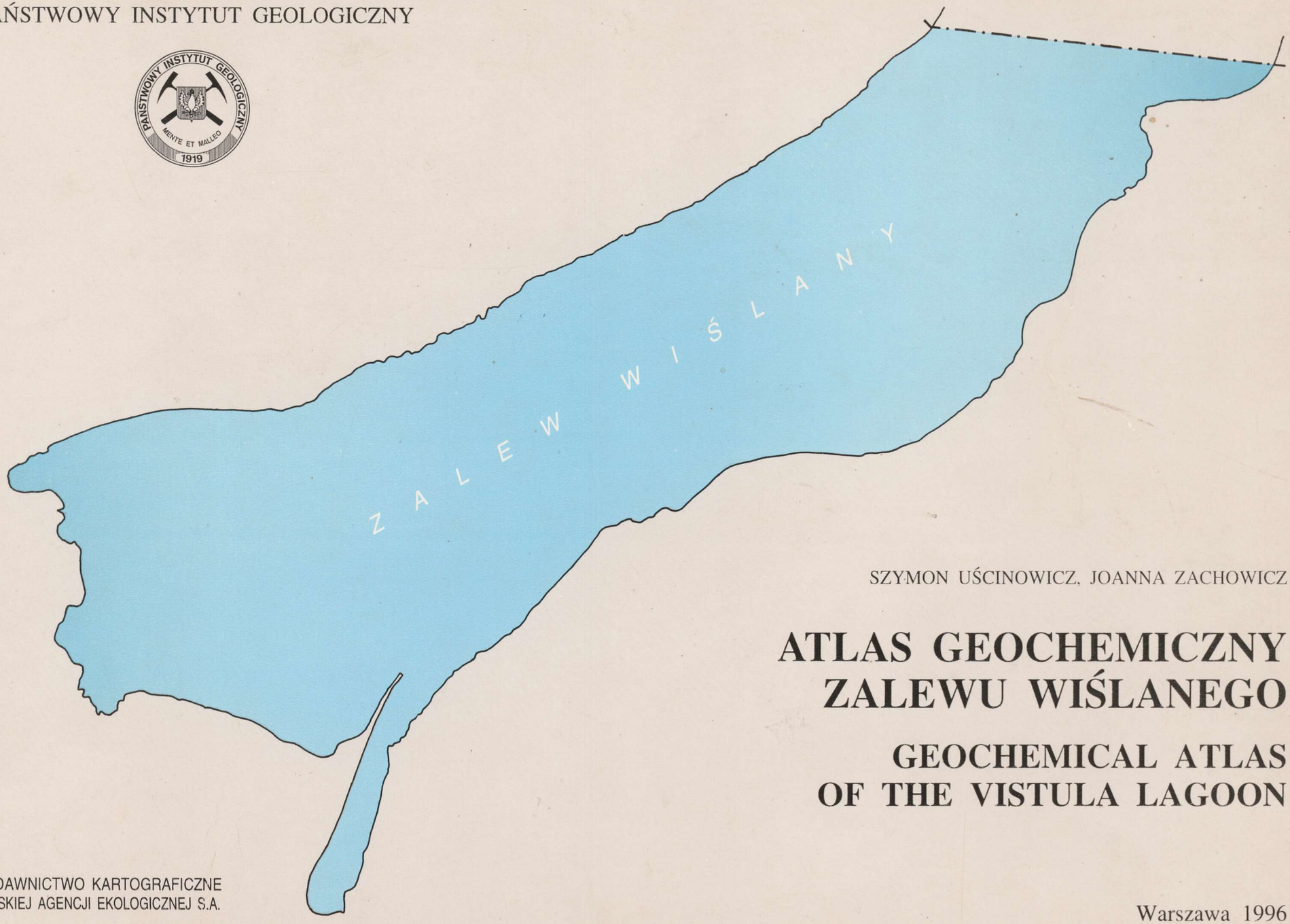
PAŃSTWOWY INSTYTUT GEOLOGICZNY



SZYMON UŚCINOWICZ, JOANNA ZACHOWICZ

ATLAS GEOCHEMICZNY ZALEWU WIŚLANEGO

GEOCHEMICAL ATLAS OF THE VISTULA LAGOON

WYDAWNICTWO KARTOGRAFICZNE
POLSKIEJ AGENCJI EKOLOGICZNEJ S.A.

Warszawa 1996

PAŃSTWOWY INSTYTUT GEOLOGICZNY

SZYMON UŚCINOWICZ, JOANNA ZACHOWICZ

ATLAS GEOCHEMICZNY ZALEWU WIŚLANEGO

GEOCHEMICAL ATLAS OF THE VISTULA LAGOON

WYDAWNICTWO KARTOGRAFICZNE
POLSKIEJ AGENCJI EKOLOGICZNEJ S.A.

Warszawa 1996

Publikacja finansowana przez
Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa

Redaktor mgr Barbara SŁOWAŃSKA

Akceptował do druku 26.06.1996 r.
dyrektor Państwowego Instytutu Geologicznego
prof. dr hab. Stanisław SPECZIK

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

WYDAWNICTWO KARTOGRAFICZNE
POLSKIEJ AGENCJI EKOLOGICZNEJ S.A.

Druk ZPP Polskiej Agencji Ekologicznej S.A. Zlec. E-18

SUMMARY

The work concerns the Polish part of the Vistula Lagoon, up to the border with Russia, and includes ports and outlet parts of rivers.

The following team took part in work on the atlas:

Sz. Uścinowicz, J. Zachowicz – concept and plan of investigations, supervision and coordination, development of maps, interpretation of results, editors of maps and text;
K. Sokołowski – database and statistical processing of results of investigations;
W. Jegliński – graphical elaboration of maps;
P. Przeździecki – graphical elaboration of annexes;
P. Anolik, L. Zaleszkiewicz – sampling of Vistula Lagoon deposits (field work);
W. Rudeńska, B. Kotulska – preparation of samples for analysis, grain size analyses.

Chemical analyses were made at the Central Chemical Laboratory of the Polish Geological Institute in Warszawa under supervision of P. Pasławski and K. Jakimowicz-Hnatyszak. Test for general nitrogen were made at the Department of Environment Engineering of the Gdańsk Technical University under supervision of H. Obarska-Pempkowiak.

The Vistula Lagoon (Plate I) is a narrow and long lagoon in the east part of the southern coast of the Baltic Sea. It is separated from the sea by the sandy Vistula Spit, which is broken at its eastern end by the Pilava Straits. At present, the whole exchange of waters between the Lagoon and the sea passes through these straits. The area of the Vistula Lagoon is 838 km^2, of which 328 km^2 belongs to Poland (Sołowiew I. I., 1975). The average depth in the Polish part is 2.4 m. In Polish territory is 14,509 km^2 of the lagoon's catchment area (total surface of the catchment area is 23,870.6 km^2), which is formed by the right part of Vistula Delta, basins of rivers Nogat, Elbląg and small sterams between Nogat and Narusa, Narusa, Bauda, Pasłęka, and parts of Banówka, Łyna and Węgorapa basins (Nieczaj I. J. *et al.*, 1975). All these rivers, except Łyna and Węgorapa, discharge directly into the Lagoon. Łyna and Węgorapa discharge indirectly, through the Pregola. Fresh and salt water mix constantly in the Vistula Lagoon. Before the connection with the Vistula Delta was closed in 1915, fresh river waters exerted a deciding influence on the hydrologic conditions in the Lagoon. However, since that time sea water is having an increasing importance in the water balance of the Lagoon. Influence of river waters becomes more distinct only during spring freshets. The second factor specially important to water dynamics in the Lagoon is wind action on the water surface. Due to shallowness of the lagoon, wind can often influence the entire water layer between surface and bottom, generating movement of the bottom surface sediments.

METHODS USED IN FIELD AND LABORATORY WORKS

Field works

In the Polish part of the lagoon, 89 samples of bottom surface sediments were taken, and another 11 samples were taken at river outlets and in ports (Plate II). Points of sampling were located by clasic geodetical methods.

Samples of silt/clay deposits were taken using the "Kajak" gravitational sampler, sandy deposits were taken with a Petersen grab. Silt/clay deposits were divided into 2 cm samples, placed in airtight plastic containers, cooled and stored in –20°C. From sandy deposits only one surface sample (2 cm) was taken.

Laboratory work

Grain size analyses

Grain size analyses of silty, silt/clay and silt/sand deposits were performed in a laser grain size meter Analysette 22 made by Fritsch. Percentage of grains in the following intervals was determined: 0.001, 0.002, 0.004, 0.008, 0.016, 0.032, 0.062, 0.125, 0.250 and 0.5 mm. Before starting the grain size measurements, shells and shell particles were removed mechanically, and organic matter was removed using perhydrol. Grain size composition of sands was determined by seiving on a 0.062, 0.125, 0.250, 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 mm set. The analyses were made in the laboratory of the Division of Marine Geology in Sopot of the Polish Geological Institute.

Geochemical analyses

After drying in room temperature and mechanical removing of shells and shell particles, samples of the deposits were powdered and then diluted for 30 min. in HNO_3 1+1 in the MDS-81D microwave device. Content of Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, Ti, V and Zn was determined using emission spectrometry with plasma excitation (ICP). A Philips PV 8060 spectrometer was used.

Hg content was determined using the atomic absorption spectrometry method, cold vapour technique, on spectrometers: AAS-3 of Zeiss and Perkin-Elmer 4100 ZL with FIAS-100 flow system.

Total organic carbon ($C_{org.}$) content was determined by a modified coulometric method, using a 702 Coulomat. All the analyses were made in the Central Chemical Laboratory of the Polish Geological Institute in Warszawa.

General nitrogen was determined by titration of excess acid after distilling ammonia from the alkalised postreaction mixture, obtained in result of mineralizing the deposits by the Kjeldahl method. Mineralisation of samples for general nitrogen tests was made in the Digestion System 61007 apparatus of the Swedish manufacturer Tecator, and distillation of ammonia ions was made in Tecator's Kjeltec System 1026 apparatus. Ammonia ions were determined in nonmineralized samples, using the general nitrogen determination method. Tests for general nitrogen were made at the Department of Hydrotechnics of the Gdańsk Technical University.

GRAIN SIZES OF BOTTOM SURFACE DEPOSITS

In accordance with F. Shepard's classification (1954), the following granulometric types of deposits were distinguished: sand, silty sand, sandy silt, silt and clayey silt (Plate III).

Basing on macroscopic descriptions of the samples, areas with accumulations of shells and boulders (> 64 mm) were marked. Boulders occur locally near the shore north-east of Tolkmicko, also between the outlets of Bauda and Pasłęka, and north-east of the Pasłęka outlet.

Sand is present along the north-west and south-east banks to 1–1.5 m depths, and locally, in the area betwen Pasłęka and Bauda outlets, even to 2–3 m depth below water surface. Along the Vistula Spit medium sand prevailes. At the south-west coast, fine sand is more common.

Silty sand was found on a rather small surface of the bottom north-east of Krynica Morska, at 1 to about 2 m depths.

Sandy silt occurs in up to 2 m depth along the south-west, deltaic banks of the Vistula Lagoon, and locally near Frombork in the 1 to 2 m depth zone.

Silt occurs in the south-west part of the lagoon, mostly in 2 to 3 m depths, separating the zone of coastal sand and sandy silt from the clayey silts, which cover the central areas of the south-west part of the Vistula Lagoon.

Clayey silt covers the largest areas of the Vistula Lagoon bottom north-east of Tolkmicko and Krynica Morska. Along the banks of the Vistula Spit, the boundary between sands and clayey silts runs at 1.5–2 m depths, and along the south-east banks – at 2.5–3 m depths, only locally coming closer to the coastline.

Clayey silt is also present in the shallow south bay of the Lagoon, called the Elbląg Bay and located between Suchacz and the outlet of river Elbląg.

Shells and accumulations of shells, forming a significant component of the deposits, occur in especially large amounts along the western banks of the Vistula Lagoon at the outlet of Szkarpawa and in the Kąty Rybackie area. Larger amounts of shells were also observed in the area between Przebrno, Krynica Morska and Tolkmicko, and in the north-east part, at the border with Russia (Plate III).

GEOCHEMICAL MAPS

Results of chemical analyses are presented in 24 mono-element geochemical maps (Plates IV–XXVII). The maps present, on bathymetric background, the distribution of each of the investigated chemical components in the surface layer (0–2 cm) of the deposits. Lines of equal content of the chemical components are drawn in accordance with principles of interpolation, taking into account also the significant relationships between content of components and grain size of the deposits. As in other water basins, also in the Vistula Lagoon the content of the analysed components depends visibly on the grain size of the deposits.

Tables with geochemical maps are supplemented with statistical parameters and histograms of frequency of occurence, and also with curves of the variability of each of the elements in a 20 cm layer of deposits in selected areas of the Vistula Lagoon. The atlas contains also maps of normalized with respect to aluminium contents of arsene, cadmium, chromium, copper, mercury, lead, zinc, phosphorus, nitrogen and organic carbon (Plates XXVIII–XXXVII). These maps were used for locating sources of supply of these elements to the Vistula Lagoon.

The geochemical picture of the surface layer of bottom sediments in the lagoon shows a distinct anthropogenic influence. It is expressed by an increased concentration of most of the elements in the Elbląg Bay area and in ports at Krynica Morska, Tolkmicko and Kąty Rybackie. Anthropogenic influence becomes much better visible after normalizing the contents with respect to aluminium. Analysis of these values shows that besides the above mentioned ports, many chemical components are supplied through the rivers: Elbląg, Pasłęka, Bauda, Szkarpawa and Nogat. Some metals come from other sources of contamination (such as roads, railway line, sewage treatment plants, etc.), located in the coastal zone of the Vistula Lagoon between Suchacz and Tolkmicko, and between Kąty Rybackie and Krynica Morska. The reason for higher normalized values of content of some of the metals in the nearshore zone in the area of Piaski remains unclear. Maybe these elements come from ammunition dumped in the lagoon during World War II.

WSTĘP

Atlas geochemiczny Zalewu Wiślanego powstał dzięki pracom wykonanym w ramach zadania badawczego pt. "Przedstawienie koncepcji oczyszczania i rekultywacji wód i dna Zalewu Wiślanego" zrealizowanego w Projekcie Badawczym Zamawianym PBZ-061-01 przez wojewodę elbląskiego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych oraz realizacji pracy pt. "Identyfikacja źródeł zanieczyszczeń Zalewu Wiślanego w oparciu o znormalizowane zawartości wybranych składników chemicznych w osadach dennych" zleconej przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku. Ta ostatnia praca finansowana była przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Opracowaniem objęto obszar Zalewu Wiślanego do granicy państwowej z Rosją oraz obszary ujściowe rzek i porty.

W realizacji atlasu uczestniczyli:

Sz. Uścinowicz, J. Zachowicz – koncepcja i projekt badawczy, nadzór i koordynacja prac, opracowanie map, interpretacja wyników, redakcja map i tekstu;

K. Sokołowski – baza danych i opracowanie statystyczne wyników badań;

W. Jegliński – opracowanie graficzne map;

P. Przeździecki – opracowanie graficzne załączników;

P. Anolik, L. Zaleszkiewicz – opróbowanie osadów Zalewu Wiślanego (prace terenowe);

W. Rudeńska, B. Kotulska – przygotowanie próbek do analiz, analizy uziarnienia.

Analizy chemiczne wykonano w Centralnym Laboratorium Chemicznym Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie pod kierunkiem P. Pasławskiego i K. Jakimowicz-Hnatyszak. Na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem H. Obarskiej-Pempkowiak oznaczono azot.

Zalew Wiślany **(Tablica I)** jest wąską i długą laguną położoną u wschodnich krańców południowego wybrzeża Morza Bałtyckiego. Od morza oddzielony jest piaszczystą Mierzeją Wiślaną, przerwaną w części wschodniej cieśniną Pilawską. Cieśniną tą zachodzi obecnie wymiana wód między morzem a zalewem. Powierzchnia Zalewu Wiślanego wynosi 838 km^2, z czego 328 km^2 należy do Polski (Sołowiew I. I., 1975). Jego średnia głębokość w części polskiej wynosi 2,4 m. W granicach Polski znajduje się 14 509 km^2 zlewiska zalewu (przy ogólnej powierzchni 23 870,6 km^2) i tworzą je prawostronna delta Wisły, dorzecze Nogatu, Elbląga, małych rzek pomiędzy Nogatem a Narusą, Narusy, Baudy, Pasłęki, część dorzecza Banówki oraz Łyny i Węgorapy (Nieczaj I. J. i in., 1975). Wszystkie wymienione rzeki oprócz Łyny i Węgorapy wpływają bezpośrednio do zalewu, zaś te dwie ostatnie za pośrednictwem Pregoły. Zalew Wiślany jest obszarem ciągłego mieszania się wód słodkich i słonych. Słodkie wody rzeczne miały decydujący wpływ na warunki hydrologiczne zalewu przed zamknięciem dopływu wód Nogatu w 1915 r. Od tego czasu w bilansie wodnym zalewu większe znaczenie zyskują wody morskie. Jedynie w okresie wiosennych wezbrań zaznacza się wyraźniejsze oddziaływanie wód rzecznych. Drugim ważnym czynnikiem decydującym o dynamice wody w zalewie jest oddziaływanie wiatru na powierzchnię wody. Płytkość zalewu sprzyja rozciągnięciu wpływu wiatru na dynamikę mas wodnych od powierzchni do dna, co często powoduje uruchomienie powierzchniowej warstwy osadów dennych.

METODY PRAC TERENOWYCH I LABORATORYJNYCH

Prace terenowe

W ramach prac terenowych pobrano 89 próbek osadów powierzchniowych z obszaru polskiej części zalewu oraz 11 próbek w ujściach rzek i w portach **(Tablica II)**. Punkty poboru próbek lokalizowano klasycznymi metodami geodezyjnymi.

Próbki osadów mulisto-ilastych pobierano przy użyciu próbnika grawitacyjnego typu "Kajak", zaś osady piaszczyste czerpakiem Petersena. Osady mulisto-ilaste dzielono na próbki 2 cm, umieszczano w hermetycznie zamykanych pudełkach plastikowych, zamrażano i przechowywano w temperaturze –20°C. Z osadów piaszczystych pobierano tylko jedną próbkę powierzchniową (2 cm).

Prace laboratoryjne

Analizy uziarnienia

Analizę uziarnienia osadów mulistych, mulisto-ilastych i mulisto-piaszczystych wykonano na laserowym mierniku wielkości ziarn Analysette 22 firmy Fritsch. Określono procentową zawartość ziarn w następujących przedziałach średnic: 0,001; 0,002; 0,004; 0,008; 0,016; 0,032; 0,062; 0,125; 0,250; 0,5 mm. Przed pomiarem wielkości ziarn z osadu usunięto mechanicznie muszle i okruchy muszli oraz substancję organiczną przy użyciu perhydrolu. Skład ziarnowy piasków określano za pomocą zestawu sit o średnicach 0,062; 0,125; 0,250; 0,5; 1,0; 2,0 i 4,0 mm. Analizy te wykonano w laboratorium Oddziału Geologii Morza Państwowego Instytutu Geologicznego w Sopocie.

Analizy geochemiczne

Próbki osadów po wysuszeniu w temperaturze pokojowej i mechanicznym usunięciu muszli i okruchów muszli sproszkowano, a następnie roztwarzano w HNO_3 1+1 w urządzeniu mikrofalowym MDS-81D w czasie 0,5 godziny. Oznaczenie zawartości Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, P, Pb,

S, Sr, Ti, V i Zn wykonano metodą spektrometrii emisyjnej ze wzbudzaniem plazmowym (ICP). Stosowano spektrometr PV 8060 firmy Philips.

Oznaczenie Hg wykonano metodą spektrometrii absorbcji atomowej, techniką zimnych par przy użyciu spektrometrów: AAS-3 firmy Zeiss oraz Perkin-Elmer 4100 ZL z systemem przepływowym FIAS-100.

Całkowitą zawartość węgla organicznego $C_{org.}$ oznaczono zmodyfikowaną metodą kulometryczną za pomocą Culomatu 702. Wszystkie te analizy zostały wykonane w Centralnym Laboratorium Chemicznym Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie.

Oznaczenie azotu ogólnego wykonano metodą miareczkowania nadmiaru kwasu po destylacji amoniaku ze zalkalizowanej mieszaniny poreakcyjnej, otrzymanej w wyniku zmineralizowania osadów metodą Kjeldahla. Mineralizację próbek na azot ogólny wykonano w aparacie Digestion System 61007 szwedzkiej firmy Tecator, zaś destylację jonów amonowych prowadzono w aparacie Kjeltec System 1026 firmy Tecator. Jony amonowe oznaczano w próbkach niezmineralizowanych stosując metodykę oznaczania azotu ogólnego. Oznaczenia azotu ogólnego wykonano na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej.

UZIARNIENIE OSADÓW DENNYCH

Mapę typów granulometrycznych powierzchniowych osadów dennych Zalewu Wiślanego skonstruowano w oparciu o mapę dokumentacyjną punktów poboru próbek (Tabl. II) oraz o wyniki analiz granulometrycznych. Klasyfikacja F. P. Sheparda (1954) była podstawą wyróżnienia następujących typów granulometrycznych osadów: piasków, piasków mulistych, mułów piaszczystych, mułów i mułów ilastych **(Tablica III)**.

W oparciu o opisy makroskopowe zaznaczono również obszary występowania nagromadzeń muszli oraz głazów (> 64 mm). Głazy występują lokalnie w strefie przybrzeżnej w rejonach na północny wschód od Tolkmicka oraz pomiędzy ujściami Baudy i Pasłęki oraz na północny wschód od ujścia Pasłęki.

Piaski występują wzdłuż wybrzeży północno-zachodnich i południowo-wschodnich do głębokości około 1–1,5 m, a lokalnie w rejonie pomiędzy ujściami Baudy i Pasłęki do 2–3 m. Wzdłuż Mierzei Wiślanej przeważają piaski średnioziarniste. Przy wybrzeżach południowo-wschodnich częściej występują piaski drobnoziarniste.

Piaski muliste stwierdzono jedynie na niewielkiej powierzchni dna na głębokościach od około 1 do około 2 m w rejonie na północny wschód od Krynicy Morskiej.

Muły piaszczyste występują wzdłuż południowo-zachodnich, deltowych wybrzeży Zalewu Wiślanego do głębokości około 2 m oraz lokalnie w rejonie Fromborka na głębokościach od 1 do 2 m.

Muły występują w południowo-zachodniej części Zalewu Wiślanego, przeważnie na głębokościach od 2 do 3 m, oddzielając strefę przybrzeżnych piasków i mułów piaszczystych od mułów ilastych zajmujących centralne obszary południowo-zachodniej części Zalewu.

Muły ilaste zajmują największe obszary dna Zalewu Wiślanego, na północny wschód od Tolkmicka i Krynicy Morskiej. Wzdłuż wybrzeży Mierzei Wiślanej granica pomiędzy piaskami a mułami ilastymi przebiega na głębokości 1,5–2 m, a przy wybrzeżach południowo-wschodnich na głębokości około 2,5–3 m, tylko lokalnie zbliżając się bliżej brzegu.

Muły ilaste wystepują też w płytkiej południowej zatoce zalewu, pomiędzy Suchaczem a ujściem rzeki Elbląg zwanej Zatoką Elbląską.

Muszle i nagromadzenia muszli, stanowiące istotny składnik osadu, szczególnie licznie występują przy zachodnich wybrzeżach Zalewu Wiślanego, w rejonie ujścia Szkarpawy oraz w rejonie Kątów Rybackich. Ponadto, występowanie większych ilości muszli stwierdzono w obszarze położonym pomiędzy Przebrnem, Krynicą Morską i Tolkmickiem oraz w części północno-wschodniej zalewu, przy granicy z Rosją (Tabl. III).

MAPY GEOCHEMICZNE

Wyniki analiz chemicznych przedstawiono na 24 monopierwiastkowych mapach geochemicznych (Tabl. IV–XXVII). Przedstawiają one obraz rozmieszczenia zawartości badanych składników w warstwie powierzchniowej osadów (0–2 cm) na tle batymetrii. Izolinie zawartości poszczególnych składników chemicznych wykreślono w oparciu o zasady interpolacji, uwzględniając równocześnie istotne zależności pomiędzy ich zawartością, a uziarnieniem osadów. Zawartość poszczególnych składników w osadach dennych Zalewu Wiślanego, podobnie jak w innych zbiornikach wodnych, w bardzo wyraźny sposób zależy od uziarnienia.

Tablice z mapami geochemicznymi uzupełniono parametrami statystycznymi i histogramami częstości występowania oraz wykresami zmienności poszczególnych pierwiastków w 20 cm warstwie osadów w wybranych obszarach Zalewu Wiślanego.

$C_{org.}$– węgiel organiczny (Tabl. IV)

Zawartość węgla organicznego w osadach powierzchniowych Zalewu Wiślanego jest na ogół mniejsza niż 3%. Osady części północnej zalewu są nieco uboższe w węgiel organiczny od osadów części południowej, gdzie często występuje on w ilościach od 3 do 5%. Podwyższone zawartości $C_{org.}$ (od 5% do maksymalnie 6,78%) występują w portach Krynica Morska, Tolkmicko, Kąty Rybackie oraz w Zatoce Elbląskiej. W stosunku do osadów Zatoki Gdańskiej (T. Szczepańska, Sz. Uścinowicz, 1994) osady Zalewu Wiślanego odznaczają się nieco niższymi zawartościami węgla organicznego.

Al – glin (Tabl. V)

Rozmieszczenie glinu w osadach Zalewu Wiślanego jest stosunkowo równomierne. Poza strefą przybrzeżną, gdzie glin występuje w ilości od 0,21 do 2%, największe powierzchnie dna zajmują muły i muły ilaste o zawartości glinu od 2 do 4%. Wartości wyższe, maksymalnie do 4,65%, występują tylko lokalnie na małych powierzchniach w portach Krynica Morska, Tolkmicko i na północy polskiej części zalewu przy granicy z Rosją.

As – arsen (Tabl. VI)

Zawartość arsenu w osadach Zalewu Wiślanego jest niska i mało zróżnicowana. Tylko w 1 próbce stwierdzono koncentrację dochodzącą do 12 ppm. Na dużych obszarach dna występują osady, w których arsen występuje w ilościach mniejszych niż granica wykrywalności (< 5 ppm). Koncentracje arsenu w osadach Zalewu Wiślanego są znacznie niższe niż w osadach Zatoki Gdańskiej i całego południowego Bałtyku.

Ba – bar (Tabl. VII)

Rozkład zawartości baru w osadach Zalewu Wiślanego jest zbliżony do rozkładu węgla organicznego. Część północna zalewu jest uboższa w bar w stosunku do części południowej. W części północnej zawartość Ba w osadach jest na ogół mniejsza niż 100 ppm, w części południowej często przekracza 100 ppm dochodząc lokalnie, w portach Krynica Morska, Tolkmicko i Kąty Rybackie oraz w Zatoce Elbląskiej, do 150–181 ppm. Podobne zawartości baru występują w osadach Zatoki Gdańskiej.

