

PASSENGER CAR – SEMITRAILER UNDERRIDE CRASH AT NIGHT – A CASE REPORT

Wojciech WACH, Jan UNARSKI

Institute of Forensic Research, Kraków, Poland

Abstract

The paper is an abridged report on the reconstruction of a rather complicated road vehicle accident in which a passenger car underrode a semitrailer during night conditions. The aim of the paper is to present the methodology of investigating multi-faceted problems in the field of inverse engineering, the solving of which goes far beyond resolving the elementary forensic, mathematical or laboratory issues. The paper includes, *inter alia*, the calculation of impact velocity by means of Kudlich-Slibar model, energy-based method and finite element method, as well as the time-distance analysis of the pre-crash phase. What deserves special attention is the section in which a unique method of investigating the obstacle visibility, including glare, at night is described.

Keywords

Road vehicle accident; Frontal underride crash; Finite element method; EES; Night visibility; Experiment.

Received 22 January 2019; accepted 18 March 2019

1. Introduction

Each road accident has its individual characteristics, and its reconstruction requires not only expertise in the methodology and mathematics, but the ability to solve complicated tasks of inverse engineering as well. This is why not only the papers that describe narrow range studies are valuable, but also those that show the way of developing major, real-life “inverse projects” which require the solution of essentially different, frequently very far apart problems and combine information into a coherent whole.

The present paper bears the features of a report, and its aim is to present the course of the procedure followed to resolve a rather complicated case. On account of the limited size of the paper and out of respect for the participants in the accident, many details of the original report have been omitted, many have been abridged, and those insignificant have been changed. The section of the paper that deserves special attention

is one describing the unique methodology of investigating obstacle recognition at night in dynamic conditions, including glare, by performing an experiment, measurements and calculations.

2. Accident scenario

The traffic vehicle accident happened on 13 May 2011 at night, on a straight section of the road passing through a village, where there was a speed limit of up to 50 km/h, as it was a built-up area. The topography of the place is shown in Figure 1: (a) a sketch of the accident site showing the end positions of the vehicles, (b) topographic photograph from the Google Earth, taken at daytime. In the accident, the passenger car Ford Escort, driven along the right lane, rode beneath left side of the semitrailer that was completely blocking the road, sitting at an angle of ca. 50° to the road axis.

The two-way roadway consisted of two travel lanes 3.2 m each. The road was horizontal and straight on the section of ca. 400 m ahead of and 145 m behind the accident site, looking in the direction of the Ford's travel direction. On the accident site, on the right, there was a bus bay, from which an entry road to an estate branched off to the right.

The asphalt surface was clean, smooth and damp. There was no rainfall, the sky overcast, clear air. The road was illuminated with four lamps situated on the left-hand side (to the Ford's travel direction), about every 100 m, lamp No. 1 was next to the truck-tractor in its post-collision position.

The driver of the truck-tractor coupled with a semi-trailer argues that initially he had been driving along his right lane in the opposite direction to that of the

Ford and he had intended to drive into the courtyard of the property which was on his left. Since the gate was narrow, the easiest way to do it was by reversing manoeuvre, so he stopped a little bit ahead, performed the manoeuvres necessary to "break" the combination vehicle, and – having made sure that there was no traffic in either direction – began backing up towards the gate. The driver maintains that his combination vehicle was very clearly visible, because during the reversing manoeuvre both the low beam headlights and warning hazard flashers were on. Additionally, the side marker lights on the semitrailer were also on and, moreover, the site of the manoeuvre was illuminated with the street lamps. Even as he was reversing, he noticed an oncoming passenger car approaching him, which – at the distance of ca. 20 m away – began to brake violent-

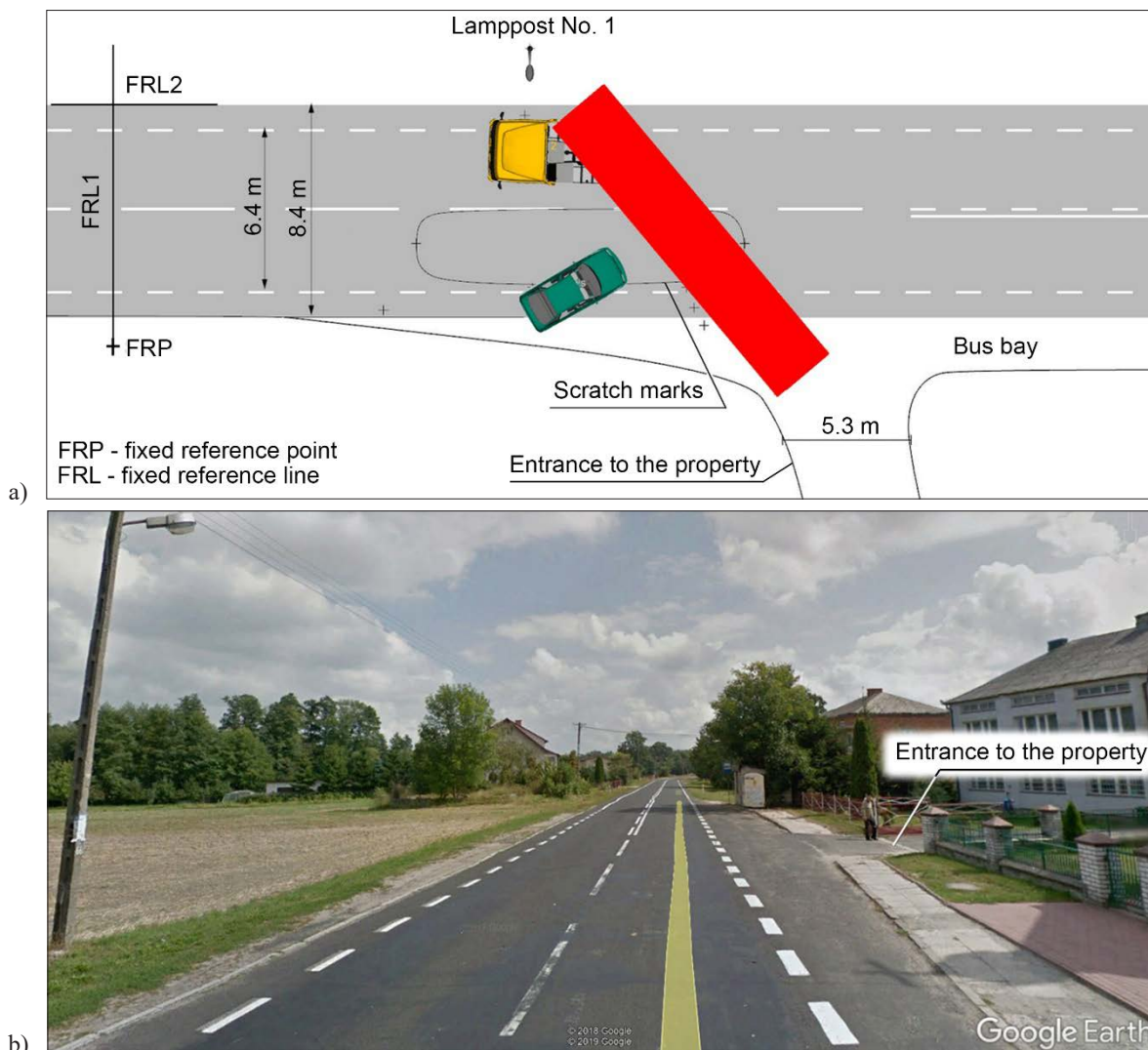


Fig. 1. Topography of the accident site: a) sketch of the post-collision situation when the police arrived, b) view in the direction of the Ford's travel (Google Earth).

ly with a screech of tyres. The car hit the left side of the semitrailer and was pinned between the road, the frame bottom and the frontal part of the semitrailer’s front left wheel, slightly diagonally to the road axis.

The Ford started to burn, and it was only owing to the rescue action that enabled the Ford to be pulled out from under the semitrailer and removed to the position indicated in Figure 1a, but above all, its driver was rescued. The Ford’s driver did not remember how the accident had happened. Both drivers were sober.

3. Traces and damage to the vehicle

The vehicles’ positions as the police found them are shown in Figures 2, 3, 4, 7 and 10. Neither the examinations nor reports on their technical condition revealed defects that could have contributed to the accident.

In the photographs the Ford looks as if it had suffered from catastrophic damage, but, in actual fact, the primary damages should be separated from the secondary ones. The primary ones are located in the front and are a direct effect of the collision, while the secondary ones are an effect of the rescue operation and the fire, and they include:

- cut off pillars – central left and rear right,

- cut across pillars – front and rear left,
- the top of the car bent upwards,
- deformation of the rear section, which resulted from pulling out the vehicle from under the semitrailer, cutting and bending the metal sheets, removing the rear door to evacuate the driver.

The upright position of the engine cover is evidently not an effect of the collision, but of being lifted by the firemen to reach and extinguish the fire source, after the car was pulled away from the semitrailer. The creases in the whole area of the cover, however, resulted from its being pushed down during the underride.

On both sides of the semitrailer, 2.9 m apart, there were side marker lights amber in colour, with retroreflective elements. On its left side there were scratches and fire-caused scorch marks visible. The truck-tractor was not damaged.

4. Reconstruction

4.1. Impact velocity

The Ford front wedged and became pinned between the roadway and the lower frame side member of the semitrailer, partly owing to the deflection of the Ford’s front suspension and rolling of the semitrailer.



Fig. 2. Damage to the Ford Escort.

The cover of the car engine compartment, shifting under the semitrailer's frame, was pushed downward and deformed from above. At the same time, the car rotated counter-clockwise through a shallow angle. The Ford's underride was stopped when its front left pillar reached the edge of the cargo box. In Figure 4 the yellow line indicates the rectilinear edge of the deformation, which passes diagonally through the engine cover, which undoubtedly is a representation of the bottom edge of the semitrailer frame, and so indicates the final position of the Ford after it had wedged beneath the semitrailer. The probable end position of the Ford is shown in Figure 5. The complete damage of the car

visible in the photograph is extremely evocative, but in the area from the front plate to the rear of the body the damage was done by the rescue operation and does not have much to do with the post-collision state.

The energy of residual deformation is measured by *EES* parameter (*Energy-Equivalent Speed*) expressed in a speed unit. Its value was estimated with three methods:

- a) by means of an empirical dependence;
- b) by a comparison with the results of crash tests;
- c) by means of simulation, employing the finite element method.



