

Kartografia wglębna i modelowanie w Holandii: automatyzacja procesu, konwersja czasowo-głębokościowa i modelowanie uskoku

Maryke den Dulk¹, Johannes C. Doornenbal¹



M. den Dulk



J. C. Doornenbal

Subsurface mapping and modelling in the Netherlands: workflow automation, td-conversion and fault modelling. *Prz. Geol.*, 62: 812–817.

Abstract. A comprehensive 3D model has been developed for the Dutch on- and offshore. This model consists of a detailed 3D structural framework of the deep subsurface including 10 major units from the Late Permian Upper Rotliegend Group up to the Neogene Upper North Sea Group. This overview presents the workflow for building the detailed structural model including the time-to-depth conversion and the assessment of uncertainties.

Keywords: 3D geological model, geology of The Netherlands

Dla obszaru lądowego Holandii oraz jej stref przybrzeżnych opracowano kompleksowy model 3D. Składa się on ze szczegółowej, trójwymiarowej osnowy strukturalnej, obejmującej 10 głównych jednostek stratygraficznych od górnopermskich utworów grupy górnego czerwonego spągowca (*Upper Rotliegend Group*) po neogeńskie utwory górnej grupy Morza Północnego (*Upper North Sea Group*). Model ten opiera się na wynikach początkowego rozpoznania obszaru opublikowanych przez Duin i in. (2006).

W kolejnym, trwającym do dziś, etapie prac zinterpretowano wiele otworów wiertniczych i zdjęć sejsmicznych 3D, dzięki czemu uzyskano bardziej szczegółowe profile stratygraficzne odwiertów oraz interpretację sejsmiki, które pozwoliły zaktualizować geometrię modelu. Kartowanie oraz modelowanie około 2500 uskoku znacząco podniosło jakość regularnych siatek interpolacyjnych (grid). W artykule przedstawiono metodykę pracy wykorzystywaną do tworzenia szczegółowego modelu strukturalnego, obejmującą konwersję czasowo-głębokościową, a także szacowanie niepewności.

INTERPRETACJA SEJSMICZNA ORAZ TWORZENIE MODELU W DOMENIE CZASOWEJ

Na dużych obszarach holenderskiej strefy przybrzeżnej i w mniejszej mierze na lądzie, wykonano zdjęcia sejsmiki 3D głównie na potrzeby przemysłu naftowego (ryc. 1). W początkowej fazie wykonywania modelu, dane z których korzystano pochodziły tylko z kilku sejsmicznych zdjęć 3D. Dopiero w kolejnych etapach prac do aktualizacji modelu zastosowano wszystkie dostępne i odtajnione dane sejsmiczne 3D z obszarów holenderskich wód terytorialnych. W trakcie realizacji aktualizowano model części lądowej obszaru. Wiele wysiłku włożono w automatyzację procesu przetwarzania danych dla ułatwienia regularnych aktualizacji modelu.

Interpretacja sejsmiki 2D i 3D dostarczyła danych wejściowych do wykartowania 10 głównych jednostek stratygraficznych. Wykonano ją zgodnie z definicjami nomenklatury stratygraficznej Holandii (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993). Interpretowane w odwiertach wydzielenia stratygraficzne pomogły zidentyfikować horyzonty sejs-

miczne oraz dostarczyły punktów odniesienia umożliwiających dokładne dowiązanie głębokości po konwersji głębokościowej. Spąg cechsztynu jest zazwyczaj najstarszym interpretowanym horyzontem. W głębokich partiach basenu sedimentacyjnego Broad Fourteens i na obszarze holenderskiej części rowu centralnego (*Dutch Central Graben*) niemożliwa jest interpretacja spągu cechsztynu. Na tych obszarach siatka miąższości (grid), bazująca na danych otworowych oraz otaczających danych sejsmicznych, została dodana do głębokości zalegania spągu triasu.

Szczegółowość, z jaką zostały wyinterpretowane uskoki i horyzonty, jest zbliżona do rozdzielczości map w skali 1 : 250 000 (oczko siatki wynosi 250 × 250 m). Części modelu, niekontrolowane sejsmiką 3D, zostały wypełnione wynikami interpretacji sejsmiki 2D i, co za tym idzie, pokazują mniej szczegółów strukturalnych. Interpretacje sejsmiczne zostały połączone w jeden skumulowany model w domenie czasowej (TWT) (ryc. 2). Drobne rozbieżności między interpretacjami, wiążące się z różnicami w przetwarzaniu danych sejsmicznych, zostały przanalizowane i zminimalizowane z wykorzystaniem indywidualnych przesunąć pionowych albo lokalnego wygładzania danych.

