

HYDRON

ul. Jastrzębowskiego 22/14
02-786 Warszawa**EKSPERTYZA WPŁYWU PIĘTRZENIA WODY
NA JAZIE W KM 27+801 RZEKI BYSTRZYCY DLA POTRZEB MEW
NA TERENY PRZYLEGŁE DO RZEKI W ZASIĘGU COFKI PIĘTRZENIA.**

Zamawiający: Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Lublinie
ul. Leszka Czarnego 3, 29-610 Lublin

Obiekt: Jaz na rz. Bystrzyca w km 27+801 (km 27+458)

Zawartość opracowania: Ekspertyza

Lokalizacja: woj. lubelskie, miasto Lublin

Umowa Nr LU.RUZ.1/2021

egz.

<i>Funkcja</i>	<i>Imię i Nazwisko:</i>	<i>Data:</i>	<i>Podpis:</i>
<i>Autorzy:</i>	<i>dr inż. Piotr Król</i> <i>upr. bud. St-72/89, Wa-1246/94</i> <i>upr. geol. VI-0349</i> <i>mgr inż. Bartłomiej Dobrzelewski</i> <i>upr. bud. MAZ/0271/POOK/10</i> <i>upr. geol. VI-0394, V-1509</i>	<i>XII</i> <i>2021</i>	

WARSZAWA 2021

Spis treści

1. WSTĘP.....	2
1.1 Podstawa i zakres opracowania.....	2
1.2 Wykaz wykorzystanych materiałów.....	2
1.2.1 Akty prawne.....	2
1.2.2 Podręczniki i publikacje.....	2
1.2.3 Decyzje, orzeczenia i wyroki administracyjne.....	3
2. OMÓWIENIE ZADANIA.....	3
3. POMIARY GEODEZYJNE W STREFIE COFKI PIĘTRZENIA.....	4
4. ANALIZA WPŁYWU PIĘTRZENIA RZEKI NA WODY POWIERZCHNIOWE.....	5
4.1 Natężenie deszczu nawalnego.....	5
4.2 Odpływy miarodajne ze zlewni.....	7
4.3 Zdolność hydrauliczna odbiorników.....	9
4.4 Analiza wyników.....	9
5. ANALIZA WPŁYWU PIĘTRZENIA RZEKI NA WODY PODZIEMNE.....	10
5.1 Założenie wyjściowe.....	10
5.2 Obserwacje piezometryczne położenia zwierciadła wód gruntowych.....	10
5.2.1 Analiza warunków gruntowo – wodnych.....	10
5.2.2 Analiza wyników.....	11
5.3 Modelowanie numeryczne przepływu wód gruntowych z wykorzystaniem modelu Modflow..	12
5.3.1 Charakterystyka modelu Modflow.....	12
5.3.2 Założenia struktury i parametrów modelu.....	15
5.3.3 Analiza wyników.....	15
6. WNIOSKI.....	16

Spis rysunków

Rys. 1. Mapa pogładowa

Rys. 2 Plan sytuacyjny

Rys. 3 Profil rzeki Bystrzycy w zasięgi cofki piętrzenia

Rys. 4.1 – 4.6 Metryki piezometrów

Rys. 5 Przekrój piezometryczny

Rys. 6 Wykres zmienności ciśnień piezometrycznych

Rys. 7 Wyniki modelowania numerycznego przepływu wód gruntowych

Rys. 7.1 Mapa hydroizopiez dla stanu bez piętrzenia

Rys. 7.2 Mapa hydroizopiez dla stanu po spiętrzeniu

Rys. 7.3 Mapa różnic ciśnień piezometrycznych

1. WSTĘP

1.1 Podstawa i zakres opracowania

Niniejsze opracowanie wykonane zostało na zlecenie Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie ul Żelazna 59A, 00-848 Warszawa – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Lublinie, ul. Leszka Czarnego 3, 20-610 Lublin w ramach umowy nr LU.RUZ.1/2021 z dnia 11 marca 2021 roku. Przedmiotem opracowania jest „Ekspertyza wpływu piętrzenia wody na jazie w km 27+801 rzeki Bystrzycy dla potrzeb MEW na tereny przyległe do rzeki w zasięgu cofki piętrzenia”.

1.2 Wykaz wykorzystanych materiałów

1.2.1 Akty prawne

- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. „Prawo Wodne”;
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. „Prawo Budowlane”;
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. „Prawo geologiczne i górnicze”;
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o zagospodarowaniu przestrzennym;
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie;
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.

1.2.2 Podręczniki i publikacje

- Chiang W. H., Kinzelbach W. „Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution” Hamburg – Zurich 1998
- Harbaugh A. W., McDonald M. G. „User’s Dokumentation for Modflow – 96, an update to the U. S. Geological Survey modular finite – difference ground – water flow model” USGS Open – File Report, 1966.
- Mrugała Sz. „Zmiany normy opadów atmosferycznych w Lublinie (1951 – 2000)” Annales Universitas Marie Curie – Skłodowska, Lublin – Polonia, Vol. LXV2 Sectio B, 2010.
- Sawicki W. „Wodociągi i kanalizacje” PWRiL, 1976
- Szczegółowa mapa geologiczna Polski z objaśnieniami w skali 1 : 50 000. Arkusz nr749 – Lublin
- Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000 z objaśnieniami. Arkusz nr 749 Lublin
- Profile otworów archiwalnych z zasobu PIG – PIB

1.2.3 Decyzje, orzeczenia i wyroki administracyjne

Decyzje, orzeczenia i wyroki administracyjne dostarczone przez Zamawiającego:

- Operat wodnoprawny na budowę i eksploatację małej elektrowni wodnej oraz na szczególne korzystanie z wód rzeki Bystrzycy w km 27+458 dla jej potrzeb. Lublin, czerwiec 2012 r.
- Instrukcja gospodarowania wodą na szczególne korzystanie z wód rzeki Bystrzycy dla potrzeb „Małej elektrowni wodnej”. Lublin, czerwiec 2012 r.
- Uzupełnienie do operatu wodnoprawnego na budowę i eksploatację małej elektrowni wodnej oraz na szczególne korzystanie z wód rzeki Bystrzycy w km 27+458 dla jej potrzeb. Lublin, wrzesień 2013 r.
- Uzupełnienie Nr 2 do operatu wodnoprawnego na budowę i eksploatację małej elektrowni wodnej oraz na szczególne korzystanie z wód rzeki Bystrzycy w km 27+458 dla jej potrzeb. Lublin, grudzień 2013 r.
- Mazurkiewicz M. „Opinia n/t wpływu przywrócenia piętrzenia wody przez jaz w km 27+458 rzeki Bystrzycy na stan nawodnienia gruntów w rejonie zabudowań przy ulicy Wapiennej w Lublinie. Warszawa, 2014 r.

2. OMÓWIENIE ZADANIA

Przedmiotem ekspertyzy jest analiza wpływu stałego piętrzenia na jazie w korycie Bystrzycy na warunki odpływy ze zlewni wód powierzchniowych i podziemnych. Powyższe zagadnienia były przedmiotem wielokrotnych analiz, decyzji administracyjnych i wyroków sądowych w okresie ostatnich dziesięciu lat. W niniejszej ekspertyzie nie sposób odnieść się szczegółowo do wszystkich ustaleń. Poniżej zostaną przytoczone najważniejsze elementy.

Zlokalizowany w km 27+458 Bystrzycy jaz piętrzący został wybudowany pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia na potrzeby działającej wtedy Cukrowni Lubelskiej. Światło budowli wynosi $2 \times 4 + 2 \times 4.3$ m, łącznie 16.6 m. Dwa skrajne przęsła tworzą przelewy stałe, dwa środkowe ruchome, zamykane zasuwami stalowymi. Wysokość piętrzenia wynosi $H = 2.4$ m. Rzędne piętrzenia wynoszą odpowiednio

NPP – 178.50 m n.p.m.,

MaxPP – 179.00 m n.p.m.,

MinPP- 177.50 m n.p.m.

Gospodarka wodna obiektu zakładała utrzymywanie normalnego poziomu piętrzenia w okresie kampanii cukrowniczej oraz minimalnego w pozostałym okresie. Po zaprzestaniu działalności i w dalszym okresie likwidacji cukrowni jaz stracił swoje pierwotne znaczenie.

W dniu 04.08.2011 roku, w ramach umowy między Dyrektorem WZMiUW w Lublinie a PPHU Hydrowat S.C. Nr 374/2011 obiekt został wdzierżawiony na potrzeby małej energetyki wodnej. Opracowany został w czerwcu 2012 roku Operat Wodnoprawny i Instrukcja Gospodarowania Wodą na potrzeby energetycznego wykorzystania piętrzenia. Dla potrzeb właściwego spadku założono stałe utrzymywanie wysokiego poziomu piętrzenie. W operacie pominięto oddziaływanie na wody powierzchniowe i podziemne terenów przyległych. W rezultacie opracowane zostały uzupełnienia nr 1 (wrzesień 2013 r) oraz nr 2 (grudzień 2013 r), w których przeprowadzono analizy hydrogeologiczne przepływu wód podziemnych oraz dopływy powierzchniowe. W prawym skrajnym przęśle, nad stałym przelewem zainstalowany został turbozespół lewarowy. Zadanie powiększono o zamiar budowy na brzegu lewym powyżej przekroju piętrzenia powierzchniowego ścieku prefabrykowanego oraz rurociągu o średnicy $d = 300$ mm z wylotem $d = 500$ mm poniżej budowli. Zadaniem dodatkowych elementów miało być odwodnienie terenów w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej oraz ogródków działkowych „Bystrzyca”. Urządzenia te, ujęte w pozwoleniu wodnoprawnym, nie zostały jednak wykonane. W zamian w międzywalu wykonano rurociąg o średnicy $d = 200$ mm na odcinku $2/3$ całkowitej długości i $d = 300$ mm na odcinku wylotowym $1/3$ całkowitej długości. Wlot z podtapianej śluzy wałowej, wylot zlokalizowane na wypadzie na ścianie piętrzącej lewego skrajnego przęśla na rzędnej 169.00 m n.p.m, w zasięgu spadania strugi przelewowej. Powyższe odstępstwo spowodowało unieważnienie pozwolenia wodnoprawnego. Decyzją WSA w Lublinie sprawa została skierowana do ponownego rozpatrzenia.

Ponowne, stałe piętrzenie na jazie jest przedmiotem sporu pomiędzy inwestorem a mieszkańcami rejonu ulic Wapiennej i Dzierżawnej. Biorąc pod uwagę zdecydowaną różnicę zdań stron postępowania oraz dużą wrażliwość społeczną problemu w niniejszej ekspertyzie dokonano ponownych, niezależnych analiz wpływu piętrzenia na wody gruntowe i powierzchniowe terenów przyległych. Z tych samych względów w analizach starano się zastosować co najmniej dwa niezależne podejścia.

3. POMIARY GEODEZYJNE W STREFIE COFKI PIĘTRZENIA

Pomiary w strefie cofki piętrzenia wykonano w dniu 10 września 2021 roku metodą RTK GPS, z uwzględnieniem poprawek z najbliższych stacji bazowych. W dniu pomiarów na jazie utrzymywane było pełne piętrzenie z rzędną wody górnej 170.03 m n.p.m. Pomiarami objęto położenie lustra wody oraz rzędne wylotów do koryta rzeki. Zasięg cofki piętrzenia ustalono poprzez lokalizację zmiany spadku zwierciadła wody. W dniu pomiarów średni spadek w strefie cofki wynosił $i = 0.85\%$, natomiast powyżej cofki $i = 1.81\%$. Długość cofki jest wynikiem rzędnej piętrzenia, ale również

zależy od wielkości przepływów. W dniu pomiarów wielkość ta wyniosła $L = 705.2$ m. Wyniki pomiarów przedstawiono na załączonym profilu podłużnym rzeki. Ponadto stwierdzone rzędne wylotów zestawiono w tabeli poniżej.

Tab. 1 Zestawienie rzędnych wylotów

Typ obiektu	Km rz. Bystrzycy	Brzeg rzeki	Średnica wylotu [m]	Rz. wylotu [m n.p.m.]	Rz. z. wody [m n.p.m.]
śluza wałowa Kd	27+524	lewy	0,6	170,42	170,04
ujęcie wody	27+558	prawy	1,2	168,7	170,04
śluza wałowa	27+622	lewy	0,6	169,25	170,05
śluza wałowa	27+636	prawy	0,8	169,33	170,05
śluza wałowa Kd	27+708	lewy	1,0	170,26	170,05
śluza wałowa	27+801	lewy	0,8	169,32	170,06
śluza wałowa	27+972	prawy	0,8	169,55	170,08
śluza wałowa Kd	28+048	prawy	1,8	169,99	170,08
śluza wałowa	28+151	lewy	0,8	169,50	170,09

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że piętrzenie na jazie ma istotny wpływ na drożność wylotów ponieważ część z nich zostaje podtopiona. Najistotniejsze jest jedna to, że podtopione zostają wyloty śluz wałowych odprowadzających wody opadowe z terenów w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej oraz ogródków działkowych „Bystrzyca” .