Fig. 3. Damage to the semitrailer and Ford Escort.



Fig. 4. The edge of deformation of the engine cover caused by the semitrailer frame edge.

Re a. Empirical dependence

In their paper (2003), Trego, Enz, Head and Oshida discuss the analysis of the results of thirty-three crash tests, in which the front of a passenger car underrode a still box trailer and impacted it at the height of the windscreen and pillars. An equation for the energy of residual deformation of the car body in the area of the pillars and roof was developed (disregarding the deformation of the engine compartment):

$$EES_1 \text{ [km/h]} = 1.609 \frac{1}{\sin\theta} \sqrt{D_1 \frac{694}{m}}, \quad (1)$$

where:

- D_1 – energy of the test car deformation (i.e. the car used in the crash tests) in [mph²], which is a sum of the values of the fields covering the deformed area visible in Figure 6,
- m – actual weight of the car involved in the accident, in [kg],
- θ – angle of underride (i.e. the acute angle between the longitudinal axes of the colliding vehicles) in [°].

Having adopted the data: $D_1 = (2 \cdot 31 + 4 \cdot 17) / 2 \approx 65 \text{ mph}^2$, $m \approx 1140 \text{ kg}$, $\theta = 50^\circ$ and the values from Figure 6 corresponding to the marked field, $EES_1 \approx 13 \text{ km/h}$.

Figure 7 shows the engine compartment whose deformation was divided into two zones and estimated with CRASH3 method (CRASH3, 1986):

- $EES_2 \approx 32 \text{ km/h}$ – characterises the deformation of the area of the right mudguard of the depth of ca. 0.75 m and width of ca. 0.30 m including the backward displacement of the right wheel;
- $EES_3 \approx 25 \text{ km/h}$ – characterises the deformation of the engine compartment from above together with the bending of the door sill with the floor in the area of the front right door. To roughly estimate EES_3 , these deformations were substituted by the longitudinal deformation of the depth of 0.20 m and width of 1.69 m.

The total initially estimated with this method would be ca.:

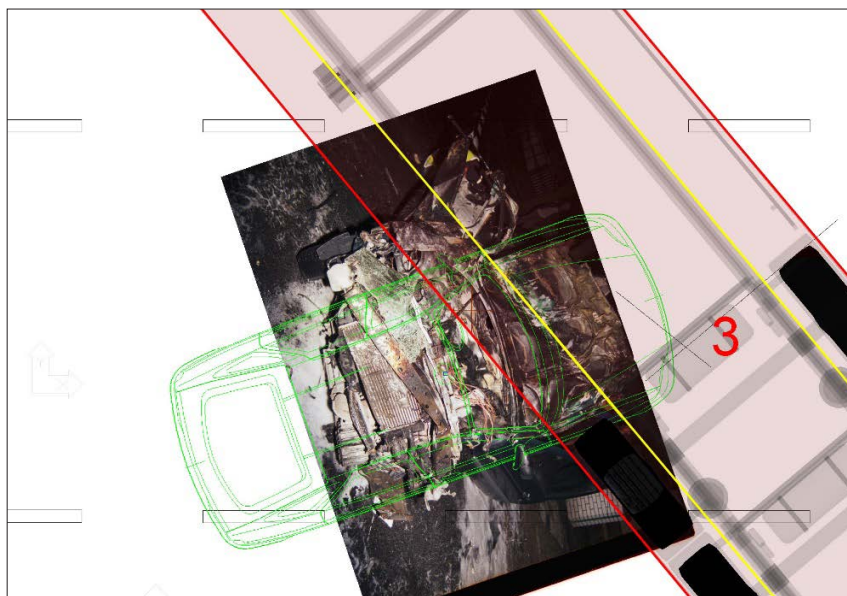


Fig. 5. The Ford’s position immediately after the collision.

$$EES = \sqrt{EES_1^2 + EES_2^2 + EES_3^2} = \sqrt{13^2 + 32^2 + 25^2} = 43 \text{ km/h.} \quad (2)$$

Taking into account the Ford's wedge and the considerable difficulties with pulling it from under the semitrailer, as well as the trailer's roll, it should be stated that the speed immediately prior to the collision was higher than the calculated value of *EES*.

Re b. Comparison with the results of crash tests

The car damages were compared with the results of crash tests consisting in:

- perpendicular underride of the Oldsmobile Cutlass (43 km/h; Wakefield, Cothorn, 1994) against the side of a semitrailer;
- diagonal underride of the Chevette (56 km/h; Wakefield, Cothorn, 1994) against the side of a semitrailer and
- perpendicular underride of two Honda Civic cars at the speed of 56 km/h against a deformable ramp located at two different heights: 48 cm (level of headlamps) and 56 cm (level immediately above headlamps; Boucher, Davis, 2000).

In the first two cases the engine compartment was left intact, because the vehicles impacted the semitrailer's frame at the height of the front pillars. In the third case, similar to the case analysed in the present paper, the top of the engine compartment was deformed

and, moreover, the door sill bending behind the front wheels is clearly visible. Similar results were presented in (Cofone, Craig, 2011). Concluding, raising the expected value of *EES* to at least 45 km/h is fully justified.

Re c. Simulation by means of the finite element method, FEM

Using the PC-Crash 11.0 program cross calculations were performed by means of the finite element method. Models of two cars were used: Geo Metro 1997 and Ford Taurus 1996, the former of which is slightly smaller, the latter one slightly bigger than Ford Escort. The vehicles designs together with sub-assemblies were described by means of a mesh of finite elements, and the simulation of the deformation process included: materials data, strength modelling, stress and strain as well as dynamics. The validated FE models of the vehicles are derived from the data basis made accessible to the public by the National Crash Analysis Center of George Washington University.

The spatial geometry of the semitrailer elements impacted by the Ford, including the frame, cargo box, steel cantilever of the semitrailer front left wheel and front of the left front wheel, was modelled using the actual dimensions of these elements (the bottom edges of the frame and the cargo box ca. 0.75 m and 1.00 m, respectively, above the roadway, the semitrailer body

	L ₃	L ₂	L ₁	R ₁	R ₂	R ₃	Total
A	31	17	17	17	17	31	130
B ₁	43	24	24	24	24	43	182/312
B ₂	95	57	57	57	57	95	418/730
B ₃	29	12	12	12	12	29	106/836
B ₄	49	27	27	27	27	49	206/1042
C	109	61	61	61	61	109	462/1504
in [mph ²]							



Fig. 6. Energy of deformation of the area of pillars and roof (Trego et al., 2003); the values in the fields have the dimension [mph²].

Fig. 7. Deformation of the Ford's engine compartment.

protruding ca. 0.40 m beyond the frame, semitrailer pitch angle ca. 2°, the angle of the car impact against the semitrailer $\theta = 50^\circ$).

The deformations suffered by the virtual cars at impact velocity of 45 km/h, shown in Figures 8 and 9,

indicate that this velocity was estimated conservatively. Therefore, taking into account also the analysis presented in sub-sections (a) and (b), it can be concluded that the Ford’s **impact velocity** v_c was 45 km/h or little more.

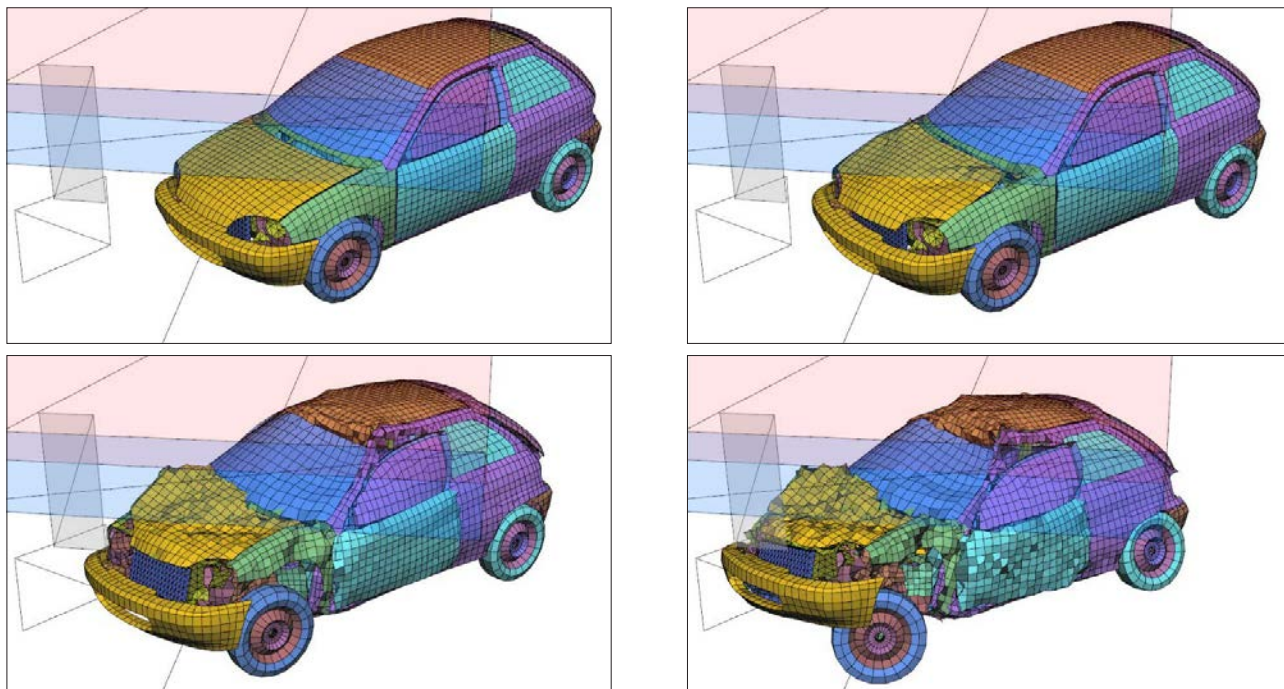


Fig. 8. FE simulation of Geo Metro – semitrailer underride at the speed of 45 km/h.

