

Tunele zatapiane

Tunel zatapiany jest szczególnym rodzajem tunelu podwodnego. Po zbudowaniu, funkcjonalnie niczym nie różni się od innych tuneli. Jednakże sposób jego budowy jest zupełnie inny. Niniejszy artykuł wyjaśnia niektóre zagadnienia związane z budową tuneli zatapianych.

Technologia wykonania tunelu zatapianego polega na zatapianiu gotowych segmentów tunelu w przewidzianym miejscu jego przebiegu. Segment tunelu jest budowany w suchym doku. Następnie jego końce uszczelnia się tymczasowo poprzez montaż przegród i zostaje on przetransportowany – spławiany na miejsce zatapiania. Tam opuszczany jest do rowu, wcześniej wykopanego w dnie rzeki. Elementy tunelu zatapia się kolejno tak, że zatapiany element dostawia się do wcześniej umiejscowionego. Rów wypełnia się następnie materiałem sypowym przykrywając tunel. Dojazdy do tunelu wykonuje się wcześniej lub w trakcie budowy części zatapianej tunelu.

Główne różnice między tunelem zatapianym a drażonym

Tunele zatapiane stanowią alternatywę dla tuneli drażonych przy porównywalnej cenie wykonania. Główną zaletą tuneli zatapianych jest to, że nie muszą one mieć przekroju okrągłego. Można projektować praktycznie dowolny kształt przekroju, co czyni tunele zatapiane atrakcyjnym rozwiązaniem dla autostrad.

Tunele zatapiane umieszcza się bezpośrednio pod dnem drogi wodnej, podczas gdy tunel drażony jest stabilny, jeśli jest zagłębiony w gruncie przynajmniej na głębokość równą swojej własnej średnicy. W rezultacie tunele zatapiane są krótsze, mają krótsze dojazdy i mniejsze spadki, co powoduje, że są korzystniejsze dla dróg samochodowych i kolejowych. Daje im to również przewagę nad mostami. W przypadku rzek intensywnie wykorzystywanych do transportu należy zapewnić odpowiedni prześwit między rzeką i mostem, co wydłuża znacznie dojazdy lub wymusza ich komplikacje (budowa ślimaków itp.). Dodatkową przewagę tunelom zatapianym nad drażonymi daje mała ilość połączeń, co ma swoje znaczenie dla wodoszczelności tunelu i ilości ewentualnych przecieków. Jednak wykonanie tunelu zatapianego ma też swoje wady – podczas operacji zatapiania wszelki ruch na drodze wodnej musi zostać wstrzymany.

Główne rodzaje tuneli zatapianych

Występują dwa podstawowe rodzaje tuneli zatapianych: o budowie stalowej i żelbetowej.

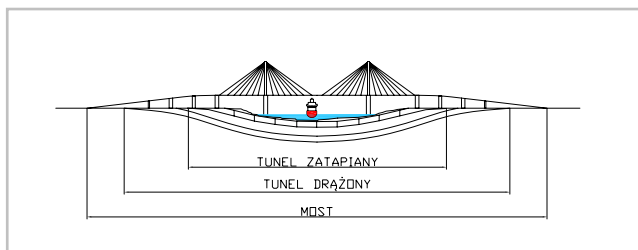
W przypadku tuneli stalowych elementy są budowane z jednej lub kilku połączonych w układ tub, zazwyczaj o okrągłym przekroju.

W przypadku tuneli żelbetowych główna konstrukcja jest najczęściej prostokątna w przekroju, podzielona na kilka oddzielnych komór.

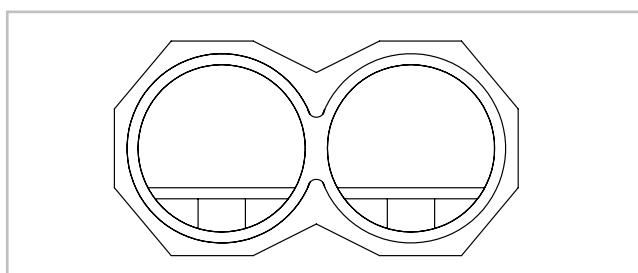
Procedura spławiania i zatapiania segmentów jest podobna dla tuneli stalowych i żelbetowych.

