

Floods and droughts on the lower Vistula

Authors

Marzenna Sztobryn
Marianna Sasim
Beata Kowalska

Keywords

lower Vistula, floods, droughts, water levels

Abstract

The study analyses floods and droughts on the lower Vistula based on the data (water levels and flow rates) recorded in stations of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMGW-PIB) in Warsaw, Kępa Polska, Toruń and Tczew. It also includes the causes of flooding and drought in the lower Vistula with the hydrological characteristics from the years 1951–2010. The variability in maximum and minimum annual and monthly flow rates has been analysed for the aforementioned period as well. In addition, the authors have analysed changes in the shape of the flood wave after passing through the reservoir and cascade in Włocławek based on the hydrograph of May and June 2010. It has been found that the flood wave is flattened and extended. This phenomenon is favourable from the point of view of flood actions.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013209

Introduction

Three characteristic parts can be distinguished on the lower Vistula (dolna Wisła): above the reservoir in Włocławek (represented by the stations in Warsaw and Płock/Kępa Polska), below the reservoir in Włocławek (Toruń and Tczew) and below Tczew, parts under strong influence of the sea (Świbno). The Vistula (Wisła) below Tczew consists of the river section and an artificial canal called the Vistula (Wisła) Cutting (Przekop Wisły) (below Przegalina). The main risks at the Vistula (Wisła) Cutting are jam and storm floods. Flood waves created in the upper sections of the river result in an increase in water levels; however, a real risk can arise only in the event of coinciding flood wave and freshet caused by storm or ice jamming. Although droughts, the hydrological low-water periods caused by meteorological phenomena in the basin of the Lower and middle Vistula (środkowa Wisła), also reduce water levels in the mouth section of the river, they do not pose as high a risk as floods. The hydrological characteristics of the river between Warsaw and Tczew show similarities between respective sections; a change in the shape of the flood wave can be observed only when the flood wave passes through the reservoir and cascade in Włocławek.

Data characteristics

Long-term observations (flow rates and water levels) from IMGW-PIB water gauge stations (1951–2010) are used in the study. Observations and measurements – despite changes in observation techniques and their frequency – are characterised by uniformity and valid ISO certification. However, in such

a long period changes were inevitable, forced by natural phenomena, e.g. destruction of a water gauge during flooding, and by external factors, e.g. hydraulic engineering reconstruction or development of towns and cities. Those apply mainly to the water gauges in Warsaw (and an additional gauge in Warsaw Nadwilanówka) and in Płock (transferred to Kępa Polska). Parallel measurements were carried out in the stations for a period of at least 2 years, for the sake of uniformity of measurement series or any comparisons. Tab. 1 shows the basic hydrological characteristics for the water levels recorded in the analysed stations, as well as the information on zero elevations of water gauges and the heights of alarm and warning levels. In addition, the study includes the maximum levels recorded in the analysed stations during the flood of 2010.

The levels reached at the stations in Warsaw Nadwilanówka and Kępa Polska during the flood of 2010 were the highest ever recorded (referred to as the absolute maximum), and the water level recorded at the station in Warsaw in 2010 was lower than the level in 1960 by only 7 cm. In Toruń and Tczew those were the highest levels observed in the twentieth century (absolute maximums recorded at those stations come from the nineteenth century, thus before the Vistula (Wisła) Cutting was made). The absolute maximums of the twentieth century, or even the alarm levels, were not exceeded only in Świbno – because of the influence of the sea. A description of the influence of the sea on the flow of flood wave is included in a separate publication [4].

In the following part, the paper analyses the maximum and minimum annual and monthly flow rates for three periods:

Station	km of the river course	Zero elevation [Kr]	Alarm level	Warning level	Absolute maximum	Absolute maximum date	Water level observed during the flood of 2010	Date of maximum during the flood of 2010	Absolute minimum	Absolute minimum date
Gdańsk Świbno	938.7	-5.083	680	600	767	16/03/1956	615	11/06/2010	413	10/02/1897
Tczew	907.9	-0.559	820	700	1 210	20/03/1816	1 040	25/05/2010	166	16/06/1930
Toruń	734.7	31.96	650	530	979	1/03/1871	848	23/05/2010	110	1/12/1892
Kępa Polska/Płock	606.5	57.25	450	420	670	18–19/03/1979/ 10/01/1982	740	23/05/2010	134	1/09/1992
Warsaw	513.3	76.08	650	600	787	31/06/1960	780	22/05/2010	68	3/09/1992
Warsaw Nadwilanówka	504.1	76.68	800	750	917	23/06/1970	947	22/05/2010	168	5/08/2007

Tab. 1. Basic hydrological characteristics of the analysed stations

before construction of the cascade in Włocławek (1951–1967), after the construction of the cascade (1968–2010) and for the whole period examined (1951–2010).

Flood risk in the Vistula basin

The cause of flood risk in the Vistula (Wisła) basin may be heavy rainfalls, melting snow cover, sludge and ice jamming, storm flooding in the mouth section of the Vistula (Wisła). Freshet rarely covers the entire river basin. On the other hand, there have often been freshets covering large areas of the basin – a few to several thousand square kilometres. It should be noted that flood risk in the Middle and lower Vistula (dolna Wisła) can be caused not only by phenomena occurring in the middle and lower part of the basin [2]. Floods occurring in the upper Vistula (górna Wisła) basin, caused by intense rainfall in Southern and South-Eastern Poland, may also be dangerous. Waves formed in the mountain tributaries, then in the upper Vistula (górna Wisła) when moving down, cause a risk over the entire length of the Vistula (Wisła), up to its estuary on the Baltic Sea.

General characteristics of risks

- the upper Vistula (górna Wisła) basin

Water in the upper Vistula (górna Wisła) poses the highest risk during freshets caused by precipitation. Freshets caused by thaw occur rarely, mainly due to specific meteorological conditions prevailing in the mountains and in the foothills in the late winter and spring. Water from snow melting freezes at night because of positive air temperatures in the daytime and negative temperatures at night. The 0 isotherm is gradually reaching higher and higher parts of mountain basins, so the area of snow melt is increasing, thus extending the duration of flow of meltwater. The entire snow melt process is slow and gradual.

Rainfalls in the southern part of Poland are usually associated with depressions in Southern Europe, fed by air flowing from over the Adriatic or the Black Sea region. It is characteristic that the precipitations causing the highest flood waves in the region are usually the second or third precipitation series. They are preceded by less intense precipitation, usually associated with a cool front and polar maritime air. Particularly high precipitation occurs in the foothills, in the upper Vistula (górna Wisła) basin, which is associated with the orographic effect caused by the Carpathians.

The vast majority of rivers in South-Eastern Poland have their sources in the mountains (the Carpathians and the Świętokrzyskie Mountains). Those are the rivers of mountain or foothill regime, characterised by a strong current, numerous shoals over the entire width of the river, gorges and relatively shallow depths. River gradients are significant and the flow is dynamic, at high rates. A very rapid increase in water level can be observed during freshets. The duration of flood waves is short, from several to a dozen or so hours, and depends on the duration of precipitation. High dynamics of flood flows results in considerable damage caused by rivers.

- the middle Vistula (środkowa Wisła) basin

Freshets caused by both precipitation and thaw may occur in the middle Vistula (środkowa Wisła) basin. Intense rainfall in the upland areas may be associated with depressions coming from above the Atlantic and accompanying fronts or depressions from over South-Eastern Europe, saturated with moisture from the Mediterranean or the Black Sea. They reach as far as Eastern Poland, Belarus and Western Ukraine. In addition, the upland character of the ground is conducive to convective movements, thus leading to intense rainfalls.

The rivers with sources at, or flowing through the Krakowsko-Częstochowska Upland, Kielecko-Sandomierska Upland and Lublin Upland are rivers of foothill regime, i.e. the water level and river valley are characterised by substantial gradient, high flow rate and low depth. The time from the occurrence of precipitation to formation of a flood wave is not very long, approx. several dozen hours. Waves of freshet caused by precipitation are dynamic, with significant increases in their level.

Snow cover in the uplands of Eastern Poland lasts for a long period and is usually characterised by considerable thickness. It disappears quite quickly and often suddenly during the thaw, which is affected by inflow of warm air masses and rainfalls, even if they are not very intense. At these times, the rivers in the region are fed with a large amount of water, and their nature is favourable to sudden freshets.

- the lower Vistula (dolna Wisła) basin

The lowland strip in Northern Poland is mainly at risk of flooding caused by thaw or thaw and precipitation. Large floods caused by precipitation, which would cover the whole region, are very rare. However, there are many local floods caused by torrential rains.

Usually, more snow lingers in the area of the lower Vistula (dolna Wisła) basin, where frosts are also stronger. During the thaw period, with an inflow of warm air from the south and even the occurrence of low precipitation, snow melts very intensively, and meltwater feeds the rivers. A particularly dangerous situation may occur in the lower sections of the Vistula (Wisła) and the Bug, where the water flowing from the upper part of the basin often encounters obstacles in the form of ice jamming (heat advection over the southern parts of the basin accelerates melting, while there may still be negative temperatures in the northern areas). As a result, the water level increases and bursts the banks.

Precipitation in the lower Vistula (dolna Wisła) basin is generally associated with a developing depression over the Atlantic Ocean and the movement of its fronts to the eastern part of Europe. This results in frontal precipitation of various durations.

Large floods caused by precipitation are very rare. Smaller floods occur within one or a few adjacent basins, but also not often. Local floods caused by torrential rains are much more frequent. The strip from the area of Toruń to the eastern border is particularly vulnerable to such floods.

The rivers of the lower Vistula (dolna Wisła) basin are characterised by a lowland regime. They are generally characterised by very low gradients; they flow slowly in wide, well-developed valleys, and wash out banks to a small extent. They are fed with plenty of water in the spring, when the snow is melting. Freshets in lowland rivers may last for a long period, while freshets caused by precipitation, melting or melting and precipitation last for several days and weeks, respectively.

Ice phenomena and their impact on water levels

Various forms of ice appear in rivers in the winter, when there are significant drops in air temperature – initially sludge and stranded ice, then permanent ice cover. The time of freezing of rivers and the duration of ice phenomena depend on the geographical location of the basin and the winter's character. However, rivers in the south-eastern (mountain tributaries of the Vistula (Wisła)), north-western and western parts of Poland usually freeze early, in November and December. Ice phenomena last approx. 90 days and 40 days a year on average in the lower Vistula (dolna Wisła) basin and the middle Vistula (środkowa Wisła) basin, respectively. Ice phenomena disappear usually in March, but may be prolonged to April in the north-east.

