

---

# BADANIE SYSTEMU DO REDUKCJI ZMIAN TEMPERATURY NAWIERZCHNI MOSTU (WIADUKTU) W CYKLACH SEZONOWYCH I DZIENNYCH PRZEZ AKUMULACJĘ ENERGII SŁONECZNEJ Z JEGO POWIERZCHNI W GRUNCIE. CZĘŚĆ I

---

Małgorzata Leszczyńska-Domańska  
Roman Domański

---

## STRESZCZENIE

Artykuł zawiera opis i wyniki prac badawczych, prowadzonych między innymi w ramach Projektu Badawczego nr N5120163/1761. Celem badań było znalezienie rozwiązania dla stosowania instalacji do podwyższania temperatury nawierzchni drogowych i mostowych w zimie i jej obniżania w lecie w warunkach Polski. Efektem końcowym prac są rozwiązania obejmujące instalację do redukcji zmian temperatury nawierzchni w cyklach długo- i krótkoterminowych, w tym usuwania śniegu i zmarzliny z powierzchni jezdnej mostów i wiaduktów, dostosowanej do polskich warunków klimatycznych.

W artykule omówiono konstrukcje mostowe. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznej dla mostu skrzynkowego, który posiada korzystną konstrukcję z punktu widzenia instalacji układu do odbioru ciepła oraz dobre własności wytrzymałościowe. Dokonano przeglądu istniejących instalacji na świecie. Przedstawiono wyniki analizy pracy wymiennika w nawierzchni przy zastosowaniu programu *Fluent*.

Podczas wykonywania obliczeń, dotyczących nawierzchni mostu i wymiennika rozważano złożoną wymianę ciepła. Obliczenia wykazały, iż zastosowany wymiennik ciepła przyczynia się do obniżenia latem temperatury nawierzchni SMA, w najbardziej nasłonecznionych godzinach, o 19°C dla skrajnych miejsc między rurkami wymiennika i o 23°C dla miejsc nad wymiennikiem.

Artykuł stanowi pierwszą część, gdyż druga część będzie opisywała magazyn gruntowy.

---

## Wprowadzenie

Powierzchnie jezdni na mostach lub wiaduktach są znacznie bardziej podatne na wychłodzenie i przegrzanie od jezdni posadowionych bezpośrednio na stałym podłożu. Taka sytuacja spowodowana jest znacznie większym obszarem wymiany ciepła z płyt mostów lub wiaduktów. O ile w przypadku dróg posadowionych bezpośrednio na stałym podłożu, w czasie sezonu zimowego, główny strumień ciepła wymieniany jest przez powierzchnię jezdni, o tyle w przypadku konstrukcji mostowych wymiana ciepła zachodzi zarówno przez

górną, jak i spodnią jej powierzchnię. Powoduje to znacznie częstsze oblodzenie nawierzchni konstrukcji nadziemnych, podczas gdy bezpośrednio sąsiadujące naziemne odcinki dróg pozostają suche, bez zalegającej zmarzliny.

Zalegająca warstwa śniegu lub lodu na jezdni stanowi bardzo duże niebezpieczeństwo dla użytkowników w ruchu lądowym. W przypadku wiaduktów i mostów, skutki ewentualnych kolizji mogą być spotęgowane przez skrajnie niekorzystne uwarunkowania terenowe. Jednakże, z punktu widzenia eksploatacji tych konstrukcji, częste stosowanie środków chemicznych, obniżających temperaturę krzepnięcia wody, może znacznie zredukować trwałość nawierzchni. Podobnego efektu spodziewać się należy podczas działania niekorzystnych czynników atmosferycznych, powodujących zamarzanie wody w mikrostrukturach powierzchni jezdnej.

Tak więc celowe wydaje się stosowanie instalacji do podwyższania temperatury nawierzchni w zimie i jej obniżania w lecie. Istotny jest wybór źródła ciepła dla instalacji grzewczej. Na podstawie analizy światowej literatury można stwierdzić, że proponowane i stosowane są bardzo różne rozwiązania wymienników w nawierzchni, a także źródeł energii. Dominują 2 typy rozwiązań samych wymienników ciepła:

- elektryczne, oporowe przewody grzejne,
- cieczowe instalacje grzejne.

Pierwsze rozwiązanie może dotyczyć stosunkowo niewielkich powierzchni i taniej energii elektrycznej. W drugim przypadku spotkać można różne rozwiązania uprzedniego podgrzania czynnika roboczego, począwszy od wykorzystania dowolnego paliwa w celu podgrzania czynnika roboczego w kotłowni, poprzez wykorzystanie gorących wód geotermalnych (np. Islandia) czy ciepła odpadowego, a skończywszy na użyciu pomp ciepła.

Celem prowadzonych prac (w tym prac w ramach projektu badawczego nr N5120163/1761 [Domański i inni 2009]) jest znalezienie, w warunkach Polski, optymalnego rozwiązania zaprezentowanego problemu. Efektem końcowym są rozwiązania obejmujące instalację do redukcji zmian temperatury nawierzchni w cyklach długo- i krótkoterminowych, w tym usuwania śniegu i zmarzliny z powierzchni jezdnej mostów i wiaduktów, dostosowanej do polskich warunków klimatycznych.

W założeniach przyjęto użycie odnawialnych źródeł energii, polegające na odbieraniu ciepła z płyty mostu przez czynnik roboczy i magazynowaniu go w gruncie w sezonie letnim, a następnie wykorzystaniu do celów podgrzewu jezdni zimą (dodatkowo mogą być wprowadzone pompy ciepła). Rozwiązanie to ma jeszcze jedną zaletę, chroni w sezonie letnim powierzchnię przed nadmiernym przegrzaniem, powodującym częściowe mięknięcie materiału jezdni, a tym samym jej deformację i niszczenie przez przejeżdżające samochody. Taki kierunek badań ma również na celu próbę wdrożenia w naszym kraju wytycznych Unii Europejskiej, dotyczących wykorzystania odnawialnych źródeł energii. W związku z ustanowieniem budżetu Unii Europejskiej do 2013 roku do Polski napłyną znaczne fundusze na rozwój infrastruktury drogowej. W planowanej sieci autostrad i dróg szybkiego ruchu nie zabraknie licznych mostów i wiaduktów. Jednak utrzymanie nawierzchni jezdnej tych odcinków dróg w odpowiednim stanie w sezonie zimowym oraz letnim (przy wysokim nasło-

necznieniu i obciążeniu mechanicznym) jest kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa, trwałości i ciągłości ruchu.

Jak już zaznaczono na świecie stosowane są różnego rodzaju instalacje podgrzewające płytę jezdnią, a tym samym roztopiające zalegającą warstwę śniegu lub zmarzliny oraz układy do zbierania energii z nawierzchni. W związku z intensywnym rozwojem infrastruktury drogowej w naszym kraju, nadszedł czas na podjęcie badań, mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa ruchu na przyszłych ciągach komunikacyjnych. Istotne są badania dotyczące obniżania temperatury nawierzchni w okresie letnim.

W większości istniejących instalacji ciepło do ogrzewania nawierzchni (w tym topnienia śniegu) jest pobierane z gruntowego magazynu ciepła z wykorzystaniem pompy ciepła (w celu podwyższenia temperatury pracy czynnika zasilającego wymiennik). Wadą takiego rozwiązania jest skończona możliwość regeneracji głębszych warstw gruntu jako źródła niskotemperaturowego ciepła. Energia pobierana do wymienników w nawierzchni jest ograniczona, bowiem magazyn gruntowy ma skończoną możliwość pobierania energii z gruntu, ze względu na parametry dotyczące transportu energii w głębszych warstwach (regeneracji). W wyniku działania instalacji głębsze partie gruntu mogą zostać wychłodzone do poziomu uniemożliwiającego jego dalsze wykorzystanie, nawet przy zastosowaniu pomp ciepła. Autorzy projektu proponują, by takiej sytuacji zapobiec, stosując regenerację układu energią promieniowania słonecznego – pobieraną w okresie letnim. W ciągu sezonu letniego przez tę samą instalację wymiennika ciepła przepływać może czynnik roboczy odbierający energię od nagrzaną przez promieniowanie słoneczne nawierzchni wiaduktu lub mostu. Podgrzany w ten sposób czynnik roboczy zatłaczany jest bezpośrednio (lub przy współpracy z pompami ciepła) do tej samej gruntowej instalacji (zasobnika), regenerując w ten sposób zasobność złoża. Wymiennik taki może być wspomagany przez dodatkowy układ kolektorów słonecznych, umieszczonych na powierzchniach bocznych mostu lub nad złożem magazynowym.

