

SERIA WYDAWNICZA: BIBLIOTEKA POMOCY NAUKOWYCH  
SERIA: MONOGRAFIE

WYŻSZA SZKOŁA GOSPODARKI KRAJOWEJ  
W KUTNIE

**Adam Moskwa**

**GEODEZYJNE OPRACOWANIE  
PROJEKTU ODCINKA TRASY  
DROGI POWIATOWEJ**

**PRACA DYPLOMOWA**

KUTNO 2016

Praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem prof. zw. dr. hab. Stefana Przewłockiego

Adam Moskwa

GEODEZYJNE OPRACOWANIE PROJEKTU ODCINKA TRASY DROGI POWIATOWEJ

**Recenzja wydawnicza:** Prof. dr hab. Fiodor Zabłocki, Politechnika Lwowska

**Redaktor:** Zbigniew Białobłocki

**Korekta:** Aneta Moszczyńska

Kutno 2016 Wydanie I

**ISBN 978-83-63484-24-8**

**Skład i projekt okładki:** Łukasz Różyński

**Druk i oprawa**

**MCP** Mazowieckie Centrum Poligrafii

ul. Słoneczna 3C, 05-270 Marki

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie, przedrukowywanie i rozpowszechnianie całości lub fragmentów publikacji bez zgody wydawcy zabronione. © 2016 Wyższa Szkoła Gospodarki Krajowej w Kutnie

# Spis treści

<b>Przedmowa</b> .....	5
<b>1. Wstęp – cel pracy</b> .....	7
<b>2. Podstawy teoretyczne dotyczące geometrii trasy</b> .....	9
2.1 Rodzaje i opis krzywych, wykorzystanych w projekcie .....	10
<b>3. Przykład praktyczny, projektowanie przebiegu trasy</b> .....	15
3.1 Projektowanie przebiegu trasy w poziomie .....	16
3.1.1 Warunki techniczne, założenia projektowe .....	16
3.1.2 Projektowanie łuku kołowego .....	17
3.1.3 Projektowanie krzywych przejściowych .....	18
3.1.4 Projektowanie krzywej esowej .....	29
3.1.5 Projektowanie krawędzi zewnętrznych trasy oraz uzyskanie poszerzenia jezdni na łuku .....	35
3.1.6 Przykładowe szkice tyczenia trasy .....	47
3.2 Projektowanie trasy w przekroju podłużnym .....	50
3.2.1 Założenia projektowe dla niwelety .....	50
3.2.2 Opracowanie parametrów niwelety .....	51
3.3 Projektowanie trasy w przekroju poprzecznym .....	59
3.3.1 Projektowanie rampy drogowej .....	60
3.3.2 Obliczenie bilansu robót ziemnych .....	66
<b>4. Komputerowe techniki projektowania trasy drogowej przy użyciu programu CivilCad 3d</b> .....	76
4.1 Projektowanie trasy w programie AutoCAD Civil 3D .....	76
<b>5. Zakończenie i wnioski</b> .....	95
<b>6. Nowa metoda lokalizacji i połączenia klotoidy z łukiem kołowym</b> .....	99





---

## Przedmowa

Praca dyplomowa (inżynierska) Adama Moskwy stanowi kompleksowe opracowanie parametrów geometrycznych wybranego odcinka drogi.

Praca zawiera podstawy teoretyczne, wykonana jest z dużą starannością przy wykorzystaniu techniki komputerowej. Kompleksowość i staranność opracowania w formie analityczno – graficznej, może stanowić dydaktyczną pomoc w procesie realizacji programu kształcenia z *Geodezji inżynierskiej* i *Geodezji inżyniersko-drogowej*.

W formie aneksu do pracy załączono artykuł: prof. P.I. Barana, dr hab. K.O. Buraka i L. Pitoń p.t. Nowa metoda lokalizacji klotoidy z łukiem kołowym, który powstał w ramach współpracy naukowej Wyższej Szkoły Gospodarki Krajowej w Kutnie z Politechniką Lwowską i może stanowić alternatywę w procesie projektowania łuków kołowych z krzywą przejściową.

Stefan Przewłocki



---

# 1. Wstęp – cel pracy

Proces projektowania drogi obejmuje szeroki zakres działań dotyczący wielu dziedzin naukowych. Zaczynając od zaplanowania przebiegu trasy, planiści muszą uwzględnić potrzeby transportu, komunikacji, ochronę środowiska naturalnego, rozsądne wykorzystanie istniejących pasów dróg, uwarunkowania geologiczne gruntu, czy wreszcie kosztorys całego przedsięwzięcia. Dodatkowym zadaniem jest sporządzenie pełnej dokumentacji prawnej jak również współpraca samorządów z inwestorami. Pod tym względem, patrząc całościowo, projektowanie dróg jest zagadnieniem interdyscyplinarnym angażującym fachowców z różnych dziedzin, a częściowa znajomość sąsiedniej branży ułatwia współpracę między nimi. Zadanie z zakresu geodezji inżynierskiej stanowi końcowy projekt przebiegu trasy w opracowaniach wielkoskalowych jak również tyczenie realizowanego projektu w terenie.

Moja praca zawiera geodezyjne opracowanie ok. kilometrowego odcinka trasy drogi powiatowej. Są to założenia, które przyjąłem na początku pisania pracy i moim zdaniem, pozwalają na utrzymanie racjonalnej objętości treści, przy równoczesnym wyczerpaniu problemu. Projekt trasy składa się zwykle z projektu wstępnego i projektu technicznego. W przypadku dłuższych odcinków, opracowywane zostają pewne założenia co do przebiegu trasy na mapach mniejszych skalach. Dzisiejsze oprogramowanie pozwala na płynne przechodzenie pomiędzy opracowaniami mało i wielkoskalowymi. Wielowarstwowość opracowań pozwala na zgromadzenie wszystkich możliwych informacji o przestrzeni w jednym miejscu, co przyspiesza podjęcie właściwej decyzji co do ogólnego przebiegu trasy.

W projekcie wstępnym uzyskujemy wstępny przebieg trasy uwzględniające punkty stałe takie jak skrzyżowania z istniejącymi trasami, miejsca gdzie projektowana trasa napotyka sztuczną lub naturalną przeszkodę terenową itp. Projekt wstępny jest wynikiem założeń techniczno - ekonomicznych i wybranego na podstawie tych założeń najbardziej optymalnego wariantu przebiegu trasy. Taki projekt wykonuje się zwykle w skali 1:10000, 1:5000, a nawet 1:2000 czy 1:1000 jeśli trasa przebiega przez trudny teren. Kolejnym etapem jest sporządzenie projektu technicznego na podstawie projektu wstępnego w skali 1:1000 lub 1:2000. W przypadku tras przebiegających w miastach, a także rozwiązania skrzyżowań czy skomplikowanych węzłów i dodatkowych, towarzyszących budowli, stosuje się mniejsze skale 1:500 lub nawet 1:250.

Celem mojej pracy było przygotowanie projektu technicznego, czyli opracowanie pełnego przebiegu trasy, uwzględniając rzeźbę terenu i związane z tym prace ziemne. W pracy opisuję podstawowe zadania i problemy, które każdy inżynier geodeta napotyka i rozwiązuje przy tego typu przedsięwzięciach takie jak tyczenie osi trasy czy projektowanie

poszerzenia pasa jezdni. W projekcie opisuję część obliczeniową, jak również pokazuję w jaki sposób nowoczesne i coraz powszechniej dostępne oprogramowanie ułatwia wykonanie takiego projektu. Pracę wykonałem w oparciu o zdobytą wiedzę inżynierską zaś w kwestie merytoryczne rozstrzygałem w oparciu o dostępne powszechnie normy techniczne, rozporządzenia Generalnej Dyrekcji Dróg i Autostrad oraz rozporządzeń odpowiednich ministerstw w zakresie budowy dróg oraz przeprowadzania prac geodezyjnych.

W mojej pracy postawiłem sobie problem wymagający inżynierskiego rozwiązania. Rozwiązaniem tego problemu jest projekt przebiegu trasy ze wszystkimi elementami, które należy opracować przed realizacją projektu w terenie. Podałem dwa rozwiązania tego projektu w dwóch wariantach. Pierwszy wariant opracowałem bez pomocy oprogramowania geodezyjnego, samodzielnie obliczając wszystkie parametry geometryczne trasy na poszczególnych etapach jej projektowania. Projekt wykreśliłem w programie LibreCad, który jest wyposażony jedynie w najbardziej podstawowe narzędzia kreslarskie, zatem nie oferuje pomocy w procesie projektowania. Drugie rozwiązanie, przedstawiłem przy użyciu programu AutoCAD Civil 3D, który jest dostępny na licencji edukacyjnej. W ten sposób przedstawiłem część teoretyczną projektowania dróg oraz aspekt praktyczny dzisiejszych realiów wykorzystywania zaawansowanego oprogramowania w procesie projektowania tras.

Najważniejszymi elementami projektu trasy drogowej są plan sytuacyjny, projekt niwelety, czyli przebieg wysokościowy trasy oraz profile poprzeczne trasy wraz z bilansem robót ziemnych. Projekt złożony z tych trzech części, zawiera wszystkie informacje, potrzebne do jego realizacji. Na podstawie informacji zawartych w planie sytuacyjnym i planie wysokościowym można opracować szkice do tyczenia osi, krawędzi zewnętrznych czy robót ziemnych.

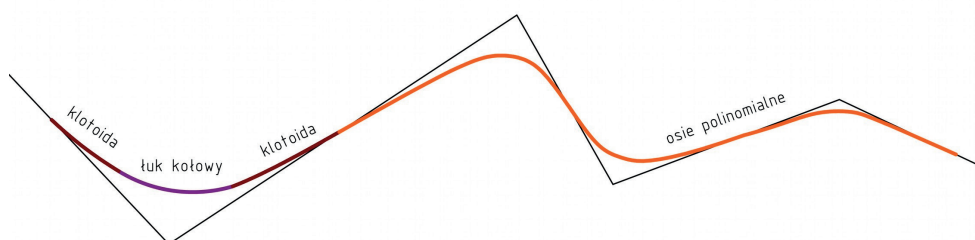
W mojej pracy, starałem się kompleksowo i szczegółowo przedstawić rozwiązanie postawionego problemu inżynierskiego. Wykorzystałem oprogramowanie stosowane w branży, działając na licencji edukacyjnej lub wersji demonstracyjnej, lecz także, ponieważ jako gorący zwolennik wolnego oprogramowania, użyłem programów darmowych i powszechnie dostępnych na licencji GNU (General Public License).



## 2. Podstawy teoretyczne dotyczące geometrii trasy

Z geometrycznego punktu widzenia, trasy składają się z odcinków prostych oraz odcinków krzywoliniowych, do których należą łuki kołowe, klotoidy, łuki paraboliczne czy bardziej złożone krzywe takie jak osie polinomialne. Krzywe stosuje się do łagodzenia punktów załamań trasy oraz niwelety. Projektant ma swobodę co do metody kształtowania geometrii trasy o ile projektowana trasa będzie spełniać kryteria postawione przez inwestora oraz określona w obowiązujących aktach prawnych. Najogólniej można stwierdzić, że dobrze zaprojektowana trasa to taka, która zapewnia możliwie najkrótszy czas przejazdu, bezpieczną i płynną jazdę przy optymalnie niskich kosztach realizacji.

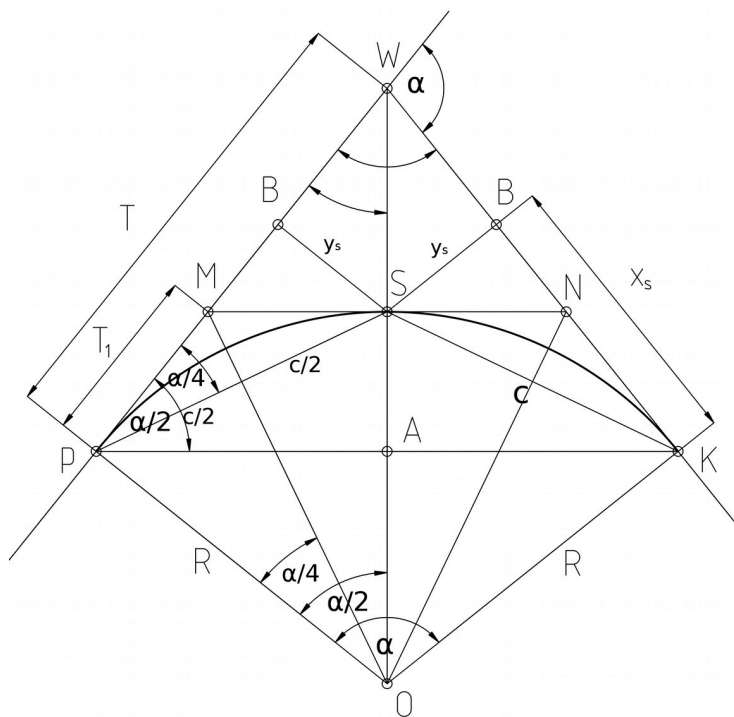
Trasa składa się elementów poziomych oraz pionowych. Dla wysokościowego opracowania przebiegu trasy projektuje się niweletę, tak więc projektowany odcinek drogi może być na pewnych odcinkach złożeniem pionowych i poziomych załamań trasy. W tym rozdziale przedstawię rodzaje krzywych, które wykorzystałem do zaprojektowania przebiegu trasyw mojej pracy.



Rys. 1. Przykładowy kształt geometrii trasy.

## 2.1 Rodzaje i opis krzywych, wykorzystanych w projekcie

W tej części pracy zamieściłem szkice przedstawiające zastosowane w tej pracy krzywe oraz związki matematyczne poza poszczególnymi elementami tych krzywych.



Rys. 2. Elementy łuku kołowego (szkic własny na podstawie [1])

Łuk kołowy.

Wzory opisujące relacje między elementami łuku [1]:

- długość stycznej głównej

$$T = PW = WK = R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

- długość stycznej krótkiej

$$T_1 = PM = MS = SN = NK = R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}$$

- odległość  $WS$  między punktem załamania stycznych a punktem środkowym łuku

$$WS = R \sec\left(\frac{\alpha}{2} - 1\right)$$

- rzędna i odcięta punktu środkowego łuku

$$x_s = PB = KB = PA = R \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$y_s = BS = SA = R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)$$

- długość cięciwy połowy łuku

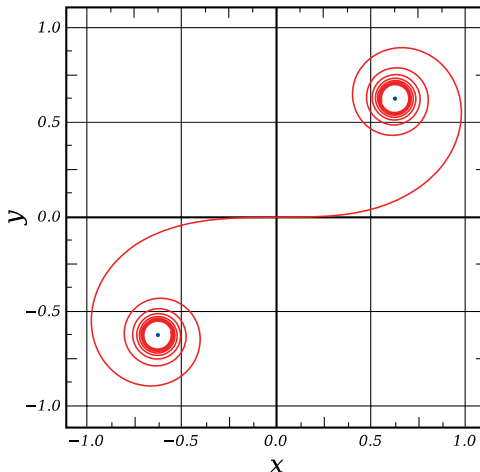
$$c = PS = SK = 2 R \sin \frac{\alpha}{4}$$

- długość całego łuku

$$L = PSK = R \frac{\alpha}{\rho}$$

Klotoida.

Klotoida, zwana też spiralą Cornu lub spiralą Eulera, jest to taka krzywa, której krzywizna jest proporcjonalna do długości łuku. Krzywa jest chętnie stosowana w drogownictwie i kolejnictwie ponieważ pojazd poruszający się po takiej krzywej ze stałą prędkością liniową, ma jednostajne przyspieszenie kątowe oraz jednostajny przyrost siły odśrodkowej. Pozwala to pojazdowi na płynne wejście w odcinek łuku kołowego co znacząco poprawia komfort jazdy.



Rys. 3. Klotoida [4]

Podstawowy wzór klotoidy:

$$L = \frac{A^2}{R} \quad LR = A^2 = const. \quad [2]$$

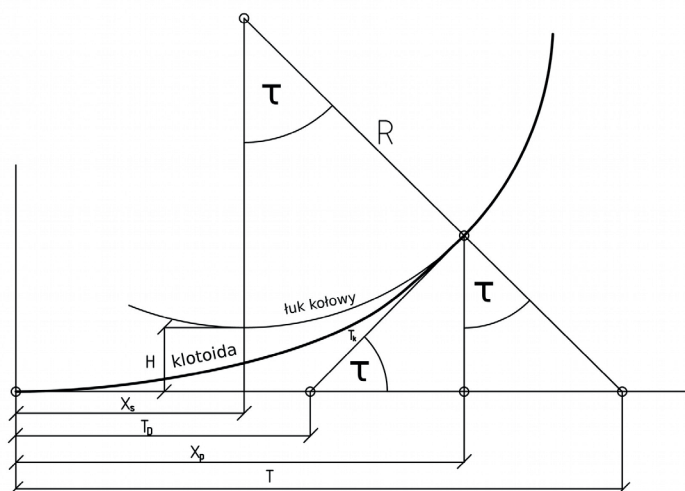
Kolejną, ważną, cechą klotoidy jest fakt, że wszystkie klotoidy są geometrycznie podobne (jednokładne). Dla każdego parametru A, otrzyma się inną klotoidę. Przy zmianie parametru A, klotoida będzie zachowywała kształt, a jedynie zmieni się jej wielkość. Jeśli więc obliczymy parametry tylko jednej klotoidy (tzw. klotoidy jednostkowej), możemy przemnożyć te wielkości przez odpowiedni współczynnik i otrzymać dowolną szukaną klotoidę. Aby przejść z wielkości dowolnej klotoidy na wielkości klotoidy jednostkowej, należy daną wielkość podzielić przez parametr a (klotoidy jednostkowej) np.:

$$\frac{L}{a} = x \quad \frac{R}{a} = r \quad (\text{wielkości pisane małymi literami dotyczą klotoidy jednostkowej})$$

Podczas projektowania krzywych przejściowych, w rozdziale 3, przedstawiłem sposób wykorzystywania klotoidy jednostkowej z użyciem tablic Lipińskiego.

Klotoida ma w punkcie przegięcia  $(0,0)$  promień krzywizny  $R=\infty$ , zatem krzywa łączy się w tym punkcie z odcinkiem prostym, stycznym do łuku, w sposób ciągły.

Następnie możemy poprowadzić klotoidę do punktu, w którym łączy się z łukiem tak, że promień krzywizny klotoidy oraz łuku są równe, co stanowi warunek zachowania ciągłości krzywizny toru jazdy. Związki geometryczne pomiędzy klotoidą jako krzywą przejściową pomiędzy odcinkiem prostym a łukiem kołowym przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Związki klotoidy łączącej się z łukiem kołowym (szkic własny na podstawie [2]).

Związki matematyczne między poszczególnymi elementami klotoidy [2]:

- odcięta  $X_S$  i rzędna  $Y_S$

$$X_S = X_p - R \sin \tau \quad Y_S = R + H = Y_p + R \cos \tau$$

- odsunięcie koła krzywizny od stycznej głównej

$$H = Y_p - R(1 - \cos \tau)$$

- długość stycznej głównej

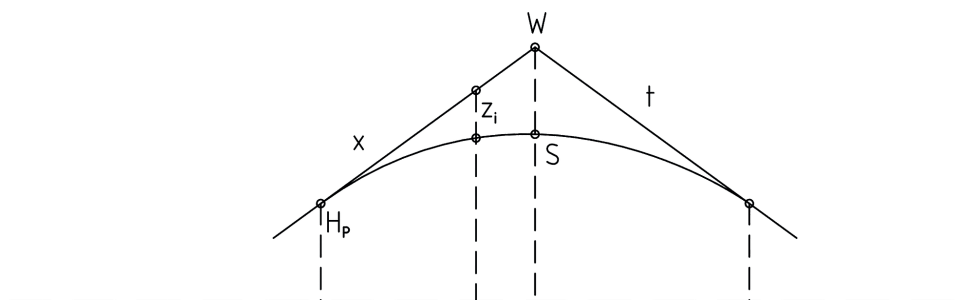
$$T = X_p + Y_p \operatorname{tg} \tau$$

- długość stycznej  $T_D$

$$T_D = X_p - Y_p \operatorname{ctg} \tau$$







Rys. 6. Tyczenie punktów pośrednich łuku pionowego (na podstawie [1]).

Rzędne punktów pośrednich łuku liczy się ze wzoru:

$$H_i = H_p + x_i - z_i$$

gdzie  $z_i = \frac{x_i^2}{2R}$  jest odległością między punktem na stycznej łuku a jego rzutem na łuk pionowy (czyli szukanym punktem pośrednim).

---

### 3. Przykład praktyczny, projektowanie przebiegu trasy

Przykład praktyczny podzieliłem na trzy części. W pierwszej przedstawiłem kolejne etapy projektowania poziomego przebiegu trasy, czyli złożenia odcinków prostych, krzywych przejściowych oraz łuków kołowych. Druga część zawiera opracowanie wysokościowej trasy, czyli projekt niwelety. Trzecia część zawiera opracowanie rampy na krzywych przejściowych oraz łukach kołowych. Kolejne etapy opracowania tego projektu przedstawiam na przykładzie ok. kilometrowego odcinka drogi powiatowej zmieniającej kierunek w dwóch punktach. Punkt początkowy i końcowy oraz punkty załamań trasy przyjąłem jako dane do tego zadania. Znane są więc współrzędne płaskie oraz rzędne wysokościowe tych punktów. Trasa przebiega przez teren płaski o nieznaczących różnicach wysokości.

Na potrzeby mojego opracowania dysponuję modelem terenu z siatką kwadratów o boku 50m, na którym utworzyłem mapę warstwicową w programie MikroMap. Powstała mapa warstwicowa z naniesionymi punktami głównymi trasy, importowałem do programu LibreCad, w którym kreśliłem poszczególne elementy projektu. Program LibreCad jest jednym z najprostszych programów CAD (computer aided design) na licencji wolnego oprogramowania. Nie zawiera on żadnych algorytmów dla zastosowań branżowych (tj. architektonicznych, kartograficznych, mechanicznych itp.). Wybór takiego oprogramowania wymagał odemnie dużej samodzielności w procesie projektowania, ponieważ program LibreCad nie potrafi generować i obliczać krzywych przejściowych tak jak robi to np.

Autodesk CivilCad. Obliczenia, potrzebne do określenia parametrów i przebiegu trasy, wykonałem również samodzielnie, wykorzystując arkusz kalkulacyjny pakietu LibreOffice.

Kierując się standardami technicznymi, przyjętymi w rozporządzeniach oraz w standardach technicznych, zdecydowałem opracować dwa łuki kołowe z kłotoidami jako krzywymi przejściowymi oraz krzywą esową, łączącą dwa łuki kołowe. Pojazd poruszający się po takim torze zachowuje płynną dynamikę jazdy ponieważ przy założeniu, że porusza się on ze stałą prędkością po kłotoidzie, ma jednostajnie rosnącą siłę odśrodkową. Gdyby ruch po łuku zaczął od przejścia z linii ciągłej na łuk kołowy, wówczas nagle znalazłby się pod działaniem siły dośrodkowej co wpłynęłoby negatywnie na komfort jazdy. Geometria toru jazdy, jak również nachylenie poprzeczne jezdni na łuku mają kluczowy wpływ na dynamikę i komfort pojazdów poruszających się po łukach. W moim przykładzie, głównym celem opracowania było zoptymalizowanie parametrów trasy, tak aby zapewnić bezpieczeństwo, płynną dynamikę oraz komfort jazdy.

Wszystkie szkice (z wyjątkiem szkiców poglądowych, które są specjalnie podpisane) przedstawione w tej pracy, są wykonane w skali, z zachowaniem rzeczywistych stosunków liniowych.

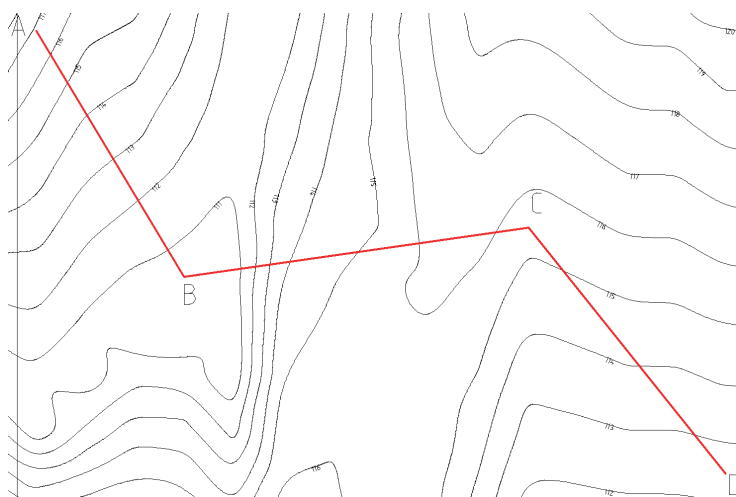
### 3.1 Projektowanie przebiegu trasy w poziomie

#### 3.1.1 Warunki techniczne, założenia projektowe

Podstawą prawną, do której najczęściej odwołuję się w tej pracy jest Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Wodnej z dnia 2 marca 1999r. w sprawie warunków technicznych jakie mają spełniać drogi publiczne i ich usytuowanie, z późniejszymi zmianami. Dlatego odnosząc się do aktów prawnych będę wskazywał jedynie artykuł oraz ustęp, wskazując na przepis pochodzący domyślnie z tej ustawy, ponieważ w tym rozdziale nie powołuję się na inne akty prawne. Przedmiotem niniejszego opracowania jest droga powiatowa klasy technicznej G, poza terenem zabudowanym, jednojezdniowa o dwóch pasach ruchu w przeciwnych kierunkach. Przyjęte warunki techniczne trasy:

- Dla tej klasy drogi przyjąłem (na podstawie art.12 ust.1) prędkość projektową:
  - 70 km/h;
- Szerokość pasa ruchu określa art. 15 ust 1 z nowelizacją z 17 lutego 2015r:
  - $d=3.5$  m;

Celem projektu jest opracowanie dwóch łuków kołowych z krzywymi przejściowymi tak aby przebieg trasy był jak najbardziej płynny i komfortowy. Problem do rozwiązania przedstawia poniższy szkic:



Rys. 7. Punkty załamań trasy

Pomiar trasy:  $|AB|=291,55\text{m}$   
 $|BC|=353,55\text{m}$   
 $|CD|=320,16\text{m}$

Kąty zwrotu trasy:  
 $\gamma_1=74,6293$   
 $\gamma_2=66,0781$

### 3.1.2 Projektowanie łuku kołowego

Najpierw zaprojektowałem dwa łuki kołowe o tym samym promieniu krzywizny. Kierując się treścią art. 21 wspomnianego rozporządzenia, zdecydowałem się przyjąć promień krzywizny  $R=200m$  dla obydwu łuków. Aby dostosować się do wymagań rozporządzenia określiłem prędkość miarodajną trasy.

Na podst. Art. 13 ust. 1 prędkość miarodajna dla tej trasy wynosi:

$$V_m = V_p + 20 \frac{km}{h} > V_m = 70 \frac{km}{h} + 20 \frac{km}{h} > V_m = 90 \frac{km}{h} \quad [5]$$

Prędkość projektowa nie odzwierciedla prędkości dopuszczalnej na drodze. Prędkość miarodajna określa dopuszczalną prędkość pojazdu w ruchu swobodnym na drodze zachowując bezpieczeństwo jazdy.

Wymagania dla krzywizny łuku kołowego są spełnione gdy wartość promienia w planie mieści się w zakresach przedstawionych w poniższych tabelach:

...wartość promienia w planie jest nie mniejsza niż:

Prędkość projektowa (km/h)		120	100	80	70	60	50	40	30
Promień łuku kołowego (m)	drogi poza terenem zabudowy, przy pochyleniu poprzecznym jezdni 7%	750	500	300	200	125	80	50	30
	drogi na terenie zabudowy: przy pochyleniu poprzecznym jezdni 5% przy pochyleniu poprzecznym jezdni 6%	— —	— —	— 250	— 170	140 120	80 70	50 —	30 —

Tabela 1. Promień łuku w zależności od prędkości projektowej [5].

...oraz musi się mieścić w zakresach (dla drogi klasy G i wyższych, nieograniczonej krawężnikami):

Prędkość miarodajna (km/h)	Promień łuku kołowego w planie (m) przy pochyleniu poprzecznym jezdni <sup>1)</sup>						
	jak na odcinku prostym	2% do 2,5%	3%	4%	5%	6% <sup>2)</sup>	7% <sup>2)</sup>
130	≥4000	≥3500	2500	1800	1400	1100	≤900
120	≥3500	≥3000	2000	1500	1200	900	≤750
110	≥2800	≥2500	1800	1400	1000	800	≤600
100	≥2200	≥2000	1400	1000	800	600	≤500
90	≥1600	≥1500	1000	750	600	500	≤400
80	≥1200	≥1100	800	600	450	350	≤300
70	≥1000	≥800	600	400	300	250	≤200
60	≥600	≥500	350	250	200	150	≤125
50	≥450	≥350	250	175	125	100	≤80

<sup>1)</sup> Pochylenie poprzeczne jezdni dla promienia o wartości pośredniej należy interpolować i zaokrąglić do 0,5%.

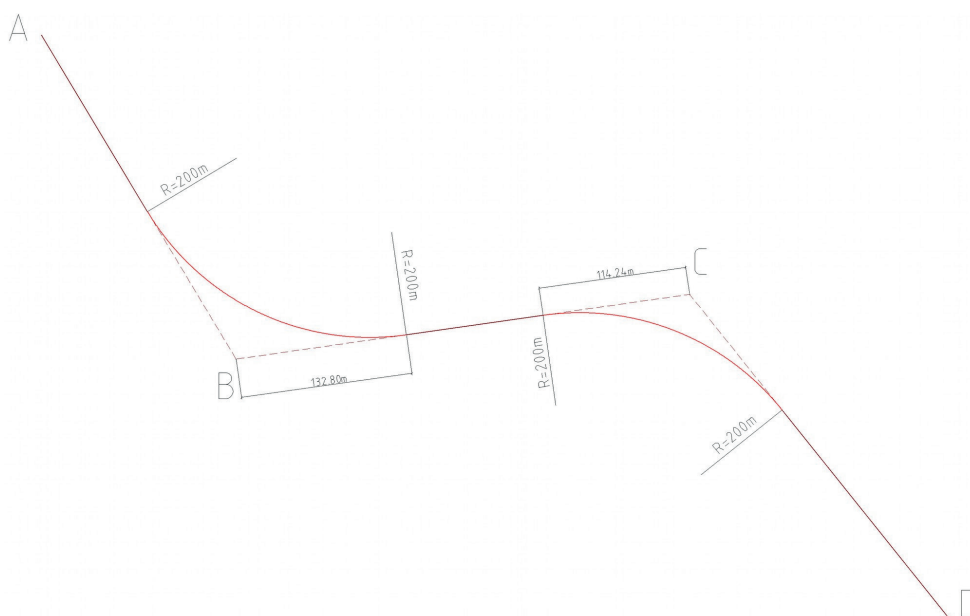
<sup>2)</sup> Stosowanie przy prędkości miarodajnej powyżej 90 km/h wymaga uzasadnienia.

Tabela 2. Promień łuku kołowego w zależności od prędkości miarodajnej i pochylenia poprzecznego jezdni [5].

W efekcie uzyskałem wstępny, przybliżony przebieg trasy:

Łuk kołowy przy p. B		Łuk kołowy przy p. C	
R	200 m	R	200 m
$T_1$	132.80 m	$T_2$	114.24 m
$\xi_1$	234.45 m	$\xi_2$	207.59 m

Tabela 3. Tabela obliczonych parametrów łuku kołowego.



Rys. 8. Załamania trasy złagodzone łukami kołowymi.

### 3.1.3 Projektowanie krzywych przejściowych

Krzywymi przejściowymi są klotoidy symetryczne po każdej stronie łuku. Czynniki wpływające na dynamikę poruszania się po klotoidzie, można przedstawić w związkach matematycznych określających parametr  $A$  klotoidy, w postaci nierówności. Przy typowaniu najbardziej optymalnego parametru  $A$  należy uwzględnić sześć warunków, które opisałem poniżej (wzory na podstawie [3]). Warunki jakie ma spełniać krzywa przejściowa określa również rozporządzenie w art. 22.

Uwaga:  $a$  – przyspieszenie,  $A$  – parametr klotoidy.

#### 1. Warunek dynamiki

Klotoida powinna być zaprojektowana tak aby przyrost przyspieszenia nie następował zbyt szybko. Przyśpieszenie na łuku wynosi zgodnie ze wzorem:

$$a = \frac{V^2}{R}$$

zaś przyrost przyspieszenia w czasie:

$$\Delta a = \frac{V^2}{Rt}$$

oraz czas przejazdu przez klotoidę:

$$t = \frac{L}{V}$$

Stąd możemy dokonać przekształcenia:

$$\Delta a = \frac{V^3}{RL} \text{ a skoro } RL = A^2 \text{ to wówczas } \Delta a = \frac{V^3}{A^2}$$

Dlatego warunek dynamiki przedstawić można jako nierówność:

$$A_1 \geq \sqrt{\frac{V^3}{\Delta a_{max}}}$$

W rozporządzeniu, ustawodawca podaje największe dopuszczalne wartości przyrostów przyspieszenia dośrodkowego, działającego na pojazd poruszający się prędkością projektową.