Formation of ice phenomena is generally accompanied by increases in water level; there are also local sludge jams. Freshets and local increases occur also in the periods of formation of ice cover, often above the warning and alarm levels.

Disappearance of ice phenomena, mainly stranded ice and ice cover, results in the forming of an ice floe, which is often stopped on obstacles when flowing along the river banks and causes increases in water level. There are local ice jams and accompanying fluctuations and increases in water level.

Analysis of maximum annual flow rates

The primary parameter characterising the hydrological river regime is its flow rate. The greatest flood risk occurring in one year is represented by the value of the maximum annual flow rate.

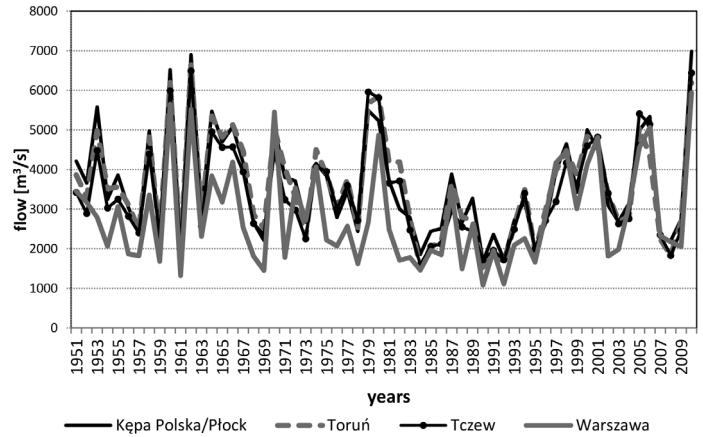


Fig. 1. Maximum annual flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)

Fig. 1 shows the maximum annual flow rates at stations located above the reservoir in Włocławek: in Warsaw and Kępa Polska/Płock, as well as below the reservoir, in Toruń and Tczew. In the years 1951–2010 the maximum annual water flow rates in Warsaw were in the range of 1080 m³/s in 1990 to 5940 m³/s in 2010. Flow rates in Kępa Polska varied from 1680 m³/s in 1990 to 6980 m³/s in 2010. In accordance with the above, it can be seen that in both stations the lowest values of annual maximums and absolute maximums occurred in 1990 and 2010, respectively. The maximum annual flow rates at stations in Toruń and Tczew, below the reservoir in Włocławek, were also correlated in time and were 6650 m³/s for Toruń in 2010 and 6490 m³/s for Tczew, also in 2010. The lowest maximum annual flow rates in Toruń and Tczew were recorded in 1984 and were 1500 m³/s and 1600 m³/s, respectively.

The highest flow rate in the lower Vistula (dolna Wisła) was observed at the station in Kępa Polska – 6980 m³/s.

Analysis of maximum monthly flow rates

Another parameter which characterises flood in rivers is the values of maximum monthly flow rates.

Fig. 2 shows the maximum monthly water flow rates at the four stations mentioned above in 1950–2010, divided into the years

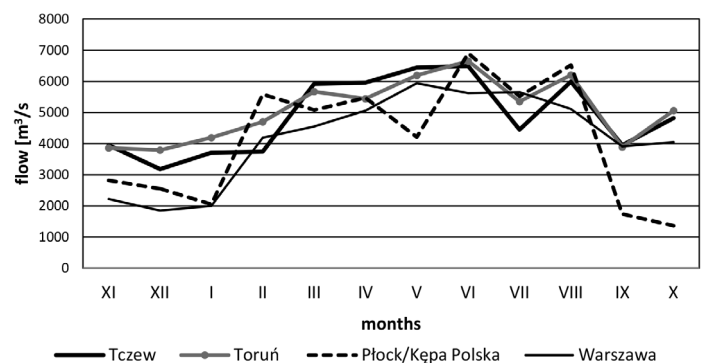


Fig. 2. Maximum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)

1951–1967 and 1968–2010. The analysed flow rates show a large variation in the 12-month period at each station.

The maximum monthly flow rate between 1951 and 2010 occurred in May in Warsaw, and in June in other stations. The lowest maximum monthly flow rates were observed at the following stations: Warsaw, Toruń and Tczew in December, Kępa Polska in October.

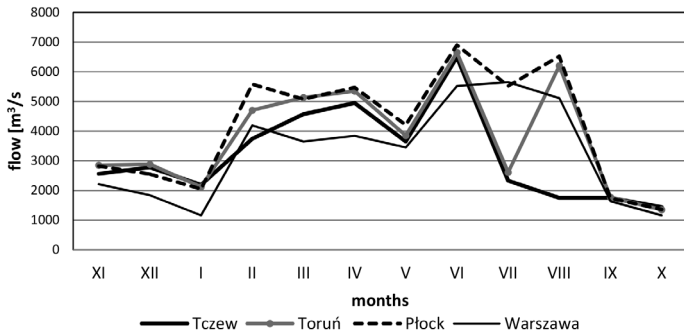


Fig. 3. Maximum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967)

In most of the stations, the maximum monthly flow rates from 1951–1967 were observed in June, with the exception of Warsaw (July). The lowest of the maximum monthly flow rates at stations in Warsaw, Toruń and Tczew were reported in October, and in November at the station in Kępa Polska/Płock (Fig. 3).

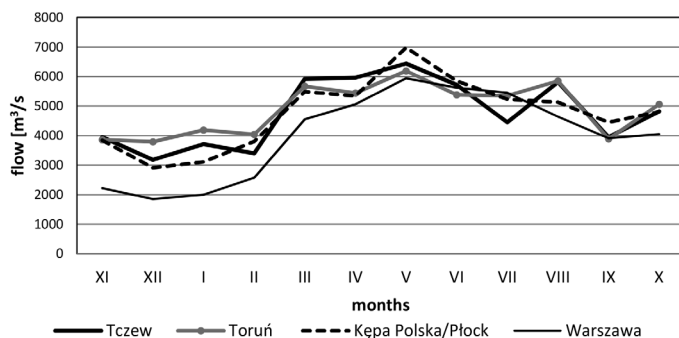


Fig. 4. Maximum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010)

From 1968–2010 the maximum monthly water levels at all stations occurred in May, while the lowest of the maximum monthly flow rates at stations in Warsaw, Toruń, Tczew, and Kępa Polska were observed in December (Fig. 4). Occurrence of the maximum annual flow rates in Warsaw and Kępa Polska coincides with the period of the disastrous flood in spring 2010. However, it should be noted that during this flood, the absolute maximums in Warsaw and Kępa Polska were clearly not accompanied by absolute maximums at the stations located below the reservoir in Włocławek. Flow rates

observed in Toruń and Tczew were very high, but still lower than in 1962.

Flood of 2010

Many years of experience of forecasters and hydrologists of IMGW-PIB indicate the impact of the cascade in Włocławek on flood wave hydrographs observed at stations located below the cascade. In order to check whether that claim is true, we have analyzed the changes in water levels at stations in Warsaw, Toruń and Tczew during the flood of 2010 (Fig. 5). The flood of 2010 was caused by heavy rainfall in the upper Vistula (górna Wisła) basin. A detailed description of the flood is included in the monograph [3].

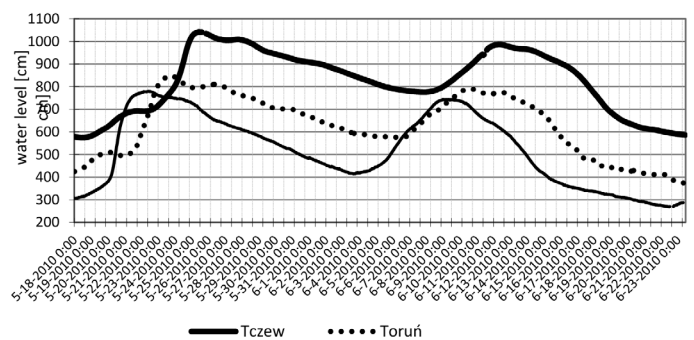


Fig. 5. Changes in water levels recorded at IMGW-PIB stations located along the lower Vistula during the flood of 2010

First peak			Second peak		
Station	Value	Time of occurrence	Station	Value	Time of occurrence
Warsaw	780	22/05/2010, 10.00 a.m.	Warsaw	743	8/06/2010, 11.00 p.m.
Kępa Polska	739	23/05/2010, 2.00 a.m.	Kępa Polska	660	10/06/2010, 12.00 a.m.
Toruń	848	23/05/2010, 6.00 p.m.	Toruń	790	10/06/2010, 1.00 p.m.
Tczew	1042	25/05/2010, 10.00 a.m.	Tczew	986	12/06/2010, 7.00 a.m.

Tab. 2. The values of peak flood waves with the time of occurrence in the lower Vistula during the flood of 2010

During the flood in May–June 2010, the absolute maximums of water levels in the 20th century were exceeded at stations in Warsaw Nadwilanówka, Kępa Polska, Toruń and Tczew (Tab. 1). Tab. 2 shows the values of peak flood waves with the time of occurrence.

The durations of levels above the alarm level during the first peak were 72 hours in Warsaw, 249 hours in Toruń and 279 hours in Tczew. Those durations were much shorter in the case of the second peak: 96 hours in Warsaw, 180 hours in Toruń and 138 hours in Tczew. This comparison and the analysis of the peak wave (Fig. 5) indicate that, after passing through the reservoir and cascade in Włocławek, the value of absolute increase in water

levels is reduced, and the duration of water levels above the alarm levels is increased. The increase rate for water levels during the first peak was 7 cm/h in Warsaw (counting from 4 UTC on 20 May to the peak), while the fastest increase rate for levels (to 8 UTC on 21 May) exceeded 12 cm/h. In Toruń those values were 6 cm/h and 7.6 cm/h, respectively. The increase values recorded in Tczew were similar to those observed in Toruń: 5.5 cm/h and 8.4 cm/h. The increase rates for water levels before reaching the peak were calculated during the second peak; they were as follows: 3.3 cm/h in Warsaw, 2.3 cm/h in Toruń and 2.4 cm/h in Tczew. During both peaks the increase in water levels before reaching the peak was higher for the station located above Włocławek than for the stations situated below it. Values in Tczew, slightly higher in comparison with Toruń, are an effect of the distance to the sea. To sum up, based on the analysis of the flood of 2010 it can be concluded that the shape of flood waves below Włocławek differs from the shape of waves above, where the increase rate and the absolute increase value of water levels are higher. However, the period of risk, measured by the duration of water levels above the alarm levels is definitely longer in the stations located below the cascade. This means that the flood wave is flattened and extended while passing through the reservoir and cascade in Włocławek. This phenomenon is favourable from the point of view of flood actions.