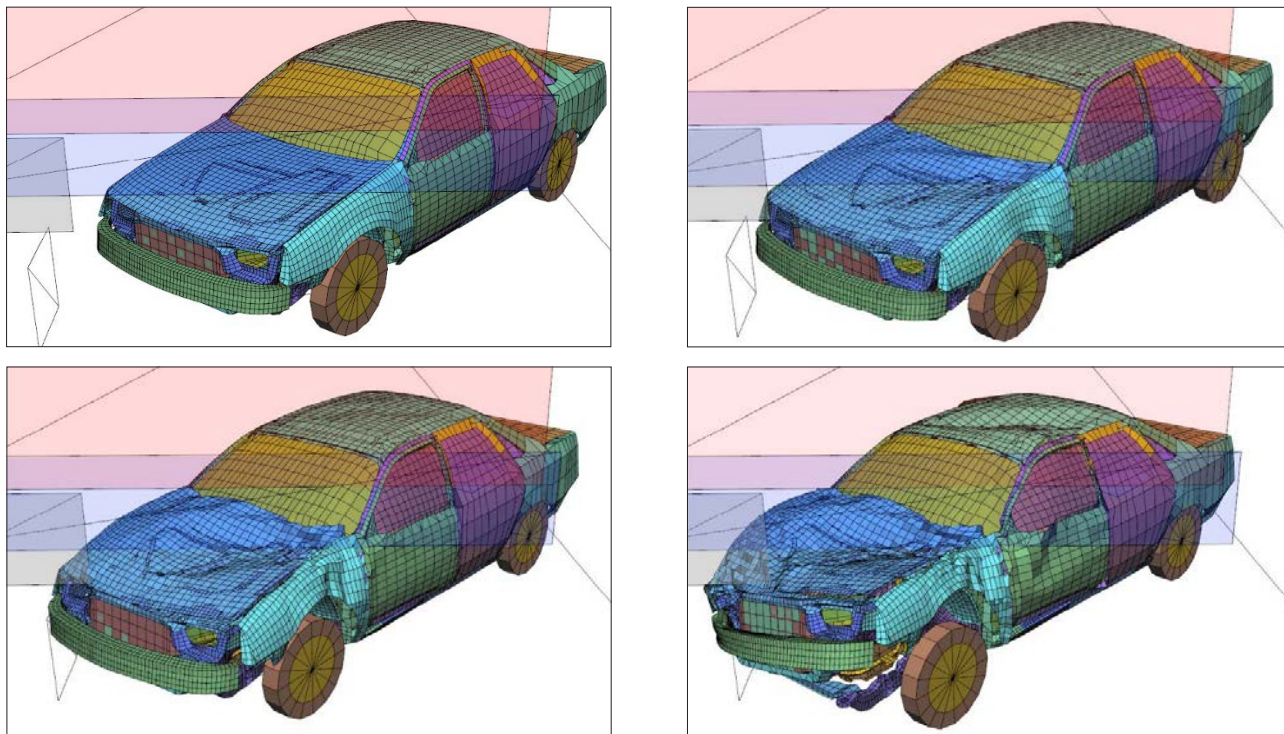


Fig. 9. FE simulation of Ford Taurus – semitrailer underride at the speed of 45 km/h.

For more details on the modelling of underride against a high, stiff obstacle in the approaches (a) and (b) see paper by W. Wach (2012).

4.2. Initial velocity

Cases of a hazard similar to the one the Ford's driver faced usually evoke a natural defensive reac-

tion such as violent braking, because there is no other choice. The failure to disclose braking tracks can be explained not only by the lack of such tracks, but also by the police officers focusing on the evocative area around the damaged car, full of debris, foam and other residue material of the rescue operation. The police officers may also neglect the anterior section of the road and miss the tyre tracks poorly visible on the



Fig. 10. The rectilinear trace the police failed to disclose.

dark roadway. Another explanation is poor visibility at night or, finally, moderate experience of the police officers in disclosing rather subtle traces.

As can be seen in Figure 10 (and it is even better to look at the photograph shown in it on the computer screen), on the right lane of the road in front of the Ford there was a long straight trace that looked like a track of a wheel braked violently. From its localisation across the road it may be inferred that it might have been left by the Ford's left front tyre, and although on the subsequent section it is covered with foam, its extension leads straight to the Ford's impact position. It is highly unlikely that the track was made during the rescue operation, because on the entire length it is straight, with no curves, and had been made before it was covered with foam. This hypothesis is also supported by the findings of the inspection of the scene of accident. Because of the limited scope of the paper, the details of this reasoning have been omitted.

The track continues beyond the bottom photograph in Figure 10. Hence it is known that it was at least 19 m long, however, its entire length cannot be specified because the photographs in the records of investigation, showing the anterior section of the road, are poorly exposed. By means of *PC-Rect* program a photogrammetric transformation of the photographs in Figure 10 was performed, which produced an orthophotomap shown in Figure 11. The solid lines indicate the path of the left track, the broken lines – the presumed right track.

If it were concluded that the track visible in the photographs was left during the accident, it would mean that the Ford's speed prior to sudden braking was at least 71–76 km/h. After the data:

$v_c = 45 \text{ km/h} = 12.5 \text{ m/s}$ – impact velocity,
 $a = 5.5 \text{ to } 7.0 \text{ m/s}^2$ – braking deceleration,
 $s > 19 \text{ m}$ – braking distance,
 $t_l = 0.2 \text{ s}$ – lag time

were adopted, this speed was calculated from the formula:

$$v = \sqrt{v_c^2 + 2as} + \frac{a}{2} t_l \quad (3)$$

Otherwise, the calculation of the initial speed from before the braking phase is impossible, in other words, only the impact velocity v_c of the order of 45 km/h would be known.

4.3. Visibility – results of experiment

The fundamental challenge of the discussed case is to determine the distance from which an average, sensible driver would be able to notice the hazard – in the circumstances of the analysed accident. Therefore, an experimental reconstruction was performed on the accident site, aimed at the measurements of the lighting parameters, with the following characteristics maintained:

- overcast,
- no precipitation,
- damp roadway (with water poured by the fire brigade),
- very clear air,
- the same type of road surface.

The experiment was performed on 20 June 2017, it started at 11:20 p.m. This time was selected to ensure identical natural illuminance (0 lx, Figure 12b), prevailing at the time of the accident at about 10:10 p.m., on 13 May 2011 (0 lx, Figure 12a).

The street lamps by the roadside were the same as on the day of the accident, producing – as the witnesses and local residents present at the experiment testi-



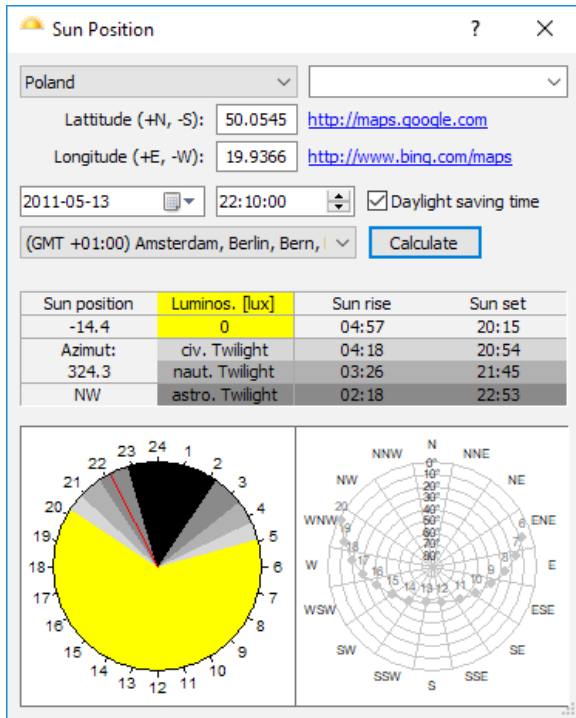
Fig. 11. Orthophotomap of the accident scene.

fied – illuminance very similar to that at the time of the accident.

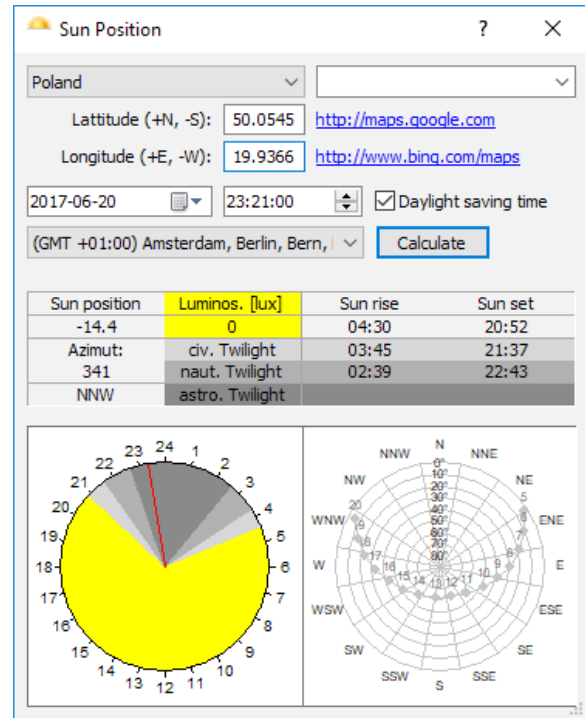
In the experiment two vehicles were used: a Ford Escort car with headlamps similar to those of the car involved in the accident, and a truck-tractor with a semitrailer shown in Figure 13.

The differences visible in the photographs were easily removed, taking the elementary measurements on the identical elements, on different elements for comparison only.

The combination vehicle was placed in the position as in Figure 1a, practically identical with the impact position and remained unchanged during the several critical seconds prior to the accident. The Ford, on the other hand, on the right lane for its heading, with the low beam headlights on, was in subsequent measurements moved every 10 m closer to the place of accident, starting from the metre 100 ending at the metre 10. Each time the photographs were taken from the



a)



b)

Fig. 12. Selection of the time of experiment on account of illuminance: a) illuminance at the time of accident at around 10:10 p.m., 13 May 2011, b) illuminance during the experiment that started at 11:20 p.m., 20 June 2017.



a)



b)

Fig. 13. Comparison of the semitrailers: a) the semitrailer involved in the accident (photograph taken with a flash-lamp), b) the semitrailer used in the experiment (no flash-lamp).

driver's seat, with the LMK device (Unarski, Wach, Cięпка, 2013).