Be – beryl (Tabl. VIII)

Obraz rozprzestrzenienia berylu w osadach Zalewu Wiślanego wykazuje duże analogie do glinu (bardzo wysoki współczynnik korelacji = 0,977, tab.1). Poza obszarami przybrzeżnymi, gdzie osady zawierają mniej niż 1 ppm Be, występuje on najczęściej w ilości od 1 do 1,5 ppm, a miejscami, zwłaszcza w części południowej, od 1,5 do 2,0 ppm, z wartościami maksymalnymi 2,0 ppm w porcie Tolkmicko.

Ca – wapń (Tabl. IX)

Zawartość wapnia w osadach Zalewu Wiślanego jest wyraźnie wyższa niż w osadach Zatoki Gdańskiej. W Zalewie Wiślanym koncentracje Ca mniejsze niż 1% są typowe wyłącznie dla osadów piaszczystych, podczas gdy w Zatoce Gdańskiej podobną zawartością wapnia charakteryzują się również muły. Muły Zalewu Wiślanego zawierają na ogół wapń w ilości większej niż 1%, a w części południowo-zachodniej również ponad 2%, dochodząc maksymalnie do 5% w Zatoce Elbląskiej.

Cd – kadm (Tabl. X)

Kadm jest pierwiastkiem występującym w osadach Zalewu Wiślanego w stężeniach wyższych niż w Zatoce Gdańskiej. Zawartości poniżej 1 ppm zanotowano jedynie w osadach piaszczystych przy wybrzeżu południowo-wschodnim, pomiędzy Przebrnem a Krynicą Morską oraz przy wybrzeżu zachodnim i południowo-zachodnim delty Wisły.

Duże obszary dna, zwłaszcza w części południowej, pokrywają muły, w których koncentracje kadmu przekraczają 1,5 ppm, lokalnie 2 ppm, dochodząc maksymalnie w rejonie ujścia Szkarpawy do 3,9 ppm.

Co – kobalt (Tabl. XI)

Obszary o podwyższonej koncentracji kobaltu (10–14 ppm) występują w południowo-zachodniej i środkowej części Zalewu oraz przy granicy z Rosją. Są one przedzielone obszarami, gdzie zawartość Co w osadach waha się od 5 do 10 ppm. W rejonach przybrzeżnych kobalt występuje w ilościach poniżej 5 ppm.

Cr – chrom (Tabl. XII)

Chrom wykazuje silne związki z glinem (współczynnik korelacji = 0,932), berylem (0,932) i kobaltem (0,912). Zawartość chromu w obszarach: północnym, środkowym i południowym zalewu wynosi od 60 do 80 ppm z maksimum (87 ppm) w Krynicy Morskiej. Osady w strefach rozdzielających powyższe obszary zawierają od 40 do 60 ppm Cr, a piaski strefy przybrzeżnej od 5 do 40 ppm. Chrom w osadach Zalewu Wiślanego występuje w nieco większych ilościach niż w osadach Zatoki Gdańskiej, gdzie jego zawartość nie przekracza na ogół 60 ppm, a tylko lokalnie dochodzi do 80 ppm.

Cu – miedź (Tabl. XIII)

Miedź w osadach powierzchniowych Zalewu Wiślanego wykazuje wysokie współczynniki korelacji z ołowiem (0,947) i cynkiem (0,954). Średnia jej zawartość wynosi 17 ppm. Maksymalne koncentracje (53 ppm) występują w południowym krańcu Zatoki Elbląskiej. Generalnie osady denne zalewu zawierają od 10 do 30 ppm, zaś piaski strefy przybrzeżnej poniżej 10 ppm. Miedź w osadach zalewu występuje w podobnych ilościach jak w osadach Zatoki Gdańskiej, gdzie zawartość tego metalu jedynie lokalnie osiąga wartość 60 ppm.

Fe – żelazo (Tabl. XIV)

Metal ten w osadach Zalewu Wiślanego występuje w ilościach od 0,25 do 4,24%. Osady piaszczyste zawierają na ogół nie więcej niż 1% żelaza, jedynie osady piaszczyste wzdłuż Mierzei Wiślanej od granicy z Rosją do Krynicy Morskiej i od Przebrna do Kątów Rybackich są wzbogacone w ten metal niekiedy powyżej 3% (3,18%). Muły i muły ilaste zawierają od 2 do 4% żelaza. Największe koncentracje występują w portach Krynica Morska (4,24%) i Tolkmicko (4,08%). Zawar-

tości tego metalu w osadach zalewu są nieco wyższe niż w osadach Zatoki Gdańskiej, gdzie tylko lokalnie osiągają wartości przekraczające 3%.

Hg – rtęć (Tabl. XV)

Rtęć w osadach zalewu występuje w ilościach od 0,02 do 0,45 ppm. Generalnie osady piaszczyste zawierają od 0,02 do 0,18 ppm Hg, zaś osady muliste i mulisto-ilaste do 0,19 ppm. Podwyższone do 23 ppm koncentracje rtęci występują lokalnie głównie w południowo-zachodniej części zalewu, zaś maksymalne ilości 0,45 ppm w Zatoce Elbląskiej.

Li – lit (Tabl. XVI)

Obraz rozmieszczenia litu w osadach zalewu w generalnych zarysach jest podobny do rozmieszczenia baru i żelaza. Wykazuje on wysokie współczynniki korelacji z glinem (0,991), barem (0,945), berylem (0,976), kobaltem (0,968), chromem (0,920) i żelazem (0,945). Na przeważającym obszarze zawartości litu wahają się od 30 do 40 ppm. Tylko lokalnie: w Zatoce Elbląskiej, w portach Krynicy Morskiej, Tolkmicka i Kątów Rybackich występuje w ilościach od 40 do 49 ppm. Maksymalne koncentracje (52 ppm) występują na granicy z Rosją. Osady przybrzeżne zawierają od 2 do 20 ppm.

Mg – magnez (Tabl. XVII)

Rozmieszczenie zawartości magnezu jest podobne do rozmieszczenia litu. Magnez wykazuje dobre korelacje z glinem (0,951), berylem (0,947), kobaltem (0,939), chromem (0,913), żelazem (0,943) i litem (0,961) (tab. 3). Niewielkie koncentracje, od 0,05 do 0,99% tego składnika występują w piaskach i mułach piaszczystych strefy przybrzeżnej oraz w Zatoce Elbląskiej. W centralnych partiach zalewu koncentracje magnezu w osadach powierzchniowych wynoszą od 1 do 1,1%. Tylko w portach Krynica Morska i Tolkmicko, a także na granicy z Rosją, wartości te wynoszą od 1,1 do 1,2%.

Mn – mangan (Tabl. XVIII)

Mangan jest pierwiastkiem, który w osadach Zalewu Wiślanego występuje w dość szerokim zakresie od 138 do 3180 ppm. Zawartość tego składnika w osadach piaszczystych wynosi od 138 do 1224 ppm i jest zdecydowanie wyższa niż w osadach piaszczystych Zatoki Gdańskiej, gdzie tylko lokalnie przekracza 100 ppm (T. Szczepańska., Sz. Uścinowicz, 1994). W rozkładzie częstotliwości występowania manganu zaznacza się wyraźna dominacja wartości w przedziale 500–2000 ppm. Najwyższe koncentracje tego pierwiastka występują w dwóch izolowanych obszarach południowo-zachodniej części zalewu (3180 i 3120 ppm), w porcie Krynica Morska (3000 ppm) i na wschód od Krynicy Morskiej (3040 ppm).

N – azot (Tabl. XIX)

Pierwiastek ten w osadach zalewu występuje w ilościach od 0,002 do 0,964%, przy czym około 50% badanych próbek mieści się w przedziale zawartości 0,2–0,4%. Zawartości azotu ponad 0,4% występują w południowo-zachodniej części zalewu w ujściu Nogatu oraz na wysokości Skowronek przy Mierzei Wiślanej. Osady portów Kąty Rybackie, Krynica Morska i Tolkmicko zawierają znaczne koncentracje azotu, od 0,656 do 0,964%.

Ni – nikiel (Tabl. XX)

Nikiel wykazuje bardzo wysokie współczynniki korelacji z glinem (0,982), barem (0,952), berylem (0,973), kobaltem (0,977), chromem (0,908), żelazem (0,936), litem (0,989) i magnezem (0,945) (tab. 1). W osadach zalewu nikiel występuje w ilościach od 2 do 44 ppm, podobnie jak w osadach Bałtyku (T. Szczepańska, Sz. Uścinowicz, 1994). Piaski strefy brzegowej zawierają do 10 ppm niklu. Duże obszary dna, zwłaszcza w części południowej, południowo-zachodniej i centralnej pokrywają muły, w których koncentracja niklu wynosi od 30 do 40 ppm. Maksymalne koncentracje tego metalu występują lokalnie na granicy z Rosją oraz w portach Krynica Morska (44 ppm), Kąty Rybackie (41 ppm) i Tolkmicko (43 ppm).

P – fosfor (Tabl. XXI)

Zawartość fosforu w osadach Zalewu Wiślanego waha się od 0,012 do 0,296%, tj. występuje on w ilościach mniejszych niż w osadach Zatoki Gdańskiej (max. 0,38%). Osady piaszczyste południowo-wschodnich wybrzeży zalewu oraz obszaru od Krynicy Morskiej do Przebrna zawierają do 0,05% fosforu. Zdecydowanie większe ilości fosforu (od 0,17 do 0,296%) stwierdzono w osadach piaszczystych przylegających do Mierzei Wiślanej od granicy z Rosją do Krynicy Morskiej. W osadach mulistych i mulisto-ilastych zawartości fosforu występują w przedziale 0,1–0,15%. Tylko w środkowej części zalewu na linii Krynica Morska–Tolkmicko – w ilościach 0,159–0,178 ppm. Podwyższone zawartości fosforu występują lokalnie w portach Krynica Morska (0,202%), Kąty Rybackie (0,204%) i Tolkmicko (0,205%). Maksymalne koncentracje (0,237–0,293%) tego pierwiastka zawierają muły ilaste zdeponowane w środkowej części Zatoki Elbląskiej.

Pb – ołów (Tabl. XXII)

Ołów jest pierwiastkiem występującym w osadach Zalewu Wiślanego w koncentracjach niższych (max. 69 ppm) niż w osadach basenów południowobałtyckich (T. Szczepańska., Sz. Uścinowicz, 1994). Obraz geochemiczny rozmieszczenia tego pierwiastka jest mało zróżnicowany. Na przeważającym obszarze dna w osadach mulisto-ilastych i mulistych koncentracje ołowiu zamykają się w przedziale od 20 do 30 ppm. Maksymalna koncentracja (69 ppm) występuje w osadach mulisto-ilastych południowej części Zatoki Elbląskiej. Również w portach Krynica Morska, Kąty Rybackie i Tolkmicko stwierdzono lokalnie podwyższone zawartości ołowiu. Zwraca uwagę również nieco podwyższona (10–20 ppm) zawartość tego pierwiastka w piaskach odmierzejowej strony zalewu, od granicy z Rosją do Kryni-

cy Morskiej, podczas gdy w pozostałych osadach przybrzeżnych pokrytych piaskami (tabl. III) stężenie ołowiu nie przekracza 10 ppm.

S – siarka (Tabl. XXIII)

Zawartość siarki w osadach Zalewu Wiślanego jest mało zmienna i zawiera się głównie w dwóch przedziałach: 0,0–0,25% (około 53% próbek) i 0,25–0,5% (około 38% próbek). Największe zawartości siarki (2,04%) występują w mułach ilastych południowej części Zatoki Elbląskiej. Tylko lokalnie, przy porcie w Kątach Rybackich i w porcie w Tolkmicku oraz na południowy wschód od Przebrna i na północny wschód od Tolkmicka, osady zawierają od 0,842% do 1,18% siarki.

Sr – stront (Tabl. XXIV)

Stront wykazuje bardzo wysoki (0,937) współczynnik korelacji z wapniem (tab. 1). W osadach Zalewu Wiślanego występuje on w stężeniach od 9 do 206 ppm. W północnej części zalewu zawartość strontu nie przekracza 80 ppm, a na przeważającym obszarze 60 ppm. W części centralnej wynosi ona od 60 do 80 ppm, a lokalnie – w portach Tolkmicka i Krynicy Morskiej, dochodzi do 94 ppm. Największe zróżnicowanie w obrazie geochemicznym strontu rysuje się w części południowej i zachodniej oraz w Zatoce Elbląskiej. Maksymalne zawartości tego pierwiastka występują na zachód od Kątów Rybackich (208 ppm) oraz pomiędzy ujściem Szkarpawy a Kątami Rybackimi (132 ppm). Generalnie zawartości strontu w osadach zalewu, a szczególnie w jego południowej i południowo-zachodniej części, są wyższe niż w osadach Zatoki Gdańskiej.

Ti – tytan (Tabl. XXV)

Zawartość tytanu w osadach Zalewu Wiślanego waha się od 116 do 969 ppm. W części zachodniej i południowo-zachodniej zalewu zawartość tytanu w osadach wynosi od 300 do 400 ppm, zaś w części centralnej od 400 do 500. Generalnie zróżnicowanie zawartości rysuje się pomiędzy strefą osadów przybrzeżnych przy Mierzei Wiślanej, a strefą osadów przybrzeżnych odlądowych. Strefa osadów przymierzejowych, zarówno piaszczystych jak i piaszczysto-mulistych, zawiera od 300 do 500 ppm, z lokalnymi wyraźnymi wzbogaceniami na granicy z Rosją (969 ppm), na północny wschód od Krynicy Morskiej (970 ppm), w Przebrnie (505 ppm) i na wschód od Kątów Rybackich (588 ppm).

V – wanad (Tabl. XXVI)

Stężenie wanadu w osadach Zalewu Wiślanego waha się od 4 do 81 ppm. Na przeważającym obszarze zalewu zawartość tego pierwiastka w osadach wynosi od 40 do 60 ppm. Tylko osady piaszczyste strefy przybrzeżnej w południowej i południowo-wschodniej części zalewu oraz obszaru od Krynicy Morskiej do Przebrna zawierają od 4 do 20 ppm wanadu. Osady piaszczyste od granicy z Rosją do Krynicy Morskiej wykazują stężenie 20–40 ppm. Tylko lokalnie zawartości wanadu przekraczają wartość 60 ppm. Maksymalną zawartością (81 ppm) tego pierwiastka charakteryzują się osady zalegające na dnie portu w Tolkmicku.

Zn – cynk (Tabl. XXVII)

Cynk w osadach Zalewu Wiślanego występuje w ilościach od 9 do 263 ppm i jego maksymalne zawartości (263 ppm) są wyższe niż w Zatoce Gdańskiej. Bardzo wysokie korelacje cynk wykazuje z barem (0,906), miedzią (0,954), rtęcią (0,932), zaś najwyższą z ołowiem (0,975) (tab. 1). Osady piaszczyste stref przybrzeżnych zawierają od 9 do 20 ppm tego metalu, zaś osady muliste i mulisto-ilaste 80–120 ppm. Podwyższone zawartości cynku (140–160 ppm) występują w portach Krynica Morska, Kąty Rybackie i Tolkmicko oraz lokalnie w południowej części zalewu. Najwyższe koncentracje tego metalu występują w południowej części Zatoki Elbląskiej.

MAPY ZNORMALIZOWANYCH ZAWARTOŚCI WYBRANYCH SKŁADNIKÓW CHEMICZNYCH JAKO WSKAŹNIK ŹRÓDEŁ ZANIECZYSZCZEŃ I OBSZARÓW ZANIECZYSZCZONYCH

Pierwiastki śladowe, a zwłaszcza niektóre z nich, występujące w nadmiernych ilościach są szczególnie niebezpieczne dla środowiska z uwagi na rolę jaką spełniają w procesach biochemicznych (A. Kabata-Pendias, H. Pendias, 1993). Za szczególnie niebezpieczne, zwłaszcza w środowisku morskim uznano rtęć, ołów, kadm, miedź, arsen, chrom, cynk i nikiel (E. Andrulewicz, 1994). Również za groźny dla środowiska morskiego, a szczególnie dla zbiorników zamkniętych jest nadmierny dopływ pierwiastków pokarmowych fosforu, azotu i węgla organicznego, przyspieszających w efekcie proces eutrofizacji.

Ważnym parametrem kontrolującym skład chemiczny osadów jest ich uziarnienie. Składniki zanieczyszczające, w tym metale ciężkie oraz azot, fosfor i węgiel, są mocno związane z frakcjami drobnoziarnistymi (mulistymi i ilastymi). Frakcje grubsze (piaszczyste > 0,063 mm), zawierające małe stężenia składników zanieczyszczających, "rozcieńczają" stężenia tych składników w całej próbce. W strefie przybrzeżnej większości zbiorników wodnych, w tym również Zalewu Wiślanego, zgodnie z ogólnymi prawidłowościami dyferencjacji mechanicznej materiału osadowego, dominują osady piaszczyste (tabl. II). Osady piaszczyste znajdujące się w pobliżu źródeł zanieczyszczeń mogą zawierać znacznie mniejsze ilości bezwzględne składników zanieczyszczających, niż osady mulisto-ilaste występujące z dala od źródeł zanieczyszczeń. W celu skorygowania tego efektu, tak aby można było porównywać skład chemiczny próbek o różnym uziarnieniu, stosuje się tzw. normalizację względem składnika, który odzwierciedla skład granulometryczny

osadu i nie zależy od dopływu antropogenicznego. Normalizując zawartość składnika zanieczyszczającego oblicza się stosunek jego całkowitej zawartości w próbce nie rozdzielonej, do całkowitego stężenia składnika odniesienia (normalizującego). Najczęściej jako składników normalizujących używa się: Al, Fe, Sc, Cs, Li, $C_{org.}$ lub zawartości określonych frakcji granulometrycznych, < 0,063 mm, < 0,02 mm itp. (L. Brügmann, 1992). Stosowany jest też niekiedy potas (M. Kersten et al., 1992).

W osadach Zalewu Wiślanego spośród wymienionych wyżej pierwiastków oznaczono Al, Fe, Li oraz $C_{org.}$ Wzajemne korelacje pomiędzy zawartością w osadach Al, Fe i Li są bardzo wysokie i wynoszą od 0,945 do 0,991 (tab. 1). W związku z powyższym, wyniki procesu normalizacji zawartości składników zanieczyszczających do każdego z tych pierwiastków będą podobne. W niniejszym opracowaniu przedstawiono mapy zawartości wybranych pierwiastków znormalizowanych w stosunku do glinu (tabl. XXVIII–XXXVII), jako najpowszechniej stosowanego składnika normalizującego.

Mapy znormalizowanych względem glinu zawartości arsenu, kadmu, chromu, miedzi, rtęci, ołowiu i cynku oraz fosforu, azotu i węgla organicznego, posłużyły w niniejszym opracowaniu do lokalizacji źródeł dopływu tych pierwiastków do Zalewu Wiślanego.

Zalew Wiślany jest zbiornikiem płytkim, w związku z czym powierzchniowa warstwa osadów wyjątkowo często podlega resuspensji i redepozycji przez fale i prądy. Uruchomienie powierzchniowej warstwy osadów ma miejsce także na skutek prowadzenia połowów ryb i żeglugi na wodach zalewu oraz na skutek aktywności organizmów bentonicznych. Z powyższych powodów ustalenie współczesnego tempa sedymentacji napotyka na trudności. Pionowa zmienność składników chemicznych w warstwie do 20 cm (tabl. IV–XXVII) nie wykazuje prawidłowości znanych z głębokowodnych basenów Morza Bałtyckiego (T. Szczepańska, Sz. Uścinowicz, 1994; C. Laban *et al.* 1994). Datowania metodą ^{14}C osadów dennych Zalewu Wiślanego z rdzenia wiertniczego ZW 6 (tabl. XXXVIII) wykazały, że tempo sedymentacji w ciągu ostatnich 5 tys. lat wynosiło około 1 mm/rok. Przy takim tempie sedymentacji osady zdeponowane 100–200 lat temu, a więc nie skażone domieszkami składników chemicznych wprowadzonych do środowiska na skutek działalności gospodarczej, powinny występować na głębokości około 10–20 cm poniżej powierzchni dna. Jednak ze względu na dużą dynamikę przypowierzchniowej warstwy osadów domieszki składników antropogenicznych występują prawdopodobnie nieco głębiej.

W osadach leżących poniżej 0,5 m występują niektóre pierwiastki, zwłaszcza kadm i rtęć, w ilości wyraźnie mniejszej niż w warstwie powierzchniowej (tab. 2) co wskazuje, że znajdują się one poniżej współczesnej warstwy dynamicznej osadów i mogą być uznane za tło geochemiczne, odzwierciedlające chemiczny skład osadów powstałych w epoce przedindustrialnej. Jednocześnie, analiza zmienności wybranych składników w profilu pionowym osadów Zalewu Wiślanego (tabl. XXXVIII) wykazała, że w przeszłości geologicznej powstawały naturalne koncentracje niektórych składników chemicznych, m.in. arsenu, miedzi, ołowiu i cynku, wyższe niż występujące współcześnie w warstwie powierzchniowej, będącej pod wpływem czynników antropogenicznych.

$C_{org.}$/Al (Tabl. XXVIII)

Rozmieszczenie $C_{org.}$/Al wskazuje, że lądowymi źródłami tego składnika osadów są rzeki Pasłęka, Szkarpawa i Nogat, a także porty Krynica Morska i Tolkmicko. Do obszarów zagrożonych nadmierną akumulacją węgla organicznego należą: Zatoka Elbląska, południowo-zachodnia część zalewu pomiędzy Suchaczem, Przebrnem i Kątami Rybackimi oraz porty w Kątach Rybackich, Krynicy Morskiej i Tolkmicku. W obszarach tych zawartość węgla organicznego w warstwie powierzchniowej przekracza wartości typowe dla tła geochemicznego oraz jest wyższa od średniej zawartości w powierzchniowej warstwie mułów Zalewu Wiślanego.

As/Al (Tabl. XXIX)

Rozmieszczenie wskaźnika As/Al wskazuje, że główne źródła dopływu arsenu znajdują się na południowo-wschodnim wybrzeżu pomiędzy Suchaczem a Tolkmickiem oraz pomiędzy Fromborkiem a granicą polsko-rosyjską. Mniejsze źródła, odzwierciedlone niższymi wartościami współczynnika As/Al, zlokalizowane są w rejonie ujścia Szkarpawy i Nogatu oraz wzdłuż Mierzei Wiślanej na odcinku Przebrno–Krynica Morska i około 3 km na zachód od Piasków. Średnia zawartość arsenu w osadach tworzących tło geochemiczne jest większa niż średnia w powierzchniowej warstwie mułów (tab. 2). Obszary, w których obecnie arsen występuje w ilości większej od średniej dla współczesnych mułów i w ilości zbliżonej do średniej tła, nie są rozległe. Występują one w Zatoce Elbląskiej oraz w środkowej części Zalewu Wiślanego, pomiędzy Tolkmickiem a Krynicą Morską.

Cd/Al (Tabl. XXX)

Kadm występujący w nadmiarze jest jednym z najniebezpieczniejszych pierwiastków dla ekosystemu. Podwyższone zawartości współczynnika Cd/Al uwidaczniają się w kilku rejonach wzdłuż wybrzeży Zalewu Wiślanego, wartości najwyższe zanotowano w rejonie około 3 km na południowy-zachód od Piasków oraz w ujściu Szkarpawy i Nogatu (tabl. V). Średnie zawartości kadmu w powierzchniowej warstwie mułów są 2, 3 razy większe od średniej zawartości w osadach przyjętych jako tło geochemiczne (tab. 2). Obszary zagrożone nadmierną akumulacją kadmu w osadach zajmują znaczne powierzchnie dna w zachodniej części Zalewu Wiślanego, zwłaszcza na zachód od linii Tolkmicko–Krynica Morska.

Cr/Al (Tabl. XXXI)

Chrom dostaje się do Zalewu Wiślanego głównie z dorzecza Pasłęki. Wskazuje na to bardzo wysoka wartość współczynnika Cr/Al stwierdzona w ujściu tej rzeki. Niższe wartości współczynnika Cr/Al występują wzdłuż wybrzeży Mierzei Wiślanej; około 2 km na zachód i około 4 km na wschód od Krynicy Morskiej oraz na

odcinku od około 3 km na zachód od Piasków do granicy państwowej. Średnie i maksymalne zawartości chromu w mułach warstwy powierzchniowej i w tle geochemicznym są bardzo podobne (tab. 2). Obszar zagrożony zanieczyszczeniem chromem ograniczony jest do niewielkiego fragmentu dna na północ i północny zachód od ujścia Pasłęki.

Cu/Al (Tabl. XXXII)

Miedź dostaje się do Zalewu Wiślanego z tych samych źródeł co kadm oraz dodatkowo z ujścia rzeki Pasłęki i Elbląga, tj. ze źródeł w których kadmu nie stwierdzono. Podobnie jak w przypadku kadmu najwyraźniej zaznacza się źródło zlokalizowane w strefie przybrzeżnej około 3 km na południowy zachód od Piasków. Zawartość miedzi, zarówno średnia jak i maksymalna, jest większa w osadach tła geochemicznego niż we współczesnych mułach (tab. 2). Głównym obszarem zagrożonym zanieczyszczeniem miedzią jest Zatoka Elbląska.

Hg/Al (Tabl. XXXIII)

Rtęć jest obok kadmu jednym z najszkodliwszych pierwiastków. W oparciu o mapę rozmieszczenia współczynnika Hg/Al stwierdzono, że źródłami rtęci są rzeki Elbląg i Pasłęka (tabl. VIII). Do obszarów zagrożonych zanieczyszczeniem rtęcią należą Zatoka Elbląska i przylegająca do niej południowo-zachodnia część Zalewu Wiślanego (tabl. XVIII). W obszarach tych zawartość rtęci w mułach warstwy powierzchniowej jest większa zarówno od zawartości średniej w tej warstwie, jak i od średnich wartości tła geochemicznego (tabl. XXXVIII).

N/Al (Tabl. XXXIV)

Azot dopływa do Zalewu Wiślanego głównie rzekami Elbląg i Pasłęka oraz z portów we Fromborku i Tolkmicku. Podwyższone wartości współczynnika N/Al stwierdzono też przy Mierzei Wiślanej nad samą granicą państwową z Rosją. Azot w podwyższonych ilościach występuje w warstwie powierzchniowej osadów mulistych w Zatoce Elbląskiej i w przylegającej do niej południowo-zachodniej części Zalewu Wiślanego oraz w pobliżu Fromborka, a także w portach Tolkmicko, Krynica Morska i Kąty Rybackie.