Pośrednim efektem działania opisanego systemu będzie zwiększenie żywotności eksploatowanej nawierzchni. Pracująca instalacja w sezonie letnim nie pozwoli na nadmierny lokalny wzrost temperatury jezdni, a tym samym na uplastycznienie się budulca. W sezonie zimowym nie dopuści do zamarzania wody w porowatej strukturze.

W artykule omówione zostaną pokrótce, funkcjonujące w świecie, podobne systemy. Przedstawione zostaną procesy ciepłno-przepływowe zachodzące w wymienniku i magazynie gruntowym (część II) i wybrane wyniki symulacji numerycznej dla wybranych geometrii, pokazujące możliwości magazynowania energii promieniowania słonecznego w polskich warunkach klimatycznych i jej wykorzystania do redukcji zmian temperatury nawierzchni.

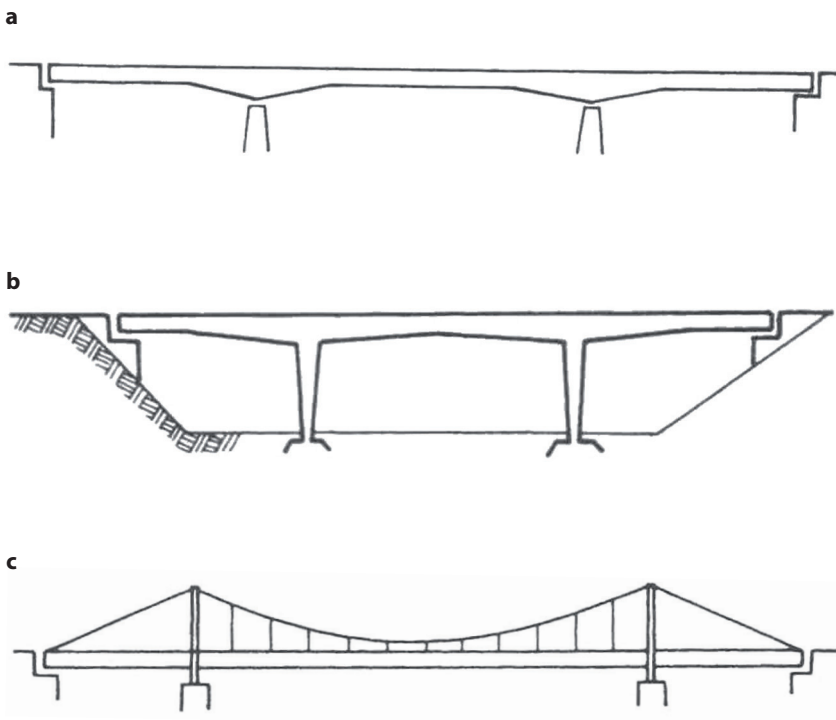
Wyniki pracy mają charakter poznawczy i będą jednocześnie podstawą do dalszych badań z nastawieniem na aplikacyjne rozwiązanie w rzeczywistym układzie.

Rozważany układ do magazynowania energii słonecznej składa się z wymienników ciepła umieszczonych pod nawierzchnią mostu, gruntowego magazynu energii i pomp tłoczących czynnik. W okresie letnim most pełni rolę odbiornika promieniowania słonecznego, następnie ciepło jest transportowane do magazynu gruntowego. Zimą kierunek przepływu jest odwrotny, magazyn oddaje energię w wymienniku gruntowym, która jest transportowa-

na do mostu i użyta do podgrzewania nawierzchni. Mamy tu więc do czynienia z dwoma trybami pracy: magazynowania energii promieniowania słonecznego, tak jak w „zwykłych” kolektorach i oddawania energii z magazynu do ogrzewania „kolektora” – nawierzchni mostu czy wiaduktu.

W pracy [Domański i inni 2009] przeprowadzono analizę istniejących instalacji, przedstawiono konstrukcje mostowe i dla trzech wybranych konstrukcji zaprezentowano odpowiednie wymienniki w nawierzchni. Dla wybranych konstrukcji mostu i wymiennika przeprowadzono symulację złożonych procesów ciepłno-przepływowch, ustalono ilości energii możliwej do uzyskania dla wybranych dni w roku oraz dobrano do tych ilości energii odpowiedni wymiennik i cały magazyn gruntowy. Symulacje prowadzono dla różnych warunków odbioru energii promieniowania słonecznego, różnych rodzajów i geometrii magazynu gruntowego. W części I artykułu zaprezentowane zostaną wyniki symulacji numerycznej pracy wymiennika w nawierzchni. W części II omówione będą procesy akumulacji energii i współpracy układu źródło–magazyn.

**Rys. 1.1. Formy mostów betonowych**



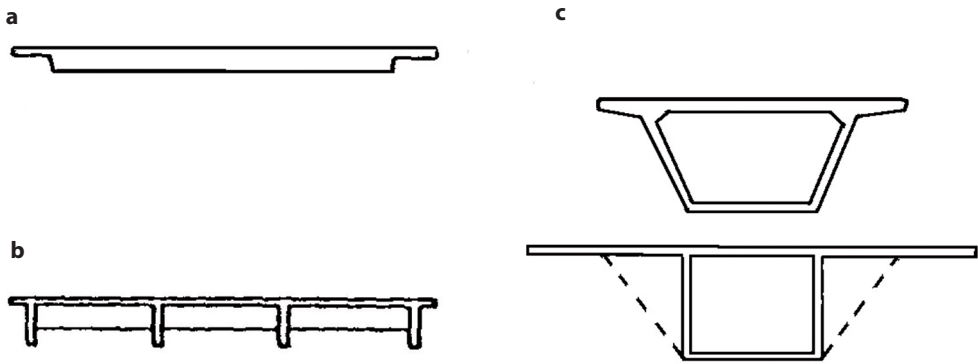
## Wybór i omówienie konstrukcji mostowych

Najczęściej spotykanymi obecnie rodzajami konstrukcji są konstrukcje betonowe, stalowe i stalowo-betonowe. Most metalowy lub przeszło mostowe składa się z jezdni, w skład której wchodzi pomost służący do przejazdu obciążenia ruchomego, z dźwigarów głównych, na których opiera się jezdnia oraz ze stężeń łączących dźwigary główne.

Mosty betonowe mają obecnie głównie konstrukcję belkową (*Rys. 1.1a*), ramową (*Rys. 1.1b*) lub wiszącą (*Rys. 1.1c*). Na warunki działania instalacji ma wpływ przede wszystkim przekrój poprzeczny pomostu.

Pomosty mają różne przekroje poprzeczne [Madaj, Wołowicki 2002, PN-85/S-10030, PN-91/S-10042], przy czym podstawowymi formami konstrukcji są: płyta (*Rys. 1.2a*), ustrój dźwigarowy (*Rys. 1.2b*) i skrzynkowy (*Rys. 1.2c*). Ustrój płytowy jest najprostszy i posiada wiele zalet, takich jak: łatwość budowy, proste deskowania, dużą sztywność na skręcanie i zginanie, a także stałą sztywność płyty, co korzystnie wpływa na trwałość nawierzchni. W ustroju dźwigarowym część betonu jest wycięta z płyty, tworząc jakby kasetony. Budowa takiego przeszła wymaga znacznie bardziej skomplikowanych deskowań, jednak oszczędność betonu i zmniejszenie ciężaru konstrukcji są znaczne.

**Rys. 1.2. Formy przekrojów poprzecznych mostów**



Źródło: [Olszewski 2006]

Taki most posiada też pewne wady, przede wszystkim małą sztywność poprzeczną. Jest to szczególnie niekorzystne przy mostach o dużej szerokości. Przy zwiększającej się rozpiętości w większym stopniu trzeba zwiększyć sztywność (wysokość ustrojową) niż nośność. Dlatego w mostach długich zmniejsza się liczbę dźwigarów do dwóch, a nawet jednego.

W celu wyeliminowania podłużnic, które są trudne do wykonania, pogrubia się płytę pomostową i dźwigary. Kolejną modyfikacją konstrukcyjną jest dodanie drugiej płyty. Otrzymujemy w ten sposób konstrukcje skrzynkową (*Rys. 1.2c*). Ponieważ skrzynka jest przekrojem zamkniętym, ma znacznie większą wytrzymałość na zginanie i skręcanie. Możliwe są ustroje jedno- lub wieloskrzynkowe. Szerokość podpór ogranicza się do szerokości skrzynki. W bardzo szerokich mostach konstrukcja może być wzmocniona zastrzałami podpierającymi pomost. Możliwe są także kombinacje podstawowych ustrojów, np. mosty dwu- lub wielodźwigarowe, które w obrębie podpór pośrednich posiadają przekroje skrzynkowe lub płytowe.