The measurements were taken in two versions of illumination with street lamp No. 1 (i.e. the lamp on and off), in the vicinity of which the truck-tractor's cab was situated. The observations made during the experiment indicated that this lamp had a marginal effect on the illumination of the car, because the light from it was very poor and covered, at the most, the front right corner of the semitrailer above the cab and the spoiler on the cab top. These elements are definitely beyond the area of the focus and visual acuity of the driver looking ahead, towards the end of the field illuminated by his headlamps. To discern these elements of the cab front illuminated more brightly, the driver would have to look straight at the headlamps of the truck-tractor. Moreover, even if he did discern them in this place, this would not carry any important information, because both the tractor's cab and the upper part of the semitrailer's front wall would look practically the same, regardless of whether the entire combination vehicle was located along the road or the semitrailer was sitting still across the road. This is why for the measurements of the boundary parameters the background and glare from the stationary truck-tractor were selected, and the elements of the measurements of visibility included:

- 1) silver (pearl grey) side of the semitrailer's cargo box,
- 2) tyres (the first of the three tyres of the semitrailer's left side),
- 3) the semitrailer's wheel disk (it is brighter than the tyre),
- 4) amber side marker lights on the semitrailer's box,
- 5) orange retroreflective tape – along the semitrailer's box,
- 6) the front right upper section of the semitrailer and cab illuminated by the street lamp.

The measurement points matrix is shown in Figure 14. The photographs are a set of data for the calculation of the possibility of obstacle recognition in dynamic conditions, which means while driving. This is different from the static recognition, because what is the decisive parameter is the time period of sighting, which in static conditions may be unlimited, while in dynamic conditions it is 0.2–0.3 s.

The sighting distance was calculated in the authors' original spreadsheet in *Excel*. Using the so-called Berek's curves the boundary parameters of the luminance levels of obstacle elements, the exceeding of which indicates that the given elements should be discerned. The calculations also include the so-called practice factor PX , which for expected objects is $PX = 5$. This value is justified by the fact that the driver was travelling through a built-up area and was

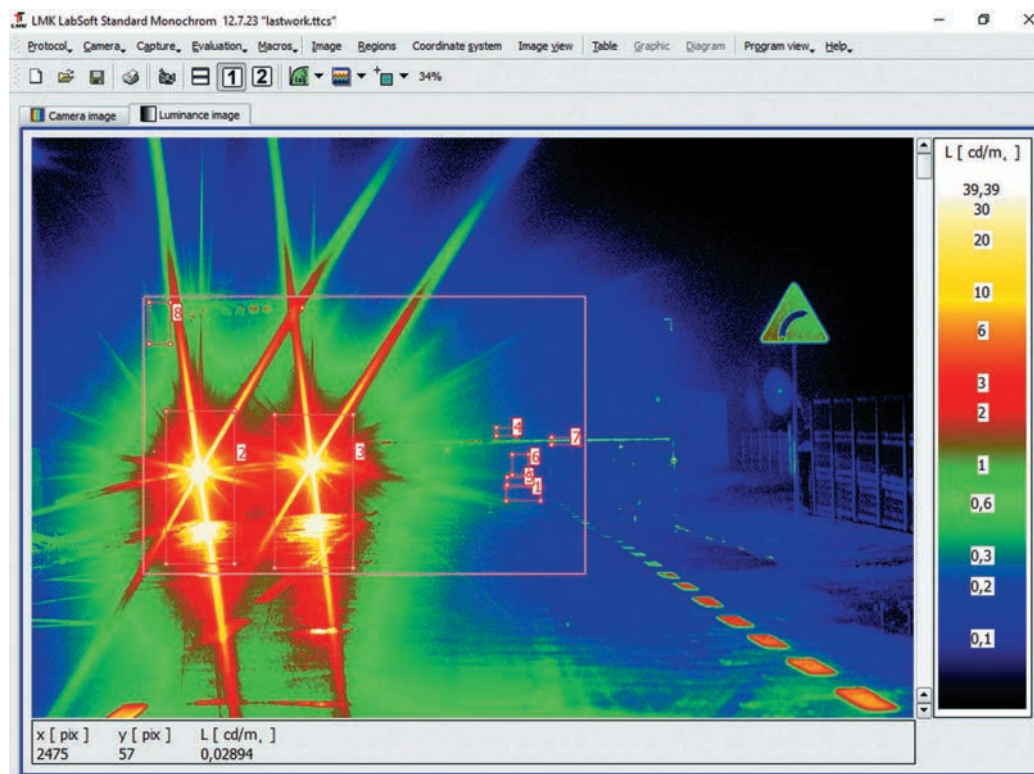


Fig. 14. Measurement points matrix.

to pass a stationary vehicle which had its low beam headlights on, so he should not have been surprised by the appearance of any obstacles on the road, because in such cases increased caution should be exercised.

The following observations should be made about the results of the calculations presented in Figure 15:

- the thick black curve B (for $PX = 5$) is the threshold line, the lines above this curve indicate a high probability of recognition;
- the side marker lights of the semitrailer (line 4) were visible over the entire driving time, that is from the distance of 100 m away from the semitrailer;
- the semitrailer's side (line 1) and the rim of the front left wheel (line 3) should have been sighted from the distance of 36–37 m;
- the semitrailer's front left tyre (line 2) should have been sighted from the distance of 22–24 m;
- by way of comparison – the retroreflective tape on the vehicle's side (line 5) could have been sighted from the distance of ca. 74 metres, but, obviously, there was no such tape on the semitrailer involved in the accident;

- in the case of the illumination of the area by a road-side lamp, the line of sighting the front upper corner of the semitrailer or the upper part of the cab (line 6) indicates that this region could have been sighted briefly when the Ford was between 85 and 75 metre ahead of the obstacle, and then again at distances of less than 56 m. The problem is that the driver knew there was a truck sitting there and this position did not signify an imminent hazard. Moreover, it was not in the field of concentration and visual acuity, whose cone was relatively narrow (opening angle 2°). Therefore, the lack of the possibility of sighting this element of the vehicle cannot be regarded as an indicator of the hazard caused by the crosswise position of the remaining part of the semitrailer.

Figure 16 shows a series of photographs taken every 10 m, starting from the distance of 100 m and ending at 10 m away from the semitrailer. In the photographs the retroreflective tape was removed and one amber side marker light was added.

The results obtained from the measurements are confirmed by the photographs. The side marker lights

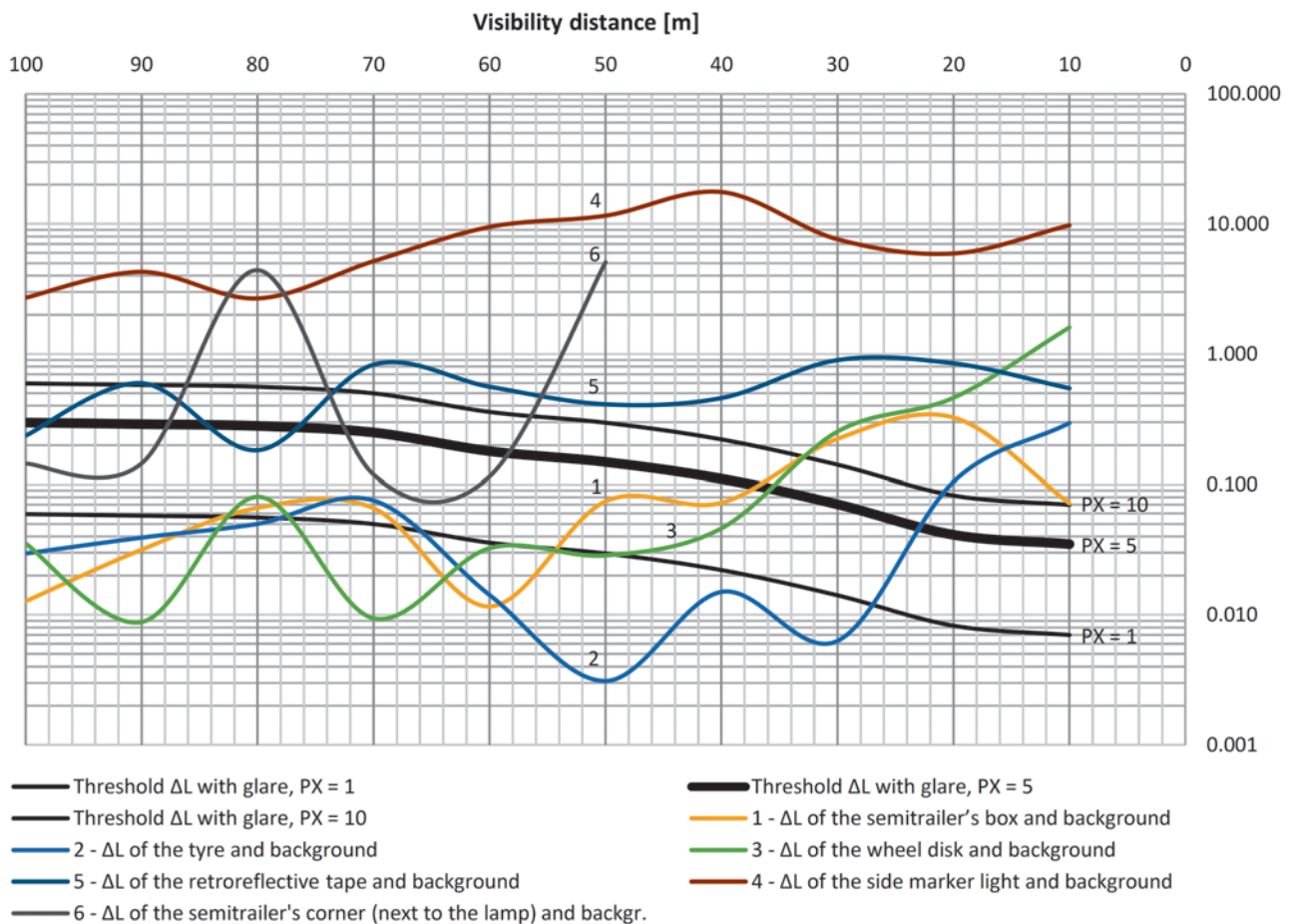


Fig. 15. Results of calculations of sighting distance of semitrailer's various elements.



Fig. 16. Stopped combination vehicle from subsequent distances from 100 m to 10 m from the semitrailer, every 10 m.



20 m



10 m

Fig. 16 (continuation). Stopped combination vehicle from subsequent distances from 100 m to 10 m from the semitrailer, every 10 m.

are visible all the time because they are bright but difficult to identify on account of their very small size. The wheel disk and the side of the semitrailer should have been seen from the distance slightly less than 40 m, while in the photograph taken from the distance of 50 m they are not conspicuous yet. The tyre, on the other hand, becomes conspicuous close to the roadway at the distance of twenty-some metres, but in the photograph taken at 30 m it cannot yet be distinguished from the background (wet tyre – damp roadway).