KONWERSJA CZASOWO-GŁĘBOKOŚCIOWA ORAZ MODEL W DOMENIE GŁĘBOKOŚCIOWEJ

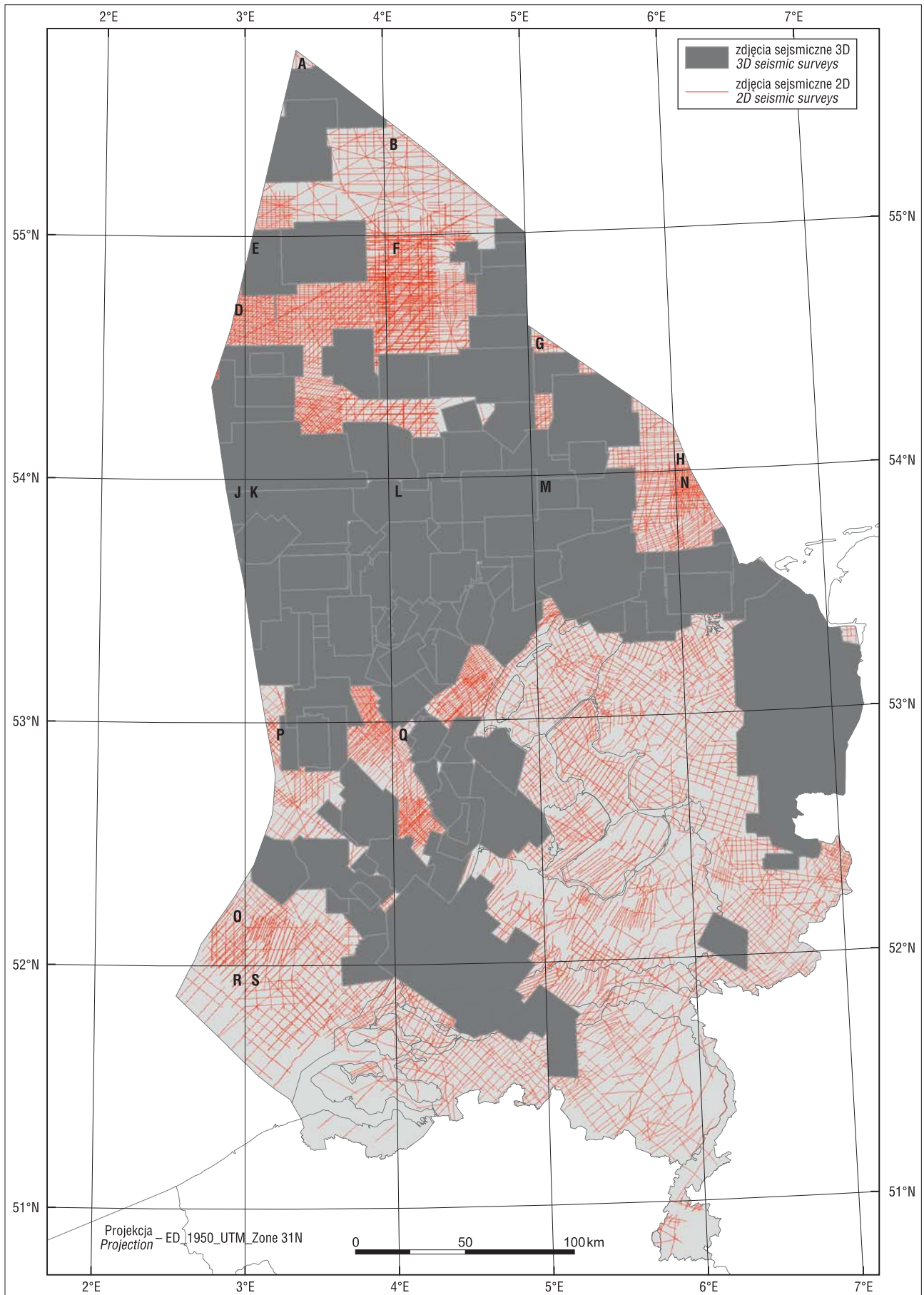
Skompilowane horyzonty czasowe dla każdej jednostki stratygraficznej, tak samo jak zinterpretowane uskoki, konwertowano do domeny głębokościowej, z wykorzystaniem warstwowego modelu prędkości