Prędkość projektowa [km/h]	120-100	80	70	60	50	40
Przyrost przyspieszenia dośrodkowego [m/s <sup>2</sup> ]	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

na podstawie Dz.U.1999.43.430

**Tabela 4.** Wartości dopuszczalnych przyrostów przyspieszenia dośrodkowego [5].

Zatem:

$$A_1 \geq 110,69m$$

2. Warunek geometrii.

Suma kątów zwrotu klotoid nie może być większa od kąta zwrotu łuku kołowego aby była zachowana ciągłość geometryczna łuku. Jeśli suma kątów zwrotu klotoid jest równa kątowi zwrotu łuku kołowego wówczas cały łuk tworzy biklotoidę, czyli nie ma części z łukiem kołowym. Matematycznie możemy zapisać ten warunek:

$$2\tau \leq \gamma$$

Podstawiając  $\tau = \frac{L}{2R}$ , otrzymam nierówność:  $\frac{L}{R} \leq \gamma$ .

Następnie podstawiając  $RL = A^2$  do tej nierówności, otrzymam  $A \leq R\sqrt{\gamma}$ .

$$A_2 \leq 216,54m$$

3. Warunek estetyki.

Na podstawie istniejących dróg, stwierdzono, że najlepszą optyczną płynność trasy, zapewnia kąt zwrotu klotoidy z przedziału od  $3^\circ$  do  $30^\circ$  (art. 22 ust. 1 pkt 2).

Wykorzystując wzór  $\tau = \frac{L}{2R}$  powyższy warunek mogę zapisać jako nierówność:

$$\frac{1}{3} R \leq A \leq R$$

Stąd, dla pierwszego łuku:

$$66,667m \leq A_3 \leq 200m$$

4. Warunek minimalnego odsunięcia łuku od stycznych głównych.

Jest to także warunek dotyczący estetyki. Odsunięcie łuku kołowego powinno być zauważalne dla kierowcy, a odsunięcie wyraża się wzorem:  $H = \frac{L^2}{24R}$ . Podstawiając  $RL = A^2$  i przekształcając, mogę warunek zapisać w postaci nierówności:

$$A \geq \sqrt[4]{24 R^3 H}$$

Co z kolei dla  $H_{\min} = 0,5m$  (dopuszczalne 0,2m) da wartość:

$$A_4 \geq 98,98m$$

5. Warunek poszerzenia jezdni na łuku.

Odsunięcie łuku od stycznych głównych nie powinno być mniejsze od poszerzenia pasa jezdni, tak aby krawędź zewnętrzna jezdni zachowała ten sam kąt zwrotu co oś pomimo poszerzenia jezdni. Warunek w postaci nierówności wygląda tak:

$$A \geq \sqrt[4]{24 R^3 d}$$

Poszerzenie pasa określa art.16 ust.1, w którym ustawodawca podaje wzór:

$p = \frac{40}{R}$ , gdzie  $R$  jest promieniem łuku kołowego. Stąd poszerzenie wynosi  $p = 0,20m$ .

$$A_5 \geq 78,72m$$

6. Warunek proporcji krzywych.

Z punktu widzenia estetyki, najlepszą płynność jazdy uzyskam jeśli zachowam odpowiedni stosunek długości łuku kołowego i klotoid, tak że:

$L$  – długość klotoidy (klotoidy są symetryczne w tym przypadku)



$L$  – długość łuku kołowego po przesunięciu

$L:L=1:n:1$

natomiast wartość  $n$  jest w przedziale  $\langle 1;2 \rangle$  (dopuszcza się  $\langle 0,5;4 \rangle$ ).

(w tym opracowaniu przyjąłem przedział  $\langle 1;2 \rangle$  )

Granice parametru  $A$  obliczyłem z nierówności (w poniższym wzorze  $L$  jest początkową długością łuku kołowego):

$$\sqrt{\frac{RL}{n_{max}+1}} \leq A \leq \sqrt{\frac{RL}{n_{min}+1}}$$

( $n_{max}$  i  $n_{min}$  są odpowiednio granicznymi wartościami przyjętego przedziału  $n$ ). Dla mojego przykładu otrzymałem:

$$125,02 \leq A_6 \leq 153,12m$$

Otrzymane wartości zestawilem w poniższej tabeli:

110.69	≤	$A_1$		
		$A_2$	≤	216.54
66.67	≤	$A_3$	≤	200.00
98.98	≤	$A_4$	≤	
78.72	≤	$A_5$		
<b>125.02</b>	≤	$A_6$	≤	<b>153.12</b>

Tabela 5. Obliczone przedziały wartości parametru  $A$ .

Po porównaniu zebranych wartości przyjąłem wartość parametru  $A=139m$ .

Następnym krokiem jest odczytanie z tablic Lipińskiego wartości parametrów klotoidy dla obliczonego parametru  $A$ .

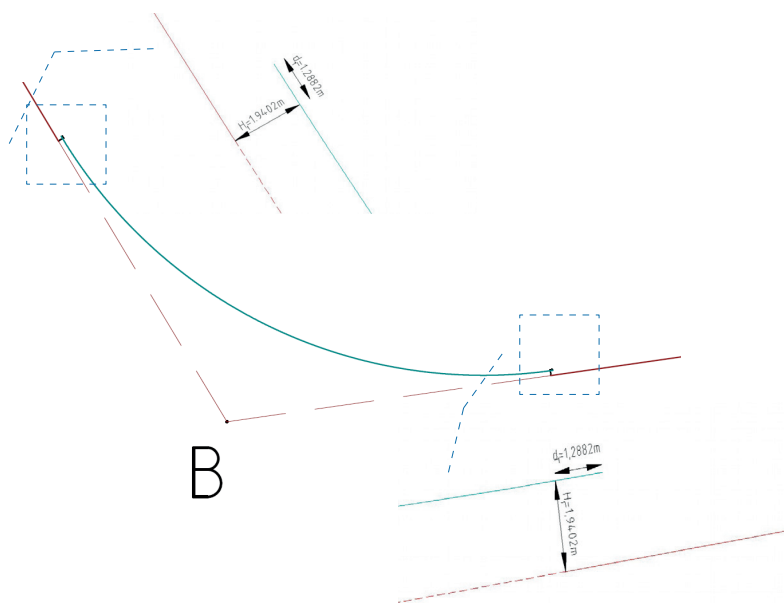
Najpierw obliczam parametr wejściowy wg wzoru:  $l_1 = \frac{A_1}{R_1}$  co daje  $l_1=0,695$ .

Na podstawie tablic Lipińskiego mogę obliczyć wartości rzeczywiste klotoidy. W moim przykładzie klotoidy w pierwszym łuku są symetryczne zatem te wielkości odnoszą się do krzywych po obydwu stronach łuku kołowego.

Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy	
$\tau''$	13,837647	15,3752	$g$
$x$	0,690957	96,0430	$m$
$y$	0,055718	7,7448	$m$
$x_s$	0,346825	48,2087	$m$
$h$	0,013958	1,9402	$m$
$l$	0,695	96,6050	$m$

**Tabela 6.** Wartości klotoidy jednostkowej dla pierwszej krzywej przejściowej [5]

Wartości klotoidy jednostkowej przemnożyłem przez parametr  $A$  i w ten sposób uzyskałem wartości rzeczywiste po czym przystąpiłem do wykreślenia krzywej. Aby poprawnie wykreślić klotoidę należało najpierw przesunąć łuk kołowy o wartość  $H_1$  oraz  $d_1$  tak jak na szkicu (przy zachowaniu tego samego promienia krzywizny):



**Rys. 9.** Odsunięcie łuku kołowego.

Następnie obliczam wartość nowej stycznej ze wzoru:

$$T_{1'} = (R_1 + H_1) \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma_1}{2} = 134,08 \text{ m}$$

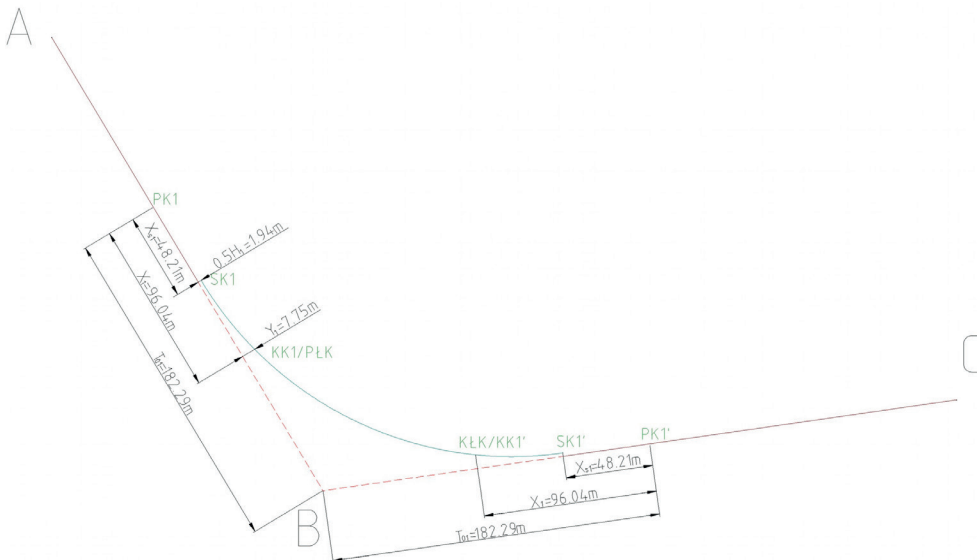
(jest to styczna do przesuniętego łuku kołowego). Z kolei wartość przesunięcia poziomego  $d_1$ :

$$d_1 = T_{1'} - T_1 = 1,29 \text{ m}$$

Odmierzając na rysunku wartości  $X_{s1}$  oraz  $0,5H_1$ ;  $X_1$  oraz  $Y_1$  (z tabeli), wyznaczyłem trzy główne punkty projektowanej klotoidy. Współrzędne są podane w układzie lokalnym, zarówno dla pierwszej jak i drugiej klotoidy.

Punkty główne klotoidy (dla drugiej krzywej, która jest symetryczna dodałem apostrof):

- początek klotoidy (PK1) – wyznaczony po odłożeniu  $T_{01}$  wzdłuż odcinka AB od punktu B;
- środek klotoidy (SK1) – wyznaczony po odłożeniu  $X_{s1}$  wzdłuż odcinka AB od punktu PK1 oraz rzędnej  $0,5H_1$ ;
- koniec klotoidy i początek łuku kołowego – wyznaczony po odłożeniu  $X_1$  wzdłuż odcinka AB od punktu PK1 oraz rzędnej  $Y_1$ ;



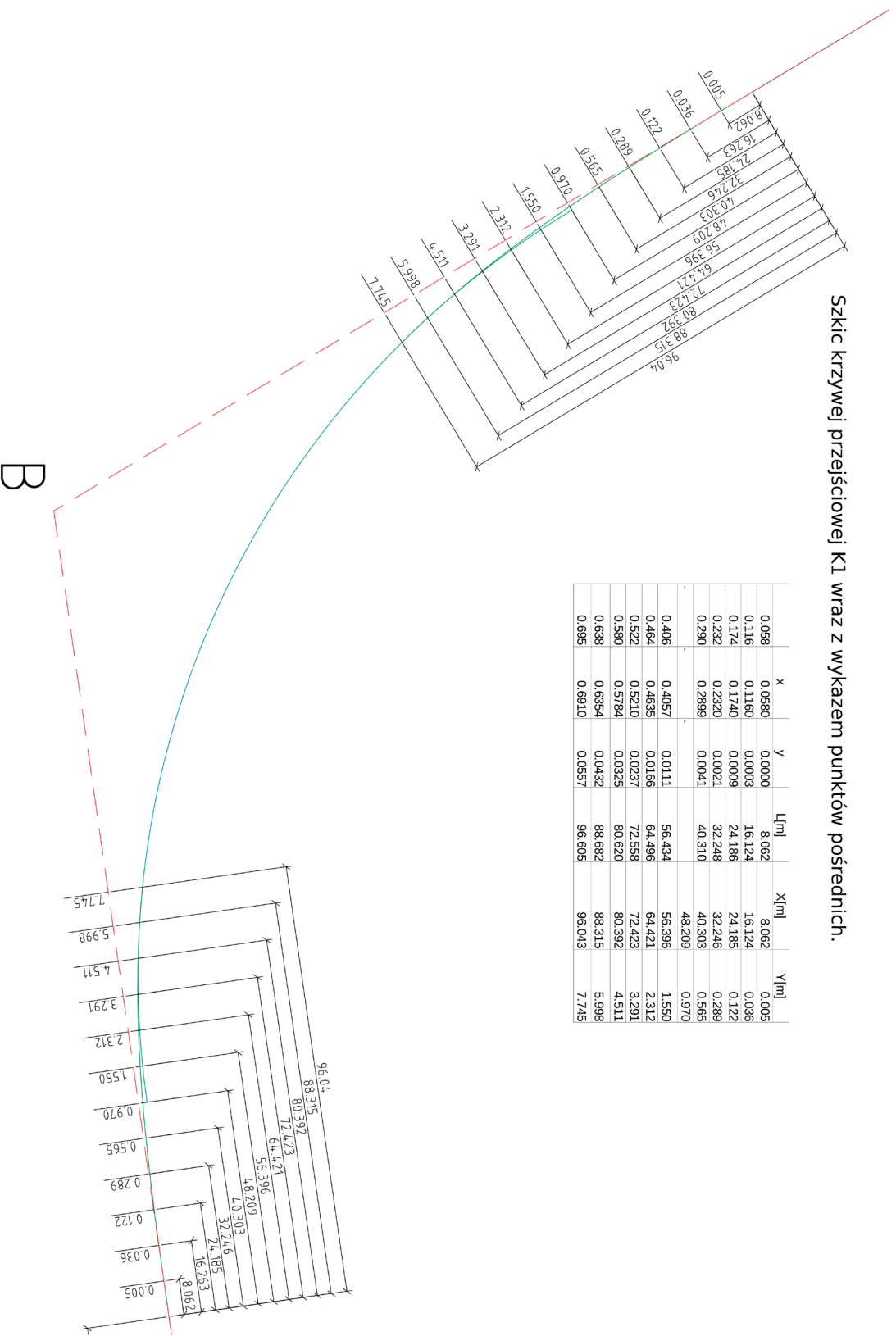
Rys. 10. Punkty główne krzywej przejściowej.

Następnie przystąpiłem do obliczenia punktów pośrednich klotoidy przy użyciu tabeli Lipińskiego. Przyjąłem krok wartości  $l=0,058$  czyli w moim przykładzie, co, mniej więcej, 8m wzdłuż osi trasy wyznaczyłem punkty pośrednie krzywej. Wyniki obliczeń zestawilem w tabeli, wraz ze szkicem na kolejnej stronie.

Otrzymaną krzywą mogę odbić symetrycznie, oś symetrii obierając między punktem B i środkiem łuku kołowego. Tam jednak zaprojektowałem krzywą esową jako krzywą przejściową co przedstawię w dalszej części pracy.

Szkic krzywej przejściowej K1 wraz z wykazem punktów pośrednich.

	X	Y	L[m]	X[m]	Y[m]
0,058	0,0580	0,0000	8,062	8,062	0,005
0,116	0,1160	0,0003	16,124	16,124	0,036
0,174	0,1740	0,0009	24,186	24,186	0,122
0,232	0,2320	0,0021	32,248	32,246	0,289
0,290	0,2899	0,0041	40,310	40,303	0,565
				48,209	0,970
0,406	0,4057	0,0111	56,434	56,396	1,550
0,464	0,4635	0,0166	64,496	64,421	2,312
0,522	0,5210	0,0237	72,558	72,423	3,291
0,580	0,5784	0,0325	80,620	80,392	4,511
0,638	0,6354	0,0432	88,682	88,315	5,998
0,695	0,6910	0,0557	96,605	96,043	7,745



Projektowanie krzywej przejściowej dla łuku przy punkcie C wygląda podobnie gdyż w przypadku drugiego łuku, przyjąłem podobne założenia projektowe. Tutaj też zastosowałem łuk kołowy z symetrycznymi kłotoidami, które złagodziły krzywiznę trasy oraz polepszyły dynamikę jazdy. W przypadku parametru A, obrałem te same założenia (tj. przyrost przyspieszenia, warunek odchyień) jak w przypadku pierwszego łuku. Wyniki obliczeń zestawilem w tabeli:

110.69	≤	A <sub>1</sub>		
		A <sub>2</sub>	≤	203.76
66.67	≤	A <sub>3</sub>	≤	200.00
98.98	≤	A <sub>4</sub>	≤	
78.72	≤	A <sub>5</sub>		
<b>117.64</b>	≤	A <sub>6</sub>	≤	<b>144.08</b>

Tabela 7. Zakresy wartości parametru A dla drugiej krzywej przejściowej.

przyjąłem zatem  $A=131m$ .

Parametr wyjściowy wynosi  $l_2 = \frac{A_2}{R_2} = 0,655$ .

Odczytane z tablic Lipińskiego pozostałe parametry liniowe i ich wartości rzeczywiste:

Wartości kłotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej kłotoidy	
$\tau''$	12,2907	13,6563	$g$
x	0,65199	85,410	$m$
y	0,04668	6,153	$m$
xs	0,327	42,8367	$m$
h	0,0169	1,5314	$m$
l	0,655	85,8050	$m$

Tabela 8. Wartości kłotoidy jednostkowej dla drugiej krzywej przejściowej.

Łuk przy wierzchołku C po przesunięciu prostopadle o wartość  $H_2=1,5314m$ :

- wartość przesunięcia poziomego  $d_2=0,875m$

Wartość nowej stycznej wynosi  $T_2 = (R_2 + H_2) \cdot \text{tg} \frac{\gamma_2}{2} = 115.115m$

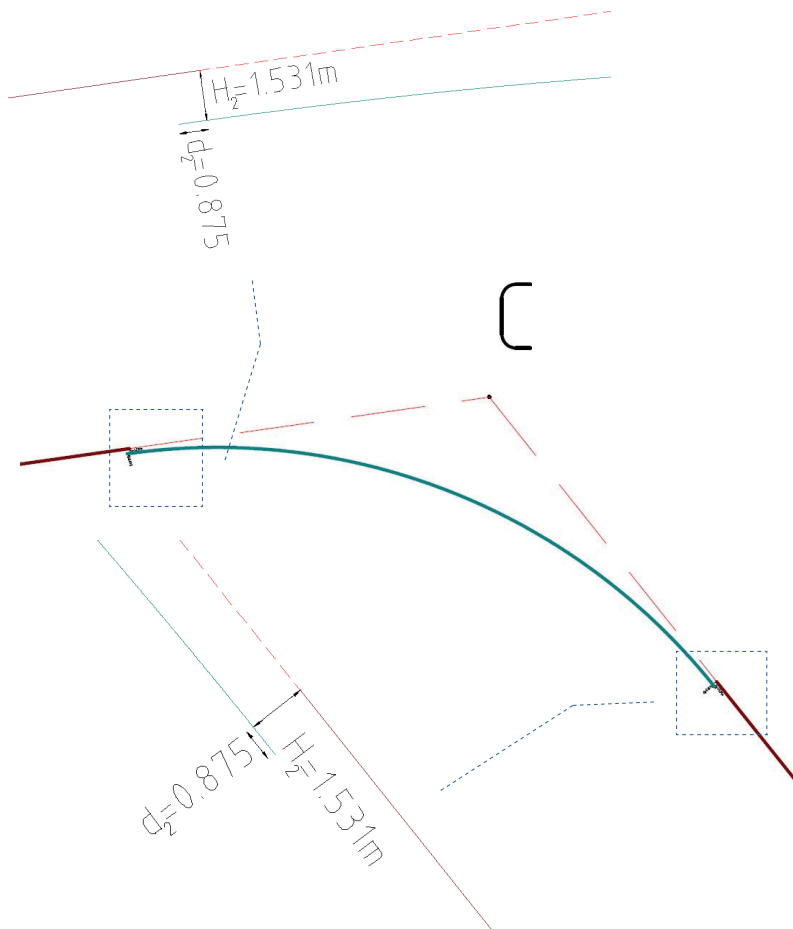
Punkty główne kłotoidy oraz punkty pośrednie wyznaczyłem tak jak w pierwszym łuku, wykorzystując tablice Lipińskiego.

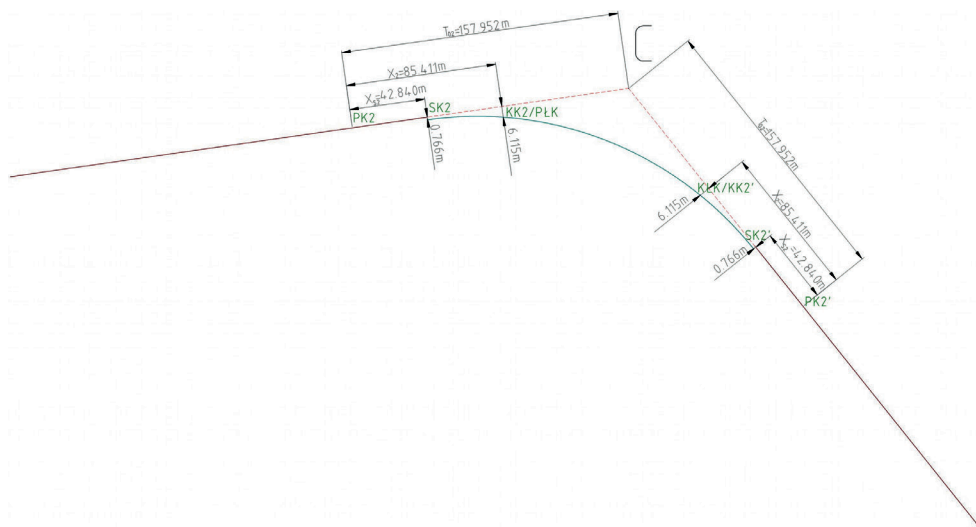
Punkty główne klotoidy (dla drugiej krzywej, która jest symetryczna dodałem apostrof):

- początek klotoidy (PK2) – wyznaczony po odłożeniu  $T_{02}$  wzdłuż odcinka BC od punktu C;
- środek klotoidy (SK2) – wyznaczony po odłożeniu  $X_{s2}$  wzdłuż odcinka BC od punktu PK2 oraz rzędnej  $0,5H_2$ ;
- koniec klotoidy i początek łuku kołowego – wyznaczony po odłożeniu  $X_2$  wzdłuż odcinka BC od punktu PK2 oraz rzędnej  $Y_2$ ;

Wyniki powyższych obliczeń przedstawiłem na szkicu poniżej.

Rys. 11. Odsunięcie łuku przy wierzchołku C.

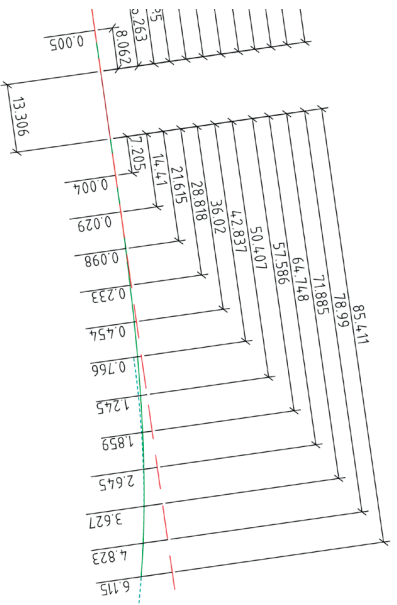




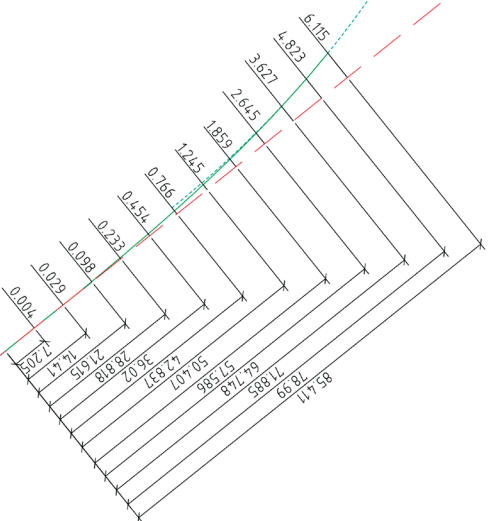
Rys. 12. Punkty główne drugiej krzywej przejściowej.

Następnie przystąpiłem do obliczenia punktów pośrednich klotoidy przy użyciu tabel Lipińskiego. Przyjąłem krok wartości  $l=0,055$  czyli w moim przykładzie, co, mniej więcej, 0m wzdłuż osi trasy wyznaczyłem punkt pośredni krzywej.

Na kolejnej stronie przedstawiłem szkic oraz wykaz w tabelce punktów pośrednich przy wierzchołku C.



	x	y	L[m]	X[m]	Y[m]
0.055	0.055	0.000028	7.205	7.205	0.004
0.110	0.11	0.000222	14.410	14.410	0.029
0.165	0.164997	0.000749	21.615	21.615	0.098
0.220	0.219987	0.001775	28.820	28.818	0.233
0.275	0.274961	0.003466	36.025	36.020	0.454
-	-	-	-	42.837	0.766
0.385	0.384789	0.009507	50.435	50.407	1.245
0.440	0.439588	0.014188	57.640	57.586	1.859
0.495	0.494258	0.020193	64.845	64.748	2.645
0.550	0.548743	0.027684	72.050	71.885	3.627
0.605	0.602977	0.036819	79.255	78.990	4.823
0.655	0.651992	0.046682	85.805	85.411	6.115



Szkic punktów pośrednich Krzywej przejściowej K2 wraz z wykazem punktów pośrednich.



### 3.1.4 Projektowanie krzywej esowej

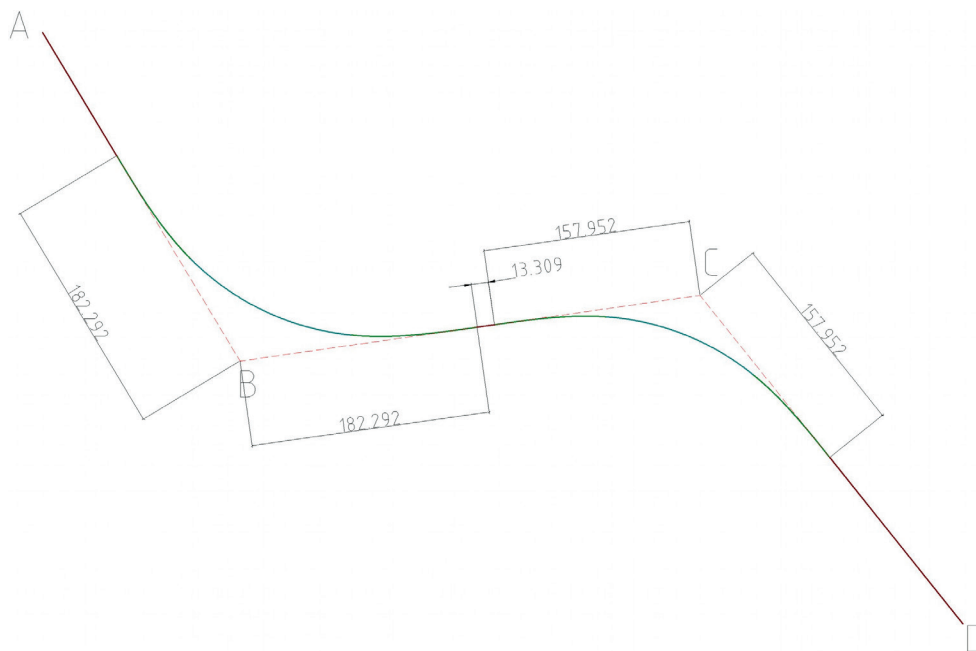
Krzywa esowa jest przejściem pomiędzy dwoma odwrotnymi łukami kołowymi za pomocą dwóch odwrotnych łuków kłotoidy. W punkcie przegięcia kłotoidy następuje połączenie dwóch krzywych przejściowych. Krzywą esową wprowadza się w takich przypadkach gdzie zaprojektowane krzywe przejściowe nachodzą na siebie. W mojej pracy, opisany przypadek nie wymaga wprowadzenia takiej krzywej, co wykazuje poniższa nierówność:

$$T_{01}+T_{02}=182.292\text{m}+157.952\text{m}=340.244\text{m}$$

$$|BC|=353.55\text{m}$$

$$T_{01}+T_{02}\leq |BC|$$

Tak jak widać poniżej:



Rys. 13: Złagodzenie trasy łukami kołowymi z symetrycznymi kłotoidami.

Wprowadzenie krzywej przejściowej w tym wypadku nie jest potrzebne, ale poprawi płynność jazdy (wzory na podstawie [1]).

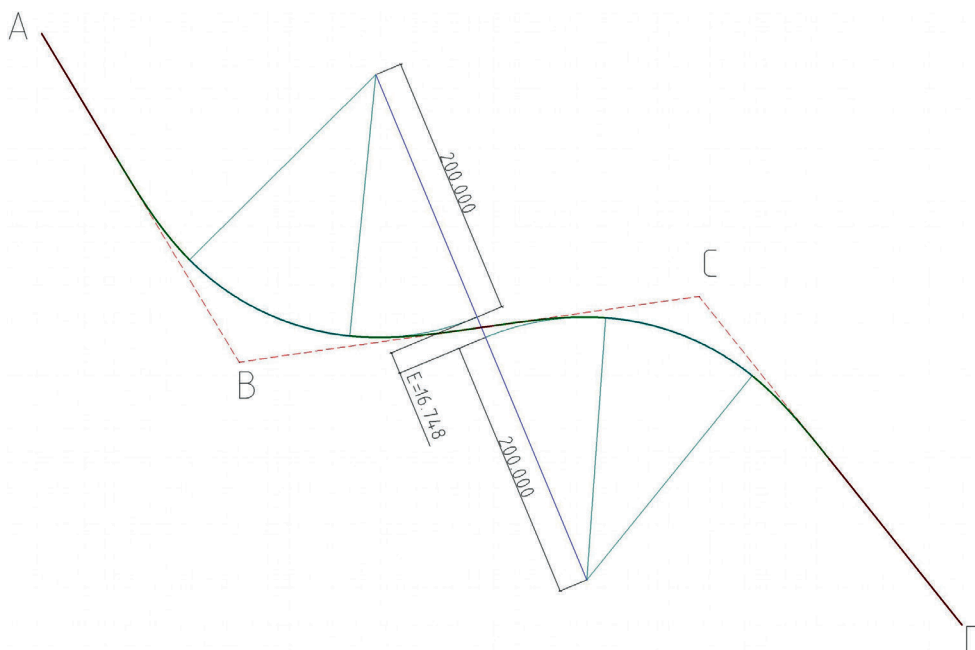
Parametr  $A_E$  krzywej esowej oblicza się ze wzoru:

$$A_E = \sqrt{\frac{L R_1 R_2}{R_1 - R_2}}$$

Jednak w tym przypadku promienie krzywizn łuków kołowych są równe, co daje zero w mianowniku, zatem skorzystam ze wzoru:

$$A_E = \sqrt{\frac{R}{2} \sqrt{12 E R + 3 E^2}}$$

W moim przykładzie, wartość  $E$  odczytałem ze szkicu wykonanego przy użyciu oprogramowania CAD. Wielkość  $E$  można też obliczyć z zależności  $D = R_1 + R_2 + E$ , gdzie  $D$  jest odległością między środkami łuków kołowych.



Rys. 14. Odczytanie wartości wielkości  $E$ .

Obliczony parametr wynosi:

$$A_E = 142,329m$$

Następnie dla obliczonego parametru odczytałem z tablic wartości klotoidy jednostkowej i przeliczyłem na wartości rzeczywiste. W tym przypadku krzywe przejściowe są klotoidami symetrycznymi z punktem symetrii w punkcie przegięcia.

$$l_E = \frac{A_E}{R} = 0,711645$$

Aby dokładnie odczytać wartości elementów klotoidy, należy przeprowadzić interpolację w następujący sposób:

- należy odczytać wartości elementów klotoidy dla dwóch parametrów wejściowych, w których zawiera się parametr obliczony, w tym wypadku  $l_1=0,711$  oraz  $l_2=0,712$ ;
- $\Delta$  jest różnicą pomiędzy elementami klotoidy (np.  $\Delta=\tau_2-\tau_1$ ;  $\Delta=x_2-x_1$ );
- następnie należy policzyć poprawkę dla elementów dla parametru wejściowego  $l_1$ ;
- poprawkę liczymy mnożąc  $\Delta$  przez różnicę  $(l_E-l_1) \cdot 1000$ ;

Tabela obliczeń z arkusza kalkulacyjnego:

l	$\tau$	$\Delta$	x	$\Delta$	y	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	h	$\Delta$	r	$\Delta$
0,711	14,48211	0,040766	0,706471	0,000968	0,059631	0,000251	0,354744	0,000495	0,014942	0,000063	1,40647	-0,001976
0,645	0,02629407		0,00062436		0,000161895		0,000319275		0,000040635		-0,00127452	
0,711645	14,50840407		0,70709536		0,059792895		0,355063275		0,014982635		1,40519548	

Tabela 9: Obliczenia wielkości klotoidy jednostkowej.