Beton posiada wyraźne cechy anizotropowe. Charakteryzuje się ok. 10 razy większą wytrzymałością na ściskanie niż na rozciąganie. Dlatego w celu wzmocnienia strefy rozciągania stosuje się zbrojenie prętami stalowymi. Jednak stal i beton mają różną odkształcalność, co powoduje zarysowania. Korzystniej byłoby, gdyby warunki pracy betonu „przesunąć” w strefę ściskania. Osiąga się to, stosując sprężanie. Idea sprężania polega na wzbudzeniu naprężeń ściskających w tych częściach przekroju betonowego, w których na skutek obciążeń powstaną naprężenia rozciągające.

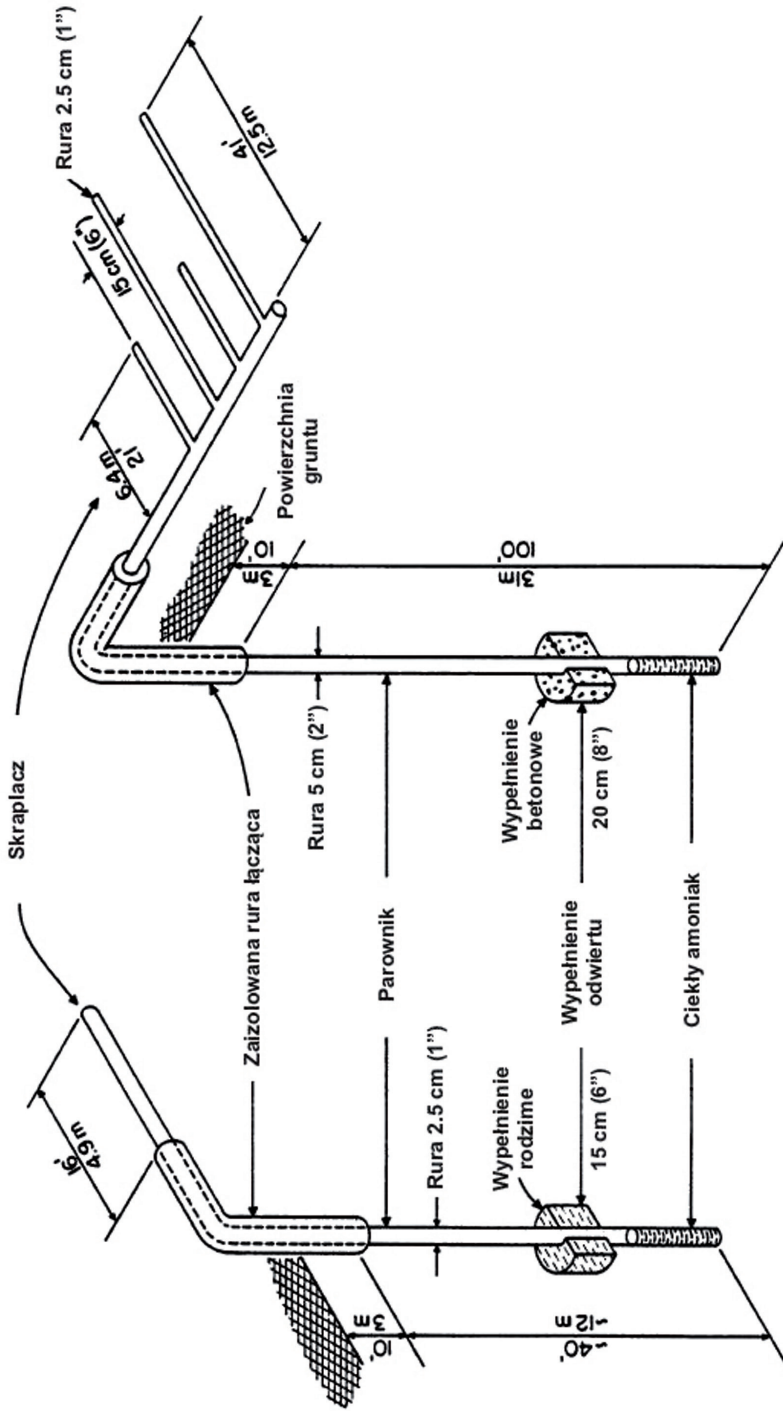
Przedmiotem szczególnej analizy były trzy różne konstrukcje mostowe. Wykonano obliczenia dla nowoczesnego mostu płytowego – Mostu Świętokrzyskiego [Domański i inni 2009] oraz szereg obliczeń dla mostu przez rzekę Odrę w Opolu [Owczarek 2008; Domański i inni 2009]. Ustrój nośny to konstrukcja skrzynkowa o zmiennej wysokości, wykonana w technologii mieszanej z zastosowaniem kabli sprężających, przebiegających wewnątrz przekroju betonu. Całkowita długość mostu wynosi 385 m. Wysokość mostu zmienia się od 5,8 m do 2,35 m.

W artykule przedstawiono wyniki dla jednego mostu skrzynkowego, który posiada korzystną konstrukcję z punktu widzenia instalacji układu do odbioru ciepła oraz dobre własności wytrzymałościowe. W ramach badań prowadzono także szczegółowe rozważania dotyczące wytapiania śniegu [Owczarek, Domański 2008; Domański i inni 2009].

### **Przegląd isniejących instalacji**

Na całym świecie funkcjonuje wiele różnych instalacji, służących do roztopiania śniegu zalegającego na jezdniach. Do bardzo oryginalnych rozwiązań należą instalacje wybudowane w Sybille Canyon (1976 rok) oraz w Spring Creek Bridge (1980 rok) w stanie Wyoming [Lund]. Zasada działania obydwu z nich jest podobna (*Rys. 2.1*). W pionowym gruntowym wymienniku ciepła (parowniku) odparowuje czynnik roboczy (amoniak), odbierając ciepło z otaczającego gruntu. Odparowany amoniak wskutek konwekcji swobodnej przepływa do górnej części instalacji (skraplacza), będącej jednocześnie wymiennikiem ciepła w nawierzchni jezdni. Stopień nachylenia osi rur skraplacza wynosi 2%, co umożliwia swobodny odpływ kondensatu. W rzeczywistości przy takim nachyleniu wymienników powstawały korki ciekłego kondensatu i stopień nachylenia musiano zwiększyć do 5%. Dodatkowo wewnętrzna powierzchnia skraplacza została spiralnie nagwintowana, tak aby powracający kondensat zwilżał ścianki w celu intensyfikacji procesu wymiany

Rys. 2.1.1. Schemat instalacji grzewczych w Sybill Canyon i Spring Creek, WY





ciepła. Przy średniej temperaturze gruntu 8°C pracująca instalacja zapewniła podniesienie temperatury nawierzchni jezdni o 3°C.

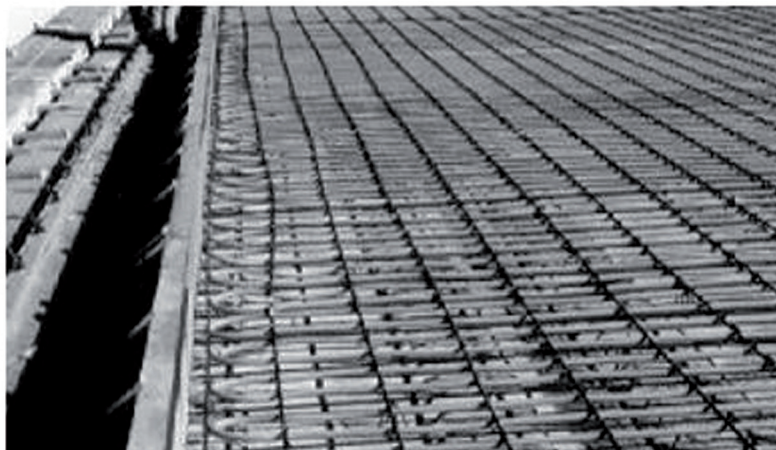
Zrealizowanym projektem jest też instalacja w wiaduktach autostrady US 287 w Amarillo, TX w USA, przerzuconym nad North 15th Avenue (FHWA-RD-99-158, 1999). Instalacja została zaprojektowana w celu niedopuszczenia do powstawania warstwy lodu na powierzchni jezdnej. Wydajność instalacji oszacowana na 129 W/m<sup>2</sup> nie pozwala jednak na bieżące roztopianie padającego śniegu. Również zasięg instalacji ograniczony został tylko do jednego pasa na każdym z dwupasmowych wiaduktów (w kierunku północnym i południowym).