Budowa tunelu zatapianego

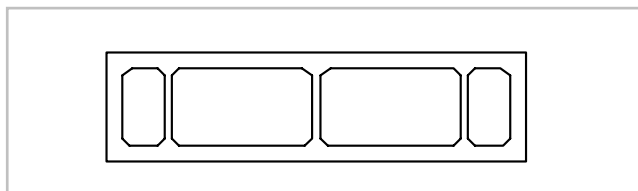
Elementy tunelu o długości od 90 do 125 m wykonuje się w suchym doku, najczęściej w pobliżu brzegu rzeki, pozostawiając pomiędzy dokiem a rzeką groblę. Zaletą takiej prefabrykacji konstrukcji tunelu na brzegu, przy dziennym świetle jest budowa w kontrolowanych warunkach. Kiedy element jest ukończony,



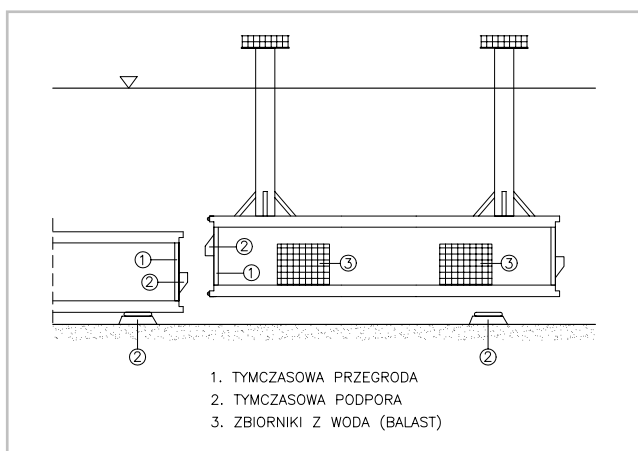
Rys. 1. Zalety tunelu zatapianego



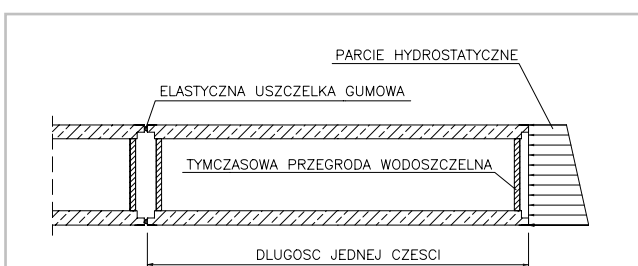
Rys. 2. Przykładowy przekrój poprzeczny tunelu stalowego



Rys. 3. Przykładowy przekrój poprzeczny tunelu żelbetowego



Rys. 4. Opuszczanie elementu tunelu



Rys. 5. Działanie parcia wody podczas łączenia elementów

oba końce zamyka się tymczasowymi przegrodami stalowymi, po to, aby element był szczelny i unosił się na wodzie. Następnie groblę pomiędzy dokiem, a drogą wodną przerywa się, aby dok wypełnił się wodą i element zaczął się unosić. Element zostaje odholowany barkami na miejsce zatapiania.

Przed operacją holowania elementu, w dnie rzeki zostaje wykopany rów przy pomocy maszyn pogłębiających. Urobek jest ładowany na barki i wywożony. Rów musi być odpowiednio przygotowany, jego brzożki powinny mieć nachylenie uniemożliwiające osuwanie się gruntu. Proces zatapiania należy przeprowadzać możliwie szybko po wykonaniu rowu, aby nie nagromadził się w nim osad rzeczny.

Element opuszcza się w miejscu zatapiania. Wewnętrzne zbiorniki balastowe służą do kontrolowania pływalności i zatopienia elementu poprzez napełnienie ich wodą. Pozycjonowanie elementu jest zapewnione przez system nawigacji satelitarnej GPS. Wieże nawigacyjne zbudowane na elementach odbierają sygnał GPS z satelitów oraz, w celu zapewnienia większej dokładności, ze stacji naziemnych o dokładnie znanych współrzędnych.