Następnie przeliczyłem wartości klotoidy jednostkowej na wartości rzeczywiste:

Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)	Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy		
$\tau''$	14,50840407	16,1204	<i>g</i>
x	0,70709536	100,6401	<i>m</i>
y	0,059792895	8,5103	<i>m</i>
$x_s$	0,355063275	50,5358	<i>m</i>
$h_E$	0,014982635	2,1325	<i>m</i>
l	0,711645	101,2876	<i>m</i>

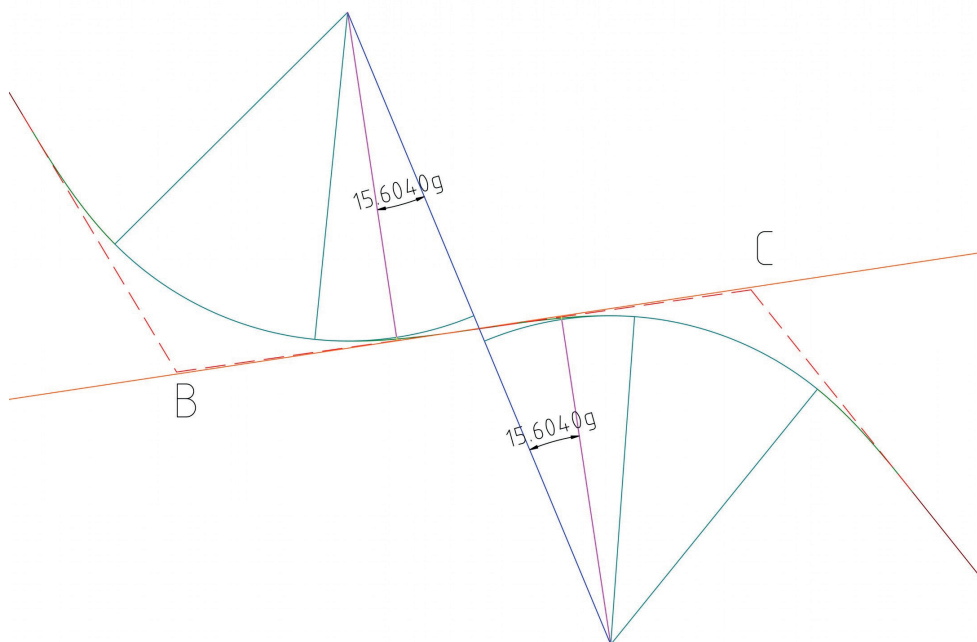
Tabela 10. Wartości klotoidy jednostkowej dla krzywej esowej.

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie osi układu współrzędnych dla układu łuków kołowych i wpisanej między nimi krzywej esowej. W moim przypadku zadanie jest nieco łatwiejsze, gdyż promienie krzywizny łuków kołowych są identyczne, przez co początek układu współrzędnych krzywej esowej znajduje się w miejscu, w którym linia łącząca

środek łuku kołowego  $S_1$  ze środkiem łuku kołowego  $S_2$  przecina oś  $OX$  układu krzywej esowej (główną styczną krzywej). Należy zatem policzyć kąt  $\delta$ :

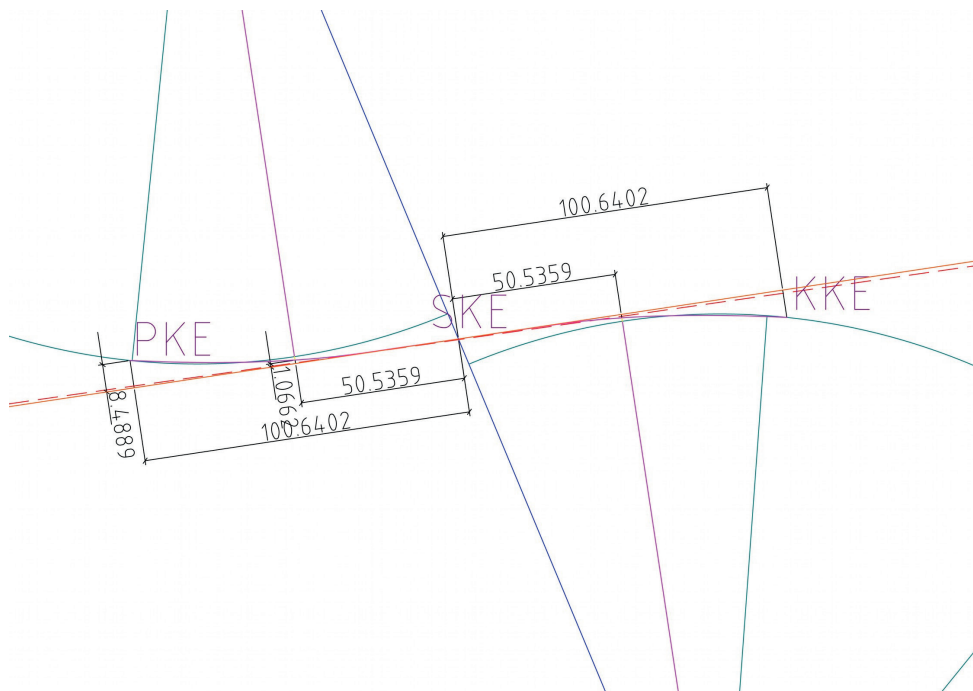
$$\text{skoro } \operatorname{tg} \delta = \frac{2x_s}{2(R+h_E)} \text{ to wówczas: } \delta = 15,6040 \text{ grad.}$$

Następnie po odłożeniu tego kąta od linii łączącej środki łuków kołowych  $S_1$  i  $S_2$  poprowadziłem linię do punktu, w którym przecięła się ona z łukiem kołowym. W tym punkcie odłożyłem wartość  $H_E$ , po obydwu stronach odcinka  $S_1S_2$ , a powstała w ten sposób linia jest styczną główną krzywej esowej (kolor pomarańczowy):



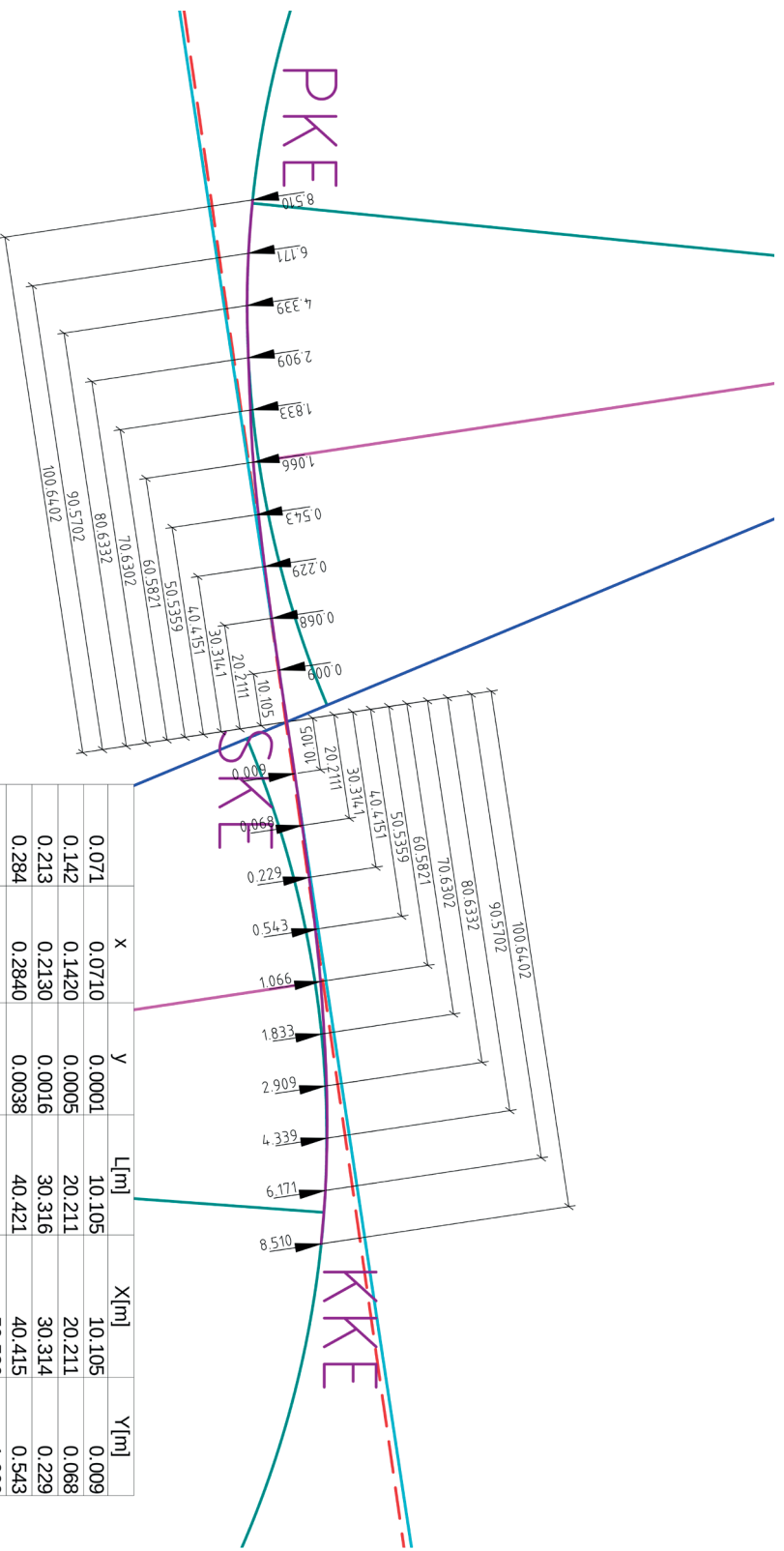
Rys. 15. Projektowanie krzywej esowej.

Kolejnym krokiem było obliczenie punktów pośrednich, także z użyciem tablic. Najpierw odłożyłem wartości  $x_1$ ,  $x_s$ ,  $y_1$ ,  $y_s$  aby określić punkty główne krzywej esowej (początek, środek i koniec). Wartości rzeczywiste odkładałem względem głównej stycznej.



Rys. 16. Punkty główne krzywej esowej.

Punkty pośrednie obliczyłem z użyciem tablic, zakładając krok wartości  $l=0.071$  co daje punkt pośredni co mniej więcej 10 m. Wyniki dokładnych obliczeń zestawiałem w tabeli oraz na szkicu na następnej stronie.



Szkic krzywej esowej łączącej odwrotne łuki kołowe  
Wykaz punktów pośrednich krzywej przejściowej

	X	Y	L[m]	X[m]	Y[m]
	0.0710	0.0001	10.105	10.105	0.009
	0.1420	0.0005	20.211	20.211	0.068
	0.2130	0.0016	30.316	30.314	0.229
	0.2840	0.0038	40.421	40.415	0.543
				50.536	1.066
	0.426	0.0129	60.632	60.582	1.833
	0.497	0.0204	70.737	70.630	2.909
	0.568	0.0305	80.843	80.633	4.339
	0.639	0.0434	90.948	90.570	6.171
	0.712	0.0598	101.288	100.640	8.510

### 3.1.5 Projektowanie krawędzi zewnętrznych trasy oraz uzyskanie poszerzenia jezdni na łuku

Szerokość pasa ruchu określa art. 15 ust. 1 z nowelizacją z 17 lutego 2015 r. i dla mojego projektu przyjąłem szerokość  $D=3.5\text{m}$ . Zgodnie ze wspomnianym wcześniej art.16 ust.1 poszerzenie drogi wynosi  $p=0.20\text{m}$ . W tym samym artykule w ustępie trzecim ustawodawca zaznaczył, że zmianę poszerzenia należy wprowadzać płynnie na prostej lub krzywej przejściowej. Brakuje tam bardziej szczegółowych wytycznych co do tego jak należy wprowadzać poszerzenie drogi. Zmiana poszerzenia pasa drogowego wiąże się ze zmianą przebiegu jednej z jego krawędzi. Rozporządzenie nie mówi jednak o tym, w którą stronę poszerzać pasy ruchu. Literatura podaje, że najczęściej poszerza się pasy ruchu do wewnątrz, a w szczególnych warunkach poszerzenie wprowadza się płynnie w obydwu kierunkach. W moim przykładzie zastosowałem drugi sposób. Poszerzenie, w moim przykładzie jest najmniejsze z przewidzianych w rozporządzeniu, a zmiana poszerzenia będzie następowała na odcinku ok. 85m, 90m oraz 101m. Poza tym trasa zmienia płynnie zwrot w przeciwnych kierunkach, czyli na łuku przy wierzchołku B pas wewnętrzny staje się pasem zewnętrznym na łuku przy wierzchołku C i odwrotnie pas zewnętrzny staje się w następnym łuku pasem wewnętrznym. Aby uzyskać poszerzenie w obydwie strony jezdni, na krzywej przejściowej, musiałem obliczyć parametr A kłotoid stanowiących skrajne krawędzie jezdni. Krzywe te będą miały różne promienie krzywizn adekwatnie pomniejszone lub powiększone o szerokość jezdni oraz poszerzenie. Parametr A krzywych obliczyłem na podstawie następujących związków matematycznych (na podstawie [1]).

Krzywa wewnętrzna:

$$R_w = R - \left(\frac{1}{2}D + p\right) \quad \text{oraz} \quad H_w = H + p$$

Krzywa zewnętrzna

$$R_z = R + \left(\frac{1}{2}D + p\right) \quad \text{oraz} \quad H_z = H - p$$

Oczywiście  $R$  jest promieniem łuku dla osi trasy, natomiast  $D$  jest szerokością jezdni, a  $p$  to poszerzenie.

Kolejne wzory dotyczą związków matematycznych kłotoidy.

$$A = \frac{H}{h} \quad A = \frac{R}{r} \quad \mu = \frac{H}{R} \quad \mu = \frac{h}{r} \quad A = Rl$$

Następnie narysowałem skrajne łuki kołowe stanowiące zewnętrzną i wewnętrzną krawędź jezdni. Łuk wewnętrzny ma promień krzywizny mniejszy o poszerzoną szerokość

pasa drogowego i odpowiednio łuk wewnętrzny ma promień krzywizny większy o tę wartość. Dla nich zaprojektowałem klotoidy, które zapewnią płynność jazdy oraz poszerzenie pasa ruchu bez widocznych załamania krawędzi jezdni.

Poniżej w tabelach zamieściłem wyniki obliczeń dla kolejnych krzywych.

Zastosowałem metodę taką samą jak w przypadku projektowania klotoid przejściowych na osi trasy.

Łuk B - krzywa zewnętrzna.

$R_z$	203.7	<i>m</i>
$H_z$	1.740	<i>m</i>
$\mu_z$	0.00854	
$l_z$	0.67321	
$A_z$	137.13	<i>m</i>

Następnie wykonałem zadanie interpolacyjne aby określić pozostałe elementy klotoidy jednostkowej.

l	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	x	$\Delta$	y	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	h	$\Delta$	r	$\Delta$	$\mu$	$\Delta$
0.673	0.001	12.97546	0.038589	0.669557	0.000974	0.050618	0.000225	0.335926	0.000495	0.012678	0.000056	1.485884	-0.002204	0.008532	0.000051
0.673211	0.0002112	12.983608	0.0081482	0.669763	0.00020566	0.050666	4.7509E-05	0.336031	0.00010452	0.012690	1.182E-05	1.485419	-0.000465	0.0085428	
0.674		13.014049		0.670531		0.050843		0.336421							

Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy	
$\tau''$	12.983608164	14.426231	<i>g</i>
x	0.6697626625	91.846044	<i>m</i>
y	0.0506655093	6.947874	<i>m</i>
$x_s$	0.3360305205	46.080613	<i>m</i>
h	0.0126898245	1.7401839	<i>m</i>
l	0.6732111525	92.318943	<i>m</i>

$T_1'$	136.407 <i>m</i>
$T_1$	135.119 <i>m</i>

Styczne odmierzam wzdłuż odcinka A'B',  
równoległego do odcinka AB.

Następnie obliczyłem punkty pośrednie:

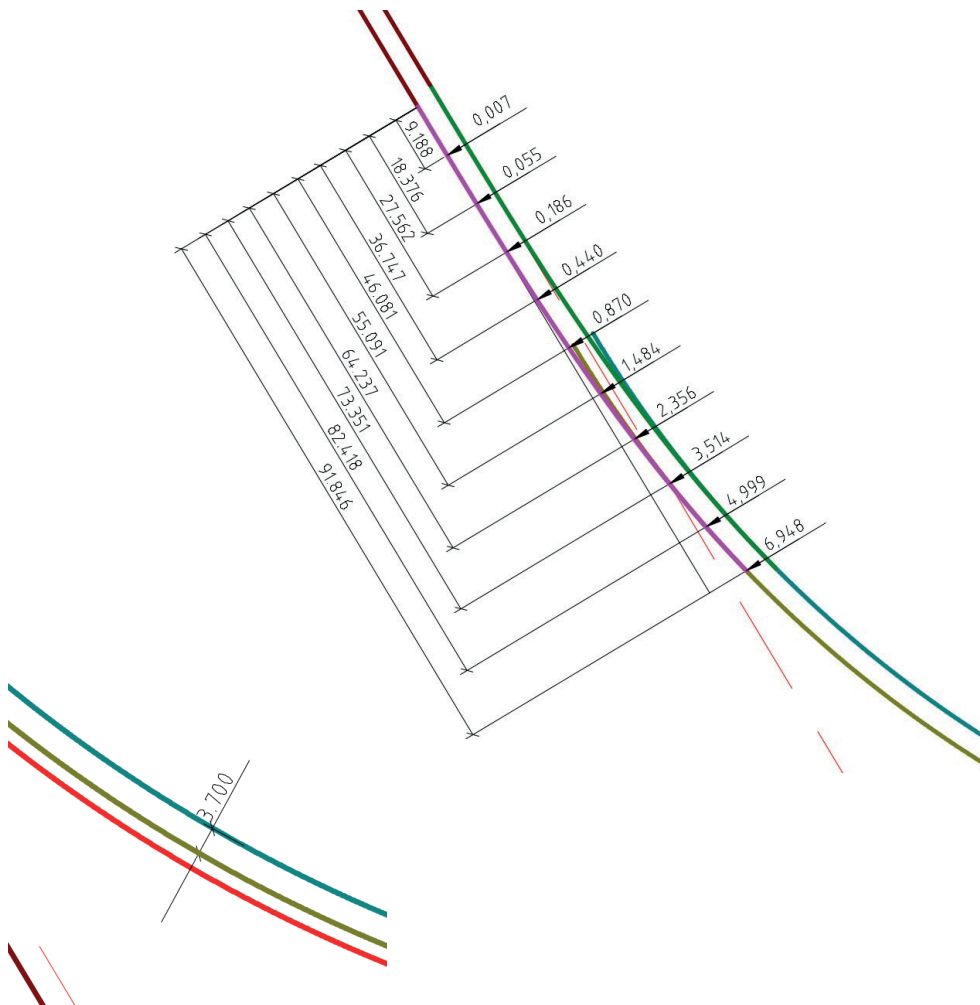
	x	y	L[m]	X[m]	Y[m]
0.067	0.067	0.000	9.188	9.188	0.007
0.134	0.134	0.000	18.376	18.376	0.055
0.201	0.201	0.001	27.564	27.562	0.186
0.268	0.268	0.003	36.751	36.747	0.440
-	-	-	-	46.081	0.870
0.402	0.402	0.011	55.127	55.091	1.484
0.469	0.468	0.017	64.315	64.237	2.356
0.536	0.535	0.026	73.503	73.351	3.514
0.603	0.601	0.036	82.691	82.418	4.999
0.673	0.670	0.051	92.319	91.846	6.948



Przesunięcie poziome oraz nowa styczna:

$T_{01}$	182.488
$\Delta$	1.288

Kolorem zielonym zaznaczona jest oś drogi na odcinku krzywej przejściowej. Kolorem magenta zaznaczona została krawędź zewnętrzna. Kolorem czerwonym zaznaczyłem łuk kołowy na zewnątrz przed przesunięciem, a kolorem ciemnożółtym po przesunięciu. Na zbliżeniu widać uzyskane poszerzenie 0.2m pasa drogi.



Rys. 17. Łuk B - krzywa zewnętrzna - punkty pośrednie.

## Łuk B - krzywa wewnętrzna.

$R_w$	196.300	<i>m</i>
$H_w$	2.140	<i>m</i>
$\mu_w$	0.010903	
$l_w$	0.715631	
$A_w$	140.479	<i>m</i>

## Zadanie interpolacyjne:

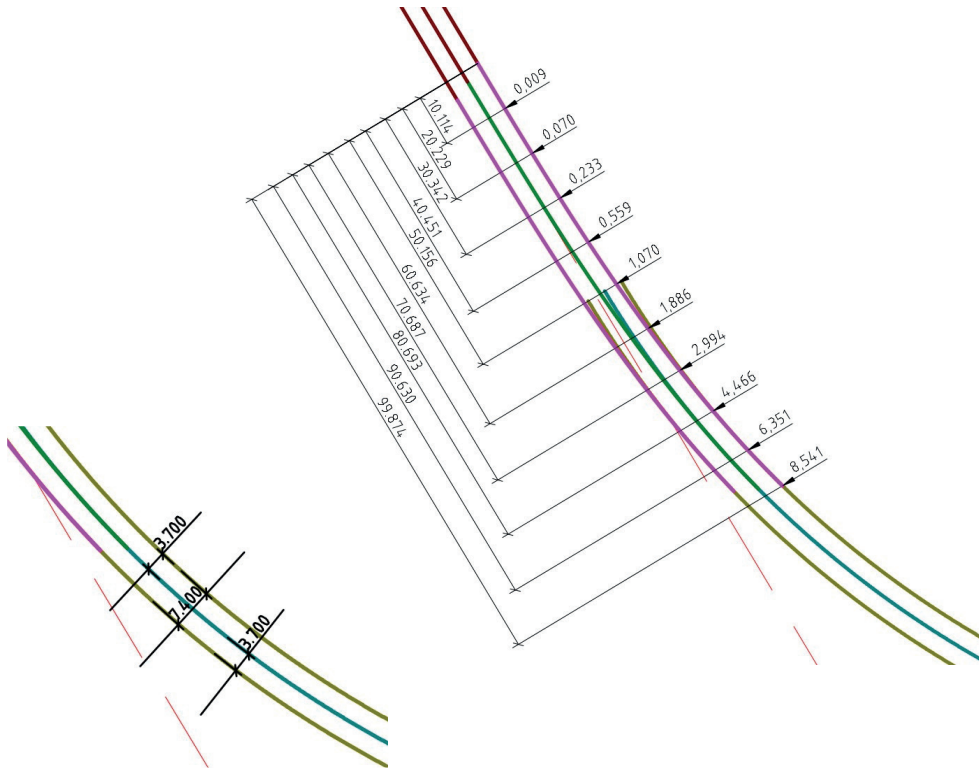
$l$	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	$x$	$\Delta$	$y$	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	$h$	$\Delta$	$r$	$\Delta$	$\mu$	$\Delta$
0.715	0.001	14.645517	0.040996	0.710342	0.000968	0.060637	0.000253	0.356723	0.000494	0.015195	0.000063	1.398601	-0.001953	0.010864	0.000061
0.71563125	0.0006313	14.6713958	0.0258788	0.7109531	0.00061105	0.06079671	0.00016	0.357035	0.000312	0.0152348	3.977E-05	1.397368165	-0.0012328	0.01090251	
0.716		14.686513		0.71131		0.06089		0.357217		0.015258		1.396648		0.010925	

Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy			
$\tau''$	14.6714	16.3016	<i>g</i>	$T_1$	131.759
$x$	0.71095	99.874	<i>m</i>	$T_1$	130.471
$y$	0.06080	8.541	<i>m</i>		
$x_s$	0.35703	50.156	<i>m</i>		
$h$	0.01523	2.140	<i>m</i>		
$l$	0.71563	100.531	<i>m</i>		

## Obliczenia punktów pośrednich:

	$x$	$y$	$L[m]$	$X[m]$	$Y[m]$		
0.072	0.072	0.000062	10.114	10.114	0.009	$T_{01}$	181.915
0.144	0.143998	0.000498	20.229	20.229	0.070	$\Delta$	1.288
0.216	0.215988	0.001656	30.343	30.342	0.233		
0.288	0.28795	0.003981	40.458	40.451	0.559		
-	-	-	-	50.156	1.070		
0.432	0.431624	0.013429	60.687	60.634	1.886		
0.504	0.503188	0.021313	70.801	70.687	2.994		
0.576	0.574417	0.031788	80.916	80.693	4.466		
0.648	0.645149	0.045207	91.030	90.630	6.351		
0.71563	0.71095	0.06080	100.531	99.874	8.541		

Uzyskane poszerzenie jezdni:



Rys. 18. Łuk B - krzywa wewnętrzna - punkty pośrednie.

Łuk C - krzywa zewnętrzna.

$R_z$	203.70	m
$H_z$	1.331	m
$\mu_z$	0.006536	
$A_z$	128.240	m

Interpolacja:

$l$	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	$x$	$\Delta$	$y$	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	$h$	$\Delta$	$r$	$\Delta$	$\mu$	$\Delta$
0.629	0.001	11.33428	0.036067	0.626543	0.00098	0.041361	0.000196	0.31409	0.000497	0.010355	0.000049	1.589825	-0.002523	0.006513	0.000042
0.629548	0.00054841	11.35406	0.01978	0.62708	0.0005374	0.041468	0.000107489	0.31436256	0.00027256	0.0103819	2.6872E-05	1.5884413518	-0.001383648	0.0065360334	
0.63		11.37035		0.627523		0.041557		0.314587		0.010404		1.587302		0.006555	

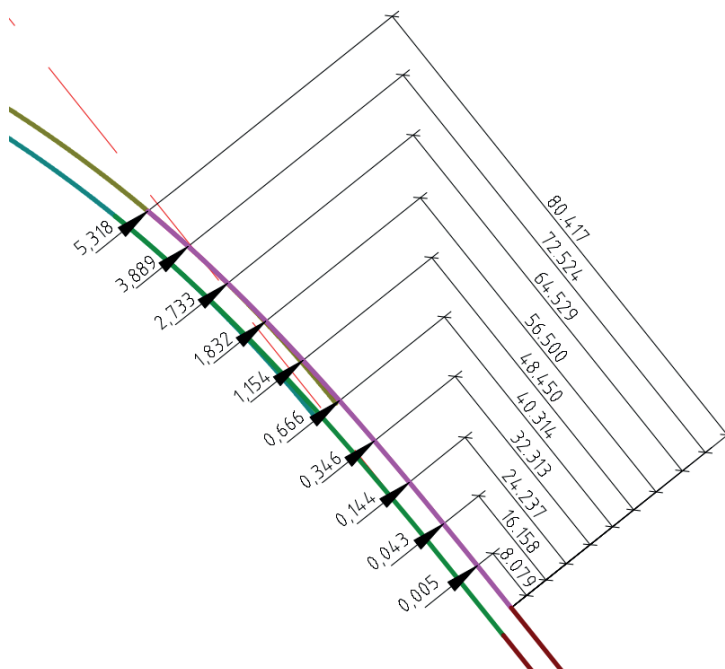
Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy	
$\tau''$	11.3541	12.6156	$g$
$x$	0.627080	80.417	$m$
$y$	0.041468	5.318	$m$
$x_s$	0.314363	40.314	$m$
$h$	0.010382	1.331	$m$
$l$	0.629548	80.733	$m$

$T_{1'}$	117.115
$T_1$	116.240

Obliczenia punktów pośrednich:

	$x$	$y$	$L[m]$	$X[m]$	$Y[m]$
0.063	0.063	0.000042	8.079	8.079	0.005
0.126	0.125999	0.000333	16.158	16.158	0.043
0.189	0.188994	0.001125	24.237	24.237	0.144
0.252	0.251975	0.002699	32.316	32.313	0.346
-	-	-	-	40.314	0.666
0.378	0.377807	0.008998	48.475	48.450	1.154
0.441	0.440583	0.014285	56.554	56.500	1.832
0.504	0.503188	0.021313	64.633	64.529	2.733
0.567	0.565537	0.030325	72.712	72.524	3.889
0.6295	0.627080	0.041468	80.733	80.417	5.318

$T_{01}$	157.428
$\Delta$	0.875



Rys. 19: Łuk C - krzywa zewnętrzna - punkty pośrednie.

Łuk C - krzywa wewnętrzna.

$R_w$	196.30	m
$H_w$	1.731	m
$\mu_w$	0.008820	
$A_w$	133.21	m

Interpolacja:

l	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	x	$\Delta$	y	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	h	$\Delta$	r	$\Delta$	$\mu$	$\Delta$
0.678	0.001	13.16898	0.038875	0.674427	0.000974	0.051749	0.000228	0.338404	0.000496	0.012962	0.000057	1.474926	-0.002172	0.008788	0.000052
0.67862	0.00061774	13.19299	0.02401448	0.675029	0.0006017	0.05189	0.000141	0.3387104	0.000306	0.0129972	3.521E-05	1.473584	-0.001342	0.0088201	
0.679		13.20785		0.675401		0.051977		0.3389		0.013019		1.472754		0.00884	

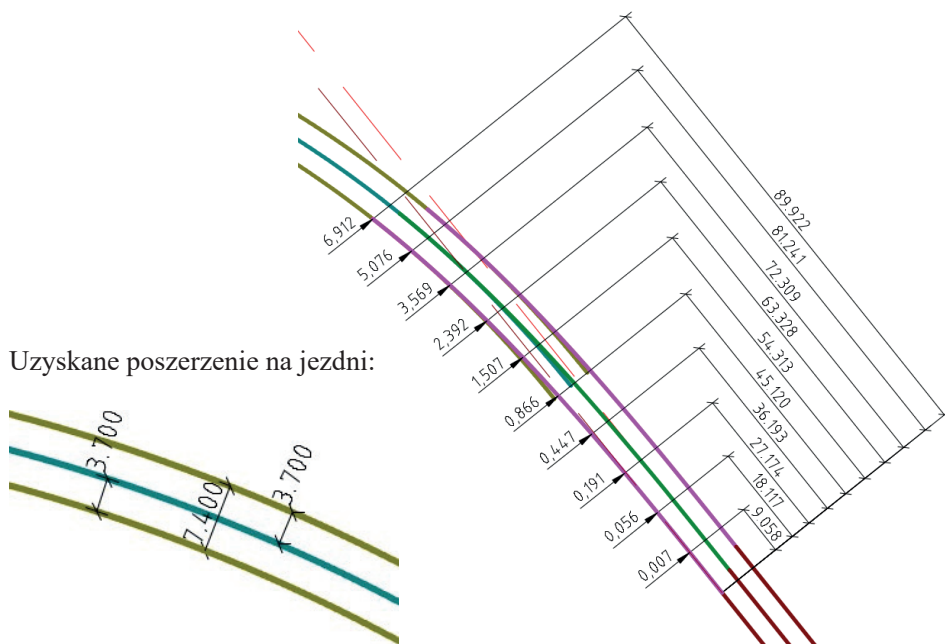
Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy	
$\tau''$	13.168977	13.16898	
x	0.675029	89.922	m
y	0.051890	6.912	m
$x_s$	0.338710	45.120	m
h	0.012997	1.731	m
l	0.678618	90.400	m

$T_1'$	113.12
$T_1$	112.24

Obliczenia punktów pośrednich:

	x	y	L[m]	X[m]	Y[m]
0.068	0.068	0.000052	9.058	9.058	0.007
0.136	0.135999	0.000419	18.117	18.117	0.056
0.204	0.203991	0.001436	27.175	27.174	0.191
0.272	0.271693	0.003354	36.234	36.193	0.447
-	-	-	-	45.120	0.866
0.408	0.407717	0.011314	54.351	54.313	1.507
0.476	0.475389	0.017959	63.409	63.328	2.392
0.544	0.54281	0.02679	72.468	72.309	3.569
0.612	0.609857	0.038108	81.526	81.241	5.076
0.678618	0.675029	0.05189	90.400	89.922	6.912

$T_{01}$	158.237
$\Delta$	0.875



Uzyskane poszerzenie na jezdni:

Rys. 20. Łuk C - krzywa zewnętrzna – punkty pośrednie.

