Sprawdzenie możliwości pracy lodołamaczy liniowych w warunkach braku udrożnienia koryta Odry środkowej i granicznej (Wariant 0)

Ekspertyza

dr hab. Inż. Tomasz Kolerski

15.12.2017

Wstęp

Ekspertyza została opracowana na podstawie materiałów udostępnionych przez zamawiającego (SWECO Consulting sp. z o. o.) w formie raportów oraz danych batymetrycznych i hydrologicznych, Dodatkowo do wykonania ekspertyzy wykorzystane informacje zawarte w obowiązujących przepisach klasyfikacji i budowy statków śródlądowych oraz wiedzy pochodzącej z literatury fachowej. Wykorzystany do sprawdzenia warunków lodowych na Odrze model matematyczny jest znanym pod nazwą DynaRICE dwuwymiarowym modelem dynamiki lodu. Materiały wykorzystane bezpośrednio w ekspertyzie zostały zestawione poniżej.

[1]. Konieczny L., Analiza Techniczna wraz z koncepcją budowy lodołamaczy liniowych w ramach projektu pn. „Kontynuacja programu budowy lodołamaczy dla RZGW Szczecin", z dnia 30 stycznia 2017 r.

[2]. Szwalgin D., Zagożdżon J., Studium wykonalności; Kontynuacja programu budowy lodołamaczy dla RZGW Szczecin, Kancelaria VIP Spółka z o. o. Olsztyn marzec 2017

[3]. Banasiak R., Garncarz-Wilk B., Wytypowanie newralgicznych miejsc zagrożenia powodzią zatorową na Odrze od stopnia wodnego Malczyce do ujścia Nysy Łużyckiej wraz z oszacowaniem potencjalnych strat powodziowych na tym odcinku rzeki, IMGW Wrocław, październik 2015

[4]. Popielawska E., Zestawienie stanów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla stacji wodowskazowych Słubice, Gozdowice, Bielinek, Widuchowa zlokalizowanych na Odrze, Poznań, kwiecień 2017

[5]. Kolerski T., Modelowanie matematyczne zjawisk lodowych na wodach śródlądowych, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2016

[6]. Ashton G.D., River and Lake Ice Engineering, Water Resources Publications, Littleton, CO, USA, 1986

[7]. Shen H.T., Wang D.S., Lal A.M.W. (1995). Numerical simulation of river ice processes. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE 9 (3), pp. 107–118.

Przedstawiony poniżej raport składa się z dwóch części. Rozdział pierwszy dotyczy omówienia formuł matematycznych służących do obliczenia mocy lodołamaczy. Natomiast rozdział drugi przedstawia założenia modelu matematycznego oraz przedstawia wyniki eksperymentu numerycznego przeprowadzanego w dwóch charakterystycznych lokalizacjach na Odrze środkowej i granicznej. Analizowane lokalizacje (Słubice km 581-586 i Cigacice km 466 – 468) zostały przede wszystkim wybrane ze względu na dostępność danych, ale również przez wzgląd na to że są to odcinki rzeki wymieniane jako potencjalne lokalizacje zatorów lodowych.

Wnioski z wykonanej ekspertyzy są następujące:

1. Planowane do wykonania lodołamacze liniowe muszą mieć parametry dopasowane do warunków lodowych panujących na Odrze granicznej i środkowej;
2. Lodołamacze o małym zanurzeniu będą miały niewielką moc, co oznacza że nie sprawdzą się w warunkach pracy na Odrze, gdzie mogą być przeznaczone do likwidacji zatorów uformowanych z lodu spływającego rynną wykonaną przez lodołamacze czołowe;
3. W obecnych warunkach batymetrycznych panujących na Odrze granicznej i środkowej lód w postaci spływającej swobodnie kry może w bardzo krótkim czasie (od 12 do 18 godzin) zatrzymywać się i formować rozległy zator o znacznej grubości (do 80 cm grubości).

1 Określenie mocy lodołamaczy

Wydane w styczniu 2016 r. przez Polski Rejestr Statków Przepisy klasyfikacji i budowy statków śródlądowych (SRL) Część VI - Urządzenia maszynowe i instalacje rurociągów, w punkcie 30.1.1 (Wymagania dodatkowe dla lodołamaczy) podają:

„Moc silników głównych i wymiary elementów linii wałów należy określić na podstawie uznanych obliczeń teoretycznych i danych doświadczalnych, przy czym podlegają one każdorazowo odrębnemu sprawdzeniu PRS"

Następnie odnoszą do szacunkowych wartości minimalnych, które musza spełniać urządzenia napędu głównego lodołamaczy i które mają być przyjętych według statków ze wzmocnieniami lodowymi (pkt. 28. tych przepisów). Można tutaj znaleźć bardzo ogólnikowe określenia nie odnoszące się w żadne sposób do warunków lodowych panujących w danej rzece, na której docelowa ma lodołamacz pracować. Podano, że moc znamionowa silników głównych mierzona w sprzęgle łączącym je z linią wałów powinna być nie mniejsza niż:

$P = 0{,}25\ D$ [kW]

W którym:

D – wyporność statku zanurzonego do wodnicy ładunkowej w wodzie słodkiej [t]

W tym samym punkcie podaje się również szczegóły dotyczące zwiększenia procentowego średnic wałów śrubowych oraz parametrów geometrii skrzydeł śruby napędowej. Jak widać niezbędne w tym wypadu jest przyjrzenie się podstawom teoretycznym które zostały zdefiniowane na przestrzeni lat w celu obliczenia mocy lodołamaczy

Pierwsze równanie opisujące wymaganą moc lodołamacza pochodzi z końca XIX w i przedstawiona została jako moc w koniach mechanicznych, przekazywana na wał napędowy śruby lodołamacza:

$$S_{HP} = c_A v h^2 \tan(BA)$$

lub w jednostkach SI [Watt]

$$S_{HP} = 745{,}7 \cdot c_A v h^2 \tan(BA)\ ;$$

w którym:

c_A = współczynnik

v = prędkość lodołamacza;

h = grubość lodu;

BA = kąt pochylenia pomiędzy dziobnicą (stewa dziobowa), a linią wody

Przedstawione równanie, pomimo że archaiczne, wciąż znajduje zastosowanie ze względu na prawidłowe zdefiniowanie wymaganej mocy lodołamacza która jest zależna liniowo od prędkości statku, oraz od kwadratu grubości lodu i tangensa kąta nachylenia dziobnicy. Kolejna znana z

literatury formuła na siłę ciągu lodołamacza pracującego w lodzie pochodzi z roku 1900 i miała duży wpływ na późniejsze rozpatrywanie tego zagadnienia. Poniżej formuła w funtach-siły:

$$T = \frac{B^{1/3}h^2}{c^2 \frac{\cos(BA)\cos(SAC) - f_x \sin(BA)}{\sin(BA)\cos(SAC) + f_x \cos(BA)}};$$

oraz z przelicznikiem na układ SI [N]

$$T = 4{,}45 \frac{B^{1/3}h^2}{c_R^2 \frac{\cos(BA)\cos(SAC) - f_x \sin(BA)}{\sin(BA)\cos(SAC) + f_x \cos(BA)}};$$

w którym:

T = siła ciągu lodołamacza

c_R = współczynnik przyjmowany jako 0,18

B = maksymalna szerokość lodołamacza w linii zwierciadła wody;

SAC = kąt prędkości

Przedstawione powyżej równanie stało się inspiracją dla bardziej współczesnej relacji opracowanej w 1970 r.

$$T = 4{,}45 \frac{\sigma h^2}{c^2 \frac{\cos(BA)\,[\cos(SAC) + f_x \sin(SAC)] - f_x \sin(BA)}{\sin(BA)\,[\cos(SAC) + f_x \sin(SAC)] + f_x \sin(BA)}};$$

w którym:

σ = wytrzymałość na rozciąganie lodu

c = współczynnik przyjmowany jako 1,535

Jak widać zastąpiono tutaj wymiar statku wytrzymałością lodu, która jest bardziej istotnym parametrem opisującym warunki lodowe. Słabością wszystkich powyżej przedstawionych formuł jest fakt, że jedyną zmienną nawiązującą do kształtu kadłuba jest kąt dziobnicy, co może sugerować że jest to jedyny obszar statku wywołujący kruszenie lodu. Na podstawie pracy lodołamaczy na zlodzonych rzekach można łatwo zauważyć że faktycznie kruszenie lodu odbywa się wzdłuż całej wodnicy.

Zespół rosyjskich badaczy pod koniec lat 60-ych XX w. opracował bardzo kompleksowe równanie na wyznaczenie oporów działających na kadłub statku pracującego w lodzie:

$$R = k_1 \mu_0 B \sigma h + k_2 \mu_0 B \gamma_L h^2 + k_3 \left(\frac{1}{\eta_2}\right) B^{k_4} h v^{k_5} + R_w;$$

w którym:

R_w = suma sił oporu działających na lodołamacz pracujący bez lodu [kilogram-siła; kG];

B = maksymalna szerokość lodołamacza w linii zwierciadła wody [m];

v = prędkość lodołamacza [m/s];

h = grubość lodu [m];

γ_L = gęstość lodu [kg/m^3];

σ = wytrzymałość na rozciąganie lodu [kg/m^2]

k = bezwymiarowe współczynniki empiryczne;

μ_0 = parametr opisujący schemat kształtu kadłuba lodołamacza

Powyższe równanie składa się z czterech członów z których pierwszy odnosi się do siły oporu na skutek złamania lodu. Drugi człon dotyczy oporu związanego z masą lodu, który na skutek złamania przez lodołamacz będzie przemieszczał się w kierunku pionowym i zanurzał się pod powierzchnię wody. Trzeci człon odnosi się do reakcji pomiędzy lodołamaczem a lodem, który będzie spychany z toru poruszającego się statku. Czwarty człon reprezentuje opory ruchu określone dla statku poruszającego się w warunkach bez lodu. Opracowane przez rosyjskich naukowców równanie jest najbardziej kompleksowym ujęciem tego zagadnienia, a późniejsze modyfikacje nie zmieniały zasady ujmowania problemu doboru mocy lodołamaczy.