4. ANALIZA WPŁYWU PIĘTRZENIA RZEKI NA WODY POWIERZCHNIOWE

Analizy wykonano dla dwóch zlewni cząstkowych, zlokalizowanych na lewym brzegu Bystrzycy, które wskutek podtopienia wylotów śluz wałowych będą miały utrudnione warunki odpływu:

- zlewni zabudowy mieszkalnej przy ul. Wapiennej i Dzierżawnej,
- zlewni ogródków działkowych „Bystrzyca”.

Wielkości odpływów ze zlewni wyznaczono metoda transformacji opadu nawalnego w odpływ. Identyczną metodykę zastosowano w analizach archiwalnych, w tym w operatach wodnoprawnych.

4.1 Natężenie deszczu nawalnego

Wielkość średnich opadów rocznych z wielolecia określono na podstawie obserwacji meteorologicznych na stacji Uniwersytetu M. C. Skłodowskiej w Lublinie w latach 1951 – 2000 [].

$H = 547$ mm

Wartość A wyznaczono ze wzoru Błaszczyka

$$A = 6.631 \cdot H^{2.5} \cdot C$$

gdzie:

H - średni opad roczny [mm].

C - liczba lat przypadająca na jedno zdarzenie deszczu

Otrzymane wartości współczynnika A dla określonego prawdopodobieństwa pojawienia się zestawiono w poniższej tabeli.

Tab. 2 Zestawienie wartości A dla określonego prawdopodobieństwa pojawienia się deszczu

P [%]	A
100	443.51
50	558.79
20	758.39
10	955.51
5	1203.88
1	2058.59

Natężenie deszczu nawalnego wyznaczono z zależności

$$q = \frac{A}{t^{0.88}} \quad [\text{l/s/ha}]$$

gdzie:

t - czas trwania deszczu [min]

Zgodnie z obowiązującymi standardami przyjęto czas trwania deszczu miarodajnego

$$t = 15 \text{ min}$$

Wartości intensywności deszczu dla określonego prawdopodobieństwa pojawienia się zestawiono poniżej.

Tab. 3 Zestawienie wielkości intensywności deszczu nawalnego w zależności od prawdopodobieństwa pojawienia się.

P [%]	q [l/s/ha]
100	72.85
50	91.78
20	124.57
10	156.95
5	197.75
1	338.14

Analizowany teren charakteryzują szczególnie niekorzystne warunki: niecki o utrudnionym odpływie, głębokie piwnice, gesta zabudowa. Dlatego też standardy wymagają przyjęcia:

- prawdopodobieństwo zaistnienia zjawiska dla sieci deszczowej $p = 10\%$ (teoretycznie raz na dziesięć lat),

- czas koncentracji terenowe $t_k = 2$ min.

Tym samym intensywność deszczu nawalnego wyniesie:

$$q = 156.95 \text{ l/s/ha.}$$

W analizach archiwalnych przyjęto arbitralnie $q = 14$ l/s/ha. Jest to wartość nierealna dla warunków klimatycznych Polski. Najprawdopodobniej popełniono błąd w lokalizacji znaku dziesiętnego. Błąd ten miał wpływ na wyniki dalszych analiz.

4.2 Odpływy miarodajne ze zlewni

Wielkości odpływów z deszczu miarodajnego wyznaczono z zależności:

$$Q = \psi \phi q F$$

gdzie:

- ψ – współczynnik spływu
- ϕ – współczynnik opóźnienia odpływu
- q – intensywność deszczu nawalnego [l/s/ha]
- F – powierzchnia zlewni.

W obliczeniach przyjęto:

$\psi = 0.6$ dla w rejonu ulic Wapiennej i Dzierżawnej i 0.2 dla ogródków działkowych „Bystrzyca”

$F = 5.5$ ha dla w rejonu ulic Wapiennej i Dzierżawnej i 11.8 ha dla ogródków działkowych „Bystrzyca”.

Są to wielkości zbliżone do przyjętych w analizach archiwalnych. Natomiast ponownej analizy wymaga wartość współczynnika opóźnienia odpływu. W analizach archiwalnych arbitralnie przyjęto $\phi = 0.48$, co wydaje się być wartością istotnie zaniżoną. Dlatego też wartość tę wyznaczono ponownie przy wykorzystaniu dwóch niezależnych metod.

W pierwszej kolejności zastosowano metodę natężeń granicznych. Współczynnik opóźnienia odpływu w tym podejściu definiowany jest następująco:

$$\phi = Q_t/Q_{tp} = q_t/q_{tp}$$

gdzie:

t – czas trwania deszczu nawalnego

t_p – czas przepływu wody z najbardziej oddalonego punktu.

Przyjmując odległość najdalszego punktu od wyloty $L = 400$ m oraz prędkość wody w kanale $V_p = 1.5$ m/s czas przepływu wyniesie:

$$t_p = 400/1.5 = 267 \text{ s} = 4.44 \text{ min}$$

Przyjmując czas retencji kanałowej równy 20% czasu przepływu oraz wyznaczony wcześniej czas koncentracji terenowej $t_k = 2$ min, czas trwania deszczu wyniesie:

$$t = 1.2 t_p + t_k = 1.2 \times 4.44 + 2 = 7.33 \text{ min.}$$

W konsekwencji:

$$q_t = \frac{955.51}{4.44^{0.667}} = 252.78 \text{ l/s/ha}$$

$$q_{tp} = \frac{955.51}{7.33^{0.667}} = 352.98 \text{ l/s/ha}$$

Tym samym współczynnik opóźnienia odpływu wyniesie:

$$\phi = \frac{252.78}{352.98} = 0.716$$

W drugiej kolejności współczynnik opóźnienia odpływu wyznaczono z zależności:

$$\phi = \frac{1}{1.5 F}$$

gdzie:

$$n = 4 - 8$$

F – powierzchnia zlewni [ha]

Biorąc pod uwagę charakterystykę zlewni przyjęto $n = 5$. Tym samym:

$$\phi = 0.71$$

W dalszych analizach przyjęto $\phi = 0.71$.

Wartości odpływów chwilowych ze zlewni o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia zestawiono poniżej.

Tab. 4 Zestawienie odpływów ze zlewni rejonu ulic Wapiennej i Dzierżawnej o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia.

P [%]	Q [l/s]
100	170.68
50	215.03
20	291.87
10	367.73
5	463.32
1	792.26

Tab. 5 Zestawienie odpływów ze zlewni ogródków działkowych „Bystrzyca”
o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia.

P [%]	Q [l/s]
100	122.07
50	153.78
20	208.78
10	263.05
5	331.43
1	566.72

4.3 Zdolność hydrauliczna odbiorników

Projektowane i częściowo wykonane kanały przerzutowe na dolne stanowisko jazu mają spadek $i = 0.2\%$ i średnicę $d = 0.2$ i 0.3 m. Zastosowano rury gładkie z tworzyw sztucznych. Przepustowość określono z wykorzystaniem formuły Manning’a dla warunków pełnego wypełnienia przekroju i przepływu bezciśnieniowego. Wyniki obliczeń dla wybranych średnic przewodu zestawiono poniżej.

Tab. 6 Przewodność hydrauliczna przewodów

Średnica przewodu [mm]	Przepływ [l/s]
200	15.26
300	47.3
500	188
600	300

4.4 Analiza wyników

Biorąc pod uwagę warunki terenowe jako odpływ miarodajny ze zlewni należy przyjąć odpływ o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 10\%$ (teoretycznie pojawiający się raz na 10 lat). Istniejące śluzy wałowe, odprowadzające do koryta rzeki wody z analizowanych zlewni, są na granicy wydolności. Należy jednak pamiętać, że projektowane były na inne warunki zagospodarowania terenów zawala. Stałe podniesienie piętrzenia w górnym stanowisku jazu spowoduje podtopienie wylotów i istotne ograniczenie wydatku. Projektowane i częściowo wykonane przewody zrzutowe na dolne stanowisko jazu o średnicach $d = 200$ i 300 mm mają zdolność hydrauliczną wielokrotnie za małą. Nie są nawet w stanie odprowadzić odpływów dorocznych ($p = 100\%$).

5. ANALIZA WPŁYWU PIĘTRZENIA RZEKI NA WODY PODZIEMNE

5.1 Założenie wyjściowe

Analizę przeprowadzono niezależnie dwiema metodami.

- Obserwacje piezometryczne
- Modelowania numerycznego

5.2 Obserwacje piezometryczne położenia zwierciadła wód gruntowych

5.2.1 Analiza warunków gruntowo – wodnych

Metodyka prac

W celu rozpoznania warunków hydrogeologicznych na obu brzegach rzeki, w osi przekroju piętrzenia, zainstalowano po trzy piezometry. Szczegółową lokalizację i konstrukcję piezometrów przedstawiono na załączonych metrykach. Instalację urządzeń poprzedzono wykonaniem otworów wiertniczych. Zastosowano przewoźną wiertnicę ze świdrami spiralnymi. Rodzaj i stan nawiercanych gruntów badano makroskopowo. Zainstalowane piezometry poddano cotygodniowym, systematycznym obserwacjom.

Morfologia terenu

Geograficznie analizowany obszar zlokalizowany jest następująco:

- Megaprowincja – Poza Alpejska Europa Środkowa
- Prowincja – Wyżyny Polskie
- Podprowincja – Wyżyna Lubelsko – Lwowska
- Makroregion – Wyżyna Lubelska
- Mezoregion – Płaskowyż Świdnicki.

Przekrój piętrzenia zlokalizowany jest w korycie Bystrzyce w centrum miasta. Mimo lokalizacji obszar nie jest wysoce zurbanizowany. Teren prawobrzeżny stanowi rozległy obszar uprzednio zabudowany obiektami Cukrowni Lubelskiej, aktualnie niezabudowany. Poniżej jazu zlokalizowano obiekty areny sportowej. Na prawym brzegu zlokalizowano osiedle niskiej i chaotycznej zabudowy wzdłuż ulicy Wapiennej i Dierzawnej. Powyżej przekroju piętrzenia występuje obszar ogródków działkowych. Dolina Bystrzycy jest płaska i rozległa. Brak naturalnych i antropogenicznych wyniesień terenu.

Budowa geologiczna

Dolinę rzeczną wypełniają holocenijskie osady rzeczne. Stanowią je głównie utwory aluwialne, wykształcone w postaci piasków średnich z przewarstwieniami namulów gliniastych i piasków

drobnych. Przykryte są utworami madowymi, wykształconymi w postaci namulów organicznych (gliniastych) i torfów oraz glin pylastych. Bezpośrednio na powierzchni, w strefie lewego brzegu przy wale przeciwpowodziowym oraz w strefie prawego brzegu na całej analizowanego obszaru, występują nasypu nie budowlane, uformowane z namulów gliniastych z domieszkami piasków gliniastych, glin i gruzu. Warstwy utworów holocenijskich nie przewiercono w czasie instalowania piezometrów. Według danych archiwalnych poniżej zalegają utwory plejstocenijskie, wykształcone w postaci glin pylastych zwięzłych i glin pylastych pochodzenia zastoiskowego.

Warunki hydrogeologiczne

Na analizowanym obszarze występuje jeden poziom wodonośny w warstwie aluwialnych piasków holocenijskich. Zasilany jest infiltracyjnie wodami opadowymi oraz napływającymi z wysoczyzny, drenowany przez koryto rzeki. Poza obszarem międzywała zwierciadło wody napięte przez mało przepuszczalne warstwy mad i nasypów nie budowlanych.

Charakterystyka geotechniczna

Z punktu widzenia celu niniejszej ekspertyzy istotna jest przepuszczalność gruntów. Wydzielono dwie warstwy geotechniczne, dla których określono wartości współczynników filtracji:

- piaski aluwialne $k = 15 \text{ m/d}$
- mady organiczne i nasypu nie budowlane $k = 1 \times 10^{-4} \text{ m/d}$

5.2.2 Analiza wyników

Wyniki pomiarów piezometrycznych, w postaci zmian wielkości ciśnień w czasie, przedstawiono załączonym w części rysunkowej diagramie, na którym pokazano również wielkości opadów atmosferycznych i położenia zwierciadła wody w korycie Bystrzycy. Ponadto dla dwóch ustalonych charakterystycznych stanów: bez piętrzenia z dnia 14.06.2021 oraz pełnego piętrzenia z dnia 13.09.2021, położenie zwierciadła wód gruntowych przedstawiono na przekroju piezometrycznym.