Między łukami krawędzie skrajne również zaprojektowałem jako krzywe esowe. Tutaj jednak krzywa esowa łączy łuki o różnych promieniach krzywizny  $R_w$  i  $R_z$ . Obliczenia zestawilem poniżej:

R	10807.111
$\text{tge}$	0.005410
$\varepsilon$	0.005410
$L_E$	202.541

$A_E$	142.293	m
-------	---------	---

$L_{1E}$	0.698541
$L_{2E}$	0.724874

	rad	deg	grad
$\delta$	0.2449473	14.03445	15.59383
F	1.822	m	

Interpolacja wartości klotoidy jednostkowej dla łuku o większym promieniu:

l	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	x	$\Delta$	y	$\Delta$	xs	$\Delta$	h	$\Delta$	r	$\Delta$
0.698	0.001	13.95736		0.693869	0.000971	0.056438	0.00024	0.348311	0.000495	0.01414	0.00006	1.432665	-0.00205
0.69854				0.694394	0.000525	0.056569	0.00013	0.34857856	0.000268	0.0141724	3.24E-05	1.431557	-0.001108
0.699				0.69484		0.05668		0.348806		0.0142		1.430615	

Obliczenie punktów pośrednich:

Wartości klotoidy jednostkowej (wg tablic Lipińskiego)		Wartości rzeczywiste dla projektowanej klotoidy	
$\tau''$			
x	0.694394	98.807	m
y	0.056569	8.049	m
$x_s$	0.348579	49.600	m
h	0.014172	2.0166	m
l	0.698541	99.397	m

	x	y	L[m]	X[m]	Y[m]
0.07	0.07	0.000057	9.960	9.960	0.008
0.14	0.139999	0.000457	19.921	19.921	0.065
0.21	0.20999	0.001543	29.881	29.880	0.220
0.28	0.279957	0.003658	39.842	39.836	0.521
-	-	-	-	49.600	1.008
0.42	0.419673	0.012341	59.763	59.716	1.756
0.49	0.489294	0.019588	69.723	69.623	2.787
0.56	0.558625	0.029218	79.684	79.488	4.158
0.63	0.627523	0.041557	89.644	89.292	5.913
0.69854	0.69439385	0.056569	99.397	98.807	8.049

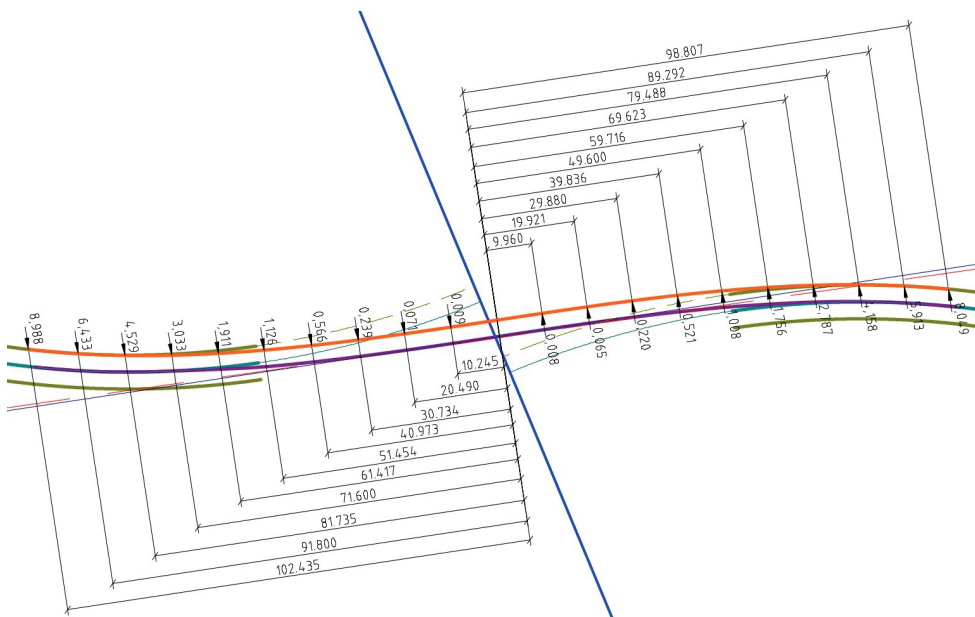
Interpolacja wartości klotoidy jednostkowej dla łuku o mniejszym promieniu:

l	$\Delta$	$\tau$	$\Delta$	x	$\Delta$	y	$\Delta$	$x_s$	$\Delta$	h	$\Delta$	r	$\Delta$
0.724	0.001			0.719043	0.000965	0.062941	0.000259	0.361173	0.000494	0.015774	0.000065	1.38122	-0.00191
0.7248737				0.7198861	0.00084311	0.063167	0.000226	0.3616046	0.000432	0.0158308	5.68E-05	1.37955	-0.00166
0.725				0.720008		0.0632		0.361667		0.015839		1.37931	

Obliczenie punktów pośrednich:

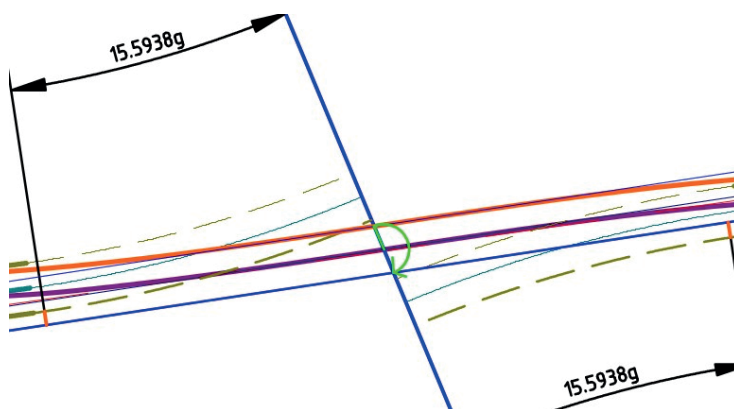
	x	y	L[m]	X[m]	Y[m]
0.072	0.072	0.000062	10.245	10.245	0.009
0.144	0.143998	0.000498	20.490	20.490	0.071
0.216	0.215988	0.00168	30.735	30.734	0.239
0.288	0.28795	0.003981	40.980	40.973	0.566
-	-	-	-	51.454	1.126
0.432	0.431624	0.013429	61.470	61.417	1.911
0.504	0.503188	0.021313	71.716	71.600	3.033
0.576	0.574417	0.031788	81.961	81.735	4.523
0.648	0.645149	0.045207	92.206	91.800	6.433
0.72487369	0.719886	0.063167	103.144	102.435	8.988

Wyniki obliczeń przedstawiłem na szkicu:



Rys. 21. Krawędź zewnętrzna krzywej esowej - punkty pośrednie.

Krawędź równoległa również jest krzywą esową o takich samych parametrach lecz o innym usytuowaniu. Należy więc obrócić powstałą krzywą (kolor pomarańczowy) z punktem obrotu w punkcie przecięcia się linii łączącej środki łuków kołowych z linią główną krzywej esowej osi trasy. Krzywa esowa osi trasy jest zaznaczona kolorem ciemna magenta, natomiast punkt obrotu znajduje się dokładnie pośrodku tej klotoidy. Pomysł przedstawiłem na kolejnym szkicu:



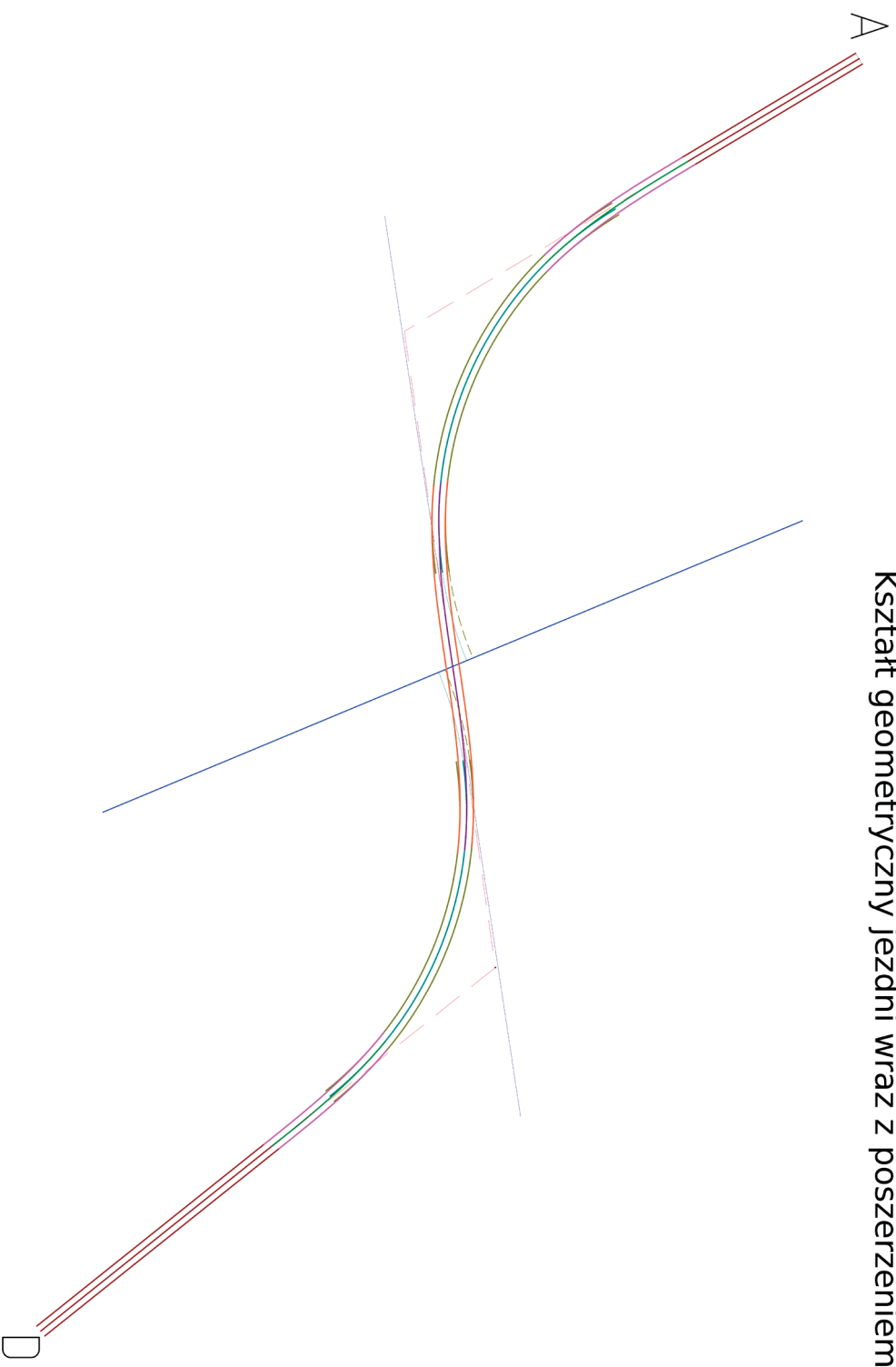
Rys. 22. Obrót krawędzi zewnętrznej.



W ten sposób zaprojektowałem przebieg trasy w płaszczyźnie poziomej. Na następnej stronie zamieściłem szkic z odpowiednio zaznaczonymi krzywymi przejściowymi i łukami kołowymi.

Program LibreCad nie potrafi generować kłotoid więc aby przedstawić przebieg trasy musiałem obliczyć punkty pośrednie i połączyć je splajnem lub, używając innej nazwy, krzywą sklejaną, którą dysponuje program. Krzywa sklejana (cytuując powszechnie dostępne definicje) jest funkcją w postaci wielomianu, składaną z innych funkcji, wygładzoną w punktach które łączy. Tę definicję pozwoliłem sobie zredagować własnymi słowami bazując na źródłach znalezionych w Wikipedii. W skrócie, za pomocą krzywej składanej mogę, w przybliżeniu, przedstawić każdą krzywą jeśli mam dane jej punkty pośrednie. W końcowym opracowaniu, linie przedstawiające krawędź pobocza oraz rowów, przedstawiłem korzystając z narzędzia rysowania linii równoległej o zadanej odległości, w programie LibreCad.

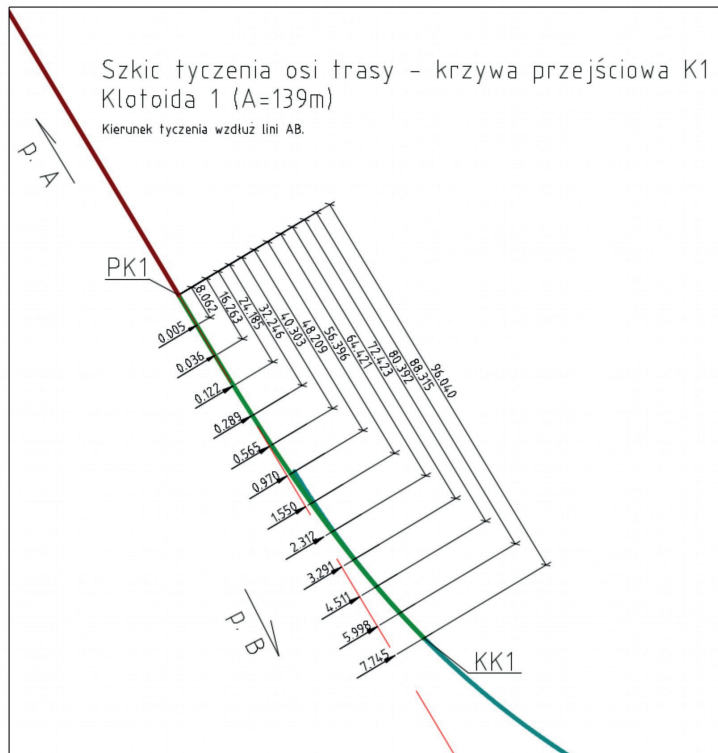
# Kształt geometryczny jezdni wraz z poszerzeniem



### 3.1.6 Przykładowe szkice tyczenia trasy

W moim opracowaniu postanowiłem nie zgłębiać szczegółowo tematu tyczenia trasy ponieważ w mojej pracy poruszam głównie kwestie projektowania, a nie realizacji projektu. Postanowiłem jednak zamieścić przykładowe szkice tyczenia odcinka krzywoliniowego drogi. Częściowo temat ten poruszyłem w poprzednich rozdziałach, zamieszczając szkice kłoid z punktami pośrednimi. Otrzymując projekt trasy, osoba zajmująca się realizacją takiego projektu może, na podstawie określonych parametrów, przygotować szkice do tyczenia krzywych przejściowych metodą rzędnych i odciętych, w taki sam sposób jak pokazałem w poprzednim rozdziale przy projektowaniu krzywych przejściowych. Najpierw należy jednak określić punkty, z których rozpoczniemy tyczenie. Na podstawie przedstawionych do tej pory obliczeń oraz relacji liniowo-kątowych, zaproponowałem sieć poligonową, która może służyć za osnowę realizacyjną tego projektu. Osnowa znajduje się na końcu tego rozdziału.

Poniżej zaproponowałem kilka szkiców tyczenia trasy, standardowymi metodami, stosowanymi w geodezji.



Rys. 22. Szkic tyczenia metodą rzędnych i odciętych.

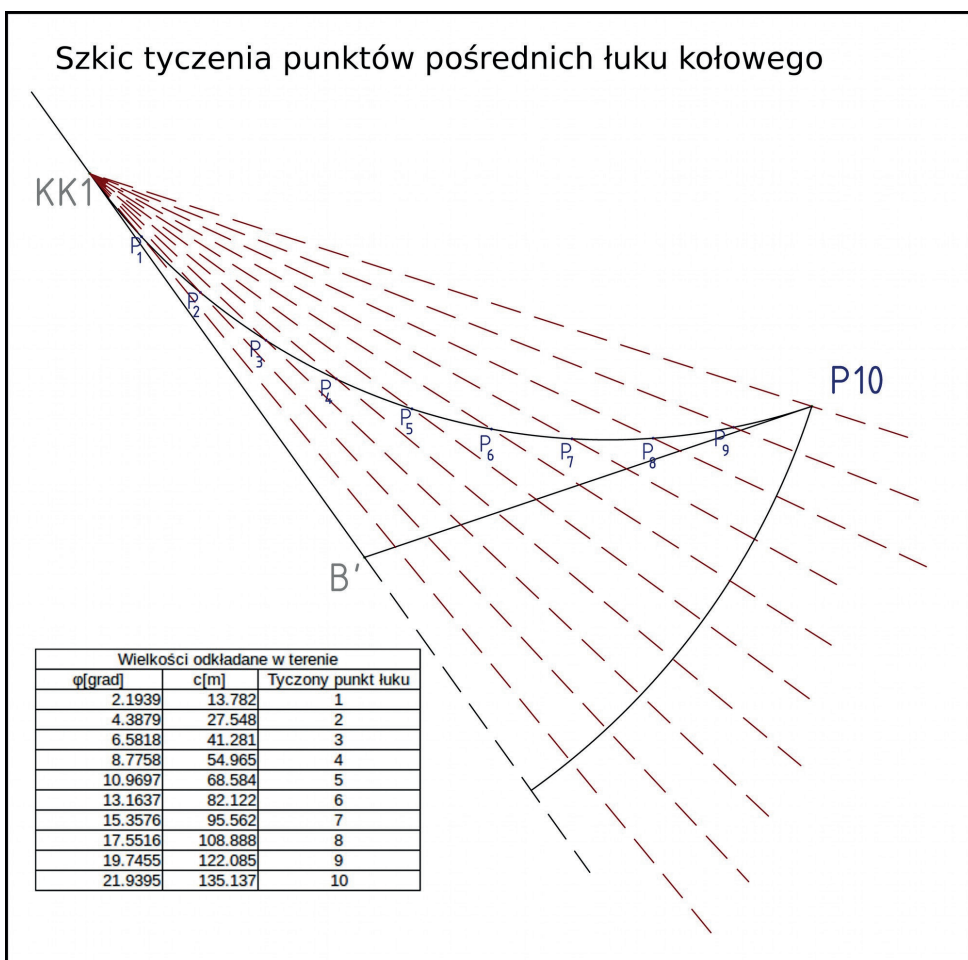
Metoda biegunowa.

Na poniższym szkicu, kolorem czerwonym zaznaczyłem osie celowe teodolitu. Tyczenie polega na odkładaniu kolejnych wartości kąta  $\varphi$  oraz cięciwy  $c$ , zgodnie z tabelką. Wartości uzyskałem wg wzoru:

$$c_n = 2R \sin(n\varphi)$$

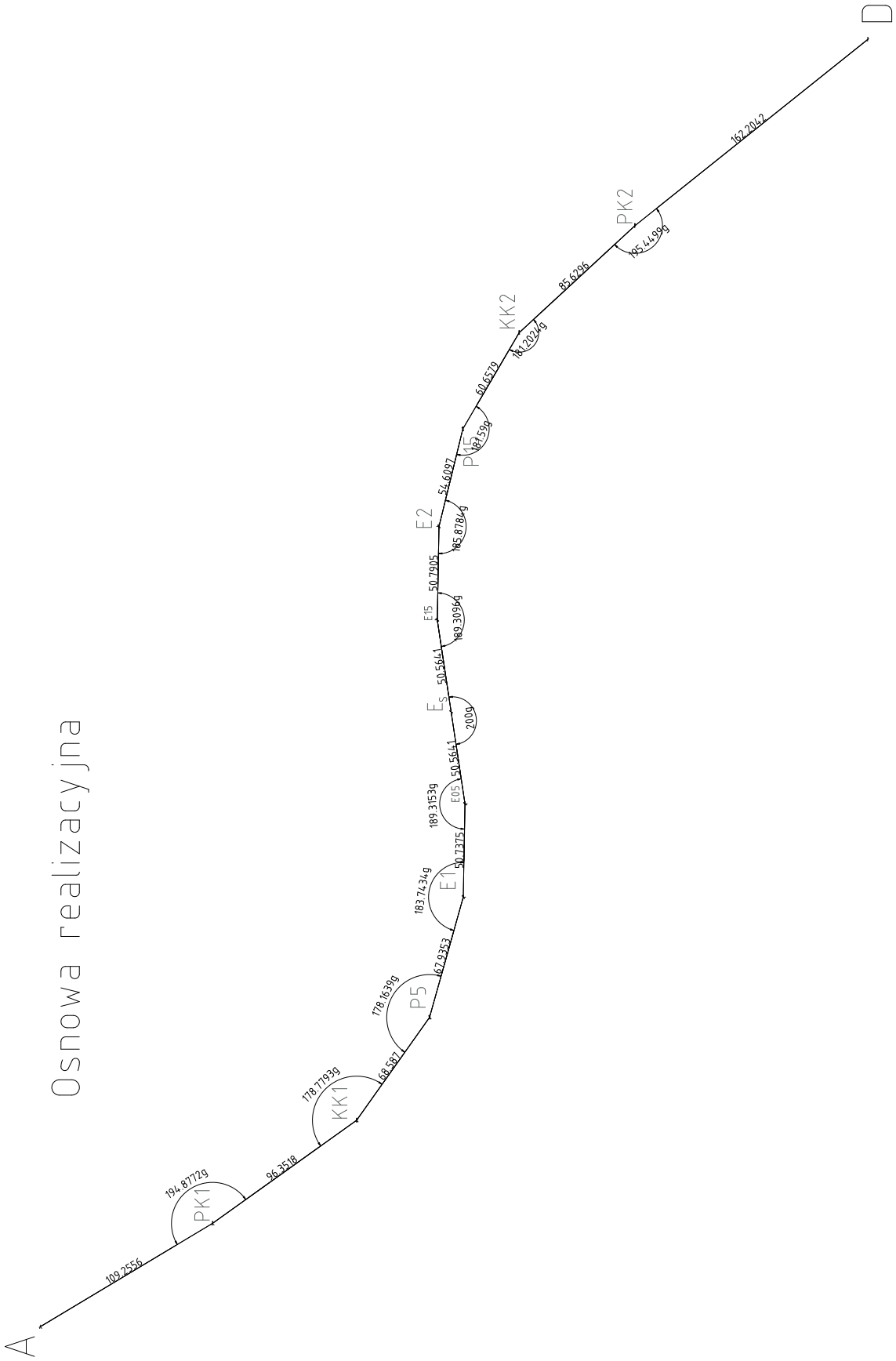
gdzie:

- $R$  jest promieniem łuku kołowego (200 m)
- $2\varphi = \frac{\text{kąt zwrotu stycznych}}{10}$
- $n$  jest  $\langle 1; 10 \rangle$



Rys. 23. Szkic tyczenia metodą biegunową.

# Osnowa realizacyjna



### 3.2 Projektowanie trasy w przekroju podłużnym

Projektowanie niwelety rozpocząłem od zdefiniowania założeń oraz parametrów dla wysokościowego przebiegu trasy. Moim zdaniem, problem można rozwiązać na dwa sposoby. Pierwszy sposób zakłada zaprojektowanie dwóch łuków pionowych, wklęsłego i wypukłego, przy czym położenie punktów środkowych łuków poziomych i pionowych pokrywa się. Takie położenie łuków pionowych i poziomych ma na celu zapewnienie harmonii przebiegu trasy. Na etapie projektowania niwelety można uzyskać, w przybliżeniu, zerowy bilans robót ziemnych rozwiązując proste równanie optymalizacyjne, które pozwoli obliczyć wysokość punktów środkowych łuków pionowych. Powstaje natomiast problem co do zachowania uzyskanych cech geometrycznych krzywych przejściowych, gdyż w tym wariantcie rozwiązania zadania w przekroju podłużnym, oś trasy wraz z osiami zewnętrznymi stają się krzywymi przestrzennymi. Przy wybraniu takiego rozwiązania, byłoby mi niezwykle trudno zaprojektować rampę drogową ponieważ nie wiem jak zmieni się długość krzywych przejściowych. Ten wariant przedstawię więc w rozdziale poświęconym programowi Autodesk CivilCad.

Drugie rozwiązanie zakłada, że dwa łuki poziome wraz z krzywymi przejściowymi, przebiegają na odcinku poziomym niwelety bez spadku, zaś ewentualne łuki pionowe znajdują się na odcinku prostym. Tutaj również należy rozwiązać równanie optymalizacyjne tak aby zbilansować masy ziemi wykopów i nasypów. Należy jednak zauważyć, że nawet w przypadku osiągnięcia akceptowalnego bilansu robót ziemnych, to jednak niweleta w tym wariantcie charakteryzuje się większymi różnicami rzędnych między projektowaną trasą a istniejącą rzeźbą terenu. W efekcie będzie to oznaczać wykonanie głębszych wykopów lub wyższych nasypów, co w porównaniu z wariantem pierwszym, może zwiększyć koszty realizacji robót ziemnych. To rozwiązanie może wydawać się mniej eleganckie lecz jest łatwiejsze do opracowania, zwłaszcza że na tym etapie, wszystkie obliczenia wykonuję samodzielnie ograniczając ułatwienia dostarczane przez współczesne oprogramowanie do minimum.

W tym rozdziale przedstawię więc wariant prostszy przebiegu trasy w przekroju podłużnym, z poziomym odcinkiem dla odcinka krzywoliniowego trasy.

#### 3.2.1 Założenia projektowe dla niwelety

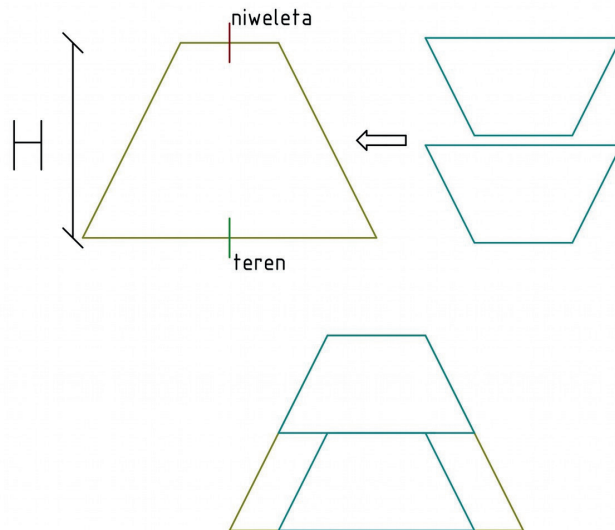
Zgodnie z przywoływanym wcześniej rozporządzeniem (Dz.U.1999.43.430) przyjąłem następujące założenia dla projektu niwelety:

- nachylenie odcinka niwelety nie może przekraczać 7% (zgodnie z art.24 ust.2);
- na podstawie art.24 ust.7 promień krzywej wypukłej ma być nie mniejszy niż 3000m;
- promień krzywej wklęsłej ma być nie mniejszy niż 1800m;

Sprawny spływ wody z jezdni będzie zapewniony przez pochylenie poprzeczne drogi o przekroju daszkowym i pochyleniu 2% oraz odpowiednio zaprojektowanym pochyleniu poprzecznym na krzywej przejściowej i łuku (projekt rampy przedstawiłem w rozdziale 3.3.).

### 3.2.2 Opracowanie parametrów niwelety

Parametrami, które musiałem obliczyć, są promienie łuków pionowych oraz punkty, w których się one znajdują. Najpierw określiłem wstępny przebieg niwelety tak aby otrzymać przybliżony, zerowy bilans robót ziemnych.

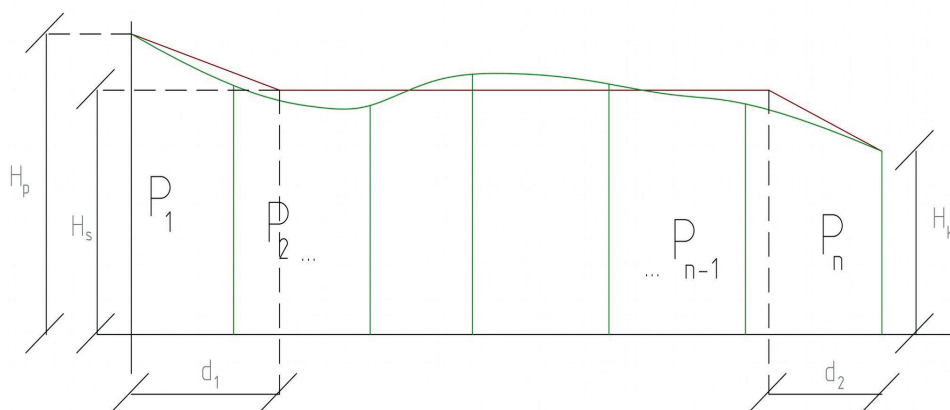


Rys. 24. Bilans mas ziemi.

Aby uzyskać bilans robót ziemnych bliski zeru, rozwiążę równanie optymalizacyjne, którego wynikiem będą wysokości punktów załamania niwelety. Przybliżenie polega na tym, że będę porównywał pole powierzchni pod wykresem zamiast faktycznych mas ziemi. Sytuacja zbilansowanych mas ziemi na profilu podłużnym, wygląda tak, że to co wystaje ponad niweletę, uzupełnia pustą przestrzeń pod nią. Należy pamiętać jednak o tym, że nie jest to dokładne obliczanie mas ziemi. Nasypy i wykopu są w kształcie prostopadłościanu o podstawie trapezu, co jest kolejnym przybliżeniem. Może zaistnieć taka sytuacja gdzie nasyp o wysokości  $H$  zbilansujemy dwoma wykopami o głębokości  $0.5H$  albo czterema wykopami o głębokości  $0.25H$ , co przedstawiłem na rysunku. Im większa jest różnica między wysokością pryzmy nasypu(wykopu) a wysokością pryzm wykopów(nasypów), które mają się bilansować, tym większy będzie ujemny bądź dodatni

bilans robót ziemnych. Dlatego w miarę możliwości, dobrze jest pilnować tego aby bilansowały się nawzajem przyzmy podobnej wysokości. Na dokładność tego podejścia ma wpływ także model terenu na jakim pracujemy. Dlatego też zaleca się aby niweleta przebiegała możliwie blisko terenu, co jednak, w moim przypadku, burzyłoby wcześniej realizowaną koncepcję projektu.

Według przyjętych założeń, mogę przyjąć, że pole powierzchni pod linią załamania niwelety (kolor czerwony) musi się równać polom powierzchni pod linią rzeźby terenu (kolor zielony), co przedstawiłem na szkicu.



Rys. 25. Projektowanie niwelety

(szkic koncepcyjny, nie jest sporządzony w skali)

Niweletę zaprojektowałem tak aby spełniała następujące równanie:

$$\text{polepowierzchnipodliniąterenu} = \text{polepowierzchnipodliniąniwelety}$$

Punkty początkowy i końcowy trasy, przyjmuję jako stałe. Łuki pionowe nie mogą być zaprojektowane w tej części trasy gdzie przebiegają krzywe przejściowe, a odległości  $d_1$  i  $d_2$  są nie mniejsze od stycznych łuków pionowych. Zatem przyjąłem, że odległości  $d_1$  i  $d_2$  mają odpowiednio długość:

$$d_1 = \frac{109,256}{2} \quad d_2 = \frac{162,256}{2}$$

- 109,256 m to odległość od p. A do początku krzywej przejściowej K1;
- 162,256 m to odległość od p. D do początku krzywej przejściowej K2.



W ten sposób, jedyną szukaną wartością jest wysokość  $H_s$ , na której przebiega odcinek krzywoliniowy trasy. Aby obliczyć tę wartość, ułożyłem i rozwiązałem proste równanie:

$$\frac{H_p + H_s}{2} d_1 + H_s D + \frac{H_s + H_k}{2} d_2 = \sum P_n$$

Po lewej stronie równania jest pole powierzchni pod linią niwelety, a po prawej jest suma pól powierzchni pod linią terenu. Pola powierzchni liczyłem jako pola trapezów lub prostokątów.  $D$  jest długością odcinka krzywoliniowego trasy.

$$H_s(0.5 d_1 + D + 0.5 d_2) + \frac{H_p}{2} d_1 + \frac{H_k}{2} d_2 = \sum P_n$$

$$H_s = \frac{\sum P_n - \frac{H_k}{2} d_2 - \frac{H_p}{2} d_1}{(0.5 d_1 + D + 0.5 d_2)}$$

Dane:

Hp	116.85
Hk	112.50
d1	54.628
d2	81.102
D	773.517

Rozwiązanie:

Hs	113.900
----	---------

Pochylenie podłużne pochyłych odcinków niwelety jest zgodne z przyjętymi założeniami i wynosi kolejno:

pochylenie		w procentach	
i1	-0.0540	-5.40	%
i2	-0.0173	-1.73	%

Kolejnym krokiem jest określenie wielkości promieni łuków pionowych. Krzywizna łuków pionowych musi być zaprojektowana tak aby była zachowana widoczność przeszkody przed zatrzymaniem lub innego pojazdu podczas wyprzedzania.

Łuk wklęsły.

Pierwszy łuk pionowy trasy, jest łukiem wklęsłym. Najbardziej optymalna wartość krzywizny tego łuku będzie spełniać dwa warunki:

- zachowanie minimalnej odległości widoczności na zatrzymanie przed przeszkodą w nocy;
- długość stycznej łuku nie może być większa niż 109,256 m.

Art. 168 podaje minimalne wartości odległości widoczności celu, w zależności od pochylenia podłużnego trasy oraz prędkości miarodajnej, dla dróg klasy G i wyższych.

Prędkość (km/h)	Najmniejsza odległość widoczności na zatrzymanie (m) na pochyleniu										
	≤ -10%	-8%	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%	8%	≥ 10%
130	—	—	390	350	330	310	300	290	280	—	—
120	—	—	340	310	290	270	260	250	240	—	—
110	—	—	280	260	240	230	220	200		—	
100	—		220	200	180			170		—	
90	190		170		150			130		120	
80	160		140		120			110		100	
70	110		100		90			85		80	
60	80				70			60			
50	55				50			45			
40	40				35						
30	25				20						

Tabela 11. Wymagania widoczności na łuku pionowym Dz.U.1999.43.430 art.168 [5].