1.1 Wnioski

Z przedstawionych tu krótkich rozważań teoretycznych wynikają następujące wnioski:

1. Moc lodołamacza musi być dobierana zgodnie z warunkami lodowymi w jakich przyjdzie mu pracować;
2. Polskie przepisy nie definiują w sposób precyzyjny w jaki sposób należy dobierać moc lodołamaczy i lodołamaczy przeciwpowodziowych, a jedynie odnoszą do minimalnych wymogów stawianych tym jednostkom;
3. Według obowiązujących w Polsce przepisów moc statku jest wprost proporcjonalna do jego wyporności.

W odniesieniu do pkt. 1 wniosków można powiedzieć że jest dalece nieroztropnym odnoszenie parametrów odrzańskich lodołamaczy do jednostek pracujących na innych rzekach w Europie. Trzeba mocno zaakcentować, że warunki lodowe na Łabie lub Dunaju dalece odbiegają od tych, które obserwujemy na Odrze.

Przykładowo zator, który wystąpił na Dunaju w lutym 2012 roku miał w okolicach miejscowości Dalj (wschodnia Chorwacja) grubość w granicach 20 – 30 cm, a jego usunięcie zajęło odpowiednim służbom 15 dni (od 7 do 22 lutego 2012 roku). Kolejny zator utworzył się w dolnym biegu Dunaju w styczniu 2017 roku osiągając długość około 11 km (miedzy Dalj a Savulja) a jego grubość wynosiła około 2 – 3 m. Stanowiło to poważne wyznawanie dla lokalnych służb z Chorwacji, Serbii i Węgier, które neutralizowały zagrożenie powodziowe związane z 11 km zatorem przez 22 dni (9 -31 stycznia 2017 r.).

Z kolei rzeka Łaba, na którą są kierowane lodołamacza o małym zanurzeniu (1 m) zamarza sporadycznie. Bazująca na danych z Federalnego Instytutu Hydrologicznego (niem. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG) pokrywa lodowa na Łabie występowała jedynie w latach dziewięćdziesiątych

minionego wieku. W sezonie zimowym 1995/96 pokrywa lodowa uformowała się w końcu stycznia 1995 r. w rejonie Gesthaaht (stopień wodny powyżej Hamburga) a następnie rozbudowywała się w górę rzeki na skutek dopływającego z górnego odcinka krążków lodowych osiągając w połowie lutego Magdeburg co stanowi ok 220 km biegu rzeki. Kolejny sezon zimowy 1996/97 sprawił utworzenie się ciągłej pokrywy lodowej między Gesthaaht a Barby (około 300 km), która utrzymywała się na Łabie przez około miesiąc. W kolejnych sezonach na Łabie obserwowano jedynie pochód kry i śryżu o koncentracji powierzchniowej nie przekraczającej 70 %.
Porównywanie odrzańskich lodołamaczy do jednostek pracujących na rzekach, gdzie zjawiska lodowe obserwowane są epizodycznie nie może być stosowane. Należy pamiętać że akcja lodołamania jest prowadzaną na Odrze w każdym sezonie, a spiętrzenia zatorowe tworzą się praktycznie na całej długości Odry granicznej i Odry środkowej poniżej Brzegu Dolnego. Szczegółowa analizę numeryczną zjawisk lodowych na dwóch reprezentatywnych odcinkach Odry pokazano w rozdziale 2.
Punkt drugi wniosków w zasadzie nie wymaga komentarza poza stwierdzeniem, że przy projekcie lodołamaczy wymagane jest odniesienie się do „uznanych obliczeń teoretycznych", które pokrótce przytoczono w tym rozdziale.
Podane w pkt. 3 powiązanie mocy lodołamaczy z ich wypornością jest w ścisłym związku z pozostałymi wymiarami kadłuba statku w tym jego zanurzenia. Wynika z tego, że wymagana moc dla lodołamacza będzie korelowała z jego zanurzeniem, czyli jednostki o zanurzeniu 1 m nie będą dysponowały wystarczającą mocą do prowadzenia lodołamania na Odrze.

2 Warunki lodowe na Odrze

Pokrywa lodowa na Odrze tworzy się praktycznie w każdym sezonie zimowym. Jako pierwsze zamarza jezioro Dąbie oraz część pól między-ostrogowych. Następnie dopływający z Odry powyżej jeziora Dąbie lód będzie rozbudowywał się w formie dynamicznej pokrywy lodowej w górę rzeki. Tempo i zasięg rozbudowy pokrywy lodowej jest uzależniona zarówno od warunków meteorologicznych jaki i hydrodynamiki rzeki. Warunki pogodowe takie jak temperatura powietrza, zachmurzenie oraz opad będą przede wszystkim czynnikiem regulującym objętość lodu w rzece. Z kolei lokalne warunki przepływu oraz prędkość i kierunek wiatru będą wpływały na tempo rozbudowy pokrywy lodowej w górę rzeki. Proces ten jest typowy dla pokrywy lodowej na Odrze granicznej oraz Odrze środkowej, jednakże pokrywa lodowa rzadko sięga powyżej Kostrzyna (ujście Warty). Z drugiej strony proces inicjujący rozbudowę pokrywy lodowej może rozpoczynać się również w innych lokalizacjach, gdzie spływ lodu jest utrudniony na skutek dużej koncentracji przepływu (zwężenia koryta), lub zmiany kierunku przepływu (ostre zakręty). Miejsca do tego predysponowane to np. most graniczny w Słubicach (km 585) gdzie światło przekroju czynnego jest zwężone z około 120 m do 60 m, czy ostre zakręty powyżej Cigacic (km 470). Z uwagi na specyfikę tych lokalizacji zostały one wybrane w celu przeprowadzenia eksperymentów numerycznych, które miały pokazać sposób przepływu lodu na reprezentatywnych odcinkach Odry środkowej (Cigacice) i granicznej (Słubice). Wyniki eksperymentów przedstawione zostaną w dalszej części opracowania (Rozdziały 2.2. i 2.3)

Istnienie pokrywy lodowej na Odrze może w niesprzyjających okolicznościach prowadzić do niekontrolowanego zatrzymywania spływu różnych form lodu wywołując zatory. Zatory lodowe są zjawiskiem o zasięgu lokalnym jednak poprzez swą wysoką dynamikę mogą prowadzić do dużych strat w sytuacji występowania rzeki z brzegów. Z tego względu służby odpowiedzialne za utrzymanie rzeki dokładają wszelkich starań w celu neutralizacji zatorów. Skuteczna akcja likwidacji zatorów lodowych na Odrze może być jedynie prowadzona z wykorzystaniem specjalnie do tego

przystosowanych statków o wzmocnionych kadłubach i dużej mocy zwanych lodołamaczami. Wyróżnia się lodołamacze czołowe, których zadaniem jest wykonywanie kanału spływowego w pokrywie lodowej i zatorze, oraz lodołamacze liniowe które asystują tymi pierwszym pracując w rynnie wolnej od lodu. Likwidacja zatoru wykonywana jest zawsze od strony wody dolnej. W pierwszej kolejności należy dotrzeć do czoła zatoru i wykonać w najbardziej korzystnym miejscu kanał spływowy dla spiętrzonej wody. Następnie lodołamacze czołowe stopniowo usuwają nagromadzony w zatorze lód, a po oczyszczeniu rzeki posuwają się w górę wykonując rynnę do spływu lodu.

Podstawowym zadaniem dla planowanych do wykonania lodołamaczy liniowych jest akcja wspomagająca pracę lodołamaczy czołowych. Zadanie to polega na utrzymywania stałej drożności kanału spływowego wykonanego w pokrywie lodowej przez lodołamacze czołowe. W praktyce sprowadza się do ciągłego patrolowania i zapewniania stałego odpływu skruszonego lodu w dół rzeki. Dodatkowo lodołamacza liniowe maja za zadanie poszerzać rynnę, aby nie dochodziło do zatrzymywania się skruszonego lodu. Zadanie to jest kluczowe do zapewnienia skutecznej akcji lodołamania, która ma sens jedynie w warunkach stałego odprowadzenia lodu w dół rzeki. W warunkach naturalnych akcji lodołamania może towarzyszyć nieplanowane zatrzymywanie się skruszonego lodu. Sprzyjające do tego warunki związane są głównie z geometrią rzeki oraz koncentracją lodu płynącego po rzece, jak również możliwości przepustowe kanału spływowego.

2.1 Model matematyczny dynamiki lodu rzecznego

Przedstawiany w raporcie model matematyczny jest znanym w literaturze modelem DynaRICE, w którego tworzeniu autor raportu uczestniczył wraz z zespołem ekspertów pracujących pod kierunkiem prof. Hung Tao Shen. Model opisuje przepływ wody w układzie dwuwymiarowym z uśrednieniem prędkości wody w kierunku pionowym, natomiast dynamika lodu jest symulowana z wykorzystaniem lagranżowskiej metody wygładzonej hydrodynamiki cząstki (*ang. Smooth Particle Hydrodynamics* SPH).