$$V(x, y, z) = V_0(x, y) + K \cdot z$$

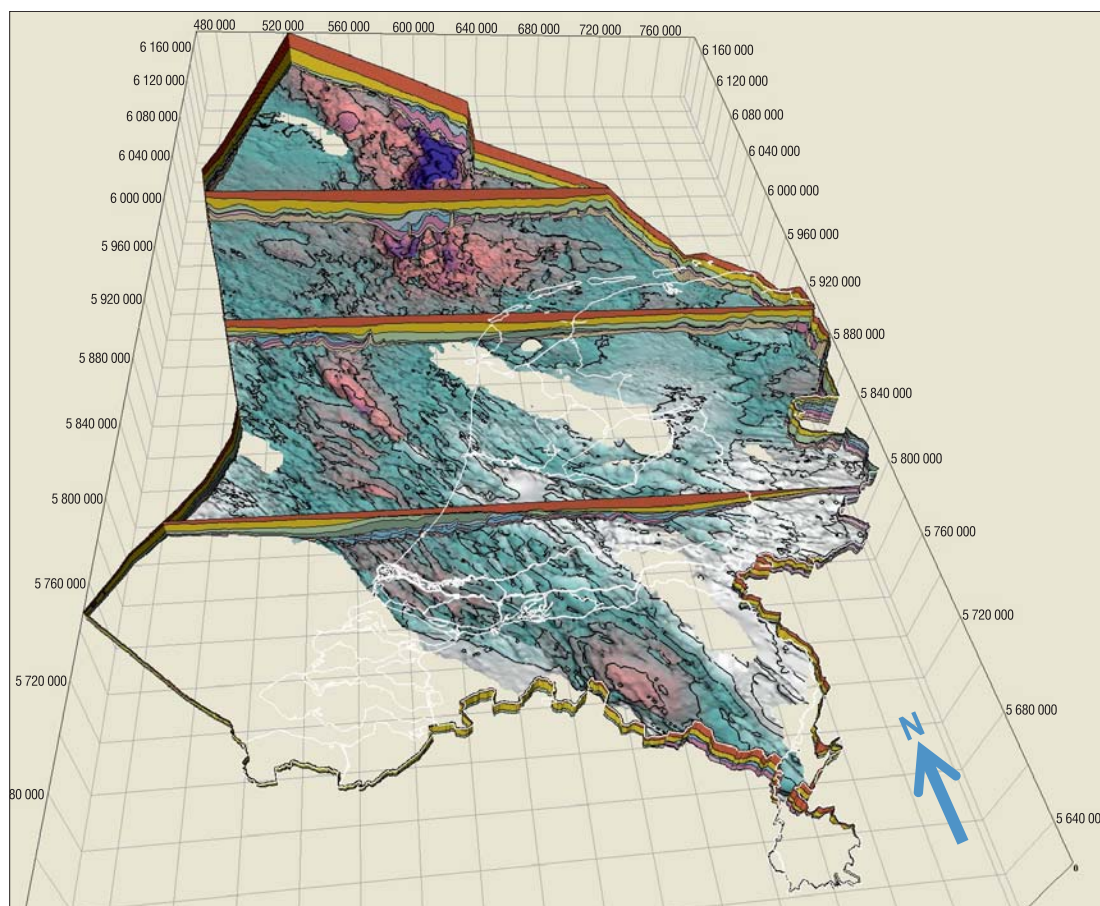
Model ten stworzono dla całej Holandii wraz z wodami przybrzeżnymi i obejmuje on cyfrowe pomiary prędkości z ponad 1300 odwiertów (Van Dalftsen i in., 2006, 2007).

Wyłączając utwory cechsztynu, założono, że prędkości w poszczególnych kompleksach rosną liniowo wraz z głębokością pod wpływem procesu kompaktacji. W ujęciu regionalnym, wartość K jest określona liniową zależnością między prędkością interwałową (V_{int}) i średnią głębokością (Z_{mid}) w otworach, wyliczoną metodą najmniejszych

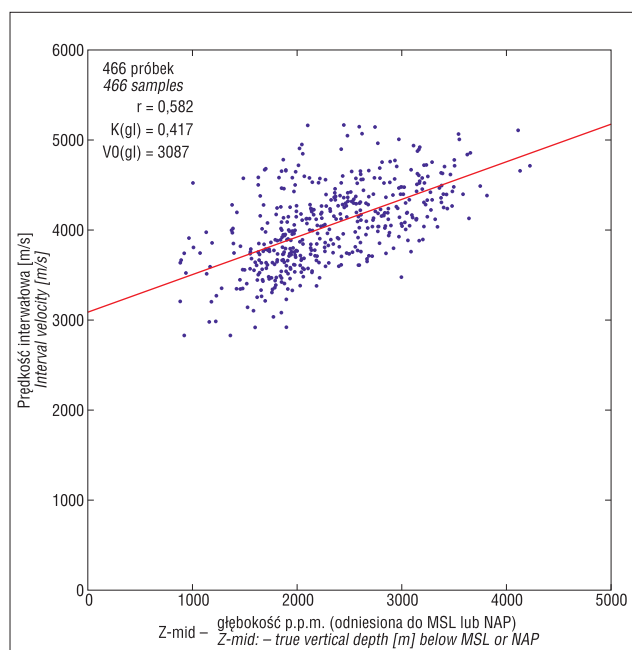
¹ TNO Geological Survey of The Netherlands Princetonlaan 6 NL-3584 CB Utrecht, The Netherlands; maryke.dendulk@tno.nl.