Interpretację zmian ciśnień w czasie może nieco utrudniać fakt, że próbne piętrzenie na jazie rozpoczęto zaraz po wystąpieniu intensywnych opadów na terenie Lublina. Mogło dojść do nałożenia się oddziaływań. Mimo to rezultaty pomiarów są oczywiste. W przypadku prawego brzegu oddalone od koryta piezometry P-5 i P-5 nie wykazują wyraźnej korelacji z opadami, ani też poziomem wody w rzece. Obserwowane zmiany rzędu 0.5 m są zmianami naturalnymi i wynikają z napływu z wysoczyzny, gdzie infiltracja jest bardziej ułatwiona. Natomiast piezometr P – 4, zlokalizowany najbliżej koryta wykazuje te same tendencje, niemniej wyraźniej zareagował na opad. Wszystkie piezometry zlokalizowane na brzegu lewym pozostają pod wpływem opadów. Mimo utrzymywania piętrzenia na jazie mierzone wartości ciśnień malały. Najdalej zlokalizowany piezometr P-1 okresowo

wykazywał niższe wartości niż piezometr zlokalizowany bliżej koryta P-2. Stwierdzono, że w okresie pomiarowym w okolicy piezometru P-1 realizowane było odwodnienie.

W strefie obu brzegów, poza obszarem międzywala, zwierciadło wód gruntowych pozostaje napięte przez warstwy mad i nasypów budowlanych. W każdych warunkach rzeka Bystrzyca wykazuje charakter drenujący w stosunku do wód gruntowych terenów przyległych. Oddziaływanie piętrzenia na obu brzegach zanika w odległości nie większej niż 80 m. W linii pierwszej zabudowy ulic Wapiennej i Dzierżawnej, w wyniku piętrzenia, napięte zwierciadło wody gruntowej podnosi się zaledwie o 0.3 m, to jest o wielkość mniejszą niż wahania sezonowe. Pozostaje na głębokości 1.9 m, to jest bezpiecznej dla obiektów budowlanych.

Obserwacje piezometryczne wykazały, że piętrzenie rzeki Bystrzycy pozostaje bez wyraźnego, negatywnego wpływu na poziom wód gruntowych terenów przyległych.

5.3 Modelowanie numeryczne przepływu wód gruntowych z wykorzystaniem modelu Modflow

5.3.1 Charakterystyka modelu Modflow

Obliczenia układu zwierciadła wody w sąsiedztwie piętrzenia rzeki Bystrzycy przeprowadzono z wykorzystaniem programu obliczeniowego Processing Modflow. Program ten jest stosowany do symulacji przepływu wód podziemnych w skali lokalnej lub regionu w zróżnicowanych warunkach hydrogeologicznych. Wynikiem obliczeń jest rozkład ciśnień i przepływów wód podziemnych, uzyskiwany poprzez przybliżone rozwiązanie różniczkowego równania filtracji, opisującego zmienną w przestrzeni i w czasie wysokość hydrauliczną, którego postać jest następująca:

$$\frac{d}{dx} \left(T_x \frac{dH}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(T_y \frac{dH}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(T_z \frac{dH}{dz} \right) - W = S \frac{dh}{dt}$$

gdzie:

- przewodności warstwy wodonośnej w kierunkach: x, y, z [L^2T^{-1}]

zdefiniowane jako:

$$T = \frac{k \cdot m}{H - h} \quad \text{– dla przepływu w warstwie wodonośnej o zwierciadle napiętym}$$

$$T = k \quad \text{– dla przepływu w warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym}$$

k- współczynnik filtracji [LT^{-1}]

m- miąższość warstwy wodonośnej [L]

H- wysokość hydrauliczna [L]

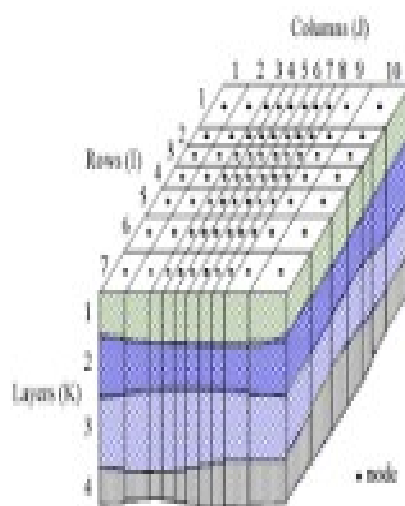
h- rzędna spągu warstwy wodonośnej [L]

W- zasilanie [LT^{-1}]

S- pojemność wodna [-]

Równanie różniczkowe filtracji jest zapisywane w postaci uproszczonej w programie MODFLOW z wykorzystaniem prawa zachowania masy. Konsekwencją zastosowania tego prawa jest zastąpienie ciągłego systemu hydrogeologicznego systemem dyskretnym, składającym się z prostopadłościennych bloków obliczeniowych. Bloki obliczeniowe stanowią układ wierszy, kolumn i warstw o ustalonych wymiarach (rys.1)

Przeprowadzenie symulacji opiera się na zachowaniu bilansu masy wody dla każdego bloku obliczeniowego i w konsekwencji dla całego układu bloków. Napełnienie każdego bloku (położenie zwierciadła wody w nim) jest uzależnione od wartości dopływów do bloku z bloków sąsiednich (sześć bloków) oraz z tzw. źródeł zewnętrznych: opadów atmosferycznych, dopływów lub odpływów z drenów, pompowni, zbiorników wodnych, nawodnień itp.



Rys.1. Przykładowy system wód podziemnych,
reprezentowany przez 10 kolumn, 10 rzędów i 4 warstwy obliczeniowe

Wiersze i kolumny dobierane są tak, aby pokrywać w planie całość modelowanego obszaru. Wymiar kolumny i wiersza jest uwarunkowany zadaną precyzją obliczeń oraz występującymi warunkami hydrogeologicznymi np. obszarami dużych spadków hydraulicznych, ujęć wody. Liczba warstw modelu jest równa liczbie dominujących warstw geologicznych (utworów) lub ważniejszych warstw wodonośnych i rozdzielających - słabo przepuszczalnych.

Zastosowanie modelu MODFLOW wymaga określenia obszaru rozwiązań oraz przeprowadzenia schematyzacji warunków przepływu wód podziemnych. Obszar rozwiązań jest określany w zależności od celu stosowania modelu oraz jest uwarunkowany budową systemu hydrogeologicznego. Granice obszaru rozwiązań są najczęściej przyjmowane zgodnie z przebiegiem

naturalnych granic systemów hydrogeologicznych takich jak: ciekły, zbiorniki wodne, wododziały, bariery nieprzepuszczalne. Możliwe jest także przyjęcie granic umownych, które opisuje się warunkami brzegowymi odpowiedniego rodzaju.

Po określeniu obszaru rozwiązań wymagane jest przeprowadzenie schematyzacji, która obejmuje podział systemu krążenia wód podziemnych na warstwy obliczeniowe. Celem schematyzacji jest zgeneralizowanie rzeczywistego układu hydrogeologicznego, w zakresie tych jego elementów i parametrów, które decydują o przebiegu zjawiska przepływu wody.

W zależności od celu stosowania modelu oraz dokładności rozpoznania warunków hydrogeologicznych schemat obliczeniowy przyjmowany jest dla skali lokalnej lub regionalnej. W skali lokalnej tworzone są modele o wysokiej dokładności odzwierciedlenia budowy geologicznej, lecz zarazem wysoce skomplikowane pod względem parametryzacji. W takich modelach warstwę obliczeniową przypisuje się indywidualnie każdej warstwie litologicznej rozpoznanej badaniami hydrogeologicznymi. Wówczas możliwe są szczegółowe badania przepływu wód w skomplikowanych warunkach hydrogeologicznych, jednakże wymagają one przeprowadzenia identyfikacji i kalibracji dużej liczby parametrów. Dzięki takim modelom przeprowadza się dokładną analizę charakterystyk hydrogeologicznych systemów o złożonej lub nietypowej budowie. W modelach o skali lokalnej ważniejsze formy hydrogeologiczne, np. poziomy wodonośne, są reprezentowane przez kilka lub kilkanaście warstw obliczeniowych. Możliwość skonstruowania modeli dokładnych „warstwa po warstwie” jest uwarunkowana stopniem dokładności rozpoznania hydrogeologicznego.

W skali regionalnej tworzone są modele hydrogeologiczne zlewni, dorzecza lub regionu geograficznego o dużym stopniu generalizacji warunków przepływu, bez odzwierciedlenia lokalnej zmienności budowy geologicznej. W takich modelach dokonuje się ogólnego podziału systemu na warstwy wodonośne i nieprzepuszczalne i przypisuje się każdej z nich odrębną warstwę obliczeniową. Wówczas jedna warstwa obliczeniowa reprezentuje od kilku do kilkunastu warstw litologicznych łącznie, natomiast pełen model systemu krążenia wód podziemnych składa się jedynie z kilku warstw obliczeniowych. Modele tego typu odznaczają się mniejszą dokładnością, natomiast posiadają prostą budowę. W modelach regionalnych wymagana jest identyfikacja oraz kalibracja mniejszej liczby parametrów przepływu wód podziemnych. Modele takie nazywa się modelami efektywnymi, które odbiegają swoją strukturą od systemu rzeczywistego, natomiast pozwalają na rozwiązywanie problemów hydrogeologicznych z wystarczającą precyzją.

Model Processing Modflow znalazł zastosowanie w praktyce do prognoz zmian warunków wodnych na skutek oddziaływania na system wód podziemnych źródeł zasilania i drenażu takich jak:

rzeki i rowy, drenaże, bariery i przesłony filtracyjne, zbiorniki wodne, ujęcia wody. Możliwe jest także zdefiniowanie infiltracji opadów atmosferycznych oraz strat wody w postaci parowania terenowego.

5.3.2 Założenia struktury i parametrów modelu

Numeryczne badania modelowe wykonano dla obszaru w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej, zlokalizowanego na lewym brzegu Bystrzycy. Analizowano dwa stany wody w rzece:

- brak piętrzenia, zwierciadło wody na rzędnej 169.20 m n.p.m.,
- piętrzenie w korycie rzeki do rzędnej 170.11 m n.p.m.

Zasięg oddziaływania piętrzenia wyznaczono z zależności Sichardt'a

$$R = 10.2 \cdot H \cdot \sqrt{k}$$

Przyjmując:

$$H = 1.9 \text{ m,}$$

$$k = 15 \text{ m/d}$$

otrzymano:

$$R = 10.2 \cdot 1.9 \cdot \sqrt{15} = 75.06 \text{ m}$$

Wyznaczony zasięg oddziaływania jest porównywalny do obserwowanego w naturze (omówionego wcześniej).

Na granicach analizowanego obszaru filtracji zadano warunki brzegowe:

- stałego ciśnienia – Warunek Dirichlet'a – w linii brzegowej Bystrzycy oraz na granicy oddziaływania
- zerowego gradientu dopływu – warunek Neuman'a - w liniach prostopadłych do rzeki

Budowę i przepuszczalność ośrodka przyjęto w oparciu o rozpoznanie z instalacji piezometrów. W modelu uwzględniono dwie warstwy geotechniczne:

- warstwę wodonośną z gruntów niespoistych,
- warstwę wierzchnią uformowaną z mało przepuszczalnych utworów madowych i antropogenicznych.

5.3.3 Analiza wyników

Wyniki badań modelowych w postaci izolinii ciśnień piezometrycznych (hydroizobat) zarówno dla stanu bez piętrzenia, jak i w warunkach piętrzenia przedstawiono na załączonych rysunkach. Ponadto na kolejnej mapie przedstawiono izolinie różnic ciśnień wywołanych spiętrzeniem rzeki. Z analizy map wynika, że oddziaływanie na poziom wód gruntowych jest ograniczone i zanika w odległości ok. 75 – 80 od linii brzegowej. W najbardziej niekorzystnym miejscu, w linii zabudowy najbliższej rzeki, przyrost ciśnienia wynosi 0.3 m. Zwierciadło wody jest napinane przez powierzchniową warstwę utworów mało przepuszczalnych i układa się co najmniej 1.9 m poniżej powierzchni terenu. Zarówno na etapie braku piętrzenia jak i w warunkach piętrzenia Bystrzyca zachowuje funkcje drenowania terenów przyległych. Potwierdza to w pełni wyniki obserwacji

piezometrycznych. Wartości ciśnień wyznaczone w modelowaniu i pomierzone w strefie piezometrów P2 i P3 zestawiono w poniższej tabeli

Tab. 7 Zestawienie wartości ciśnień

Data pomiaru	Stan rzeki	Numer piezometru	Pomiar w terenie	Model numeryczny
14.06.2021	169.20	P2	169.70	169.70
		P3	169.55	169.55
13.09.2021	170.11	P2	169.90	169.90
		P3	169.87	169.87

Wyniki modelowania numeryczne dla terenu w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej są tożsame z wynikami pomiarów w naturze.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania, pomiary, obliczenia i analizy upoważniają do sformułowania następujących wniosków z podziałem na zagadnienia.