Most o konstrukcji skrzynkowej (box beam construction) ma 17,7 m szerokości i 44,5 m długości. Ogrzewana powierzchnia wynosi 900 m<sup>2</sup> na każdym z wiaduktów. Czynnik roboczy, wykorzystany w opisywanej instalacji, jest pięćdziesięcioprocentowym roztworem glikolu propylenowego i dejonizowanej wody.

Objętość całej instalacji, obejmującej wymienniki ciepła w jezdniach, system podziemnego magazynu energii wraz z orurowaniem łączącym, wynosi 11 300 l, z czego ok. 2650 l to pojemność wymienników ciepła w płytach wiaduktów. Charakterystyczne jest umiejscowienie rur – kolektorów zasilających instalacje rozmrażające. W tym projekcie wszystkie połączenia umiejscowione zostały na zewnątrz konstrukcji.

Każdy wiadukt podzielony został na 32 strefy, w których pomiędzy kolektorami – zasilającym i powrotnym ułożone zostały rurowe wymienniki ciepła o średnicy wewnętrznej 3/4". Rurki grzewcze w płycie wiaduktów rozmieszczone zostały w odległości 152 mm od siebie, a następnie zatopione w jezdnej warstwie betonu o grubości 76 mm (Rys. 2.2).

**Rys. 2.2. Sposób rozmieszczenia wymienników ciepła w jezdni autostrady US 287 (FHWA-RD-99-158, 1999)**





**Rys. 2.3. Most w Weatherford, z lewej instalacja rozmrażania w trakcie budowy, z prawej efekt działania instalacji**



Źródło: [Bose, Smith, Spitler 2002, Spitler, Ramamoorthy 2000, Spitler]

Podobne rozwiązanie wykorzystano w projekcie na międzystanowej autostradzie, znajdującej się na wschód od Weatherford w Oklahomie, w Stanach Zjednoczonych (Rys. 2.3) [Bose, Smith, Spitler 2002; Spitler, Ramamoorthy 2000; Spitler]. Projekt polegał na określeniu minimalnej temperatury wlotowej czynnika roboczego, ilości i konfiguracji pomp ciepła, a także rozmiaru gruntowego wymiennika ciepła. Ostatecznie zaprojektowano układ składający się z 16 pomp ciepła, 250 otworów w ziemi o długości 76,00 m każdy.

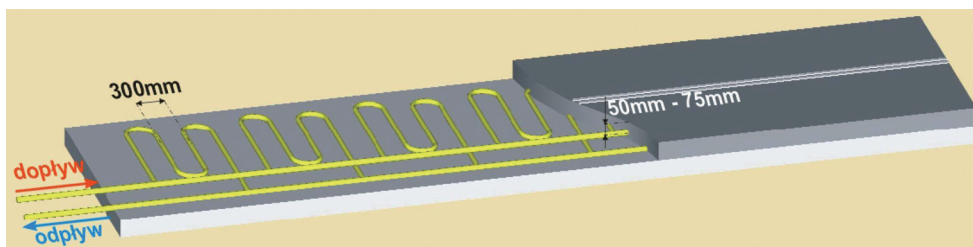
Analiza numeryczna wykonana została przy pomocy dwóch programów: *TRANSYS* i *HVACSim+*. Każdy element układu (płyta mostu, pompy ciepła, gruntowy magazyn ciepła i pompy cyrkulacyjne) rozważany był jako oddzielny element z określonymi warunkami pracy, a następnie wszystkie wyniki połączone zostały w jedną część. Roztopianie zamrożonej powierzchni mostu realizowane jest przez specjalnie skonfigurowany system rur (Rys. 2.3). 16 pomp ciepła, współpracujących z instalacją wewnątrz nawierzchni mostu, połączonych zostało zależnie od realizowanego cyklu. W trakcie procesu ładowania magazynu pompy ciepła połączone zostały szeregowo w 8 par. W trakcie procesu rozmrażania nawierzchni mostu pompy ciepła połączone zostały równolegle.

Z problemem usuwania zalegającej warstwy śniegu zmierzili się również Szwajcarzy ([www.polydynamics.ch](http://www.polydynamics.ch)) [Serso]. Celem projektu **SERSON** (Sonennenergie Ruckgewinnung aus Strassenoberflächen) było:

- odbieranie ciepła z asfaltu, kiedy jego temperatura osiągnęła 60°C,
- magazynowanie odebranego ciepła w podziemnym magazynie,
- wykorzystanie zmagazynowanego ciepła w czasie zimy w celu zapobiegania powstawaniu lodu.

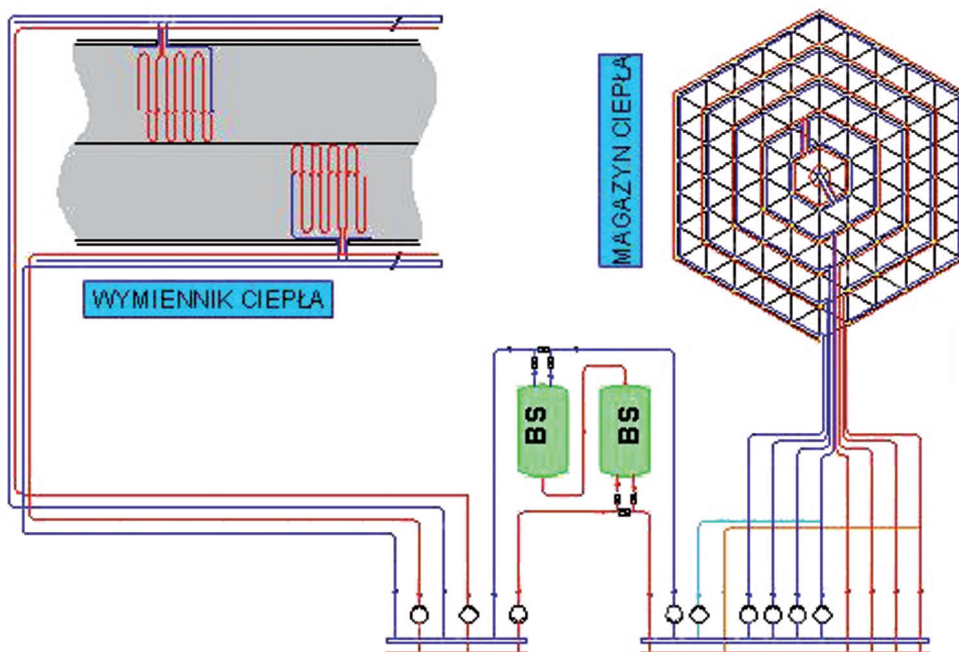
Wykorzystanie pomp ciepła lub innych dodatkowych urządzeń pośredniczących nie było konieczne. Schemat ideowy przedsięwzięcia został pokazany na Rys. 2.5.

Rys. 2.4. Schemat instalacji wewnątrz nawierzchni mostu



Źródło: [Bose, Smith, Spitler 2002, Spitler, Ramamoorthy 2000]

Rys. 2.5. Schemat ideowy instalacji SERSO



Źródło: [www.polydynamics.ch, SERSO]

W spodniej warstwie asfaltu umieszczony został poziomy wymiennik ciepła, na który składa się 160 stalowych rur, z których każda ma 34 metry długości. Uzyskana w ten sposób ogrzewana powierzchnia płyty mostu wynosi 1300 m<sup>2</sup> (Rys. 2.4). Podziemny magazyn ciepła został umieszczony w bezpośrednim sąsiedztwie mostu. Składa się na niego bateria gruntuowych wymienników ciepła typu U-rura. Wymienniki ciepła połączone zostały z układem rur rozmieszczonych w płycie mostu w jeden system hydrauliczny, wraz z armaturą przyłączeniową oraz układem pomp i zaworów (Rys. 2.5).

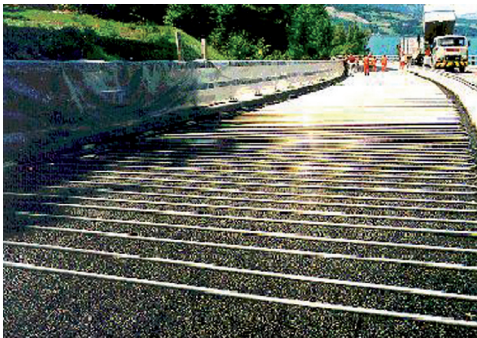
Układ wymienników ciepła w płycie mostu i efekt pracy instalacji przedstawia Rys. 2.6.

