
The scientific planning and activity of this work was supported by the French-Italian Joint Research Program "Galileo", and by a core project of CoRiLa for climate change monitoring in the Venice area.

Bibliografia *References*

Accerboni E. e Manca B., 1973. Storm Surge Forecasting in the Adriatic Sea by Means of a Two-Dimensional Hydrodynamical Numerical Model. Bollettino di Oceanologia Teorica e Applicata, vol. XV, n. 57, p. 3-22.

Artegiani A., 1971. Traiettorie di perturbazioni meteorologiche che hanno provocato acqua alta a Venezia. TN 18, CNR, Lab. St. Dinamica Grandi Masse, Venezia.

Canestrelli P., Cerasuolo M., Corte C. e Pastore F., 1997. Eccezionale persistenza di alte maree a Venezia nel periodo 1996 - Gennaio 1997. Rilevanza del contributo meteorologico. Convegno Nazionale "Meteorologia ed aree urbane", Roma.

Dorigo L., 1961. Maree eccezionali registrate a Venezia Punta della Salute (Periodo 1867-1960). Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia. In: Rapporti preliminari, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, vol. 1, p. 39-69.

Dorigo L., 1966. Maree eccezionali registrate a Venezia Punta della Salute (Periodo 1867-1964). Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia. In: Rapporti e studi, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, vol. III, p. 161-183.

Dorigo L., 1968. Le alte maree eccezionali a Venezia (Periodo 1867-1966). Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque, Venezia, 38 p. Ferla M. e Rusconi A., 1994. L'evento di "acqua alta" 921218 in Laguna di Venezia; indagine sui sovralzi differenziati. Atto presentato al XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche (Napoli). Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Venezia, 16 p.

Ferla M. e Rusconi A., 1994. L’evento di “acqua alta” 921218 in laguna di Venezia; indagine sui sovralzi differenziati. Atto presentato al XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche (Napoli). Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Venezia, 16 p.

Nania A., 1969. Il vento e l'attrito esterno nelle burrasche adriatiche - Analisi statistica. Rivista di Meteorologia Aeronautica, XXIX, n.4, p. 3-11.

Padoan G. e Dorigo L., 1963. Qualche considerazione su livelli marini eccezionali misurati a Punta della Salute - Venezia - e sulle variazioni altimetriche subite da quel mareografo. In: Atti del Simposio internazionale sul tema "Influenze meteorologiche e oceanografiche sulle variazioni del livello marino". Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, p. 89-100.

Pirazzoli P. A. e Tomasin A., 1999. L'evoluzione recente delle cause meteorologiche dell' "acqua alta". Atti dell'Ist. Ven. Scienze, Lettere ed Arti, CLVII, p. 317-344.

Rusconi A., 1986. Rilevazioni idrografiche in laguna veneta; l'evento 860201. Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque, Venezia, 23 p.

Speranza A., 1975. The formation of baric depressions near the Alps. Annali di Geofisica, vol.XXVIII, n.2-3, p.177-217.

Tomasin A. e Pirazzoli P. A., 1999. The seiches in the Adriatic Sea. Atti dell'Ist. Ven. Scienze, Lettere ed Arti, CLVII, p. 299-316.

Umgiesser G., 1999. Valutazione degli effetti morbidi e diffusi sulla riduzione delle punte di marea a Venezia, Chioggia e Burano. Atti dell'Ist. Ven. Scienze, Lettere ed Arti, CLVII, p.231-286.

Warrick R.A., Le Provost C., Meier N.F., Oerlemans J. e Woodworth P.L., 1996. Changes in sea level. In: J.T. Houghton et al. (Eds.)."Climate Change 1995", Cambridge University Press, p. 359-405.

Pubblicazioni del Centro Previsioni e Segnalazioni Maree
Comune di Venezia

Canestrelli P. e Tomasin A., 1981. Sull'attendibilità di un modello empirico-statistico per la previsione dell'acqua alta a Venezia.

Canestrelli P., Cerasuolo M. e Tomasin A., 1982. La nebbia a Venezia nel decennio 1971-80: dati statistici.

Canestrelli P., Facchinelli F. e Miglioli M., 1983. Profili altimetrici in Venezia e isole per la viabilità pedonale in caso di "acqua alta".

Canestrelli P., Voltan A. e Tomasin A., 1983. Uno schema empirico di facile uso per la previsione della marea a Venezia.

Canestrelli P., Pastore F. e Tomasin A., 1986. Sviluppi di un modello operativo previsionale delle maree di Venezia e previsione di casi rilevanti.

Canestrelli P., Costa F. e Tomasin A., 1995. Il Centro previsioni e segnalazioni maree.

Canestrelli P., Cerasuolo M. e Corte C., 1997. L'alta marea a Venezia: il fenomeno e le strategie operative.

Canestrelli P., Cerasuolo M., Corte C. e Pastore F., 1997. Eccezionale persistenza di alte maree a Venezia nel periodo novembre 1996 – gennaio 1997. Rilevanza del contributo meteorologico.

Canestrelli P., Piasenti S. e Scattolin G., 1997. Rilievi batimetrici alle bocche di porto della laguna di Venezia.

Canestrelli P., Cerasuolo M., Corte C. e Pastore F., 1998. La marea a Venezia e l'impatto sulle attività umane.

Canestrelli P., 1999. Il sistema statistico del Comune di Venezia per la previsione del livello della marea in città. Risultati teorici e in fase di operatività.

Canestrelli P. e Cossutta L., 2000. Moto ondoso in Canal Grande.

Previsioni delle altezze di marea per il bacino di San Marco. Valori astronomici. In collaborazione con il Ministero dei Lavori Pubblici, Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, e dell'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del C. N. R. di Venezia. Anni: dal 1982 al 2001.

Canestrelli P., 1988. Registrazione ed elaborazione dei valori del livello di marea a Punta della Salute, diga Sud Lido, diga Sud Chioggia e piattaforma "Acqua Alta" negli anni 1983-1987.

Registrazione ed elaborazione dei valori dei parametri meteomarini a : Punta Salute, diga Sud Lido, diga Nord Malamocco, diga Sud Chioggia, Piattaforma "Acqua Alta" e San Nicolò del Lido. Anni: dal 1988 al 1994.

Registrazione ed elaborazione dei parametri meteomarini nella Laguna di Venezia. Anni: 1995 e 1996.