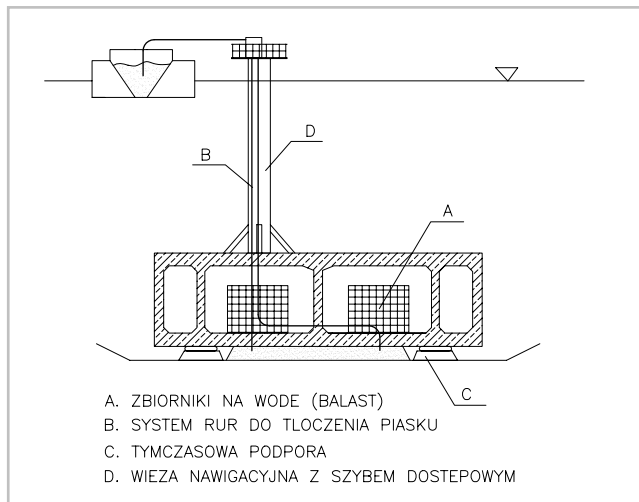
Element opuszczany do rowu umieszcza się na tymczasowych podporach. Tymczasowe podpory to z jednej strony stopy fundamentowe z zamontowanymi podnośnikami hydraulicznymi, które dają możliwość regulacji wysokości i uzyskania właściwej pozycji. Z drugiej strony element jest opierany na wspornikach segmentu wcześniej zatopionego.

Podparcie to jest tylko tymczasowe i służy do osiągnięcia właściwej pozycji. Kiedy kontakt między dwoma elementami zostaje osiągnięty, nowo zatopiony element jest dociągany siłownikami hydraulicznymi. Po złączeniu dwóch elementów wypompowuje się wodę z komory powstałej między tymczasowymi przegrodami obu elementów. Parcie wody powoduje skompresowanie elementów ze sobą, dociśnięcie uszczelki i uzyskanie szczelnego połączenia.

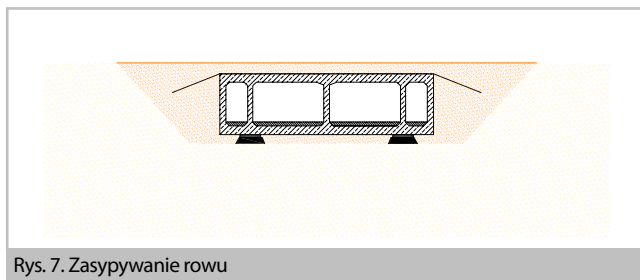
Znajdujące się na segmencie tunelu wieże nawigacyjne posiadają szyby umożliwiające dostęp do środka oraz do komór pomiędzy przegrodami dwóch złączonych segmentów.

W następnym etapie budowy, pomiędzy podstawę tunelu, a dno rowu, poprzez otwory w dnie segmentu tunelu, zostaje wstrzyknięta warstwa piasku. Piasek jest dostarczany z barki poprzez system rur biegnących w szybie wieży nawigacyjnej. Stopień zagęszczenia piasku można skontrolować po bokach tunelu. W ten sposób tunel uzyskuje sprężyste podparcie na całej powierzchni dna.

Kolejnym krokiem jest obudowanie połączeń płytami stalowymi dla dodatkowego zapewnienia wodoszczelności. Ostateczne połączenie między elementami wykonuje się poprzez ułożenie w złączu prętów zbrojeniowych zapewniających ciągłość konstrukcji i zalanie złącza betonem. Wtedy pozostaje jedynie usunąć tymczasowe stalowe przegrody pomiędzy elementami i wykonać warstwę betonu balastowego, usuwając tymczasowe zbiorniki z wodą.



Rys. 6. Wstrzykiwanie piasku pod element tunelu



Rys. 7. Zасыpywanie rowu

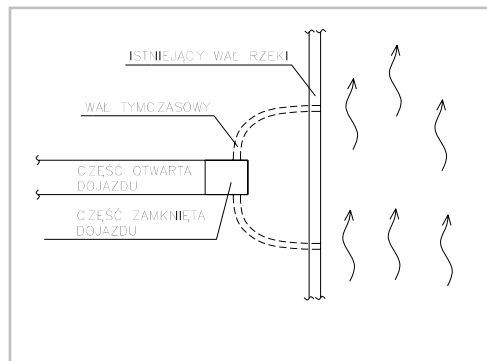
Następnie rów w dnie rzeki zasypuje się. Przed zasypaniem układa się na tunelu rodzaj membrany, która stanowi dodatkową ochronę dla górnej powierzchni tunelu.