The accident happened at an extremely unfortunate position of the semitrailer relative to the Ford's track, well shown in the photograph taken at the distance of 30 m (Figure 16), and the photograph taken by a police officer (Figure 17) and stored in the case file. On the Ford's movement track extension, where its headlights illuminate the road foreground, there was no part of the semitrailer visible, and the car low beam headlights slid under the semitrailer. As a result, what stood out against the background of the dark roadway

was the white retroreflective central line reaching out beyond the semitrailer, producing the illusion that the road was free on a distance longer than that from the semitrailer, not yet visible. It is a known phenomenon in similar configuration of vehicles, when it turns out that the obstacle blended in with the background is closer than suggested by the illuminated section of the road.

The most challenging interpretative problem to solve occurs in the case of the assessment of the distance of perceiving the amber side marker lights on the left side of the semitrailer. They are perceived as very small points floating in the black space to the right of the bright low beam headlights of the stopped truck-tractor. A question arises whether their visual appearance can be interpreted beyond any doubt as an obstacle located on the same spot as the truck-tractor, or as some unknown lights of other objects further back. The photographs taken from a longer distance (100–50 m) are not a decisive proof that the lights be-



Fig. 17. A photograph in the records of investigation: the centre broken line on a road section longer than the distance from the semitrailer.

long to the same combination vehicle whose low beam headlights are visible on the left side of the road. This is why in the process of visual perception they may be neglected as a real obstacle. In such circumstances, it is the wheels disks and semitrailer's side that are deemed an image of a most certainly existing obstacle. Obviously, the final assessment of the impact of the optic illusion on the perception of an obstacle rests with a judicial authority.

4.4. Time – distance analysis of the accident

At the core of the time – distance analysis of the course of the accident and the possibility of its avoidance is the identification of the initial state of hazard from the point of view of an ordinary, sensible driver. Having negotiated a turn, the driver enters a straight section of the road and does not realize that he will soon find himself in a critical situation.

On entering the straight road, the Ford's driver saw from a distance of ca. 400 m the low beam headlights of a yet unidentified vehicle. As he was approaching it, he judged it to be a lorry. As it was night-time conditions, the glare from the low beam headlights made it difficult for him to decide whether the vehicle was moving or sitting, or maybe the driver was performing some manoeuvre, or whether it was a single vehicle or a combination vehicle. If we assume that the Ford was riding on this section at the speed of $v = 45$ to 70 km/h (i.e. 12.5 to 19.4 m/s), it would mean that he covered the distance in, respectively:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{400}{[12.5 \text{ to } 19.4]} = 32 \text{ to } 21 \text{ s.} \quad (4)$$

If so, the Ford's driver had enough time to realize that the vehicle whose lights he had seen from far away was making some unusual manoeuvres, so he should have stopped. The more so, that the truck-tractor had his warning emergency flashers on. That would have been the case at daytime, or if there had been good external illumination of the road on both sides, because then the combination vehicle would have been conspicuous straight away.

From the point of view of the driver viewing the situation at night, the low beam headlights, or even lights seen from afar, were nothing out of the ordinary in typical road traffic and did not prompt defensive manoeuvres or increasing caution beyond its regular level. Even if the Ford's driver had seen the lorry on his right lane at that moment (the truck-tractor's driver maintains that it was exactly in this way that he made jackknifing his combination vehicle easier to back up into the courtyard), there was still no interaction be-

tween the vehicles, because they were separated by the distance of ca. 400 m and a very long time of reaching each other of 32–21 s. After a few or several seconds the truck tractor was already on the left lane (relative to the Ford's heading), and the distance between the vehicles was from 350 to 100 m. Only from this moment does it make sense to analyse whether from the point of view of an ordinary, sensible driver there were real premises to exercise extraordinarily increased caution.

What the Ford's driver could discern was a lorry on the left lane, positioned collinear with the road, sitting or slowly reversing collinear with to the road. He could also see that the right lane was free, because the semitrailer was not visible yet. He might have considered lorry's any prior manoeuvres on the road as completed or being completed, and the situation as quite regular and he could continue his travel. There is nothing unusual in vehicles passing each other in road traffic and does not require exercising special care. The glare from the low beam headlights did not interfere with the visibility of the right lane, which seemed free due to the white retroreflective lines of the road surface markings.

What is disputable is the question of the hazard warning flashers as the only premise to increase caution or eliminate the reliance on the driver of the oncoming vehicle. The Ford's driver was convinced that the lorry was at a safe side distance away from him (the front right wheel did not even cross the white edgeline marking of the shoulder). And this, together with the hazard warning flashers, would suggest that the vehicle had stopped, or that there were some people nearby (you usually expect the driver engaged in some activity around the vehicle). The Ford's driver might have been so strongly convinced it was the case that he focused on the truck tractor and, as a result, failed to see the small amber side marker lights of the semitrailer. Incidentally, we do not know whether these lights shone with their own light or reflected one. If it was not their own light, their retroreflection was reduced due to the semitrailer's angle relative to the Ford's heading. The tests performed with a so-called oculograph (e.g. Kleudus, Bradač, Semela, 2010; Pflieger, 2012) confirm that bright sources of light or uncommon situations attract the eye better than dark or average images. Similar cases when, for instance, a pedestrian clothed in grey would be perceived sooner if the observer's eye was not distracted by a pedestrian wearing light clothes, are well known to accident reconstruction specialists. Apart from the hazard warning flashers, the Ford's driver did not have any premises to become more careful and he had a good reason to assume that there would be potential unilluminated pedestrians or cyclists on the asphalt shoulder (outside the roadway).

The authors have decided to omit in the paper an analysis of the causes of the accident, which, obviously, is essential for the authority commissioning a written report, but of minor importance in view of the methodological aim of the paper. Moreover, the actual analysis was so extensive that it would require a separate paper.

5. Conclusions

The reconstruction of road accidents is a multi-faceted operation from the category of inverse engineering. In this category the expertise in solving single isolated mathematical and physical tasks must coexist with the ability to identify relevant and significant issues and combine information from sometimes remote areas into a coherent system (for a more comprehensive discussion see W. Wach, 2014). From the point of view of the development of science, it is favourable to not only present new findings and methods, but also their real-life applications, because they make scientific search meaningful on the one hand, and are an inspiration for new investigations on the other.

Bibliography

1. Boucher, D., Davis, D. (2000). Trailer underride protection – A Canadian perspective. *SAE Technical Paper No. 2000-01-3522*.
2. Cofone, J., Craig, V. (2011). Automobile/tractor-trailer side underride crash tests. *Accident Reconstruction Journal*, 21(2), 21–26.
3. *CRASH3 Technical manual, Accident Investigation Division* (1986). NCSA, National Highway Traffic Safety Administration.
4. Kledus, R., Bradač, A., Semela, M. (2010). Comparative perception of objects by drivers from stationary and moving vehicles in regular road traffic. (In) *Proceeding of the 19th Annual Congress of the European Association of Accident Research and Analysis (EVU)* (pp. 9–28). Prague: EVU.
5. Pflieger, E. (2012). Hazard recognition and reaction in practice – exact time proof by visualization analysis. (In) *Proceeding of the 21st Annual Congress of the European Association of Accident Research and Analysis (EVU)* (pp. 113–120). Brasov: EVU.
6. Trego, A., Enz, B., Head, D., Oshida, Y. (2003). A scientific approach to tractor-trailer side underride analysis. *SAE Technical Paper 2003-01-0178*.
7. Unarski, J., Wach, W., Cięпка, P. (2013). Determining visibility distance based on measurements with the LMK system. (In) *Proceedings of the 22th Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU)* (pp. 85–94). Firenze: EVU.
8. Wach, W. (2012). PC-Crash – Zderzenie przy wjeździe samochodu pod naczepę. *Paragraf na Drodze*, 3, 29–50.
9. Wach, W. (2014). *Wiarygodność strukturalna rekonstrukcji wypadków drogowych*. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
10. Wakefield, B. D., Cothorn, J. E. (1994). Underride vehicle crash damage. *Accident Reconstruction Journal*, 6(6), 34–38.

Corresponding author

Dr hab. inż. Wojciech Wach
Institute of Forensic Research
ul. Westerplatte 9
PL 31-033 Kraków
e-mail: wwach@ies.krakow.pl

WJAZD SAMOCHODU OSOBOWEGO POD NACZEPĘ W NOCY – ANALIZA PRZYPADKU

1. Wstęp

Każdy wypadek drogowy nosi swoje indywidualne cechy, a jego rekonstrukcja wymaga nie tylko biegłości co do metodologii i matematyki, ale umiejętności rozwiązywania złożonych wyzwań inżynierii odwrotnej. Dlatego cenne są nie tylko prace opisujące wąskie badania, ale także te, które pokazują sposób opracowania dużych, rzeczywistych „projektów odwrotnych”, w których trzeba było rozwiązywać różne, często dalekie od siebie zadania i łączyć informacje w spójną całość.

Artykuł ma charakter raportu, a jego celem jest zaprezentowanie toku postępowania zastosowanego do rozwiązania pewnego dość złożonego przypadku. Ze względu na ograniczenia co do objętości pracy oraz szacunek dla osób uczestniczących w wypadku wiele szczegółów rzeczywistego raportu pominięto, wiele z nich skrócono, a wiele innych, nieistotnych – zmieniono. Na szczególną uwagę zasługuje podpunkt, w którym opisano unikalną metodykę badania widoczności przeszkód w nocy w warunkach dynamicznych, z uwzględnieniem olśnienia, poprzez przeprowadzenie eksperymentu, pomiarów i obliczeń.

2. Okoliczności wypadku

Do wypadku drogowego doszło 13 maja 2011 r. w nocy na prostym odcinku drogi przebiegającej przez wieś, gdzie obowiązywało ograniczenie prędkości do 50 km/h, ponieważ znajdowała się ona w obszarze zabudowanym. Topografię tego miejsca przedstawiono na rys. 1: rysunek (a) to szkic miejsca wypadku wraz z pozycjami końcowymi pojazdów, a rysunek (b) przedstawia zdjęcie topograficzne z portalu Google Earth wykonane w porze dziennej. Wypadek polegał na tym, że samochód Ford Escort jadący prawym pasem ruchu najechał na lewy bok naczepy zastawiającej w całości jezdnię i ustawionej względem jej osi pod kątem ok. 50°.