Droughts

from the hydrological point of view it is very important to analyse low levels of water, hydrological low-water periods, which are caused by atmospheric and soil drought due to the absence or deficiency of precipitation in the basin. In Poland droughts occur usually where there is not enough precipitation during the growing season, and very warm and dry air flows in to the country. If the preceding period was characterised by deficiency of precipitation, we call this an atmospheric drought. The result of a long-lasting atmospheric drought is a soil and hydrological drought. During a soil drought the top soil layer dries out and plants cease to grow or even wither away.

The result of a hydrological drought is a hydrological low-water period. At this time, rivers are no longer fed with water from precipitation and the level of surface water is reduced, often below the level adopted as the minimum to maintain riverine ecosystems.

A long duration of low water level and flow rate (below the adopted limit value, e.g. average low flow rate, SNQ) is called a hydrological low-water period. Two types of low-water periods are distinguished in Poland: summer low-water periods, often extending to the autumn period, then called summer and autumn low-water periods, and winter low-water periods. Summer low-water periods, preceded by atmospheric and soil drought, begin when the rivers are fed solely or almost solely by groundwater. Occurrence of winter low-water periods is associated with the appearance of ice phenomena on rivers and longer periods of a negative air temperature, when runoff is stopped, and the flow of groundwater is very limited.

Duration of low-water is very diverse and ranges from 20 days (the period adopted as the minimum in the definition) to 200

days, which is rather rare. Low-water levels of 3–4 months have occurred many times.

Low-water levels typically appear in the summer period (June–July), sometimes extending to the autumn (September–October). Early winter and winter low-water levels are primarily typical for mountain rivers. However, there are some exceptions, e.g. a long-term winter low-water period in 1954, which covered almost the entire country, did not affect the mountain tributaries of the Vistula (Wisła) and some mountain tributaries of the Oder. The end of a summer low-water period is associated with substantial precipitation. Precipitation at medium level or slightly exceeding the norm causes a short-term increase of water level in the rivers, but they do not restore the water resources in the basin. Only large and long-term precipitation, particularly in the autumn and winter period, can compensate for water shortages. The end of winter low-water period is usually rapid, as a result of an increase in the air temperature and runoff of meltwater.

General characteristics of the most serious droughts

Recently, the first half of the 1990s and the years 2003 and 2006 were very dry. The drought of 1992 was in particular severe, disastrous in many areas. It was characterised by many weeks of heat, shortage of precipitation, dried up soil (reduced yields, no feed, resulting in increase in food prices), an increase in the number of fires (tens of thousands of hectares of forest were burnt). The hydrological effects of the drought of 1992 were extremely low flow rate and water level in rivers (at many stations the water level fell below the previously observed values), a very low level of groundwater (in the south the level of groundwater dropped by 100 and more centimetres below the average), insufficient amount of water in farm wells. There was a real risk of complete emptying of the Sulejów Reservoir in Pilica, which supplies water to Łódź and Tomaszów Mazowiecki.

Analysis of minimum annual flow rates

The paper analyses the variability in the minimum annual flow rates at stations located above the reservoir in Włocławek: in Warsaw and Kępa Polska/Płock and below the reservoir, in Toruń and Tczew (Fig. 6).

In the examined period (1951–2010) the minimum annual water flow rates in Warsaw were in the range of 108 m³/s in 1960 to 333 m³/s in 1981. Minimum annual flow rates in Kępa Polska

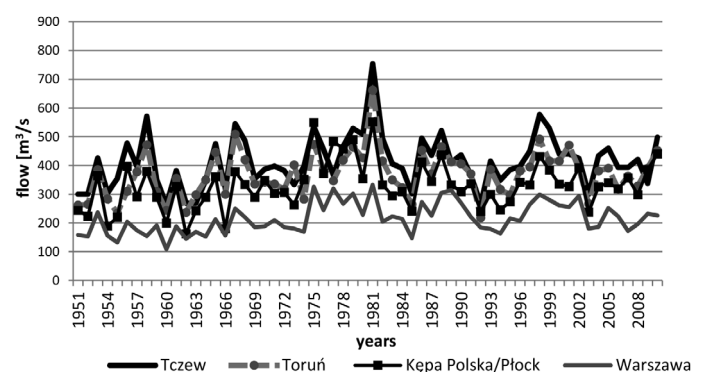


Fig. 6. Minimum annual flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)

varied from 162 m³/s in 1962 to 552 m³/s in 1981. It should be noted that in both stations the maximum values of the annual minimums occurred in the same year – 1981. The minimum annual flow rates at stations in Toruń and Tczew, below the reservoir in Włocławek, were from 218 m³/s in 1992 to 662 m³/s in 1981 for Toruń, and from 264 m³/s in 1960 to 754 m³/s in 1981 for Tczew. In the section of the Vistula (Wisła) under discussion, the lowest flow rate was observed at the station in Warsaw; it was equal to 108 m³/s (1960). 1981 was characterised by the occurrence of the highest of the minimum annual flow rates at all four stations. The occurrence of the minimum annual flow rates in Kępa Polska in 1962 and in Toruń in 1992 emphasizes the reduction of water resources during the drought observed in those years.

Analysis of minimum monthly flow rates

The minimum monthly rates show a large variation in the 12-month period at each station. Fig. 7 shows the minimum monthly water flow rates at the four above-mentioned stations in 1950–2010, divided into the years 1951–1967 and 1968–2010. In 1951–2010 the absolute minimum flow rates at 3 examined stations were recorded in December, and were as follows: 108 m³/s for Warsaw, 162 m³/s for Kępa Polska and 264 m³/s for Tczew. The absolute monthly minimum of 218 m³/s in Toruń was recorded in September. The following highest values in those sets were recorded: 260 m³/s for Warsaw in May, 420 m³/s for Kępa Polska, also in May, 464 m³/s for Toruń in April and 504 m³/s for Tczew in May.

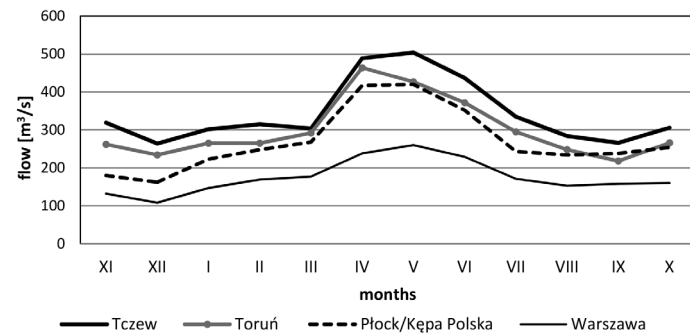


Fig. 7. Minimum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)

Fig. 8 shows the minimum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967). At all the examined stations the minimum flow rates occurred in December, and were as follows: 108 m³/s in Warsaw, 162 m³/s in Kępa Polska, 234 m³/s in Toruń and 264 m³/s in Tczew. The highest of the minimum annual flow rates occurred in April, and were as follows: 314 m³/s in Warsaw, 638 m³/s in Kępa Polska, 709 m³/s in Toruń and 720 m³/s in Tczew.

Fig. 9 shows the minimum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010). At two stations the minimum monthly flow rates occurred in September and were as follows: 238 m³/s in Kępa Polska, 218 m³/s in Toruń, 266 m³/s in Tczew. The minimum monthly

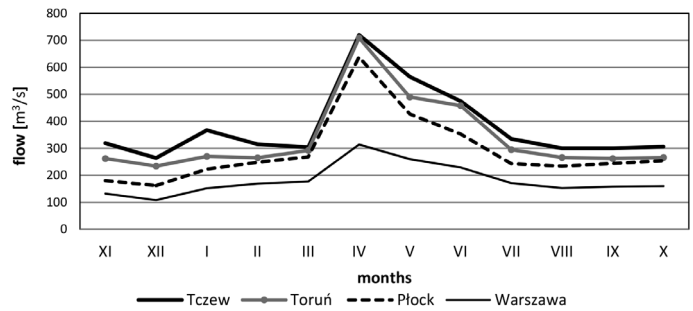


Fig. 8. Minimum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967)

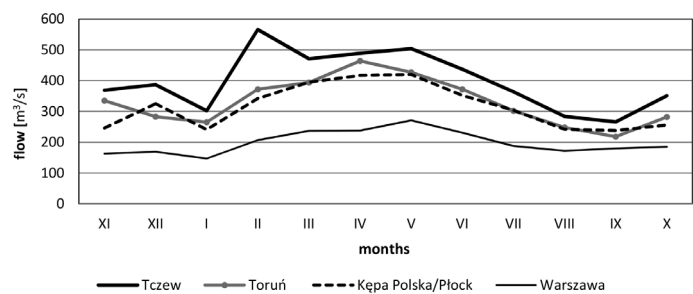


Fig. 9. Minimum monthly flow rates at the following stations: Warsaw, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010)

flow rate of 147 m³/s in Warsaw was recorded in January. The highest of the minimum monthly flow rates occurred in May (Warsaw and Kępa Polska), in April (Toruń) and in January (Tczew). Those flow rates were as follows: 271 m³/s in Warsaw, 420 m³/s in Kępa Polska, 464 m³/s in Toruń and 566 m³/s in Tczew.

Summary

In this work we have shown the causes of floods and droughts on the lower Vistula (dolna Wisła). We have analysed variation in the maximum and minimum monthly and annual flow rates in the years 1951–2010. The occurrence of the maximum annual flow rates in Warsaw and Kępa Polska coincides with the period of the disastrous flood of spring 2010. In this flood, the absolute maximums in Warsaw and Kępa Polska were not accompanied by absolute maximums at the stations located below the reservoir in Włocławek. Flow rates observed in Toruń and Tczew were very high, but still lower than in 1962 (before construction of the cascade in Włocławek).

Comparison of hydrographs observed in May and June 2010 at stations in Warsaw, Toruń and Tczew shows the impact of the reservoir in Włocławek on the flood wave shape. The shape of the flood wave below Włocławek differs from the wave shape above the cascade, where the increase rate and the absolute increase value of water levels are higher. However, the period of risk, measured by the duration of water levels above the alarm levels is definitely longer in the stations located below the cascade. The flood wave is flattened and extended while passing through the reservoir and cascade

in Włocławek. This phenomenon is favourable from the point of view of flood actions.