1. Wpływ piętrzenia na cofkę.

1.1 Zasięg cofki piętrzenia jazu zależy od wysokości piętrzenia, jak również od przepływów w rzece.

W dniu pomiarów wynosił $L = 705.2$ m.

1.2 W zasięgu cofki podtopionych zostaje część wylotów do koryta rzeki.

1.3 Piętrzenie na jazie ma istotny wpływ na drożność wylotów.

2. Wpływ piętrzenia na wody powierzchniowe.

2.1 Miarodajne odpływy z deszczy nawalnych z obszaru w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej wynoszą $Q = 367.73$ l/s.

2.2 Miarodajne odpływy z deszczy nawalnych z obszaru ogródków działkowych „Bystrzyca” wynoszą $Q = 263.05$ l/s.

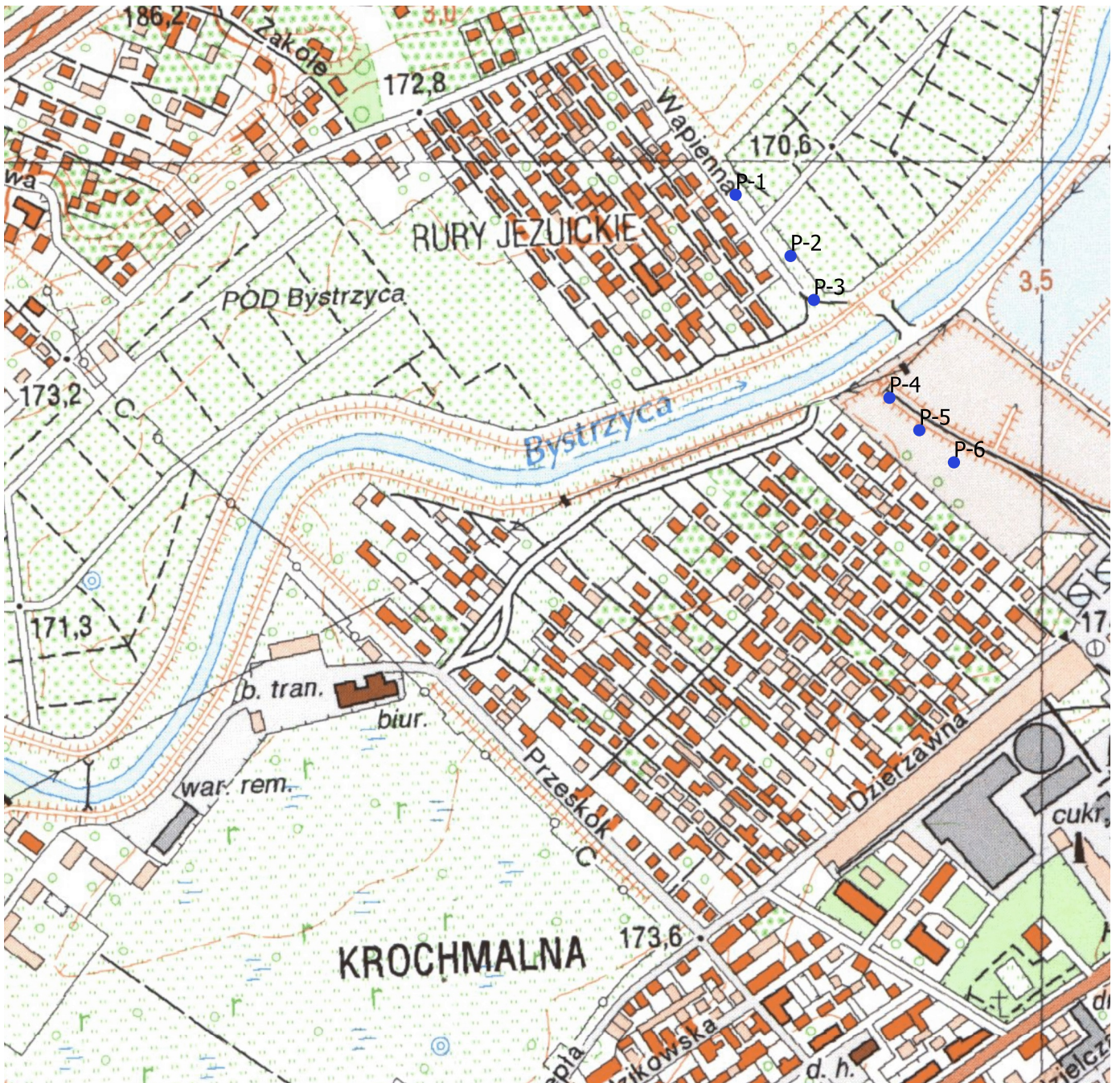
2.3 W obu przypadkach śluzy wałowe, przez które odprowadzane są odpływy, są na granicy wydolności.

2.4 Piętrzenie wody na jazie ma istotny wpływ na warunki odprowadzania wód opadowych z terenów przyległych.

2.5 Przywrócenie pełnego piętrzenia na jazie wymaga wcześniejszego, skutecznego odprowadzenia wód opadowych z terenów zawala.

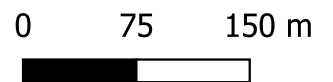
3. Wpływ piętrzenia na wody podziemne.

- 3.1 Zarówno w warunkach bez piętrzenia, jak i z piętrzeniem rzeka Bystrzyca zachowuje charakter drenujący w stosunku do wód gruntowych terenów przyległych.
- 3.2 Poza strefą międzywał w obu przypadkach i na obu brzegach zwierciadło wód gruntowych pozostaje napięte przez warstwę mad i nasypów.
- 3.3 Maksymalny zasięg oddziaływania piętrzenia wynosi 75 do 80 metrów i w ograniczony sposób sięga w obszar zabudowy w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej.
- 3.4 W pierwszej linii zabudowy w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej przyrost napiętego zwierciadła wód gruntowych wynosi $\Delta H = 0.3$ m.
- 3.5 Po spiętrzeniu wód na jazie minimalna głębokość do napiętego zwierciadła wód gruntowych wynosi 1.9 m.
- 3.6 Spiętrzenia wód Bystrzycy do analizowanego poziomu, w związku z instalacją MEW, praktycznie pozostaje bez wpływu na reżim wód gruntowych terenów przyległych.
4. Ocena skuteczności projektowanych i zrealizowanych odwodnień.
- 4.1 Drożność hydrauliczna odwodnienia przyjętego w operacie wodnoprawnym (nie zrealizowanego) wynosi $Q = 47.3$ l/s i jest niewystarczająca dla potrzeb odwodnienia zawala.
- 4.2 Drożność hydrauliczna zrealizowanego odwodnienia z terenów w rejonie ulic Wapiennej i Dzierżawnej wynosi zaledwie 15.26 l/s i jest dalece niewystarczająca. Nie jest nawet w stanie odprowadzić odpływów dorocznych ($p = 100\%$).
- 4.3 Zarówno projektowane jak i zrealizowane elementy odwodnienia nie są skuteczna w warunkach przywrócenia pełnego piętrzenia na jazie.



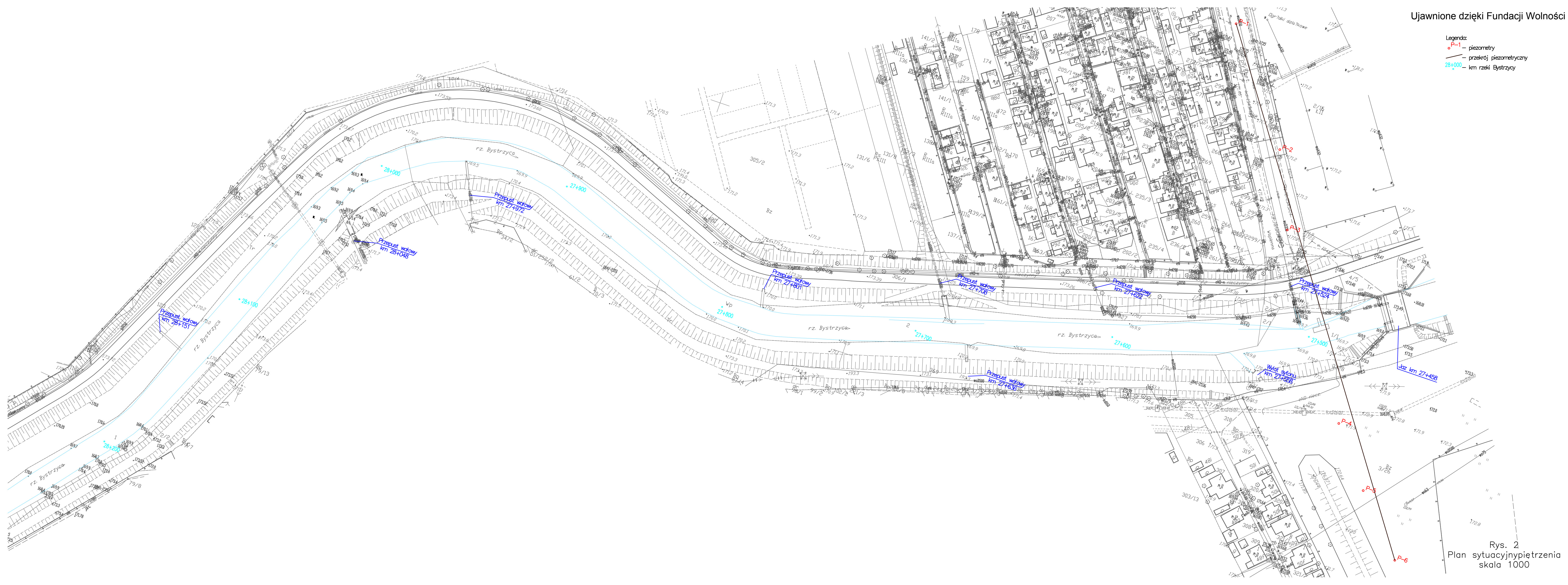
LEGENDA:

- Piezometry

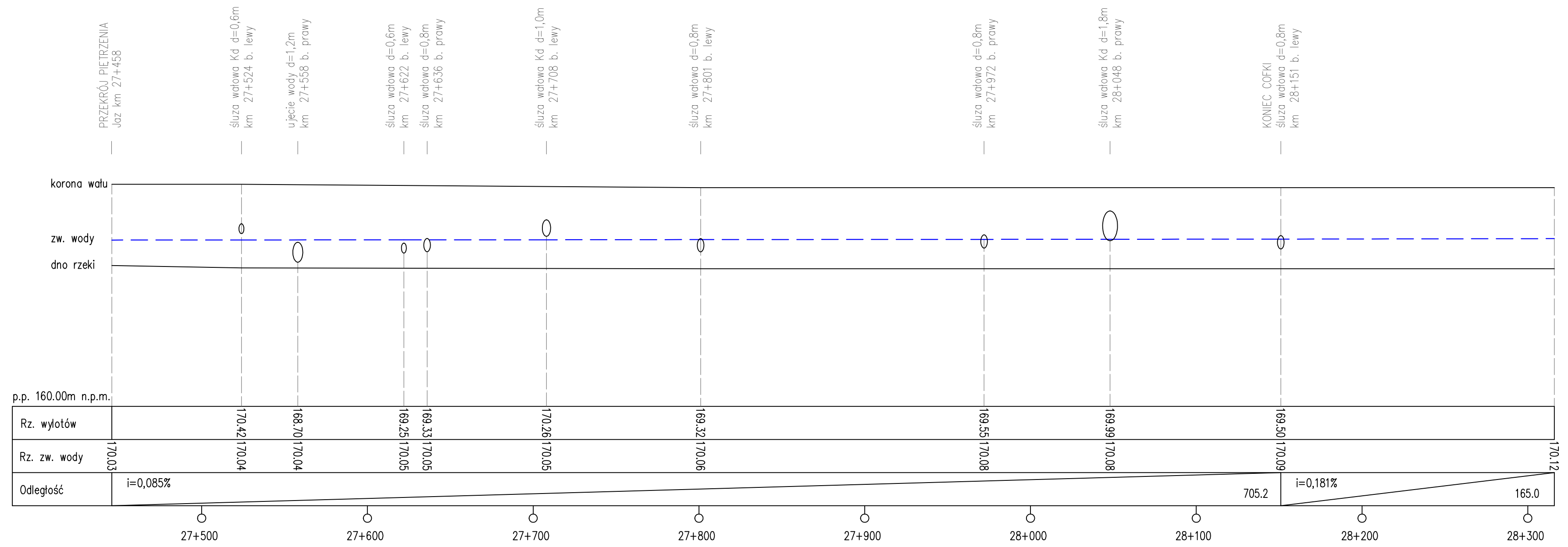


Rys.1
Mapa lokalizacyjna
skala 1:5000

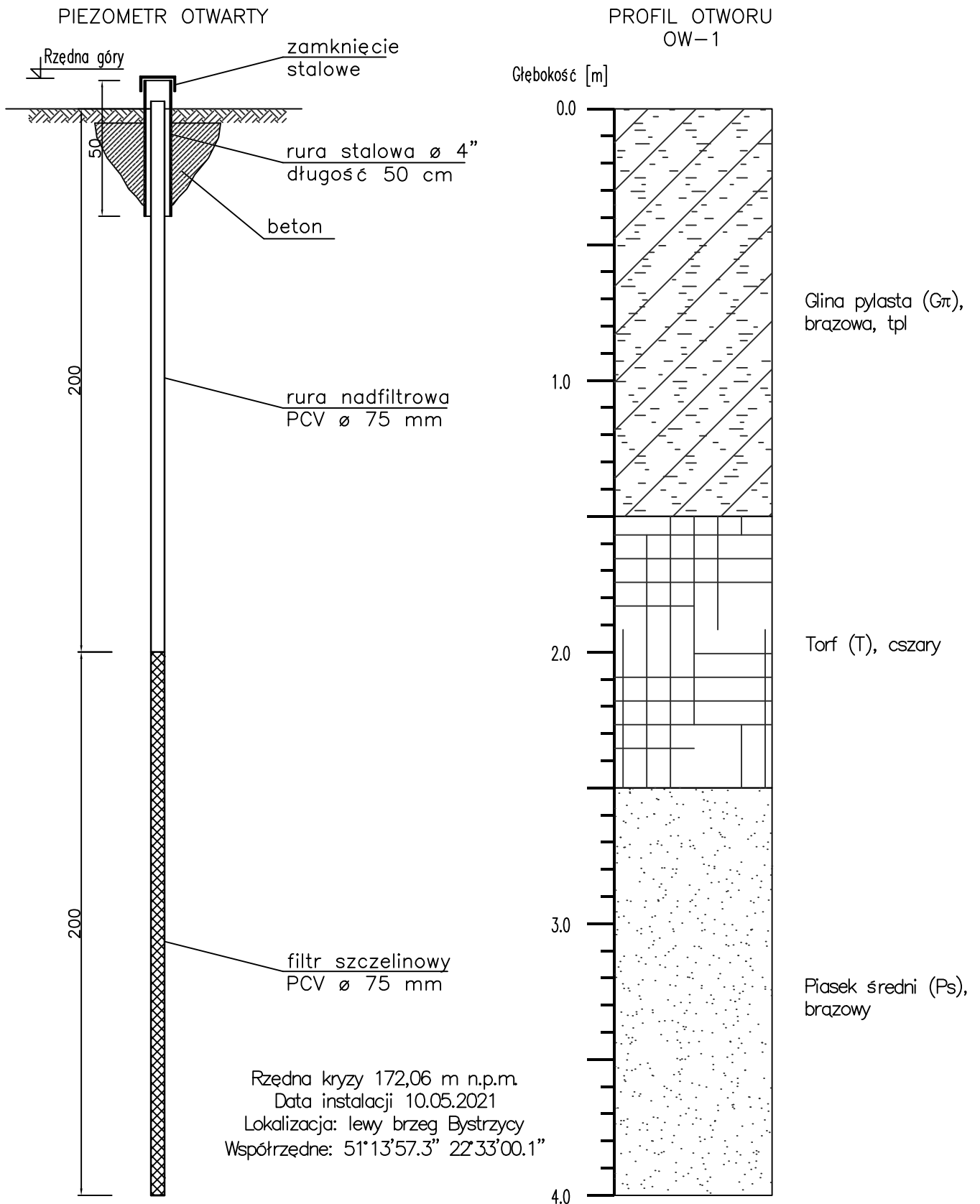
- Legenda:
● P-1 — piezometry
— przekrój piezometryczny
28+000 — km rzeki Bystrzycy



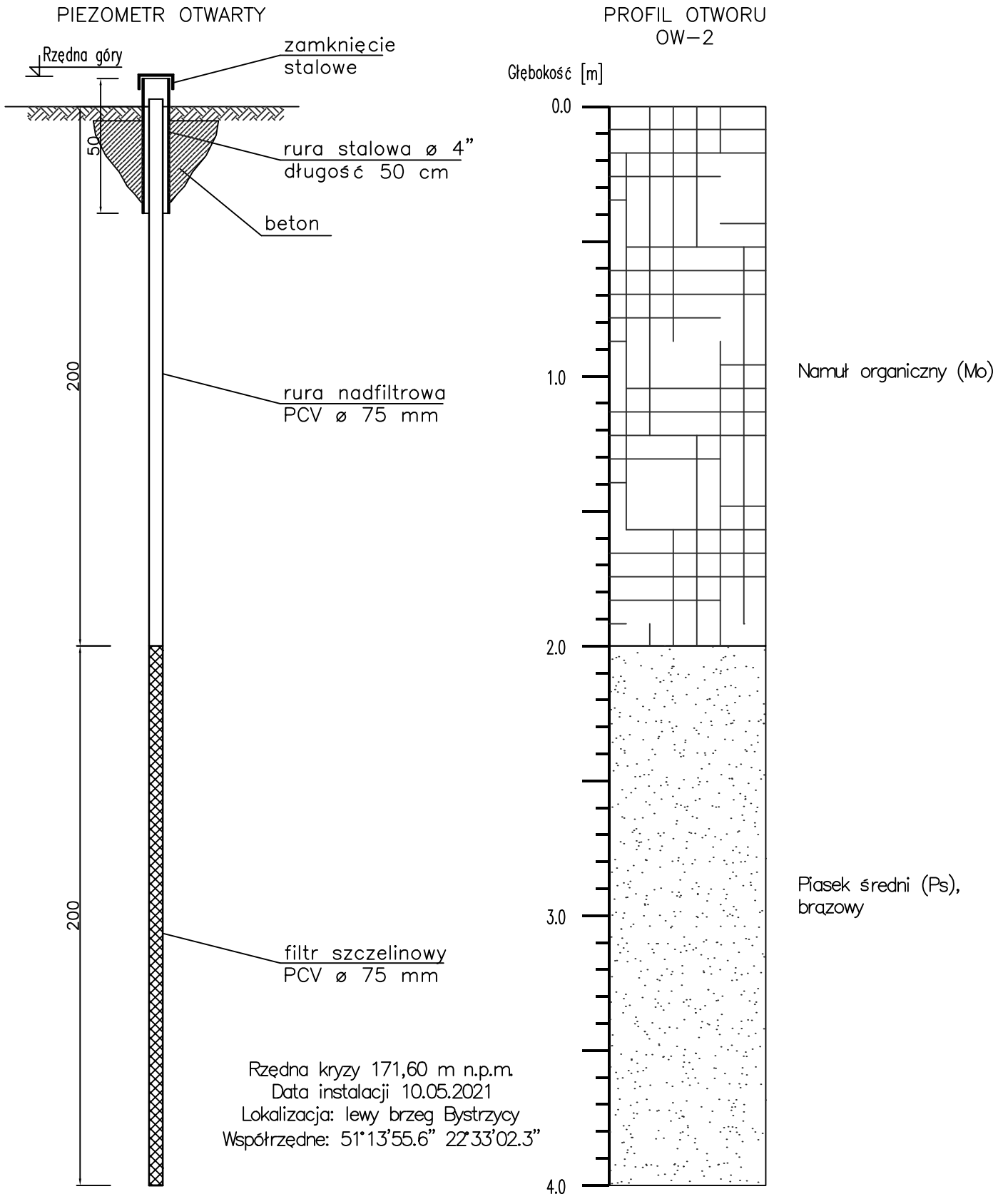
Rys. 2
Plan sytuacyjny piętrzenia
skala 1000



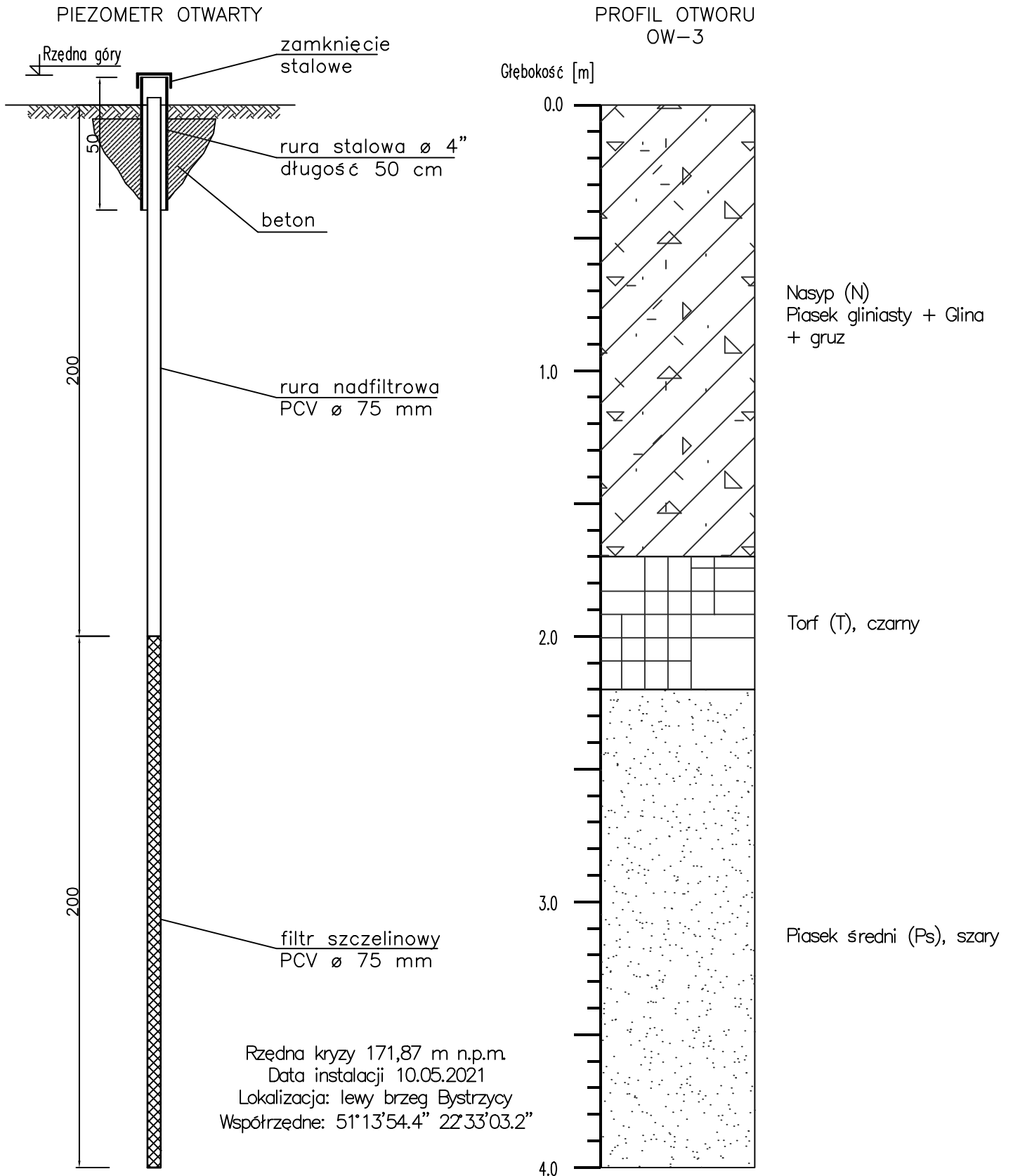
Rys. 3
 Profil rzeki Bystrzycy w zasięgu cofki piętrzenia
 skala 200/2000