Art. 168 w kolejnym ustępie, podaje minimalną wysokość celu (0,30 m) obserwacji, który musi być widoczny z pozycji obserwatora, zlokalizowanego na wysokości 1m. Warunki widoczności na łukach pionowych\*.

Pierwszy warunek przedstawia wzór:

$$S > L: L_{\min} = 2S - \frac{200(H + Stg\beta)}{i_1 \cdot 100}$$

$$L_{\min} = R_{\min} i_1 \quad \text{gdzie} \quad R_{\min} = 1800 \text{ m}$$

Dane do równania:

S	170	
hl	0.6	
	deg	rad
$\beta$	1.00	0.0174532925
$L_{\min}$	97.21	m

Rozwiązanie:

$R_{\min}$	1153.97	m
------------	---------	---

Drugi warunek przedstawia równanie:

$$2t \leq 109,256m$$

gdzie:

- $t$  jest wartością stycznej łuku

$$R \leq \frac{2t}{i_1} \Rightarrow R \leq \frac{109,256}{i_1}$$

stąd:

$$R_{max} = 2022,96m.$$

Łuk wypukły.

Łuk wypukły musi spełniać następujące warunki:

- zachowanie minimalnej odległości widoczności na zatrzymanie przed przeszkodą;
- zachowanie minimalnej odległości widoczności na wyprzedzanie;
- długość stycznej łuku nie może być większa niż 162,256 m.

Pierwszy warunek określa równanie:

$$S > L: L_{min} = 2S - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{i_2}$$

Dane do równania:

S	150
h1	1
h2	0.30
L <sub>min</sub>	51.77

Rozwiązanie:

R <sub>min</sub>	1297.64	m
------------------	---------	---

Drugi warunek dotyczy minimalnej odległości na wyprzedzanie na łuku wypukłym. Zgodnie z rozporządzeniem wynosi ona dla mojego projektu 550 m. Z racji tego że zajmuję się krótkimi odcinkami wskazana odległość to ponad całkowitej długości mojej trasy, a łuk znajduje się na jej końcu, rozpatrywanie tego warunku nie ma sensu.

<b>Prędkość miarodajna drogi</b>	<b>(km/h)</b>	<b>120</b>	<b>110</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>60</b>
<b>Odległość widoczności na wyprzedzanie</b>	<b>(m)</b>	<b>700</b>	<b>650</b>	<b>600</b>	<b>550</b>	<b>500</b>	<b>450</b>	<b>400</b>

Tabela 12. Tabela minimalnej odległości na wyprzedzanie Dz.U.1999.43.430 art.169.[5]

Trzeci warunek, tak jak w przypadku łuku wklęsłego, przedstawiłem równaniem:

$$R \leq \frac{2t}{i_1} \Rightarrow R \leq \frac{162,256}{i_1}$$

którego rozwiązaniem jest

$$R_{max} = 9398,82m.$$

Po przeanalizowaniu wszystkich warunków, przyjąłem poniższe wartości promieni łuków pionowych:

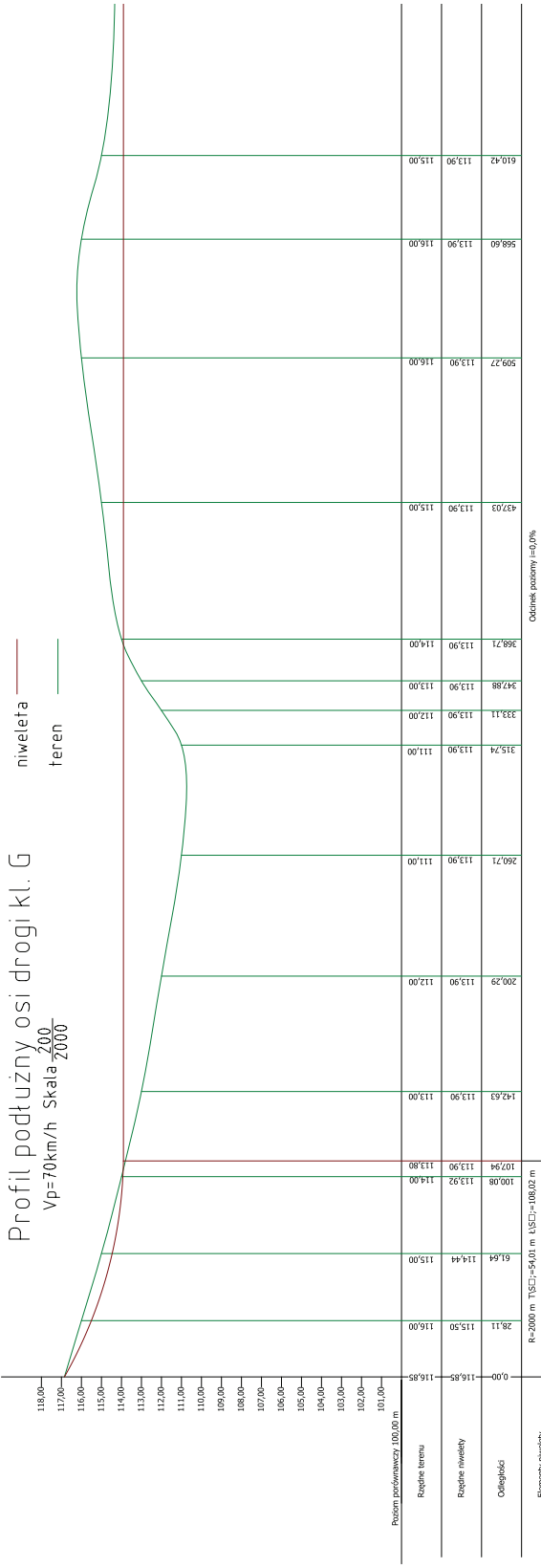
Wybrane promienie łuków pionowych.			
łuk pionowy 1-wklęsły		łuk pionowy 2 – wypukły	
R	2000	R	8000

Po opracowaniu parametrów niwelety, przystąpiłem do wykreślenia profilu podłużnego trasy (wzory użyte do obliczenia wysokości punktów pośrednich łuków pionowych przedstawiłem w rozdziale poświęconemu teorii).

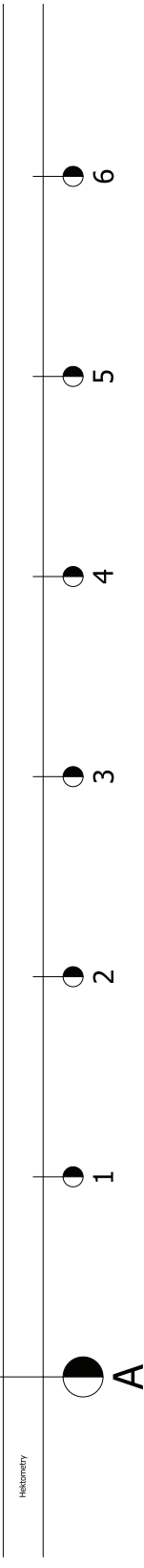
\*Uwaga: Wzory na warunki widoczności na łukach pionowych na podstawie [7].

# Profil podłużny osi drogi kl. G

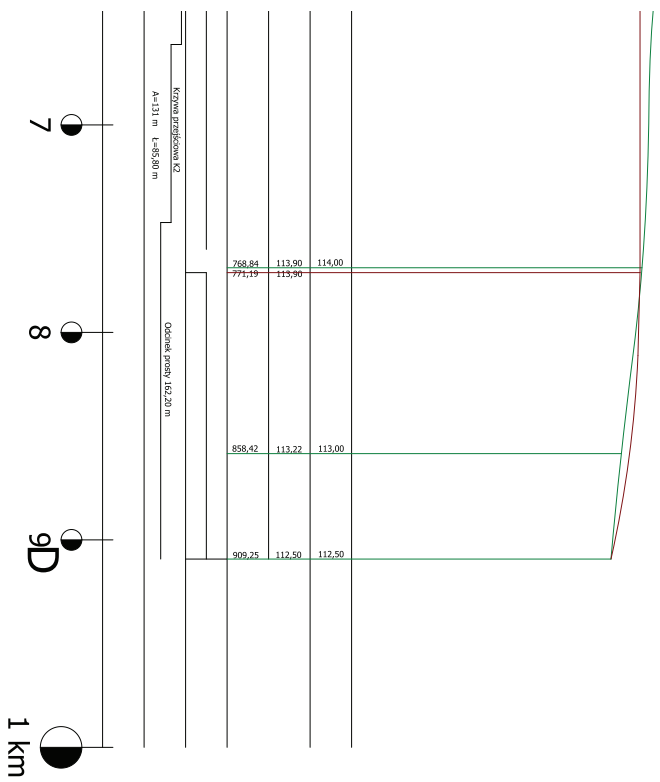
Vp=70km/h Skala  $\frac{200}{2000}$



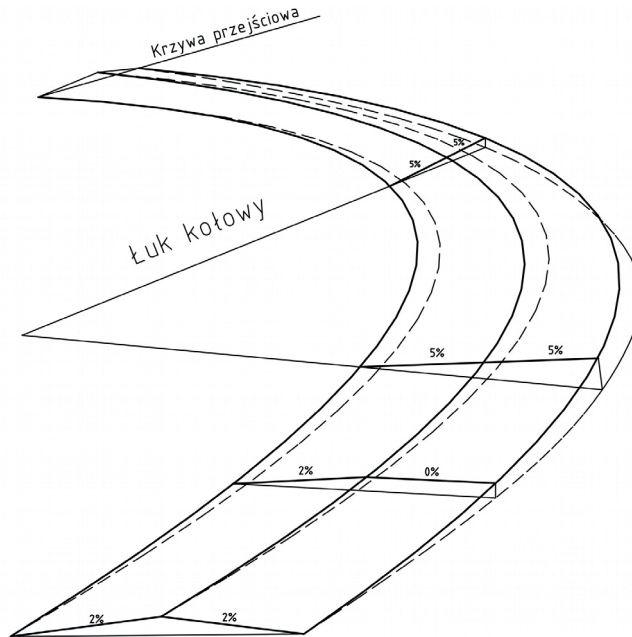
Elementy niwelety	Stacja początkowa	Stacja końcowa	Wysokość początkowa	Wysokość końcowa	Skłony
Proczym parawanowicy	100.00	101.00	116.85	116.85	0.0%
Regulacje niwelety	107.94	113.90	113.90	113.90	0.0%
Odległość	51.64	114.44	115.00	115.00	0.0%
Elementy niwelety	142.63	113.90	113.00	113.00	0.0%
Elementy osi trasy	200.29	113.90	112.00	112.00	0.0%
Elementy niwelety	260.71	113.90	111.00	111.00	0.0%
Elementy osi trasy	315.74	113.90	111.00	111.00	0.0%
Elementy niwelety	333.11	113.90	112.00	112.00	0.0%
Elementy osi trasy	347.88	113.90	113.00	113.00	0.0%
Elementy niwelety	369.71	113.90	114.00	114.00	0.0%
Elementy osi trasy	437.03	113.90	115.00	115.00	0.0%
Elementy niwelety	509.27	113.90	116.00	116.00	0.0%
Elementy osi trasy	568.60	113.90	116.00	116.00	0.0%
Elementy niwelety	610.42	113.90	115.00	115.00	0.0%



Elementy osi trasy	Stacja początkowa	Stacja końcowa	Wysokość początkowa	Wysokość końcowa	Skłony
Łuk łukowy o zaroście w lewo	0+00	0+200	116.85	116.85	0.0%
Łuk łukowy o zaroście w prawo	0+200	0+423.3	116.85	116.85	0.0%
Łuk łukowy o zaroście w prawo	0+423.3	0+646.6	116.85	116.85	0.0%
Łuk łukowy o zaroście w prawo	0+646.6	0+870	116.85	116.85	0.0%
Łuk łukowy o zaroście w prawo	0+870	0+1093.3	116.85	116.85	0.0%
Łuk łukowy o zaroście w prawo	0+1093.3	0+1316.6	116.85	116.85	0.0%

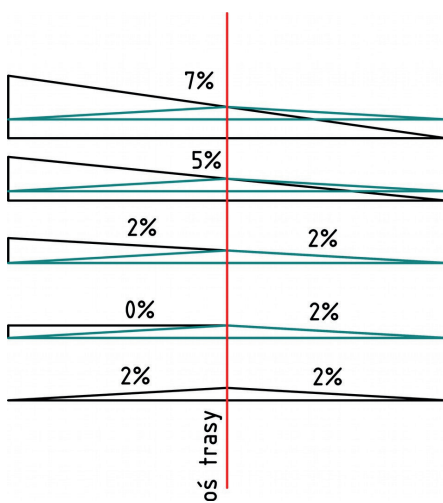


### 3.3 Projektowanie trasy w przekroju poprzecznym



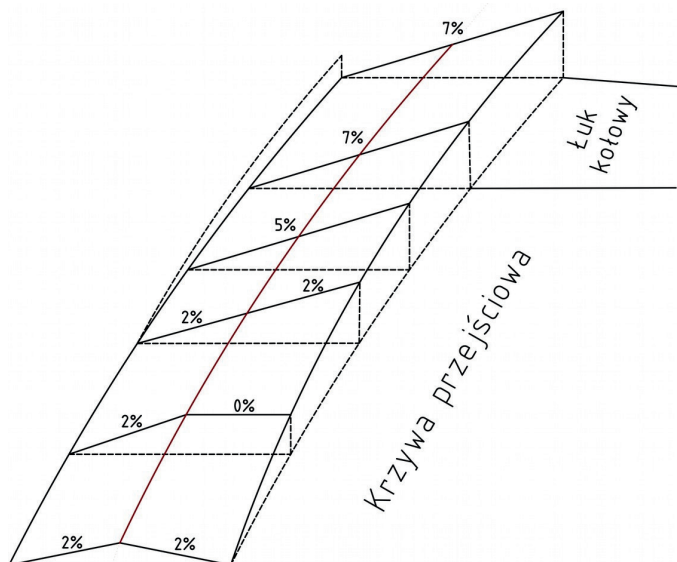
Rys. 26. Rampa drogowa

Art. 17 ust.1 rozporządzenia mówi o pochyleniu poprzecznym, które ma umożliwić swobodny odpływ wody. Dalsze zapisy rozporządzenia regulują kwestie zmiany pochylenia poprzecznego. Dla projektowanej w moim projekcie, trasy, przyjąłem pochylenie poprzeczne 2% dla nawierzchni twardej ulepszonej. Pochylenie poprzeczne zmienia się na łuku kołowym gdzie, zgodnie z tabelą zamieszczoną wcześniej, z art. 21 ust.3 p.2a, osiągnie wartość pochylenia jednostronnego 7%.



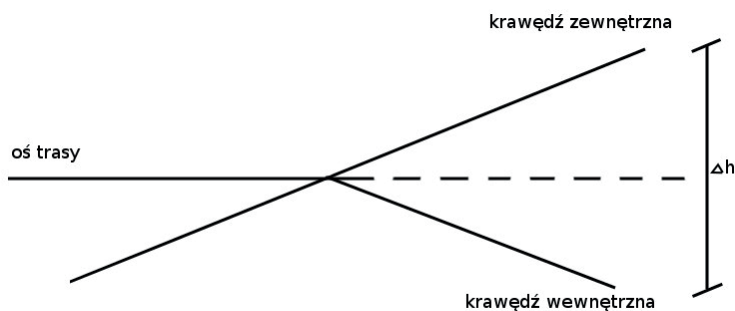
W celu wprowadzenia płynnej zmiany przechyłki na drodze, zaprojektowałem rampy drogowe.

Rampa drogowa jest konstrukcją zmieniającą wysokość krawędzi zewnętrznych jezdni tak aby ułatwić wejście pojazdu w łuk kołowy. W moim projekcie przyjąłem, że wysokość osi trasy nie zmienia się i jest ona osią obrotu jezdni.



Rys. 27. Rampa realizowana na krzywej przejściowej.

### 3.3.1 Projektowanie rampy drogowej\*



Rys. 28. Krawędzie jezdni na rampie.

Art. 17 ust. 4 określa minimalną i maksymalną wartość dodatkowego pochylenia podłużnego krawędzi jezdni. W moim projekcie wartość ta musi się zawierać w granicach  $0,0035 \leq \Delta i \leq 0,016$ .

Do obliczenia elementów rampy wykorzystałem poniższe wzory:

$$\Delta h = 3,5(0,02 + i_p) \quad \text{oraz} \quad L = \frac{\Delta h}{\Delta i}$$

\* na podstawie [8]



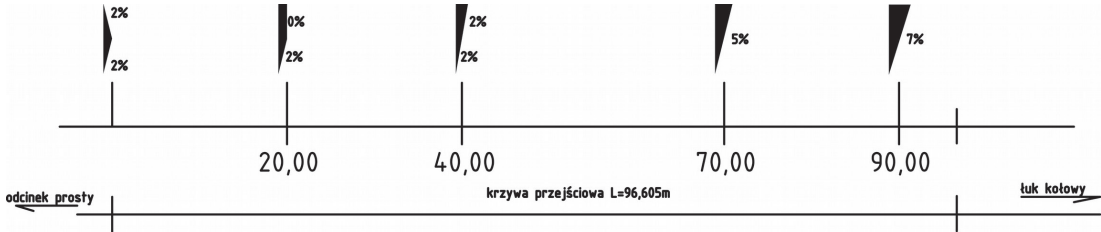
gdzie:

- $\Delta h$  jest różnicą wysokości pomiędzy krawędzią zewnętrzną a wewnętrzną jezdni;
- 0,02 jest początkowym pochyleniem poprzecznym jezdni, a  $i_p$  jest kolejną wartością zwiększającego się pochylenia poprzecznego;
- L jest odległością pomiędzy początkiem a kolejnym punktem rampy;
- 3,5 m do szerokość pasa drogowego, (dodanie poszerzenia nie wpływa na zmianę pochylenia poprzecznego ponieważ jest ono wprowadzane po obu stron jezdni, więc w obliczeniach można przyjąć jedną wartość szerokości pasa); •  $\Delta i$  jest dodatkowym pochyleniem podłużnym krawędzi jezdni

Jeśli dodatkowe pochylenie podłużne krawędzi jezdni  $\Delta i$  jest mniejsze niż dopuszczalne, wówczas należy przyjąć jego minimalną wartość. Rampę projektuje się na krzywej przejściowej, zatem aby sprawdzić powyższy warunek, należy za L wstawić długość krzywej przejściowej. Jeśli warunek nie zostanie spełniony, projektowana rampa będzie krótsza od krzywej przejściowej. Obydwa przypadki występują w moim opracowaniu.

Na następnych stronach zaprezentowałem zaprojektowane rampy drogowe oraz zastosowane w tym projekcie profile poprzeczne drogi.

Rampa drogowa nr.1 na krzywej przejściowej przy łuku B.



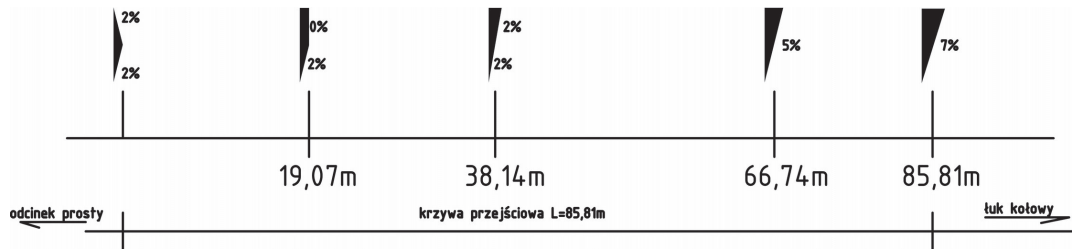
Obliczenia:

D'	7.4 m
szer. pasa	3.7
$\Delta i_{min}$	0.37 %
$\Delta i_{max}$	1.6 %
p	0.2

L	96.605
$\Delta h$	0.333
$\Delta i$	0.345 % warunek nie spełniony

L	96.605			
$\Delta h$	0.333			
$\Delta i$	0.345 % warunek nie spełniony			
L'	90	$i_{min}$	0.0037	
Kolejne etapy				
Pochylenie				
2.00%	0.00%	$\Delta h$	0.074	
		L	20	
2.00%	2.00%	$\Delta h$	0.148	
		L	40	
		5.00%	$\Delta h$	0.259
		L	70	
		7.00%	$\Delta h$	0.333
		L	90	

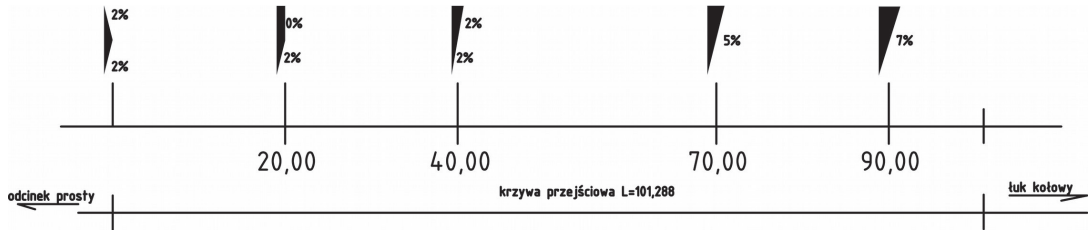
Rampa drogowa nr.2 na krzywej przejściowej przy łuku C.



Obliczenia:

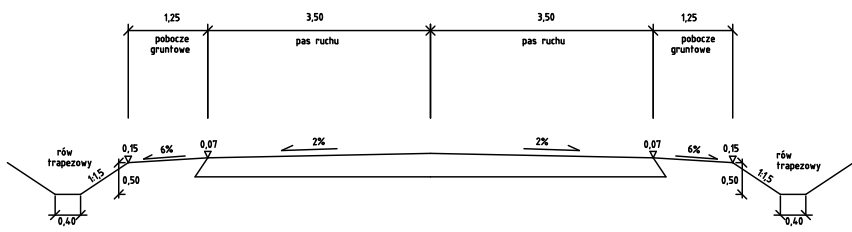
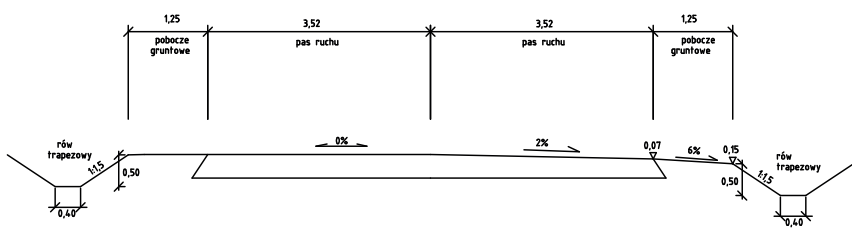
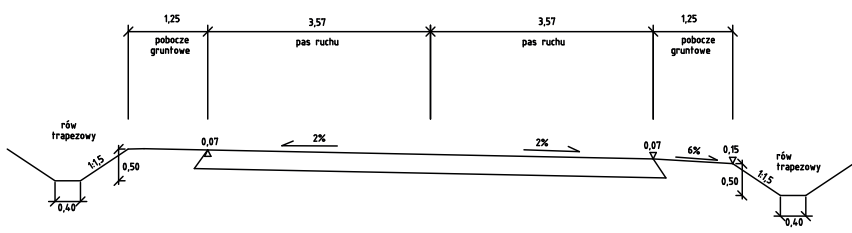
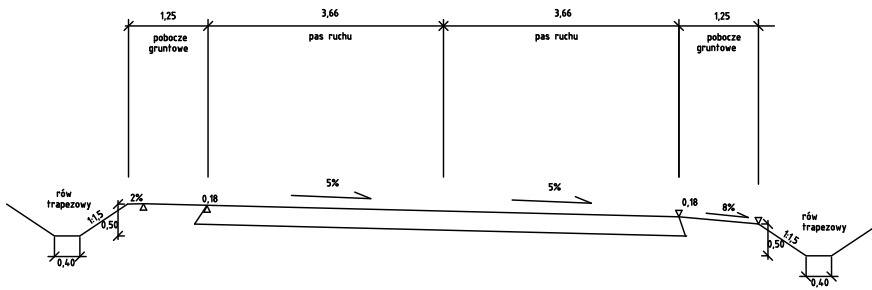
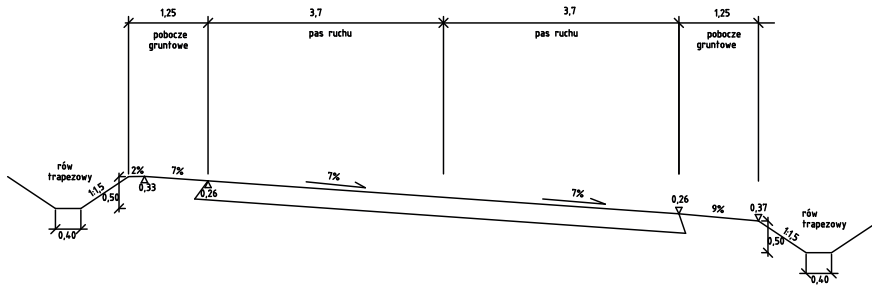
L	85.805		
$\Delta h$	0.333		
$\Delta i$	0.3880892722 %	warunek spełniony	
		$i_{min}$	0.0038808927
Kolejne etapy			
Pochylenie			
2.00%	0.00%	$\Delta h$	0.074
		L	19.0677777778
2.00%	2.00%	$\Delta h$	0.148
		L	38.1355555556
	5.00%	$\Delta h$	0.259
		L	66.7372222222
	7.00%	$\Delta h$	0.333
		L	85.805

Rampa drogowa nr.3 na krzywej esowej:



Obliczenia:

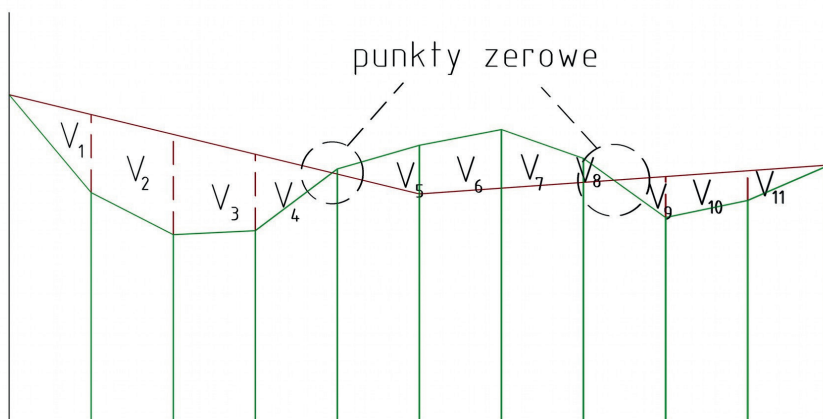
L	101.288
$\Delta h$	0.333
$\Delta i$	0.3287666524 % warunek nie spełniony
L'	90
Kolejne etapy	$i_{min}$ 0.0037
Pochylenie	
2.00%	0.00%
	$\Delta h$ 0.074
	L 20
2.00%	2.00%
	$\Delta h$ 0.148
	L 40
	5.00%
	$\Delta h$ 0.259
	L 70
	7.00%
	$\Delta h$ 0.333
	L 90



### 3.3.2 Obliczenie bilansu robót ziemnych

Obliczenie bilansu robót ziemnych polega na, obliczeniu przybliżonej objętości brył ziemi wykopów oraz nasypów. Podstawą tych obliczeń jest projekt wstępny lub techniczny trasy, czyli przekrój podłużny oraz profile poprzeczne trasy. Opracowanie bilansu robót ziemnych jest bardzo istotnym elementem w procesie realizacji budowy komunikacyjnych, gdyż koszty tworzenia budowli ziemnych oraz transport mas ziemi może stanowić nawet połowę całkowitego kosztu realizacji projektu. Dokładność takiego opracowania zależy oczywiście od zgodności opracowania kartograficznego terenu, które służy za podstawę wykonania projektu oraz metody obliczania pryzm wykopów i nasypów. Celem takiego opracowania jest oczywiście sporządzenie szkiców tyczenia i realizacji wykopów i nasypów w terenie.

Najpierw przystąpiłem do sporządzenia przekrojów poprzecznych trasy. Odległość pomiędzy poszczególnymi przekrojami starałem się dobrać adekwatnie do zmian rzeźby terenu. Gdybym wykonał przekrój poprzeczny np. co stałą odległość 50 m, mógłbym błędnie złagodzić linię terenu. Dlatego też przekroje poprzeczne wykonałem w miejscach gdzie oś trasy przecina warstwicę lub w miejscach z różnych względów kluczowych, jak np. punkt zerowy. Punkt zerowy jest miejscem przejścia wukopu w nasyp lub odwrotnie, czyli jest to punkt widoczny na profilu podłużnym, miejscu przecięcia się niwelety z rzeźbą terenu.



Rys. 29. Punkty zerowe.

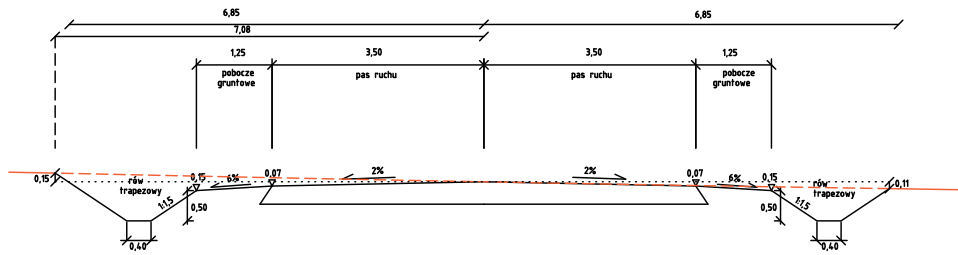
W rozdziale poświęconym rampie drogowej zamieściłem typy profili poprzecznych, wykorzystanych w moim projekcie. Wykonanie profili poprzecznych trasy polegało na dodaniu linii terenu w dany miejscu trasy i przecięcia tej linii ze skarpami nasypów lub

wykopów. W tym celu określiłem wysokości krawędzi zewnętrznych w każdym punkcie, w którym sporządziłem profil poprzeczny. Za krawędź zewnętrzną przyjmowałem krawędź skarpy rowu, a następnie przecinałem ze sobą linię skarpy z linią terenu. Wysokość krawędzi liczyłem na mapie warstwicznej metodą interpolacji i najczęściej blisko warstwic.

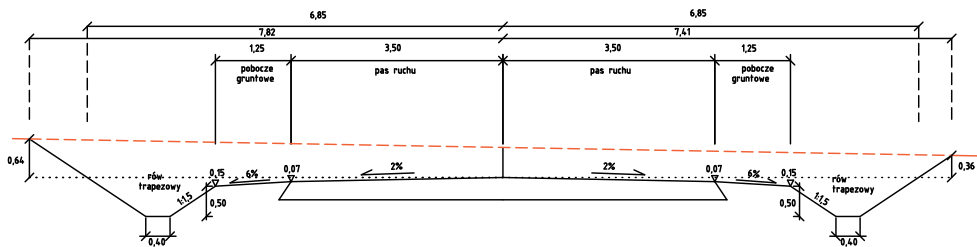
W ten sposób uzyskałem granice robót ziemnych, które wykorzystałem do końcowego opracowania drogi w planie. Granice robót ziemnych naniosłem na mapę, łącząc punkty przecięcia skarp nasypów/wykopów krzywą składaną (splajn).

Na następnych stronach zamieściłem profile poprzeczne trasy.