A typical season for the appearance of low-water levels is the summer period (June–July), sometimes extended to the autumn (September–October).

The duration of low-water is very diverse and ranges from 20 days (the period adopted as the minimum in the definition) to 200 days, which is rather rare. Low-water levels of 3–4 months have occurred many times. Analysis of the frequency of occurrence of the minimum annual flow rates shows that most flow rates in Warsaw are in the range of 200–300 m³/s (46.67%), while at the stations in Kępa Polska, Toruń and Tczew the minimum annual flow rates are usually in the range of 300–400 m³/s: 50%, 45% and 38.3%, respectively.

REFERENCES

1. Reports of the National Hydrological – Meteorological Department (PSHM), reports of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMGW-PIB).
2. Sasim M., Walijewski G., Sytuacja hydrologiczno-meteorologiczna i przebieg powodzi w zlewni środkowej i dolnej Wisły [*Hydrological and meteorological situation and the course of the*

floods in the Middle and lower Vistula basin] [in:] Dorzecze Wisły – monografia powodzi maj–czerwiec 2010 [*Vistula basin – monograph of the flood in May – June 2010*], ed. M. Maciejewski, M. Ostojski, T. Walczykiewicz, Warsaw 2011.

3. Sztobryn M., Krzysztofik K., Sytuacja hydrologiczno-meteorologiczna w ujściowym odcinku Wisły [*Hydrological and meteorological situation in the mouth section of the Vistula*] [in:] Dorzecze Wisły – monografia powodzi maj–czerwiec 2010 [*Vistula basin – monograph of the flood in May–June 2010*], ed. M. Maciejewski, M. Ostojski, T. Walczykiewicz, Warsaw 2011.
4. Sztobryn M. i in., Wpływ morza na odpływ wielkich wód Wisły w czerwcu 2010 roku, Powódź 2010 – Forum NT [*Influence of the sea on the outflow of high waters of the Vistula in June 2010, Flood of 2010, Forum NT*], Warsaw 2010, pp. 35–50

Acknowledgements

The authors want to thank the Chief Executive of IMGW-PIB, Mieczysław Ostojski, PhD. Eng. for creating the conditions for inclusion in this valuable publication. In addition, we would like to thank the employees of the Hydrological Forecasts Office at IMGW-PIB in Gdynia, especially Alicja Kańska, M.Sc., and Magda Mielke, M.Sc., for technical assistance in the preparation of the study.

Marzena Sztobryn

Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute
e-mail: Marzena.Sztobryn@imgw.pl

A graduate of the Faculty of Hydraulic Engineering at Gdańsk University of Technology. She is a Doctor of Technical Sciences at the Institute of Hydroengineering of the Polish Academy of Sciences. Senior forecaster and hydrologist, and a long-time head of the Hydrological Forecasts Office of the Maritime Branch in Gdynia, Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. President of the Baltic Ice Department (since 2010). The head of many national and international projects, including framework programs of the European Union, SELF, ESEAS, THESEUS. Co-author of numerous reports and publications in the field of coastal hydrology, sea icing, and climate changes. Lecturer in the Gdynia Maritime school. She is a member of many associations, including the Association of Water and Drainage Engineers and Technicians, the Polish Geophysical Society, the Gdańsk Scientific Society and the American Meteorological Society.

Marianna Sasim

Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute
e-mail: Marianna.Sasim@imgw.pl

She graduated from Warsaw University of Technology in the Faculty of Sanitary and Hydraulic Engineering, Department of Water Engineering (1968). She completed postgraduate studies in the field of water management at Warsaw University of Technology (1971). A long-time employee of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute in Warsaw (since 1967) – senior forecaster and hydrologist. Head of the Central Hydrological Forecasts Office in Warsaw (1999–2009). Head of the Operational Control Centre at the National Hydrological and Meteorological Department since 2009.

Teacher in the School of Water Management in Dębno (1989–1991). Co-author of many publications and monographs on floods. Has participated in many projects and seminars in the field of hydrology. Author of cyclical articles to the journal *Obserwator* (1968–2005). Member of many associations, including the Association of Water and Drainage Engineers and Technicians, the Polish Geophysical Society, and the Polish Association of Hydrologists.

Beata Kowalska

Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute
e-mail: Beata.Kowalska@imgw.pl

A graduate of the Faculty of Hydraulic Engineering at Gdańsk University of Technology. A long-time employee of the Hydrological Forecasts Office of the Maritime Branch in Gdynia, the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. Co-author of numerous reports and publications in the field of hydrology (especially changes in the average and maximum sea level and flood risks in coastal areas). Participant of international research projects in the field of climate changes, protection of coasts and risks of extreme hydrological phenomena, including framework programs of the European Union: SELF, ESEAS, THESEUS. She is responsible for hydrological calculations for Northern Poland in the framework of the project ISOK – Computerized Information System of Country Protection. Member of the Polish Geophysical Society.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 118–124. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Powodzie i susze na dolnej Wiśle

Autorki

Marzenna Sztobryn
Marianna Sasim
Beata Kowalska

Słowa kluczowe

dolna Wisła, powodzie, susze, stany wody

Streszczenie

W pracy przeanalizowano powodzie i susze na dolnej Wiśle na podstawie danych (stany wody i przepływy) zanotowanych na stacjach IMGW-PIB Warszawa, Kępa Polska, Toruń i Tczew. Przedstawiono przyczyny powstawania powodzi i suszy na dolnej Wiśle, wraz z charakterystyką hydrologiczną z lat 1951–2010. Przeanalizowano również dla tego okresu zmienność maksymalnych i minimalnych przepływów rocznych i miesięcznych. Ponadto przeprowadzono badanie zmiany kształtu fali wezbraniowej po przejściu przez zbiornik i stopień we Włocławku, na podstawie hydrogramów z maja i czerwca 2010 roku. Stwierdzono, że fala wezbraniowa wyplaszcza się i wydłuża. Jest to zjawisko korzystne z punktu widzenia prowadzenia akcji przeciwpowodziowej.

Wprowadzenie

Na dolnej Wiśle można wydzielić trzy charakterystyczne części: powyżej zbiornika we Włocławku (reprezentowane przez stację Warszawa oraz Płock/Kępa Polska) poniżej zbiornika we Włocławku (Toruń i Tczew) oraz poniżej Tczewa, części pozostające pod silnym wpływem morza (Świbno). Wisła poniżej Tczewa składa się z odcinka rzeki oraz sztucznego kanału zwanego Przekopem Wisły (poniżej Przegaliny). Na Przekopie Wisły głównymi zagrożeniami są powodzie zatorowe oraz sztormowe. Fale powodziowe, powstałe w górnych odcinkach rzeki, powodują wzrost poziomów wody, jednakże prawdziwe zagrożenie może powstać dopiero w przypadku jednoczesnego nałożenia się fali powodziowej i wezbrania sztormowego bądź zatoru lodowego. Również zjawiska suszy i tzw. niżówek hydrologicznych, powstałych na skutek zjawisk meteorologicznych w dorzeczu górnej i środkowej Wisły, choć powodują obniżenie poziomów wody w ujściowym odcinku rzeki, nie powodują aż tak wielkiego zagrożenia jak powodzie. Charakterystyka hydrologiczna rzeki pomiędzy Warszawą a Tczewem wykazuje podobieństwa pomiędzy poszczególnymi przekrojami; jedynie podczas przechodzenia fali powodziowej przez zbiornik i stopień we Włocławku można zauważyć modyfikację kształtu fali powodziowej.

Charakterystyka danych

W pracy wykorzystano wieloletnie obserwacje (przepływy i stan wody), pochodzące ze stacji wodowskazowych IMGW-PIB (1951–2010). Obserwacje i pomiary – pomimo zmian w technice obserwacji, jak i częstotliwości ich wykonywania – charakteryzują się jednorodnością oraz posiadaniem certyfikatu ISO. W tak długim okresie zmiany były jednak nieuniknione, wymuszone przez zjawiska naturalne, np. zniszczenie wodowskazu podczas powodzi, jak i czynniki zewnętrzne, np. przebudowę hydrotechniczną czy rozwój miast. Dotyczyły one głównie wodowskazów w Warszawie (dodatkowy Warszawa Nadwilanówka) oraz w Płocku (przeniesiony do Kępy Polskiej). W celu zachowania jednorodności serii pomiarowej lub możliwości porównań na stacjach tych były prowadzone równoległe pomiary przez okres minimum 2 lat. W tab. 1 przedstawiono podstawową charakterystykę hydrologiczną, dotyczącą stanów wody zanotowanych na analizowanych stacjach wraz z informacją o rzędnych zer wodowskazów oraz wysokościami stanów alarmowych i ostrzegawczych. Ponadto zamieszczono maksymalne stany zanotowane na analizowanych stacjach podczas powodzi w 2010 roku.

Na stacjach Warszawa Nadwilanówka i Kępa Polska stany osiągnięte podczas powodzi

w 2010 roku były najwyższymi kiedykolwiek zanotowanymi (tzw. absolutne maksimum), a na stacji Warszawa stan wody zanotowany w 2010 roku był jedynie o 7 cm niższy niż z 1960 roku. Natomiast w Toruniu i Tczewie były to najwyższe zaobserwowane stany w XX wieku (absolutne maksima zanotowane na tych stacjach pochodzą z XIX wieku, a więc przed wykonaniem Przekopu Wisły). Jedynie w Świbnie – ze względu na wpływ morza – nie tylko nie zostały przekroczone absolutne maksima z XX wieku, ale nawet stan alarmowy. Opis wpływu morza na odpływ fali powodziowej znajduje się w oddzielnej publikacji [4].

W dalszej części pracy przeanalizowano maksymalne i minimalne przepływy roczne oraz miesięczne dla trzech okresów: przed zbudowaniem stopnia we Włocławku (1951–1967), po zbudowaniu (1968–2010) oraz dla całego rozpatrywanego okresu (1951–2010).