System został zaprogramowany, tak aby pracował w dwóch trybach:

- Tryb letni – powierzchnia jezdni absorbuje promieniowanie słoneczne. Czynnik roboczy, krążący w rurkach umieszczonych w płycie mostu, nagrzewa się, jednocześnie odprowadzając ciepło do gruntuowego magazynu ciepła.
- Tryb zimowy – czynnik roboczy, cyrkulujący wewnątrz instalacji, pobiera ciepło z podziemnego magazynu i oddaje je w wymienniku ciepła, umieszczonym w materiale jezdni, aby zapobiec możliwości pojawienia się warstwy zmarzliny (Rys. 2.6). Instalacja zaczyna przechodzić w stan pracy, kiedy temperatura zewnętrzna znajduje się w przedziale  $-8^{\circ}\text{C} \div +4^{\circ}\text{C}$ .

W ciągu pierwszego roku pracy system adoptował się do otaczających warunków. Był to też czas nabywania doświadczeń związanych z obsługą i sterowaniem systemem. Dopiero w trakcie trzeciego i czwartego roku możliwe było podjęcie stosownych kroków w celu optymalizacji pracującego układu.

**Rys. 2.6. Układ wymienników ciepła w płycie mostu (zdjęcie wykonane w trakcie budowy oraz efekt pracującej instalacji roztapiania śniegu i lodu)**



Rys. 2.7. Widok połączonych gruntowych wymienników ciepła



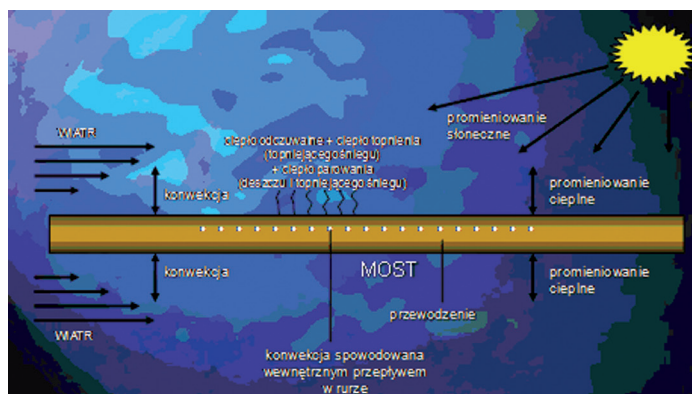
Źródło: [www.polydynamics.ch, SERSO]

### Analiza pracy wymiennika w nawierzchni

Dla każdej konstrukcji model ogólny procesów wymiany ciepła z samej nawierzchni do otoczenia i wymiennika jest podobny. Schematycznie procesy wymiennika ciepła pokazano na Rys. 3.1.

Dla poprawnego zaprojektowania wymiennika ciepła w nawierzchni mostowej należy przeprowadzić szereg analiz dotyczących jego geometrii, strat ciśnienia i, oczywiście, procesów wymiany ciepła – płyta, wymiennik, otoczenie.

Rys. 3.1. Schemat procesów wymiany ciepła na powierzchni mostu





**Rys. 3.2. Most skrzynkowy**

Do analizy różnych geometrii, wynikających z projektów wymiennika, zastosowano różne narzędzia – programy własne oraz programy profesjonalne [Leszczyńska-Domańska i inni 2008; Domański i inni 2009]. Najpełniejsze obliczenia przeprowadzono dla mostu skrzynkowego przy wykorzystaniu programu *Fluent*. W programie tym jest do dyspozycji moduł dotyczący symulacji procesów wymiany energii na drodze promieniowania i konwekcji między powierzchniami, z uwzględnieniem promieniowania słonecznego (*Solar Model*). Model ten zawiera użyteczny kalkulator słoneczny, który może zostać użyty do określenia położenia słońca na niebie za pomocą podania pory dnia (godziny i minuty), konkretnego dnia danego miesiąca oraz położenia geograficznego rozpatrywanego modelu. Podając pozycję GPS i nachylenie płaszczyzny oraz jej właściwości radiacyjne, można więc symulować dla różnych warunków pogodowych procesy pochłaniania promieniowania słonecznego. Model stosowany dla warunków *Fair Weather Conditions*. Szczegółowy opis *Solar Load Model* w programie *Fluent* i jego testy przedstawiono w opracowaniu [Domański i inni 2009].

Jako element do rozważań wybrano dwumetrowy, powtarzający się element 3D – segment mostu skrzynkowego. Cały most, którego konstrukcję rozważano, składa się z 45 takich segmentów. Powierzchnia rozważanego segmentu wynosi 29,2 m<sup>2</sup>. Fotografie elementu mostu skrzynkowego przedstawiono na Rys. 3.2.

Segmentowa budowa układu wymienników pozwala na łatwy montaż i ewentualne odcięcie segmentu od kolektorów zbiorczych w przypadku awarii.

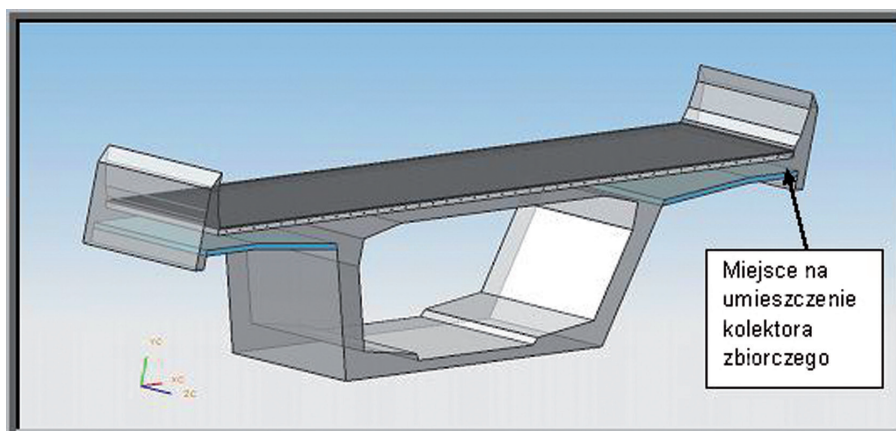
Podstawowe dane dotyczące geometrii rozważanego mostu:

- szerokość mostu: 15 400 mm,
- szerokość nawierzchni mostu: 14 600 mm,
- grubość warstwy betonu asfaltowego: 106,5 mm,
- grubość warstwy SMA (nawierzchnia drogi): 30 mm,

- powierzchnia warstwy SMA: 29,2 m<sup>2</sup>,
- odległość między rurami wymiennika: 350 mm,
- średnica zewnętrzna rur wymiennika: 30 mm,
- średnica wewnętrzna rur wymiennika: 26 mm,
- głębokość osadzenia wymienników: 35 mm poniżej powierzchni betonu asfaltowego od wierzchu rury, 50 mm od środka, 80 mm od powierzchni SMA do środka rury,
- długość rozpatrywanego odcinka mostu: 2000 mm,
- pojemność instalacji chłodniczo-grzewczej: 0,082698 m<sup>3</sup>,
- grubość izolacji termicznej powierzchni poza obszarem skrzynki mostu: 100 mm.

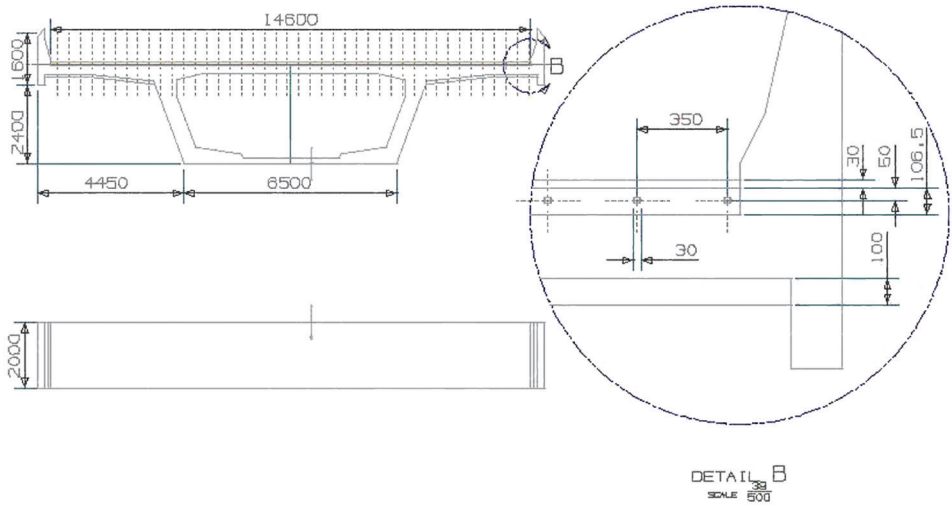
Kształt modelowanego segmentu mostu przedstawiono na Rys. 3.3, a jego wymiary na Rys. 3.4. Schemat wymiennika przyjętego do rozważań przedstawiono na Rys. 3.5.