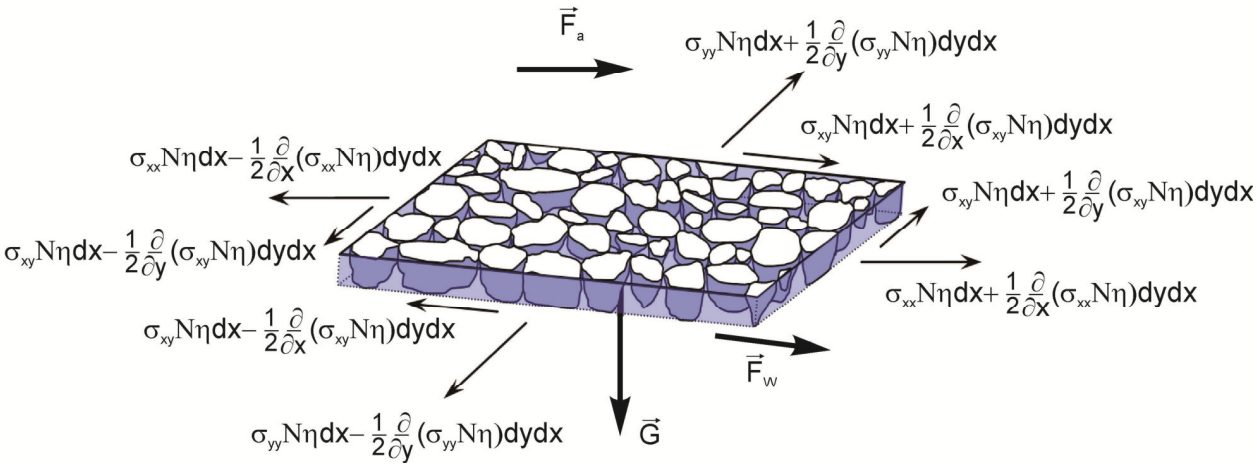
W odniesieniu do obiektów hydrotechnicznych często stosowaną praktyką jest wykonywanie modelu hydraulicznego, który jest wykonywany w skali i przy zachowaniu prawa podobieństwa. Drugą możliwością jest wykorzystanie modelu matematycznego, który z założenia ma umożliwić przedstawienie dowolnego zagadnienia hydraulicznego przez rozwiązanie odpowiednio skonstruowanych równań matematycznych. Oba przedstawione podejścia cechują się pewnego rodzaju przybliżeniem w stosunku do rzeczywistości. Za wykorzystaniem wyników modelowania numerycznego do wspomagania procesu projektowania przemawia stosunkowo niewielki koszt poniesiony na zastosowanie tego modelu do rzeczywistego obiektu inżynierskiego w porównaniu z odtwarzaniem procesu z wykorzystaniem modelu hydraulicznego. Prawidłowe rozpoznanie procesów towarzyszących inwestycjom przekłada się na znaczne oszczędności w ich realizacji i wyższy zysk wynikający z prawidłowego działania obiektu. Bez tego etapu pracy większość założeń, przyjmowanych zarówno na etapie planowania lub przy projektowaniu budowli, musi bazować na tak zwanej wiedzy ogólnej, doświadczeniu projektanta przy podobnych obiektach lub szacunkach wynikających z niekoniecznie słusznej opinii eksperckiej. Aby wyzbyć się subiektywnej oceny niezbędne jest przedstawienie rzetelnych obliczeń popartych prawidłowo przyjętymi danymi wejściowymi.

Procesy lodowe na rzekach przebiegają pod wpływem hydrodynamiki, termodynamiki i wzajemnego oddziaływania lodu. W celu ujęcia pełnego obrazu zachodzących zjawisk niezbędne jest

wyprowadzenie równania, w którym przedstawi się bilans sił działających na lód. Równanie bilansu sił wewnętrznych i zewnętrznych działających fragment rumowiska lodowego znajdującego się na powierzchni wody (Rys. 2.1) można przedstawić w postaci równania zachowania momentu pędu (II zasada dynamiki Newtona):

$$M_L \frac{d\vec{V}_L}{dt} = \vec{R} + \vec{F}_a + \vec{F}_w + \vec{G} \qquad (2\text{-}1)$$

W którym M_L jest masą jednostkową (na powierzchnię) rozpatrywanej cząstki lodu, $\vec{V}_L$ jest wektorem prędkości lodu, $\frac{d\vec{V}_L}{dt}$ jest przyspieszeniem lodu poruszającego się po powierzchni wody, $\vec{R}$ jest siłą pochodzącą od naprężeń wewnętrznych lodu, $\vec{F}_a$ jest siłą związaną z oddziaływaniem wiatru na lód, $\vec{F}_w$ jest siłą pochodzącą od oddziaływania płynącej wody na lód, natomiast $\vec{G}$ jest siłą grawitacji.



Rys. 2.1. Schemat sił działających na rumowisko lodowe znajdujące się na powierzchni wody

Szczegóły wykorzystanych w modelu wyprowadzeń matematycznych zamieszczono w załączniku.

Brzeg przepuszczalny dla modelu dynamiki lodu jest tożsamy z górnym warunkiem brzegowym w modelu hydrodynamicznym. Na arbitralnie zdefiniowanym brzegu obszaru przyjmuje się zależność zmienności dopływu lodu w czasie, która może być definiowana jako natężenie przepływu lodu lub jego koncentracja. Dolny warunek brzegowy jest zwykle traktowany jako w pełni przepuszczalny dla wody i lodu co oznacza że lód będzie swobodnie odpływał z obszaru obliczeniowego.

Warunek początkowy jest definiowany indywidulanie w zależności od symulowanej sytuacji rzeczywistej. Najczęściej przyjmuje się jednorodne pokrycie całego obszaru lodem o zadanej koncentracji i wyjściowej grubości. Jeśli symulowane jest ruszenie lodu, wówczas w chwili początkowej ustala się nieruchome i jednorodnie rozłożone cząstki reprezentujące pokrywę lodową, które następnie poddane są działaniu sił zewnętrznych i wewnętrznych. Na skutek działania tych sił lód będzie poruszał się w dół obszaru obliczeniowego. W sytuacji obliczania procesu zamarzania rzeki warunkiem początkowym jest układ zwierciadła wody bez zjawisk lodowych.

W tak skonstruowanym modelu matematycznym lód będzie poruszał się zgodnie z bilansem sił wewnętrznych i zewnętrznych wobec czego lokalizacja i czas powstania zatoru są elementem obliczeniowym, a nie wcześniej narzuconą sugestią. Wyniki modelu będą potraktowane jako możliwy

scenariusz rzeczywisty, ale należy je traktować z pewną dozą nieufności ze względu na brak przeprowadzonej kalibracji (brak danych obserwacyjnych) oraz na niekompletne dane wejściowe.

2.2 Transport lodu na Odrze granicznej, Słubice km 581 – 586

Słubice są położone na górnym odcinku Odry granicznej, około 40 km od ujścia Nysy Łużyckiej. Łączący Słubice z Frankfurtem nad Odrą most jest miejscem newralgicznym z punktu widzenia powstawania zatorów lodowych. Przyczyną tego jest zwężenie przekroju poprzecznego Odry z około 120 m do szerokości światła przęsła mostu wynoszącego około 65 m. Dodatkowo, wybudowana powyżej mostu kierownica uniemożliwia odpływ lodu pod kolejnym jego przęsłem (Rys. 2.2).

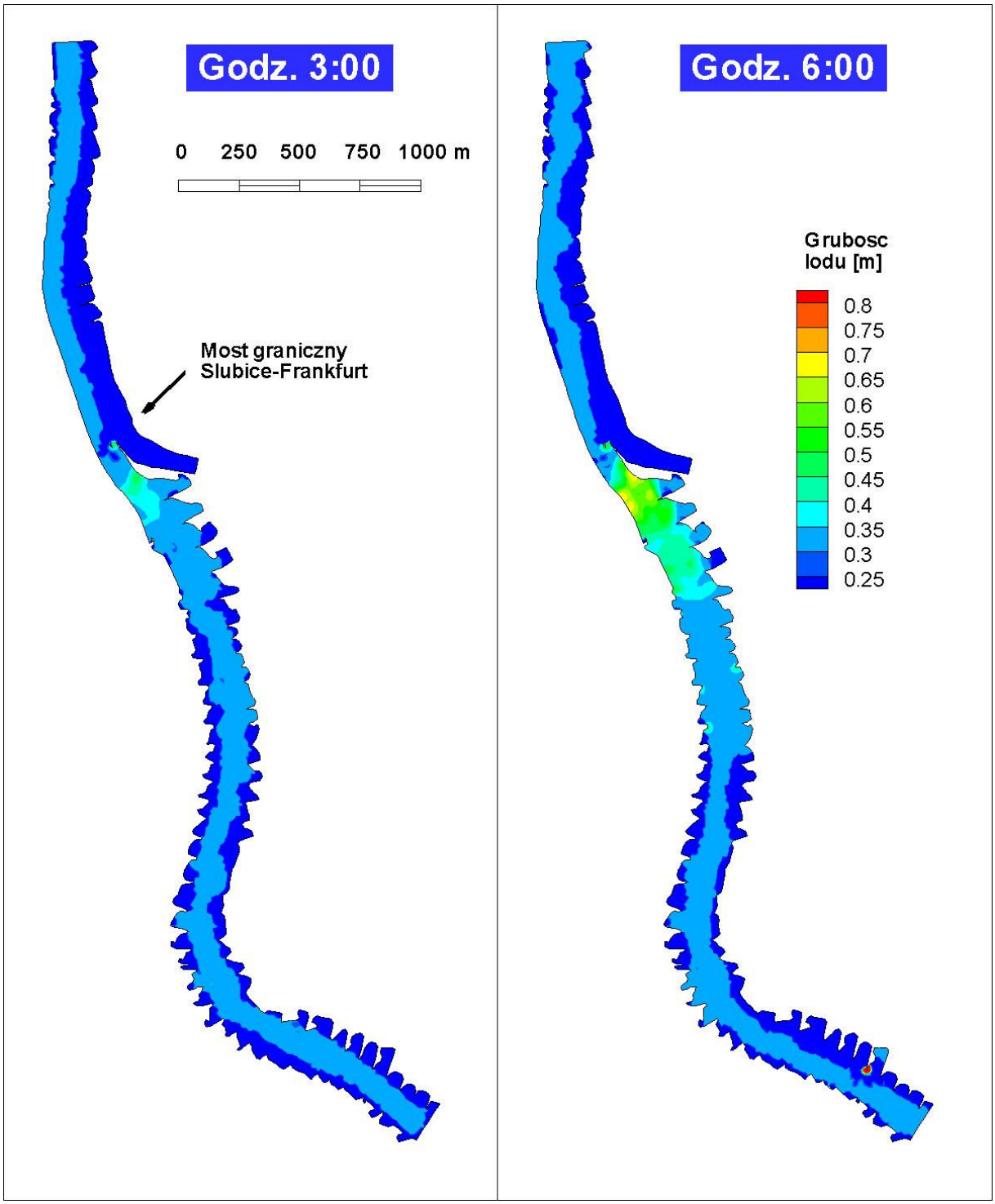
Rys. 2.2. Odra w rejonie Słubic z widocznym mostem granicznym, lipiec 2015 (fot. Wolkenkratzer, źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slubice_Polen_001b.jpg)