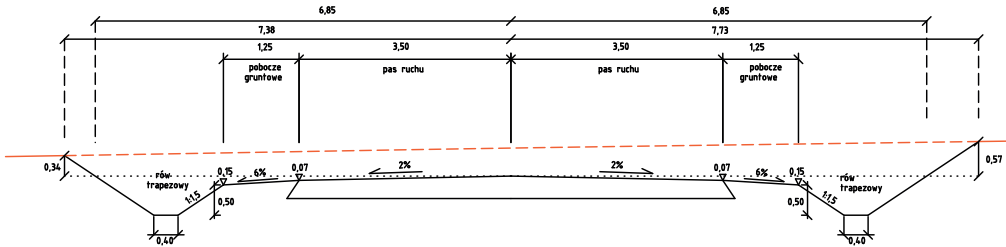
PT  $H_T = 116,85\text{m}$   $H_N = 116,85$



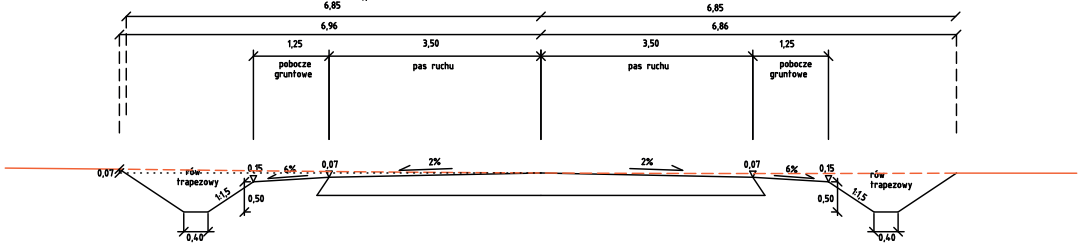
28,11m  $H_T = 116,00\text{m}$   $H_N = 115,504\text{m}$



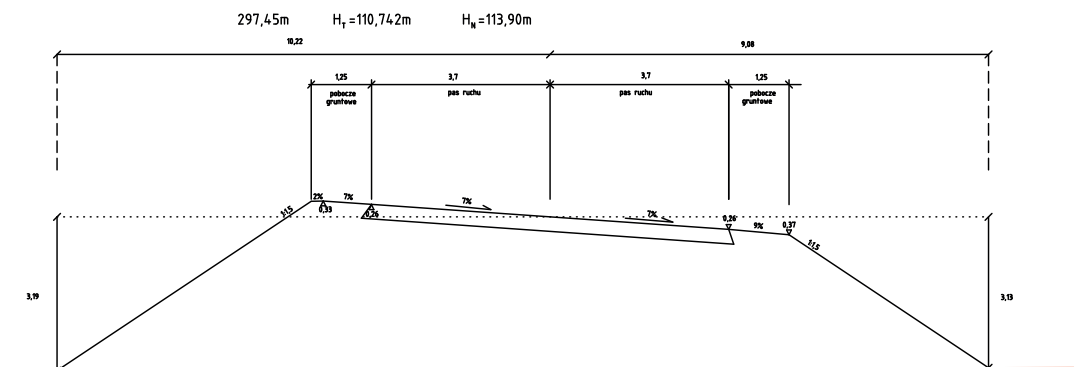
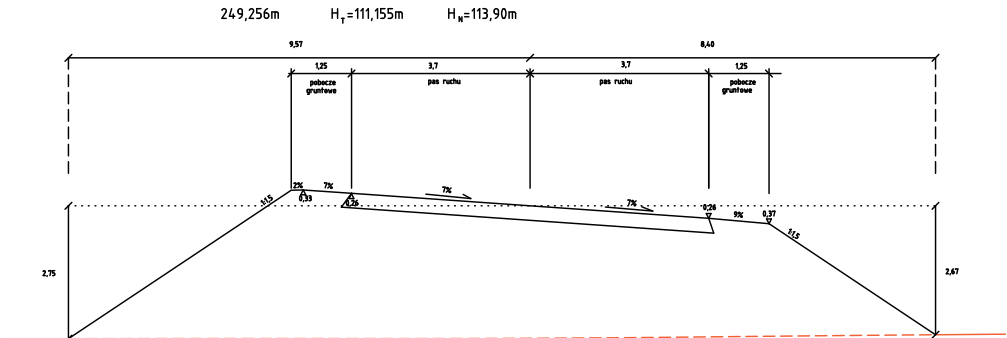
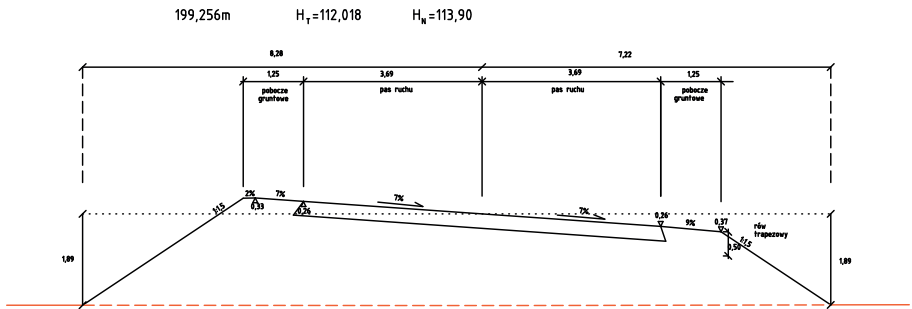
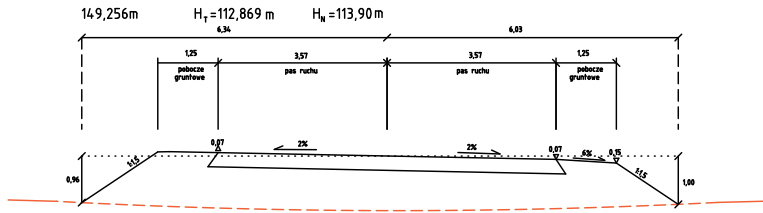
61,639m  $H_T = 115,00\text{m}$   $H_N = 114,464\text{m}$



103,44m  $H_T = 113,913\text{m}$   $H_N = 113,913\text{m}$

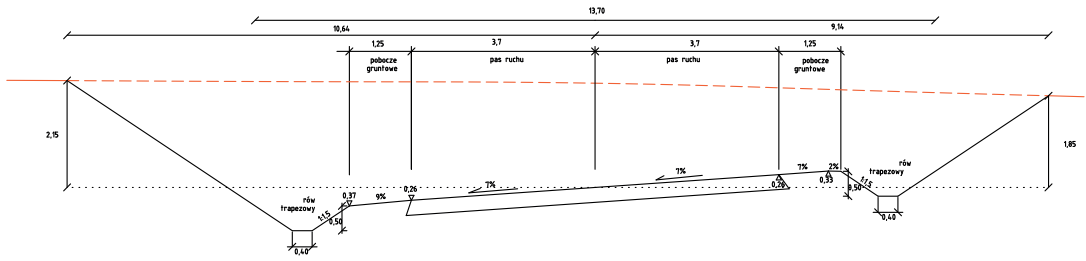




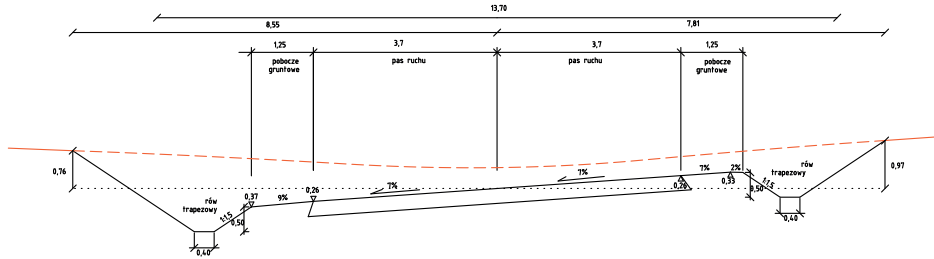




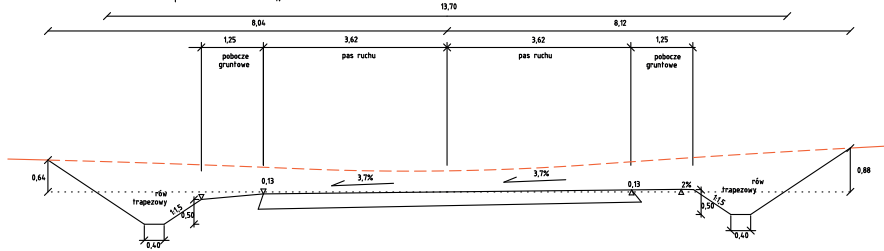
610,42m  $H_T=115,00m$   $H_N=113,90m$



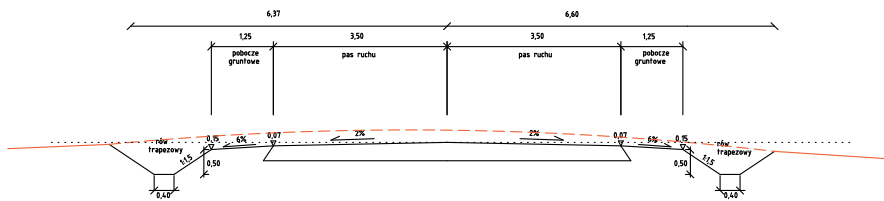
661,24m  $H_T=114,42m$   $H_N=113,90m$

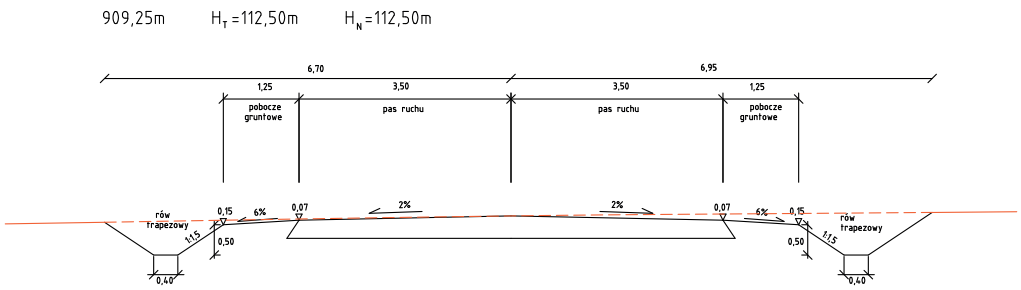
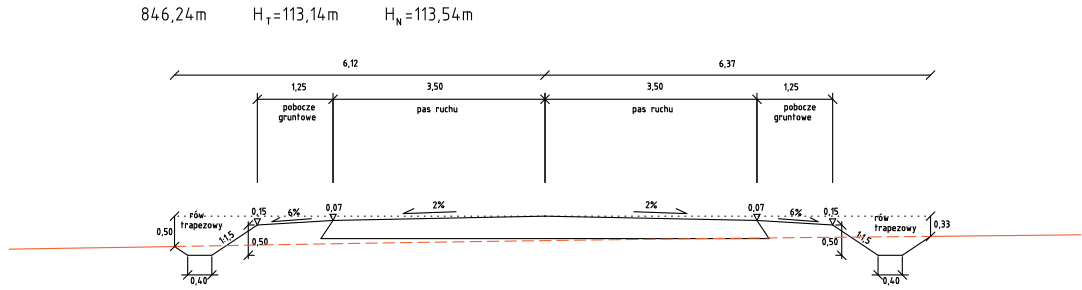
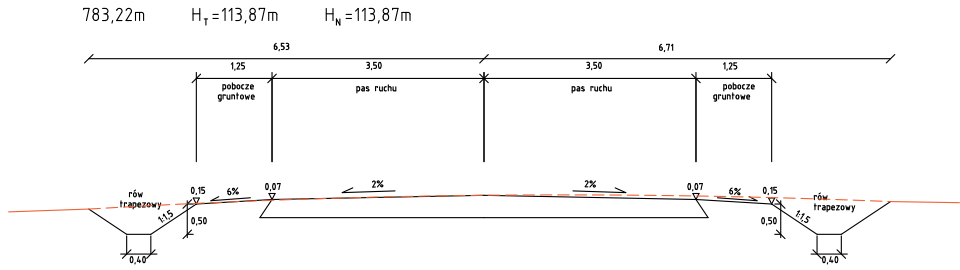


711,67m  $H_T=114,32m$   $H_N=113,90m$

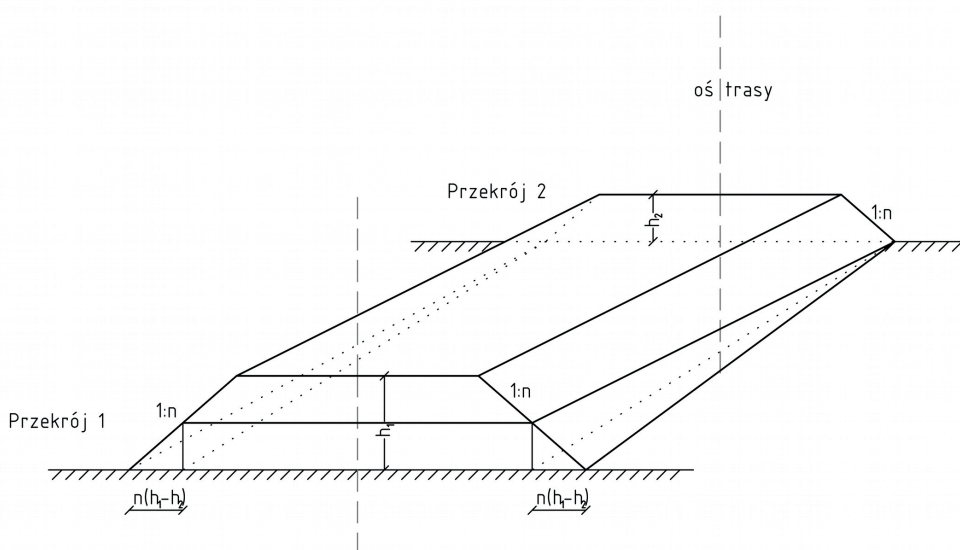


747,04m  $H_T=114,15m$   $H_N=113,90m$





Uwaga: Opracowano na podstawie [9]



Rys. 30. Wymiary pryzmy nasypu.

Powyższy szkic poglądowy tłumaczy metodę liczenia objętości pryzmy wykopu/nasypu według poniższego wzoru:

$$V = \frac{P_1 + P_2}{2} l - \frac{n(h_1 - h_2)^2}{6} l$$

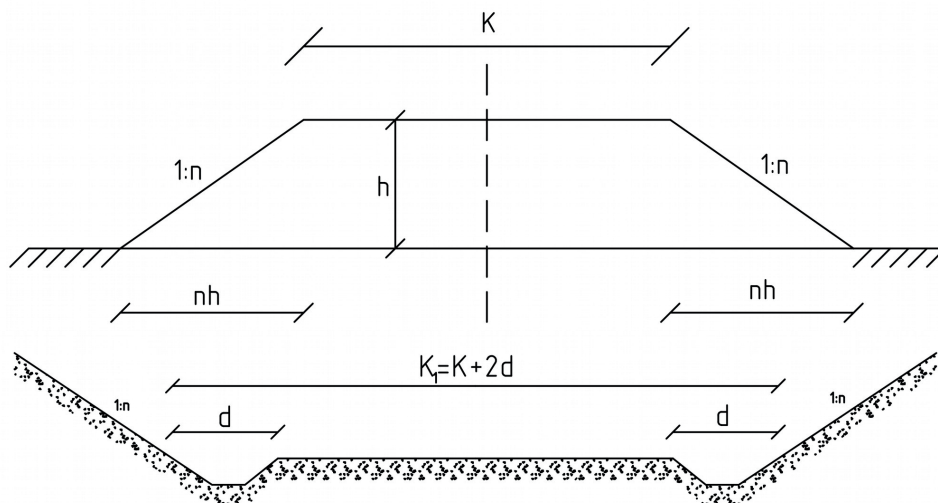
gdzie:

- $P_1$   $P_2$  są polami przekrojów 1 i 2;
- $h_1$   $h_2$  są odpowiednio wysokościami przekrojów;
- $l$  jest odległością pomiędzy przekrojami;
- 1:n to pochylenie skarp.

$$v_p = \frac{n(h_1 - h_2)^2}{6} l$$

Powyższe wyrażenie jest poprawką objętości bryły.

Pole powierzchni przekroju nasypu oraz wykopu przedstawiają kolejno poniższe szkice:



Rys. 30. Nasyp/wykop w przekroju poprzecznym.

W przypadku gdy powierzchnia terenu przebiega poziomo, w kierunku poprzecznym do osi trasy, wówczas pole powierzchni można obliczyć według wzorów:

- pole nasypu

$$P_n = Kh + nh^2$$

- pole wykopu

$$P_w = K_1 h + nh^2 + 2r$$

gdzie:

- $K$  oznacza szerokość roboczą trasy;
- $h$  to wysokość/głębokość nasypu/wykopu;
- $r$  jest polem przekroju rowu (pole trapezu).

Nie zawsze jest tak, że teren przebiega poziomo. W tym projekcie założyłem liniowy spadek wysokości, dlatego też przyjąłem, że średnia arytmetyczna wysokości krawędzi zewnętrznych trasy będzie się równać wysokości liczonej przyzmy. Skorzystałem z tego uproszczenia ponieważ dokładne liczenie mas ziemi jest zajęciem niezwykle czasochłonnym. W rozdziale czwartym zaprezentuję, jak można uzyskać bilans mas ziemi, korzystając ze współczesnego oprogramowania.

Na następnej stronie zamieściłem tabelę z arkusza kalkulacyjnego, przedstawiającą bilans objętości nasypów i wykopów. Aby uzyskać dokładniejszy wynik, zwiększyłem ilość przekrojów poprzecznych.

Obliczenia bilansu robót ziemnych:				Wykop
				Nasyp
[m]			[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
D	H niwelety	H terenu	P – przekroju	Objętości
0.00	116.85	116.85	1	
10.00	116.33	116.55	4	21
20.00	115.87	116.25	6	48
30.00	115.45	115.95	8	69
40.00	115.09	115.63	8	81
53.93	114.63	115.25	10	126
64.00	114.38	114.93	9	91
74.00	114.19	114.66	7	79
84.00	114.04	114.4	6	65
94.00	113.95	114.15	3	45
103.440	113.913	113.913	1	19
107.94	113.90	113.8	1	4
138.00	113.90	113.1	12	196
149.256	113.90	112.87	16	155
168.00	113.90	112.54	21	347
174.256	113.90	112.35	25	145
199.26	113.90	112.02	31	698
228.00	113.90	111.51	41	1038
249.256	113.90	111.16	49	957
258.00	113.90	111.03	52	439
288.00	113.90	110.76	58	1641
297.45	113.90	110.74	58	548
310.00	113.90	110.86	56	714
330.00	113.90	111.79	36	906
350.00	113.90	113.12	12	463
365.871	113.90	113.90	1	94
370.00	113.90	114.04	3	6
437.03	113.90	115	17	655
490.00	113.90	115.76	31	1283
509.267	113.90	116	36	647
545.00	113.90	116.23	41	1368
568.6	113.90	116	36	904
580.00	113.90	115.77	31	384
610.42	113.90	115	17	739
661.24	113.90	114.42	8	646
690.00	113.90	114.33	7	214
711.67	113.90	114.32	7	145
747.04	113.90	114.15	4	189
771.19	113.90	114.02	2	77
783.22	113.87	113.87	1	17
811.19	113.80	113.56	3	55
846.24	113.54	113.14	6	159
880.22	112.95	112.77	2	139
909.25	112.5	112.5	0	36
			Suma wykopów	8737
			Suma nasypów	8542
Bilans mas ziemi			196	1.13%

---

## 4. Komputerowe techniki projektowania trasy drogowej przy użyciu programu CivilCad 3d

W poprzednich rozdziałach przedstawiłem sposób projektowania trasy bez stosowania programów, które same liczą parametry trasy oraz jej geometrię. Moim zdaniem, najbardziej uciążliwym zadaniem (może poza kreśleniem trasy w planie) było obliczanie mas ziemi z wykopów i nasypów. Jest to zadanie bardzo czasochłonne, dlatego stosowałem pewne przybliżenia, jednocześnie dzieląc trasę na więcej pryzm niż ich było po opracowaniu przekrojów poprzecznych. W tym rozdziale rozwiąże postawiony problem, nowoczesnymi metodami projektowania tras, przy użyciu programu AutoCad Civil 3d, firmy Autodesk. Oprogramowanie to jest powszechnie dostępne w wersji edukacyjnej.

### 4.1 Projektowanie trasy w programie AutoCAD Civil 3D

Model terenu, który wcześniej posłużył mi do przygotowania mapy warstwicznej, załadowałem w postaci listy punktów nr XYH do programu, który automatycznie opracował warstwice. W opcjach widoczności warstw danego obiektu wybrałem widoczność warstw głównych oraz pomocniczych. Program dodatkowo oferuje wiele innych zestawów informacji na pozostałych warstwach, jak. np. obszary zlewisz czy spadki terenu.

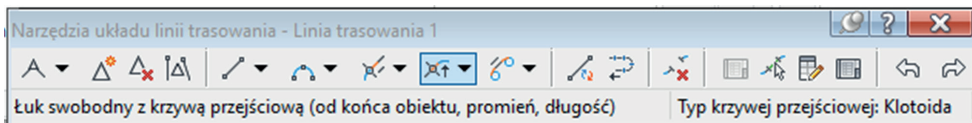
Następnym krokiem było wykreślenie linii trasowania. Linia trasowania, w programie Civil 3D jest linią, wzdłuż której program oblicza wszystkie elementy trasy. Linia trasowania wyznacza oś projektowanej drogi. Aby określić linię trasowania, najpier skorzystałem z narzędzia rysowania linii wg. Współrzędnych i wprowadziłem odcinki AB oraz CD. W poprzednich rozdziałach były to styczne do łuków kołowych, które zaprojektowałem w początkowym etapie tworzenia trasy. Odcinek BC nie jest mi potrzebny, ponieważ program sam połączy łuki kołowe krzywą przejściową. Po wprowadzeniu odcinków AB oraz CD, skorzystałem z narzędzia skracania/wydłużania linii. Odcinki AB i CD należy skrócić o wartość nowej stycznej  $T_{01}$ , która jest linią rzędnych projektowanej klotoidy. Nowa styczna, tak jak pokazałem w rozdziale 3.1.3 jest zależna od geometrycznych parametrów klotoidy (krzywej przejściowej) i łuku kołowego.

Uwaga: W tym wariantcie drogi zdecydowałem się zwiększyć promień krzywizny łuków kołowych aby uniknąć potrzeby zaprojektowania poszerzenia. Poszerzenie można uzyskać stosując dodatkowe narzędzia dostępne najczęściej na licencji komercyjnej lub można samodzielnie takie narzędzia stworzyć i zaimplementować do programu. W tym rozdziale pragnę skupić się na innych aspektach projektowania i wizualizacji projektu.



W efekcie wartości nowych stycznych  $T_{01}$  z rozdziału 3.1.3 zwiększyłem nieznacznie i odcinek AB zmniejszyłem o wartość -188 m a odcinek CD o wartość -163 m. Następnie wybrałem narzędzie “Linia trasowania” aby zaznaczyć odcinki proste projektowanej trasy. Podczas wywołania polecenia rysowania linii trasowania, otwiera się okno dialogowe, którym możemy między innymi wpisać prędkość projektową, czy też wybrać zestaw norm dla projektowania dróg lub linii kolejowych np. w Polsce. Jeśli w procesie projektowania złamiemy jakieś normy, wówczas program wyświetli nam w danym miejscu trasy ostrzeżenie. Nie będzie to jednak uniemożliwiało kontynuowania tworzenia projektu. Jest to o tyle słuszne, że chociażby ustawodawca w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, przewiduje odejście, od niektórych przepisów w szczególnych przypadkach. Program nie musi też trafnie odczytać intencji projektanta lub rozumieć koncepcji projektu.

Linie kreśliłem zgodnie z przyjętym kierunkiem trasy od punktu A do punktu D. Następnie przystąpiłem do wykreślenia krzywych przejściowych oraz łuków.

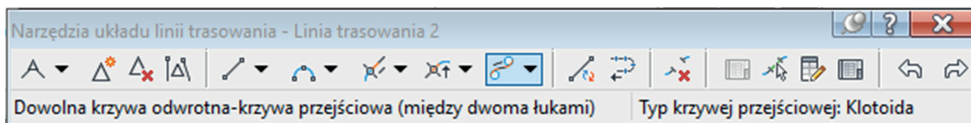


Pośród narzędzi przybornika “Narzędzia układu linii trasowania” wybrałem “Łuk swobodny z krzywą przejściową (od końca obiektu, promień, długość)”.

Słowa zapisane w nawiasie są ważne ponieważ wskazują na parametry wejściowe, które projektant musi wprowadzić. Korzystając z tego narzędzia należy zaznaczyć odcinek linii trasowania bliżej tego końca, z którego ma wychodzić krzywa. Następnie program prosi o wprowadzenie następujących parametrów:

- promień krzywizny;
- długość krzywej przejściowej lub jej parametr  $A$ ;
- kierunek zwrotu trasy;
- długość łuku kołowego;

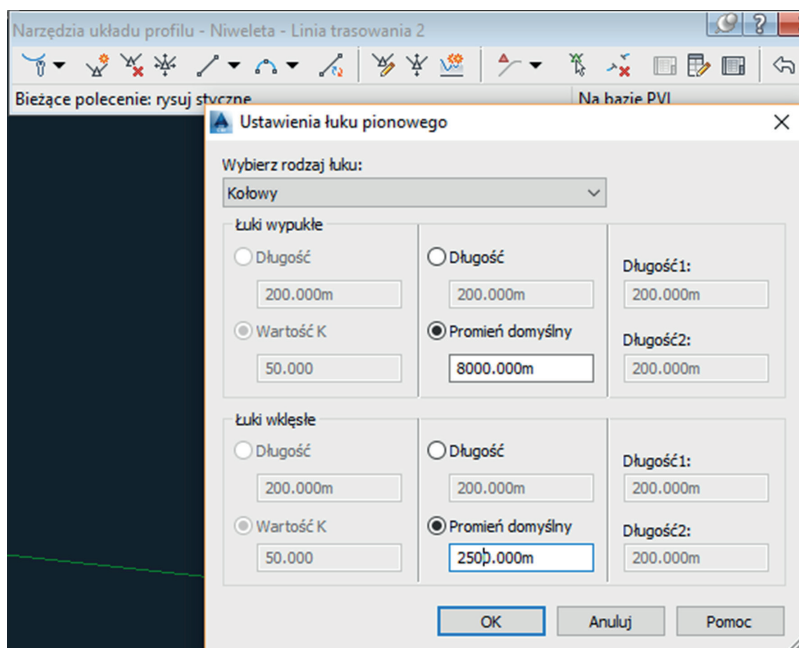
Korzystając z arkusza kalkulacyjnego, w którym liczyłem poprzedni wariant trasy, zmieniłem wartości dla zadania obliczania parametru  $A$ , dzięki czemu mogłem sprawdzić czy poprzednio zastosowany parametr klotoidy może być zastosowany w tym zadaniu. Jako promień krzywizny wprowadziłem  $R=210$  m, parametry klotoid przyjąłem dla pierwszego łuku  $A=139$  m i dla drugiego łuku  $A=131$  m. Długość łuku kołowego jest nie istotna, ponieważ nie wpływa ona na geometrię krzywej przejściowej między łukami.



Do stworzenia krzywej przejściowej między łukami skorzystałem z narzędzia “Dowolna krzywa odwrotna-krzywa przejściowa (między dwoma łukami)”.

Po zaznaczeniu łuków, które mają być połączone, jedynym parametrem do wprowadzenia jest współczynnik  $A1/A2$ , któremu nadałem wartość 1.

W ten sposób, otrzymałem przebieg trasy w poziomie. Kolejnym krokiem było opracowanie niwelety. Program Civil 3D tworzy profil terenu samodzielnie, jeśli projektant wskaże linię trasowania. Po wybraniu opracowanej linii trasowania wskazałem miejsce w rysunku dla profilu podłużnego. Aby zaprojektować niweletę na wygenerowanym profilu, należy wybrać przybornik “Narzędzia układu profilu”. Program umożliwia stosowanie pionowych łuków kołowych oraz parabolicznych. W moim przykładzie, wybrałem łuki kołowe. Civil 3D potrafi rysować łuki kołowe na podstawie wykreślonych przez projektanta stycznych. Wystarczy wprowadzić porządane parametry łuku, a następnie wskazać punkty przecięcia się stycznych.



Zaletą korzystania z takiego oprogramowania jest to, że każdy element geometrii trasy, można w każdej chwili zmienić i zbudować tzw. jednym kliknięciem. Dlatego też

początkowo punkty załamania niwelety, przyjąłem w połowie długości łuków kołowych, a ich wysokość przyjąłem wizualnie.

Kolejnym etapem jest wskazanie profilu poprzecznego trasy. W programie Civil 3D istnieje narzędzie “Zespół”. Wybierając to narzędzie należy wskazać na rysunku miejsce, w którym ma zostać narysowany profil poprzeczny. W mojej wersji programu, mogę wskazać profil dla klasy G bez krawężników. Koszty z takich narzędzi jest niezwykle wygodne, ponieważ dzięki niemu, program sam liczy przechyłkę na rampie, a także poszerzenie (choć tego narzędzie niestety nie posiadam w wersji edukacyjnej).

Następnym krokiem jest utworzenie korytarza. Korytarz określa wszystkie przestrzenne parametry drogi. Dlatego w oknie dialogowym należy wskazać na trzy opracowane wcześniej elementy trasy, czyli linię trasowania, niweletę oraz zespół (profil poprzeczny).

Utwórz korytarz

Nazwa:  
Korytarz - <[Pierwsza linia bazowa korytarz]

Opis:

Styl korytarza:  
Podstawowy

Warstwa korytarza:  
C-DROGI-KORYTARZE

Linia trasowania:  
Linia trasowania 2

Profil:  
Niweleta - Linia trasowania 2

Zespół:  
Droga klasy G

Powierzchnia docelowa:  
<brak>

Ustaw linię bazową i parametry regionu

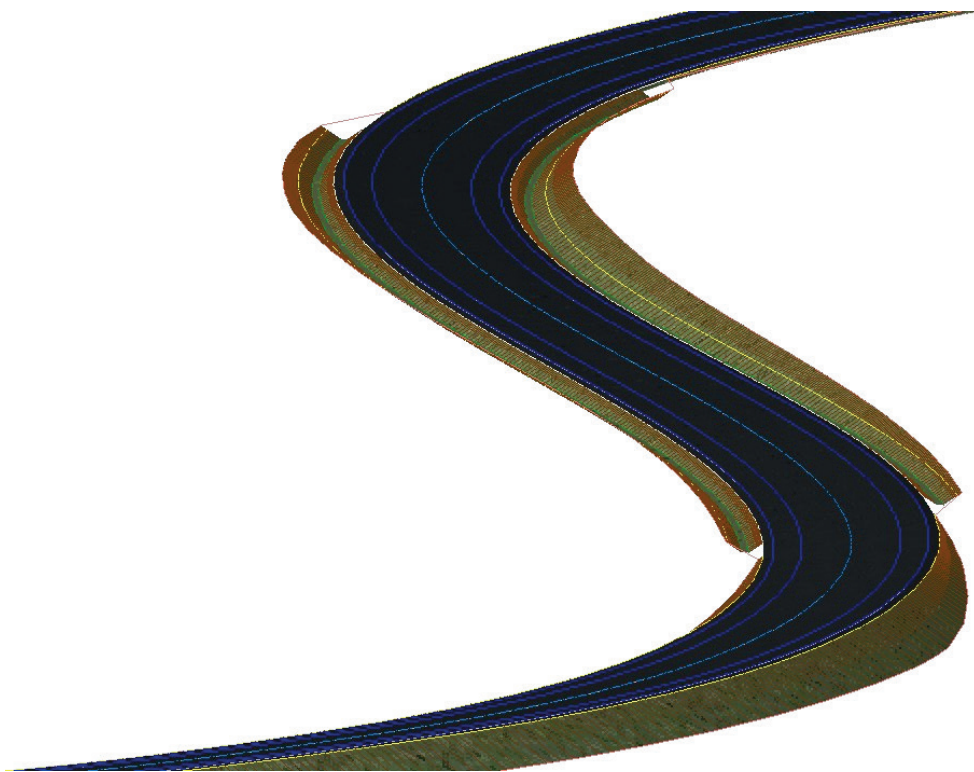
OK Anuluj Pomoc

Początkowo korytarz jest przesłonięty przez teren jeśli przebiega pod jego powierzchnią. Korytarz zawiera także informacje o skarpacech wykopów i nasypów. Rowy odwadniające są tworzone automatycznie. Do pełnego zbioru informacji korytarza o przebiegu

trasy, brakuje przechyłki. Aby to zrobić zaznaczyłem korytarz, a ze wstążki narzędziowej wybrałem narzędzie “Przechyłka”.

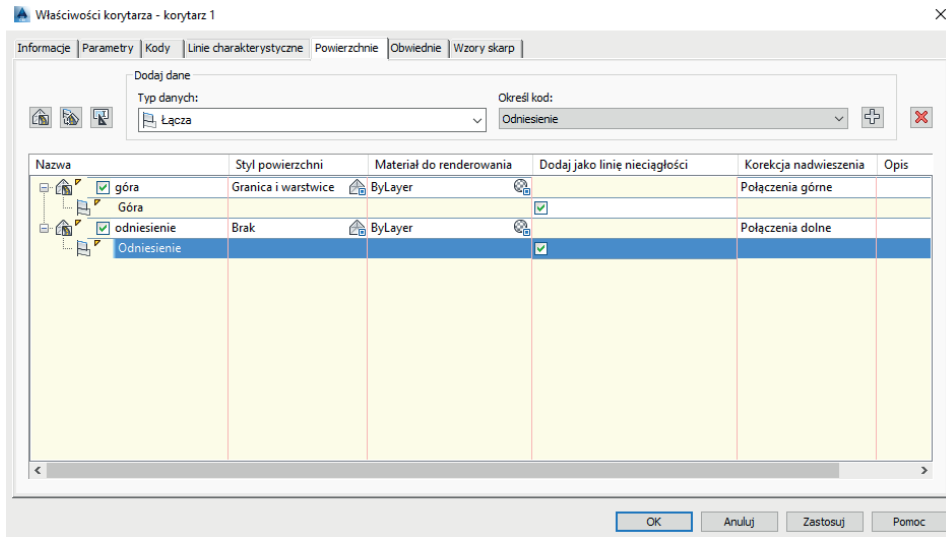
Uwaga: Warto też zaznaczyć, że jest możliwe wstawienie kilku profili poprzecznych w rysunku, aby następnie wskazać właściwy fragment trasy, który ma dany profil realizować. W ten sposób można uzyskać poszerzenie oraz przechyłkę samemu, obliczając wszystkie parametry i wartości tak jak robiłem to w poprzecznikach rozdziałach.