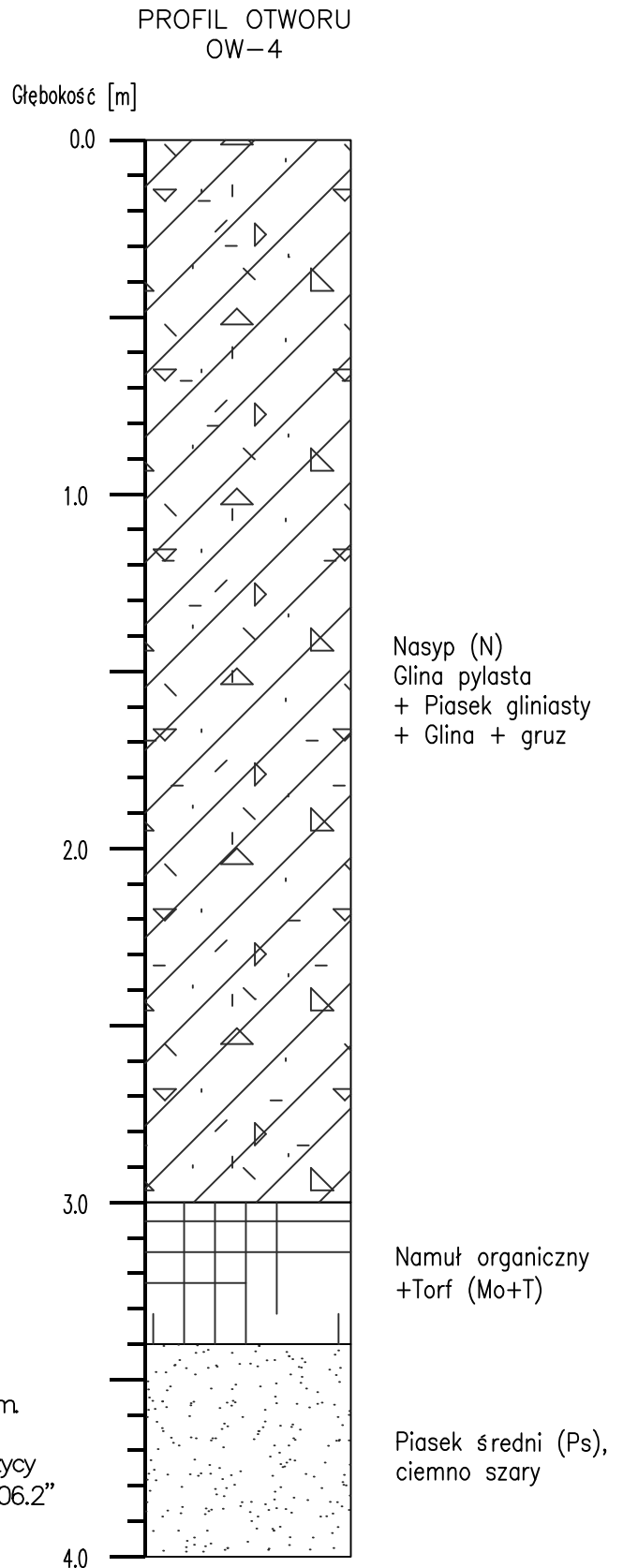
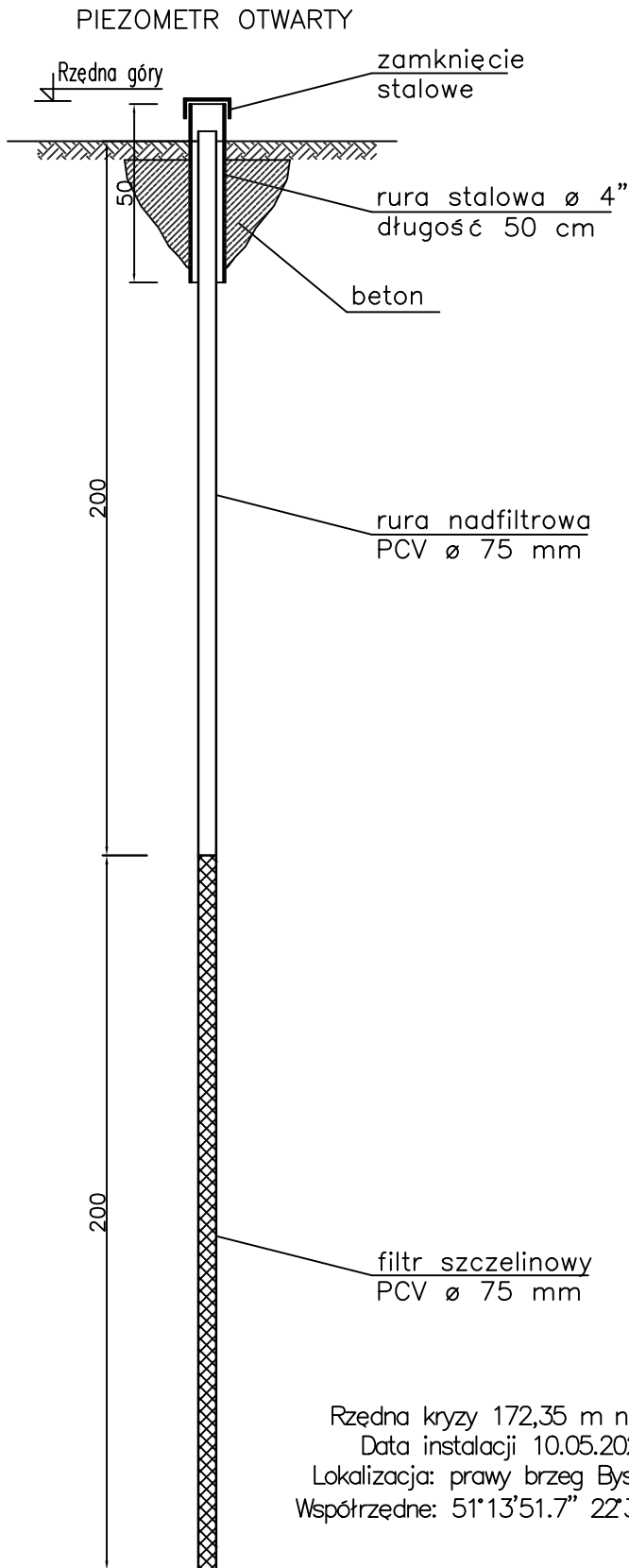
Rys. 4.1
 Metryka piezometru P-1



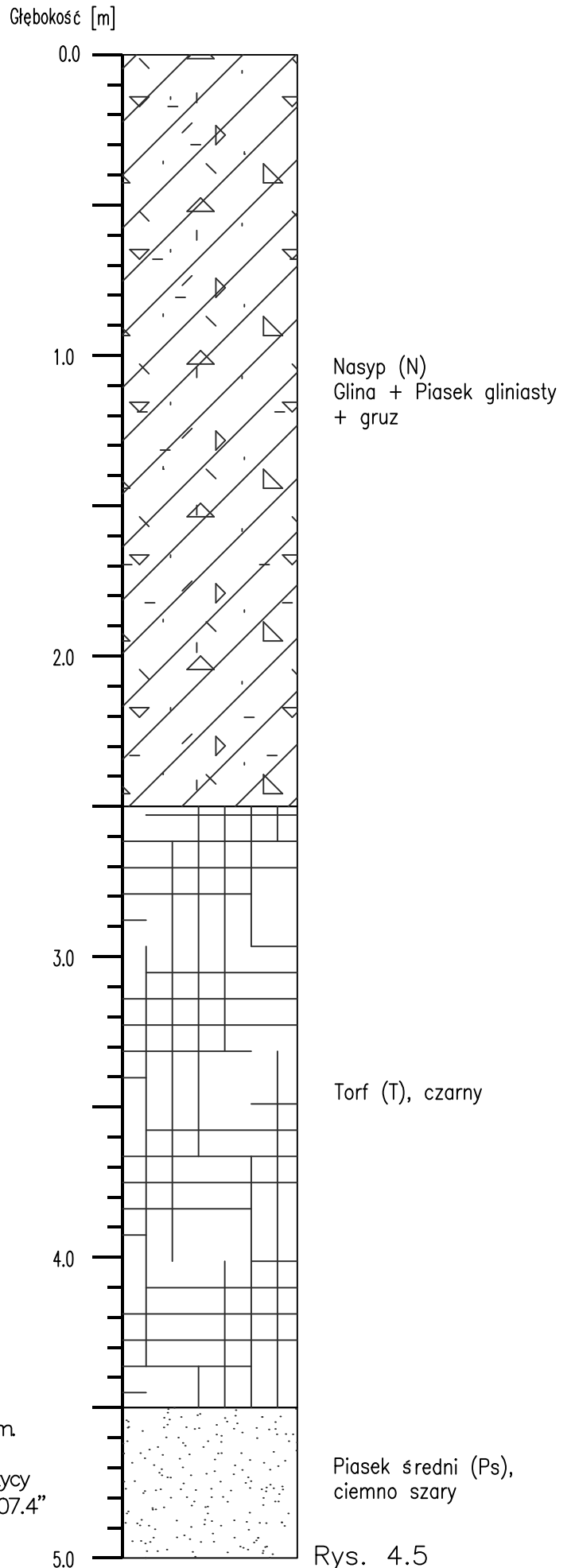
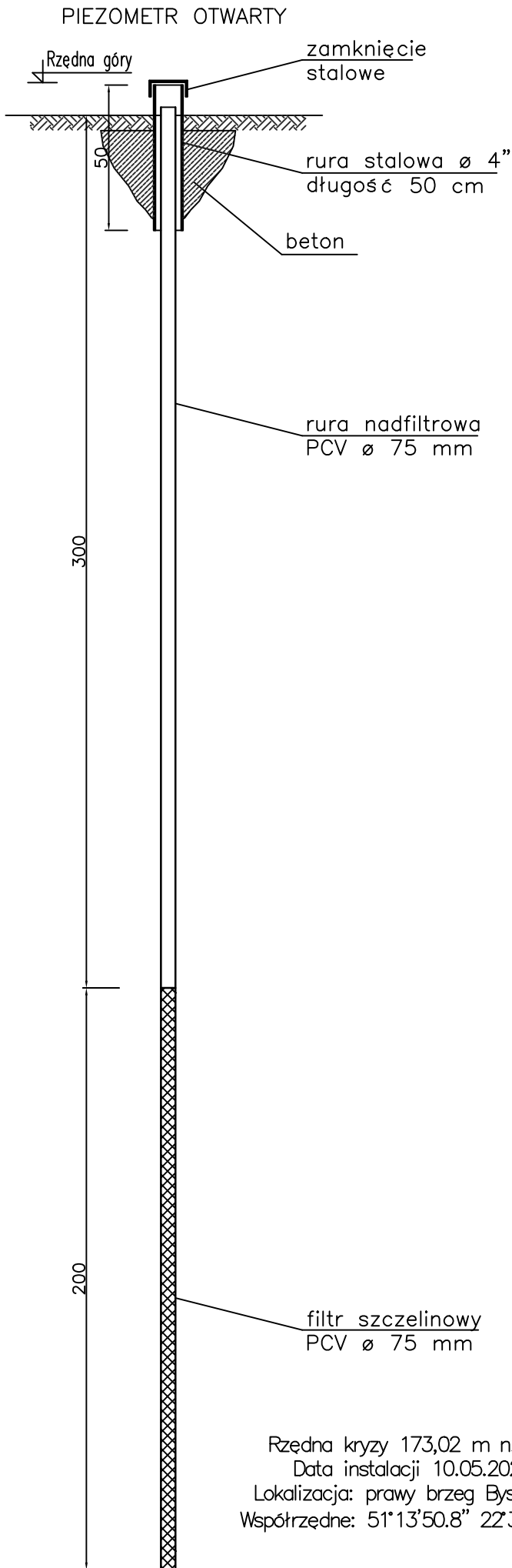
Rys. 4.2
 Metryka piezometru P-2