Oprócz części zatapianej tunelu wykonuje się część lądową w wykopach na brzegach rzeki. Część lądowa stanowi dojazdy do zatopionego tunelu i w zależności od ukształtowania terenu na brzegach rzeki może mieć przekrój zamknięty, bądź rynnowy. Ta część tunelu jest wykonywana metodą odkrywkową. Należy dążyć do projektowania jak najkrótszych części tunelu o przekroju zamkniętym ze względów na koszty budowy oraz zapewnienie bezpieczeństwa.

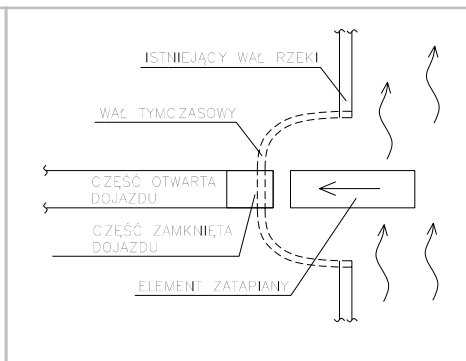
Jednym ze sposobów połączenia części zatapianej z dojazdem jest zamknięcie przegrodą części lądowej i wykonanie drugiego wału ochronnego ze ścianek szczelnych za istniejącym wałem ochronnym rzeki, w głąb lądu. Pierwotnie istniejący wał rozkopuje się, przygotowuje się rów dla elementu zatapianego, który połączy część podwodną z częścią lądową.

Projektowanie tunelu zatapianego

Przy projektowaniu przekroju elementu tunelu żelbetowego podstawowym kryterium w doborze grubości ścian jest zapewnienie pływalności elementu tunelu. W obliczeniach należy



Rys. 8. Dołączanie części podwodnej do dojazdu



Rys. 9. Lokalizacja tunelu Liefkenshoek (Hydonamic)



Fot. 1. Splawianie elementu na miejsce zatapiania – tunel Liefkenshoek (Hydronamic)



Fot. 2. Zatapianie elementu dołączanego do części lądowej – tunel Liefkenshoek (Hydronamic)



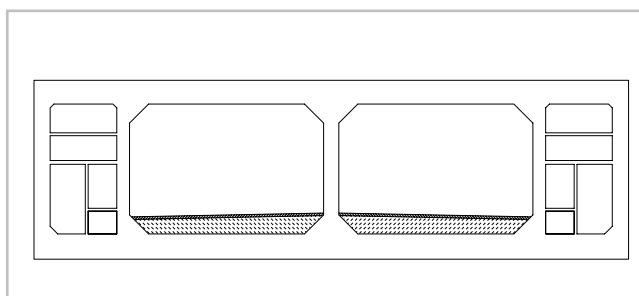
Fot. 3. Tunel Kennedy w Antwerpii – widok z lotu ptaka (Besix)

wziąć pod uwagę dwie fazy budowy tunelu: fazę splawiania elementu i fazę końcową, kiedy element musi leżeć stabilnie na dnie. W fazie splawiania element wystaje ponad powierzchnię wody zazwyczaj kilka do kilkunastu cm. Jeśli wysokość elementu wynosi około 8 m, znaczy to, że ciężar elementu jest mniejszy od wyporu wody o około 1 %.

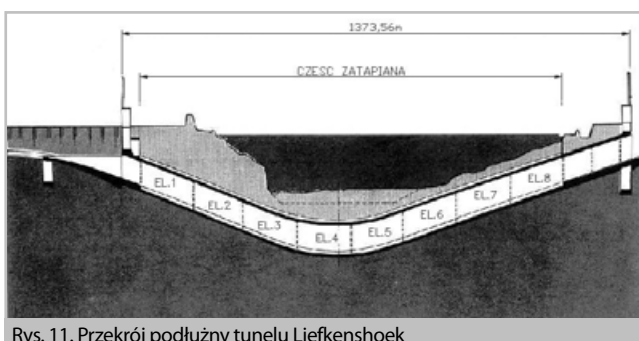
Gdy element jest nad miejscem, w którym ma być posadowiony, zatapia się go, przy użyciu tymczasowego balastu – zbiorników z wodą. Tymczasowy balast jest później zastąpiony warstwą betonu niezbrojonego, który wylewa się wewnątrz elementu. Element musi wtedy uzyskać ciężar dostatecznie przewyższający wypór wody, aby uzyskać odpowiednią stabilność. By spełnić ten wymóg przyjmuje się, że w końcowej fazie ciężar tunelu powinien przewyższać wypór wody o 7,5 %. Należy zatem przewidzieć odpowiednią grubość warstwy betonu balastowego. Margines bezpieczeństwa później jeszcze wzrośnie, ponieważ rów, w którym spoczywa tunel zostanie z powrotem zasypany, jednakże zależnie od procesu erozji dna rzeki, ten czynnik może z czasem zaniknąć.

