

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta dopravní**

**Czech Technical University in Prague  
Faculty of Transportation Sciences**

Ing. Drahomír Schmidt, Ph.D.

**Simulace a modelování pro podporu analýzy silničních nehod**

**Simulations and Modelling Used For Analyses of Road Traffic  
Accidents**

## **SUMMARY**

The work is focused upon simulation and modeling of traffic accidents. The author results from his dissertation work and concentrates upon specificities of the tasks dealt with by forensic examiners. First, elementary software means are being analyzed together with requirements as for analysis support of road accidents – simulation environment.

Required certainty (reliance) as for created models for all users of simulation models is obtained on the ground of examination of facticity of calculated models situation. Perfect knowledge of accident events is a must for verification of the models when analyzing road accidents, not only being it from the perspective of final positions and consequences but also in the course of the whole accident process. For better veracity of simulations it is thus necessary to analyze and model sufficient number of “real” events - crash-tests.

Marginal and initial conditions, their objective detection, set-up and right choice as for extent of data are a basic premise when making a model that corresponds to the real event. It is always the interval of final parameters that could have occurred with a probability near to certainty which is a result of the simulation of the accident event.

The objective of author’s research is projecting of a derivative method for a chance of acquiring pavement friction qualities as an objective parameter for creating of the model of the accident event by means of the 3D technology of scanning and elaboration of acquired pixel clouds for detection of areal surface qualities of the measured samples.

An experimental examination is also the part of the suggested method suggesting patterns needed for measuring and elaboration of examination samples together with a necessary algorithmization of the processes.

## SOUHRN

Práce je zaměřena na oblast simulací a modelování silničních nehod. Autor navazuje na svou disertační práci a zaměřuje se na specifika úloh řešených soudními znalci. Nejprve jsou analyzovány základní softwarové prostředky a požadavky pro podporu analýzy silničních nehod – simulační prostředí.

Potřebnou jistotou (důvěrou) ve vytvořené modely, pro všechny uživatele simulačních prostředků, je ověření reálnosti vypočítaných stavů modelů. V analýze silničních nehod je nezbytná pro verifikování modelů dokonalá znalost nehodových dějů, nejen z pohledu konečných poloh a následků, ale průběhu celého nehodového děje. Pro zvyšování věrohodnosti simulací je tedy nutné analyzovat a modelovat dostatečné množství „reálných“ dějů - Crash-testů.

Okrajové a počáteční podmínky, jejich objektivní zjištění, nastavení a správná volba rozsahu nutných informací jsou základním předpokladem pro vytvoření modelu, jenž odpovídá reálnému ději. Výsledkem simulace nehodového děje je vždy interval výsledných parametrů, jež mohly nastat s pravděpodobností hraničící s jistotou.

Předmětem výzkumné činnosti autora je navržení odvozené metody pro možnost získání adhezních vlastností vozovek, jako objektivního parametru pro tvorbu modelu nehodového děje s využitím techniky 3D skenování a zpracování získaných mračen bodů pro získání plošných povrchových vlastností měřených vzorků.

Součástí navržené metody je i experimentální ověření, navržení potřebných šablon pro měření a zpracování zkušebních vzorků i nezbytná algoritmizace postupů.

**Klíčová slova:** simulace, modelování, dopředná simulace, zpětná simulace, okrajové a počáteční podmínky, verifikace modelu, adheze vozovek, 3D skenování, mračna bodů, meshování, objektivní podklady nehodového děje, CAD, PCCrash, VirtualCrash.

**Keywords:** simulation, modelling, forward simulation, backward simulation, initial condition, boundary condition, model verification, adhesion, 3D scan, point cloud, meshing, objective materials, CAD, PCCrash, VirtualCrash.

<b>ÚVOD .....</b>	<b>6</b>
<b>1. SIMULACE A MODELOVÁNÍ .....</b>	<b>6</b>
1.1. UŽIVATELÉ SOFTWARE VYUŽITELNÝCH PRO ANALÝZU DN .....	10
1.2. KRITÉRIUM VYUŽITELNOSTI (ROBUSTNOSTI) SOFTWARE: .....	10
1.3. LICENČNÍ POLITIKA .....	11
1.4. SPECIFIKA ŘEŠENÝCH ÚLOH PŘI ANALÝZE DN .....	12
1.5. ZÁKLADNÍ MATEMATICKÉ MODELY POUŽÍVANÉ PŘI ANALÝZE DN .....	14
1.6. RÁZ TĚLES – (PŘÍKLAD ŘEŠENÍ) .....	16
<b>2. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VOZOVKY JAKO OKRAJOVÁ PODMÍNKA SIMULACE - NOVÁ NAVRŽENÁ ODVOZENÁ METODA .....</b>	<b>20</b>
2.1. NÁVRH NOVE METODY ZAMĚŘENÍ VOZOVKY S VYUŽITÍM 3D SKENOVÁNÍ .....	21
2.2. NÁVRH ZÁKLADNÍ MĚŘÍCÍ DESTIČKY – SOUŘADNÝ SYSTÉM.....	23
2.3. NÁVRH POSTUPU ZAMĚŘENÍ SKENOVANÝCH OBLASTÍ.....	25
2.4. NÁVRH ZPRACOVÁNÍ S VYUŽITÍM ROZHŘANÍ PARAMETRICKÉHO CA MODELÁŘE .....	29
2.5. ANALÝZA ZAMĚŘENÝCH VZORKŮ VOZOVKY .....	30
2.6. CHYBY A FILTRACE VZORKŮ .....	31
<b>3. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ .....</b>	<b>33</b>