2.2.1 Wyniki symulacji numerycznej

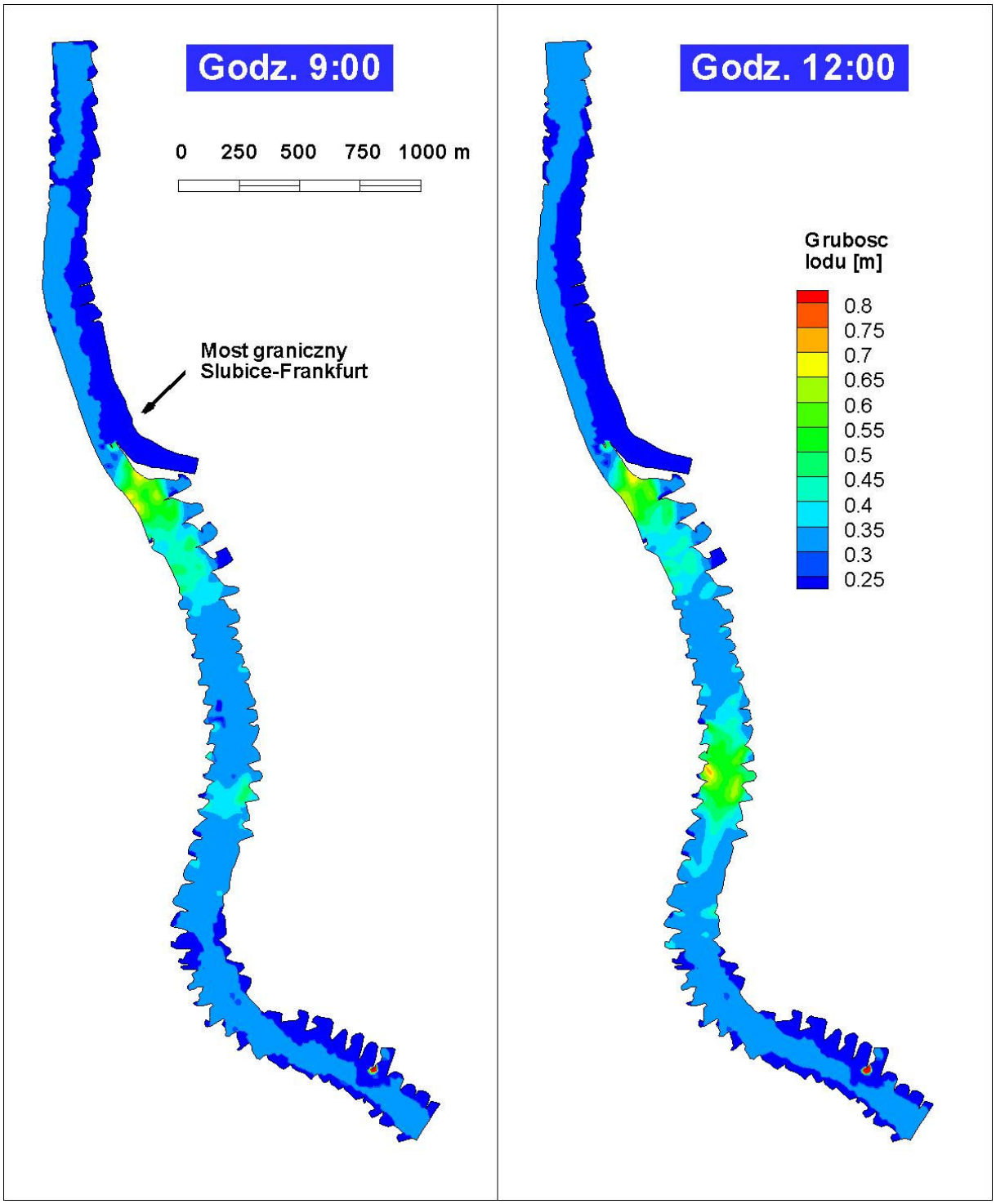
Implementacja modelu matematycznego sprowadzała się do wykonania siatki elementów skończonych na podstawie pomierzonej batymetrii i linii brzegowej obszaru Odry od km 581 do km 586. Ze względu na brak danych batymetrycznych po niemieckiej stronie granicy układ dna był ekstrapolowany przy wykorzystaniu metody Sheparda dla najbliższych 16 punktów. Obliczenia prowadzono dla przepływu niskiego NQ = 160 m^3/s i dla dopływu lodu o koncentracji 0,5. Parametry lodu takie jak kąt tarcia wewnętrznego i szorstkość dolnej powierzchni zostały dobrane na podstawie wartości typowych, które były kalibrowane i weryfikowane na takich rzekach jak dolna Wisła, rzeka Św. Wawrzyńca, czy rzeka Niagara. Wartości parametrów krytycznych, dotyczących dynamicznego formowania się zatoru tj. krytycznej liczby Froude'a dla napływającego lodu (Fr = 0,09) oraz prędkości erozyjnej dla zatoru lodowego (V_{cr} = 1,5 m/s) przyjęto zgodnie z zleceniami w literaturze.

Niestety, przyjęcie bardziej adekwatnych wartości parametrów modelowych wymagałoby długotrwałej kalibracji modelu na Odrze granicznej. Z tego względu przyjęte wyniki stanowią jedynie informację orientacyjną, pokazującą pewne trendy w formowaniu się zatorów lodowych w rejonie Słubic.

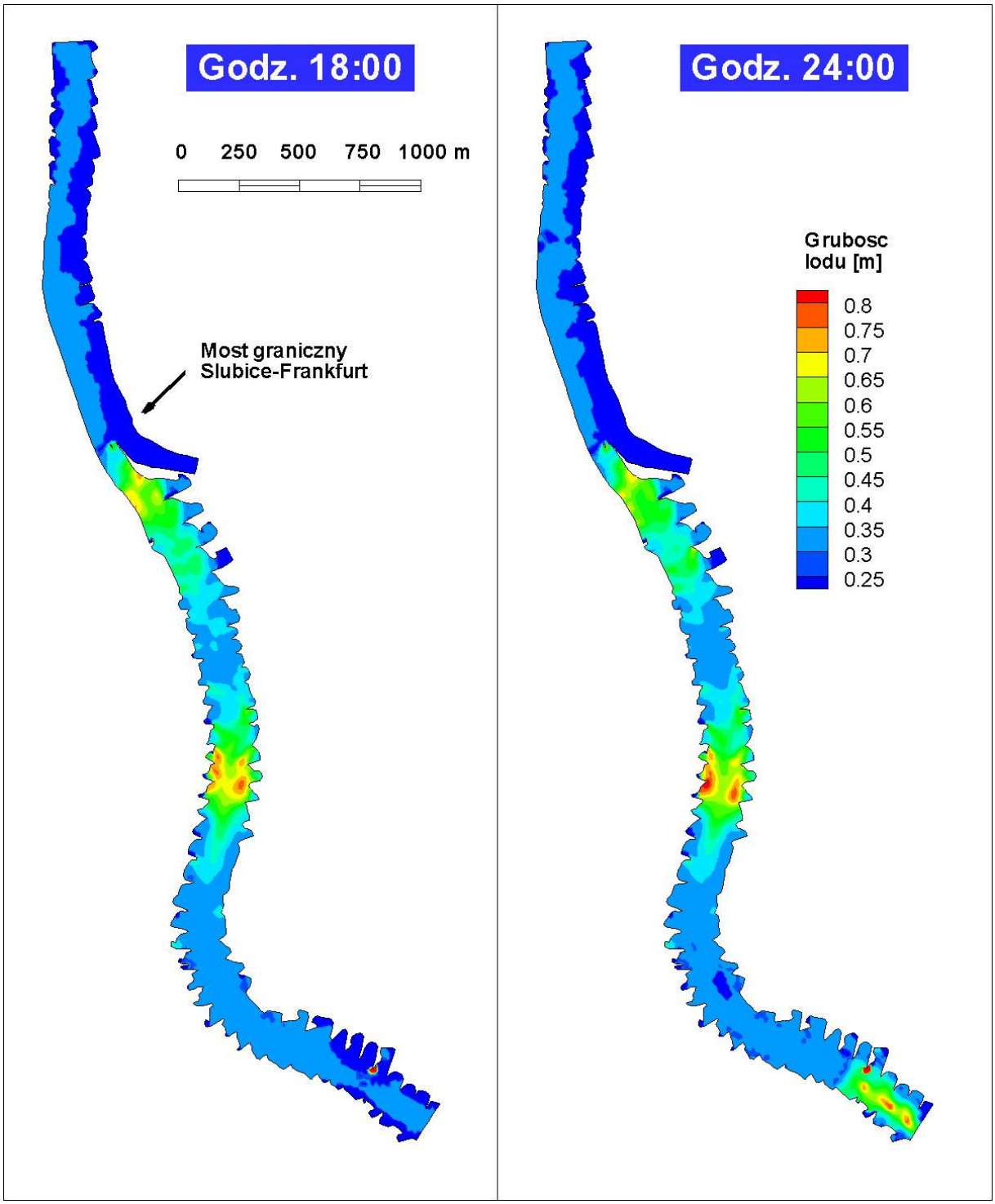
Uzyskane z obliczeń numerycznych wyniki wskazują na wyraźną tendencję do zatrzymywania się lodu w rejonie mostu granicznego w Słubicach-Frankfurcie. Przy symulowaniu napływu lodu o średniej koncentracji (N=0,5) początki zatoru obserwuje się już po 3 godzinach symulacji a rozbudowany zator występuje po 18 godzinach symulacji. Grubość czoła zatoru nie jest znaczna ponieważ osiąga od 0,6 do 0,75 m, natomiast zator rozbudowuje się na długości około 2 km, osiągając po 24 godzinach górny skraj obszaru obliczeniowego.