Ryc. 1. Zarys obszaru badań oraz położenie wykorzystanych zdjęć sejsmicznych 2D i 3D
Fig. 1. Overview of the mapping area and 3D and 2D seismic surveys used for building the model



Ryc. 2. Trójwymiarowa wizualizacja modelu skompilowanego w domenie czasowej (TWT). Powierzchnia odzwierciedla spąg osadów cechsztyńskich (Zechstein Group). Przekroje odzwierciedlają ułożenie kolejnych kompleksów modelu
Fig. 2. 3D-view of the compiled model in the TWT-domain. The surface represents the base of the Zechstein Group. The cross-sections show the stacked layers in the model



Ryc. 3. Diagram $Z_{\text{mid}} - V_{\text{int}}$ dla utworów triasu dolnego (Lower Germanic Trias Group) w Holandii. Nachylenie krzywej regresji odzwierciedla globalną wartość K użytą w konwersji czasowo-głębokościowej
Fig. 3. $Z_{\text{mid}} - V_{\text{int}}$ plot of the Lower Germanic Trias Group in the Netherlands. The slope of the linear regression line represents the global K -value used for the time-to-depth conversion

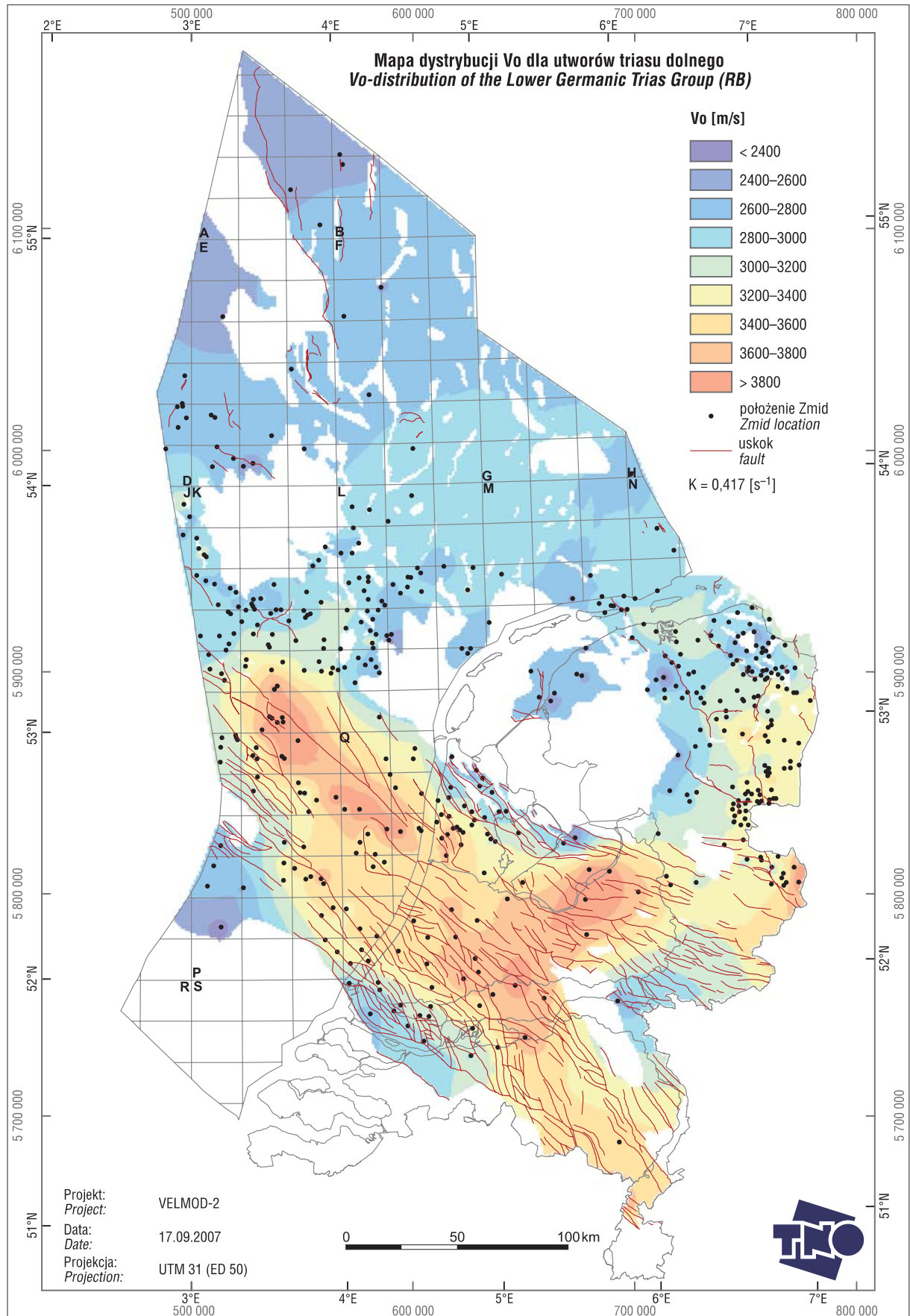
kwadratów. Rycina 3 pokazuje tę relację dla utworów dolnego triasu germańskiego. Zależny od lokalizacji parametr $V_0(x, y)$ jest określony przez lokalizację otworu wiertniczego równaniem:

$$V_0(x, y) = K \cdot [z_b - z_t \cdot \exp(K \cdot \Delta T)] \cdot [\exp(K \cdot \Delta T) - 1]^{-1},$$

a następnie interpolowany na siatkach grid obejmujących cały odwzorowywany obszar za pomocą kriginu blokowego (ryc. 4). Zależność ta wskazuje, że czas przejścia pomiędzy stropem (z_t) i spągami (z_b) kompleksu w modelu jest równa czasowi przejścia ΔT określonego dla krzywej akustycznej.

Przestrzenna dystrybucja zmian wartości $V_0(x, y)$ często pokrywa się z występowaniem obszarów późnokredowej i kenozoicznej inwersji strukturalnej (stosunkowo wysokie prędkości), a także z regionami, gdzie wewnątrz warstw stwierdzono warunki panującego nadciśnienia (stosunkowo niskie prędkości). Obserwacja ta dodatkowo potwierdza słuszność podziału modelu na kompleksy stratygraficzne.

Opisany model V_0-K nie jest wykorzystywany dla utworów cechsztynu. Kompleks cechsztyński zdominowany jest przez wysokoprędkościowe poziomy węglanowe i sole, które nie wykazują prostej zależności pomiędzy prędkościami propagacji fal sejsmicznych a głębokością. Dla tych utworów stworzono prowizoryczną siatkę prędkości interwałowych, bazując na czasie przejścia pochodzącym z interpretacji sejsmicznej oraz relacji pomiędzy V_{int} i ΔT (dane otworowe). Finalny rozkład V_{int} uzyskano przez



Ryc. 4. Mapa dystrybucji V_0 dla utworów triasu dolnego (*Lower Germanic Trias Group*). Wysokie wartości V_0 w centralnej i południowej części Holandii pokrywają się z obszarami poddanymi inwersji strukturalnej, na którą wskazują główne mezozoiczne elementy strukturalne

Fig. 4. Map of the V_0 distribution of the Lower Germanic Trias Group. High values of V_0 in the central and southern parts of the Netherlands coincide with areas of strong structural inversion according to the major Mesozoic structural elements

dowiązanie prowizorycznej siatki do rzeczywistych wartości V_{int} w otworach.

Po wykonaniu konwersji czasowo-głębokościowej, pionowe niewiązania dla każdego horyzontu oraz znaczników głębokości stropów w profilach otworów są przeliczane na obszarze modelu do postaci siatki, przy użyciu krigingu. Anomalnie wysokie wartości niewiązań powodowane przez struktury lokalne, takie jak wysady solne i uskoki, są filtrowane i korygowane w skali lokalnej. Wynikowa siatka rozbieżności jest łączona siatką czasowo-głębokościową w celu otrzymania modelu strukturalnego zgodnego z danymi otworowymi.