**Rys. 3.3. Modelowany segment mostu**

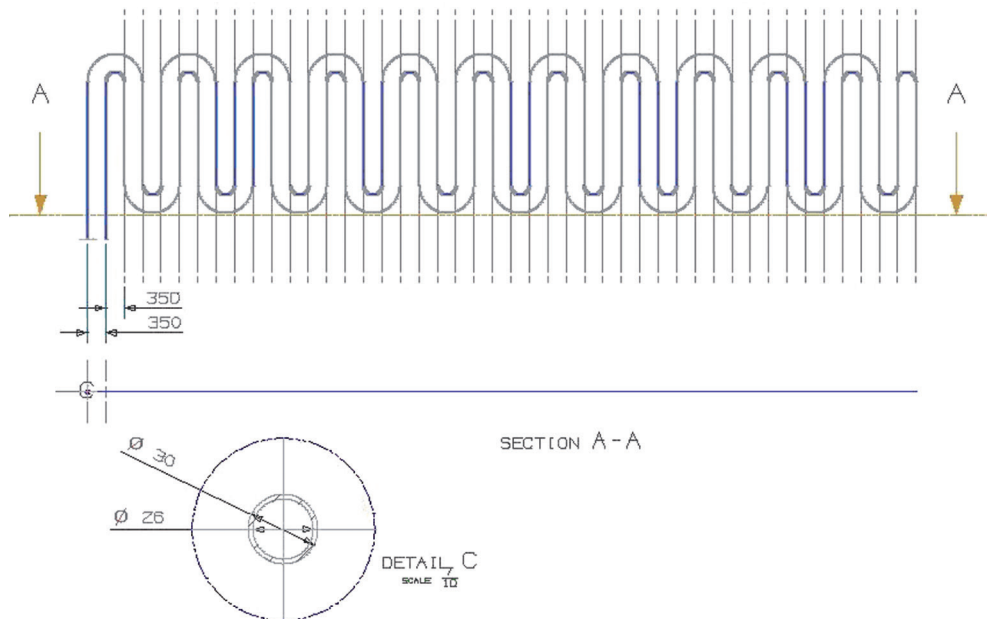


W czasie projektowania takiego wymiennika przyjęto koncepcję, że musi on być zbudowany z jednej rury i zapewniać równomierność rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym mostu. Ze względu na fakt, iż ma on szerokość 2 m uzyskano także powtarzalność rozkładu temperatury wzdłuż mostu. Przy tak założonej konstrukcji wymiennika łatwo wykonać wyprowadzenia do kolektorów zbiorczych, które mogą być umieszczone po jednej stronie mostu, podwieszane pod konstrukcją boczną. Takie rozwiązanie zapewnia łatwość montażu i usuwania awarii. Mogą one być zamontowane w warstwie styropianu lub być preizolowane. Osie rur wymiennika (po analizie istniejących konstrukcji) o średnicy zewnętrznej 30 mm, wewnętrznej 26 mm, umieszczono na głębokości 80 mm od powierzchni. Jako czynnik roboczy przyjęto mieszaninę glikolu z wodą. Pojemność całej instalacji dla tej geometrii wymiennika podstawowego wynosi ok. 3 m<sup>3</sup>.

Rys. 3.4. Schemat segmentu mostu



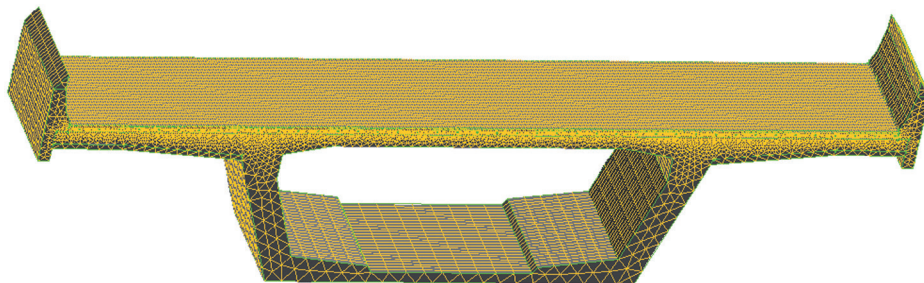
Rys. 3.5. Schemat wymiennika chłodząco-grzewczego





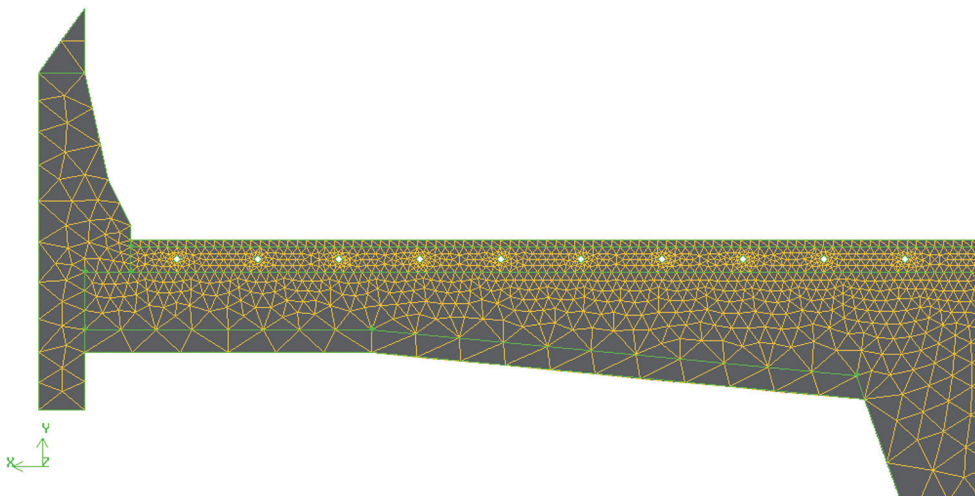
Jako narzędzie obliczeniowe wykorzystano program *Fluent* w wersji 6.2 i wersji 6.3. Przeprowadzono analizę problemu i wybrano odpowiednią dla poszczególnych obszarów siatkę. Siatkę 3D przekroju mostu i jej zbliżenie 2D przedstawiono na *Rys. 3.6* i *3.7*.

**Rys. 3.6. Siatka 3D segmentu modelowanego mostu**



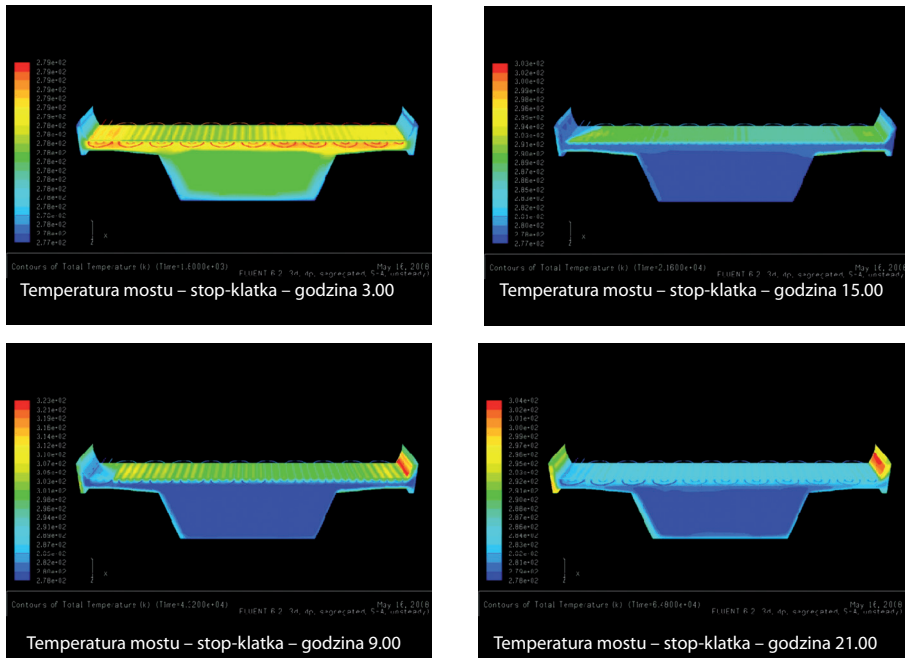
W celu obliczeń pełnej wymiany ciepła z otoczeniem wykonano także siatkę dla powietrza atmosferycznego wokół mostu i wykonano odpowiednie obliczenia [Leszczyńska-Domańska i inni 2008].