Rys. 2.3. Wynik symulacji numerycznej; grubość lodu na Odrze w rejonie Słubic w 3 i 6 godzinie symulacji



Rys. 2.4. Wynik symulacji numerycznej; grubość lodu na Odrze w rejonie Słubic w 9 i 12 godzinie symulacji



Rys. 2.5. Wynik symulacji numerycznej; grubość lodu na Odrze w rejonie Słubic w 18 i 24 godzinie symulacji

2.2.2 Podsumowanie

W rejonie Odry granicznej zatory lodowe mogą tworzyć się w bardzo krótkim czasie, a końcowa grubość czoła zatoru może po jednej dobie dochodzić miejscami do 0,8 m. Czas formowania się takiego zatoru odpowiada warunkom w jakim przyjdzie pracować lodołamaczom liniowym które pływając wzdłuż pewnego odcinka rzeki mogą napotkać tego rodzaju akumulacje utworzone z lodu skruszonego w górze rzeki. Likwidacja zator o takiej grubości będzie wymagała użycia lodołamaczy o znacznej mocy, a co za tym idzie większym zanurzeniu. Lodołamacze o zanurzeniu do 1 m mogą nie

mieć dostatecznej mocy do likwidacji zatorów o podobnych gabarytach. W przypadku dłuższego dopływu lodu lub niekorzystnych warunków meteorologicznych, zator będzie znacznie przekraczał uzyskane z symulacji rozmiary.

2.3 Transport lodu na Odrze środkowej, Cigacice km 466 – 468

Obliczenia prowadzono na półtora-kilometrowym odcinku rzeki bezpośrednio przed miejscowością Cigacice i mostem drogowym na drodze S3. W bliskim sąsiedztwie tego odcinka znajduje się wodowskaz Cigacice, dzięki czemu można było ustalić stany przepływy charakterystyczne. Wybór odcinka rzeki był podyktowany faktem, że w tym rejonie Odra zmienia gwałtownie kierunek przepływu z północno-wschodniego na zachodni. Model matematyczny został wykonany na podstawie danych batymetrycznych, które posłużyły do wykonania sieci elementów skończonych. Systematyczne obserwacje warunków lodowych w rejonie Cigacic nie są prowadzone, z tego względu przyjrzano się fotografiom i filmom dostępnym w Internecie, które mogły pomóc w oszacowaniu skali zjawiska. Jeden z dostępnych amatorskich filmów pokazuje transport lodu prądowego w rejonie bezpośrednio przed zakrętem Odry oraz powyżej mostu na trasie S3. Według zamieszczonych informacji film został wykonany w styczniu 2017 r. a poniżej podano kilka ujęć rzeki i płynącego lodu.

Rys. 2.6. przedstawia odcinek bezpośrednio przed modelowanym obszarem z wyraźnie zaznaczonym przekierowaniem nurtu w stronę prawego brzegu rzeki. Widoczne jest również brak lodu brzegowego na części z pól między-ostrogowych, do których wpływają krążki śryżowe. Kolejne ujęcia (Rys. 2.7 i 2.8) pokazują przepływ lodu w obszarze obliczeniowym, gdzie można zauważyć bardziej równomierny rozkład poprzeczny koncentracji lodu. Ostatnie ujęcie (Rys. 2.9) pokazuje rejon dolnej części obszaru obliczeniowego, na którym łatwo dostrzec znacznie mniejszą koncentrację powierzchniowa lodu niż dla odcinka rzeki wyżej położonego. Wskazuje to na utrudniony odpływ lodu z obszaru zakrętu na rzece i duży potencjał zatorowy tego odcinka. Niestety brak jest na materiale precyzyjnych ujęć modelowanego zakrętu Odry, wobec czego można się tylko domyślać jak zjawisko transportu i akumulacji lodu przebiega na tym obszarze.

Rys. 2.6. WidokOodry powyżej Cigacic, rejon km 465, bezpośrednio przed górnym warunku brzegowego obszaru obliczeniowego Wyraźne ułożenie dopływu lodu przy prawym brzegu Odry; część pól ostrogowych niezamarznięta

Rys. 2.7. Widok Odry powyżej Cigacic, rejon km 466; strzałki oznaczają początek i koniec obszaru obliczeniowego, styczeń 2017

Rys. 2.8. Ruch lodu na odcinku Odry stanowiącej obszar obliczeniowy dla modelu matematycznego, styczeń 2017

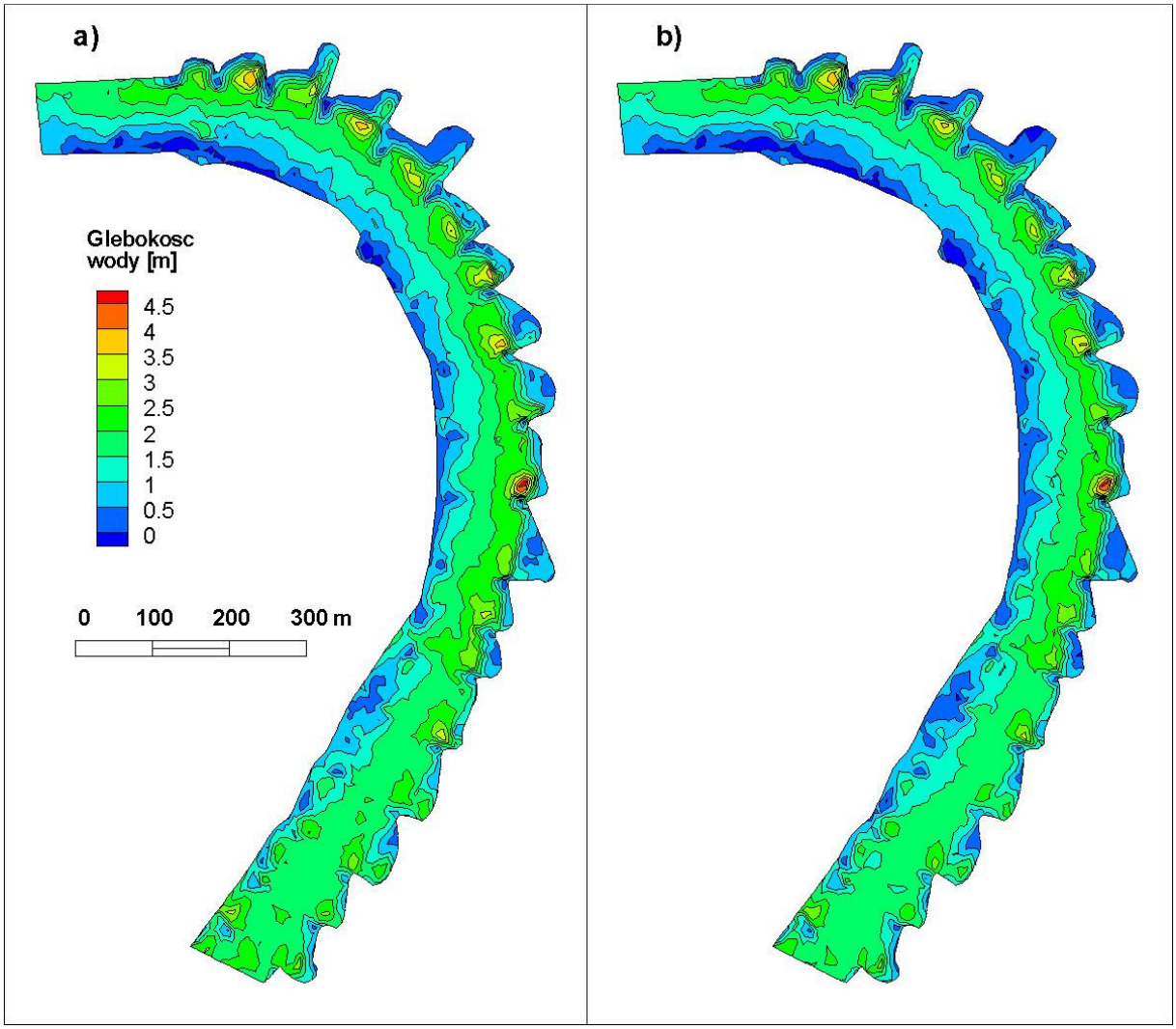
Rys. 2.9. Ruch lodu na odcinku Odry w dolnej części obszaru obliczeniowego (km 468), styczeń 2017