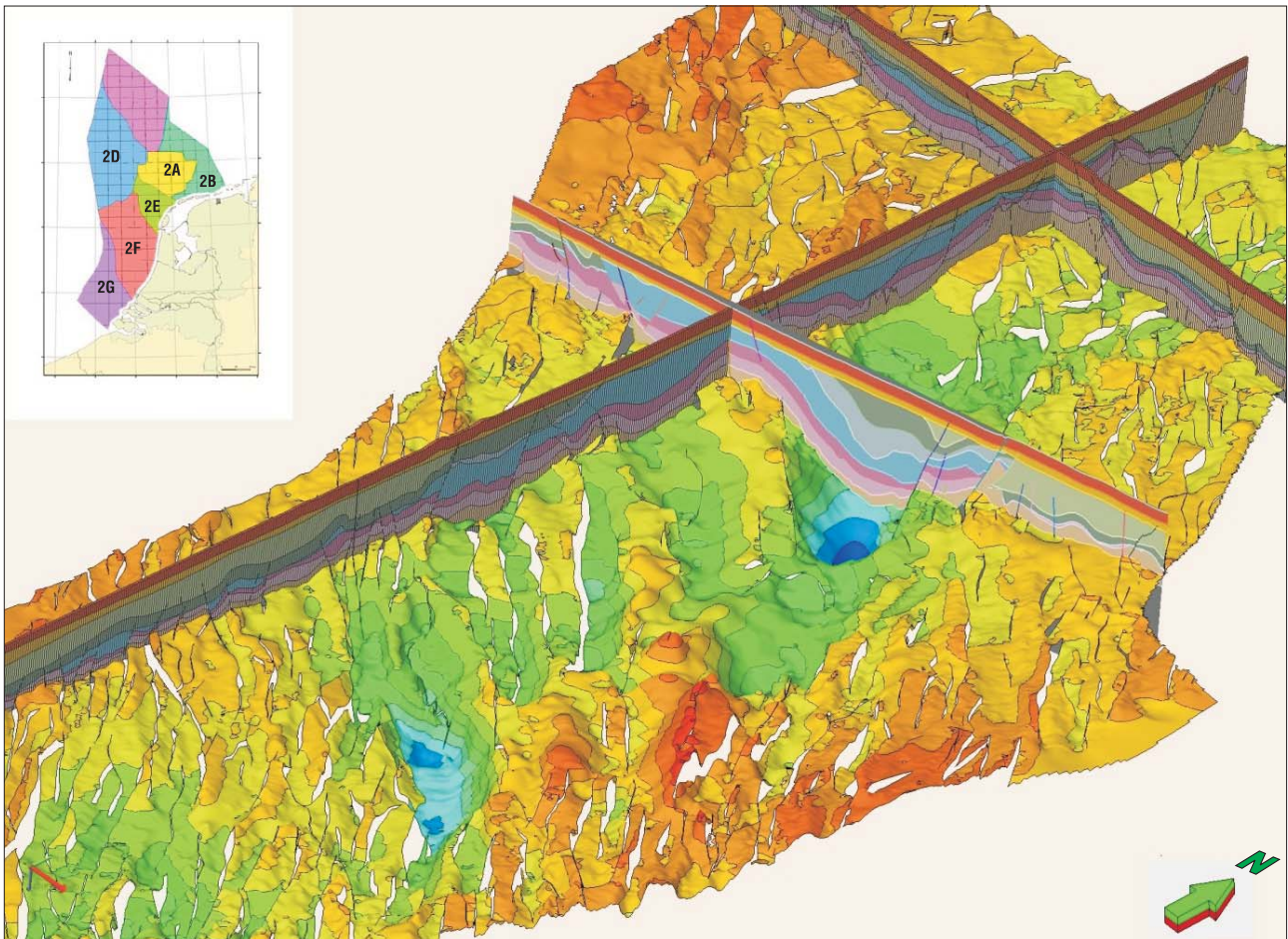
Spąg cechsztynu często jest obarczony błędem poważnego prze- lub niedoszacowania głębokości poniżej wysadów solnych, w związku z problematyczną identyfikacją tych granic w badaniach sejsmicznych. Poprawka zastosowana w tym przypadku sprowadza się do wycinania takich obszarów modelu, a następnie określania wartości głębokości przez interpolację.

Spąg górny czerwonego spągowca został odwzorowany przez dodanie do modelu spągu cechsztynu mapy miąższości, bazującej na danych otworowych. Mapy głębokości i miąższości utworzono również dla najważniejszych horyzontów zbiornikowych, integrując tym samym stratygraficzne krzywe otworowe, interpretację sejsmiczną oraz uskoki. Horyzonty zbiornikowe kartowano tam, gdzie odkryto złoża węglowodorów lub gdzie można je wykorzystać do innych zastosowań (np. geotermia).

MODELOWANIE USKOKÓW

Uskoki zostały wyinterpretowane w miejscach, gdzie stwierdzono znaczące przesunięcie horyzontów obserwowane na dużej przestrzeni oraz gdy były one istotne z punktu widzenia budowy strukturalnej. Dla obszaru wód przybrzeżnych wyinterpretowano około 3 800 uskoków; przypisano im unikatowe opisowe nazwy i zapisano w bazie danych uskokowych, w celu ułatwienia dostępu teraz i w przyszłości. Nazwy te odnoszą się do strukturalnie powiązanych subregionów (A–G), numerów bloków akwizycji sejsmicznej na morzu, najpłytszych i najgłębszych wydzieleni stratygraficznych przeciętych przez uskoki oraz numerów seryjnych.