**Rys. 3.7. Siatka 2D przekroju modelowanego mostu (zbliżenie)**



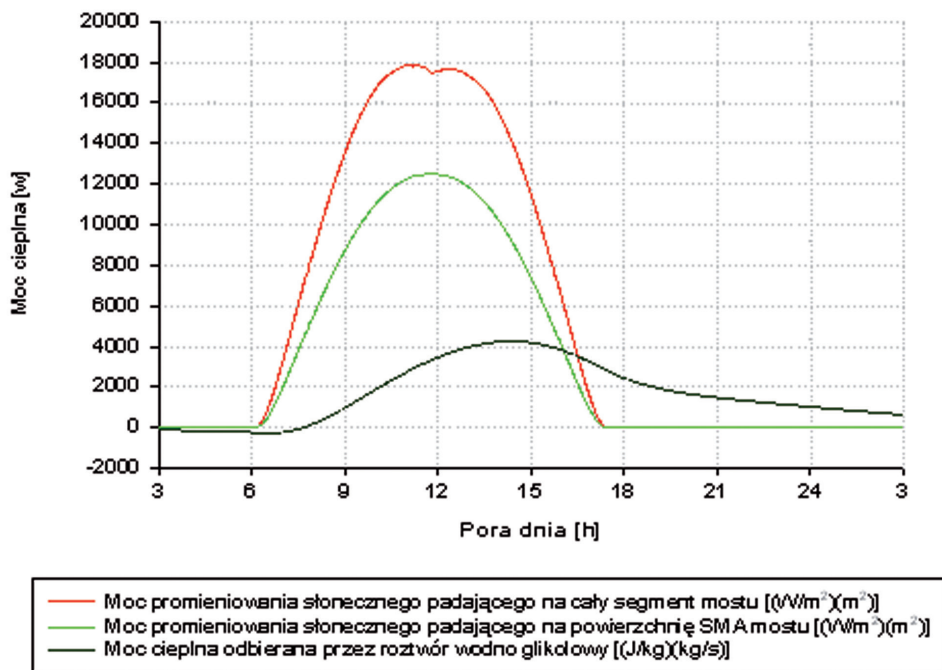
Podczas wykonywania obliczeń, dotyczących nawierzchni mostu i wymiennika, rozważano złożoną wymianę ciepła; wprowadzano lub wyznaczano następujące dane: natężenie promieniowania słonecznego docierającego do każdej z powierzchni, temperaturę wylotową roztworu wodno-glikolowego oraz różnicę energii roztworu na wlocie i wylocie z wymiennika. Dane były zapisywane z częstotliwością 1 kroku czasowego, przy czym krok ów wynosił 10 sekund. Całkując zebrane dane, otrzymano poszukiwane wartości dostarczonej i odebranej energii. Przepływ masy roztworu wodno-glikolowego był stały i wynosił 0,2609 kg/s. Prędkość przepływu czynnika wynosi 0,4 m/s. Badania symulacyjne prowadzono dla różnych prędkości wiatru, od 1,8 do 5 m/s. Prezentowane wyniki obejmują okres 24 godzin między godz. 3.00 15 marca a godz. 3.00 16 marca. Warunki pogodowe określano na bazie danych ze stacji meteorologicznych dla Warszawy i jak już powiedziano, warunki nasłonecznienia z *Solar Model* z *Fluenta*. Szczegółowe dane meteo – temperatury i prędkości wiatru opisano w pracy [Domański i inni 2009]. Na podstawie danych zebranych ze stacji opracowane zostały własne, modelowe rozkłady temperatur oraz prędkości wiatru. Biorąc pod uwagę doświadczenia z działania innych instalacji, przyjęto, że temperatura czynnika powracająca z magazynu energii waha się w granicach od 279K do 287K. W związku z tym temperatura wejściowa czynnika chłodząco-grzewczego dla poszczególnych dni została przyjęta następująco: marzec –279K, czerwiec –280K, wrzesień –285K, grudzień –285K. W dalszych symulacjach rozważano zmienne temperatury dolutowe, wynikające ze współpracy z magazynem.

Rys. 3.8. Pola temperatury (stop-klatki dla marca)



Na Rys. 3.9 przedstawiono odpowiedni bilans energii dla okresu od 15 do 16 marca, uzyskany z całkowania pól temperatury.

Rys. 3.9. Bilans energii dla okresu 15-16 marca



Jeśli przyjąć, iż całkowita powierzchnia mostu wynosiłaby  $1314 \text{ m}^2$ , to składałaby się zatem z 45 segmentów, a ilość odebranej energii w ciągu sezonu letniego wyniosłaby  $897\,491,5423 \text{ kWh}$  ( $897,5 \text{ MWh}$ ).

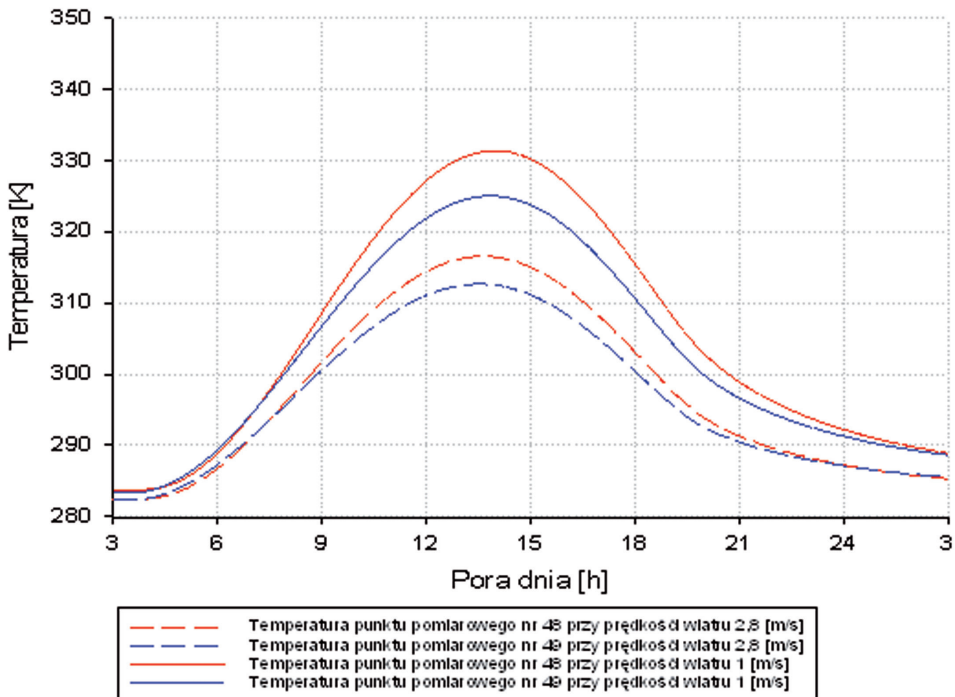
Podobną analizę można przeprowadzić dla okresu zimowego. W tym przypadku należałoby z kolei wprowadzić współczynnik określający czas pracy instalacji. Gdyby instalacja pracowała nieprzerwanie w okresie między październikiem a lutym, dostarczona ilość energii do całego mostu o powierzchni  $1314 \text{ m}^2$  wyniosłaby  $211\,568,0575 \text{ kWh}$  ( $211,5 \text{ MWh}$ ) – dla danych warunków modelowania. Jeżeli weźmie się pod uwagę fakt, że energia latem gromadzona jest w zasobniku gruntowym i jej część jest tracona (w pierwszym roku może to być nawet połowa wartości, zależy to od rodzaju wymiennika, a także cyklu grzania w kolejnych latach), to przedstawiony bilans wykazuje, iż energia odebrana w okresie letnim aż

w nadto wystarczający sposób jest w stanie zaspokoić potrzeby geotermalnego grzania dróg zimą. Może ona również dobrze być wykorzystywana do innych celów, np. do ogrzewania budynków z zastosowaniem pomp ciepła.