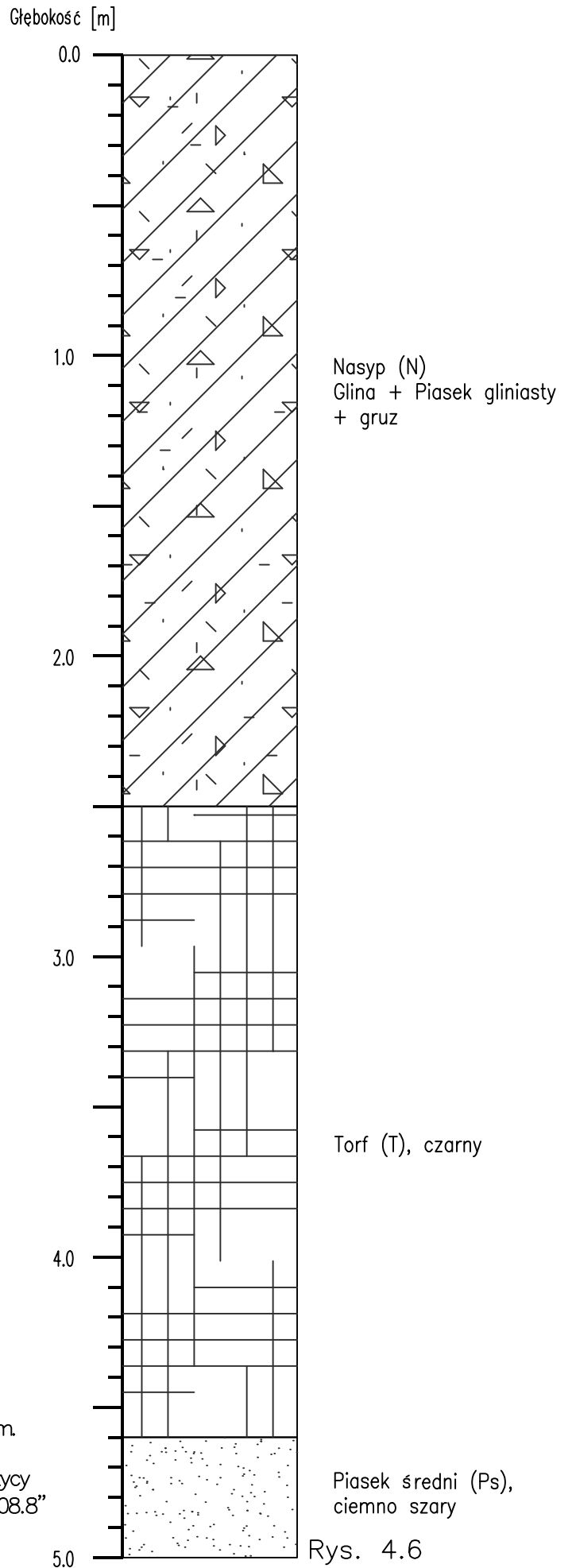
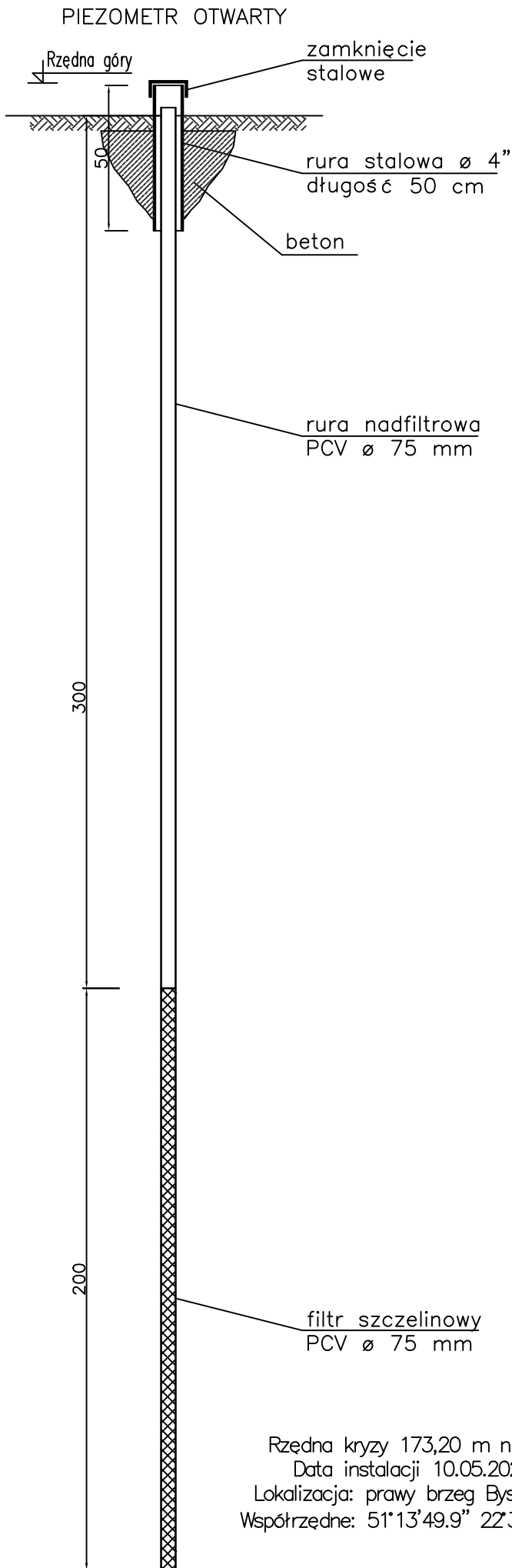
Rys. 4.3
 Metryka piezometru P-3



Rys. 4.4
 Metryka piezometru P-4

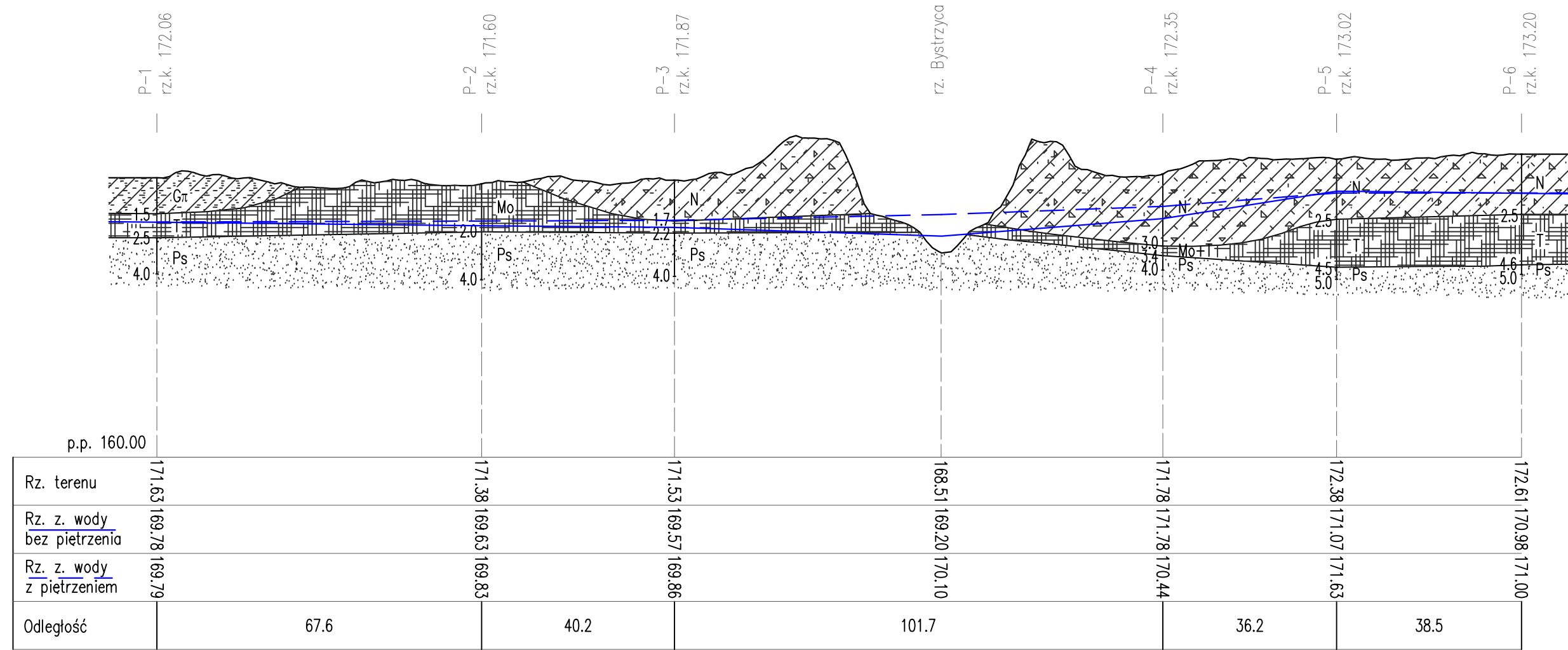


Rys. 4.5
Metryka piezometru P-5



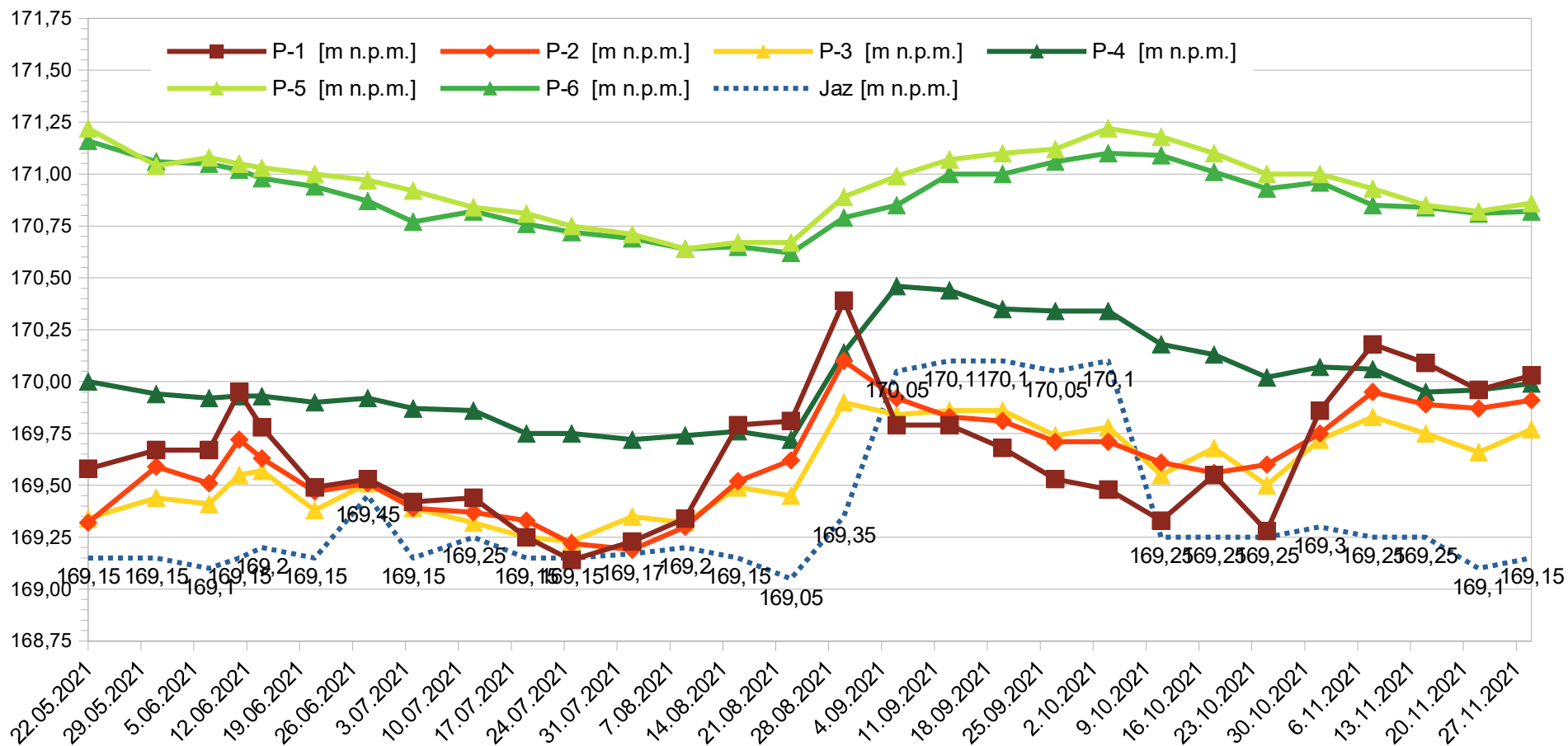
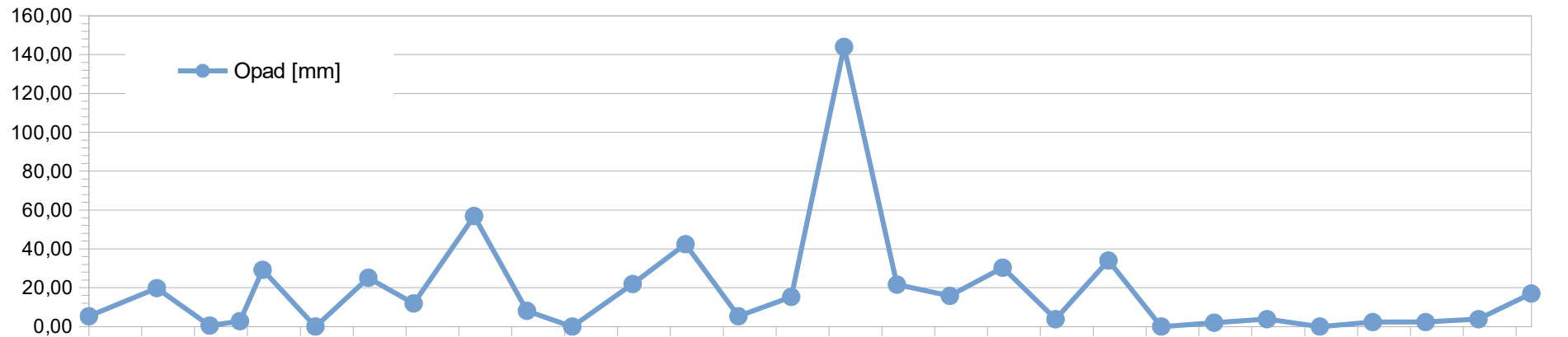
Rys. 4.6
Metryka piezometru P-6