Dwukierunkowa jezdnia drogi składała się z dwóch pasów ruchu o szerokościach po 3,2 m. Jezdnia była pozioma i prosta na odcinku ok. 400 m przed i 145 m za miejscem wypadku, jeśli się ją oglądało, patrząc w stronę jazdy forda. W miejscu wypadku, po prawej stronie znajdowała się zatoka autobusowa, od której dalej w prawo dochodził wjazd do posesji.

Nawierzchnia asfaltowa była czysta, gładka i wilgotna. Nie padał deszcz, zachmurzenie było całkowite, a powietrze przejrzyste. Droga była oświetlona czterema lampami stojącymi po lewej stronie (patrząc w kierunku

jazdy forda) co ok. 100 m, przy czym obok ciągnika siodłowego stojącego w pozycji powypadkowej znajdowała się lampa nr 1.

Kierowca ciągnika siodłowego sprzęgniętego z naczepą tłumaczył, że pierwotnie jechał swoim prawym pasem ruchu w stronę przeciwną do kierunku jazdy forda i miał zamiar wjechać na podwórkę posesji znajdującej się po swojej lewej stronie. Z powodu wąskiej bramy najłatwiej było to wykonać cofając, a więc zatrzymał się nieco dalej, wykonał na jezdni manewry umożliwiające odpowiednie „załamanie” zespołu i – upewniwszy się, że droga z obu kierunków jest wolna – rozpoczął cofanie do bramy. Kierowca uważa, że zespół drogowy był bardzo dobrze widoczny, ponieważ w czasie cofania były włączone światła mijania i awaryjne, na przyczepie dodatkowo światła obrysowe, a nadto miejsce manewru było oświetlone lampami ulicznymi. Już w trakcie cofania kierowca zauważył, że w jego stronę zbliża się samochód osobowy, który – będąc w odległości ok. 20 m od niego – zaczął gwałtownie hamować z piskiem opon. Samochód ten uderzył w lewy bok naczepy i zaklinował się pomiędzy jezdnią, spodem ramy, a przodem lewego przedniego koła naczepy w nieco ukośnej pozycji względem osi jezdni.

Ford zaczął płonąć i tylko sprawna akcja ratunkowa pozwoliła wyciągnąć go i odsunąć na pozycję pokazaną na rys. 1a, ale przede wszystkim uratować kierowcę, który przebiegu wypadku nie zapamiętał. Obaj kierowcy byli trzeźwi.

3. Ślady i uszkodzenia pojazdu

Pojazdy w pozycji zastanej przez policję pokazano na rysunkach 2, 3, 4, 7 i 10. Badania pojazdów i opinie dotyczące ich stanu technicznego nie ujawniły usterek, które mogłyby wpłynąć na zaistnienie wypadku.

Ford na zdjęciach sprawia wrażenie, jakby doznał ogromnych zniszczeń, ale w rzeczywistości należy odseparować uszkodzenia pierwotne od wtórnych: pierwotne zlokalizowane są z przodu i stanowią bezpośredni skutek zderzenia, a wtórne to te, które są efektem akcji ratunkowej i pożaru, czyli:

- wycięte słupki – lewy środkowy i prawy tylny,
- przecięte słupki – lewy przedni i tylny,
- odgięty do góry dach,
- deformacja tyłu będąca skutkiem wyciągania pojazdu spod naczepy, cięcia i wyginania blach oraz usuwania tylnych drzwi celem ewakuacji kierowcy.

Pionowa pozycja pokrywy silnika najwyraźniej nie jest skutkiem zderzenia, ale podniesienia przez strażaków w celu odsłonięcia i zgaszenia źródła ognia już po odciągnięciu samochodu od naczepy. Natomiast pogięcie pokrywy na całej powierzchni wynika z jej dociskania od góry do dołu podczas wjeżdżania pod ramę naczepy.

Po obu stronach naczepy, w odległości 2,9 m od siebie rozmieszczone były światła obrysowe barwy pomarańczowej z elementami odblaskowymi. Na lewej jej burcie były widoczne zarysowania i popożarowe osmolenia. Ciągnik siodłowy nie został uszkodzony.

4. Rekonstrukcja

4.1. Prędkość zderzeniowa

Przód samochodu Ford wcisnął się i zaklinował pomiędzy jezdnią a dolną podłużnicą naczepy, czemu sprzyjało ugięcie zawieszenia przedniego i poprzeczne zakolysanie się naczepy. Pokrywa komory silnika samochodu, przesuwaną się pod ramą naczepy, była przez nią dociskana do dołu i deformowana od góry, a równocześnie samochód obrócił się pod niewielkim kątem przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Wjazd forda pod naczepę został powstrzymany w chwili, gdy przedni lewy słupek sięgnął krawędzi skrzyni ładunkowej. Na rys. 4 zaznaczono żółtą linią prostoliniową krawędź załamania przebiegającą ukośnie przez pokrywę silnika, która jest niewątpliwie odwzorowaniem dolnej krawędzi ramy i tym samym wskazuje pozycję końcową forda po ostatecznym zaklinowaniu się pod naczepą. Prawdopodobną pozycję końcową samochodu Ford pokazano na rys. 5. Widoczne na zdjęciach całkowite zniszczenie samochodu jest niezwykle sugestywne, ale w obszarze od płyty czołowej do tyłu nadwozia pochodzi z akcji ratowniczej i ma niewiele wspólnego ze stanem pozderzeniowym.

Miarą energii trwałej deformacji pojazdu jest parametr *EES* (*Energy-Equivalent Speed* – prędkość równoważna energii) wyrażony w jednostce prędkości. Jego wartość została oszacowana trzema metodami:

- za pomocą zależności empirycznej;
- poprzez porównanie z wynikami prób zderzeniowych;
- symulacyjnie, za pomocą metody elementów skończonych.

Ad a. Zależność empiryczna

W artykule Trego, Enza, Heada i Oshidy (2003) przeanalizowano wyniki 34 prób zderzeniowych polegających na wjechaniu przodu samochodu osobowego pod stojącą naczepę kontenerową i zderzeniu z nią na wysokości przedniej szyby i słupków. Opracowano następującą zależność na energię trwałej deformacji nadwozia

w obszarze słupków i dachu (z pominięciem deformacji przedziału silnikowego):

$$EES_1 \text{ [km/h]} = 1,609 \frac{1}{\sin\theta} \sqrt{D_1 \frac{694}{m}}, \quad (1)$$

gdzie:

D_1 – energia deformacji samochodu testowego (tj. podanego próbie zderzeniowej) w $[\text{mph}^2]$, będąca sumą wartości z pól obejmujących odkształcony obszar na rys. 6,

m – masa rzeczywista samochodu uczestniczącego w wypadku w $[\text{kg}]$,

θ – kąt wjazdu (tj. kąt ostry pomiędzy osiami wzdłużnymi kolidujących pojazdów) w $[\text{°}]$.

Po przyjęciu danych: $D_1 = (2 \cdot 31 + 4 \cdot 17) / 2 \approx 65 \text{ mph}^2$, $m \approx 1140 \text{ kg}$, $\theta \approx 50^\circ$ i wartości z rys. 6 odpowiadających zaznaczonemu polu, $EES_1 \approx 13 \text{ km/h}$.

Rys. 7 przedstawia przedział silnikowy, którego odkształcenia rozdzielono na dwie strefy i oszacowano metodą CRASH3 (CRASH3, 1986):

- $EES_2 \approx 32 \text{ km/h}$ – charakteryzuje deformację rejonu prawego błotnika o głębokości ok. 0,75 m i szerokości ok. 0,30 m wraz z cofnięciem prawego koła;
- $EES_3 \approx 25 \text{ km/h}$ – charakteryzuje deformację przedziału silnikowego od góry wraz z załamaniem progu z płytą podłogową w okolicy prawych przednich drzwi; aby zgrubnie obliczyć EES_3 , odkształcenia te zastąpiono poprzez deformację wzdłużną o głębokości 0,20 m i szerokości 1,69 m.

Całkowita wartość szacowana wstępnie tą metodą wynosiła ok.:

$$EES = \sqrt{EES_1^2 + EES_2^2 + EES_3^2} = \sqrt{13^2 + 32^2 + 25^2} = 43 \text{ km/h}. \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę zakleszczenie forda i spore trudności z wyciągnięciem go spod naczepy, a także zakolysanie poprzeczne naczepy, prędkość tuż przed kolizją była większa niż obliczony *EES*.

Ad b. Porównanie z wynikami prób zderzeniowych

Uszkodzenia pojazdu porównano z wynikami prób zderzeniowych polegających na prostopadłym wjechaniu pod naczepę samochodu Oldsmobile Cutlass (43 km/h; Wakefield, Cothorn, 1994), ukośnym wjechaniu pod naczepę samochodu Chevrolet (56 km/h; Wakefield, Cothorn, 1994) i prostopadłym wjechaniu samochodów Honda Civic z prędkością 56 km/h pod odkształcalną rampę znajdującą się na dwóch różnych wysokościach: 48 cm (poziom reflektorów) i 56 cm (poziom tuż nad reflektorami; Boucher, Davis, 2000).

W dwóch pierwszych przypadkach przedział silnikowy pozostał nienaruszony, ponieważ pojazdy najechały na ramę naczepy na wysokości przednich słupków. W trzecim przypadku, podobnie jak w badanej sprawie,

doszło do deformacji góry komory silnika i nadto widoczne jest załamanie progu za przednimi kołami. Podobne wyniki przedstawiono w (Cofone, Craig, 2011). Zatem pełne uzasadnienie znajduje podwyższenie spodziewanej wartości *EES* przynajmniej do 45 km/h.

Ad c. Symulacja metodą elementów skończonych, MES

Za pomocą programu PC-Crash 11.0 przeprowadzono kontrolne obliczenia metodą elementów skończonych. Wykorzystano modele dwóch samochodów: Geo Metro z roku 1997 i Ford Taurus z roku 1996, z których pierwszy jest nieco mniejszy, a drugi większy od samochodu Ford Escort. Struktury pojazdów wraz z podzespołami zostały opisane za pomocą siatki elementów skończonych, a symulacja procesu deformacji uwzględniła dane materiałowe, modelowanie wytrzymałościowe, odkształcenia i naprężenia oraz dynamikę. Zwaliowane modele MES pojazdów pochodzą z bazy danych udostępnionej publicznie przez National Crash Analysis Center of George Washington University.