P/Al (Tabl. XXXV)

Fosfor dostaje się do Zalewu Wiślanego wzdłuż prawie całej strefy przybrzeżnej. Obok spływu z lądu poważnym źródłem fosforu jest prawdopodobnie ptactwo wodne. Najwyższa wartość współczynnika P/Al występuje w strefie przybrzeżnej około 3 km na zachód od Piasków na Mierzei Wiślanej. Zawartość fosforu w powierzchniowej warstwie (0–2 cm) osadów mulisto-ilastych jest nieco wyższa od wartości przyjętych za tło geochemiczne (tab. 2).

Pb/Al (Tabl. XXXVI)

Ołów dopływa do Zalewu Wiślanego z kilku źródeł wyraźnie uwidaczniających się na mapie rozmieszczenia wskaźnika Pb/Al. Najwyższe wartości tego wskaźnika występują w południowej części Zatoki Elbląskiej w pobliżu Suchacza oraz około 3 km na południowy zachód od Tolkmicka. Ponadto wyróżniają się: rejon Fromborka, ujście Pasłęki i wybrzeża Mierzei Wiślanej od Przebrna do granicy polsko-rosyjskiej. W przeszłości geologicznej zachodziły w Zalewie Wiślanym naturalne procesy akumulacji ołowiu w ilościach większych niż ma to miejsce obecnie, tak że średnie zawartości tego metalu są wyższe dla tła geochemicznego niż dla warstwy powierzchniowej mułów (tab. 2). Współcześnie tylko w Zatoce Elbląskiej oraz w rejonie Krynicy Morskiej występują zawartości ołowiu wyższe niż średnia tła geochemicznego.

Zn/Al (Tabl. XXXVII)

Cynk, podobnie jak rtęć, dopływa do Zalewu Wiślanego głównie rzekami Pasłęką i Elbląg. Ponadto wyraźne źródło cynku rysuje się na wybrzeżu zalewu w rejonie Suchacza. Zawartości cynku, podobnie jak ołowiu, miedzi i arsenu, są w warstwie powierzchniowej osadów mulistych często mniejsze niż w poziomie tła (tab. 2). Wyraźnie wzbogacone w cynk, w stopniu 2–3 razy przewyższającym wartości tła, są osady występujące w Zatoce Elbląskiej oraz, w nieco mniejszym stopniu, w rejonie Krynicy Morskiej.

PODSUMOWANIE

W obrazie geochemicznym powierzchniowej warstwy osadów dennych Zalewu Wiślanego uwidaczniają się niewątpliwie wpływy antropogeniczne. Są one wyrażone podwyższonymi koncentracjami większości pierwiastków w rejonie Zatoki Elbląskiej oraz w portach: Krynica Morska, Tolkmicko i Kąty Rybackie. Znacznie wyraźniej wpływy antropogeniczne widoczne są po znormalizowaniu wartości poszczególnych pierwiastków względem glinu. Analiza tych wartości wykazała, że obok wymienionych wyżej portów źródłami dopływu wielu składników chemicznych są rzeki.

Rzeka Elbląg, przepływająca przez Elbląg i wpadająca do południowej odnogi Zalewu Wiślanego tzw. Zatoki Elbląskiej, jest poważnym źródłem ołowiu, rtęci, cynku oraz miedzi, które to składniki akumulowane są w osadach głównie w pobliżu jej ujścia. Podwyższone zawartości azotu, fosforu i węgla organicznego występujące w mułach Zatoki Elbląskiej również dostarczane są przez tę rzekę.

Pasłęka, niosąca do Zalewu Wiślanego wypłukane z gleb składniki nawozów sztucznych i środków ochrony roślin, a także ścieki komunalne Braniewa, jest poważnym źródłem: chromu, miedzi, ołowiu, rtęci, cynku i arsenu. Pasłęka dostarcza też węgiel organiczny, azot i fosfor.

Bauda jest rzeką czystszą od Pasłęki. W rejonie ujściowym, w osadach Zalewu Wiślanego występują wyraźnie podwyższone wartości współczynnika As/Al oraz słabiej zaznaczające się Cd/Al, Cu/Al i P/Al co wskazuje, że Bauda może być źródłem arsenu, kadmu, miedzi i fosforu.

Ujścia Szkarpawy i Nogatu są relatywnie czyste. Podobnie jak w rejonie ujściowym Baudy występują tu nieznacznie podwyższone znormalizowane wartości arsenu, kadmu, miedzi i fosforu. Szczególnie interesujące i bardzo trudne do wyjaśnienia są względnie podwyższone wartości wielu składników chemicznych w strefie przybrzeżnej.

Strefa brzegowa pomiędzy Suchaczem a Tolkmickiem jest źródłem arsenu, ołowiu i cynku oraz w mniejszym stopniu kadmu i miedzi. Szczególnie wyraźnie uwidaczniają się wysokie wartości współczynników As/Al oraz Pb/Al w miejscach gdzie przebiegają tory kolejowe w pobliżu linii brzegowej.

Strefa brzegowa pomiędzy Kątami Rybackimi a Krynicą Morską zaznacza się nieznacznie podwyższonymi wartościami As/Al, Pb/Al i Cu/Al oraz w mniejszym stopniu Cd/Al. Arsen, ołów miedź i kadm dostają się tu najprawdopodobniej z oczyszczalni ścieków zlokalizowanej nad brzegami Zalewu Wiślanego, około 2 km na południowy zachód od Krynicy Morskiej. Źródłem zanieczyszczeń jest też transport samochodowy na szosie biegnącej bardzo blisko brzegów zalewu, na odcinku pomiędzy Kątami Rybackimi a Przebrnem. Nie jest wykluczone, że zanieczyszczenia mogą pochodzić także ze zlokalizowanych tam ośrodków wypoczynkowych.

Strefa brzegowa pomiędzy Krynicą Morską a granicą polsko-rosyjską, zwłaszcza rejon położony około 3 km na południowy zachód od Piasków jest źródłem fosforu oraz skażeń metalami, takimi jak: kadm, miedź, ołów i arsen. Przy granicy państwa występuje też podwyższona zawartość współczynnika N/Al. Na tym odcinku Mierzei Wiślanej nie ma poza Piaskami zabudowań, a szosa o małym natężeniu ruchu oddzielona jest od Zalewu Wiślanego pasmem wysokich do około 30 m, zalesionych wydm. Brak znanych źródeł zanieczyszczeń oraz rodzaj występujących tam pierwiastków, pozwala sądzić, że źródłem zanieczyszczeń może być zatopiona amunicja lub inne pozostałości z II wojny światowej.

Analiza geochemiczna osadów Zalewu Wiślanego wykazała również, że w przeszłości geologicznej powstawały naturalne koncentracje składników chemicznych większe niż występujące współcześnie w warstwie powierzchniowej, będącej pod wpływem czynników antropogenicznych (tab. 2, tabl. XXXVIII).

Można więc przyjąć, iż w obszarze Zalewu Wiślanego istnieją tylko niewielkie obszary, których osady wzbogacone są w składniki chemiczne mogące stwarzać zagrożenie dla środowiska.

LITERATURA

ANDRULEWICZ E., 1994 – Morze Bałtyckie jego zagrożenia i ochrona. Państw. Insp. Ochr. Środ., Warszawa.

BRÜGMANN L., 1992 – Review of methods for the determination of contaminants in sediments "Review of contaminants in Baltic sediments". Cooperative research raport 180, ICES Copenhagen.

KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H., 1993 – Biogeochemia pierwiastków śladowych. PWN, Warszawa.

KERSTEN M., BALLAS P. W.,V. ENK R. J., GREEN N., KRAMER K. J. M., KRIEWS M. MONTENEY F. ZUURDEEG. B., AKKERMAN I., D. VRIES A., MORIS A., EBBING J., ZWOLSMAN J. J. G., 1992 – Metals. In: "Background concentrations of natural compounds". Ed. R. Laane, Tidal Waters report: DGW-92.033.

EMSLEY J., 1980 – The phosphorus cycle. In: "The natural environment and biogeochemical cycles". Vol. 1. Part A, Springer - Verlage, Berlin Heidelberg, New York.

LABAN C., EBBING J., ZACHOWICZ J., SZCZEPAŃSKA T., UŚCINOWICZ SZ., 1994 – Geological and geochemical sea bed monitoring of Gdańsk Gulf area. Arch. OGM Państwowy Instytut Geologiczny, Sopot.

NIECZAJ I.J., SILICZ U.W., JABŁOŃSKA T., 1975 – Hydrografia zlewiska zalewu. "Hydrometeorologiczny ustrój Zalewu Wiślanego" (red. A. Majewski). Wyd. Kom. i Łączności, Warszawa.

SHEPARD F.P., 1954 – Nomenclature based on sand-silt-clay ratio. *Journal of Sediment. Petrology*, Vol. 24, No 3.

SOŁOWIEW I. I., 1975 – Charakterystyka morfometryczna zalewu i jego linia brzegowa. "Hydrometeorologiczny ustrój Zalewu Wiślanego" (red. A. Majewski). Wyd. Kom. i Łączności, Warszawa.

SZCZEPAŃSKA T., UŚCINOWICZ SZ., 1994 – Atlas geochemiczny południowego Bałtyku w skali 1:500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

Tabela 1
Table

Współczynniki korelacji między składnikami chemicznymi w osadach powierzchniowych (0–2 cm)
Correlation coefficients between chemical components in surface sediments (0–2 cm)

	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Mg	Mn	Ni	N	P	Pb	S	Sr	Ti	V	Zn	$C_{org.}$
Al	X	0.640	0.948	0.979	0.655	0.516	0.965	0.932	0.835	0.961	0.751	0.991	0.951	0.673	0.982	0.815	0.623	0.863	0.485	0.624	0.456	0.989	0.877	0.897
As		X	0.679	0.661	0.458	0.455	0.674	0.615	0.629	0.659	0.620	0.647	0.602	0.580	0.654	0.443	0.511	0.673	0.498	0.512	0.312	0.660	0.664	0.620
Ba			X	0.942	0.753	0.553	0.933	0.886	0.850	0.900	0.818	0.945	0.881	0.798	0.952	0.849	0.672	0.878	0.495	0.689	0.370	0.937	0.906	0.951
Be				X	0.667	0.563	0.974	0.932	0.828	0.971	0.761	0.976	0.947	0.701	0.973	0.796	0.697	0.862	0.449	0.626	0.471	0.989	0.872	0.888
Ca					X	0.647	0.708	0.598	0.710	0.630	0.663	0.663	0.594	0.636	0.698	0.655	0.630	0.658	0.438	0.937	0.229	0.658	0.707	0.759
Cd						X	0.597	0.501	0.538	0.572	0.448	0.541	0.529	0.530	0.560	0.391	0.563	0.504	0.298	0.613	0.318	0.563	0.502	0.508
Co							X	0.912	0.817	0.955	0.755	0.968	0.939	0.725	0.977	0.758	0.653	0.855	0.462	0.667	0.463	0.977	0.859	0.876
Cr								X	0.779	0.940	0.792	0.920	0.913	0.667	0.908	0.759	0.677	0.834	0.405	0.552	0.535	0.944	0.841	0.858
Cu									X	0.836	0.853	0.818	0.761	0.504	0.843	0.705	0.605	0.947	0.731	0.656	0.414	0.835	0.954	0.831
Fe										X	0.760	0.945	0.946	0.664	0.936	0.753	0.731	0.891	0.467	0.594	0.601	0.980	0.874	0.844
Hg											X	0.761	0.743	0.604	0.775	0.675	0.559	0.882	0.535	0.535	0.287	0.745	0.932	0.835
Li												X	0.961	0.687	0.989	0.787	0.584	0.843	0.456	0.637	0.381	0.977	0.869	0.887
Mg													X	0.656	0.945	0.756	0.581	0.808	0.390	0.572	0.416	0.947	0.831	0.830
Mn														X	0.701	0.591	0.636	0.581	0.108	0.546	0.314	0.676	0.607	0.746
Ni															X	0.793	0.588	0.857	0.486	0.657	0.369	0.974	0.885	0.901
N																X	0.616	0.741	0.424	0.507	0.264	0.790	0.775	0.876
P																	X	0.635	0.199	0.560	0.646	0.681	0.613	0.681
Pb																		X	0.706	0.589	0.473	0.871	0.975	0.853
S																			X	0.525	0.213	0.481	0.653	0.506
Sr																				X	0.284	0.635	0.602	0.708
Ti																					X	0.527	0.367	0.329
V																						X	0.868	0.878
Zn																							X	0.896
$C_{org.}$																								X

Tabela 2
Table

Zawartość wybranych składników chemicznych w mułach ilastych Zalewu Wiślanego
Contents of some chemical components in clayey silts of Vistula Lagoon

Warstwa (m)	Ilość próbek	*)	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	P	$C_{org.}$
			(ppm)							(%)	(%)
0.00–0.02	59	x	5.2	1.62	61.8	20.4	0.17	25.9	105.2	0.137	2.92
		s	1.77	0.52	8	3.7	0.05	3.7	18.7	0.041	0.81
		max.	12	3.9	78	33	0.38	38	175	0.293	6.78
0.5–0.6	7	x	8	0.76	65	27	0.19	33	130	0.116	2.38
		max.	13	1.7	75	40	0.39	47	215	0.238	4.43
1.0–1.1	7	x	7	0.85	61	26	0.2	33	129	0.110	2.27
		max.	10	1.6	78	54	0.65	60	317	0.317	5.19
2.0–2.1	7	x	6	0.61	60	24	0.12	27	103	0.086	2.04
		max.	9	2.2	71	34	0.26	40	161	0.169	4.37
3.0–3.1	7	x	6	0.57	50	18	0.06	18	80	0.067	2.59
		max.	8	2.0	63	22	0.08	25	95	0.087	5.07
0.5–3.1	28	x	7.0	0.70	59	24	0.14	28	111	0.095	2.32
		s	2.3	0.59	12	8.1	0.12	10.3	51	0.058	1.20
		max.	13	2.2	78	54	0.65	60	317	0.317	5.19

*) x - średnia arytmetyczna, s - odchylenie standardowe, max. - wartość maksymalna

SPIS TREŚCI

Wstęp 3

Metody prac terenowych i laboratoryjnych 3

Prace terenowe 3

Prace laboratoryjne 3

Uziarnienie osadów dennych 4

Mapy geochemiczne 4

Mapy znormalizowanych zawartości wybranych składników chemicznych jako wskaźnik źródeł zanieczyszczeń i obszarów zanieczyszczonych 7

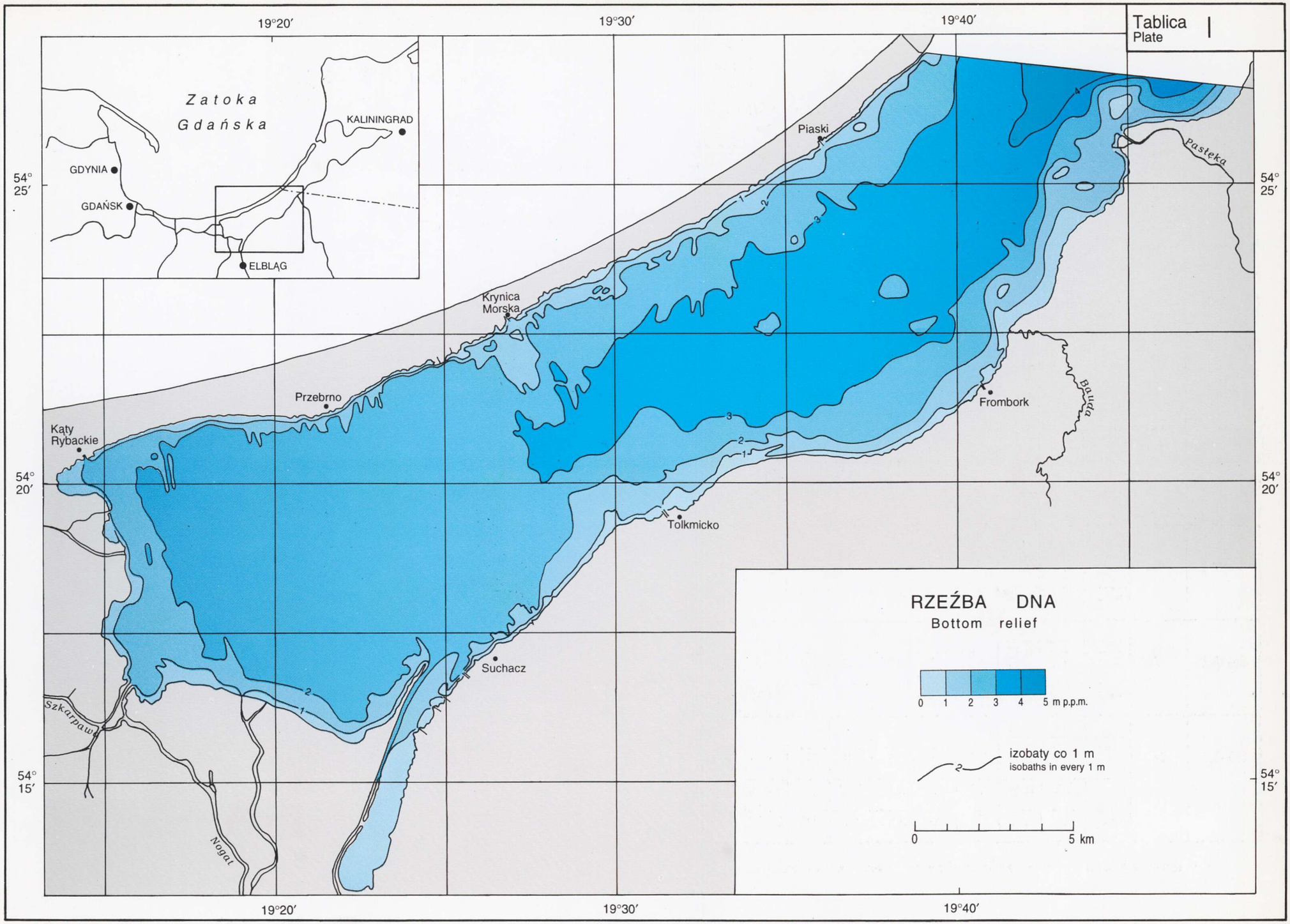
Podsumowanie 9

Literatura 10

Summary 11

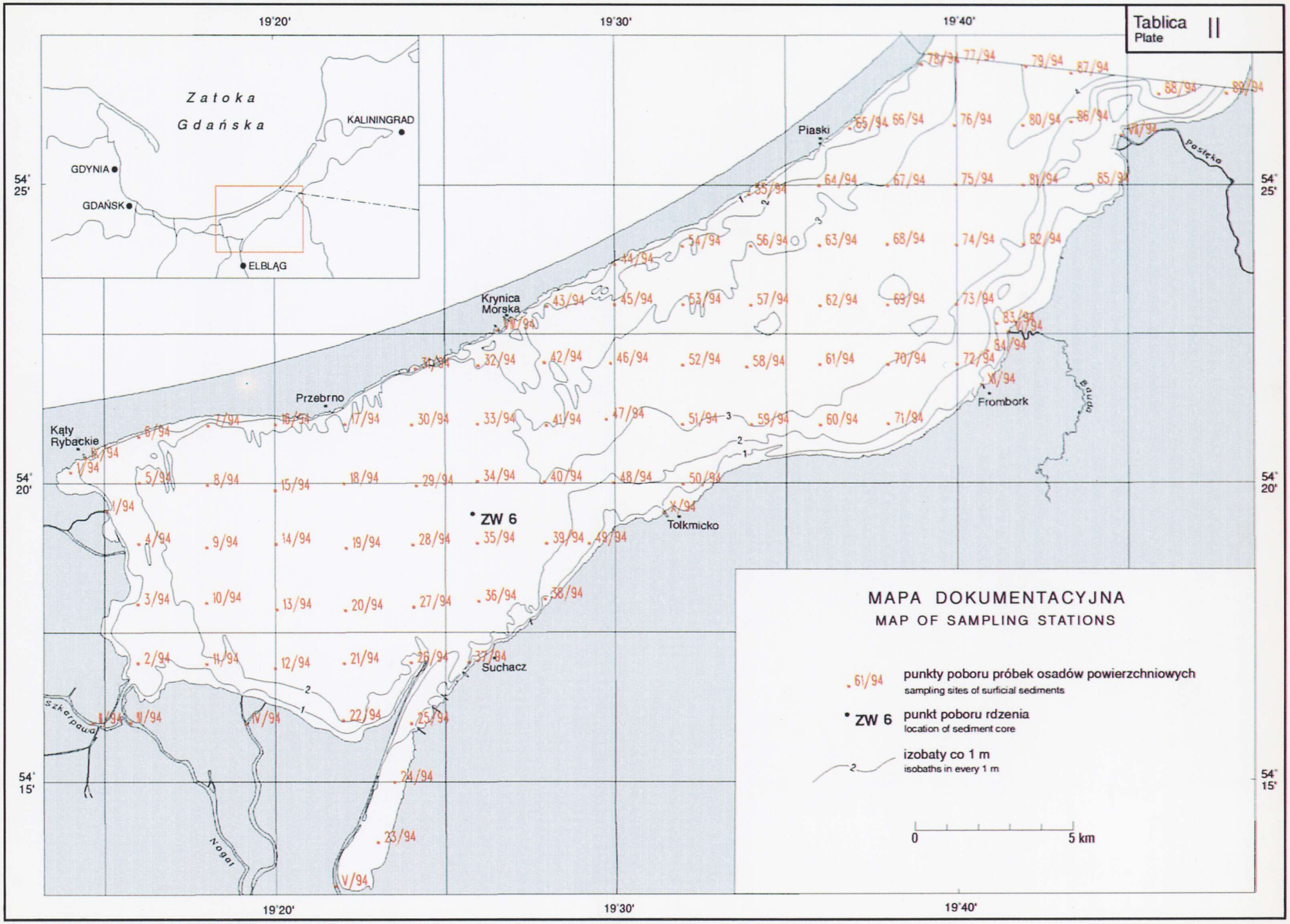
Tablice I–XXXVIII

Tablica
Plate I



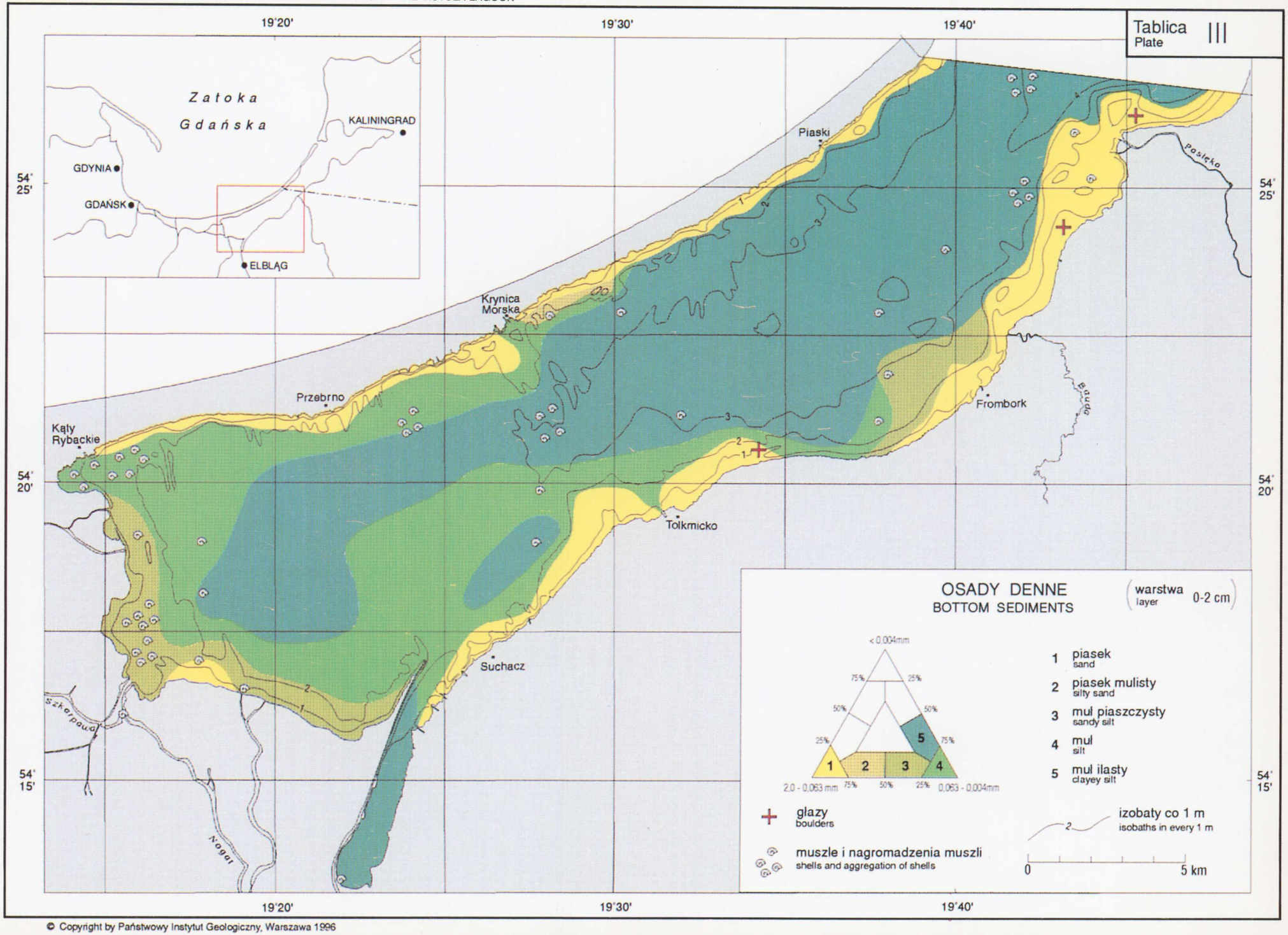
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica II
Plate