Zagrożenie powodziowe w dorzeczu Wisły

Przyczyną zagrożenia powodziowego w dorzeczu Wisły mogą być intensywne opady deszczu, topniejąca pokrywa śnieżna, zatory śryżowe i lodowe, piętrzenia sztormowe w ujściowym odcinku Wisły. Szadko zdarza się sytuacja, aby wezbraniem objęte było całe dorzecze. Często występowały

Stacja	km biegu rzeki	Rzędna zera [Kr]	Stan alarmowy	Stan ostrzegawczy	Absolutne maksimum	Data absolutnego maksimum	Stan wody zaobserwowany podczas powodzi w 2010 roku	Data maksimum w czasie powodzi w 2010 roku	Absolutne minimum	Data absolutnego minimum
Gdańsk Świbno	938,7	-5,083	680	600	767	16.03.1956	615	11.06.2010	413	10.02.1897
Tczew	907,9	-0,559	820	700	1210	20.03.1816	1040	25.05.2010	166	16.06.1930
Toruń	734,7	31,96	650	530	979	1.03.1871	848	23.05.2010	110	1.12.1892
Kępa Polska/Płock	606,5	57,25	450	420	670	18–19.03.1979, 10.01.1982	740	23.05.2010	134	1.09.1992
Warszawa	513,3	76,08	650	600	787	31.06.1960	780	22.05.2010	68	3.09.1992
Warszawa Nadwilanówka	504,1	76,68	800	750	917	23.06.1970	947	22.05.2010	168	5.08.2007

Tab. 1. Podstawowa charakterystyka hydrologiczna analizowanych stacji

natomiast wezbrania obejmujące znaczne obszary dorzecza, rzędu kilku, a nawet kilkunastu tysięcy kilometrów kwadratowych. Należy zauważyć, że zagrożenie powodziowe na środkowej i dolnej Wiśle może być powodowane nie tylko przez zjawiska zachodzące w środkowej i dolnej części dorzecza [2]. Groźne mogą być również powodzie występujące w dorzeczu górnej Wisły, wywołane intensywnymi opadami w południowej i południowo-wschodniej Polsce. Fale uformowane na górskich dopływach, a następnie na górnej Wiśle, przemieszczając się w dół, powodują zagrożenie na całej długości Wisły, aż do jej ujścia do Bałtyku.

Ogólna charakterystyka zagrożeń Dorzecze górnej Wisły

Rzeki dorzecza górnej Wisły stwarzają największe zagrożenie podczas wezbrań opadowych. Wezbrania roztopowe występują tu rzadko, głównie za sprawą szczególnych warunków meteorologicznych, panujących w górach i na pogórzach na przełomie zimy i wiosny. Dodatnia temperatura powietrza w dzień i ujemna w nocy sprawiają, że woda z topniejącej w ciągu dnia pokrywy śnieżnej zamara za nocą. Izoterma „0” obejmuje stopniowo coraz to wyższe partie zlewni górskich, przez co obszar topnienia pokrywy śnieżnej powiększa się, wydłuża się również czas spływu wód roztopowych. Cały proces topnienia śniegu jest powolny i stopniowy.

Opady deszczu na południu Polski są najczęściej związane z niżami południowo-europejskimi, zasilanymi masami powietrza napływającymi z nad Adriatyku lub rejonu Morza Czarnego. Charakterystyczne jest to, że opady, które powodują największe fale powodziowe w tym rejonie, są zwykle drugim lub trzecim epizodem opadowym. Poprzedzone są one opadami o mniejszym natężeniu, związanymi zazwyczaj z frontem chłodnym i powietrzem polarno-morskim. Na przedgórzu, w dorzeczu górnej Wisły, występują opady wyjątkowo wysokie, co jest związane z tzw. efektem orograficznym powodowanym przez Karpaty.

Rzeki południowo-wschodniej Polski mają swoje źródła w przeważającej większości w górach (w Karpatach, w Górach Świętokrzyskich). Są to rzeki o reżimie górskim i podgórskim, charakteryzujące się bystrzym nurtem, licznymi pływami na całej szerokości rzeki i przełomami oraz stosunkowo małymi głębokościami. Spadki są znaczne, a przepływ dynamiczny, z dużymi prędkościami. Podczas wezbrań następuje bardzo gwałtowny przybór wody. Czas trwania fal wezbraniowych jest krótki, rzędu kilku lub kilkunastu godzin, i jest zależny od czasu trwania opadów. Duża dynamika przepływów wezbraniowych jest przyczyną znacznych zniszczeń powodowanych przez rzeki.

Dorzecze środkowej Wisły

W dorzeczu środkowej Wisły mogą występować wezbrania zarówno opadowe, jak i roztopowe. Intensywne opady w rejonie wyżyn mogą być związane z wędrującymi z nad Atlantyku niżami i towarzyszącymi im frontami atmosferycznymi bądź z niżami z nad południowo-wschodniej Europy, nasyconymi wilgocią śródziemnomorską lub czarnomorską. Sięgają one nad obszar wschodniej Polski, Białorusi i zachodniej Ukrainy. Dodatkowo wyżynny charakter podłoża sprzyja ruchom konwekcyjnym,

co w efekcie prowadzi do intensywnych opadów deszczu.

Rzeki mające swe źródła lub przepływające przez wyżyny: Krakowsko-Częstochowską, Kielecko-Sandomierską i Lubelską są rzekami o reżimie podgórskim, tzn. zwierciadło wody i dolina rzeki mają znaczne spadki, dużą prędkość przepływu i niewielkie głębokości. Czas od wystąpienia opadu do utworzenia się fali wezbraniowej nie jest zbyt długi, rzędu kilkudziesięciu godzin. Fale wezbrań opadowych są dynamiczne, ze znacznymi wzrostami stanu.

Na wyżynach wschodniej Polski pokrywa śnieżna utrzymuje się długo i ma zwykle znaczną grubość. Podczas roztopów zanika dość szybko i często gwałtownie, do czego przyczynia się napływ ciepłych mas powietrza i opady deszczu, nawet niezbyt intensywne. Zasilanie rzek tego regionu jest wówczas znaczne, a charakter rzek sprzyja gwałtowności wezbrań.

Dorzecze dolnej Wisły

Pas nizin północnej Polski zagrożony jest głównie powodziami roztopowymi i roztopowo-opadowymi. Duże powodzie opadowe, obejmujące cały region, zdarzają się bardzo rzadko. Występują natomiast lokalne powodzie opadowe z intensywnych opadów nawalnych.

Na obszarze dorzecza dolnej Wisły zwykle zalega więcej śniegu, silniejsze też są mrozy. W okresie roztopowym, przy napływie ciepłego powietrza z południa i występowaniu nawet niewielkich opadów, śnieg topi się intensywnie, a woda roztopowa zasila rzeki. Szczególnie niebezpieczna sytuacja może wystąpić w dolnych odcinkach Wisły i Bugu, gdzie woda spływająca z górnej części zlewni często napotyka na przeszkody w postaci zatorów lodowych (adwekcja ciepła nad południowe części zlewni przyspiesza topnienie, podczas gdy w partiach północnych nadal mogą się utrzymywać temperatury ujemne). W efekcie następuje spiętrzenie i wystąpienie wody z brzegów.

Opady na obszarze dorzecza dolnej Wisły związane są przeważnie z rozwojem niżu nad Atlantykiem i przemieszczaniem się jego frontów na wschód Europy. Występują wówczas opady frontalne, o zróżnicowanym czasie trwania.

Duże powodzie opadowe są bardzo rzadkie. Mniejsze, w skali jednej lub sąsiadujących ze sobą zlewni, występują, lecz również niezbyt często. Zdecydowanie większą częstotliwość mają powodzie lokalne, wywołane opadami nawalnymi. Szczególnie zagrożony jest pas ciągnący się od okolic Torunia do granicy wschodniej kraju.

Rzeki dorzecza dolnej Wisły charakteryzują się reżimem nizinnym. Mają na ogół bardzo małe spadki, płyną wolno w szeroko, dobrze wykształconych dolinach, w małym stopniu rozmywają brzegi. Zasilane są obficie wodą na wiosnę, podczas roztopów. Wezbrania na rzekach nizinnych mogą trwać przez dłuższy czas, podczas gdy wezbrania opadowe kilka dni, a roztopowe lub roztopowo-opadowe przez kilka tygodni.

Zjawiska lodowe i ich wpływ na przebieg stanów wody

W okresie zimowym, gdy następują znaczne spadki temperatury powietrza, w rzekach pojawiają się różne formy lodu, początkowo śryż i lód brzegowy, następnie stała pokrywa lodowa. Terminy zamarzania rzek

oraz czas utrzymywania się zjawisk lodowych zależą od położenia geograficznego zlewni i charakteru zimy. Przeciętnie jednak najwcześniej, już w listopadzie i grudniu, zamarzają rzeki na południowym wschodzie (górskie dopływy Wisły), na północnym wschodzie i wschodzie Polski. W dorzeczu dolnej Wisły zjawiska lodowe utrzymują się ok. 90 dni, a w dorzeczu środkowej Wisły przeciętnie 40 dni w roku. Zjawiska zanikają zwykle w marcu, a na północnym wschodzie mogą przeciągnąć się do kwietnia.

Powstawaniu zjawisk lodowych towarzyszą na ogół wzrosty stanu wody, a lokalnie tworzą się zatory śryżowe. Również w okresach powstawania pokrywy lodowej następuje piętrzenie wody i lokalne wzrosty, często powyżej stanów ostrzegawczych i alarmowych.

W okresie zanikania zjawisk lodowych, głównie lodu brzegowego i ciągłej pokrywy lodowej, tworzy się kra, która spływając z biegiem rzek często zatrzymuje się na przeszkodach i powoduje piętrzenie wody. Występują lokalne zatory lodowe oraz towarzyszące im wahania i wzrosty stanu wody.

Analiza rocznych przepływów maksymalnych

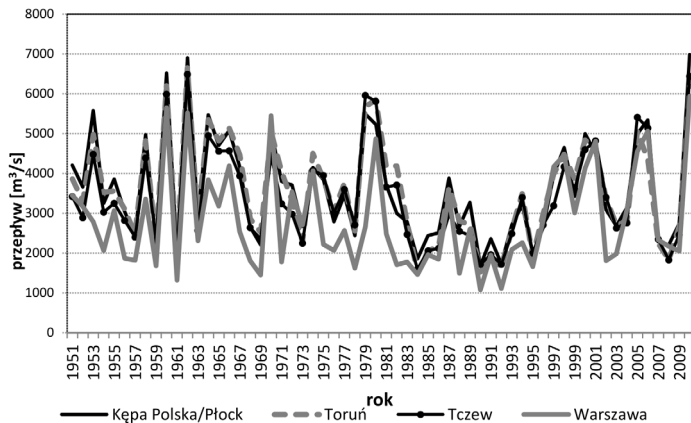
Podstawowym parametrem charakteryzującym reżim hydrologiczny rzeki jest wartość przepływu. Największe zagrożenie powodziowe, jakie wystąpiło podczas pojedynczego roku, jest reprezentowane przez wartość maksymalnego rocznego przepływu.