Baza danych uskokowych umożliwia przechowywanie danych przestrzennych w formie geometrycznej (punkty, linie, poligony), a także wykonanie przestrzennego wyszukiwania danych. Uskoki są przechowywane w formie dwóch różnych trójwymiarowych formatów geometrii: linii 3D (*fault sticks*) oraz grup poligonów 3D. W bazie danych przechowywane są takie atrybuty jak: długość uskoku, uśredniony bieg i upad, typ uskoku, nazwy horyzontów przeciętych przez uskoki i wiele innych. Atrybuty te są obliczane podczas wprowadzania do bazy danych. Obszar wód terytorialnych został podzielony na siedem regionów, wzdłuż zarysu granic głównych mezozoicznych elementów strukturalnych. Ogółem około 2 500 uskoków zostało włączonych do modeli tworzonych dla tych zdefiniowanych strukturalnie regionów (ryc. 5).



Ryc. 5. Trójwymiarowa wizualizacja modelu uskokowego morskiego subregionu 2F. Powierzchnia odzwierciedla spąg cechsztynu (*Zechstein Group*), a na przekrojach odwzorowane są kompleksy stratygraficzne i uskoki wchodzące w skład modelu

Fig. 5. 3D-fault model view of the offshore sub-region 2F. The surface represents the base of the *Zechstein Group*. The cross-sections show the stacked layers and faults in the model

OCENA NIEPEWNOŚCI

Zastosowany do modelowania schemat przetwarzania obejmuje ocenę niepewności głębokości zalegania warstw oraz miąższości wydzielen. Błędy modelu mogą mieć różne źródła, takie jak: jakość danych, niejednoznaczność interpretacji sejsmicznej i interpolacji horyzontów, skomplikowana budowa strukturalna, a także niepewność związana z modelem prędkościowym. Wykorzystywany schemat przetwarzania danych określa sposób rozmieszczenia tych błędów w modelu finalnym. Wykonywane są wielokrotne stochastyczne realizacje każdego z elementów modelu (interpretacja sejsmiczna, powierzchnie w domenie czasowej – TWT, grid V_0), żeby ocenić wpływ poszczególnych parametrów. Przetwarzanie wszystkich możliwych kombinacji (np. wielokrotne realizacje horyzontów czasowych TWT są konwertowane do domeny głębokościowej z wykorzystaniem wielokrotnych realizacji modelu prędkościowego) powoduje powstanie 2 500 jednakowo prawdopodobnych wyników modelu finalnego, umożliwiając ilościowe ujęcie niepewności względem odchylenia standardowego (ryc. 6). Ponadto, wyniki te pozwalają zobaczyć w jaki sposób poszczególne elementy modelu wpływają na niepewność wyniku modelu końcowego. Bieżące rezultaty pokazują zróżnicowany wpływ jakości danych, złożoności budowy strukturalnej oraz wpływ modelu prędkościowego na wyniki kartowania w różnych częściach obszaru badań. Pokazują również, że błędy powstałe w płytko położonych warstwach modelu mogą wpływać na dużą niejednoznaczność na większych głębokościach, ponieważ model prędkościowy propaguje te błędy do warstw niżej leżących.

WNIOSKI

Na podstawie danych sejsmicznych i otworowych, należących do tzw. domeny publicznej dla obszaru lądowego i wód przybrzeżnych Holandii, jest budowany model strukturalny obejmujący 10 najważniejszych wydzielen stratygraficznych oraz powiązane z nimi uskoki.