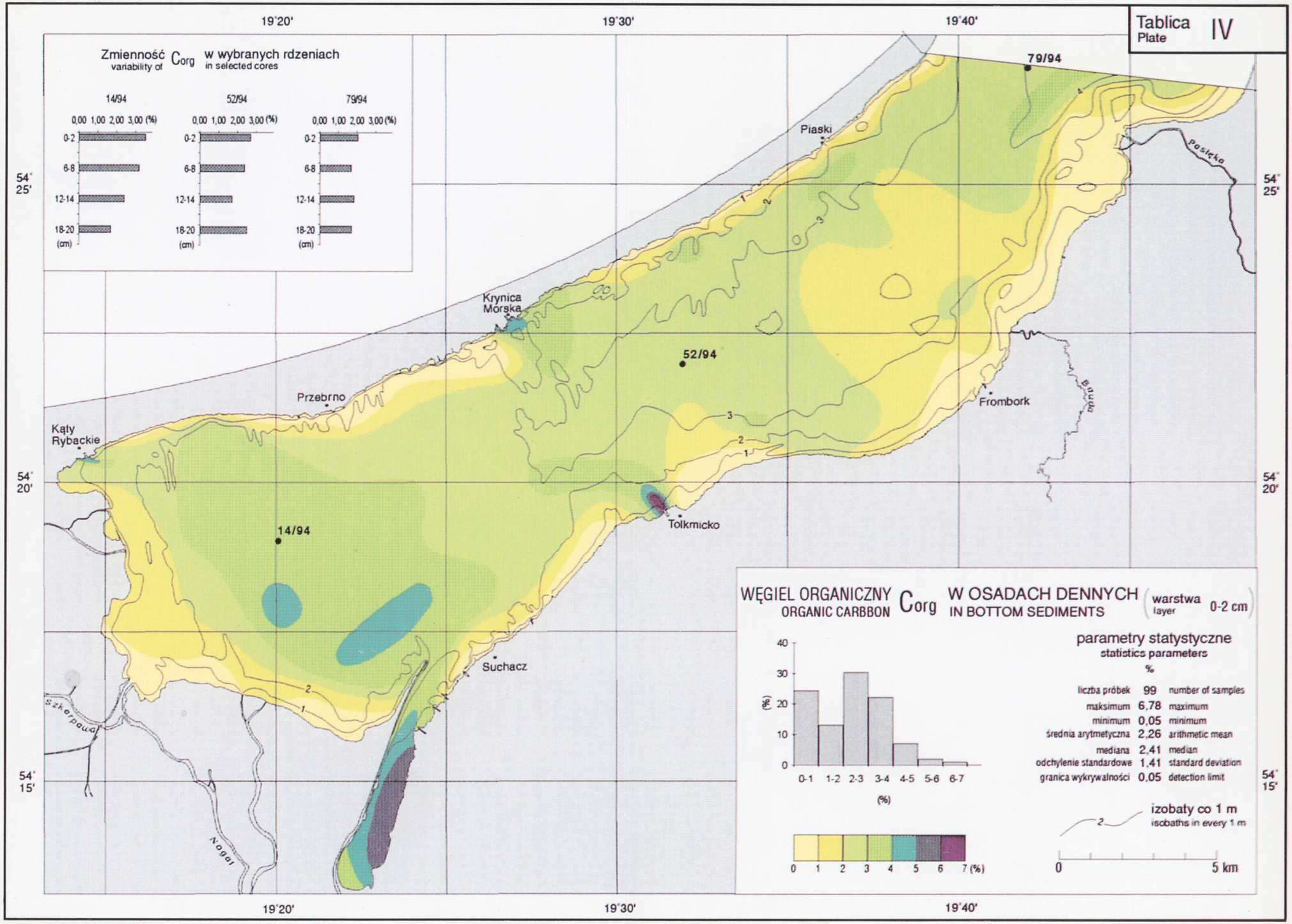
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica / Plate III

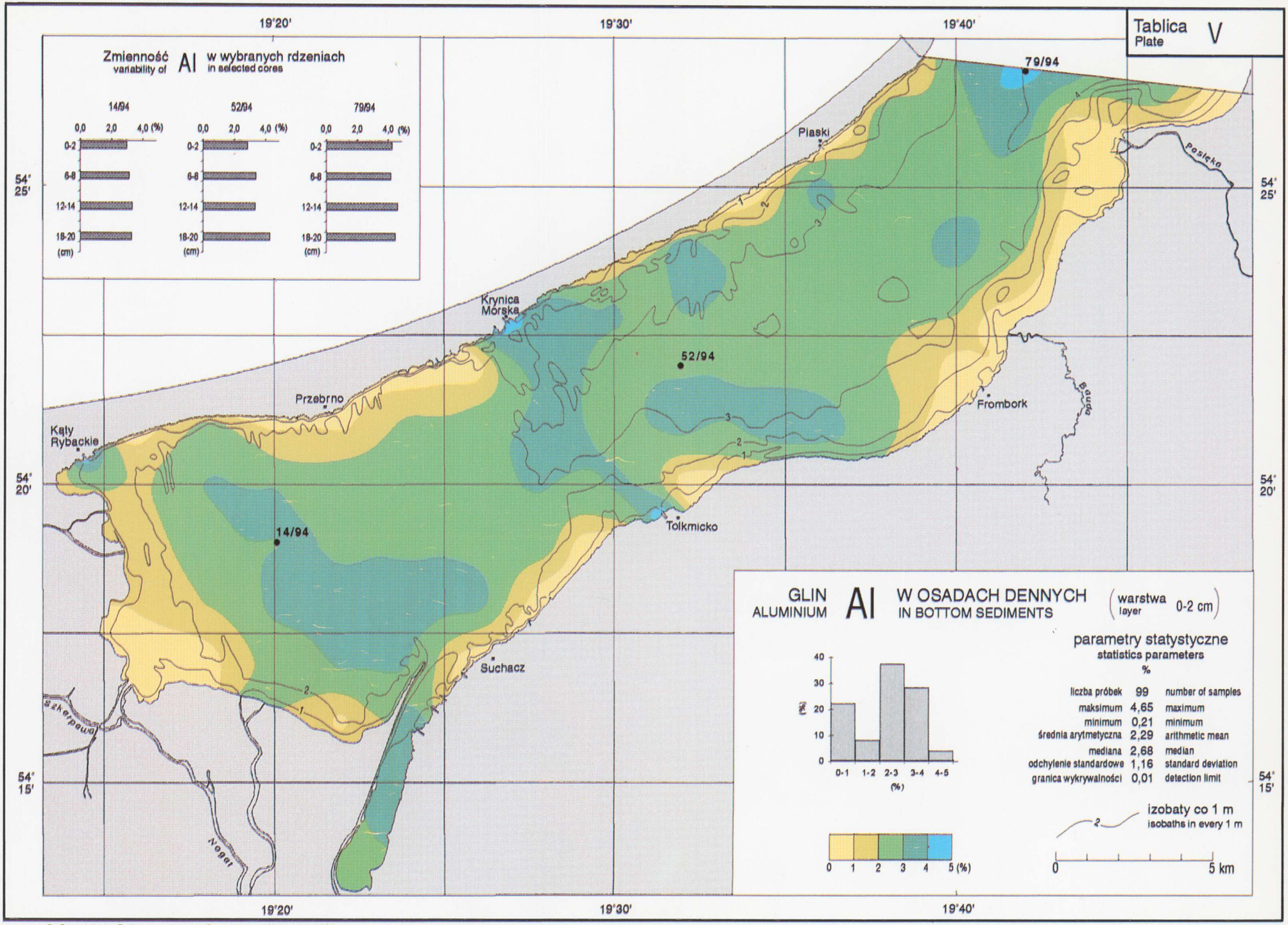


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate IV

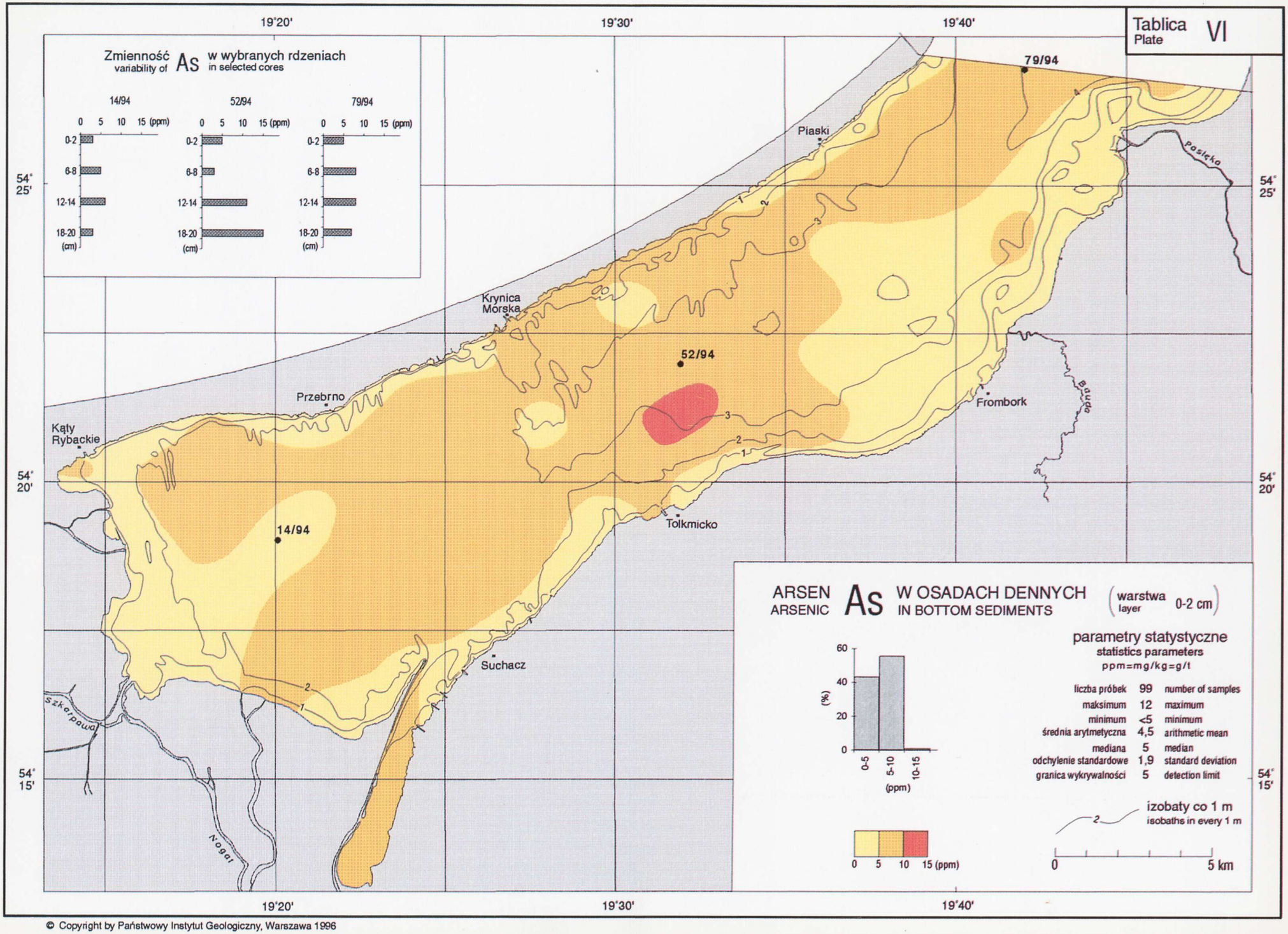


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996



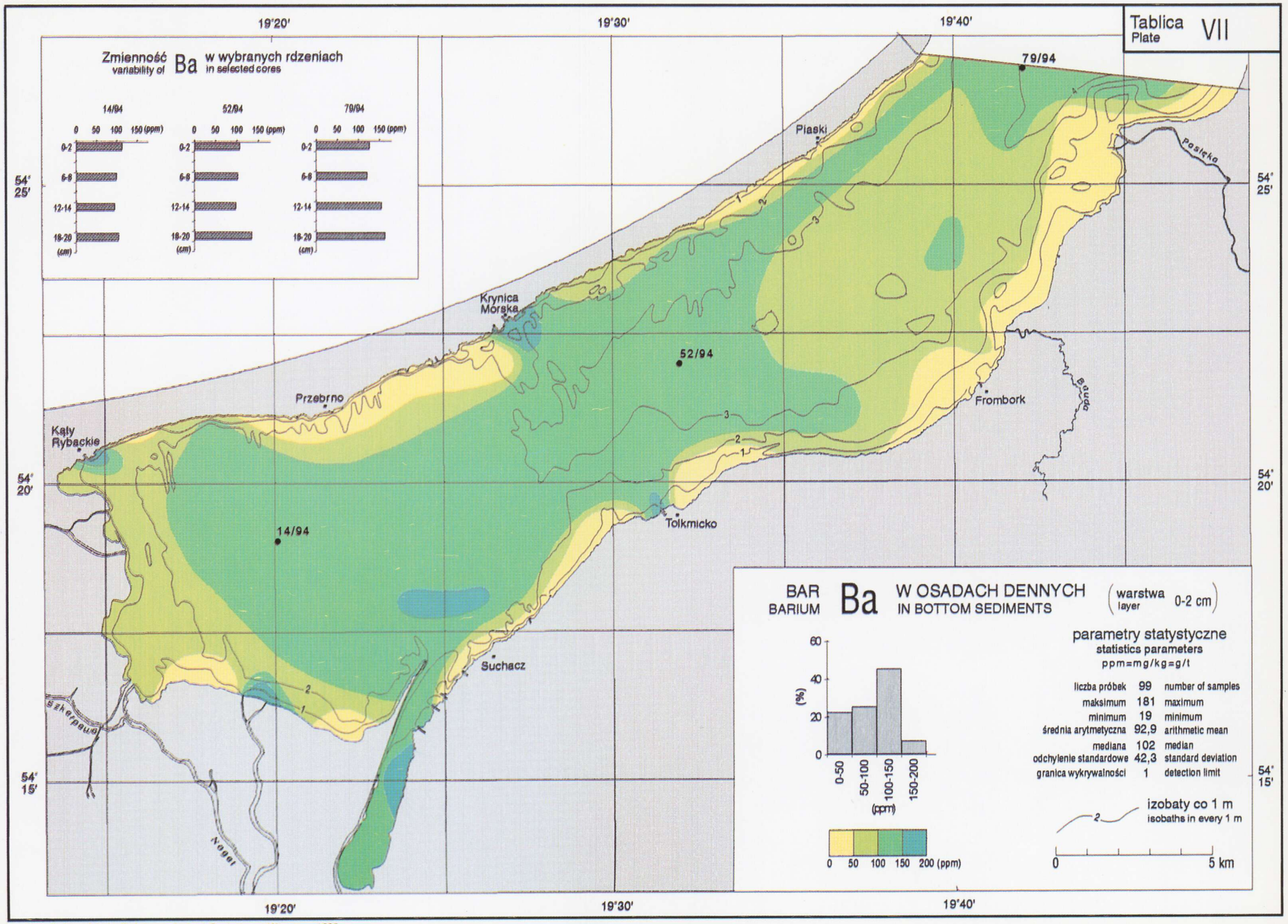
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate VI



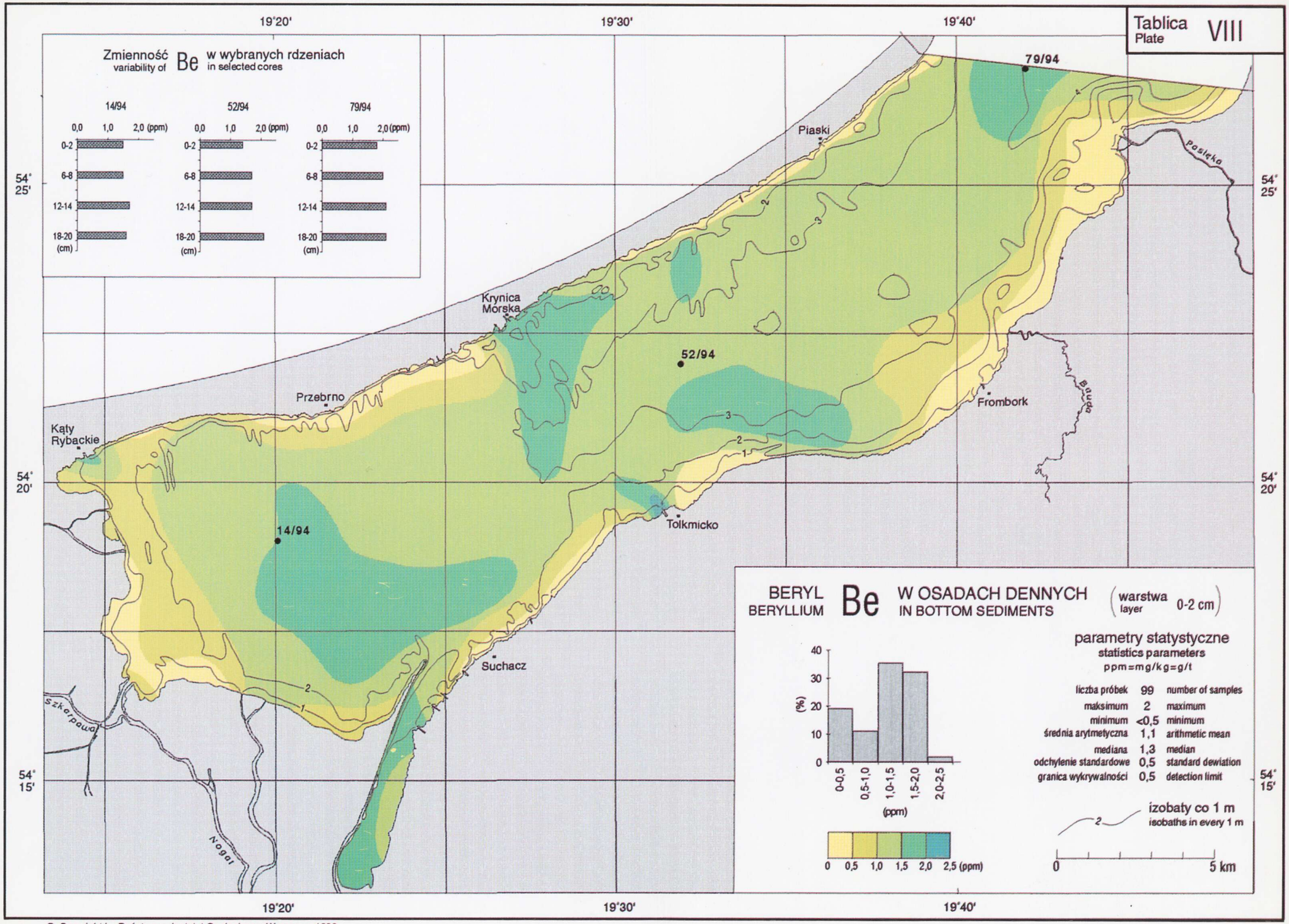
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate VII



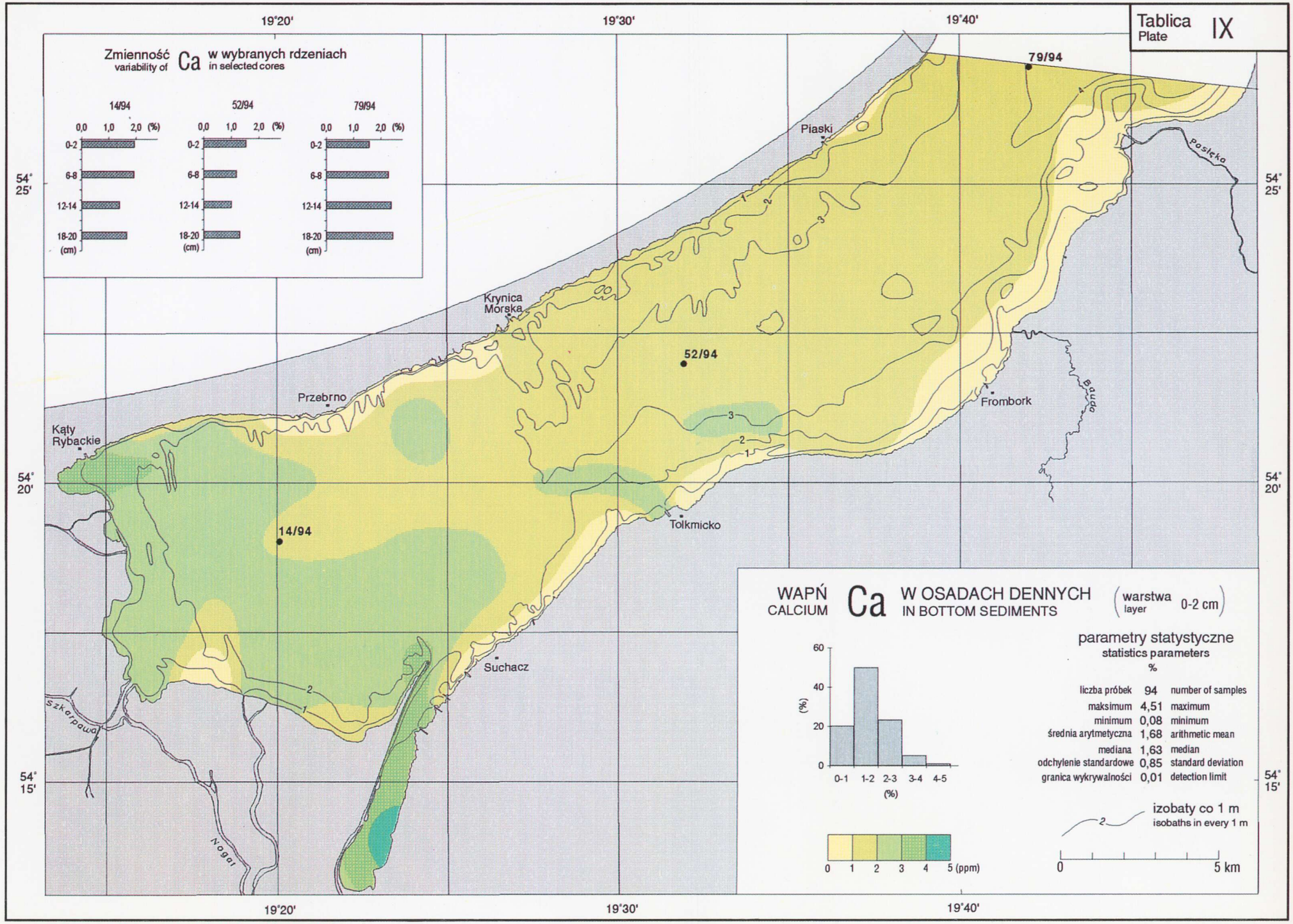
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate VIII



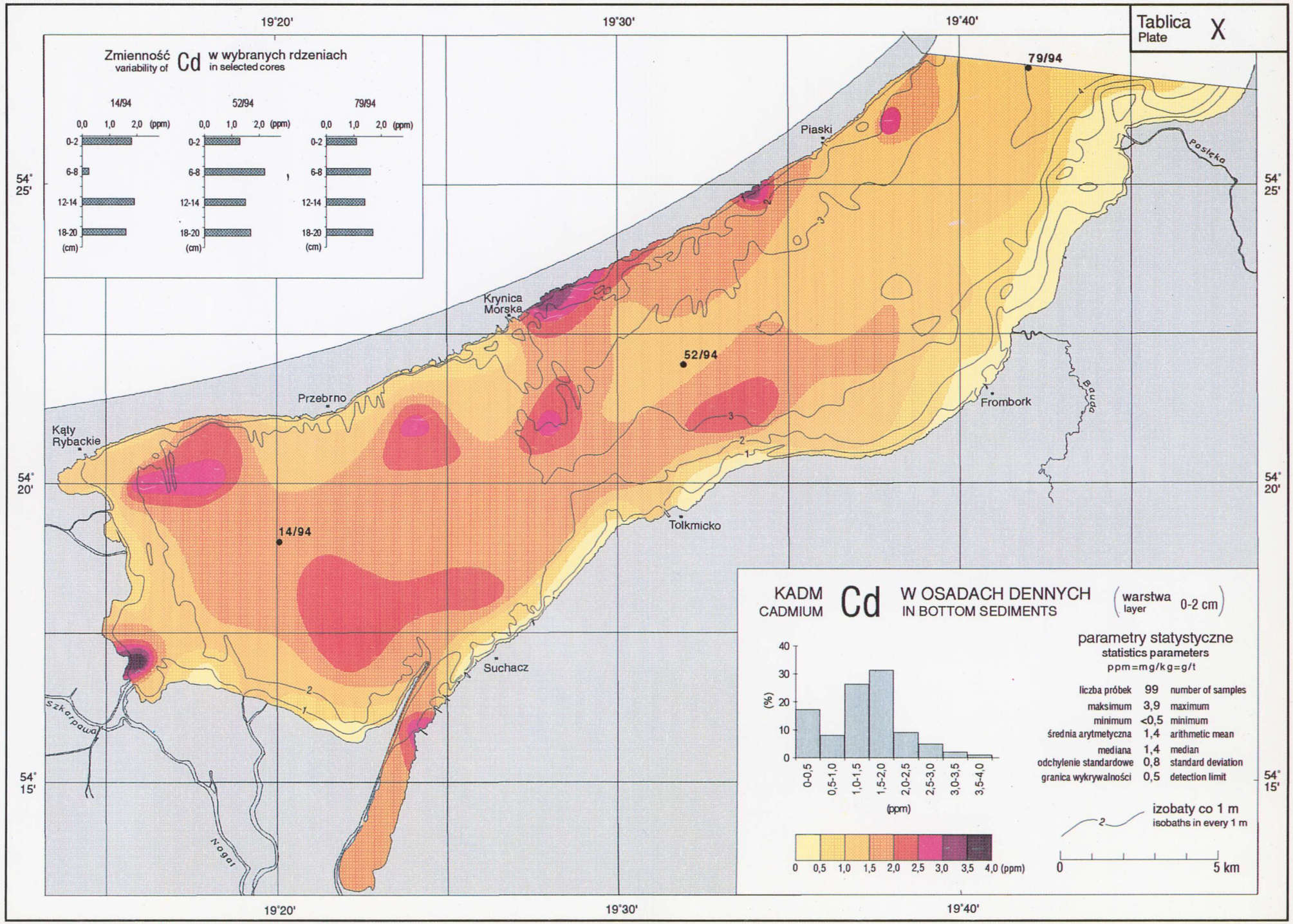
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate IX