Na rys. 1 przedstawiono przebiegi maksymalnych rocznych przepływów na stacjach usytuowanych powyżej zbiornika we Włocławku: w Warszawie i Kępie Polskiej/Płocku oraz poniżej zbiornika, w Toruniu i Tczewie. W latach 1951–2010 maksymalne roczne przepływy wody w Warszawie utrzymywały się w przedziale od 1080 m³/s w 1990 roku, do 5940 m³/s w 2010 roku. Przepływy na stacji Kępa Polska były zróżnicowane: od 1680 m³/s w 1990 roku do 6980 m³/s w 2010 roku. Zgodnie z powyższym można zauważyć, że na obu stacjach najniższe wartości z maksimum rocznych oraz absolutne maksima wystąpiły odpowiednio w 1990 oraz 2010 roku. Natomiast maksymalne roczne przepływy na stacjach w Toruniu i Tczewie, poniżej zbiornika we Włocławku, również były skorelowane w czasie i wynosiły odpowiednio dla Torunia 6650 m³/s w 2010 roku, a dla Tczewa 6490 m³/s również w 2010 roku. Najniższy z maksymalnych rocznych przepływów w Toruniu zanotowano w 1984 roku i wyniósł 1500 m³/s, natomiast w Tczewie 1600 m³/s, również w 1984 roku. Najwyższy przepływ na dolnej Wiśle zaobserwowano na stacji Kępa Polska jako równy 6980 m³/s.

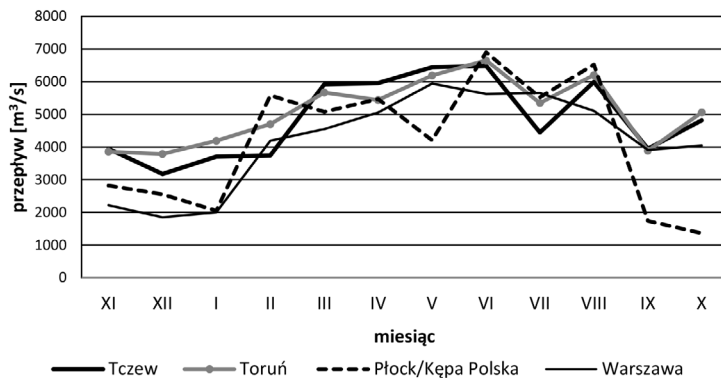
Analiza miesięcznych przepływów maksymalnych

Kolejnym parametrem charakteryzującym powodziowość rzeki są wartości maksymalnych miesięcznych przepływów.

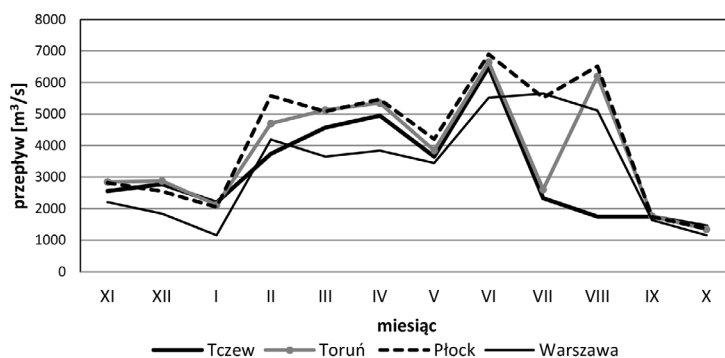
Na rys. 2 przedstawiono rozkłady maksymalnych miesięcznych przepływów wody na czterech ww. stacjach w latach 1950–2010 oraz z podziałem na lata 1951–1967 oraz 1968–2010. Na każdej stacji analizowane przepływy wykazują duże zróżnicowanie w cyklu 12-miesięcznym.



Rys. 1. Maksymalne roczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)



Rys. 2. Maksymalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)



Rys. 3. Maksymalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967)

Pierwsza kulminacja			Druga kulminacja		
Stacja	Wartość	Czas wystąpienia	Stacja	Wartość	Czas wystąpienia
Warszawa	780	22.05.2010, godz. 10.00	Warszawa	743	8.06.2010, godz. 23.00
Kępa Polska	739	23.05.2010, godz. 2.00	Kępa Polska	660	10.06.2010, godz. 0.00
Toruń	848	23.05.2010, godz. 18.00	Toruń	790	10.06.2010, godz. 13.00
Tczew	1042	25.05.2010, godz. 10.00	Tczew	986	12.06.2010, godz. 7.00

Tab. 2. Wartości kulminacji fali powodziowej wraz z godziną wystąpienia na dolnej Wiśle podczas powodzi w 2010 roku

W Warszawie maksymalny roczny przepływ w okresie 1951–2010 wystąpił w maju, natomiast na pozostałych stacjach w czerwcu. Przepływy najmniejsze z maksymalnych miesięcznych zaobserwowano na posterunkach: Warszawa, Toruń i Tczew w grudniu, natomiast w Kępie Polskiej w październiku. W latach 1951–1967 na większości stacji, z wyjątkiem Warszawy, maksymalne miesięczne przepływy zaobserwowano w czerwcu, natomiast w Warszawie w lipcu. Przepływy najniższe zaś z maksymalnych miesięcznych zanotowano w październiku na stacjach Warszawa, Toruń, Tczew oraz w listopadzie na stacji Kępa Polska/Płock (rys. 3).

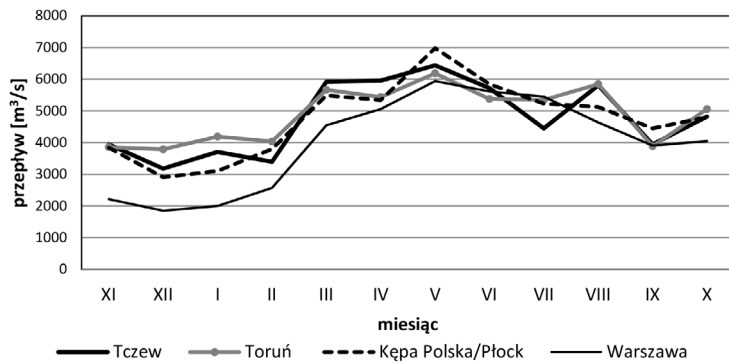
W latach 1968–2010 maksymalne miesięczne stany wody na wszystkich stacjach występowały w maju, natomiast przepływy najniższe z maksymalnych miesięcznych na stacjach Warszawa, Toruń, Tczew i Kępa Polska zaobserwowano w grudniu (rys. 4). Występowanie maksymalnych rocznych przepływów w Warszawie i Kępie Polskiej pokrywa się z terminem katastrofalnej powodzi wiosną 2010 roku. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku tej właśnie powodzi absolutnym maksimum w Warszawie i Kępie Polskiej zdecydowanie nie towarzyszyły absolutne maksima na stacjach usytuowanych poniżej zbiornika we Włocławku. Zaobserwowane przepływy w Toruniu i Tczewie były bardzo wysokie, ale jednak niższe niż w 1962 roku.

Powódź 2010

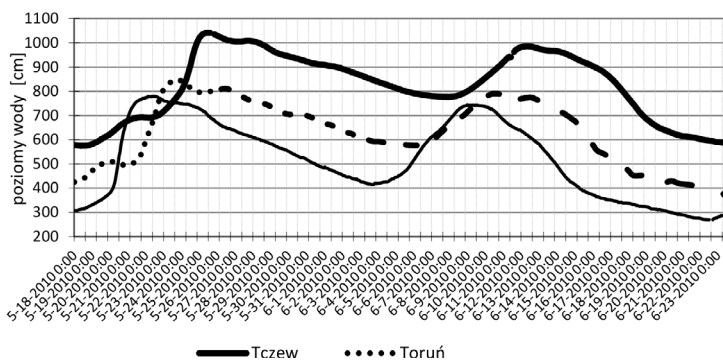
Wieloletnie doświadczenia synoptyków hydrologów IMGW-PIB wskazują na oddziaływanie stopnia we Włocławku na hydrogramy fali powodziowej, zaobserwowane na stacjach położonych poniżej stopnia. W celu oceny poprawności tego stwierdzenia przeanalizowano zmiany stanów wody na stacjach Warszawa, Toruń i Tczew podczas powodzi 2010 roku (rys. 5). Powódź w 2010 roku została wywołana przez obfite opady w dorzeczu górnej Wisły. Szczegółowy opis powodzi znajduje się w monografii [3].

Podczas powodzi w maju–czerwcu 2010 roku zostały przekroczone absolutne maksima stanów wody z XX wieku na stacjach Warszawa Nadwiłanówka, Kępa Polska, Toruń i Tczew (tab. 1). W tab. 2 podano wartości kulminacji fali powodziowej wraz z godziną ich wystąpienia.

Czas utrzymywania się stanów powyżej stanów alarmowych wynosił podczas pierwszej kulminacji 72 godz. w Warszawie, 249 godz. w Toruniu i aż 279 godz. w Tczewie. Podczas drugiej kulminacji czasy te były dużo niższe: w Warszawie 96 godzin, w Toruniu 180 godzin i 138 godzin w Tczewie. Porównanie to, wraz z analizą kulminacji fali (rys. 5), wskazuje, że po przejściu przez zbiornik i stopień we Włocławku relatywnie obniża się wartość bezwzględnego wzrostu stanów wody oraz wydłuża czas utrzymywania się stanów wody powyżej stanów alarmowych. Szybkość wzrostu stanów wody podczas pierwszej kulminacji wyniósł w Warszawie aż 7 cm/godz. (licząc od 4 UTC dnia 20 maja do osiągnięcia kulminacji), podczas gdy najszybsze tempo wzrostu poziomów (do 8 UTC dnia 21 maja) przekroczyło 12 cm/godz. W Toruniu wartości te wyniosły odpowiednio 6 cm/godz. oraz 7,6 cm/godz.