2.3.1 Wyniki symulacji numerycznej

Model matematyczny został zaimplementowany do około 2 kilometrowego fragmentu Odry powyżej wodowskazu Cigacice, którego batymetria została szczegółowo opomiarowna. Przyjęto w obliczeniach że najmniej korzystne warunki dla przepływu lodu będą występowały w warunkach przepływu niskiego oraz w dolnej granicy przepływów średnich. Dane hydrologiczne z wodowskazu Cigacice zostały dostarczone przez firmę zamawiającą (SWECO Consulting sp. z o. o.) i obejmowały okres 1984 – 2013. Spośród tych danych wybrano przepływy charakterystyczne czyli przepływ średni niski (SNQ = 84 m^3/s), oraz dolne ograniczenie przepływów średnich (NSQ = 117 m^3/s). Układ głębokości wody dla obu przepływów pokazano na Rys 2.10a i b.

Obliczenia prowadzono dla obu warunków przepływu i dopływu lodu ze średnią koncentracją (N=0,5), o początkowej grubości pojedynczej kry lodowej (krążków śryżowych) η = 0,2 m. Uwzględniano również oddziaływanie wiatru wiejącego z kierunku wschodniego oraz zachodniego. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2.11 – 2.14 w postaci rozkładów grubości lodu i rozkładów głębokość większych od 1,0 m. Należy podkreślić że we wszystkich analizowanych przypadkach nie dochodziło do zatrzymywania się lodu na całej szerokości przekroju, a jedynie odkładanie się go przy obu brzegach rzeki. Przyczyną może być stosunkowo mały obszar poddany analizie, co może skutkować brakiem uwzględnienia mostu drogowego na trasie S3 (dane batymetryczne nie obejmowały tego odcinka rzeki). Dodatkowo nie uwzględniono dopływu rzeki Wkry, który mógł w pewnym stopniu zakłócać transport lodu.

Wartym zauważenie jest fakt że pochód lodu jest spowolniony w środkowym odcinku analizowanego fragmentu Odry co skutkuje w systematycznym wypełnianiu koryta lodem dopływającym z górnej części rzeki. Wyniki symulacji o czasie trwania 1 doby wskazują, że istnieje w tym rejonie potencjał do powstania zatoru, natomiast lokalizacja czoła tego zatoru będzie z dużym prawdopodobieństwem położona powyżej analizowanego odcinka Odry. Nie bez znaczenie jest pominięcie dolnego fragmentu w bezpośrednim sąsiedztwie obu mostów w Cigacicach. Dla pełniejszego rozeznania tego odcinak rzeki należałoby rozszerzyć obszar obliczeniowy zarówno w górę jaki w dół rzeki.



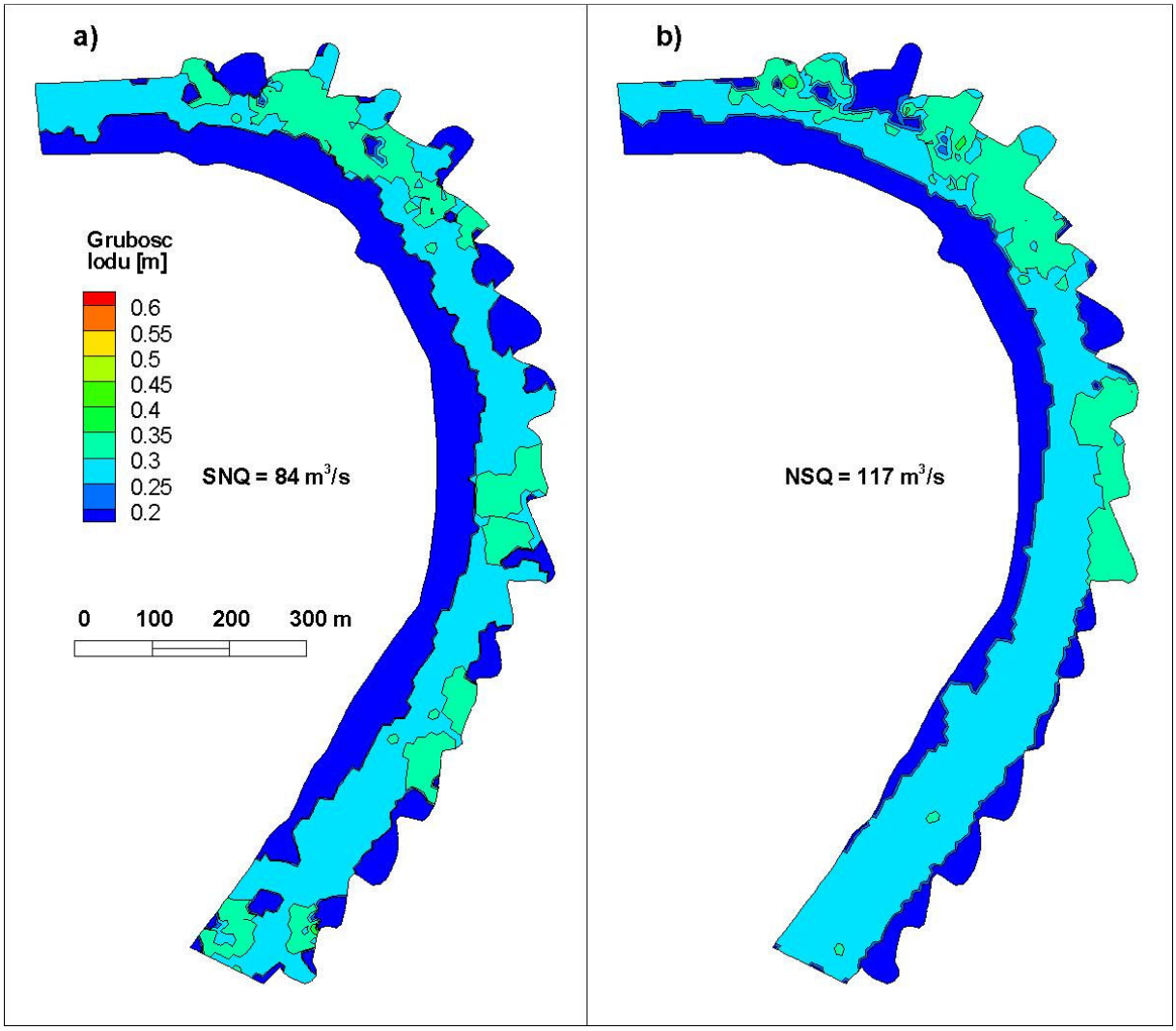
Rys. 2.10. Rozkład głębokości wody w Odrze powyżej Cigacic przy przepływie SNQ = 87 m^3/s (a); NSQ = 117 m^3/s (b)

2.3.2 Podsumowanie

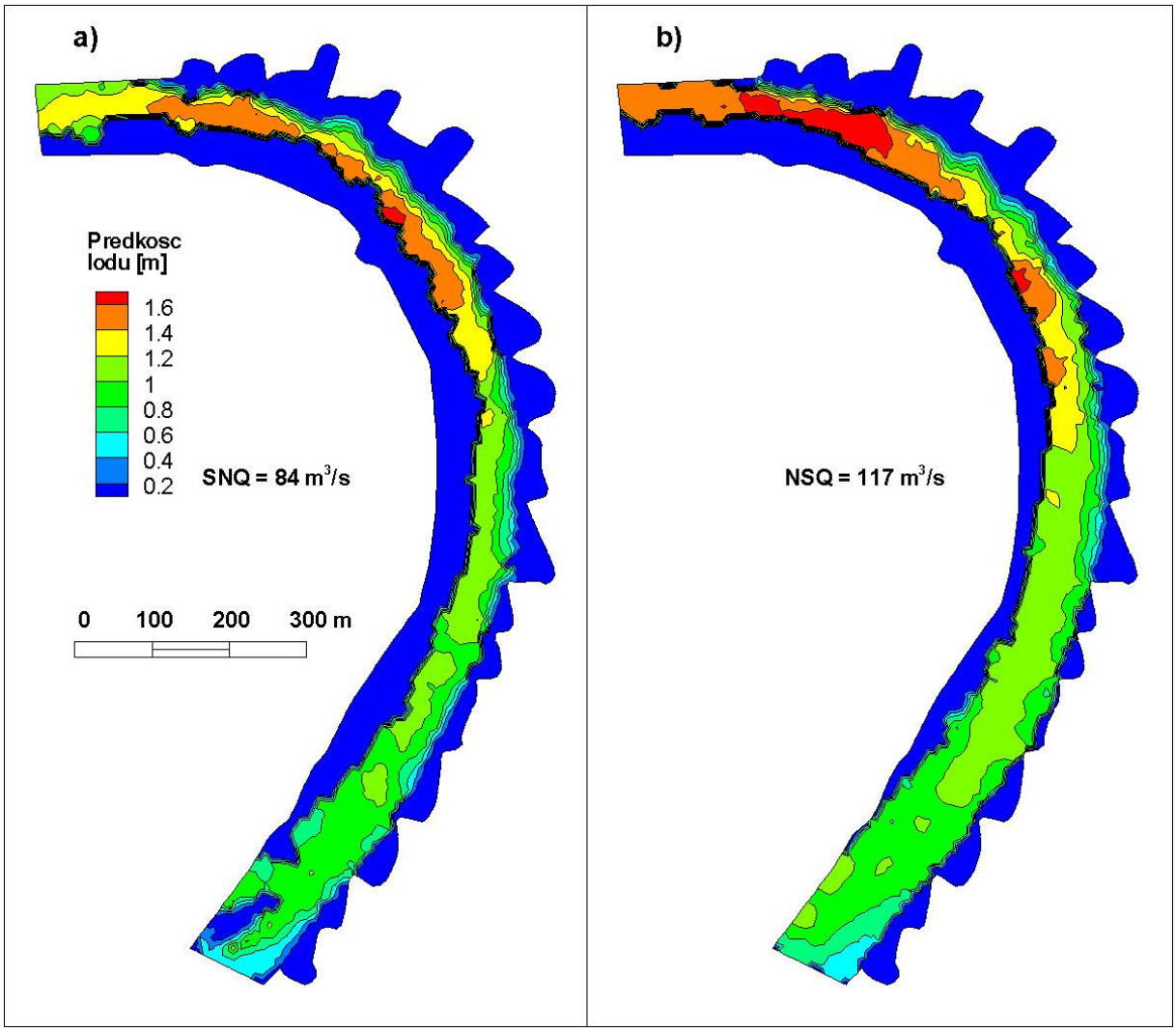
Pomimo tych ograniczeń można zauważyć następujące zjawiska:

1. Lód ma tendencje do poruszania się stosunkowo blisko główek ostróg na prawym brzegu rzeki, gdzie głębokości są bardzo zróżnicowane (od 0,5 m do ponad 4 m głębokości przy SNQ).
2. Ze względu na występujące w niektórych miejscach mielizny dochodzi do zalegania lodu na dnie. Może to prowadzić do formowania się tzw. zatoru głuchego, czyi akumulacji lodu wypełniającej cały przekrój rzeczny.
3. Wiatr wschodni spycha lód ku lewemu brzegowi gdzie występują rozległe płycizny
4. Wiatr zachodni utrudnia odpływ, ale ruch lodu jest ciągły i nie wywołuje istotnych akumulacji

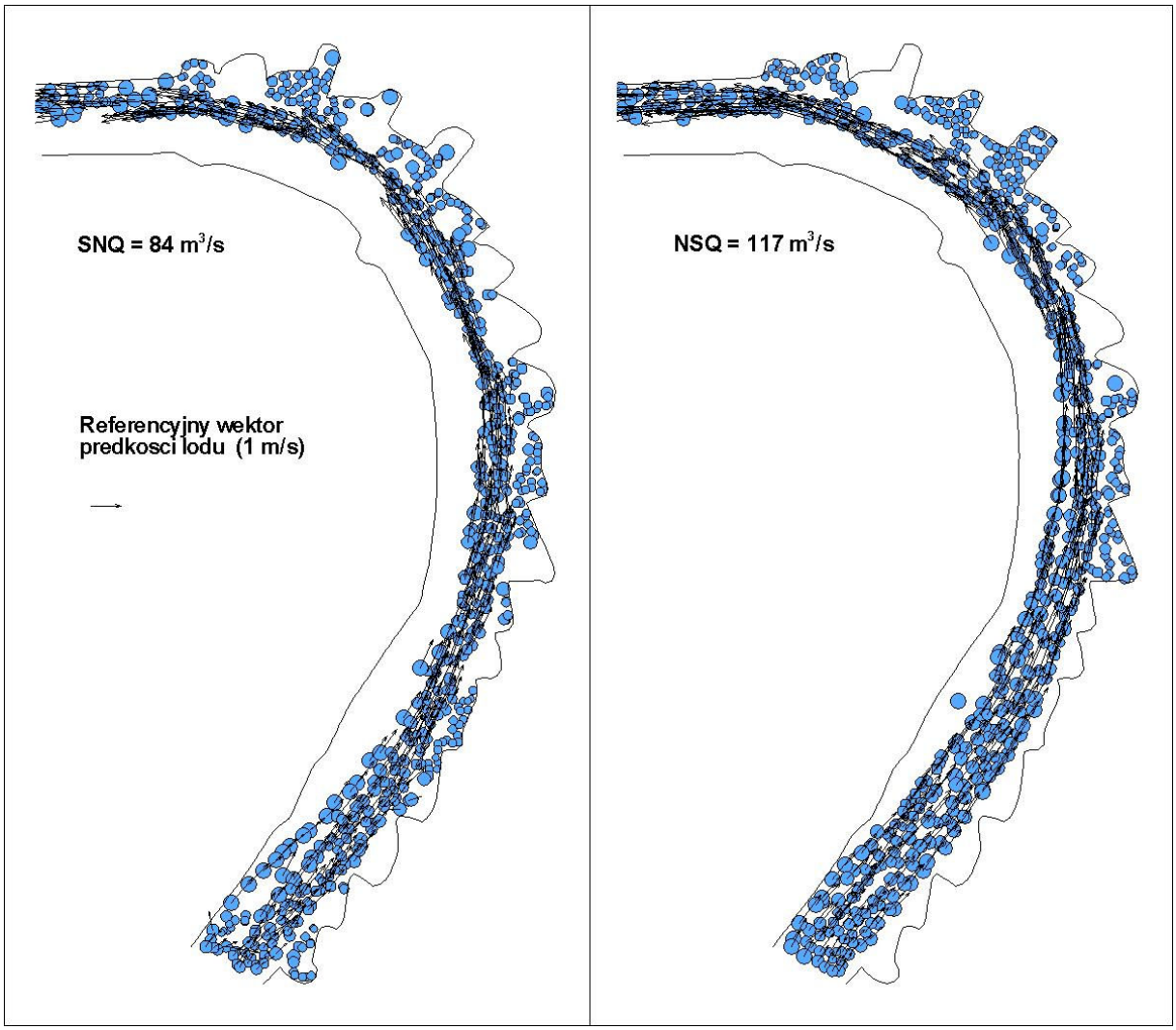
Odnosząc powyższe wnioski do pracy lodołamaczy w rejonie Odry środkowej można dostrzec istotne problemy polegające na braku wymaganych głębokości dla lodołamaczy liniowych. Jest to problematyczne zarówno w rejonie intensywnego ruchu lodu (brzeg prawy) jak też w odniesieniu do brzegu lewego w pobliżu którego lód zalega na płyciznach. Należy pamiętać że lodołamacze liniowe muszą prowadzić akcję ciągłego udrażniania koryta rzeki, umożliwiając tym samym stały odpływ lodu. W sytuacji wymaganej pracy w rejonie prawego brzegu może się zdarzyć, że głębokość będzie niewystarczająca co może prowadzić do ryzyka osiadania lodołamaczy na mieliźnie.



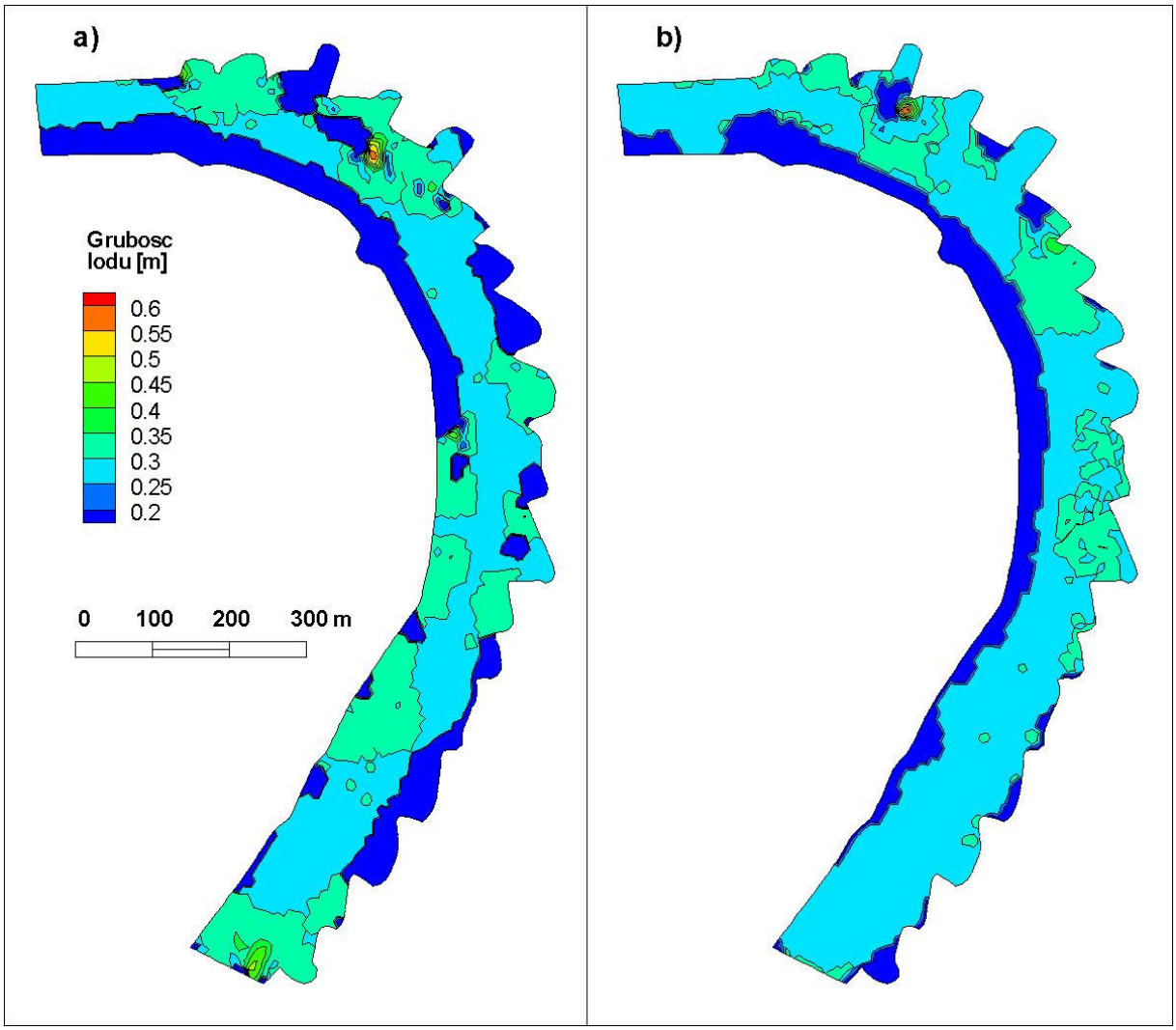
Rys. 2.11. Rozkład grubości lodu na Odrze powyżej Cigacic przy przepływie NSQ = 84 m^3/s (a) SNQ = 117 m^3/s (b)