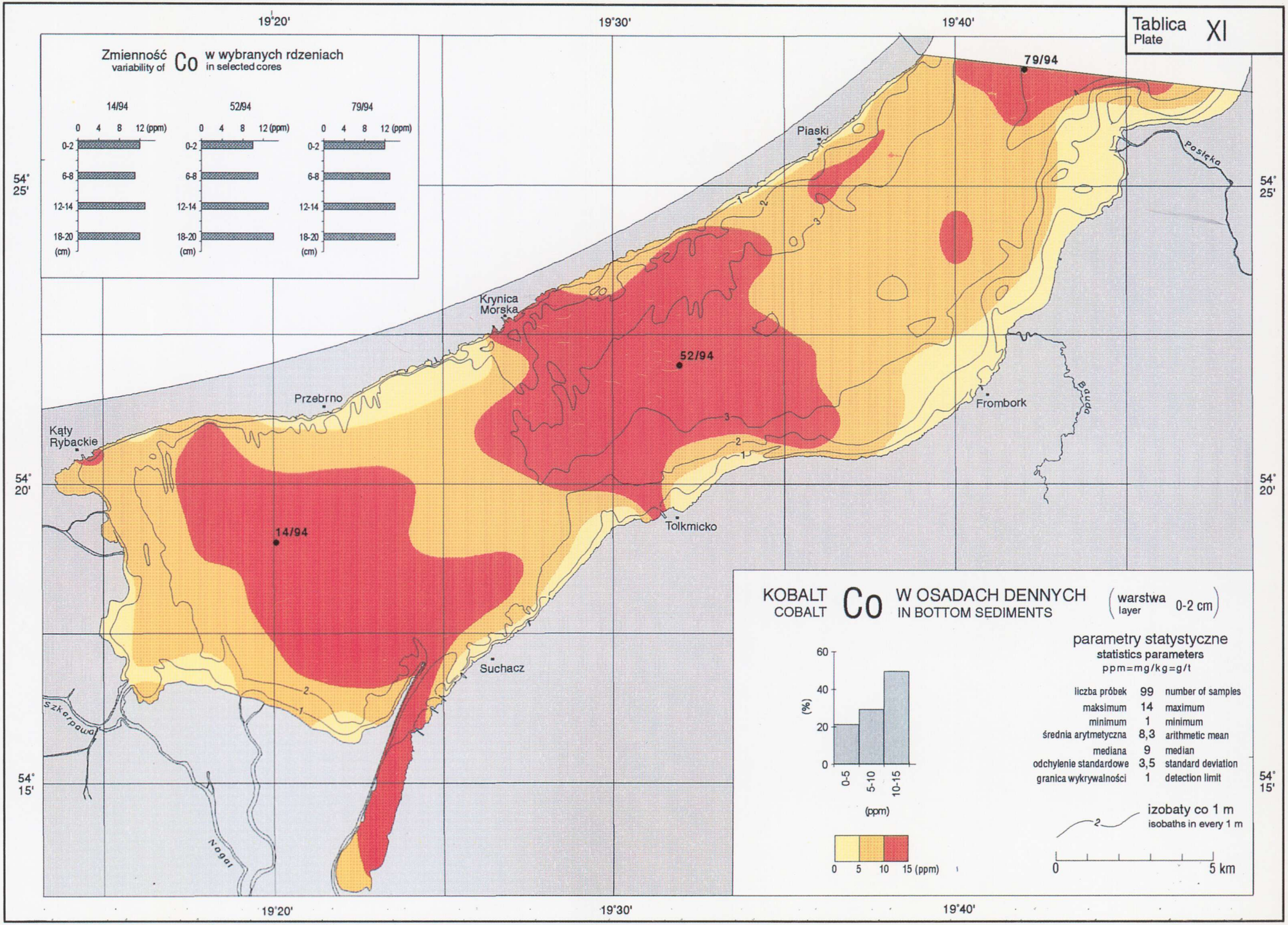
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica / Plate X



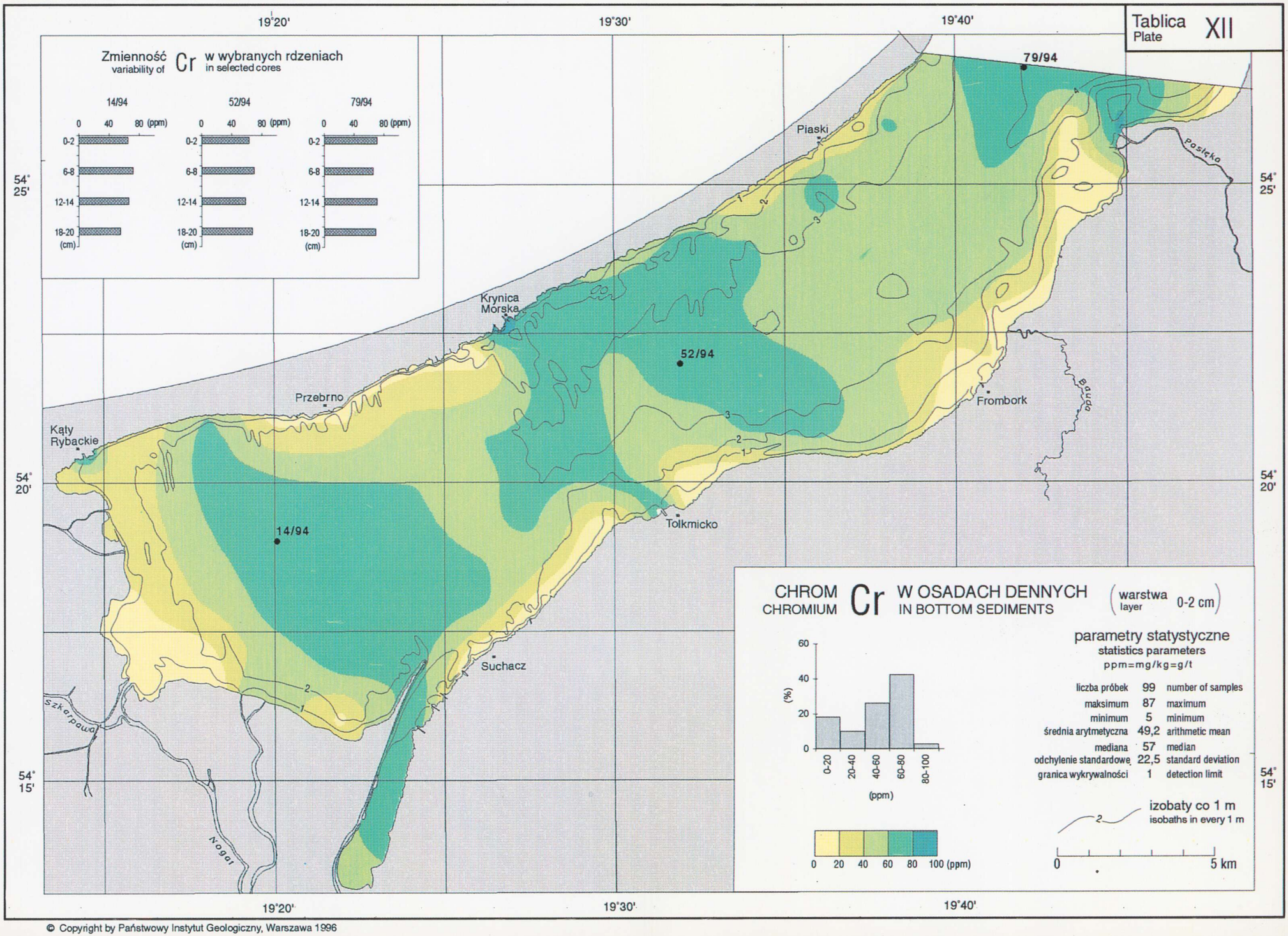
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XI



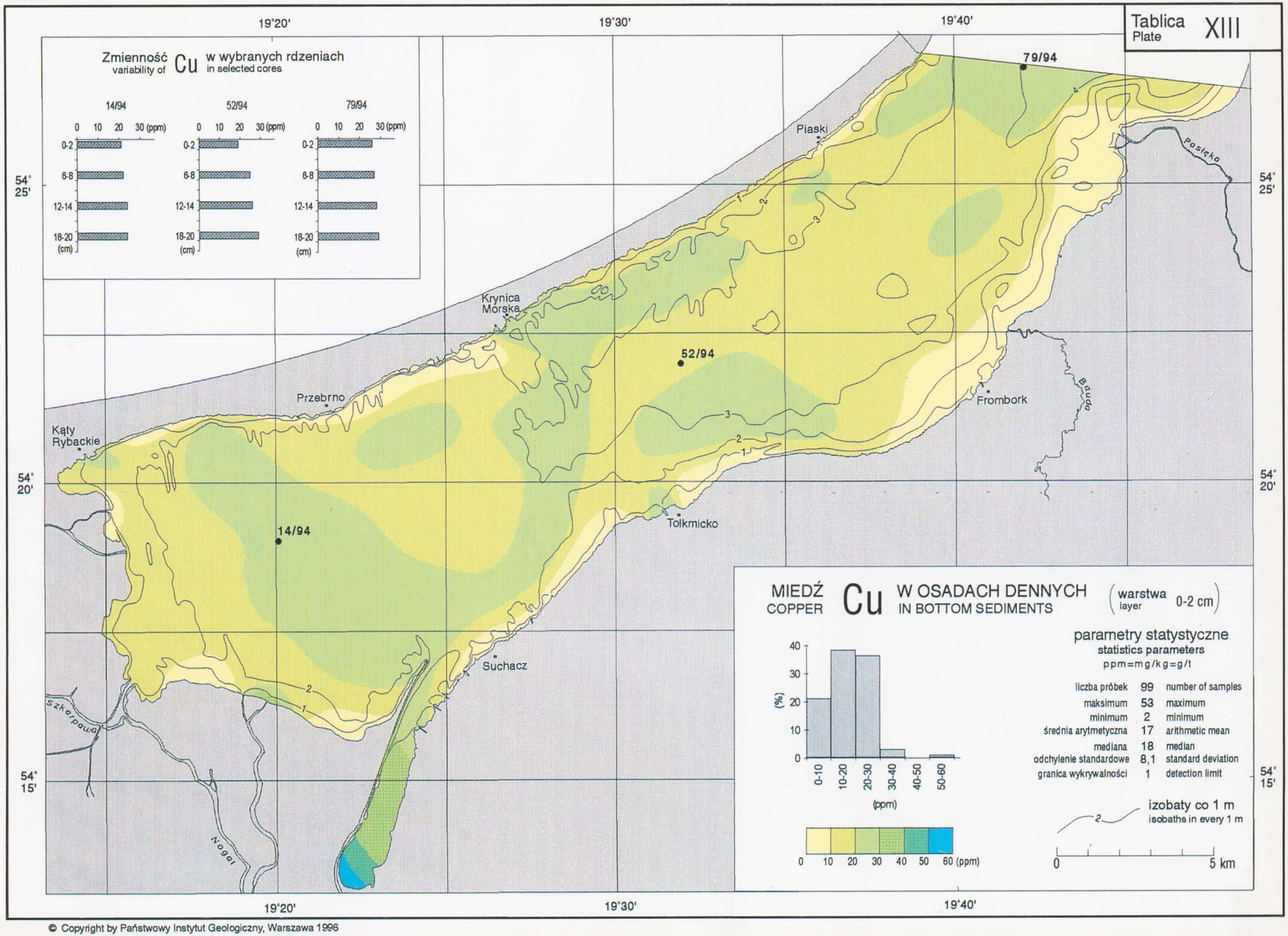
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XII



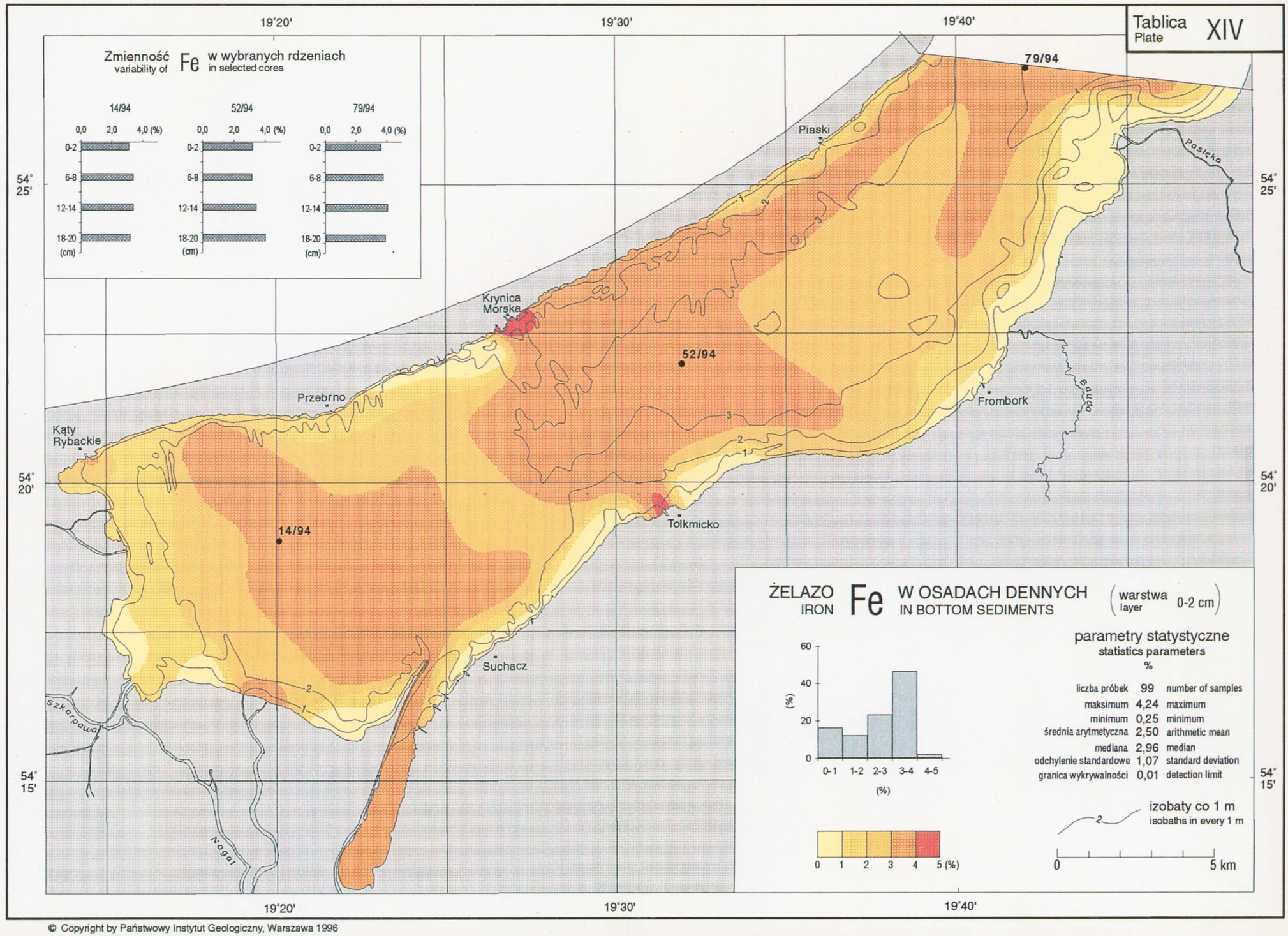
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XIII



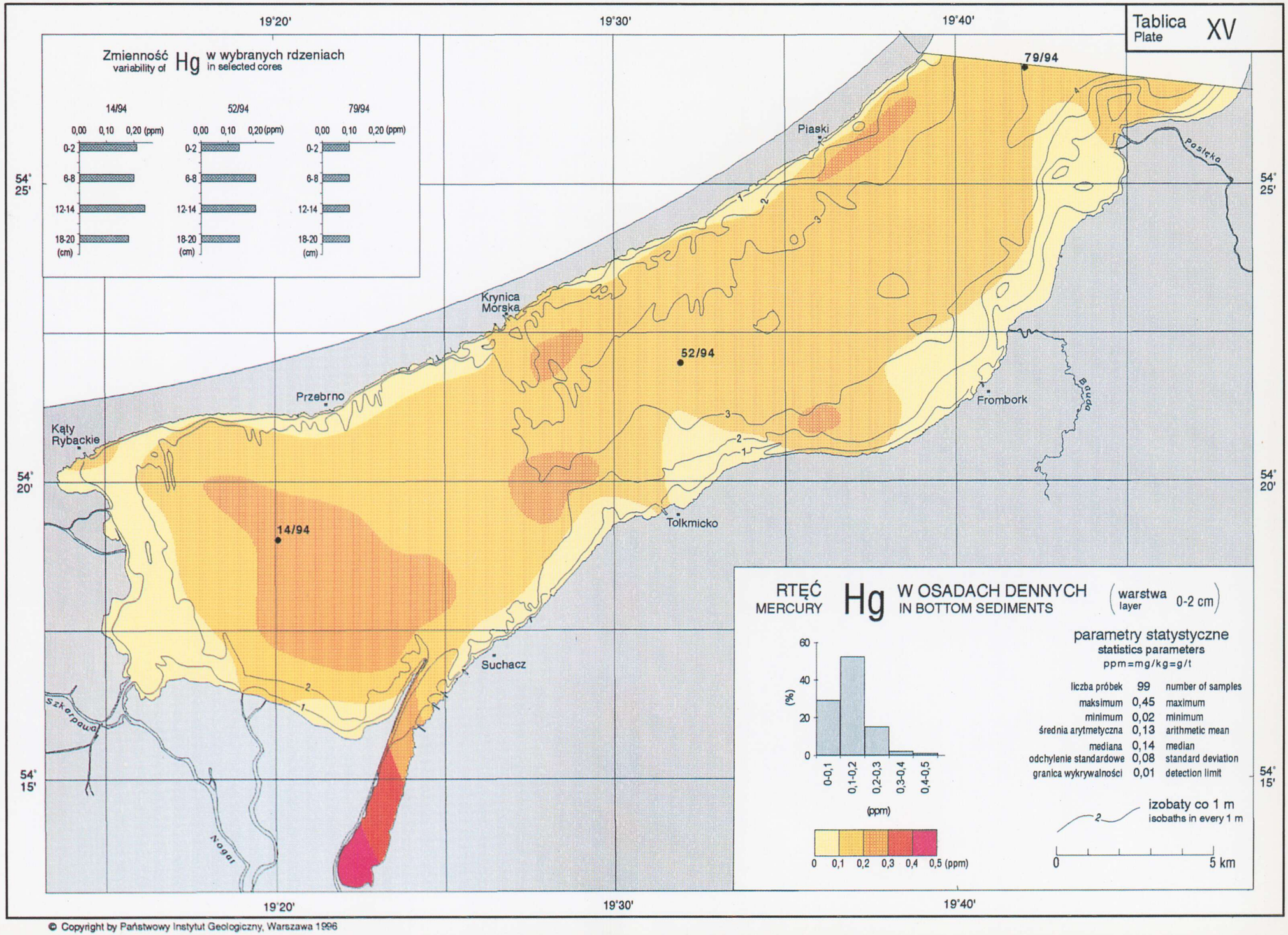
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XIV



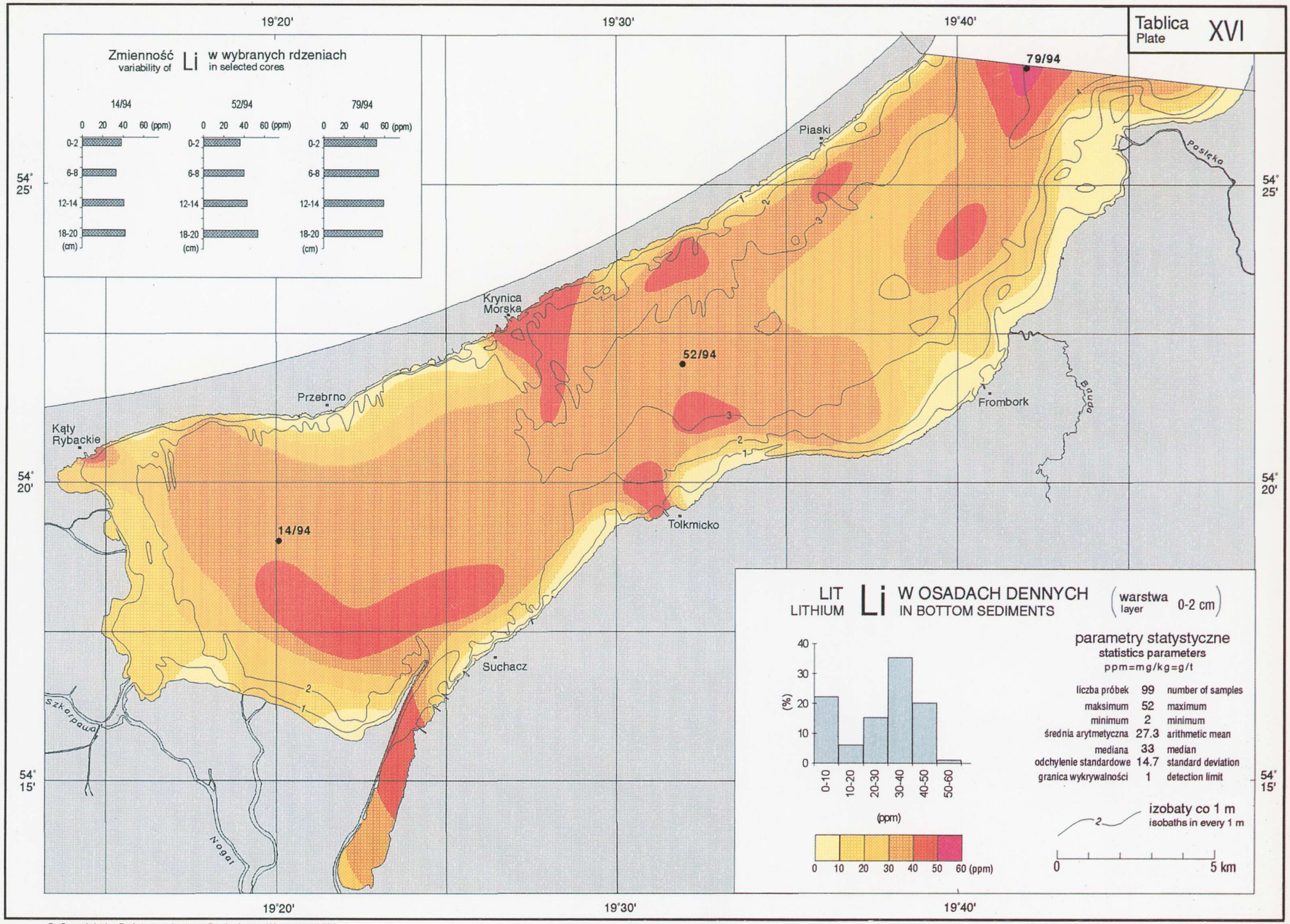
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XV



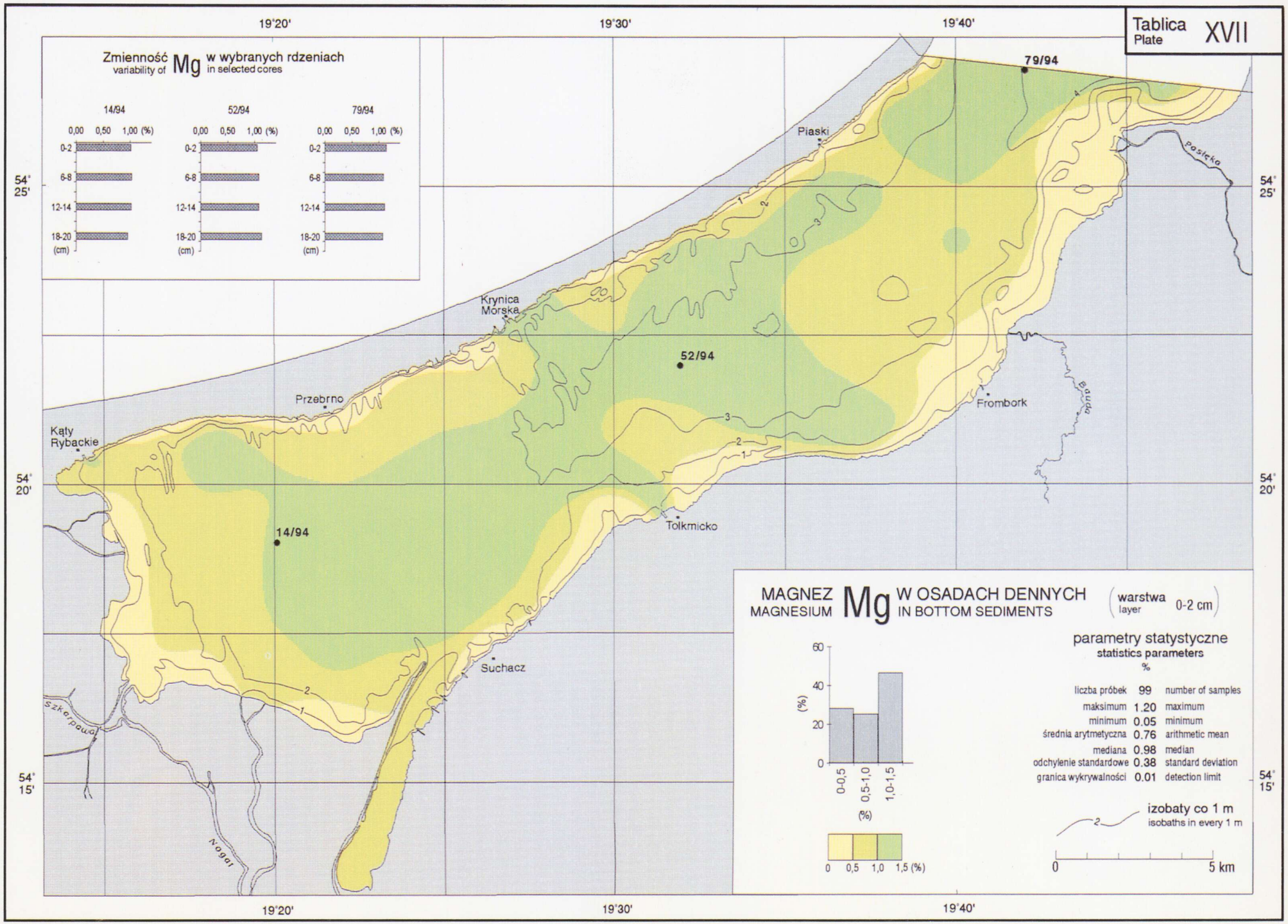
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XVI



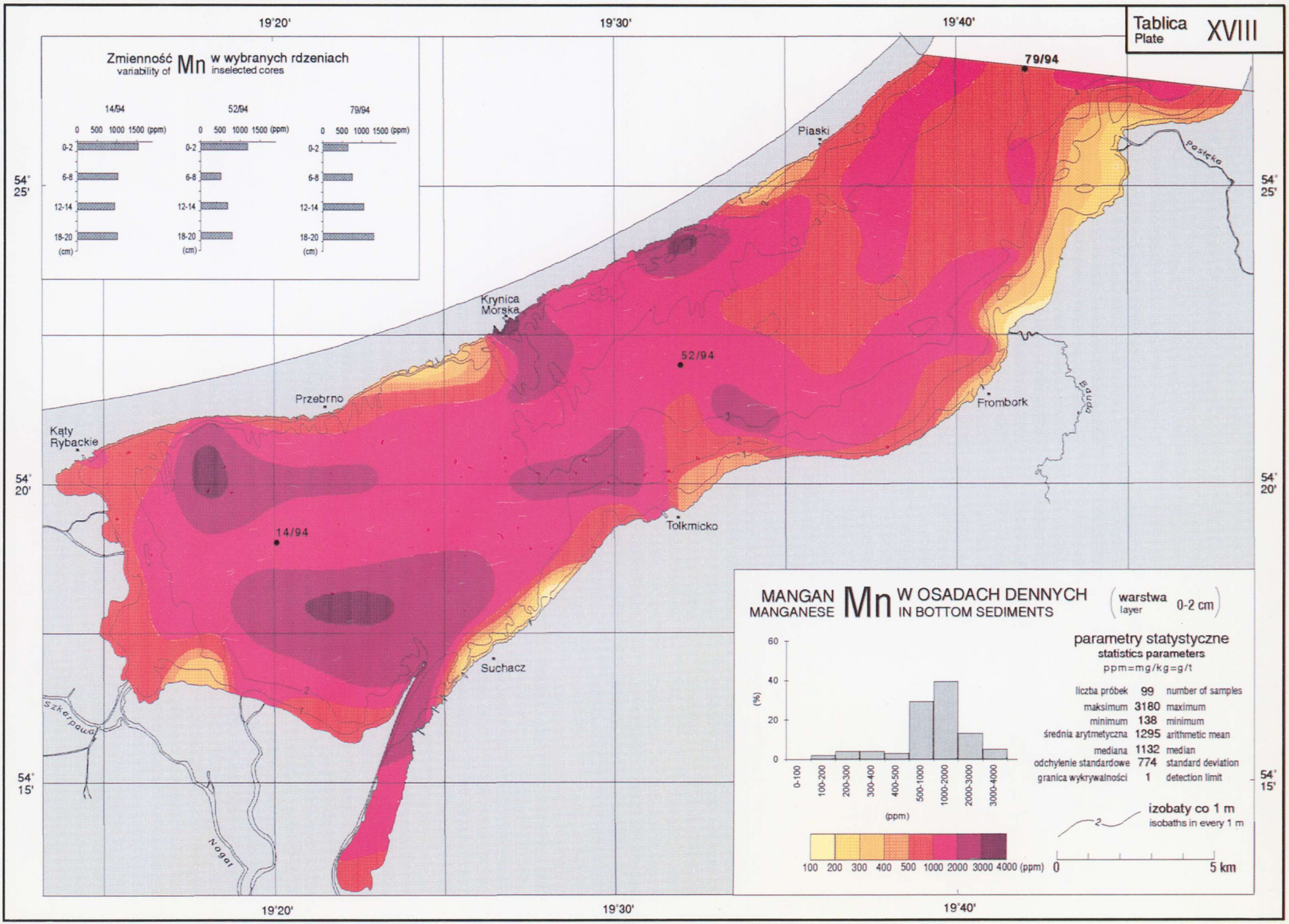
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XVII