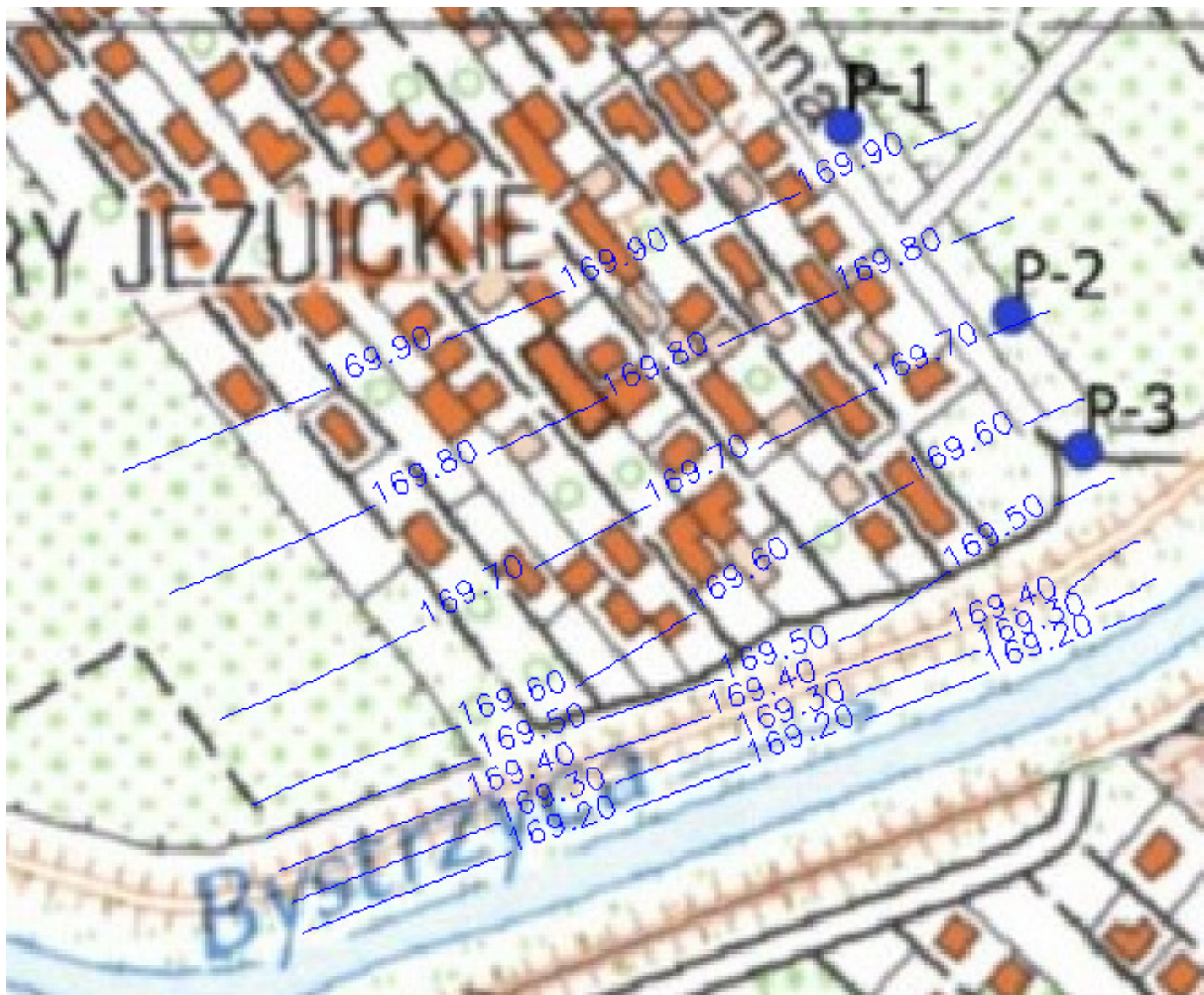
Profil piezometryczny



Rys. 5
 Profil piezometryczny
 skala 200/1000

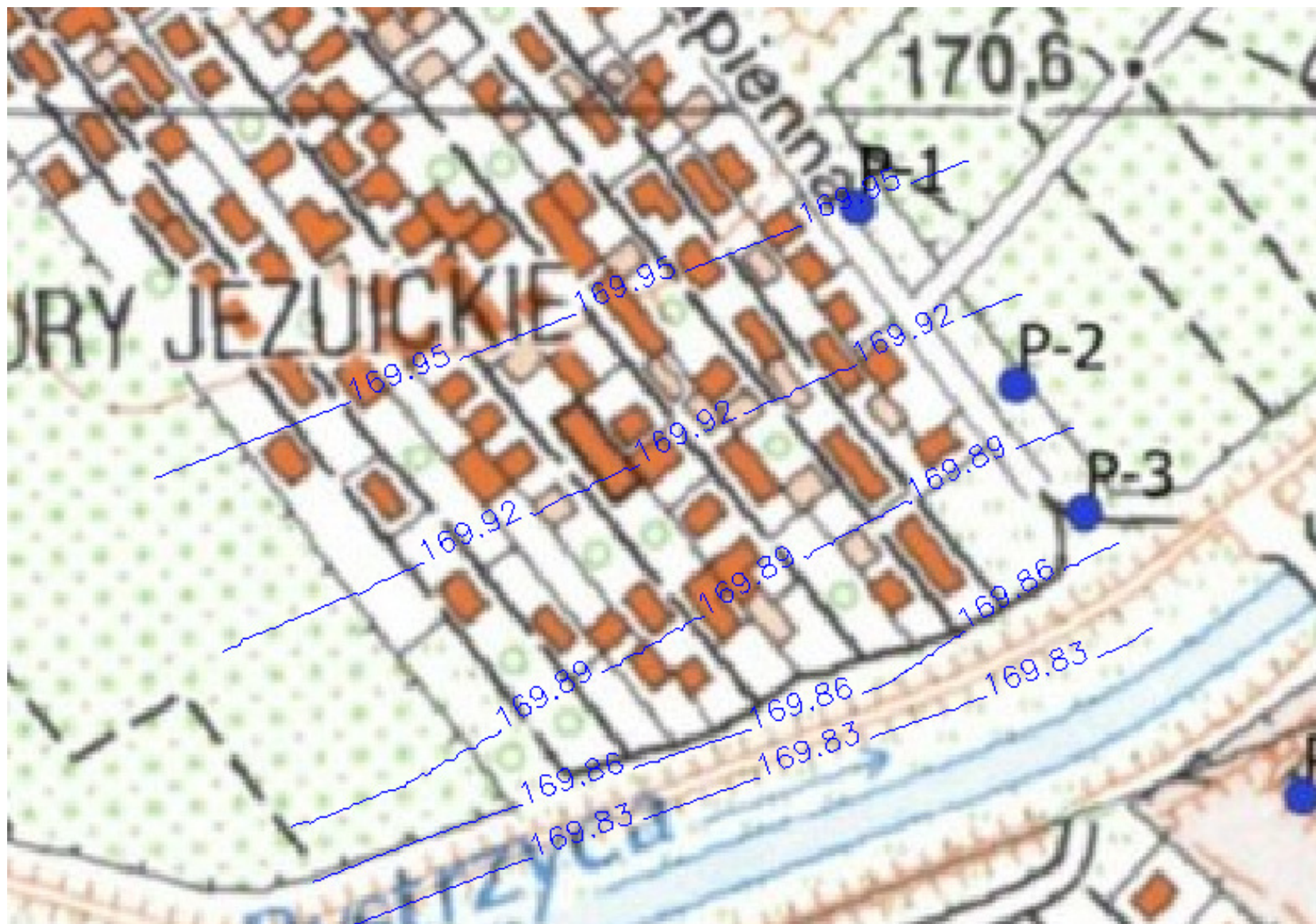
Wykres zmienności ciśnień piezometrycznych





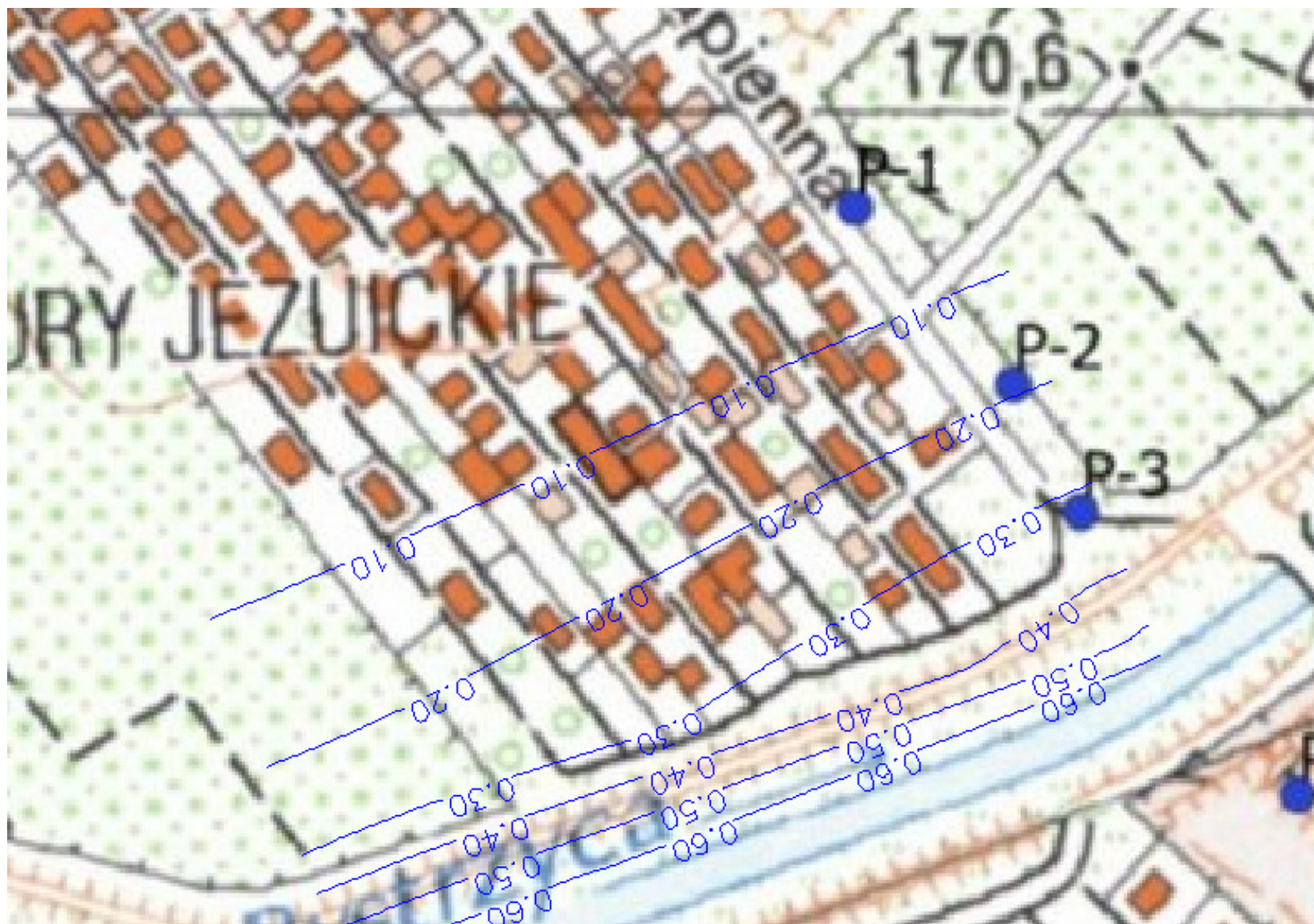
Rys. 7.1

Mapa hydroizopiez dla stanu bez piętrzenia



Rys. 7.2

Mapa hydroizopiez dla stanu po spiętrzeniu



Rys. 7.3

Mapa różnic ciśnień piezometrycznych