W oknie dialogowym projektowania przechyłki wybrałem typ jezdni “Niepodzielona z koroną” czyli daszkowy przekrój. W kolejnych oknach dialogowych są opcje dotyczące szerokości jezdni oraz sterowania poboczem. Po wprowadzeniu danych, program sam projektuje rampę drogową. Poniższy rysunek przedstawia kształt trasy z wyłączoną warstwą terenu. Widać wyraźnie skarpy oraz pochylenie poprzeczne jezdni na łukach.

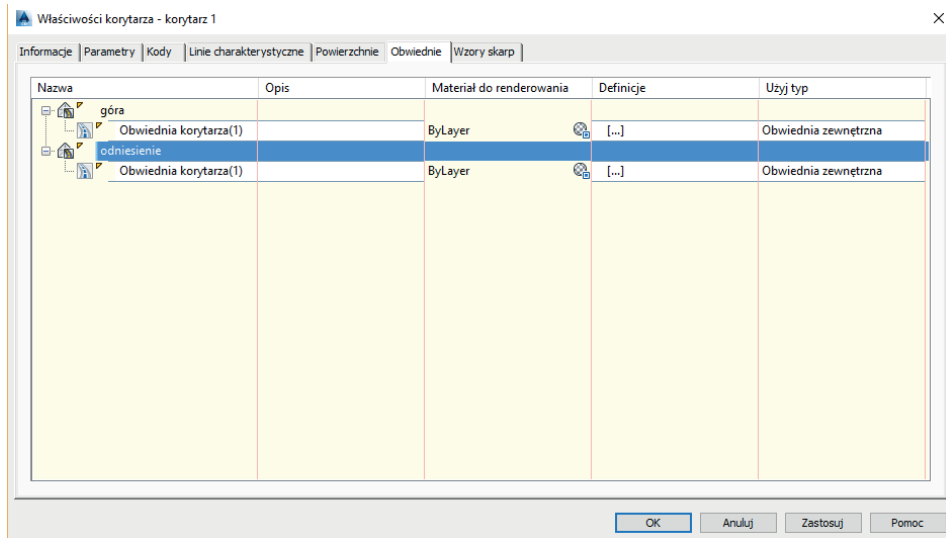


Rys. 31. Trasa projektowana w Civil 3D.

Do uzyskania ostatecznego kształtu trasy należy sprawdzić bilans robót ziemnych, a tym samym zweryfikować przebieg niwelety. Aby program wygenerował przekroje poprzeczne, należy utworzyć nowe powierzchnie w obrębie korytarza.

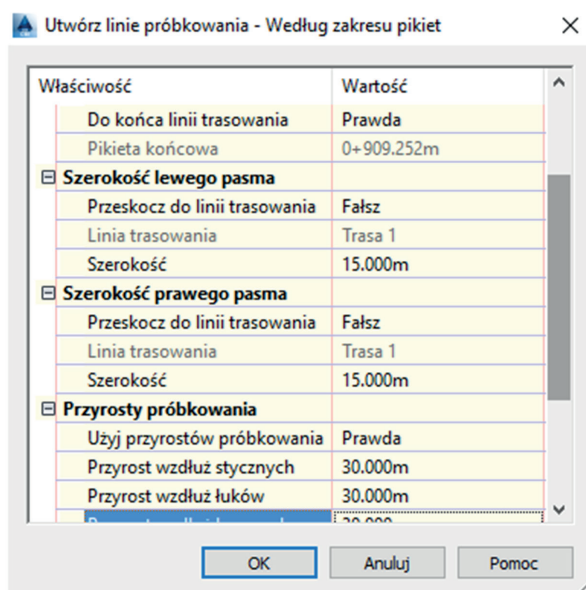


W oknie dialogowym właściwości korytarza jest zakładka “Powierzchnie”. W tej zakładce utworzyłem dwie nowe powierzchnie. Powierzchni “Góra” nadałem kod “Góra” I tak samo powierzchnia “Odniesienie” otrzymała kod odniesienie. Te powierzchnie będą kluczowe w oknie dialogowym tworzenia przekrojów poprzecznych. Opcja “Dodaj jako linie nieciągłości” pozwoli m. in. w późniejszym etapie, scalić powierzchnię korytarza z powierzchnią terenu, aby uzyskać wizualizację projektu. Następnym krokiem edycji powierzchni w obrębie korytarza jest stworzenie obwiedni dla nowych powierzchni tak jak na poniższym rysunku:

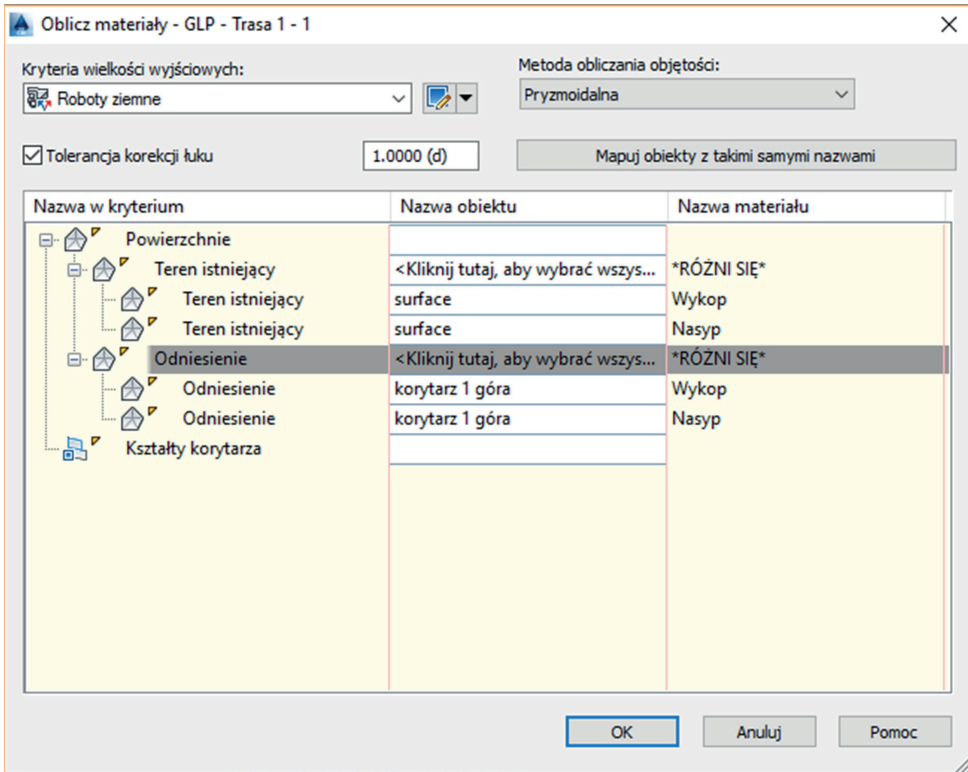


W następnej zakładce “Wzory skarp” jest opcja dodawania skarp. Program, po wybraniu tej opcji, prosi użytkownika o wskazania linii skarp. Wskazując konkretną linię należy wskazać jej kod np. Rzutowanie\_nasyp. Po wskazaniu wszystkich linii, program wyświetli symbole skarp widocznie później w planie sytuacyjnym.

Przekroje poprzeczne są rysowane wzdłuż linii trasowania. Do wskazania miejsc przekrojów poprzecznych użyłem narzędzia “Linie próbkowania”, która określa parametry generowanych przekrojów takie jak częstotliwość czy odległość od osi trasy. Można wskazać samodzielnie punkty, w których będą wykonywane przekroje lub zastosować żądany algorytm. Po wybraniu narzędzia, wskazałem opracowaną linię trasowania a następnie opcję “Utwórz linię próbkowania według zakresu pikiet”. Przekroje zostały wykonane co 30m.



Po wygenerowaniu przekrojów poprzecznych, program ma wszystkie informacje do tego aby przygotować tabelę bilansu robót ziemnych. W tym celu, ze wstążki narzędziowej, w zakładce “Analiza” wybrałem narzędzie “Oblicz materiały”.

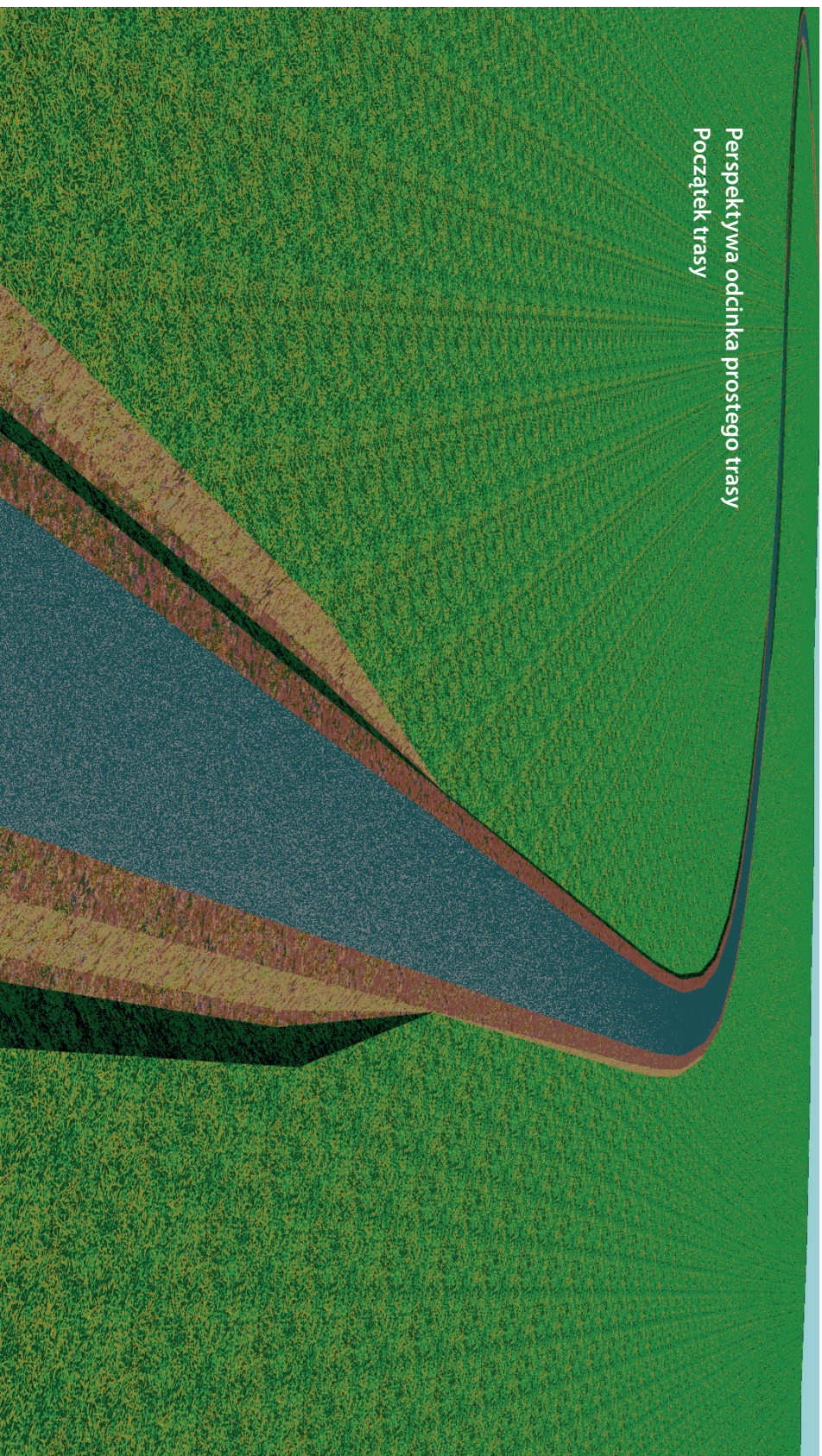


Na tym etapie należy wprowadzić odpowiednie powierzchnie korytarza i terenu tak aby program mógł obliczyć objętości mas ziemi. Możemy też wybrać metodę obliczania objętości (w moim przykładzie, przymoidalna). Po wprowadzeniu odpowiednich danych, program przelicza, a następnie pyta o miejsce na rysunku, gdzie ma wyświetlić tabelę robót ziemnych. Na tym etapie należy zweryfikować niweletę. Jeśli bilans robót ziemnych nie będzie zadowalający, należy zmieniać wysokości punktów załamania niwelety (lub punktów środkowych łuku pionowego). Przykładowo, jeśli ilość masy ziemi w nasypach, znacząco przewyższa masy w wykopach, wówczas należy poprowadzić niweletę bliżej linii terenu. Można też zwiększyć wykop, lub tylko zmniejszyć nasyp. Zaletą nowoczesnego oprogramowania jest to, że można przeanalizować wiele wariantów niwelety, ponieważ program za każdym razem na nowo przeliczy cały projekt. Dodatkowo, można zaprojektować nachodzące na siebie łuki pionowe i poziome z czego zrezygnowałem w poprzednim rozdziale. Należy jednak pamiętać, że bilans bliski zeru, nie musi oznaczać najmniejszych możliwych kosztów realizacji robót ziemnych. Nawet jeśli uda się uzyskać bilans mas ziemi na poziomie 1% to jeżeli zaprojektujemy głębokie wykopy i wysokie nasypy, koszt realizacji takiego projektu będzie nadal bardzo wysoki.

W moim projekcie, nasypy i wykopy są blisko siebie oraz bilansują się, dzięki czemu nie ma potrzeby dowożenia ziemi na teren realizacji, a koszty transportu ziemi z wykopów są zminimalizowane. Na następnych stronach zamieściłem tabelę uzyskanego bilansu robót ziemnych, profil podłużny wraz z niweletą oraz plan sytuacyjny w skali 1:1000, dla porównania z rozwiązaniem z poprzedniego rozdziału. Zaletą programu Civil 3D jest kompatybilność z oprogramowaniem do modelowania tej samej firmy, serii programów 3ds Max Design. Dzięki temu rozwiązaniu, można zaprojektować bardzo sprawnie i precyzyjnie trasę wraz z jej infrastrukturą, a następnie przedstawić projekt inwestorowi w postaci wizualizacji. Na końcu rozdziału zamieściłem również wizualizację mojego projektu drogi bez elementów infrastruktury czy otoczenia, lecz z krzywizną toru widoczną z perspektywy jadącego pojazdu.



Perspektywa odcinka prostego trasy  
Początek trasy

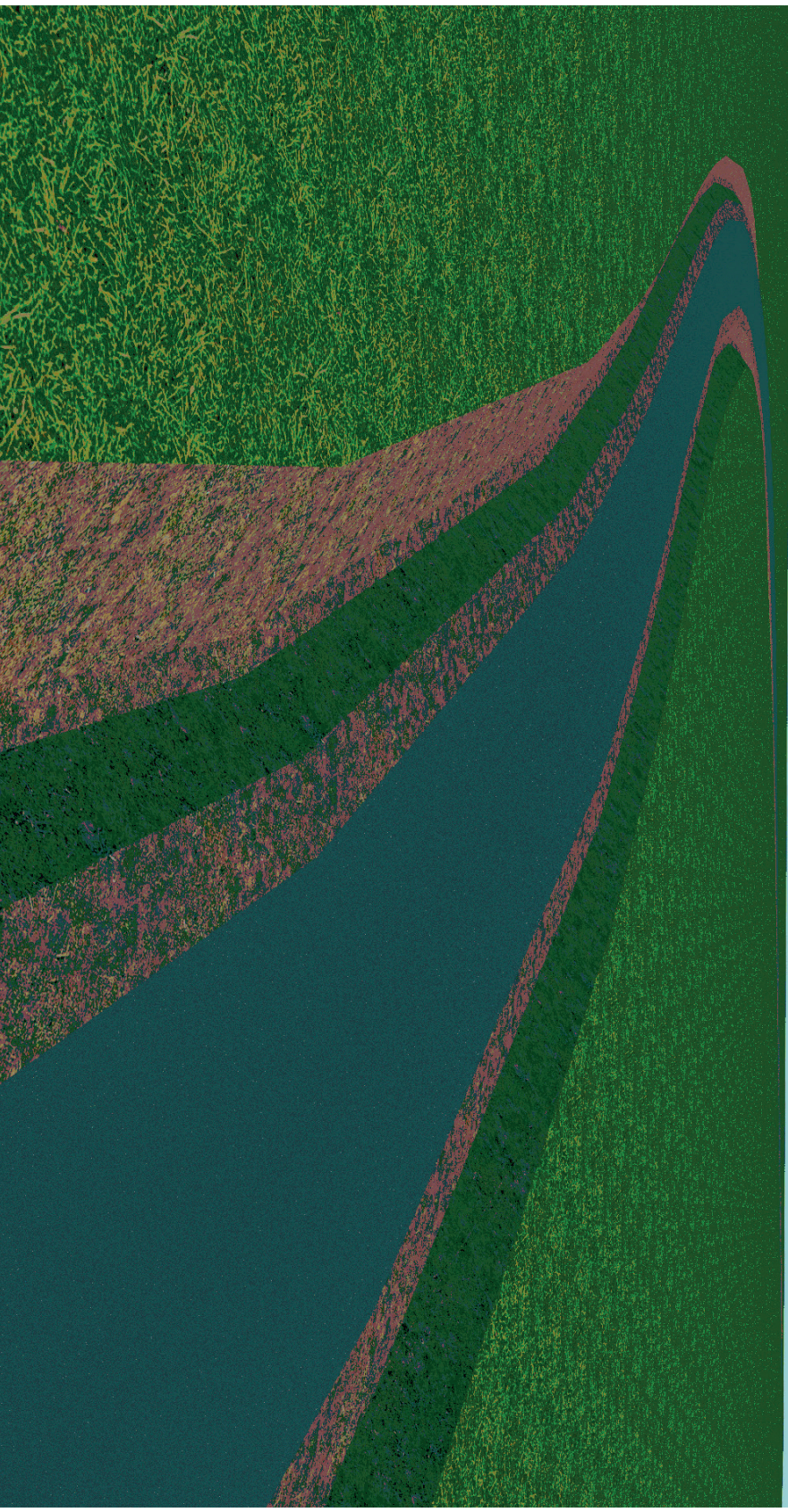




Perspektywa łuku poziomego drogi obserwowanego w czasie jazdy po łuku  
200 m trasy



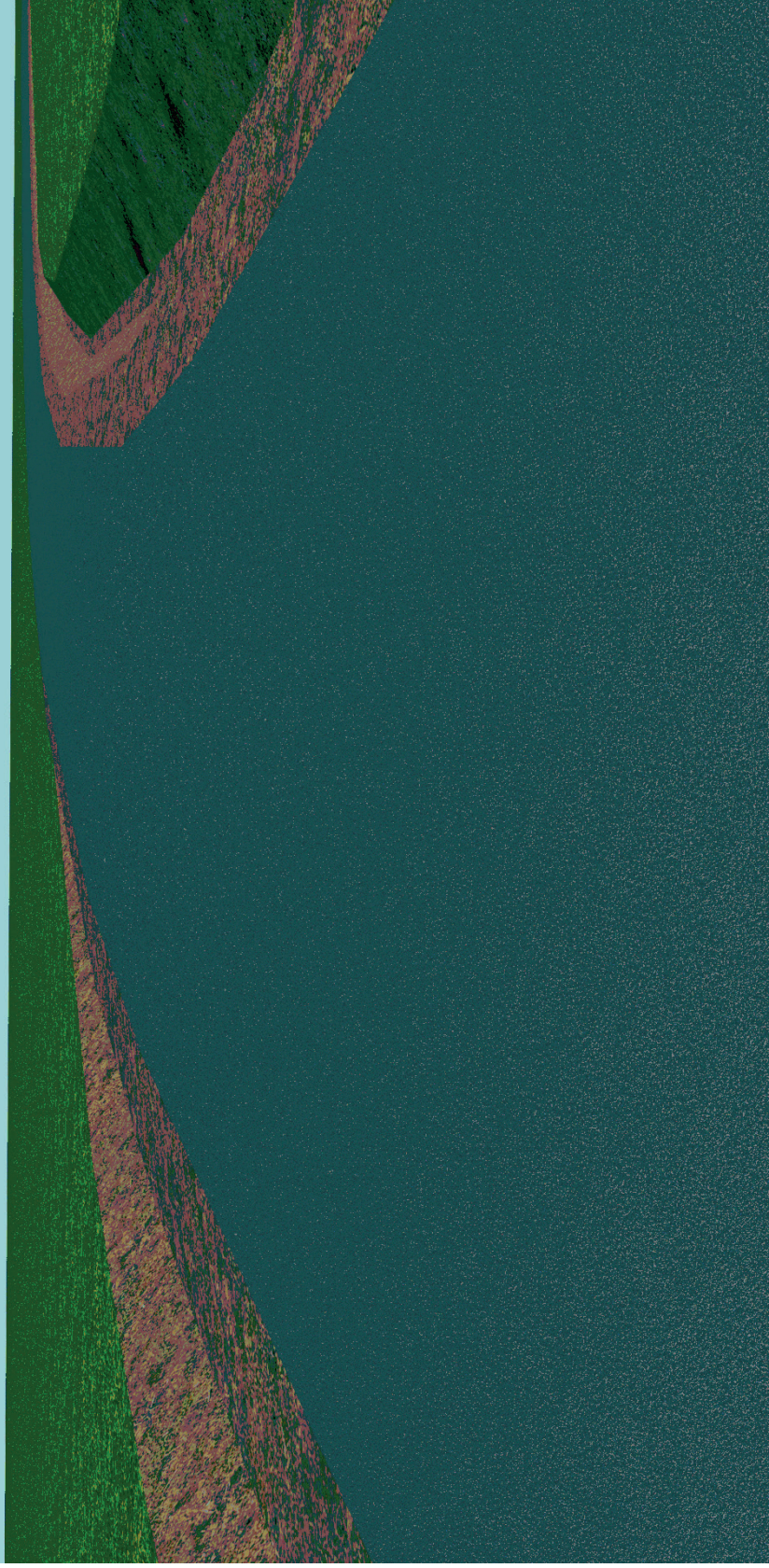




Perspektywa krzywej przejściowej  
385 m trasy



## Perspektywa łuku poziomego obserwowanego w czasie jazdy po łuku



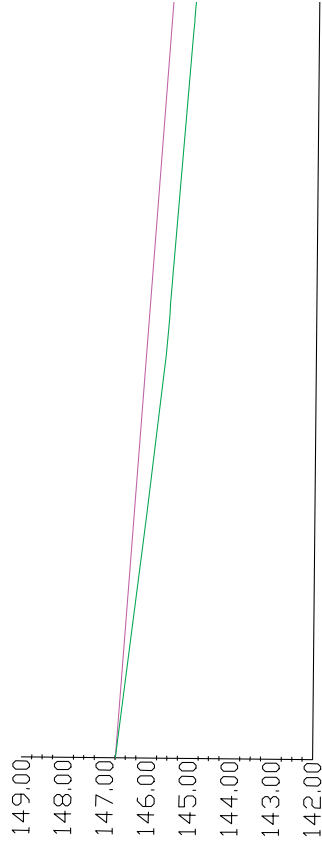
# Raport objętości

Linia trasowania: Linia trasowania 2  
 Grupa linii przykładowych: GLP - Linia trasowania 2 - 1  
 Pikieta początkowa: 0+000.000  
 Pikieta końcowa: 0+912.825

Pikieta	Obszar ciecicia (m kw.)	Objętość ciecicia (m sześciennie)	Objętość do ponownego wykorzystania (m sześciennie)	Obszar wypełnienia (m kw.)	Objętość wypełnienia (m sześciennie)	Skum. obj. ciecicia (m sześciennie)	Skum. obj. do ponownego wykorzystania (m sześciennie)	Skum. obj. wypełnienia (m sześciennie)	Skum. obj. netto (m sześciennie)
0+000.000	3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0+025.000	2.18	69.09	69.09	0.67	8.37	69.09	69.09	8.37	60.72
0+042.208	0.00	18.72	18.72	1.42	17.94	87.81	87.81	26.31	61.50
0+050.000	0.00	0.00	0.00	1.77	12.41	87.81	87.81	38.72	49.09
0+075.000	0.00	0.00	0.00	2.83	57.53	87.81	87.81	96.24	-8.44
0+100.000	0.00	0.00	0.00	3.74	82.22	87.81	87.81	178.46	-90.66
0+103.548	0.00	0.00	0.00	3.79	13.36	87.81	87.81	191.83	-104.02
0+103.548	0.00	0.00	0.00	3.79	0.00	87.81	87.81	191.83	-104.02
0+123.991	0.00	0.00	0.00	4.11	80.74	87.81	87.81	272.57	-184.76
0+125.000	0.00	0.00	0.00	4.13	4.16	87.81	87.81	276.72	-188.92
0+144.435	0.00	0.00	0.00	4.48	83.64	87.81	87.81	360.36	-272.56
0+150.000	0.00	0.00	0.00	4.52	25.04	87.81	87.81	385.40	-297.60
0+175.000	0.00	0.00	0.00	4.74	115.93	87.81	87.81	501.33	-413.53
0+195.552	0.00	0.00	0.00	4.97	100.07	87.81	87.81	601.40	-513.60
0+195.552	0.00	0.00	0.00	4.97	0.00	87.81	87.81	601.40	-513.60
0+200.000	0.00	0.00	0.00	5.00	22.26	87.81	87.81	623.67	-535.86
0+225.000	0.00	0.00	0.00	5.14	127.35	87.81	87.81	751.02	-663.21
0+250.000	0.00	0.00	0.00	5.24	130.33	87.81	87.81	881.35	-793.54
0+275.000	0.00	0.00	0.00	4.71	124.89	87.81	87.81	1006.24	-918.44
0+299.141	0.00	0.00	0.00	4.74	114.60	87.81	87.81	1120.84	-1033.04
0+300.000	0.00	0.00	0.00	4.77	4.09	87.81	87.81	1124.93	-1037.12
0+325.000	1.09	13.31	13.31	2.66	93.33	101.12	101.12	1218.26	-1117.14
0+350.000	5.13	76.82	76.82	0.01	33.65	177.94	177.94	1251.91	-1073.97
0+375.000	7.74	159.62	159.62	0.00	0.18	337.55	337.55	1252.09	-914.54
0+400.000	7.67	191.34	191.34	0.00	0.00	528.89	528.89	1252.09	-723.20
0+402.729	7.64	20.88	20.88	0.00	0.00	549.78	549.78	1252.09	-702.32
0+402.729	7.64	0.00	0.00	0.00	0.00	549.78	549.78	1252.09	-702.32
0+414.826	7.08	88.63	88.63	0.00	0.00	638.41	638.41	1252.09	-613.68
0+422.894	6.52	54.75	54.75	0.00	0.00	693.16	693.16	1252.09	-558.93
0+425.000	6.46	13.67	13.67	0.00	0.00	706.83	706.83	1252.09	-545.26
0+430.959	6.32	38.08	38.08	0.00	0.00	744.91	744.91	1252.09	-507.18
0+439.024	6.19	50.44	50.44	0.00	0.00	795.35	795.35	1252.09	-456.74
0+439.024	6.19	0.00	0.00	0.00	0.00	795.35	795.35	1252.09	-456.74
0+439.024	6.19	0.00	0.00	0.00	0.00	795.36	795.36	1252.09	-456.74
0+447.089	5.50	47.14	47.14	0.00	0.00	842.49	842.49	1252.09	-409.60
0+450.000	5.28	15.68	15.68	0.00	0.00	858.18	858.18	1252.09	-393.91
0+455.153	4.93	26.31	26.31	0.00	0.00	884.49	884.49	1252.09	-367.61
0+463.222	4.94	39.69	39.69	0.00	0.00	924.18	924.18	1252.09	-327.92
0+475.000	5.29	59.78	59.78	0.04	0.24	983.96	983.96	1252.33	-268.37
0+475.319	5.30	1.69	1.69	0.04	0.01	985.65	985.65	1252.34	-266.70
0+475.319	5.30	0.00	0.00	0.04	0.00	985.65	985.65	1252.34	-266.70
0+500.000	5.96	137.55	137.55	0.00	0.53	1123.20	1123.20	1252.88	-129.68
0+525.000	4.15	125.12	125.12	0.15	1.85	1248.31	1248.31	1254.72	-6.41
0+550.000	2.22	78.41	78.41	0.60	9.38	1326.73	1326.73	1264.10	62.63
0+567.375	1.62	32.55	32.55	1.26	16.26	1359.27	1359.27	1280.36	78.91
0+575.000	1.27	10.75	10.75	1.84	11.92	1370.03	1370.03	1292.29	77.74
0+600.000	0.00	15.48	15.48	3.67	69.37	1385.51	1385.51	1361.65	23.86
0+625.000	0.00	0.00	0.00	3.92	95.40	1385.51	1385.51	1457.05	-71.54
0+650.000	0.00	0.00	0.00	2.95	86.37	1385.51	1385.51	1543.41	-157.90
0+659.431	0.00	0.00	0.00	2.66	26.61	1385.51	1385.51	1570.03	-184.51
0+659.431	0.00	0.00	0.00	2.66	0.00	1385.51	1385.51	1570.03	-184.51
0+675.000	0.00	0.00	0.00	2.22	38.14	1385.51	1385.51	1608.17	-222.66

0+700.000	0.00	0.00	0.00	1.60	47.89	1385.51	1385.51	1656.06	-270.55
0+704.834	0.00	0.00	0.00	1.50	7.51	1385.51	1385.51	1663.57	-278.05
0+722.992	0.00	0.00	0.00	0.98	22.51	1385.51	1385.51	1686.07	-300.56
0+725.000	0.00	0.00	0.00	0.93	1.91	1385.51	1385.51	1687.98	-302.47
0+741.150	2.26	18.26	18.26	0.56	11.97	1403.77	1403.77	1699.95	-296.18
0+741.150	2.26	0.00	0.00	0.56	0.00	1403.77	1403.77	1699.95	-296.18
0+750.000	2.34	20.37	20.37	0.44	4.41	1424.14	1424.14	1704.36	-280.22
0+775.000	2.41	59.38	59.38	0.39	10.34	1483.52	1483.52	1714.69	-231.17
0+795.632	2.42	49.81	49.81	0.37	7.86	1533.33	1533.33	1722.55	-189.22
0+800.000	2.42	10.58	10.58	0.37	1.63	1543.91	1543.91	1724.18	-180.27
0+825.000	2.44	60.77	60.77	0.36	9.12	1604.68	1604.68	1733.31	-128.63
0+850.000	2.61	63.12	63.12	0.21	7.13	1667.81	1667.81	1740.43	-72.63
0+875.000	2.84	68.14	68.14	0.08	3.68	1735.95	1735.95	1744.11	-8.16
0+900.000	3.13	74.63	74.63	0.00	1.14	1810.58	1810.58	1745.25	65.34
0+912.825	3.26	41.01	41.01	0.00	0.06	1851.59	1851.59	1745.31	106.29

Bilans mas ziemi wyniósł 3%.