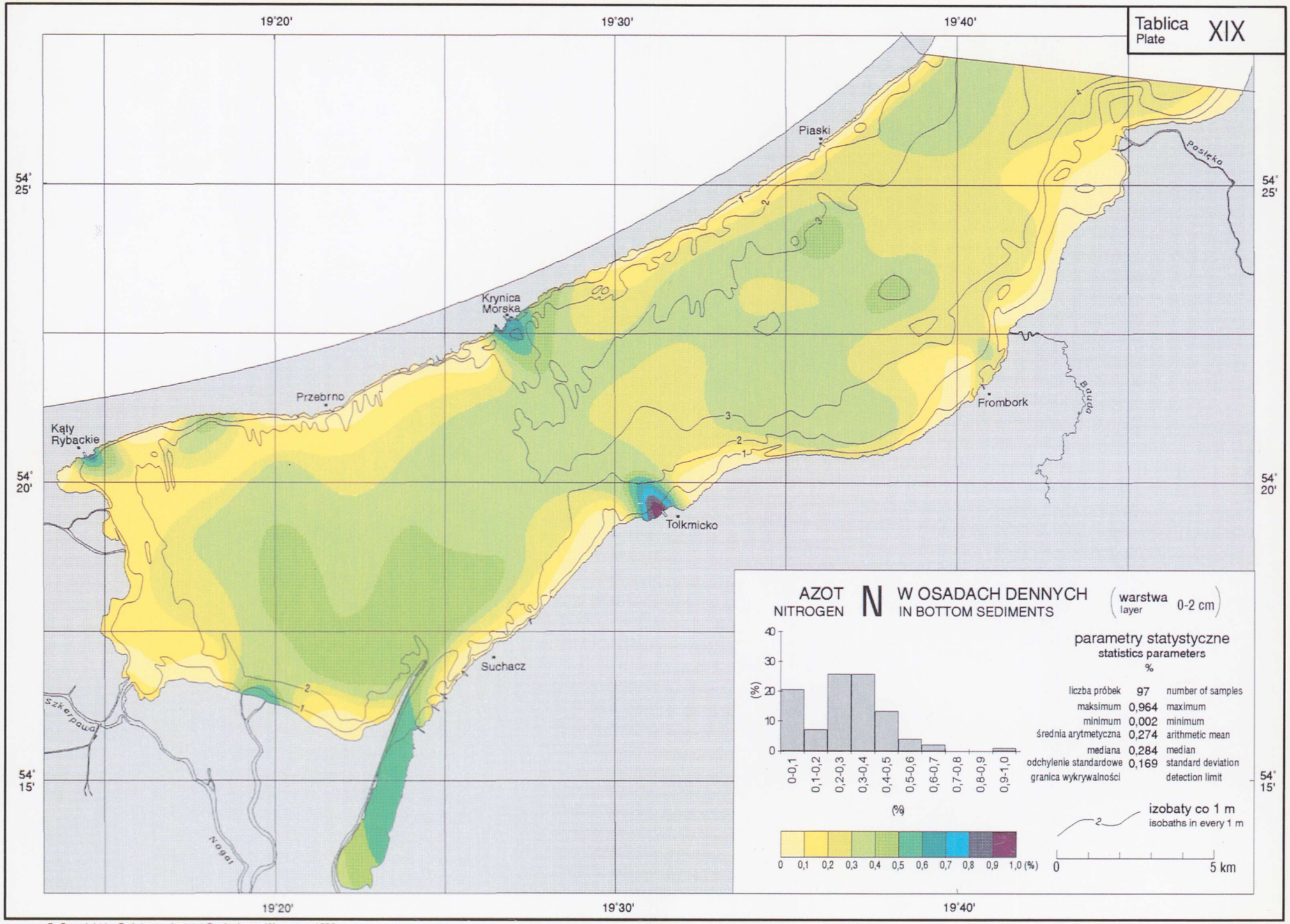
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XVIII



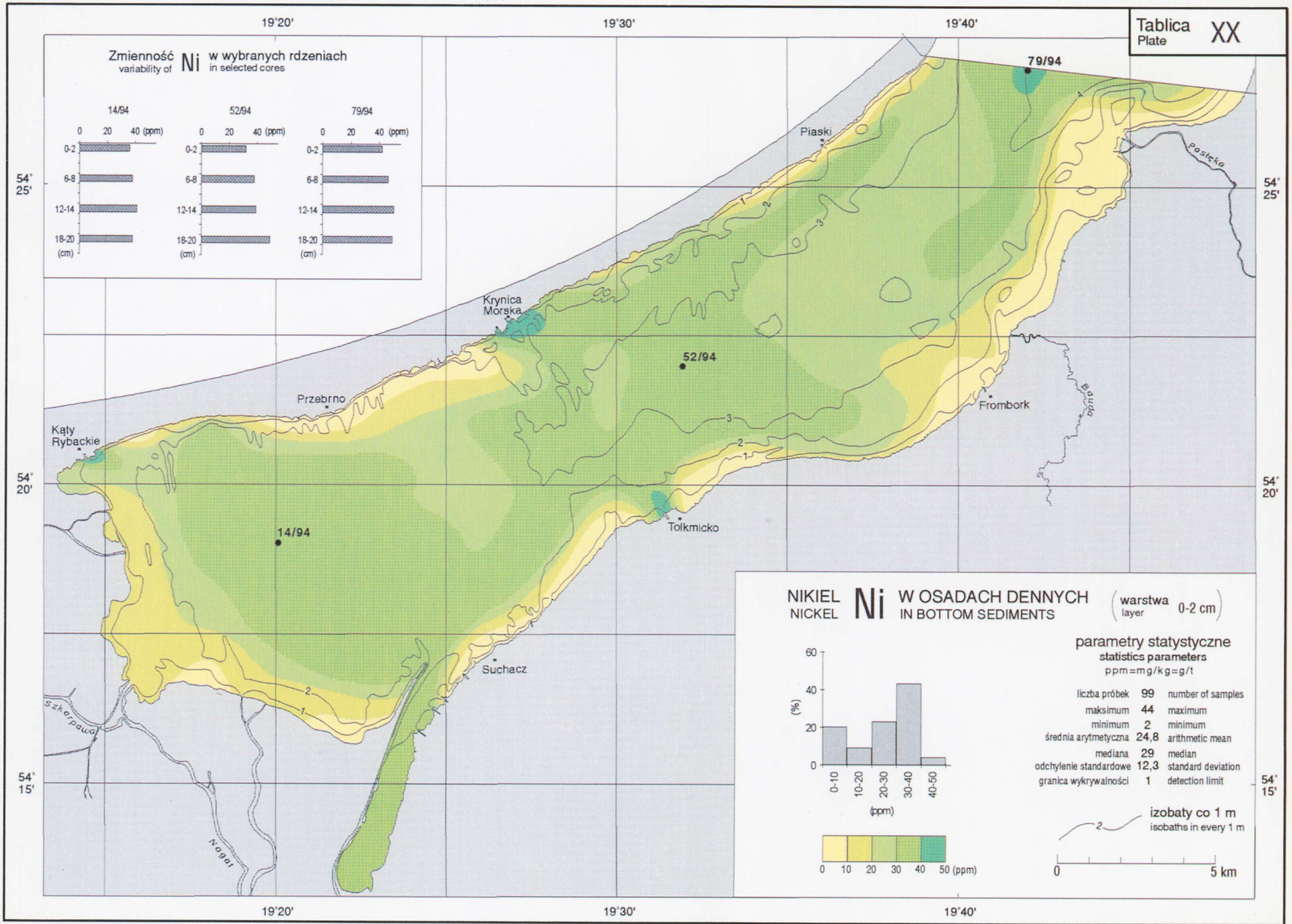
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XIX



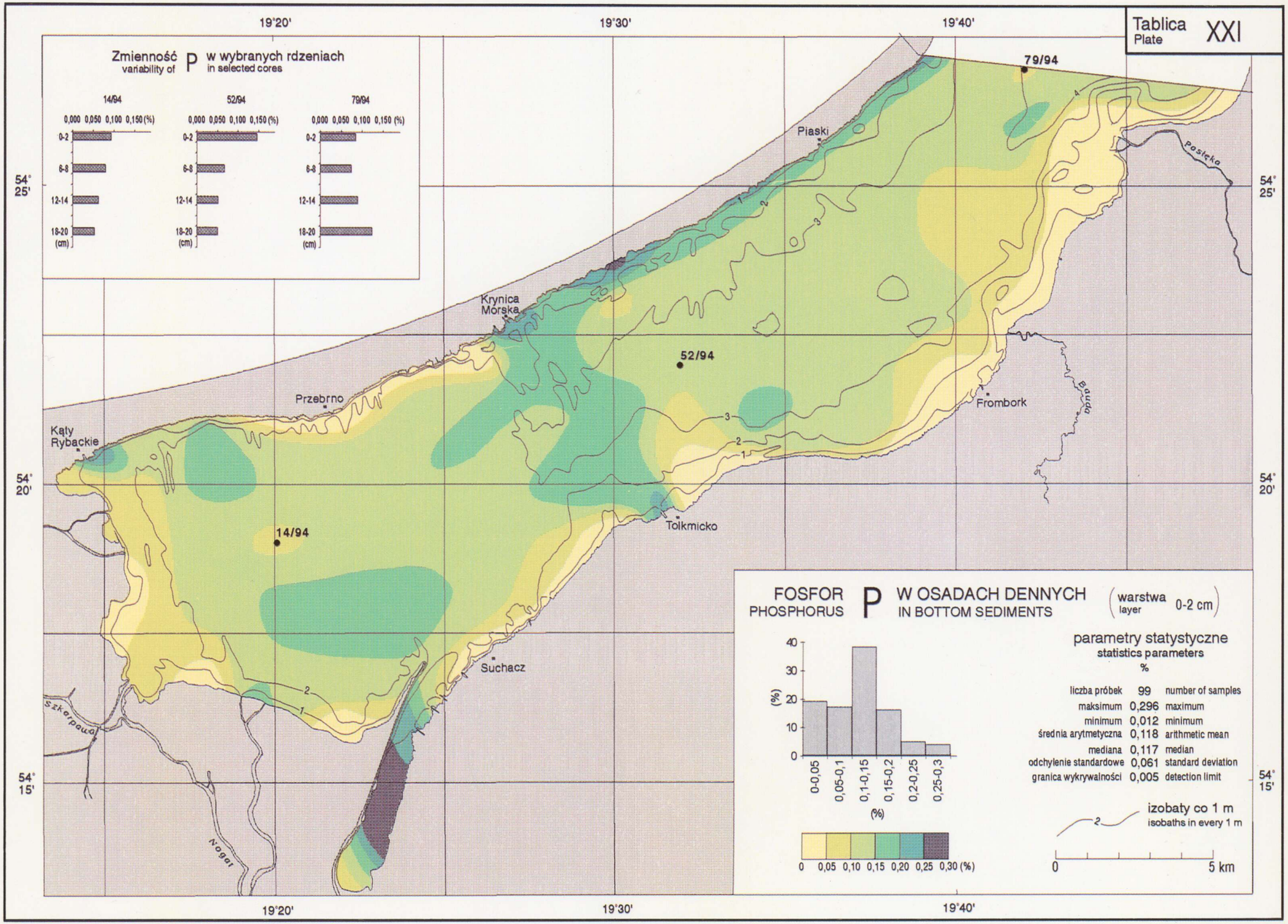
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XX



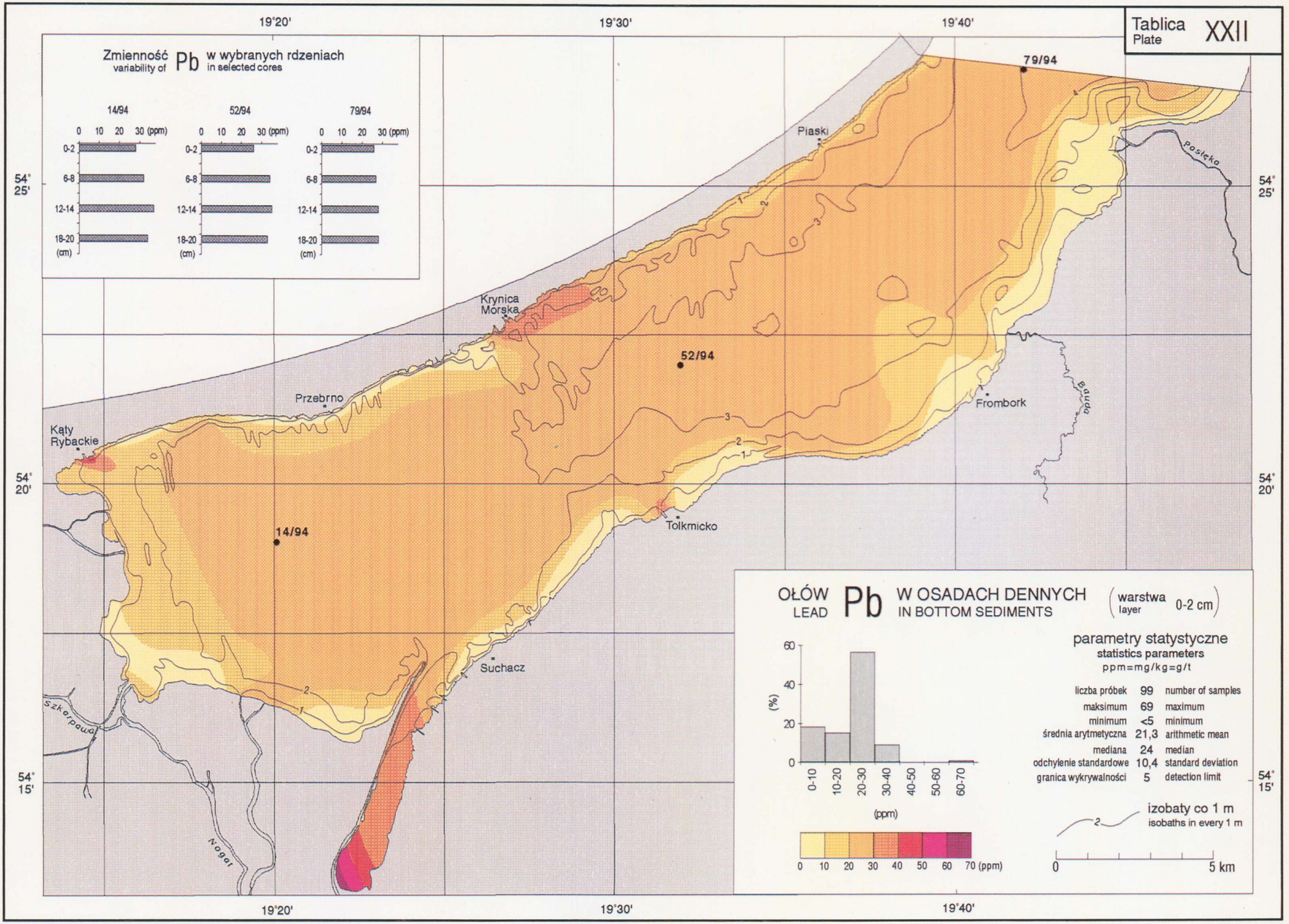
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXI



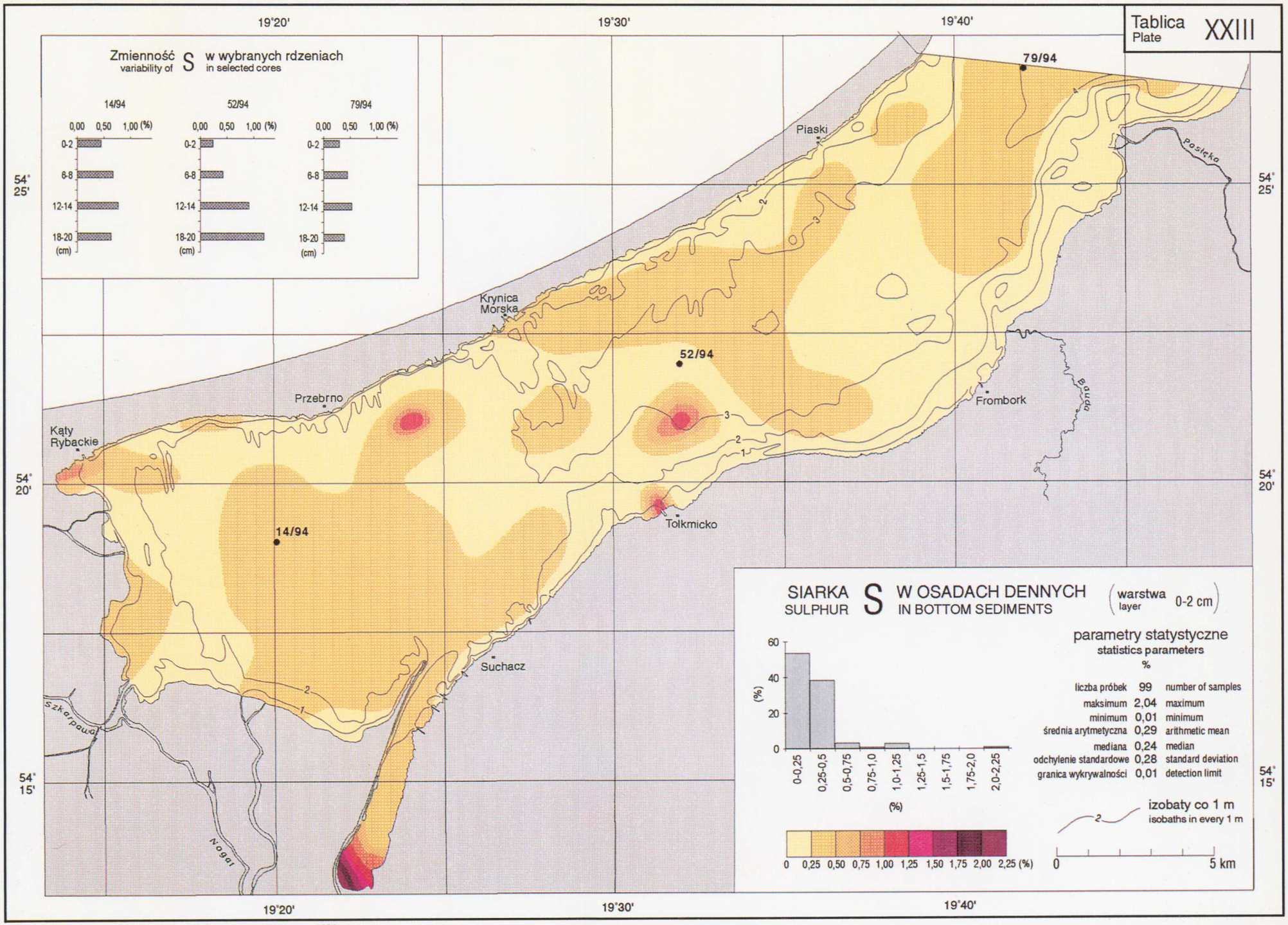
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica / Plate XXII



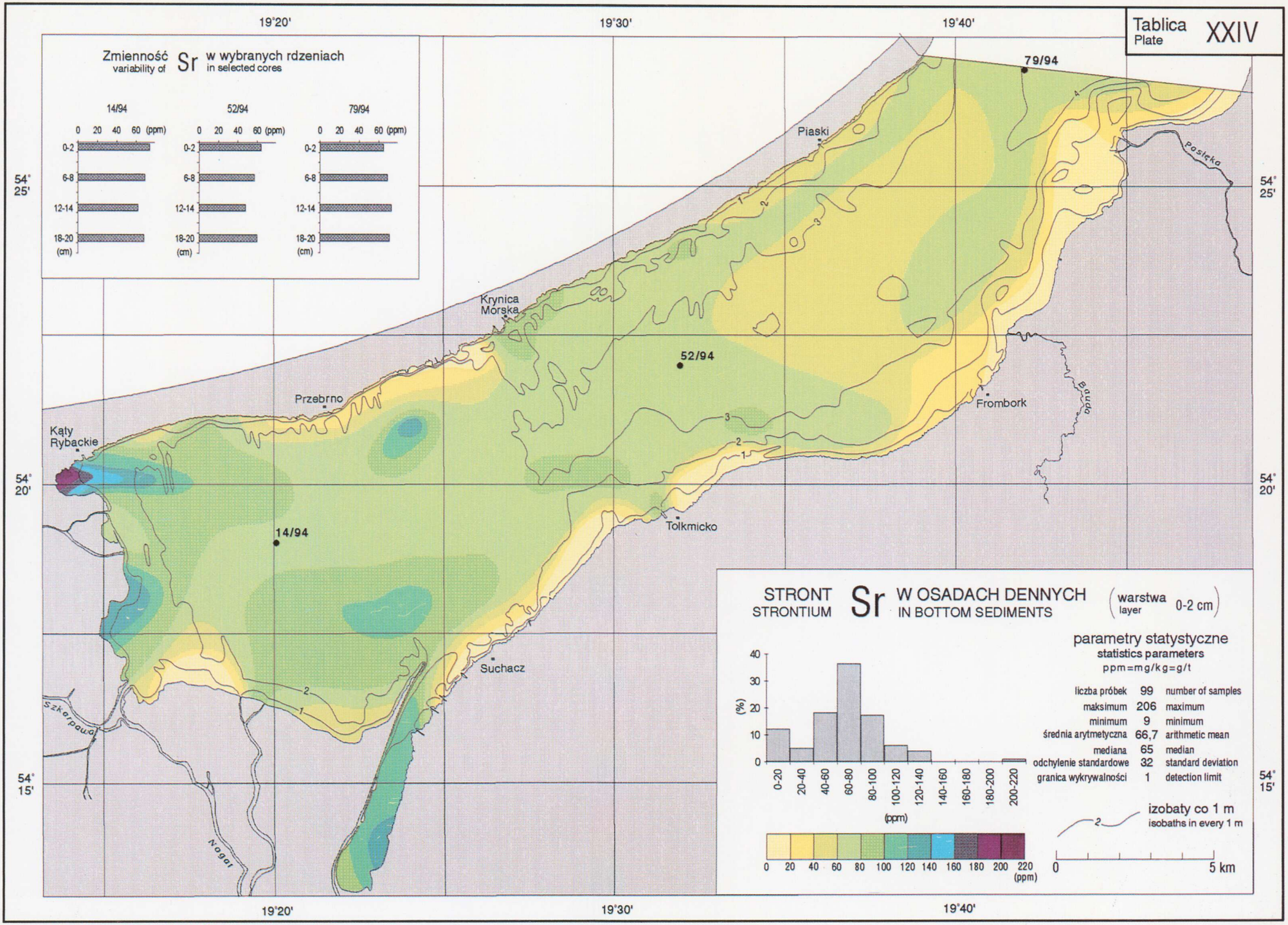
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XXIII



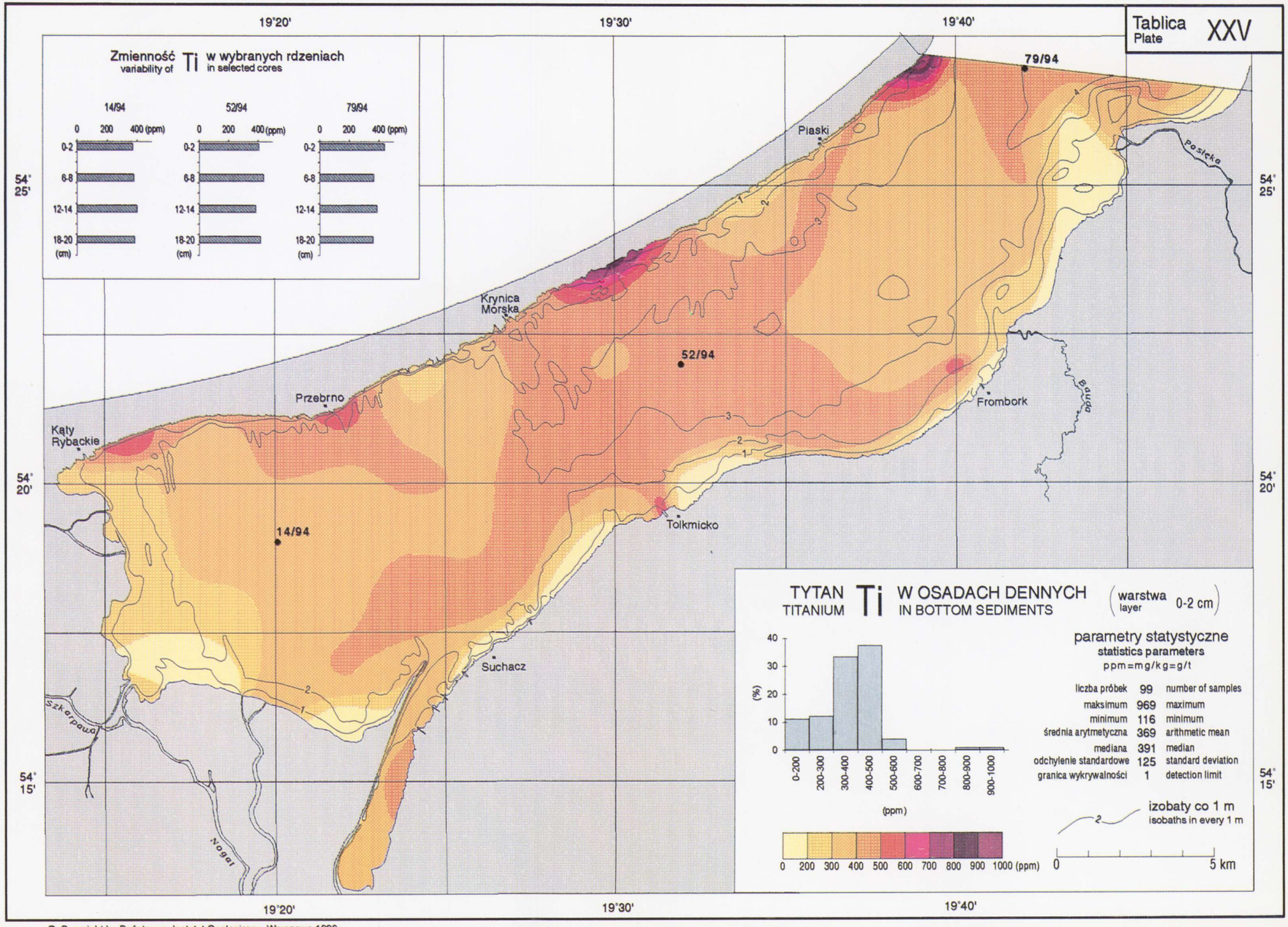
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXIV



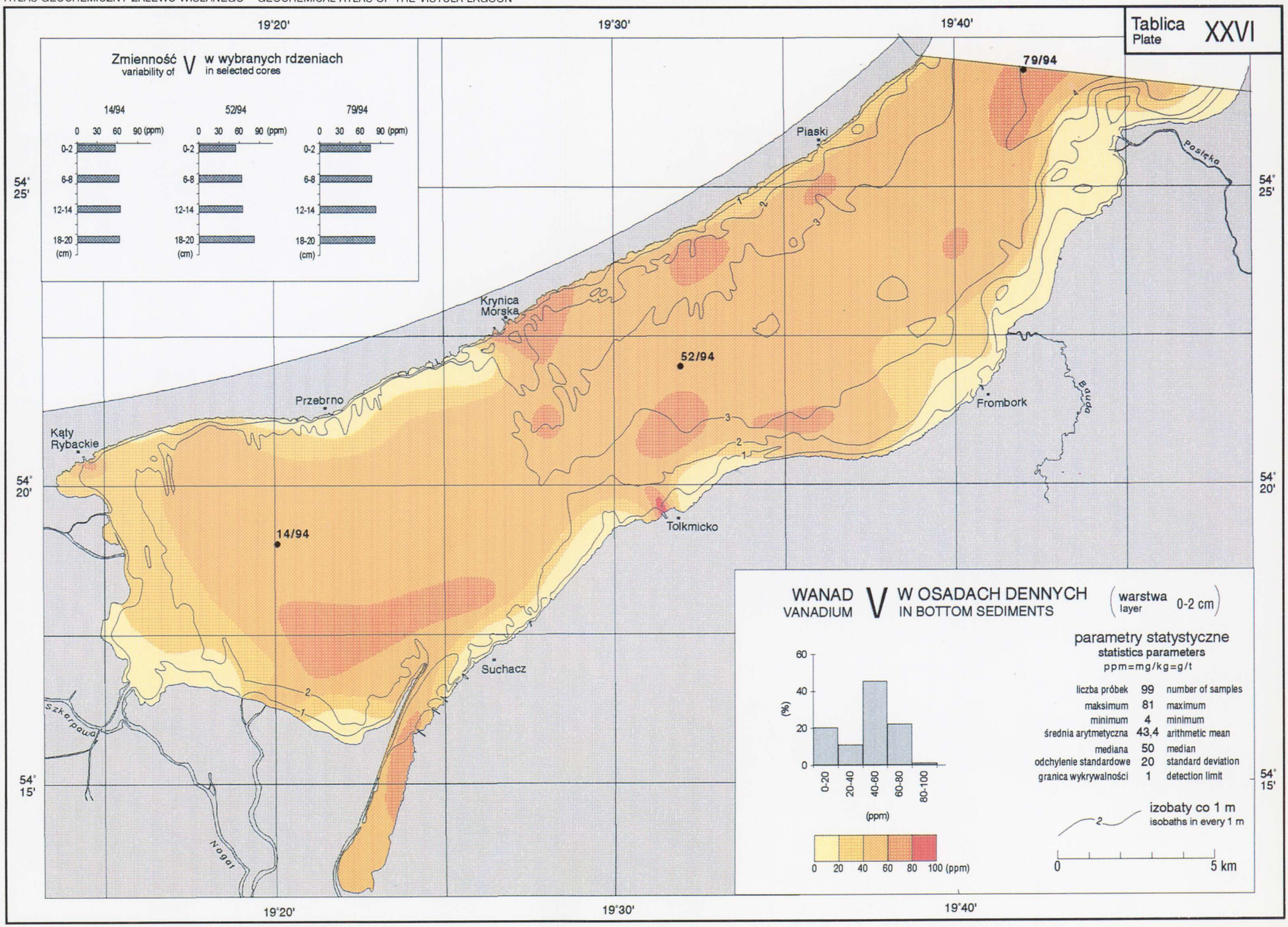
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate
XXV



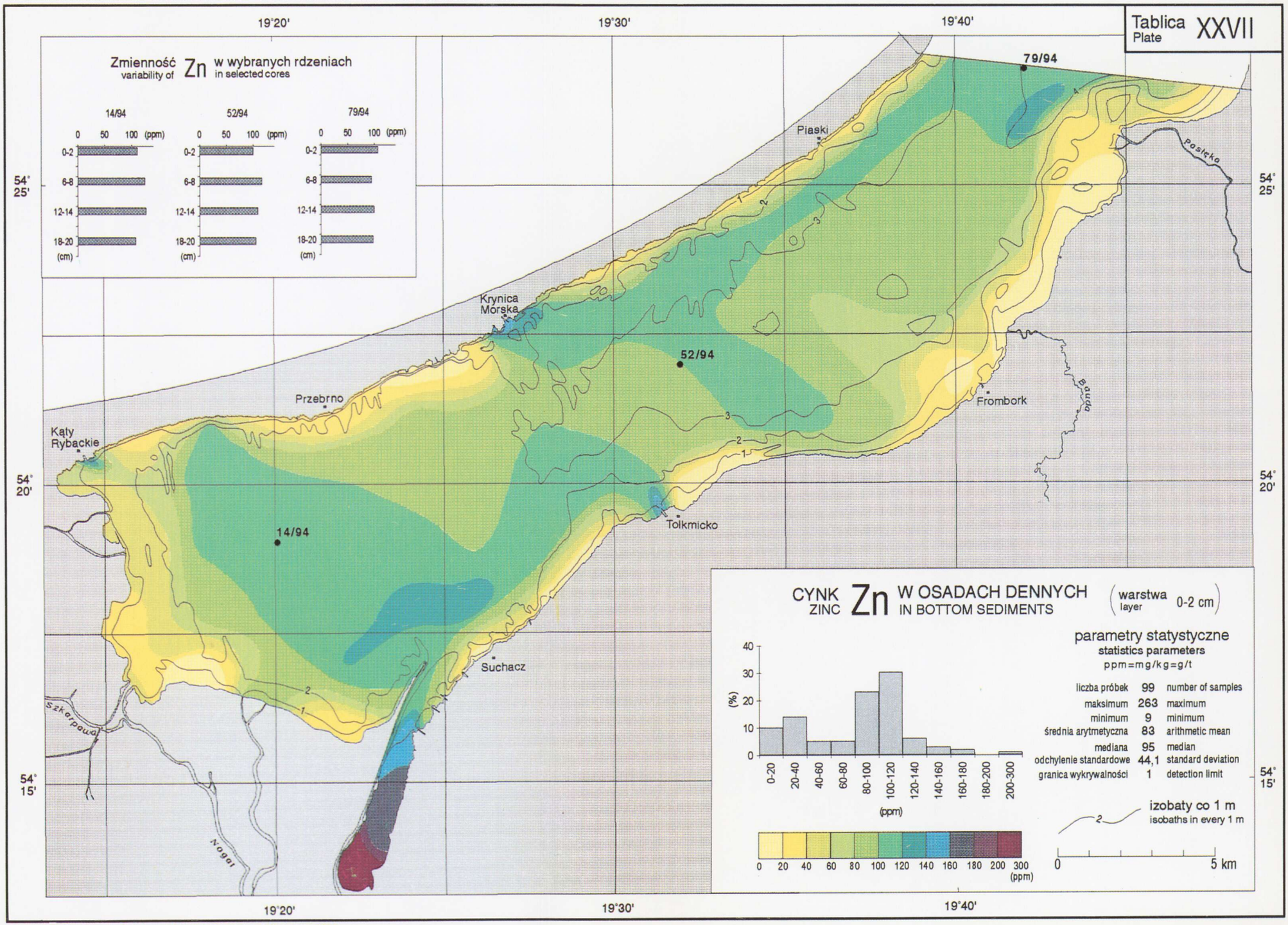
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXVI

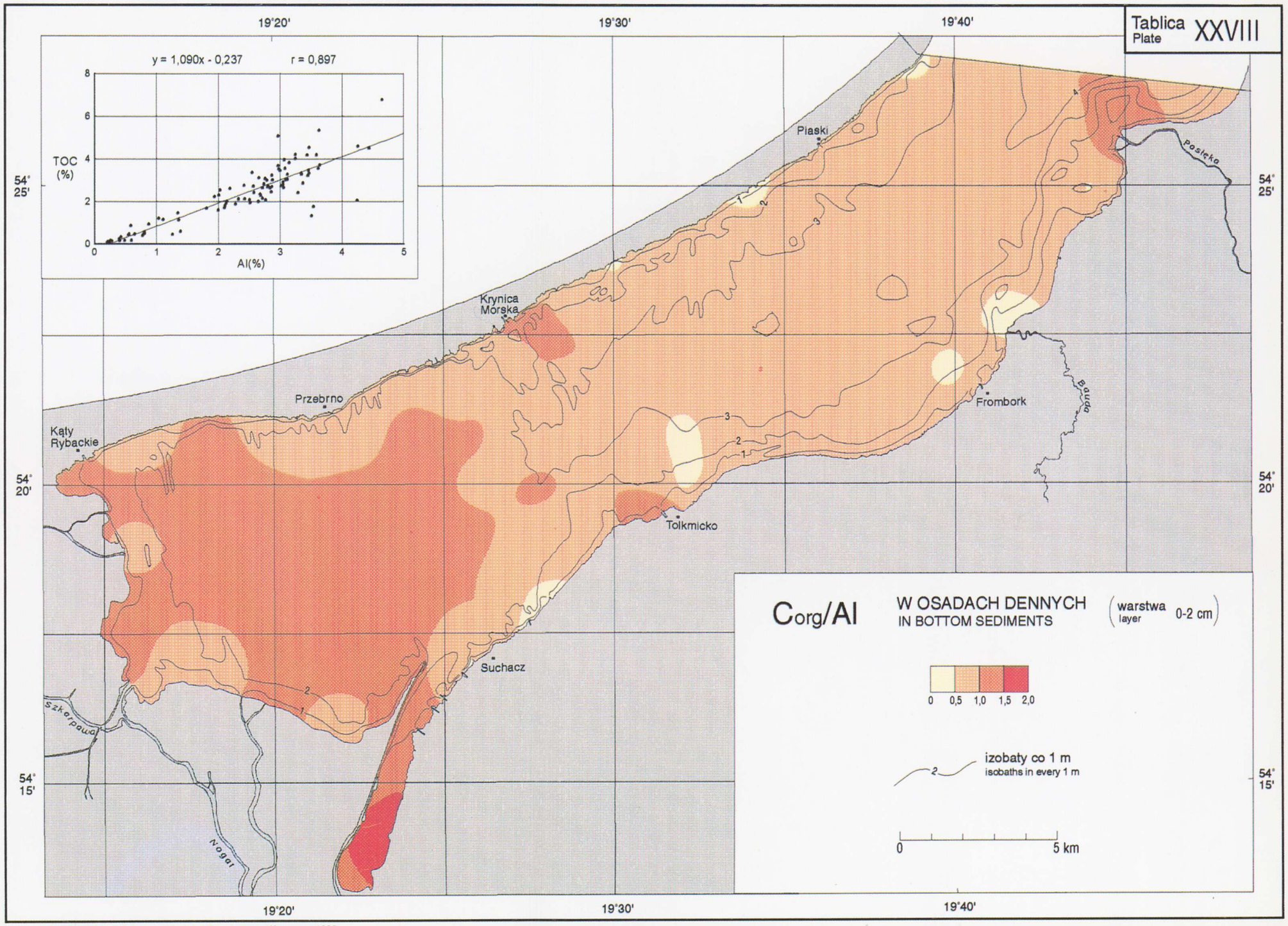


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XXVII

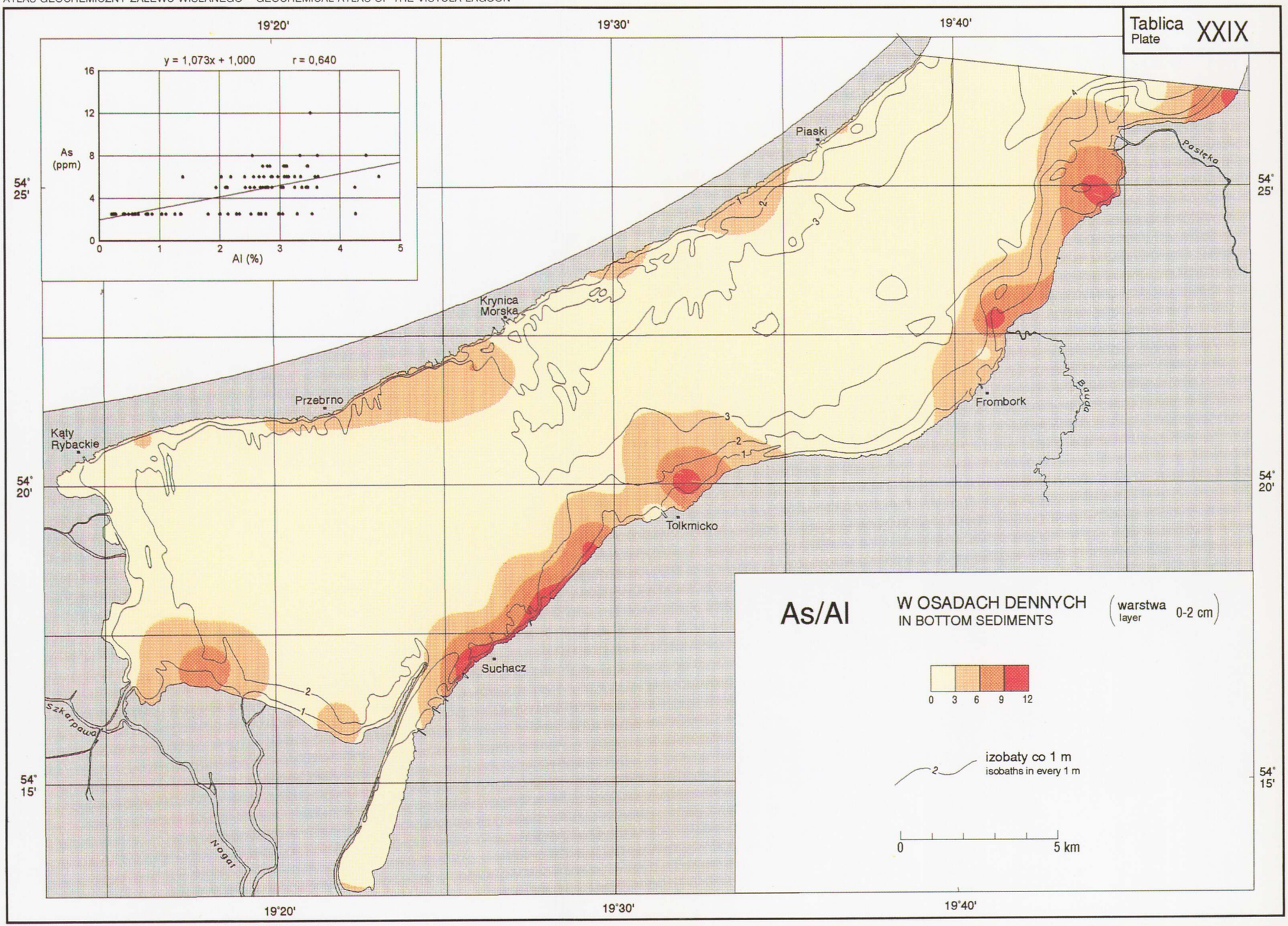


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996



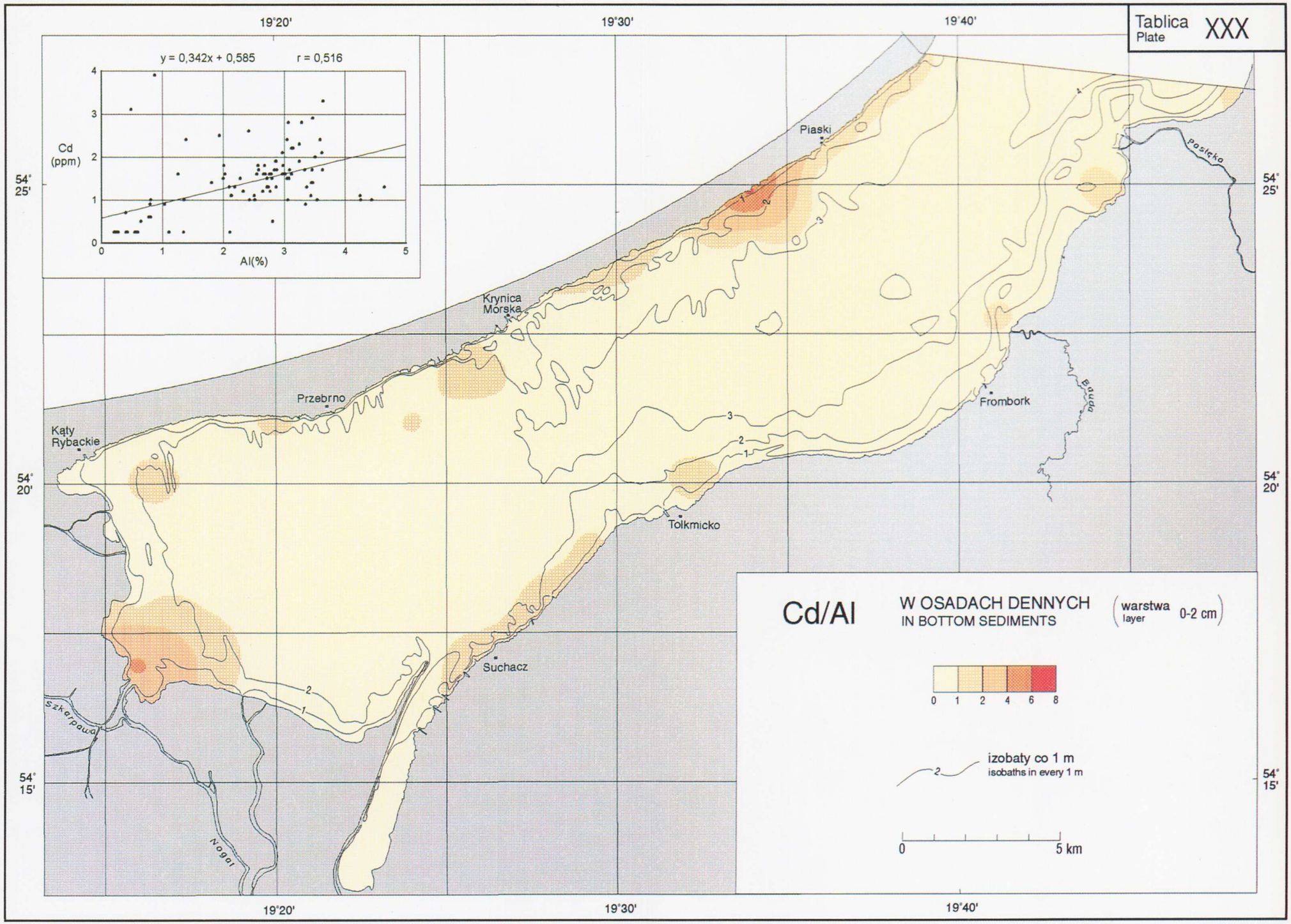
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXIX



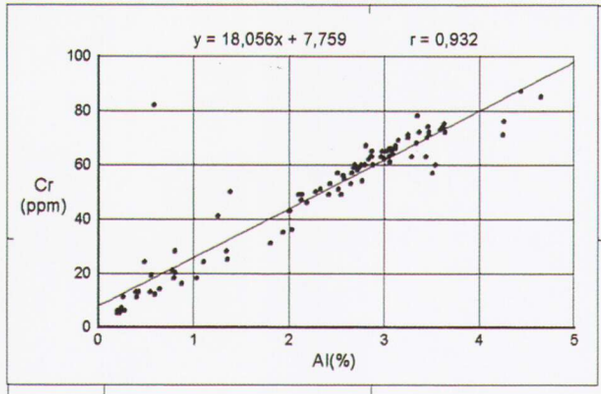
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXX



© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXXI



19°20' 19°30' 19°40'

54° 25' 54° 20' 54° 15'

Piaski
Krynica Morska
Przebrno
Kąty Rybackie
Frombork
Tolkmicko
Suchacz
Pasłęka
Baruda
Szkarpawa
Nogat