Rys. 2.12. Rozkład prędkości przepływu lodu na Odrze powyżej Cigacic przy przepływie NSQ = 84 m^3/s (a) SNQ = 117 m^3/s (b)



Rys. 2.13. Rozkład prędkości pojedynczych cząstek lagranżowskich reprezentujących lód przy przepływie NSQ = 84 m^3/s (a) SNQ = 117 m^3/s (b)



Rys. 2.14. Rozkład grubości lodu na Odrze powyżej Cigacic przy przepływie SNQ = 117 m^3/s w warunkach wiatru o prędkości 10 m/s wiejącego ze wschodu (a) z zachodu (b)

A. Załącznik – opis podstawowych równań wykorzystanych w modelu matematycznym dynamiki lodu

W układzie dwuwymiarowym siły wewnętrzne w lodzie są zdefiniowane w sposób następujący:

$$\vec{R} = \vec{\imath} R_x + \vec{\jmath} R_y \,, \qquad \text{(A-1)}$$

$$R_x = \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx} N\eta) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{xy} N\eta) \,, \qquad \text{(A-2)}$$

$$R_y = \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{yx} N\eta) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{yy} N\eta) \,, \qquad \text{(A-3)}$$

gdzie, σ_{xx} i σ_{yy} są składowymi normalnymi naprężenia wewnętrznego w lodzie lub rumowisku lodowym, natomiast $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ są składowymi stycznymi tensora naprężeń wewnętrznych. Położenie tego punktu opisane jest w postaci wektora $\vec{r}$, który definiuje się następująco: $\vec{r}^2 = x^2 + y^2$. Wszystkie naprężenia są wyznaczane w punkcie, w którym rozpatrywana cząstka lodu się znajduje. Obliczenie naprężeń wewnętrznych bazuje na modelu konstytutywnym lepko-plastyczno-sprężystym, który uwzględnia wiąże naprężenia z odkształceniami zachodzącymi w lodzie pod wpływem

działających na niego sił zewnętrznych. Pozostałe zmienne występujące w równaniach (A-2) i (A-3) to koncentracja powierzchniowa lodu N oraz grubość lodu η.

Model lepko-plastyczno-sprężysty lodu został opracowany na podstawie modelu Hiblera. Zależność między naprężeniem, σ, a odkształceniem, ϵ , wyrażona została równaniem:

$$\sigma_{ij} = 2\eta_V \dot{\epsilon}_{ij} + (\zeta_V - \xi_V)\dot{\epsilon}_{ij}\delta_{ij} + 2\Lambda\epsilon_{ij} + (\Psi - \Lambda)\epsilon_{ij}\delta_{ij} - P\delta_{ij} \,, \qquad \text{(A-4)}$$

$$\zeta_V = \frac{P}{2\left\{\left(\dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy}\right)^2 + \left[\left(\dot{\epsilon}_{xx} - \dot{\epsilon}_{yy}\right)^2 + 4\dot{\epsilon}_{xy}{}^2\right]/4\right\}} \,, \qquad \text{(A-5)}$$

$$\xi_V = \frac{\zeta_V}{4} \qquad \text{(A-6)}$$

gdzie $\dot{\epsilon}_{ij}$ – pochodna przemieszczenia w danym kierunku, tj. $\dot{\epsilon}_{xx} = \partial u/\partial x$, $\dot{\epsilon}_{yy} = \partial v/\partial y$ oraz $\dot{\epsilon}_{xy} = 0{,}5(\partial v/\partial x + \partial u/\partial y)$. Ψ i Λ są modułami sprężystości objętościowej, które są powiązane z modułem Younga, E, i współczynnikiem Poissona, υ, w następujący sposób:

$$\Psi = \frac{E}{2(1-\upsilon)} \,, \qquad \text{(A-7)}$$

$$\Lambda = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \,. \qquad \text{(A-8)}$$

Człon związany z ciśnieniem przedstawia zależność:

$$P = \tan\left(\frac{\pi}{4} \pm \frac{\varphi}{2}\right)\left(1 + \frac{\rho_L}{\rho}\right)\frac{\rho_L g \eta}{2}\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{15} \,, \qquad \text{(A-9)}$$

Gdzie φ – kąt tarcia wewnętrznego przyjmowany dla lodu $\varphi = 46°$, N_{max} maksymalna koncentracja lodu. Znak $\pm$ odnosi sie do sytuacji, gdy dochodzi do ściskania (+) bądź ekspansji (-) lodu.

W sposób analogiczny do równań (A-2) i (A-3) można przedstawić pozostałe siły uwzględniane w równaniu (2-1) działajcie na pojedynczą cząstkę lodu:

$$\vec{F_a} = \vec{\imath}\left[\rho_a C_w \left|\vec{V_L} - \vec{W}\right| (u - W_x)N\right] + \vec{\jmath}\left[\rho_a C_w \left|\vec{V_L} - \vec{W}\right| (v - W_y)N\right] \qquad \text{(A-10)}$$

$$\vec{F_w} = \vec{\imath}\left[\rho \frac{{n_L}^2}{(\alpha_d d_w)^{1/2}}\left|\vec{V_L} - \vec{V_w}\right| (u - u_w)N\right] + \vec{\jmath}\left[\frac{{n_L}^2}{(\alpha_d d_w)^{1/2}}\left|\vec{V_L} - \vec{V_w}\right| (v - v_w)\, N\right] \qquad \text{(A-11)}$$

$$\vec{G} = -\vec{\imath} M_L g\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right) - \vec{\jmath} M_L g\left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right) \qquad \text{(A-12)}$$

W powyższych równaniach wykorzystano następujące zmienne: parametr C_w [-] jest współczynnikiem oddziaływania wiatru, C_w = 0,00155, ρ_a jest gęstością powietrza [kg·m^{-3}], $\vec{V_w} = u_w\vec{\imath} + v_w\vec{\jmath}$ [m·s^{-1}] jest prędkością wody, $\vec{V_L} = u\vec{\imath} + v\vec{\jmath}$ [m·s^{-1}] jest prędkością lodu na powierzchni wody, $\vec{W} = \vec{\imath}W_x + \vec{\jmath}W_y$ [m·s^{-1}] jest prędkością wiatru na wysokości 10 m ponad powierzchnią rzeki, n_L jest współczynnikiem szorstkości dolnej powierzchni lodu, d_w [m] jest głębokością wody pod pokrywa lodową, natomiast

α_d [-] jest parametrem mówiącym o proporcji powierzchni czynnej przekroju poprzecznego będącej pod wpływem oddziaływania lodu.

Dodatkowo, w celu zamknięcia układu równań dynamiki lodu w modelu rozwiązuje się równanie zachowania masy lodu, oraz równanie zachowania powierzchni lodu:

$$\frac{dM_L}{dt} + M_L \nabla \vec{V}_L = E_m \,, \qquad \text{(A-13)}$$

$$\frac{dN}{dt} + N \nabla \vec{V}_L = -R_a \,. \qquad \text{(A-14)}$$

W równaniu (A-13) E_m jest członem źródłowym związanym z wymianą masy lodu na powierzchni wody zachodzącej na skutek procesów termodynamicznych (zamarzanie i topnienie) oraz wymiany masy lodu w efekcie wypływania na powierzchnie lodu prądowego (na skutek działania siły wyporu), jak też porywania lodu w głąb wody na skutek silnej turbulencji. Człon źródłowy R_a jest wprowadzony w celu uwzględnienia zmiany koncentracji lodu na skutek oddziaływania mechanicznego. W przypadku kontaktu lodu z dnem rzeki tarcie uwzględnia się poprzez dynamiczny warunek brzegowy na dnie kanału:

$$\left|\vec{F}_G\right| = Ng(\rho_L \eta - \rho_w d_w) \tan \varphi_w \,, \qquad \text{(A-15)}$$

gdzie: $\varphi_w =$ kąt tarcia wewnętrznego pomiędzy lodem a dnem kanału [°]. W modelu siła związana z tarciem między lodem a dnem kanału jest zawsze skierowana przeciwnie do kierunku prędkości poruszającego się lodu.