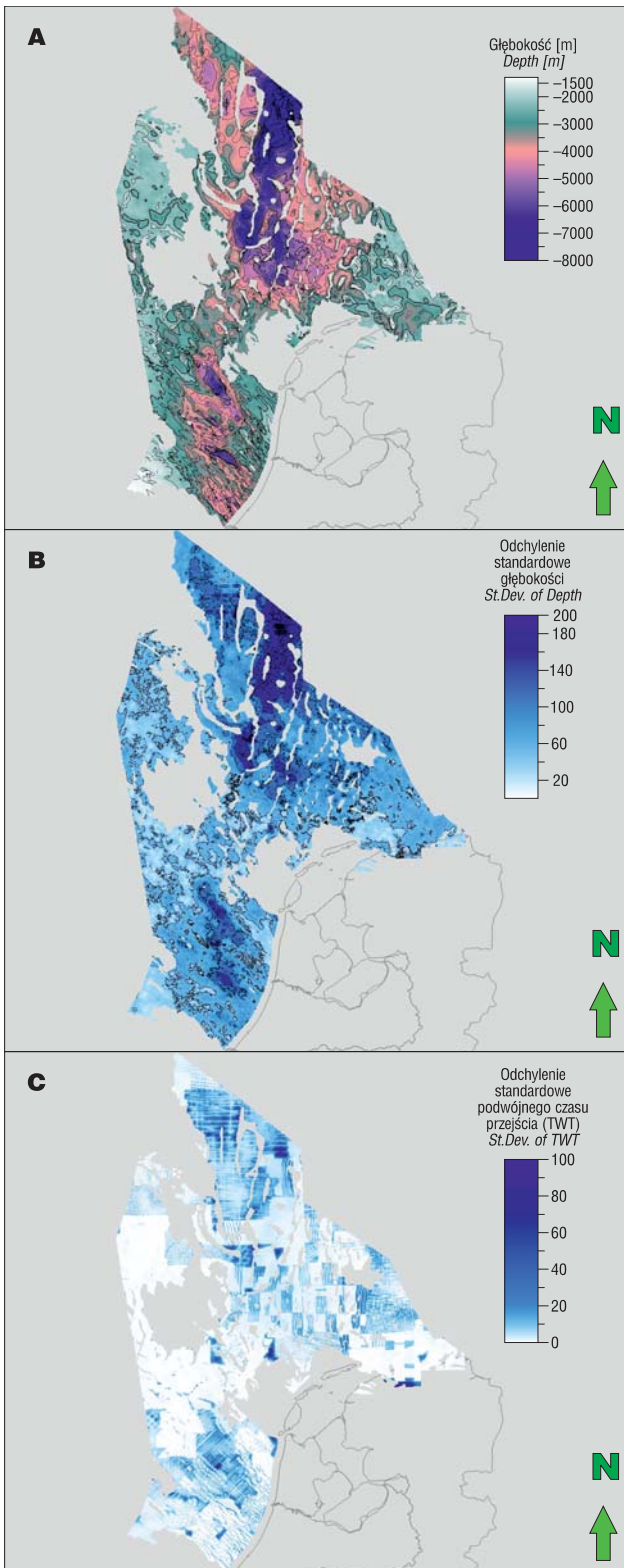
Do konwersji jednostek zbudowanych z utworów klastycznych użyto założenia liniowego wzrostu prędkości wraz z głębokością. Zależność ta nie odnosi się do utworów poddanych inwersji strukturalnej, działaniu naciśnienia, a także warstw zbudowanych przez wysokoprędkościowe węglany oraz sole.

Niepewność (*uncertainty*) w modelu została oszacowana z wykorzystaniem metod stochastycznych. Kombinacja wielokrotnych realizacji wsadowych modeli cząstkowych daje pojęcie o sposobie propagacji błędów w stosowanych schematach przetwarzania i pozwala skwantyfikować całkowitą niepewność ostatecznego modelu w ujęciu ilościowym.

Thumaczył Bartosz Papiernik

LITERATURA

- DUIN E.J.T., DOORNENBAL J.C., RIJKERS R.H.B., VERBEE, J.W. & WONG Th.E. 2006 – Subsurface structure of the Netherlands – results of recent onshore and offshore mapping. *Netherlands J. Geosci.*, 85 (4): 245–276.
- VAN ADRICHEM BOOGAERT H.A. & KOUWE W.F.P. 1993 – Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGPA. Mededel. Rijks Geol. Dienst 50.
- VAN DALFSEN W., DOORNENBAL J.C., DORTLAND S. & GUNNINK J.L. 2006 – A comprehensive seismic velocity model for the Netherlands based on lithostratigraphic layers. *Netherlands J. Geosci.*, 85 (4): 277–292.
- VAN DALFSEN W., VAN GESSEL S.F. & DOORNENBAL J.C. 2007 – Velmod-2, Joint IndustryProject. TNO-report 2007-U-R1272C.



Ryc. 6. Przykład wykorzystania metod stochastycznych do konwersji czasowo-głębokościowej. **A** – głębokość [m], **B** – odchylenie standardowe głębokości i **C** – odchylenie standardowe podwójnego czasu przejścia (TWT) dla utworów triasu dolnego (*Lower Germanic Trias Group*); głębokie partie basenu (ciemny niebieski/purpurowy) oraz obszary pokryte sejsmiką 2D (patrz ryc. 1) ewidentnie ujawniają wysoką niepewność (ciemny niebieski)

Fig. 6. An example of the use of stochastic methods for time to depth conversion. **A** – depth [m], **B** – standard deviation of depth and **C** – standard deviation of TWT for the Lower Germanic Trias Group. Deep basins (dark blue/purple) and areas with 2D seismic coverage (see Fig. 1) clearly show high uncertainty (dark blue)