Cr/Al

W OSADACH DENNYCH
IN BOTTOM SEDIMENTS

warstwa layer 0-2 cm

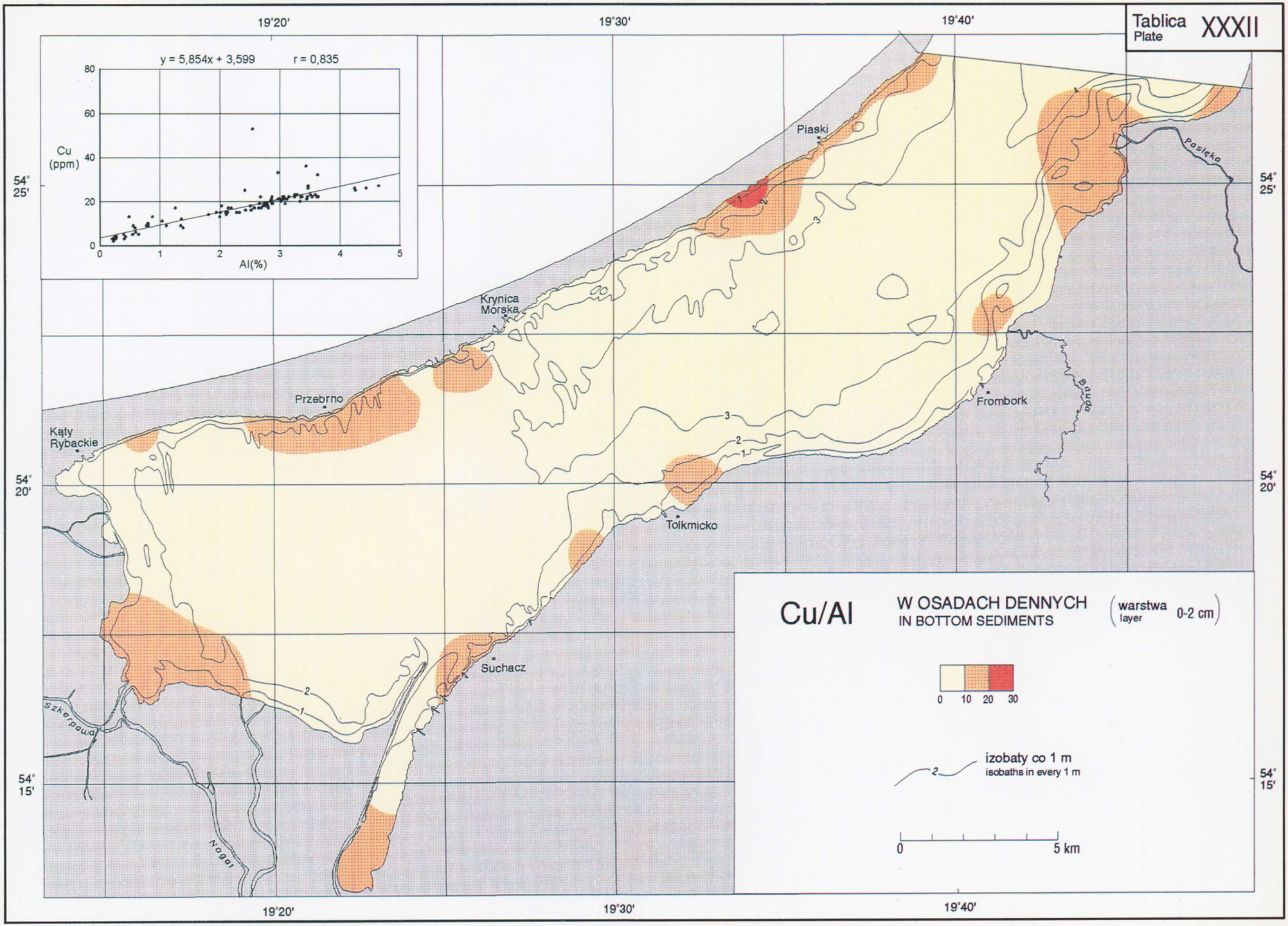
0 30 60 90 120 150

izobaty co 1 m
isobaths in every 1 m

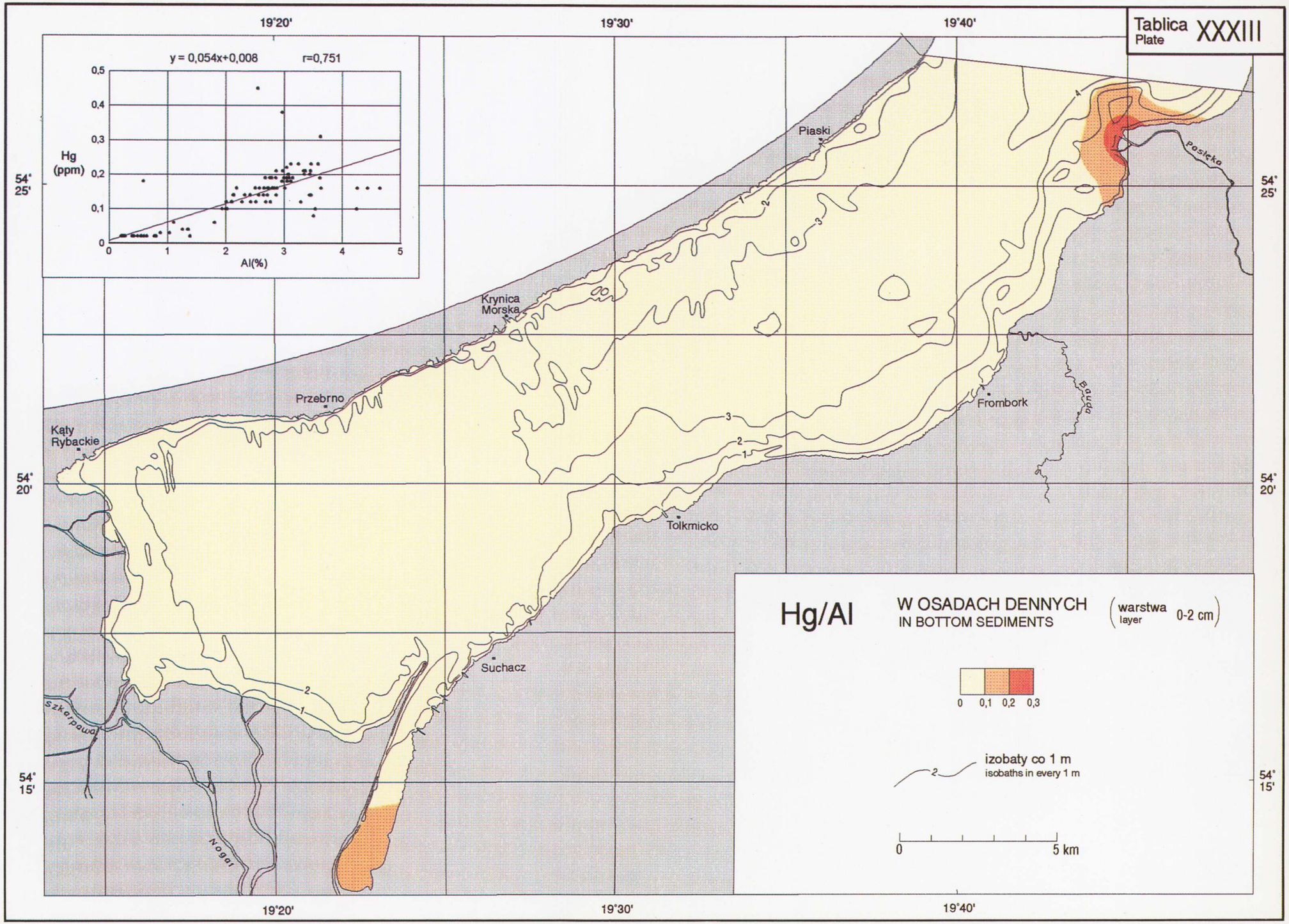
0 5 km

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XXXII

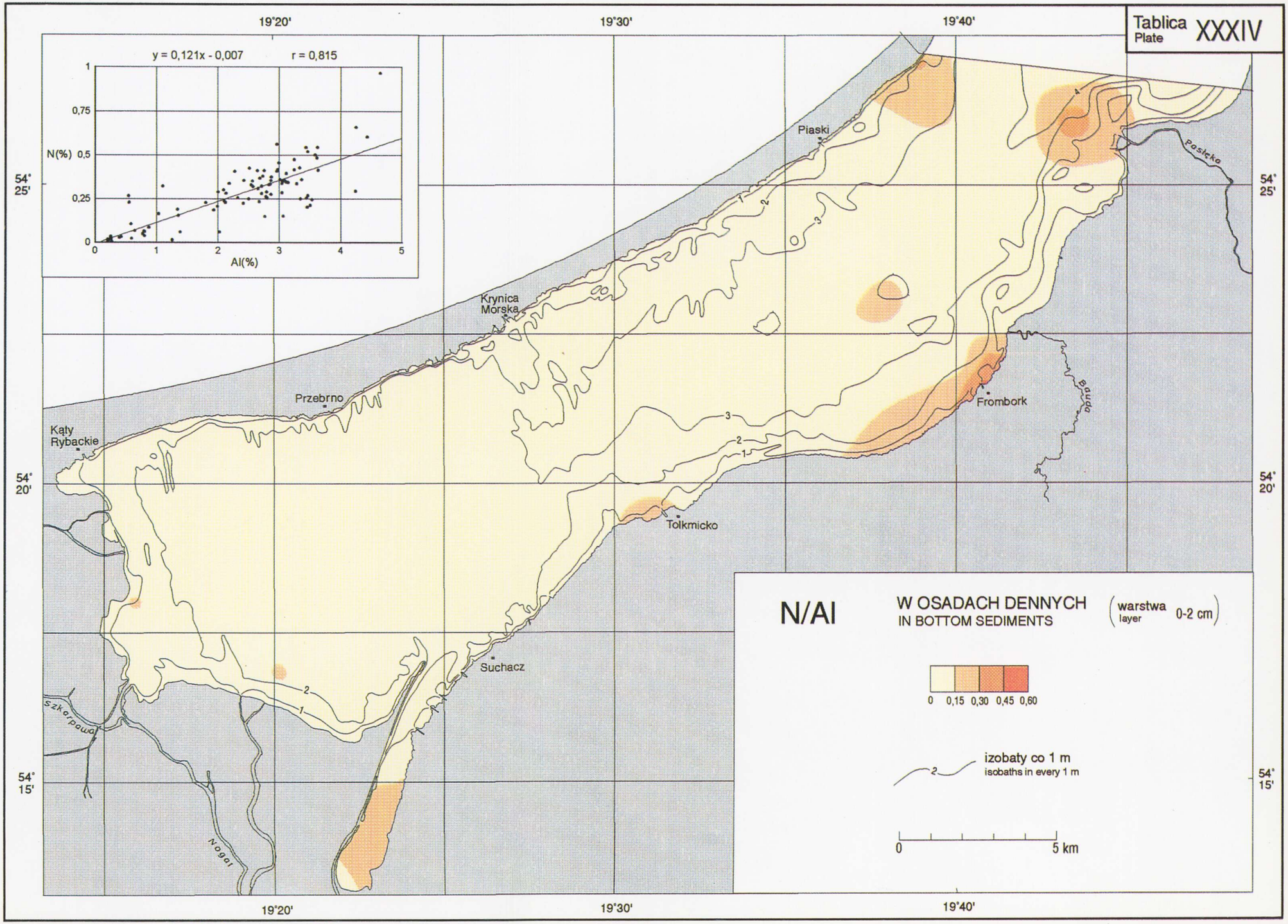


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

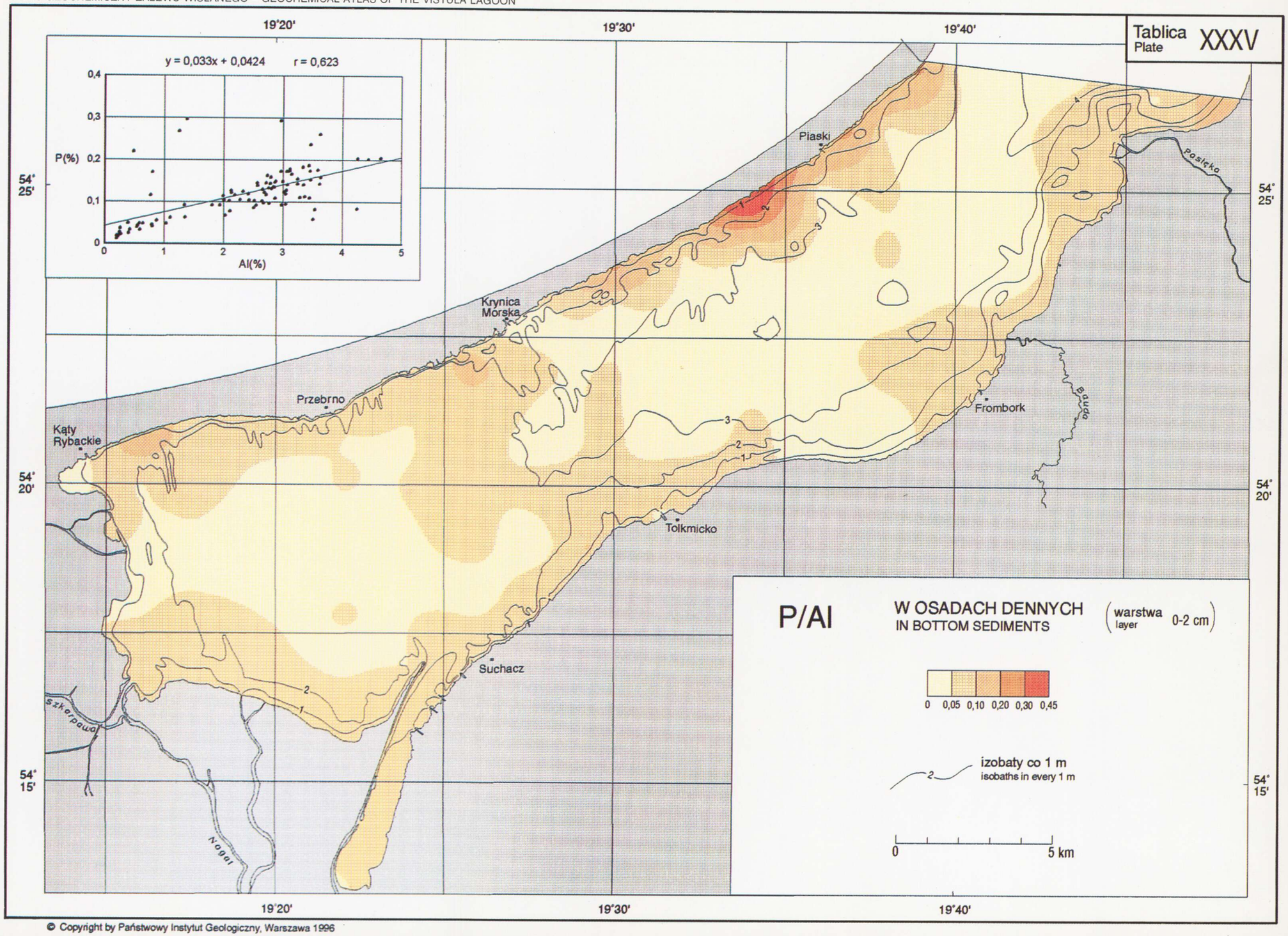


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XXXIV

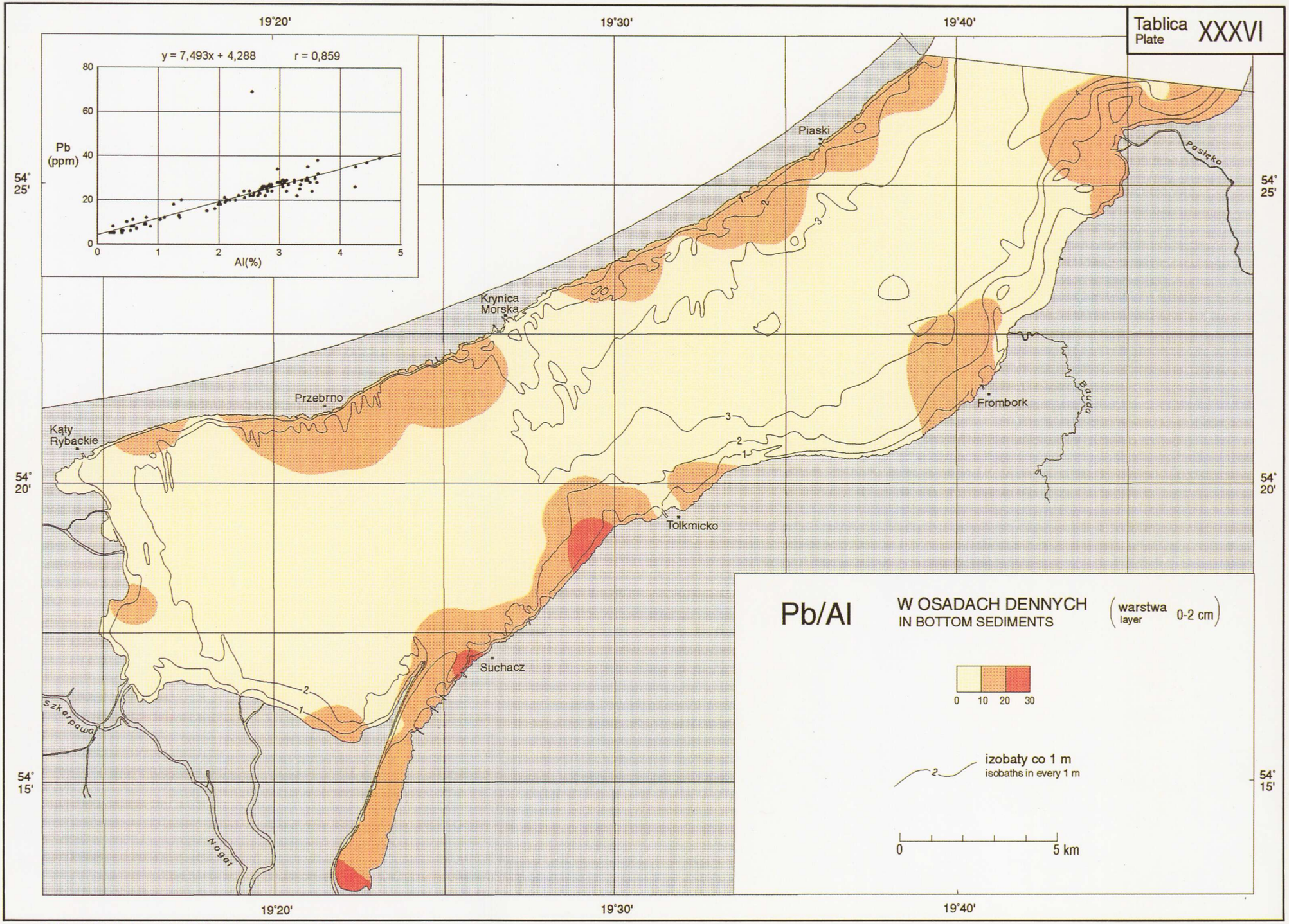


© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996



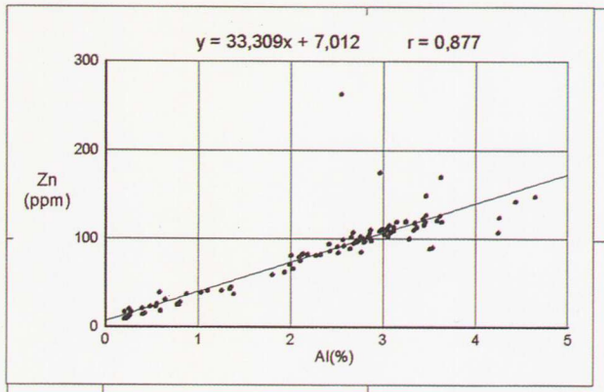
© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica
Plate XXXVI



© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

Tablica Plate XXXVII



19°20' 19°30' 19°40'

54° 25' 54° 20' 54° 15'

Piaski
Krynica Morska
Przebrno
Kąty Rybackie
Frombork
Tolkmicko
Suchacz
Pasłęka
Baudа
Szkarpawa
Nogat

Zn/Al W OSADACH DENNYCH IN BOTTOM SEDIMENTS (warstwa layer 0-2 cm)

25 50 75 100

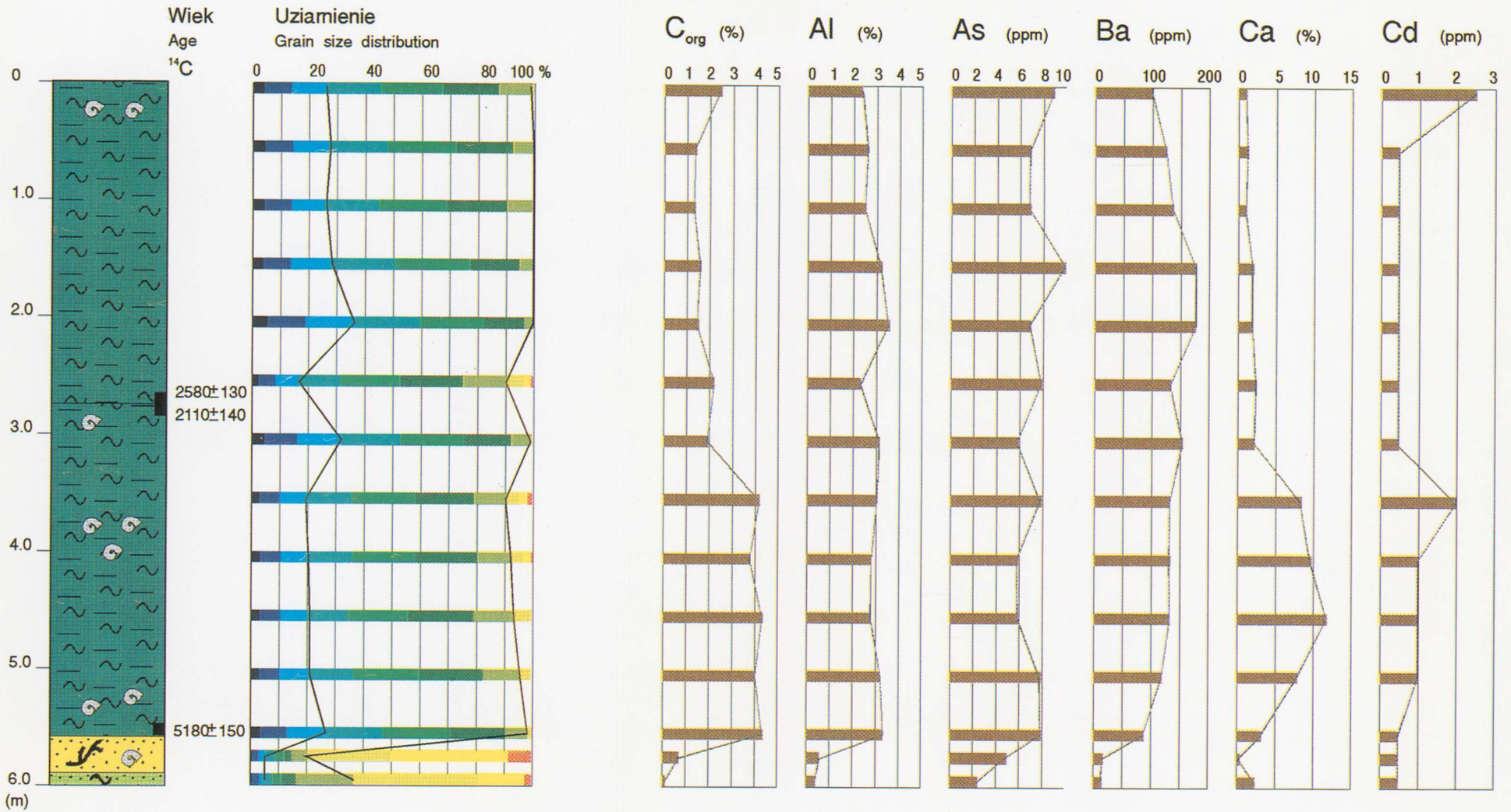
izobaty co 1 m
isobaths in every 1 m

0 5 km

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996

UZIARNIENIE I ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH PIERWIASTKÓW W RDZENIU
GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND CONTENT OF SELECTED ELEMENTS IN SEDIMENT CORE

ZW 6

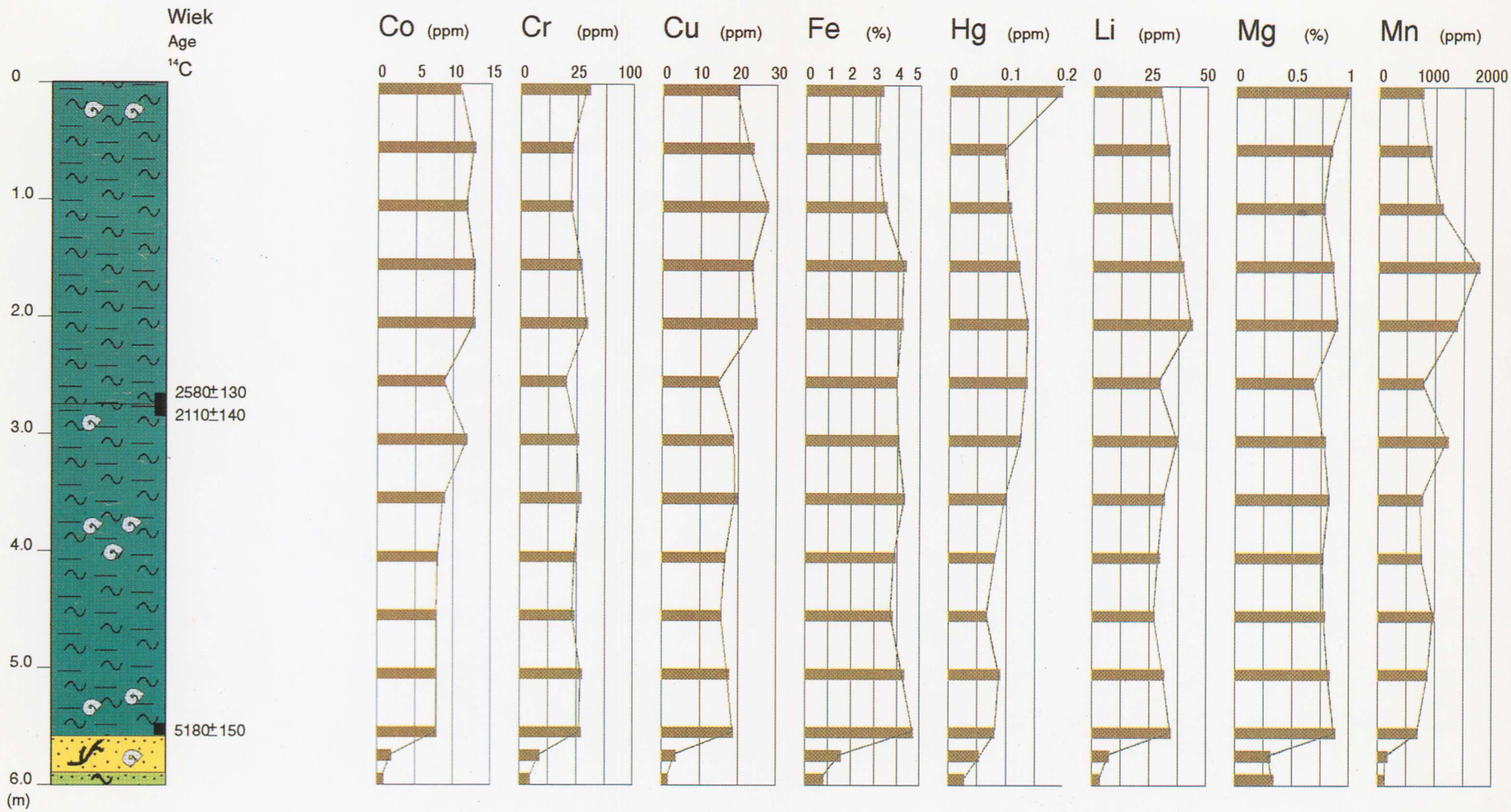


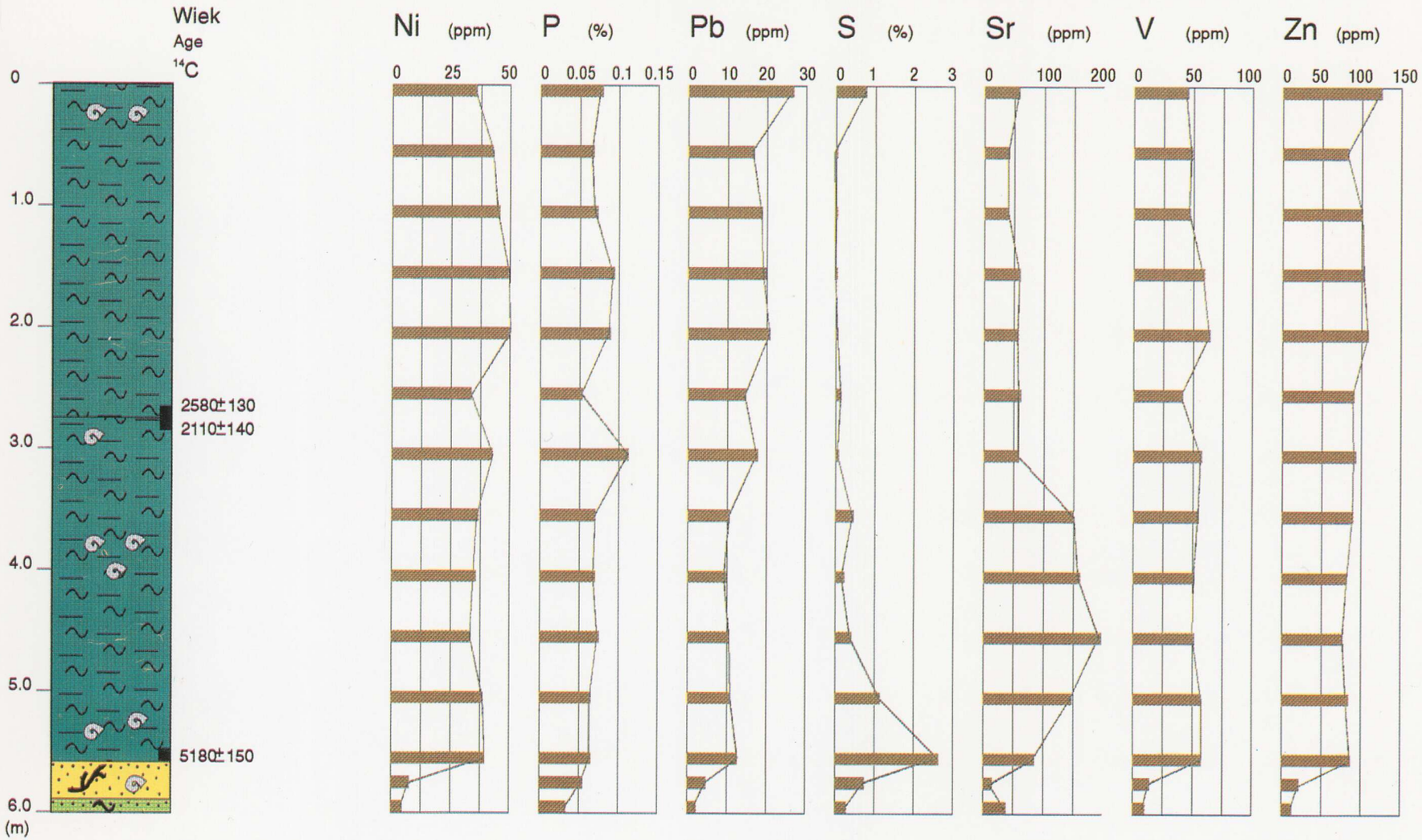
- muł ilasty — clayey silt
- piasek drobnoziarnisty — finegrained sand
- piasek mulisty — silty sand
- muszle — shells
- szczątki roślin — plant remains

< 1	4 - 8	32 - 63	250 - 500
1 - 2	8 - 16	63 -125	> 500 µm
2 - 4	16 - 32	125 -250	

UZIARNIENIE I ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH PIERWIASTKÓW W RDZENIU
GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND CONTENT OF SELECTED ELEMENTS IN SEDIMENT CORE

ZW 6



UZIARNIENIE I ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH PIERWIASTKÓW W RDZENIU
GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND CONTENT OF SELECTED ELEMENTS IN SEDIMENT CORE

ZW 6