### Podsumowanie

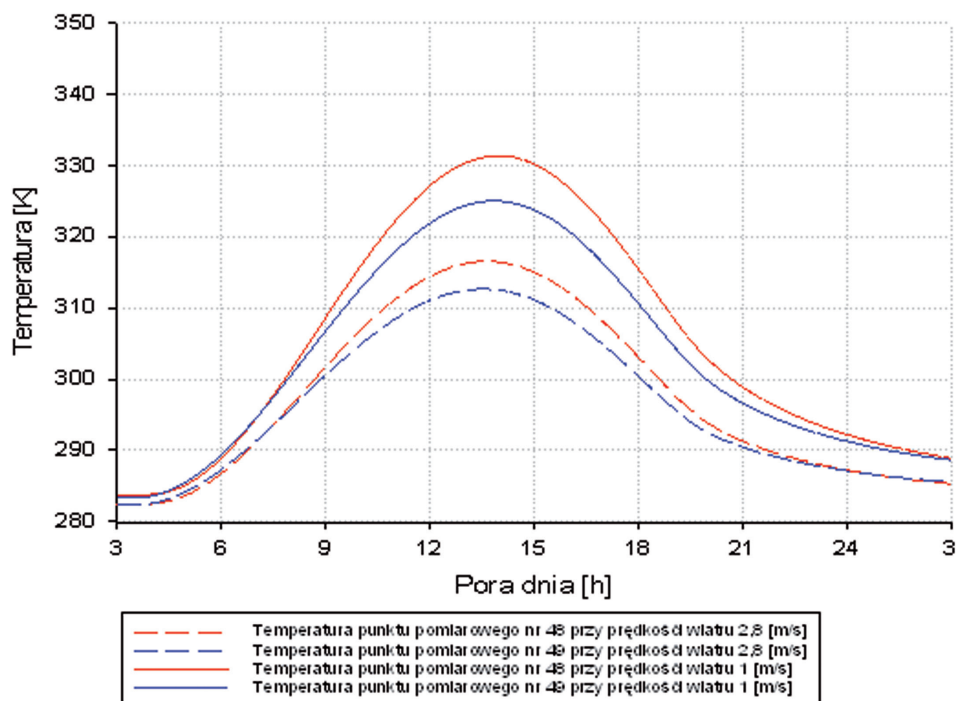
Obliczenia wykazały, iż zastosowany wymiennik ciepła przyczynia się do obniżenia latem temperatury nawierzchni SMA, w najbardziej nasłonecznionych godzinach, o 19°C dla skrajnych miejsc między rurkami wymiennika i o 23°C dla miejsc nad wymiennikiem (Rys. 4.1). Uwzględniając fakt, iż maksymalna temperatura latem bez chłodzenia osiągnęła wartości 335K (to znaczy 58°C), wielkości te znacząco poprawiają odporność na odkształcenia warstw bitumicznych nawierzchni.

**Rys. 4.1. Rozkład temperatury powierzchni SMA w dwóch wybranych punktach pomiarowych 48 i 49 [Domański i inni 2009] w funkcji pory dnia i prędkości wiatru dla okresu 21-22 czerwca**



Uzyskane wyniki rozkładu temperatury w nawierzchni mostu wykazują, że w tym czasie temperatura zmienia się wzdłuż nawierzchni z amplitudą do 15°C. Pamiętając, iż maksymalna jej wartość poprzez chłodzenie została już znacząco obniżona, to wymiennik zapewnia równomierne chłodzenie nawierzchni, przyczyniając się do sprawniejszego odbioru energii oraz zapewnienia nawierzchni chłodzenia, zapobiegającego miejscowym przegrzaniom. Rozważając działanie instalacji zimą, należy stwierdzić, że przy zadanych wartościach temperatury zewnętrznej minimalna, zarejestrowana temperatura nawierzchni wyniosła nieco ponad 1°C powyżej zera (dla danych warunków symulacji). Dodatkowo wykres zmienności temperatury warstwy SMA na głębokości 2,5 cm wykazuje, iż w tym czasie najniższa temperatura na tej głębokości wyniosła 2°C powyżej zera, co – należy oczekiwać – zapobiegłoby oblodzeniu. Wykazują to również animacje przebiegu całego procesu [Domański i inni 2009]. W modelu założono temperaturę powietrza -5°C, zatem trzeba stwierdzić, że przy obniżeniu temperatury powietrza poniżej -5°C działanie instalacji celem likwidowania oblodzenia lub odśnieżania nie byłoby wystarczające. Należałoby zagęścić rurki wymiennika podczas projektowania instalacji lub zastosować element wspomagający, jakim jest pompa ciepła, pozwalająca uzyskać wyższą temperaturę czynnika grzewczego.

Rys. 4.2. Zestawienie bilansów energii dla wszystkich prowadzonych symulacji



Na kolejnym *Rys. 4.2* przedstawiono wyniki podsumowujące wszystkie prowadzone symulacje dla mostu skrzynkowego, dla różnych dni w roku, z uwzględnieniem ilości energii odbieranej lub dostarczonej. Aby dokładniej ocenić funkcjonowanie instalacji, należy rozważyć także inne geometrie samego wymiennika i, oczywiście, uwzględnić parametry pracy gruntowego akumulatora energii.

Przedstawione wyniki potwierdzają przydatność programu *Fluent* do rozważań złożonych procesów transportu energii. Obecnie wieloprocesorowe komputery pozwalają na uzyskiwanie symulacji dla bardzo złożonych geometrycznie, a także fizycznie, układów. W pracy [Domański i inni 2009] przedstawiono pełne wyniki symulacji numerycznej układu wymiennik ciepła w nawierzchni – magazyn gruntowy, których część będzie przedstawiona w II części artykułu.

Prowadzone badania w pełni potwierdziły możliwości zastosowania takich instalacji w polskich warunkach klimatycznych.

#### Literatura:

Domański i inni 2009, Domański R., Leszczyńska-Domańska M., Kuta J., Fołtyń M., Olszewski P, *Badanie systemu do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu (wiaduktu) w cyklach sezonowych i dziennych przez akumulację energii słonecznej z jego powierzchni w gruncie*, Projekt Badawczy nr N5120163/1761, Warszawa, styczeń.

Domański R., 2000, *Magazynowanie energii cieplnej*, PWN, Warszawa.

Bose J. E., M. D. Smith, Spitler J. D., 2002, *Advances in Ground Source Heat Pump Systems – An International Overview*, (w:) *Proceedings of the Seventh International Energy Agency Heat Pump Conference*, 1:313-324, Beijing, May 19-22.

Leszczyńska-Domańska i inni 2008, Leszczyńska-Domańska M., Domański R, Fołtyń M., *Numerical simulation of the processes of receipt of solar energy from the surface of the bridge In order to stabilize the temperature In short – and long – term cycles*, (w:) *SOLPOL 2008, International Conference Renewable Energy Innovative Technologies and New Ideas*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Owczarek M., Domański R., 2008, *Snow melting on road pavement using solar energy*, (w:) *SOLPOL 2008, International Conference Renewable Energy Innovative Technologies and New Ideas*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Madaj A., Wołowicki W., 2002, *Mosty betonowe, wymiarowanie i konstruowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

*Most przez Odrę w ciągu obwodnicy północnej miasta Opola*, Opole, 1997-1999 (na prawach rękopisu).

Rakowski G., Kacprzyk Z., 1993, *MES w Mechanice Konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

PN-85/S-10030, *Konstrukcje mostowe, obciążenia.*

PN-91/S-10042, *Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.*

Olszewski P., 2006, *Analiza pracy długoterminowego, gruntowego magazynu energii z regeneracją sezonową*, rozprawa doktorska, WPW, Warszawa.

Owczarek M., 2008, *Pole temperatury i bilanse ciepła konstrukcji mostowej w procesach absorpcji, magazynowania i odzysku energii promieniowania słonecznego*, niepublikowana rozprawa doktorska, WPW, Warszawa.

Lund J. W., *Pavement Snow Melting Geo-Heat Center*, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, USA.

Spitler J. D., Ramamoorthy M., 2000, *Bridge Deck Deicing using Geothermal Heat Pumps*, (w:) *Proceedings of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference*, Aylmer, Québec. August 17-18.

Spitler J. D., *Oklahoma State University geothermal smart bridge*, Available: <http://www.smart-bridge.okstate.edu>

*SERSO – Solar energy recovery from road surfaces*, [www.polydynamics.ch](http://www.polydynamics.ch)

---

#### ABSTRACT

The aim of this paper is to present a methodology of the design of road surface temperature controlling installation (temperature increasing in winter, decreasing in summer) for polish climatic conditions. (N5120163/1761 Research project). The result is a concept of temperature changes decrease installation in long and short term cycles including plowing and the icing reduction from the road surface.

This paper presents bridge construction review and numerical simulation for box bridge which has the best construction for heat extraction and good strength properties.

Analyzes of heat exchanger work computer simulations in the "Fluent" program are also present.

Advance heat transfer phenomena were taken into account during the simulation of the road surface and heat exchanger different working conditions. The results show temperature reduction of road surface material SMA by 19°C in the most irradiated parts between the pipe lines and 23°C over the heat exchanger.

The paper is a first part of research. The second part will describe the results of investigation of ground energy storage.

---

---

**dr inż. Małgorzata Leszczyńska-Domańska**, profesor Wyższej Szkoły Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, dziekan Wydziału Informatyki w Wyższej Szkole Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, adiunkt na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej

**prof. dr hab. inż. Roman Domański**, profesor zwyczajny na Wydziale Mechaniki Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, profesor zw. w Wyższej Szkole Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, Przewodniczący Rady Naukowej Instytutu Lotnictwa