Wodoszczelność

Wodoszczelność jest jednym z podstawowych celów projektu każdego tunelu zatapianego.



Rys. 10. Przekrój poprzeczny tunelu Liefkenshoek



Rys. 11. Przekrój podłużny tunelu Liefkenshoek

Tunele o konstrukcji stalowej są wodoszczelne z racji jakości wielu spawów na powłoce wykonywanych na placu budowy, z racji połączeń, ewentualnie połączeń elastycznych.

Wodoszczelność tuneli żelbetowych zależy od jakości połączeń, zabezpieczenia wodoodpornego oraz od nieobecności rys o pełnej głębokości. Tunele żelbetowe o przekroju skrzynkowym mają zawsze strefy w płytach górnej i dolnej narażone na rozciąganie. Dlatego element tunelu projektuje się tak, aby powstałe rysy mogły wnikać w ograniczonym stopniu, pozostawiając warstwę betonu w strefie ściskanej wystarczająco grubą dla uniknięcia przecieku. Z kolei podczas budowania elementu, rysy pojawiają się w ścianach pionowych. Przyczyną ich powstawania jest skurcz betonu oraz duża ilość wydzielanego przez dojrzewający beton ciepła hydratacji (zarówno płyty dolna i górna jak i ściany elementu mają znaczną grubość – ok. 1 m).

Aby zapobiec przeciekaniu wody do tunelu przez przekrój betonowy, stosuje się membrany oraz zapobiega się tworzeniu się rys podczas budowy elementu.

Membrany stosuje się na zewnętrznych powierzchniach tunelu zatapianego. Aby membrana dobrze spełniała swoje zadanie, musi być niezawodna: musi być odporna na działanie środowiska wodnego, musi wytrzymać zewnętrzne obciążenia mechaniczne (parcie wody i piasku) oraz musi być elastyczna, aby pokryć rysy, które mogą się pojawić. Czasami musi też dodatkowo zabezpieczać beton konstrukcyjny przed działaniem agresywnych środków chemicznych. Membrana powinna przylegać całą powierzchnią do tunelu, aby wyeliminować możliwość wnikania wody pomiędzy tunel i membranę w przypadku jej przebicia. Występuje wiele odmian membran: stalowe, bitumiczne, poli-merowe, płynne do pokrywania tunelu.

Podczas dojrzewania betonu w ścianach temperatura wzrasta z powodu hydratacji cementu. Kiedy ściany się ochładzają, kurczą się. Kurczenie to jest ograniczone przez wykonaną wcześniej płytę dolną, co powoduje naprężenia rozciągające w ścianach. Gdy ich wartość przekroczy wytrzymałość betonu, pojawiają się rysy.

Aby zapobiec niekontrolowanemu rozwojowi rys, stosuje się podziały ścian na odcinki o długości ok. 20 m, tworząc w ten sposób miejsca wystąpienia dozwolonych rys. Dla zapewnienia wodoszczelności takiej przerwy, w przekroju umieszcza się taśmę gumową, która dzięki swojej elastyczności uszczelnia rozwijającą się szczelinę, tworząc w ten sposób tzw. połączenie ekspansywne. Dodatkowo na powierzchni zewnętrznej elementu w miejscu takiej przerwy należy zastosować elastyczną uszczelkę.

Aby uniknąć ekstremalnego wzrostu temperatury, który powoduje powstawanie rys, należy stosować cement o niskim ciepłe hydratacji, np. wielkopieczowy. Ponadto stosuje się chłodzi-

nie ścian i płyty stropowej poprzez pompowanie zimnej wody przez system zabetonowanych metalowych rur. Koszt takiego chłodzenia jest niski, a chłodzenie dodatkowo skraca czas wiązania betonu. Chłodzenie można stosować jednocześnie z połączeniami ekspansywnymi.