POZIOM ODNIESIENIA 142.00

Rzędne niwelety	146.74	146.62	146.50	146.38	146.26	146.14	146.02	145.91	145.79	145.68	145.58	145.51	145.43	145.36	145.28	145.13	145.05	144.97
Rzędne istniejące	146.74	146.62	146.50	146.38	146.26	146.14	146.02	145.91	145.79	145.68	145.58	145.51	145.43	145.36	145.28	145.13	145.05	144.97
Różnice rzędnych	0.00	0.05	0.10	0.16	0.21	0.26	0.31	0.36	0.40	0.45	0.48	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54
Elementy niwelety																		
Elementy trasy							PROSTA L=103.55m											
Odstęgi	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000
Kilometraż	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000	0+000

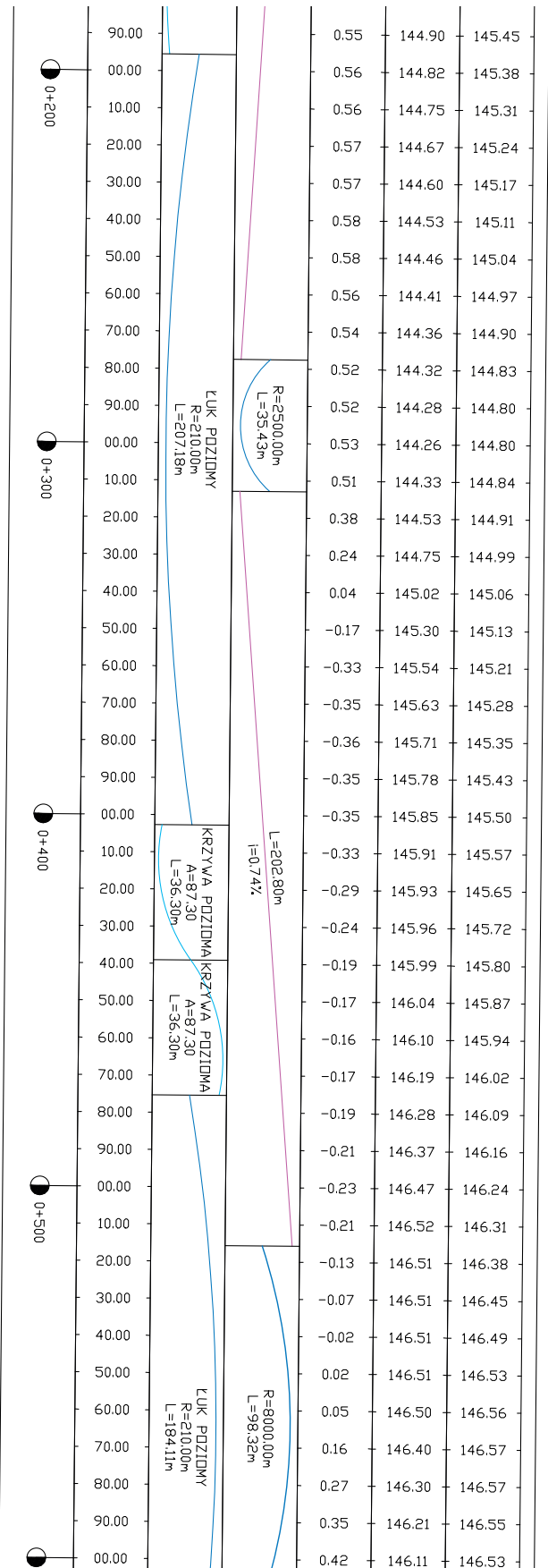
L=277.49m  
I=-0.68%

KRZYWA POZIOMA  
A=139.00  
L=92.00m



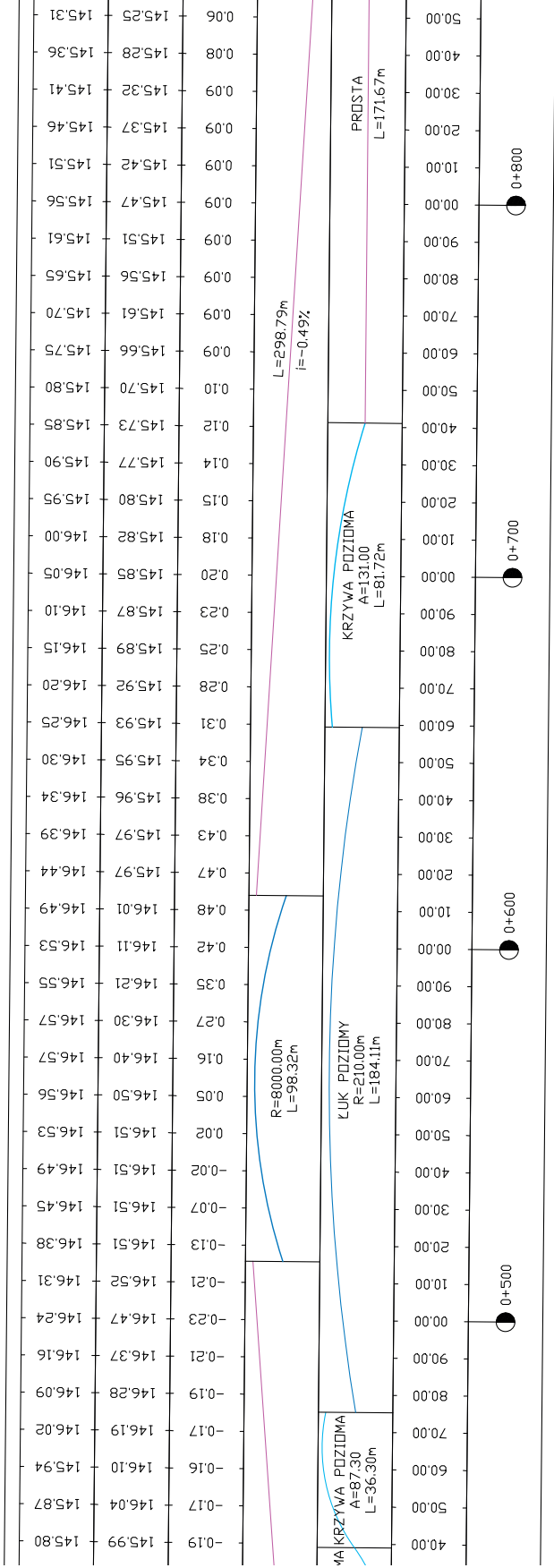


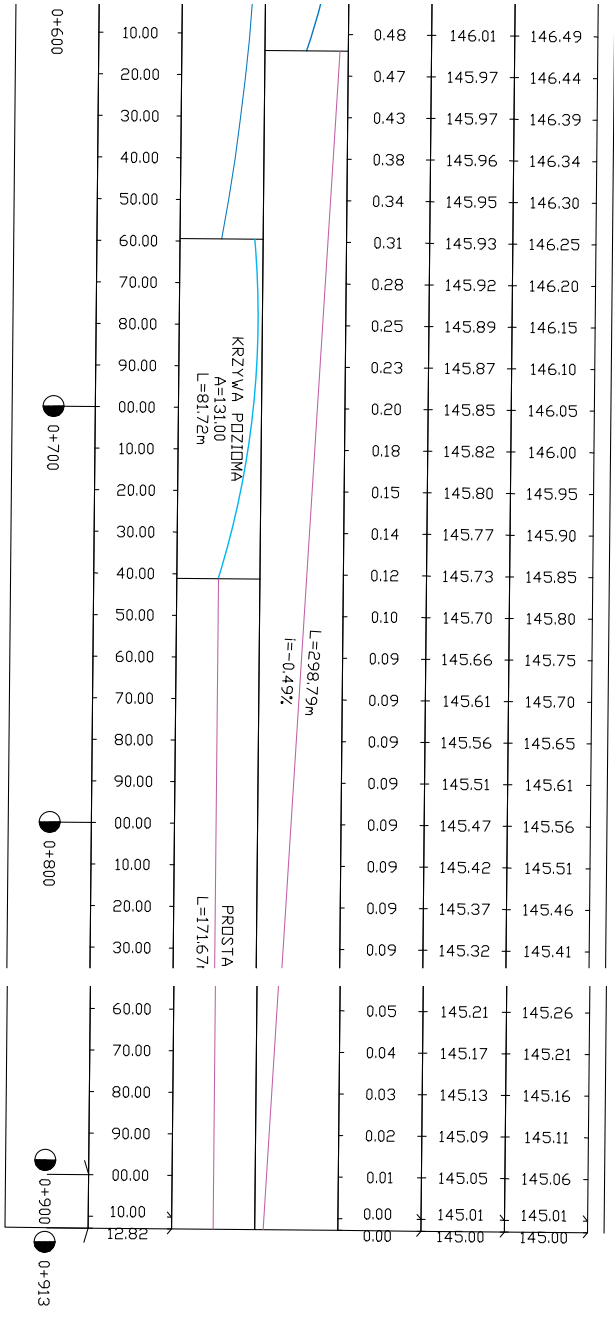
# Wykres profili - Linia trasowania





# - Linia trasowania 2





2

---

## 5. Zakończenie i wnioski

Największą zaletą dostępnego dziś oprogramowania jest możliwość analizowania różnych rozwiązań, bez ponownego obliczania tych samych parametrów przy zmianie danych. W przypadku realizacji projektu trasy, najbardziej kosztownym etapem są roboty ziemne, a jeśli ziemię należy dowozić na plac budowy, wówczas koszty transportu pochłaniają dużą część budżetu inwestycji. Wykorzystany przeze mnie program AutoCAD Civil 3D jest programem zawierającym, moim zdaniem, najwięcej narzędzi stworzonych z myślą o inżynierii lądowej. W mojej pracy przedstawiłem tylko wąski zakres możliwości tego programu. Civil 3D pozwala, w jednym projekcie (rysunku) przygotować kosztorys realizacji poszczególnych etapów inwestycji. Ponadto pozwala na “przetestowanie” projektowanej trasy za pomocą narzędzia “Jazda”, dzięki, któremu projektant może obserwować projektowaną drogę z punktu widzenia poruszającego się po niej pojazdu. W swojej pracy wykorzystałem numeryczny model terenu, lecz Civil 3D może pracować również na mapach warstwicznych w formacie rastrowym, ortofotomapie czy także załadowanym pliku GIS lub modelu terenu opracowanym na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą scanningu laserowego. Wizualizacja projektu w postaci modelu 3D, przy użyciu programu 3ds Max Design, daje możliwość zaprezentowania projektu inwestorom, czy z drugiej strony ułatwia planistom zadbać o walory estetyczne i właściwe wkomponowanie inwestycji w lokalny krajobraz. Wydaje mi się, że przy okazji udało mi się zrealizować dodatkową tezę w mojej pracy. Uważam że wyraźnie przedstawiłem różnicę pomiędzy projektantem, a narzędziem. Obliczanie wszystkich elementów geometrycznych trasy samodzielnie, zajęło mi kilka dni, natomiast z wykorzystaniem programu Civil 3D, zadanie stało się możliwe do rozwiązania w zaledwie godzin, pomimo faktu że to było moje pierwsze spotkanie z tym programem. Nie ulega jednak wątpliwości, że projektant nie może polegać wyłącznie na możliwościach swojego oprogramowania ponieważ to projektant wprowadza wartości parametrów, które żąda program. Podczas kreślenia krzywej przejściowej z łukiem kołowym, wpisałem parametr A i promień krzywizny łuku. Są to tylko dwa parametry, lecz całkowicie determinują kształt załagodzenia załamania trasy, a więc także komfort jazdy, bezpieczeństwo poruszania się pojazdów oraz estetykę obiektu. Nawet jeśli program, będzie sprawdzał nasz projekt z zaimplementowanymi do wewnątrz programu normami technicznymi (opracowanymi dla danego kraju), nie zwalnia to projektanta z obowiązku zadbania o to aby projekt te normy spełniał.

Większa możliwość obliczeniowa komputera oraz coraz bardziej złożone algorytmy pozwalają na stosowanie niezwykle eleganckich, a jednocześnie złożonych rozwiązań, takich jak składanie łuków pionowych i poziomych. Przykładem może być wykorzystywanie

krzywych przestrzennych w projektowaniu mostów. Techniki komputerowe otwierają szansę dla krzywych, które nie były dotąd chętnie stosowane w projektowaniu dróg. Kiedy zbierałem materiały źródłowe, znalazłem bardzo mało informacji na temat wykorzystania w inżynierii komunikacyjnej spirali logarytmicznych czy krzywych Blossa. Klotoida jest bardzo elegancką i wygodną, z inżynierskiego punktu widzenia, krzywą przejściową i dlatego jest powszechnie stosowana.

Kolejną zaletą współczesnego oprogramowania jest możliwość gromadzenia dużej liczby informacji geodezyjnej w jednym miejscu. Przykładowo, projektując drogę w programie Civil 3D, trzy najważniejsze elementy projektu, czyli plan sytuacyjny, projekt niwelety oraz przekroje poprzeczne, znajdowały się na jednym rysunku. Korzystając z warstwy terenu, opisującej zlewiska, mogłem wziąć pod uwagę ewentualne miejsca gromadzenia się wody opadowej, podczas projektowania pionowych łuków wklęsłych.

W niniejszej pracy pokazałem także, że metody stosowane w inżynierii komunikacyjnej są od lat takie same. Zmieniają się narzędzia, które zastępują inżyniera w wykonywaniu złożonych obliczeń, lecz zrozumienie metody umożliwia prawidłowe stosowanie nowych narzędzi oraz tworzenie ich, gdy pojawią się nowe możliwości technologiczne.

## Literatura

- [1] Lipiński M., Tablice do tycznia krzywych, cz. I (Łuki kołowe), cz II (Klotoida), PPWK, Warszawa 1972.
- [2] Przewłocki Stefan, Geodezja Inżyniersko Drogowa, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [3] Grabowski R.J.: Kształtowanie geometryczne krzywych przejściowych w drogach kołowych, kolejowych i trasach wodnych, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.
- [4] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Klotoida>
- [5] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie z późniejszymi zmianami.
- [6] Gocał Jan, Geodezja inżyniersko-przemysłowa, część pierwsza, wydanie pierwsze, Kraków : Wydaw. Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, 1999.
- [7] Wolfgang Kühn, Fundamentals of road design, Southampton : WIT, 2013.
- [8] Żurowski A. Pomiary geodezyjne w budowie dróg, lotnisk i mostów, Warszawa 1981.
- [9] Opracowanie zbiorowe Gradkowski Krzysztof, Żurawski Stanisław, Budowle i roboty ziemne, skrypt Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.

## **Oprogramowanie wykorzystane w pracy dyplomowej**

LibreCAD - darmowe oprogramowanie na licencji GNU (General Public License) do komputerowego wspierania projektowania (CAD) 2D, źródło: <http://librecad.org/cms/home.html>

AutoCAD Civil 3D – komercyjne oprogramowanie dedykowane dla projektów inżynierii lądowej, dostępne w wersji edukacyjnej i wykorzystane w takiej postaci, w tej pracy, źródło: <http://www.autodesk.com/education/free-software/autocad-civil-3d>

3ds Max Design – komercyjne oprogramowanie służące do tworzenia trójwymiarowej grafiki i animacji, dostępny i wykorzystany w tej pracy w wersji edukacyjnej, źródło: <http://www.autodesk.com/education/free-software/3ds-max-design>

MikroMap – komercyjny program graficzny do tworzenia geodezyjnych map i szkiców, w tej pracy wykorzystany w wersji demonstracyjnej, źródło: <http://www.coder.atomnet.pl/demo.htm>

LibreOffice Calc – arkusz kalkulacyjny pakietu LibreOffice, na licencji wolnego oprogramowania GNU, źródło: <https://pl.libreoffice.org/pobieranie/>

## **Streszczenie**

W pracy dyplomowej przedstawiłem kolejne etapy opracowywania przebiegu trasy drogowej. Głównym założeniem pracy było opisanie metod projektowania poszczególnych elementów trasy, zarówno od strony obliczeniowej jak również przy użyciu współcześnie stosowanego oprogramowania. Cel pracy zrealizowałem, opracowując dwa warianty przebiegu trasy na przygotowanym wcześniej, przez siebie, modelu terenu. Podczas projektowania, stosowałem się do Polskich standardów, uwzględnionych w aktach prawnych, na które się w swojej pracy powołuję. Metody zastosowane w tej pracy są powszechnie stosowanymi w inżynierii komunikacyjnej. Rozwiązanie postawionego problemu inżynierskiego przedstawiłem w formie graficznej z wykorzystaniem programów CAD (*computer aided design*).

**Słowa kluczowe:** CAD, droga, trasa, łuk, klotoida, krzywa przejściowa, niweleta, rampa drogowa.

---

## 6. Nowa metoda lokalizacji i połączenia klotoidy z łukiem kołowym

*P. I. Baran, K. O. Burak, L. Pitoń*

*Wyższa Szkoła Gospodarki Krajowej w Kutnie*

Podczas ruchu po torze zakrzywionym pojawia się siła odśrodkowa równoważąc siły występujące na krzywej, jest to jednostronny poprzeczny profil z nachyleniem do środka krzywej. W tym celu używana jest krzywa przejściowa, promień takich krzywych ciągle się zmienia od nieskończoności na początku, do promienia łuku kołowego na końcu, co prowadzi do stopniowego zmniejszenia wartości przyspieszenia odśrodkowego.

Równanie krzywej przejściowej, w szczególności klotoidy ma postać

$$\rho = RL/l = C/l, \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – promień krzywej przejściowej;  $R$  – promień łuku kołowego;  $L$  – długość krzywej przejściowej;  $l$  – odległość krzywej od punktu początkowego;  $C=RL$  – stała krzywej przejściowej.

Według rozporządzenia drogowego DBN V.2.3-4-2000 długość krzywej przejściowej zaleca się przyjmować od 35 do 130 metrów z promieniem krzywej w zakresie od 50 do 2000 metrów. Na drogach kolejowych, według DBN V.2.3-19-2008, długość krzywych zawiera się w zakresie od 20 do 300 metrów, a w przypadku metra, według DBN V.2.3-7-2010 – od 20 do 80 metrów.

Matematyczna klotoida stosowana na Ukrainie i w wielu krajach Europy opisuje zależność

$$l^2 = 2C\varphi_l; \quad C = RL, \quad (2)$$

gdzie:  $\varphi_l$  – kąt pomiędzy osią odciętych a styczną do krzywej w punkcie P, odległym od jej początku o długość  $l$ ;  $L$  – długość krzywej przejściowej;  $R$  – promień łuku kołowego.

Teoria krzywych przejściowych jest opisana w wielu źródłach [1-11], w których to jest ona rozmieszczona symetrycznie do początku lub końca krzywej obwodowej, co prowadzi do przemieszczenia krzywej do środka krzywizny i zmniejszenia promienia

$$p \approx L^2 / 24R. \quad (3)$$

Aby zająć się tym problemem stosując drugą metodę [2, 4, 8, 9] jednocześnie przesunięciu ulega krzywa obwodowa i zostaje przeniesiony środek jej krzywizny, pozostawiając niezmienny promień. Pomimo tego, zasadniczą wadą lokacji krzywej przejściowej jest przemieszczenie krzywej obwodowej ze swojego początkowego (projektowanego) położenia, prowadząc do znacznych komplikacji w metodzie obliczania parametrów krzywej jak i ich rozmieszczenia w planie.

Opracowano nowy, efektywny sposób określania położenia krzywej przejściowej i jej połączeń z łukiem kołowym, co jest oparte na jego dyslokacji wzdłuż krzywej aż do jej końca. Parametry klotoidy spełniają wymagania SBR i pozostają takie same dla obydwu metod.

Położenie punktów klotoidy wyznaczają współrzędne prostokątne wyznaczone ze znanych wzorów.

$$x = l \left( 1 - \frac{l^4}{40C^2} \left( 1 - \frac{l^4}{86,4C^2} \right) \right); \quad y = \frac{l^3}{6C} \left( 1 - \frac{l^4}{56C^2} \left( 1 - \frac{l^4}{125,7C^2} \right) \right); \quad C = RL. \quad (4)$$

Współrzędne końca klotoidy obliczone za pomocą tych wzorów mają postać :

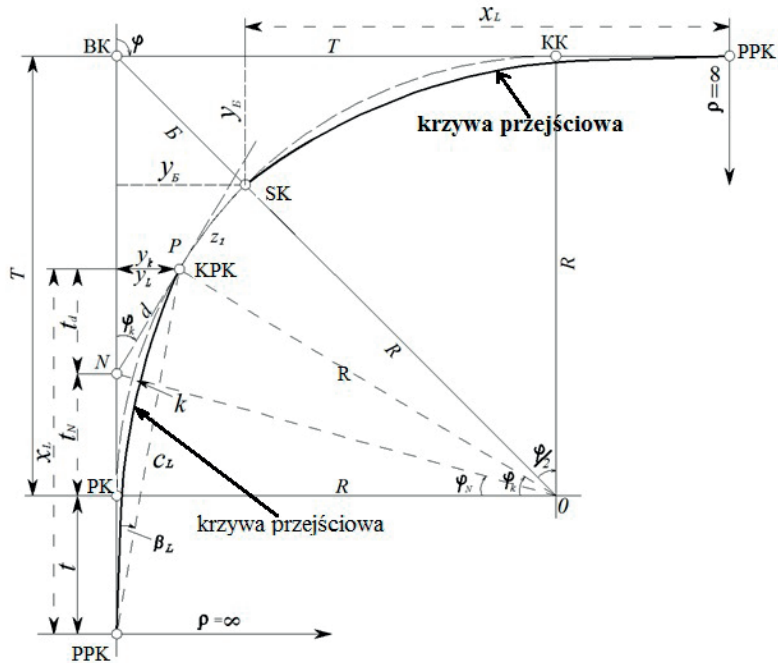
$$x_L = L \left( 1 - \frac{L^2}{40R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{86,4R^4} \right) - \dots \right); \quad y_L = \frac{L^2}{6R} \left( 1 - \frac{L^2}{56R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{125,7R^4} \right) - \dots \right). \quad (5)$$

Położenie klotoidy i jej połączenie z łukiem kołowym przedstawiono na rys. 1. Aby określić położenie końca klotoidy trzeba wyznaczyć wierzchołek kąta obrotu a następnie odcięte i współrzędne łuku kołowego w punkcie KPK względem początku krzywej PK.

$$\varphi_k = \frac{180^\circ k}{\pi R} = \frac{k}{R}; \quad x_k = R \sin \varphi_k; \quad y_k = R(1 - \cos \varphi_k) \approx \frac{k^2}{2R} \left( 1 - \frac{k^2}{12R^2} + \frac{k^4}{360R^4} - \dots \right), \quad (6)$$

Gdzie kąt jest podawany w radianach





Rys.1 Położenie krzywej przejściowej

Współrzędne prostokątne punktu KPK względem początku krzywej przejściowej wyznacza się według wzorów (3).

W ten sposób, pod koniec krzywej przejściowej powinien być spełniony warunek  $y_L = y_k$  aóo

$$\frac{L^2}{6R} \left( 1 - \frac{L^2}{56R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{125,7R^2} \right) - \dots \right) = \frac{k^2}{2R} \left( 1 - \frac{k^2}{12R^2} \left( 1 - \frac{k^2}{30R^2} \right) - \dots \right) \quad (7)$$

Jest to łatwe do określenia, zależy od długości klotoidy lub odwrotnie długość L od K, a mianowicie:

$$k = \frac{\frac{L}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \frac{L^2}{56R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{125,7R^2} \right) - \dots}}{\sqrt{1 - \frac{k^2}{12R^2} \left( 1 - \frac{k^2}{30R^2} \right) - \dots}} \approx \frac{L}{\sqrt{3}}; \quad (8)$$

$$L = \frac{k \sqrt{3 \left( 1 - \frac{k^2}{12R^2} \left( 1 - \frac{k^2}{30R^2} \right) - \dots \right)}}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{56R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{125,7R^2} \right) - \dots}} \approx k\sqrt{3}.. \quad (9)$$

Pierwsza formuła jest używana przy połączeniu łuku kołowego z krzywą a druga formuła gdy krzywa jest zastąpiona klotoidą.

Aby obliczyć dokładne (do 1 mm) wartości należy najpierw określić przybliżone wartości  $k' \approx L/\sqrt{3}$  lub  $L' \approx k\sqrt{3}$  oraz metodą iteracji obliczyć wartości mianowników ww. wzorów. Tak więc, na przykład jeśli  $L_0 = 90,000$  m to obliczona wartość orientacyjna  $k' \approx 51,9615$  m lub 51,9565 w liczniku, następnie w mianowniku 0,9995497 – dokładna wartość wynosi  $k = 51,980$  m.

Jeśli to konieczne, należy ustawić wartości tak aby zwiększyć lub zmniejszyć optymalne warunki dla lokalizacji krzywych.

Mniejsze odchylenie od krzywej przejściowej ma miejsce w pierwszej połowie strefy PK (do SPK) a większe w drugiej połowie (do KPK) gdzie obie krzywe pokrywają się. Średnia całkowita przemieszczenia krzywych na długości krzywej przejściowej wynosi,

$$\Delta\bar{y} = \frac{L^2}{104R}, \quad (10)$$

które dla powyższych krzywych wynosi tylko 0,15m.

Poprzez takie zbliżenie krzywych, punkty końcowe wykonane podczas badań ulegają obniżeniu o wartość

$$\Delta P = 0,577211(L_1 + L_2) + (K_1 + K_2) - K, \quad (11)$$

która zazwyczaj nie przekracza - 50mm.

Takim sposobem można określić położenie krzywej z promieniem krzywizny  $\rho = R$ .

Wzór (8) jest najbardziej skuteczny ponieważ badania wykonywane są w laboratorium lub w warunkach polowych z początkową wartością promienia wyznaczającą elementu łuku kołowego, w tym jego długości K, a następnie po wybraniu długości krzywej

przejęciowej należy obliczyć jej podstawowe elementy ustalające położenie krzywych w geometrii drogi, łącznie z wykorzystaniem tablic z wartościami R i L.

Inne parametry klotoidy wymagane dla widoku układu określane są według wzorów:

$$t_k = x_k = R \sin \varphi_k; \quad t = x_L - t_k; \quad c_L = \sqrt{x_L^2 + y_L^2}; \quad \beta_L = \arctg(y_L / x_L), \quad (12)$$

Gdzie:  $t_k$  – odcięta punktu KPK od PK;  $t$  – odcięta PK w stosunku do PPK.

Rozmieszczenie punktów pośrednich zależy od ich współrzędnych prostokątnych, które oblicza się według wzoru (4) z wykorzystaniem odległości od punktu PPK lub wybranych tabel krzywych. Jednocześnie obliczana jest odległość od PPK do klotoidy PK i jej rzędnej.

$$l_{\text{PK}} = t / \sqrt{\left(1 - \frac{t^2}{40C^2} \left(1 - \frac{t^2}{86,4C^2}\right) - \dots\right)}; \quad y_{\text{PK}} \approx \frac{l_{\text{PK}}^3}{6C}, \quad (13)$$

W razie potrzeby za pomocą wzoru (4) można obliczyć odciętą i rzędną w połowie klotoidy SPK.

Dla widoku pozostałego łuku kołowego wyznacza się metodą współrzędnych prostokątnych lub biegunowych początkowy punkt N, który umieszczony jest w odległości od punktu PK.

$$t_N = \frac{y_L}{\operatorname{tg} \varphi_k}; \quad d = \sqrt{t_N^2 + y_L^2} = \frac{y_L}{\sin \varphi_k}. \quad (14)$$

Należy zauważyć, że umieszczanie krzywej przejęciowej może być wykonane w warunkach

$$k_1 + z_1 + z_2 + k_2 \leq K \quad \text{a} \quad \text{b} \quad \frac{L_1 + L_2}{\sqrt{3}} + z_1 + z_2 \leq K, \quad (15)$$

gdzie:  $z_1, z_2$  – pozostałe łuki kołowe, których suma ma odpowiednią długość (20-40m) w zależności od typu budynku. Jeśli to wymaganie nie jest spełnione, należy zwiększyć standardowy zakres wartości, a co za tym idzie, obwodową długość krzywej K.

Ilustracji praktycznego zastosowania tej metody jest podana w oparciu o krzywą obwodową z takimi danymi źródłowymi do obliczenia jego elementów:

$$\varphi = 26^\circ 16'; \quad R = 500; \quad T = 116,660; \quad K = 229,220; \quad B = 13,429 \quad \text{i} \quad D = 4,101 \text{ m}$$

Długość krzywej przejściowej przyjmowana jest jako 90,000m i obliczane są odpowiednie wartości krzywej w obszarze:

$$\begin{aligned} k' &\approx 51,962 : k = 51,980; \varphi_k = 5^\circ 57' 23,2''; x_k = t_k = 51,886; \\ y_k &= 2,6984; x_L = 89,927; y_L = 2,6984 \text{ (kontrolaobliczen)}; \\ t &= x_L - x_k = 38,041; c_L = 89,968; \beta_L = 1^\circ 43' 07,4''; y_{\text{ПК}} = 0,204; \\ t_N &= 25,863; d = 26,003 \text{ m}; \varphi_k = 5^\circ 57' 23,3'' \text{ (kontrolaobliczen)}. \end{aligned}$$

Jak widać, dobrana długość klotoidy 90m zapewnia połączenie z łukiem kołowym w połowie jego długości co pozwala na zwiększenie klotoidy do 20-30m. Analogicznie umieszczona jest krzywa w drugiej połowie krzywej (symetryczne krzywe przejściowe) lub klotoidy o różnych długościach (asymetryczna krzywa przejściowa). Oczywiście w pierwszym przypadku pozostałe odcinki krzywej mają taką samą długość, a w drugim – różne długości w asymetrycznym rozstawie.

Elementy krzywej z asymetrycznymi klotoidami obliczane są według wzorów.

$$\begin{aligned} T_{\text{П}_1} &= T + t_1; T_{\text{П}_2} = T + t_2; K_{\text{П}} = L_1 + z_1 + z_2 + L_2; \\ \text{Б}_{\text{П}} &= \text{Б}; \text{Д}_{\text{П}} = (2T + t_1 + t_2) - (L_1 + z_1 + z_2 + L_2), \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie:  $T, K, \text{Б}, \text{Д}$  – elementy łuku kołowego.

Analiza zmiennych pokazuje, że dolna część krzywej przejściowej (42%) zajmuje obszar prostej (do PK), a większość (58%) – obszar łuku kołowego. Ponadto, te elementy są tak skorelowane, że  $k \div 0,73k$  (suma współczynników proporcjonalności wynosi  $\sqrt{3}$ ). Przypomnijmy, że w tradycyjnym systemie wprowadzania klotoidy stosowanym obecnie w praktyce, krzywa ta dzieli PK na dwie połowy, co doprowadziło do znacznych komplikacji w technologii widoku układu krzywej. W nowej metodzie przemieszczenie SPK w stosunku do PK wynosi  $\Delta x_{\text{СПК}} = 0,0772L$  ze znaczącym techniczno-ekonomicznym efektem. W naszym przykładzie  $x_{\text{СПК}} = 44,988; y_{\text{СПК}} = 0,338 \text{ m}$ , a odległość SPK od PK wzdłuż stycznej wynosi 6,947 m.

Dla **symetrycznych krzywych klotoidalnych**  $L_1 = L_2 = L_3$  i zgodnie z założeniami  $y_k = \text{Б} \cos \varphi / 2$  długość dwusiecznej łuku kołowego na pionowej osi klotoidy ustalana jest według wzoru (9)

$$L = \frac{\sqrt{6R \text{Б} \cos \varphi / 2}}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{56R^2} \left(1 - \frac{L^2}{12R^2}\right)}} \approx \sqrt{6R \text{Б} \cos \varphi / 2}. \quad (17)$$

Zauważono, że krzywe klotoidy są połączone w środku krzywej SK i są symetryczne bez pozostałych łuków kołowych.

Zgodnie z przedstawionym przykładem dla  $B=13,429$ ;  $y_k = 13,077$  i  $R=500\text{m}$  uzyskano wartość ułamkową  $L= 198,353\text{m}$ . Dla kontroli wyznaczenia  $L$  ze wzoru (5) można obliczyć wartość  $y_L$ .

Jest oczywistym, że promień łuku kołowego klotoidy w punkcie SK jest równy normalnemu promieniowi łuku kołowego.

### Wnioski

1. Przesunięcie środka krzywej przejściowej od początku łuku kołowego o wartość  $0,772 L$  zapewnia proste połączenie krzywych bez przemieszczenia łuku kołowego z pierwszego położenia, wybranego w procesie projektowania lub badań polowych.
2. Metoda zapewnia maksymalnie (do  $0,5\text{m}$ ) przybliżenie krzywej przejściowej i łuku kołowego, co praktycznie nie zmienia pikietażu.
3. W konsekwencji prostego połączenia krzywej przejściowej i łuku kołowego znacznemu uproszczeniu ulega metoda rozmieszczenia krzywych na drogach kolejowych i zmniejsza się liczba osi w liniowym transporcie zabudowanym, zwłaszcza w tunelach.

### Literatura

1. *Baran, P.I.* До теорії та практики розпланування сучасних перехідних кривих / P.I. Baran // Вісн. геодез. та картогр.– 1998.–№3.– str.20-26.
2. *Baran, P.I.* Інженерна геодезія / P.I. Baran.– К.: Віпол. – 2012. – str.618.
3. *Белятынский, А.А.* Таранов А.М. Применение кривых нового типа при проектировании закруглений автомобильных дорог/ А.А. Белятынский, А.М. Таранов // Строительство и архитектура.– 1981.– №2.–str.104-106.
4. *Бобков, В.Ф.* Дорожные условия и безопасность движения / В.Ф. Бобков: учеб. для вузов.– М.,Транспорт: 1993.–str.271.
5. *Бойчук, В.С.* Довідник дорожника /В.С.Бойчук.–К.:Урожай,2002,– str.560.
6. *ДБН В.2.3-4-2000.* Автомобільні дороги. К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000, – str.100.
7. *Каменецкий, Б.И.* Автомобильные дороги /Б.И. Каменецкий, И.Г.Кошкин.–М.:Транспорт,1979.– str.144.
8. *Левчук, Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н.* Прикладная геодезия /Г.П. Левчук, В.Е. Новак, Н.Н. Лебедев.– М.: Недра, 1983.– str.400.
9. *Сокол, Э.Н.* Кривые переменного радиуса и их применение на трубопроводном транспорте. Э.Н. Сокол.– Л.: Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1984,– str.88 .

10. *Цилль, В.* Инженерная геодезия (перевод с 6-го немецкого издания) / В.Цилль. – М.:Недра, 1974. – str. 430.
11. *Geodezja inżynieryjna. Tom 1* – Warszawa, PPWK. – 1979. – str.638.
12. *Baran, P.I.* Новий спосіб розміщення клотоїди та її з'єднання з незміщеною коловою кривою / P.I.Baran, К.О.Бурак // Вісн. геодез. та картогр. – 2013. – №3. – str.11-14.

**Artykuł recenzowany**