Przestrzenna geometria elementów naczępy, w które uderzył ford, a więc ramy, skrzyni ładunkowej, stalowego wspornika lewego przedniego koła naczępy i czoła lewego przedniego koła naczępy, została zamodelowana zgodnie z rzeczywistymi wymiarami tych elementów (dolne krawędzie ramy i skrzyni: ok. odpowiednio 0,75 m i 1,00 m nad jezdnią, skrzynia wysunięta na ok. 0,40 m przed ramę, nachylenie wzdłużne naczępy: ok. 2°, kąt najazdu samochodu na naczępę $\theta = 50^\circ$).

Odształcenia doznane przez wirtualne samochody podczas zderzenia z prędkością 45 km/h, pokazane na rysunkach 8 i 9, wskazują, że prędkość ta została oszacowana ostrożnie. Stąd, biorąc pod uwagę także wcześniejszą analizę przedstawioną w podpunktach (a) i (b), można ostatecznie uznać, że prędkość forda w **chwili zderzenia** v_c wynosiła **45 km/h** lub niewiele więcej.

Szersze informacje na temat modelowania wjazdów pod wysoką, sztywną przeszkodę w podejściu (a) i (b) można znaleźć w artykule Wacha (2012).

4.2. Prędkość początkowa

Sytuacje zagrożenia analogiczne do tej, jaka pojawiła się przed oczami kierowcy forda, zwykle wywołują naturalną reakcję obronną w postaci gwałtownego hamowania, ponieważ innego wyboru nie ma. Nieujawnienie śladów hamowania można tłumaczyć nie tylko ich brakiem, ale także np. skupieniem się policjantów na ekspresyjnym obszarze w pobliżu zniszczonego samochodu, pełnym odłamków, piany i pozostałości akcji ratunkowej, a pominięciem wcześniejszego odcinka drogi i przeoczeniem śladów opon, słabo widocznych na ciemnej jezdni, słabą widocznością w nocy czy wreszcie umiarkowanym

doświadczeniem policjantów w ujawnianiu dość subtelnych śladów.

Na rys. 10 (a jeszcze lepiej na zdjęciu oglądanym na ekranie komputera) można zauważyć, że na prawym pasie jezdni przed fordem znajdował się długi, prostoliniowy ślad przypominający ślad ekstremalnie hamowanego koła. Jego pozycja względem szerokości jezdni nasuwa przypuszczenie, że mogła go pozostawić lewa przednia opona forda i, jakkolwiek na dalszym odcinku jest przykryty przez pianę, jego przedłużenie prowadzi wprost do pozycji zderzeniowej forda. Bardzo wątpliwe, aby powstał podczas akcji ratunkowej, gdyż na całej długości jest prosty, bez zakrzywień i powstał przed pokryciem jezdni pianą. Hipotezę tę wspierają też spostrzeżenia z wizji miejsca wypadku. Ze względu jednak na ograniczoną objętość tekstu argumentację tę pominięto.

Ślad ten „wychodzi” przed dolne zdjęcie na rys. 10, stąd wiadomo, że jego długość wynosiła co najmniej 19 m, nie da się jednak określić jego całkowitej długości, ponieważ zdjęcia z akt pokazujące wcześniejszy odcinek drogi są słabo naświetlone. Za pomocą programu *PC-Rect* wykonano transformację fotogrametryczną zdjęć z rys. 10, uzyskując ortofotomapę pokazaną na rys. 11. Liniami ciągłymi zaznaczono przebieg lewego śladu, a przerywanymi – domniemanego śladu prawego.

Gdyby uznać, że ślad widoczny na zdjęciach pochodził z wypadku, znaczyłyby to, że prędkość forda przed rozpoczęciem gwałtownego hamowania wynosiła co najmniej 71–76 km/h. Została ona obliczona ze wzoru:

$$v = \sqrt{v_c^2 + 2as} + \frac{a}{2} t_l \quad (3)$$

po przyjęciu danych:

$v_c = 45 \text{ km/h} = 12,5 \text{ m/s}$ – prędkość zderzeniowa,

$a = 5,5 \div 7,0 \text{ m/s}^2$ – opóźnienie hamowania,

$s > 19 \text{ m}$ – długość drogi hamowania,

$t_l = 0,2 \text{ s}$ – czas narastania opóźnienia.

W przeciwnym razie obliczenie prędkości początkowej sprzed hamowania jest niemożliwe, czyli znana byłaby tylko prędkość zderzeniowa v_c rzędu 45 km/h.

4.3. Widoczność – wyniki eksperymentu

Fundamentalnym problemem badanej sprawy jest ustalenie odległości, z jakiej przeciętny rozważny kierowca mógłby zauważyć niebezpieczeństwo w takich okolicznościach, jakie zaistniały w chwili wypadku. Dlatego na tym samym miejscu przeprowadzono eksperyment procesowy, którego przedmiotem było zmierzenie parametrów świetlnych przy zachowaniu:

- całkowitego zachmurzenia,
- braku opadów atmosferycznych,
- wilgotnej jezdni (polanej wodą przez straż pożarną),
- bardzo dobrej przejrzystości powietrza,
- tej samej nawierzchni.

Eksperyment wykonano 20 czerwca 2017 r., rozpoczynając go o godzinie 23.20. Porę tę dobrano tak, aby zapewnić identyczne natężenie naturalnego oświetlenia (0 lx, rys. 12b), jakie panowało w chwili wypadku 13 maja 2011 r. ok. godz. 22.10 (0 lx, rys. 12a).

Przy drodze znajdowały się te same lampy uliczne, co w dniu wypadku, dając – według świadków zgromadzonych na eksperymencie i okolicznych mieszkańców – oświetlenie bardzo podobne, jak w chwili zdarzenia.

Do eksperymentu wykorzystano dwa pojazdy: samochód Ford Escort z reflektorami podobnymi do tych posiadanych przez samochód biorący udział w wypadku i ciągnik siodłowy z naczepą pokazaną na rys. 13.

Różnice, jakie są widoczne na zdjęciach, łatwo zniwelowano, wykonując podstawowe pomiary na elementach identycznych, a tylko porównawczo również na elementach odmiennych.

Zespół pojazdów został ustawiony w takiej pozycji, jak na rys. 1a, która była praktycznie tożsama z pozycją zderzeniową i niezmienna w czasie krytycznych kilku sekund przed wypadkiem. Natomiast ford znajdujący się na prawym pasie dla swojego kierunku ruchu, z włączonymi światłami mijania, był w kolejnych pomiarach przybliżany co 10 m do miejsca wypadku, począwszy od metra setnego, skończywszy na dziesiątym. Za każdym razem wykonywano zdjęcia z miejsca kierowcy urządzeniem LMK (Unarski, Wach, Ciępka, 2013).

Pomiary przeprowadzono w dwóch wersjach oświetlenia lampą uliczną nr 1 (tj. lampa włączona i wyłączona), w sąsiedztwie której znalazła się kabina ciągnika siodłowego. Obserwacje w czasie eksperymentu wykazały, że ma ona marginalny wpływ na oświetlenie samochodu, gdyż jej światło jest bardzo słabe i oświetla co najwyżej przedni prawy górny róg naczepy ponad kabiną i owiewkę na dachu kabiny, które są zdecydowanie poza obszarem koncentracji i ostrości wzroku kierowcy patrzącego przed siebie w kierunku końca pola oświetlonego przez światła swoich reflektorów. Aby znaleźć te jaśniej oświetlone elementy przodu kabiny, kierowca musiałby kierować swój wzrok prosto na reflektory zatrzymanego ciągnika siodłowego. Ponadto nawet ich rozpoznanie w tym miejscu nie niesłoby żadnej istotnej informacji, bo zarówno kabina ciągnika, jak i górna część przedniej ściany naczepy wyglądałyby praktycznie tak samo niezależnie od tego, czy cały zespół stał wzdłuż drogi, czy też naczepa była ustawiona skosem w poprzek jezdni. Dlatego też do pomiarów parametrów granicznych wybrano tło oraz olśnienie od światła mijania zatrzymanego ciągnika siodłowego, a jako elementy podlegające zauważeniu:

- 1) srebrną (popielatą) burtę skrzyni ładunkowej naczepy,
- 2) opony (pierwszą z trzech opon lewej strony naczepy),
- 3) tarczę obręczy koła naczepy (jest jaśniejsza niż opony),
- 4) boczne pomarańczowe światła obrysowe na skrzyni naczepy,

5) taśmę odblaskową – pomarańczową wzdłuż skrzyni naczepy,

6) przedni prawy górny fragment naczepy i kabiny oświetlony przez lampę uliczną.

Matrycę punktów, w których dokonywano pomiarów pokazano na rys. 14. Zdjęcia stanowią zbiór danych do obliczeń możliwości rozpoznania przeszkód w warunkach dynamicznych, czyli w czasie jazdy. Jest to odmienna sytuacja od zauważania statycznego, gdyż decydującym parametrem jest tutaj czas obserwacji, który w warunkach statycznych może być nieograniczony, a w warunkach dynamicznych wynosi 0,2–0,3 s.

Odległości zauważania obliczono w autorskim arkuszu kalkulacyjnym programu Excel. Korzystając z tzw. krzywych Bereka, wyznaczono graniczne parametry poziomów luminancji elementów przeszkody, których przekroczenie wskazuje, że dany element powinien zostać zauważony. W obliczeniach uwzględniono również tzw. współczynnik praktyczny PX , który dla obiektów spodziewanych wynosi $PX = 5$. Wartość tę uzasadnia fakt, że kierujący prowadził pojazd przez teren zabudowany i miał się wymijać z pojazdem zatrzymanym na światłach mijania, nie powinien być on zatem zaskoczony pojawieniem się jakichś przeszkód na drodze, gdyż w takich sytuacjach wymijania powinna być zachowana wzmożona ostrożność.

Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 15 należy skomentować następująco:

- linię graniczną stanowi gruba czarna krzywa B (dla $PX = 5$), linie powyżej tej krzywej wskazują na duże prawdopodobieństwo zauważenia;
- boczne elektryczne światła obrysowe naczepy (linia 4) były zauważalne przez cały czas jazdy, czyli od odległości 100 m aż do naczepy;
- burtę naczepy (linia 1) oraz obręcz przedniego lewego koła naczepy (linia 3) powinny zostać zauważone z odległości 36–37 m;
- opona przednia lewa naczepy (linia 2) powinna zostać zauważona z odległości 22–24 m;
- porównawczo – taśma odblaskowa na boku pojazdu (linia 5) mogłaby zostać zauważona z odległości ok. 74 metrów, ale oczywiście na naczepie biorącej udział w wypadku jej nie było;
- w przypadku oświetlenia terenu lampą przydrożną linia zauważenia przedniego prawego górnego narożnika naczepy lub górnej części kabiny (linia 6) wskazuje, że rejon ten mógł być przez chwilę widoczny, gdy ford znalazł się pomiędzy 85 a 75 metrem przed przeszkodą oraz ponownie w odległościach mniejszych niż 56 m. Problem w tym, że kierowca forda wiedział, że w tym miejscu stoi samochód ciężarowy i ta pozycja nie wskazywała mu na grożące niebezpieczeństwo, ponadto nie była w polu koncentracji i ostrości wzroku, którego stożek jest stosunkowo wąski (kąt rozwarcia 2°). Nie można zatem brać możliwości do-

strzeżenia tego elementu pojazdu jako wyznacznika zagrożenia poprzecznym ustawieniem pozostałej części naczepy.

Na rys. 16 przedstawiono serię zdjęć wykonanych co 10 m, począwszy od 100 m, skończywszy na 10 m od naczepy. Na zdjęciach usunięto taśmę odbłaskową i dodano jedno boczne pomarańczowe światelko obrysowe.

Wyniki uzyskane drogą pomiarów potwierdzają zdjęcia. Światelka boczne są widoczne przez cały czas, gdyż są jasne, ale trudne do identyfikacji ze względu na bardzo mały rozmiar. Do zauważenia tarczy obręczy koła i burty powinno dojść z nieco mniejszej odległości niż 40 m, natomiast na fotografii wykonanej z odległości 50 m jeszcze ich nie widać. Z kolei do zauważenia opony tuż przy jezdni dochodzi w odległości około dwudziestu kilku metrów, przy czym na zdjęciu z odległości 30 m jeszcze nie można jej odróżnić od tła (mokra opona – mokra jezdnia).

Do wypadku doszło przy wyjątkowo niefortunnym ustawieniu naczepy w stosunku do toru jazdy samochodu Ford, dobrze ukazanym na fotografii z 30 m (rys. 16), a także na zdjęciu policyjnym z akt sprawy (rys. 17). Na przedłużeniu toru ruchu fordą, tam gdzie jego światła oświetlają przedpole jazdy, nie było żadnej konkretnej części naczepy, a światła mijania wślizgiwały się pod naczepę. Powodowało to, że na tle ciemnej jezdni wyróżniała się biała, odbłaskowa linia środkowa, wychodząca dalej poza naczepę, dając złudzenie, że jezdnia jest wolna na dłuższym odcinku niż wynosi odległość od jeszcze niewidocznej naczepy. Jest to znane zjawisko w podobnej konfiguracji pojazdów, gdy okazuje się, że zlewająca się z tłem przeszkoda jest bliżej niż sugeruje oświetlony odcinek jezdni.

Największy problem interpretacyjny pojawia się w przypadku oceny odległości zauważania pomarańczowych światełek obrysowych na lewym boku naczepy. Są one widoczne jako bardzo małe punkty zawieszony w czarnej przestrzeni na prawo od jasnych świateł mijania zatrzymanego ciągnika siodłowego. Powstaje problem, czy ich wygląd można zinterpretować bezwzględnie jako przeszkodę zlokalizowaną w tym miejscu, co zatrzymany ciągnik, czy jako nieznanne światła innych obiektów znajdujących się w głębi. Zdjęcia wykonane z większej odległości, 100–50 m, nie dają pewności, że światelka te należą do tego samego zespołu drogowego, którego światła mijania widać z lewej strony drogi, dlatego w procesie dostrzegania mogą zostać pominięte jako realna przeszkoda. W tej sytuacji jako obraz bezwzględnie istniejącej przeszkody jawią się dopiero obręcze kół i burta naczepy. Oczywiście ostateczna ocena wpływu złudzenia optycznego na zauważenie przeszkody leży w kompetencji organu procesowego.

4.4. Analiza czasowo-przestrzenna wypadku

Rdzeniem czasowo-przestrzennej analizy przebiegu wypadku i możliwości jego uniknięcia jest ustalenie początku zagrożenia z punktu widzenia przeciętnego rozsądnego kierowcy, który wyjeżdża zza zakrętu na prostą i nie wie, że niebawem zastanie go na drodze jakaś krytyczna sytuacja.

Kierowca samochodu Ford po wjechaniu na prostą zobaczył z odległości rzędu 400 m światła mijania niezidentyfikowanego jeszcze pojazdu. W miarę zbliżania się miał czas, aby ocenić, że jest to samochód ciężarowy. Ponieważ panowały warunki nocne, a światła mijania świeciły w jego kierunku, olśnienie utrudniało rozróżnienie tego, czy pojazd ten jedzie czy stoi, czy też może wykonuje jakieś manewry i czy jest to sam samochód, czy też zespół pojazdów. Gdyby założyć, że ford poruszał się na tym odcinku z prędkością $v = 45 \div 70$ km/h = 12,5 ÷ 19,4 m/s, to znaczy, że pokonał go w czasie odpowiednio:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{400}{[12,5 \div 19,4]} 32 \div 21 \text{ s.} \quad (4)$$

Wydaje się więc, że kierowca fordą miał wystarczająco dużo czasu na to, aby zorientować się, że pojazd, którego światła widzi w oddali, wykonuje na drodze jakieś niezwykle manewry, a więc należy się przed nim zatrzymać, tym bardziej, że w ciągniku siodłowym były włączone światła awaryjne. Z pewnością byłyby tak w dzień albo przy dobrym oświetleniu zewnętrznym drogi z dwóch stron, ponieważ cały zespół pojazdów byłby od razu dobrze widoczny.

Z punktu widzenia kierowcy obserwującego sytuację w nocy światła mijania, a nawet światła widziane z daleka, nie były niczym dziwnym w typowym ruchu drogowym i nie skłaniały do wykonania manewrów obronnych czy do podwyższenia ostrożności ponad normalny poziom. Gdyby nawet kierowca fordą widział w tym momencie samochód ciężarowy na swoim prawym pasie (kierowca ciągnika siodłowego twierdzi, że w taki właśnie sposób ułatwił sobie załamanie zespołu przy cofaniu na podwórce), to i tak nie istniała jeszcze żadna relacja pomiędzy pojazdami, bowiem dzieliła je odległość ok. 400 m i bardzo długi czas dojazdu 32–21 s. Po kilku–kilkunastu sekundach ciągnik siodłowy był już ustawiony na lewym pasie (patrząc w kierunku jazdy fordą), a odległość między pojazdami wynosiła 350–100 m. Dopiero od tego momentu nabiera sensu analizowanie, czy z punktu widzenia przeciętnego rozsądnego kierowcy istniały realne przesłanki do nadzwyczajnego zwiększenia ostrożności.

Tym, co mógł rozpoznać kierowca fordą, był samochód ciężarowy na lewym pasie w pozycji równoległej do jezdni, stojący lub powoli cofający równoległe do jezdni, a także wolny prawy pas, gdyż naczepa nie była jeszcze

widoczna. Ewentualne wcześniejsze manewry pojazdu ciężarowego na drodze mógł uznać za właśnie zakończone lub kończące się, a zastaną sytuację za dość typową i pozwalającą na kontynuowanie jazdy. Wymijanie się pojazdów jest naturalne w ruchu drogowym i nie wymaga zachowania szczególnej ostrożności, a olśnienie od świateł mijania nie zaburzało widoczności prawego pasa ruchu, który sprawiał wrażenie wolnego z powodu białych odbłaskowych linii oznakowania poziomego. Dyskutować można tylko kwestię świateł awaryjnych jako jedynej przesłanki do tego, by zwiększyć ostrożność lub utracić zaufanie do kierowcy pojazdu z przeciwka. Kierowca forda widział, że pojazd ciężarowy znajduje się w bezpiecznym odstępie bocznym od niego (przednie prawe koło nawet przekraczało białą linię pobocza), a to – łącznie ze światłami awaryjnymi – sugerowałoby przede wszystkim zatrzymanie pojazdu lub obecność obok niego jakichś osób (zwykle należy spodziewać się kierowcy wykonującego jakieś czynności przy pojeździe). Sugestia mogła być tak duża, że kierowca forda specjalnie skupił się na ciągniku i właśnie przez to przeoczył małe pomarańczowe światelka boczne naczepy. Nawiasem mówiąc, nie wiadomo, czy światelka te świeciły własnym światłem – jeżeli nie, to ich odbłask był zmniejszony z powodu kątownego ustawienia względem toru jazdy forda. Badania prowadzone za pomocą tzw. okulografu (np. Kledus, Bra-dać, Semela, 2010; Pflieger, 2012) potwierdzają, że jasne źródła światła lub niezwykle sytuacje bardziej przyciągają wzrok niż ciemne lub przeciętnej jasności obrazy. Praktyka opiniowania także zna wiele podobnych przykładów, takich jak np. sytuacja, w której ubrany na szaro pieszy byłby szybciej zauważony, gdyby wzroku nie odciągnął od niego pieszy w jasnym ubraniu. Poza światłami awaryjnymi kierowca forda nie miał innych przesłanek do zwiększenia ostrożności i miał prawo zakładać, że potencjalni nieoświetleni piesi lub rowerzyści będą korzystać z asfaltowego pobocza.

Autorzy pominieli w artykule analizę przyczyn wypadku, co oczywiście jest najważniejsze dla organu zlecającego ekspertyzę, ale mało znaczące z punktu widzenia metodologicznego celu artykułu. Nadto analiza ta była tak obszerna, że wymagałaby osobnej publikacji.

5. Wnioski

Rekonstrukcja wypadków drogowych jest wieloaspektowym działaniem z kategorii inżynierii odwrotnej, w której sprawność w rozwiązywaniu odosobnionych zadań matematyczno-fizycznych musi współistnieć z umiejętnością identyfikacji istotnych problemów i łączenia informacji sięgających nieraz bardzo odległych obszarów w spójny system (szerzej na ten temat w publikacji Wach, 2014). Z punktu widzenia rozwoju nauki korzystne jest nie tylko prezentowanie nowych odkryć i metod, ale także rzeczowych zastosowań, gdyż te z jednej strony

nadają sens poszukiwaniom naukowym, z drugiej inspirowują do nowych badań.