Rys. 4. Maksymalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010)



Rys. 5. Zmiany stanów wody zanotowane na stacjach IMGW-PIB położonych wzdłuż dolnej Wisły podczas powodzi w 2010 roku

W Tczewie zanotowane wartości wzrostów były zbliżone do toruńskich: 5,5 cm/godz. oraz 8,4 cm/godz. Podczas drugiej kulminacji obliczono szybkość wzrostu poziomów wody przed osiągnięciem wartości kulminacji, wyniosły one dla Warszawy 3,3 cm/godz., Torunia 2,3 cm/godz. oraz Tczewa 2,4 cm/godz. Podczas obu kulminacji wzrost stanów wody przed osiągnięciem kulminacji był wyższy dla stacji położonej powyżej Włocławka niż dla położonych poniżej. Nieco wyższe wartości obliczone dla Tczewa w porównaniu z Toruniem są skutkiem bliskości morza.

Reasumując, na podstawie analizy powodzi z 2010 roku można stwierdzić, że kształt fali powodziowej poniżej Włocławka różni się od kształtu fali powyżej, gdzie szybkość wzrostu, jak i bezwzględna wartość wzrostu stanów wody są wyższe. Natomiast czas trwania zagrożenia, mierzony czasem utrzymywania się poziomów powyżej stanów alarmowych, jest zdecydowanie dłuższy dla stacji położonych poniżej stopnia. Oznacza to, że podczas przechodzenia fali powodziowej przez zbiornik i stopień we Włocławku fala powodziowa wypłaszcza się i wydłuża. Jest to zjawisko korzystne z punktu widzenia prowadzenia akcji przeciwpowodziowej.

Susze

Z hydrologicznego punktu widzenia bardzo ważną informacją jest analiza niskich stanów wody, tzw. niżówek hydrologicznych, które są następstwem suszy atmosferycznej i glebowej, spowodowane brakiem bądź niedoborem opadów w dorzeczu.

W Polsce susze występują najczęściej wtedy, gdy w okresie wegetacyjnym występuje brak dostatecznej ilości opadów oraz napływa bardzo ciepłe i suche powietrze. Jeśli w okresie poprzedzającym występował niedobór opadów, możemy mówić o tzw. suszy atmosferycznej. Następstwem utrzymującej się przez dłuższy czas suszy atmosferycznej jest susza glebowa i hydrologiczna. Podczas suszy glebowej wysycha wierzchnia warstwa gleby, ustaje wzrost roślin lub wręcz rośliny usychają.

Efektom suszy hydrologicznej jest niżówka hydrologiczna. Ustaje wówczas zasilenie rzek wodą z opadów atmosferycznych, obniża się zwierciadło wód powierzchniowych, często poniżej poziomu przyjmowanego za graniczny dla utrzymania ekosystemów rzecznych.

Długotrwałe utrzymywanie się niskiego stanu i przepływu (poniżej przyjętego stanu granicznego, np. średniego niskiego przepływu, SNQ) nazywamy niżówką hydrologiczną. W Polsce wyróżnia się dwa rodzaje niżówek: niżówki letnie, przeciągające się często na okres jesieni i związane wówczas niżówkami letnio-jesiennymi i niżówkami zimowe. Niżówki letnie, poprzedzone suszą atmosferyczną i glebową, rozpoczynają się wówczas, gdy rzeki zasilane są wyłącznie lub prawie wyłącznie przez wody podziemne. Występowanie niżówek zimowych jest związane z pojawieniem się zjawisk lodowych na rzekach i dłuższymi okresami ujemnej temperatury powietrza, kiedy zatrzymany zostaje spływ powierzchniowy, a dopływ wód podziemnych jest mocno ograniczony.

Czas trwania niżówek jest bardzo zróżnicowany i waha się od 20 dni (okres przyjęty z definicji jako minimalny) do ponad 200 dni, co zdarza się raczej rzadko. Wielokrotnie występowały niżówki 3–4 miesiące.

Typową porą pojawiania się niżówek jest okres letni (czerwiec–lipiec), niekiedy przedłużający się na jesień (wrzesień–październik). Niżówki wczesnozimowe i zimowe są charakterystyczne przede wszystkim dla rzek górskich. Jednak zdarzają się wyjątki, np. długotrwała niżówka zimowa w 1954 roku, która objęła niemal cały kraj, nie pojawiła się na górskich dopływach Wisły i niektórych górskich dopływach Odry.

Zakończenie niżówki letniej związane jest z wystąpieniem znacznych opadów atmosferycznych. Opady przeciętne lub nieznacznie przewyższające normy powodują krótkotrwałe podniesienie stanu wody w rzekach, lecz nie odbudowują zasobów wodnych zlewni. Dopiero znaczne i długotrwałe opady, szczególnie w okresie jesienno-zimowym, są w stanie uzupełnić niedobory wody. Koniec niżówki zimowej następuje gwałtownie w wyniku wzrostu temperatury powietrza i spływu wód roztopowych.

Ogólna charakterystyka najgroźniejszych susz

W ostatnich latach bardzo sucha była pierwsza połowa lat 90. oraz rok 2003 i 2006. Szczególnie dotkliwa, a na wielu obszarach katastrofalna była susza w 1992 roku. Charakteryzowały ją wielotygodniowe upały, niedobór opadów, wyschnięta gleba (spadek plonów, brak pasz i w konsekwencji wzrost cen żywności), wzrost liczby pożarów (spłonęły dziesiątki tysięcy hektarów lasów). Skutkami hydrologicznymi suszy w 1992 roku były m.in. wyjątkowo niski przepływ i stan wody w rzekach (na wielu posturkach stan wody spadł poniżej wartości dotychczas obserwowanych), bardzo niski poziom wód podziemnych (na południu zwierciadło wód podziemnych spadło 100 i więcej centymetrów poniżej wartości średnich), niedostateczne zasilenie studni gospodarskich. Wystąpiła realna groźba całkowitego opróżnienia zbiornika Sulejów na Pilicy, zaopatrującego w wodę Łódź i Tomaszów Mazowiecki.

Analiza rocznych przepływów minimalnych

W pracy przeanalizowano zmienność minimalnych rocznych przepływów na stacjach usytuowanych powyżej zbiornika we Włocławku: w Warszawie i Kępie Polskiej/Płocku oraz poniżej zbiornika, w Toruniu i Tczewie (rys. 6).

W rozważanym okresie (1951–2010) minimalne roczne przepływy wody w Warszawie zawierały się w przedziale od 108 m³/s w 1960 roku do 333 m³/s w 1981 roku. Minimalne roczne przepływy na stacji Kępa Polska były zróżnicowane od 162 m³/s w 1962 roku do 552 m³/s w 1981 roku. Można zauważyć, że na obu stacjach maksymalne wartości minimum rocznych wystąpiły w tym samym roku – 1981. Natomiast maksymalne roczne przepływy na stacjach w Toruniu i Tczewie, poniżej zbiornika we Włocławku, wyniosły odpowiednio dla Torunia od 218 m³/s w 1992 roku do 662 m³/s w 1981 roku, a dla Tczewa od 264 m³/s w 1960 roku do 754 m³/s w 1981

roku. Na omawianym odcinku rzeki Wisły najniższy przepływ zaobserwowano na stacji Warszawa i był on równy $108 \text{ m}^3/\text{s}$ (1960). Rok 1981 charakteryzował się występowaniem na wszystkich czterech stacjach przepływów najwyższych z minimalnych rocznych. Występowanie minimalnych rocznych przepływów w Kępie Polskiej w 1962 roku oraz w Toruniu w 1992 roku podkreśla zmniejszenie zasobów wodnych podczas susz zaobserwowanych w tych latach.

Analiza miesięcznych przepływów minimalnych

Na każdej stacji miesięczne minimalne przepływy wykazują duże zróżnicowanie w cyklu 12-miesięcznym. Na rys. 7 przedstawiono rozkłady minimalnych miesięcznych przepływów wody na czterech stacjach w latach 1950–2010 oraz z podziałem na lata 1951–1967 oraz 1968–2010.

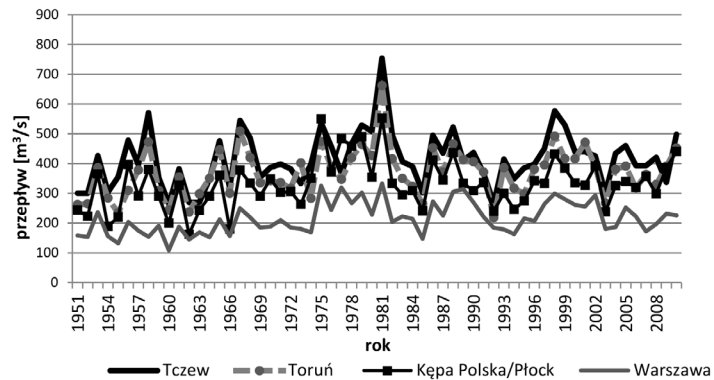
W latach 1951–2010 na trzech rozpatrywanych stacjach absolutne przepływy minimalne zostały odnotowane w grudniu, wynosiły odpowiednio: dla Warszawy $108 \text{ m}^3/\text{s}$, dla Kępy Polskiej $162 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz dla Tczewa $264 \text{ m}^3/\text{s}$. Natomiast w Toruniu absolutne minimum miesięczne zanotowano we wrześniu i wynosiło ono $218 \text{ m}^3/\text{s}$. Najwyższe wartości w tych zbiorach odnotowano: dla Warszawy $260 \text{ m}^3/\text{s}$ w maju, dla Kępy Polskiej $420 \text{ m}^3/\text{s}$ również w maju, dla Torunia $464 \text{ m}^3/\text{s}$ w kwietniu oraz w Tczewie $504 \text{ m}^3/\text{s}$ w maju.

Na rys. 8 przedstawiono przebieg minimalnych miesięcznych przepływów na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967). Na wszystkich rozważanych stacjach minimalne przepływy wystąpiły w grudniu i wynosiły: w Warszawie $108 \text{ m}^3/\text{s}$, w Kępie Polskiej $162 \text{ m}^3/\text{s}$, w Toruniu $234 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz w Tczewie $264 \text{ m}^3/\text{s}$. Natomiast najwyższe z minimalnych rocznych przepływów wystąpiły w kwietniu i wynosiły odpowiednio: w Warszawie $314 \text{ m}^3/\text{s}$, w Kępie Polskiej $638 \text{ m}^3/\text{s}$, w Toruniu $709 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz w Tczewie $720 \text{ m}^3/\text{s}$.