Przykład tunelu zatapianego: tunel Kennedy w Antwerpii

Tunel Kennedy to tunel zatapiany pod rzeką Skaldą stanowiący część południowej obwodnicy Antwerpii. Tunel ten został ukończony w 1969 roku. Całkowita jego długość wynosi 690 m. Część zatapianą stanowi 5 elementów żelbetowych, każdy ponad 100 m długości. Wymiary zewnętrzne elementów: szerokość 47,85 m, wysokość 10 m. Przekrój poprzeczny zawiera 2 komory drogowe, 1 komorę kolejową, 1 komorę przeznaczoną dla pieszych i 1 komorę techniczną.

Przykład tunelu zatapianego: tunel Liefkenshoek

Tunel Liefkenshoek to tunel zatapiany pod rzeką Skaldą, położony na północ od Antwerpii.

Całkowita długość tunelu wynosi 1373,5 m, podczas gdy długość części zatapianej wynosi 1136 m. Przekrój tunelu składa się z dwóch 2 – pasmowych jezdni oraz dwóch komór technicznych przeznaczonych na wentylację i wyposażenie techniczne. Całkowita szerokość wynosi 31,25 m, a wysokość 9,60 m. Przekrój podłużny tunelu składa się z konstrukcji portalu z budynkiem obsługi na lewym brzegu, ośmiu zatapianych elementów długości 142 m każdy oraz, na prawym brzegu, z konstrukcji portalu wraz z budynkiem obsługi i 180 m odcinka tunelu, wykonanego metodą odkrywkową. Dok, w którym zastały wykonane elementy tunelu, wykopano na lewym brzegu rzeki.

Po ukończeniu elementów dok zalano i otwarto na rzekę poprzez przerwanie wału. Elementy zatapiano obciążając je przez wypełnianie zbiorników balastowych wodą. Zatopione umieszczono na tymczasowych podporach składających się ze wsporników od strony łączenia z uprzednio zatopionym elementem i hydraulicznych podstaw z drugiej strony, zbudowanych na wcześniej przygotowanych stopach fundamentowych. Przestrzeń między dnem rowu, a powierzchnią dolną tunelu została wypełniona piaskiem. Podstawy hydrauliczne zostały opuszczone i tunel osiadł na warstwie piasku.

Posadowienie elementu zrealizowano w ciągu 72 godzin po zatopieniu, aby zminimalizować ryzyko zamulenia warstwy wprowadzanego pod element piasku. ●

Artykuł stanowi fragment części teoretycznej pracy magisterskiej autora.

LITERATURA

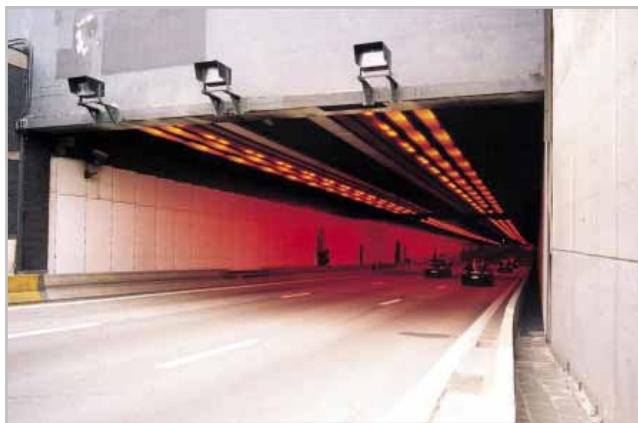
- [1] Karol Szechy: The Art Of Tunneling, Akademiai Kiado, Budapest 1973
- [2] Motorway Tunnels Built By The Immersed Tube Method, Government Publishing Office - The Hague 1976
- [3] Immersed tunnel techniques, Thomas Telford, London
- [4] Tunnels & Tunneling International June 1998, September 1998, January 1999, June 1999, January 2000
- [5] Tunnelling and Underground Space Technology. Elsevier Science Ltd. Vol.12 No.1 1997, Vol.12 No.2 1997

autor

mgr inż. Artur Dziadynak



Fot. 4. Tunel Kennedy w Antwerpii – wjazd do tunelu – strona południowa



Fot. 5. Tunel Kennedy w Antwerpii – wewnątrz tunelu



Fot. 6. Tunel Kennedy w Antwerpii – strona północna – widok z samochodu



Fot. 7. Gotowe elementy tunelu Liefkenshoek (Hydronamic)