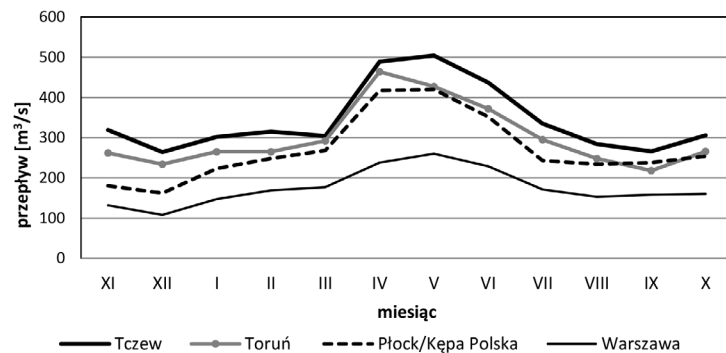
Na rys. 9 przedstawiono przebieg minimalnych miesięcznych przepływów na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010). Na dwóch stacjach minimalne miesięczne przepływy wystąpiły we wrześniu i wynosiły: w Kępie Polskiej $238 \text{ m}^3/\text{s}$, w Toruniu $218 \text{ m}^3/\text{s}$, w Tczewie $266 \text{ m}^3/\text{s}$. Natomiast w Warszawie minimalny miesięczny przepływ odnotowano w styczniu i wyniósł on $147 \text{ m}^3/\text{s}$. Najwyższe z minimalnych miesięcznych przepływy wystąpiły w maju (Warszawa i Kępa Polska) oraz w kwietniu (Toruń) i w styczniu (Tczew). Przepływy te wynosiły odpowiednio: w Warszawie $271 \text{ m}^3/\text{s}$, w Kępie Polskiej $420 \text{ m}^3/\text{s}$, w Toruniu $464 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz $566 \text{ m}^3/\text{s}$ w Tczewie.

Podsumowanie

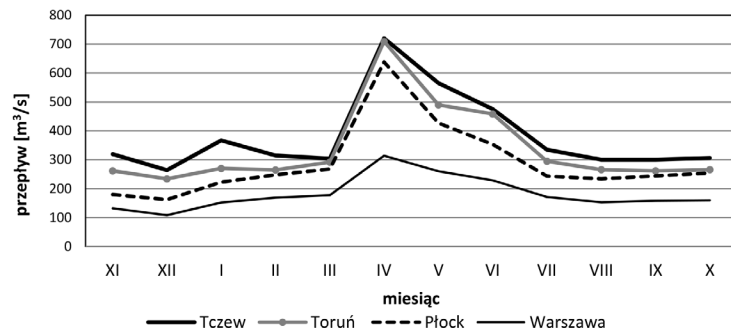
W pracy przedstawiono przyczyny powstania powodzi i suszy na dolnej Wiśle. Przeanalizowano zmienność maksymalnych i minimalnych przepływów miesięcznych i rocznych w latach 1951–2010. Występowanie maksymalnych rocznych przepływów w Warszawie i Kępie Polskiej pokrywa się z terminem katastrofalnej powodzi wiosną 2010 roku. W tej



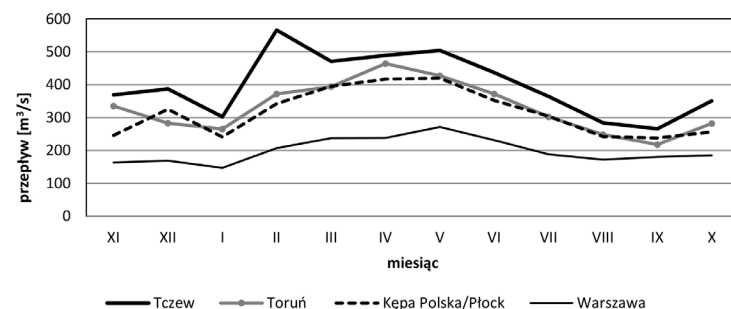
Rys. 6. Minimalne roczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)



Rys. 7. Minimalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–2010)



Rys. 8. Minimalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1951–1967)



Rys. 9. Minimalne miesięczne przepływy na stacjach: Warszawa, Kępa Polska/Płock, Toruń, Tczew (1968–2010)

właśnie powodzi absolutnym maksimum w Warszawie i Kępie Polskiej nie towarzyszyły absolutne maksima na stacjach usytuowanych poniżej zbiornika we Włocławku. Zaobserwowane przepływy w Toruniu i Tczewie były bardzo wysokie, ale jednak niższe niż w 1962 roku (a więc przed wybudowaniem stopnia we Włocławku).

Porównanie hydrogramów zaobserwowanych w maju i czerwcu 2010 roku na stacjach Warszawa, Toruń i Tczew wykazało wpływ zbiornika i stopnia we Włocławku na kształt fali powodziowej. Kształt fali powodziowej poniżej Włocławka różni się od kształtu fali powyżej stopnia, gdzie szybkość wzrostu, jak i bezwzględna wartość wzrostu stanów wody są wyższe. Natomiast czas trwania zagrożenia, mierzony czasem utrzymywania się stanów powyżej stanów alarmowych jest zdecydowanie dłuższy dla stacji położonych poniżej stopnia. Podczas przechodzenia fali powodziowej przez zbiornik i stopień we Włocławku fala powodziowa wypłaszcza się i wydłuża. Jest to zjawisko korzystne z punktu widzenia prowadzenia akcji przeciwpowodziowej.

Typową porą pojawiania się niżówek

jest okres letni (czerwiec–lipiec), niekiedy przedłużający się na jesień (wrzesień–październik).

Czas trwania niżówek jest bardzo zróżnicowany i waha się od 20 dni (okres przyjęty z definicji jako minimalny) do ponad 200 dni, co zdarza się raczej rzadko. Wielokrotnie występowały niżówki 3–4 miesiące. Analiza częstości występowania minimalnych rocznych przepływów w przedziałach wartości wykazała, że w Warszawie najczęściej przepływy zawierają się w przedziale 200–300 m³/s (46,67%), natomiast na stacjach Kępa Polska, Toruń, Tczew minimalne roczne przepływy najczęściej występują w przedziałach 300–400 m³/s, odpowiednio: 50%, 45% oraz 38,3%.

Podziękowania

Autorki dziękują dyrektorowi naczelnemu IMGW-PIB dr. hab. inż. Mieczysławowi Ostojkiemu za stworzenie warunków umożliwiających włączenie się do tej cennej publikacji. Ponadto dziękują serdecznie pracownikom Biura Prognoz Hydrologicznych IMGW-PIB w Gdyni, a w szczególności p. mgr Alicji Kańskiej

i mgr Magdzie Mielke za pomoc techniczną w przygotowaniu pracy.

Bibliografia

1. Raporty PSHM, raporty IMGW-PIB.
2. Sasim M., Walijewski G., Sytuacja hydrologiczno-meteorologiczna i przebieg powodzi w zlewni środkowej i dolnej Wisły [w:] Dorzecze Wisły – monografia powodzi maj–czerwiec 2010, red. M. Maciejewski, M. Ostojski, T. Walczykiewicz, Warszawa 2011.
3. Sztobryn M., Krzysztofik K., Sytuacja hydrologiczno-meteorologiczna w ujściowym odcinku Wisły [w:] Dorzecze Wisły – monografia powodzi maj–czerwiec 2010, red. M. Maciejewski, M. Ostojski, T. Walczykiewicz, Warszawa 2011.
4. Sztobryn M. i in., Wpływ morza na odpływ wielkich wód Wisły w czerwcu 2010 roku, Powódź 2010 – Forum NT, Warszawa 2010, s. 35–50

Marzenna Sztobryn

dr inż

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

e-mail: Marzenna.Sztobryn@imgw.pl

Absolwentka Wydziału Hydrotechniki Politechniki Gdańskiej. Doktorat z nauk technicznych obroniła w Instytucie Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk. Starszy synoptyk hydrolog i wieloletni kierownik Biura Prognoz Hydrologicznych Oddziału Morskiego w Gdyni, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Przewodnicząca Bałtyckich Służb Lodowych (od 2010). Kierowniczka wielu krajowych i międzynarodowych projektów, w tym programów ramowych Unii Europejskiej SELF, ESEAS, THESEUS. Współautorka licznych raportów i publikacji z zakresu hydrologii brzegowej, zlodzenia morza oraz zmian klimatu. Wykładowczyni w Szkole Morskiej w Gdyni. Członkini wielu stowarzyszeń, m.in. Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Wodnych i Melioracyjnych, Polskiego Towarzystwa Geofizycznego, Gdańskiego Towarzystwa Naukowego i American Meteorological Society.

Marianna Sasim

mgr inż.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

e-mail: Marianna.Sasim@imgw.pl

Absolwentka Politechniki Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Sanitarnej i Wodnej, Oddział Budownictwa Wodnego (1968). Studia podyplomowe z zakresu gospodarki wodnej odbyła na Politechnice Warszawskiej (1971). Długoletnia pracownica IMGW-PIB w Warszawie (od 1967) – starszy synoptyk hydrolog. Kierowniczka Centralnego Biura Prognoz Hydrologicznych w Warszawie (1999–2009). Od 2009 roku kierowniczka Centrum Nadzoru Operacyjnego Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej.

Pedagog w Technikum Gospodarki Wodnej w Dębem (1989–1991). Współautorka wielu opracowań i monografii powodziowych. Uczestniczka wielu projektów i seminariów z zakresu hydrologii. Autorka cyklicznych artykułów do gazety „Obserwator” (1968–2005). Członkini wielu stowarzyszeń, m.in. Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Wodnych i Melioracyjnych, Polskiego Towarzystwa Geofizycznego, Stowarzyszenia Hydrologów Polskich.

Beata Kowalska

mgr inż.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

e-mail: Beata.Kowalska@imgw.pl

Absolwentka Wydziału Hydrotechniki Politechniki Gdańskiej. Wieloletnia pracownica Biura Prognoz Hydrologicznych Oddziału Morskiego w Gdyni, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Współautorka licznych raportów i publikacji z zakresu hydrologii (zwłaszcza zmian średniego i maksymalnego poziomu morza oraz zagrożeń powodziowych terenów nadmorskich). Uczestniczka międzynarodowych projektów badawczych z dziedziny zmian klimatycznych, ochrony brzegów i zagrożeń ekstremalnymi zjawiskami hydrologicznymi, w tym programów ramowych Unii Europejskiej SELF, ESEAS, THESEUS. Odpowiedzialna za obliczenia hydrologiczne dla północnej Polski w ramach projektu ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju. Członkini Polskiego Towarzystwa Geofizycznego.