# ÚVOD

Od roku 2004 se aktivně zabývám problematikou „modelování a simulací pro podporu analýzy dopravních nehod“. Simulace a počítačové modelování jsou jednou z velmi významných oblastí využití výpočetní techniky, ždyť i jedna z původních motivací pro vývoj počítačů vycházela právě z oblasti modelování. Simulační systémy nám v zásadě slouží k tomu, abychom s nimi prováděli experimenty (simulace je modelování na počítači).

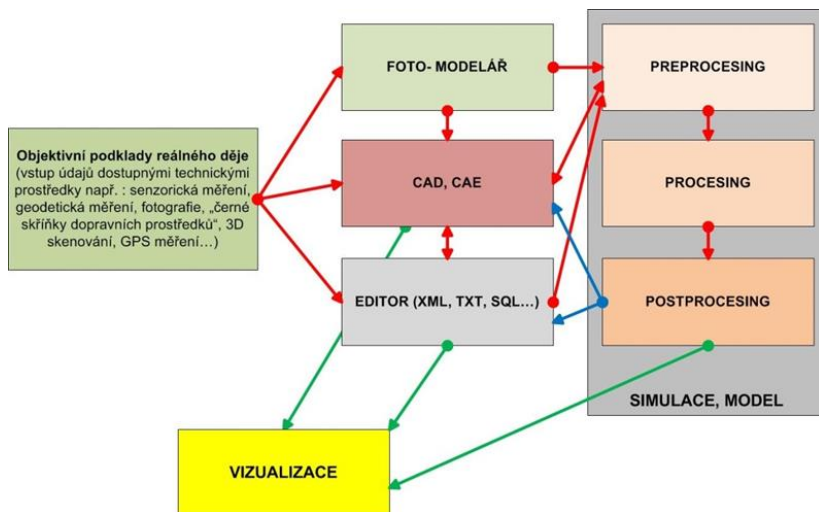
Je naprosto zřejmé, že v oblasti dopravy se díky lepší finanční dostupnosti budou možnosti využití simulací a simulátorů, virtuální reality, dále rozšiřovat. Každý cestující, který použije dopravní prostředek, nastupuje v očekávání, že bude bezpečně a v pořádku převezen (dopraven) na místo určení. Tyto technologie by nám měly pomoci zvýšit pravděpodobnost, že tomu tak skutečně bude. Dnes jsou běžně pravidelně a povinně testováni piloti letadel na letových simulátorech, kde musí řešit výjimečné, stresové situace, aby prokázali schopnost vykonávat svou profesi. Lze předpokládat, že zítra to samé čeká strojvedoucí, řidiče autobusů, kamionů a další profese...

Pro zvyšování bezpečnosti se dnes automaticky využívá „virtualizace“, jak pro vývoj aktivní, tak pasivní bezpečnosti dopravních prostředků i cest. V těchto spisech navazuji na svou specializaci modelování a simulací pro podporu analýzy dopravních nehod a zaměřování míst dopravních nehod. Vývoj zaměřovacích technologií a senzorů s možností zpracování takto získaných údajů ve virtuálním světě, s využitím výpočetní kapacity k nasazení inteligentních systémů, přináší v globálním zhodnocení finanční úspory a přispívá ke zvyšování bezpečnosti v dopravě.

## 1. SIMULACE A MODELOVÁNÍ

Základním principem tvorby modelů a simulací, pro podporu analýzy dopravních nehod, je zkoumání reálného děje – vzoru. Přitom vzor má svoji vnitřní strukturu, může se nacházet v určitých stavech, existují v něm rozlišitelné situace a probíhají v něm jisté děje, které jej převádí z jedné situace do jiné. Přitom soubor všech situací systému je uzavřen vůči dějům (tedy je schopen reagovat na každou situaci).

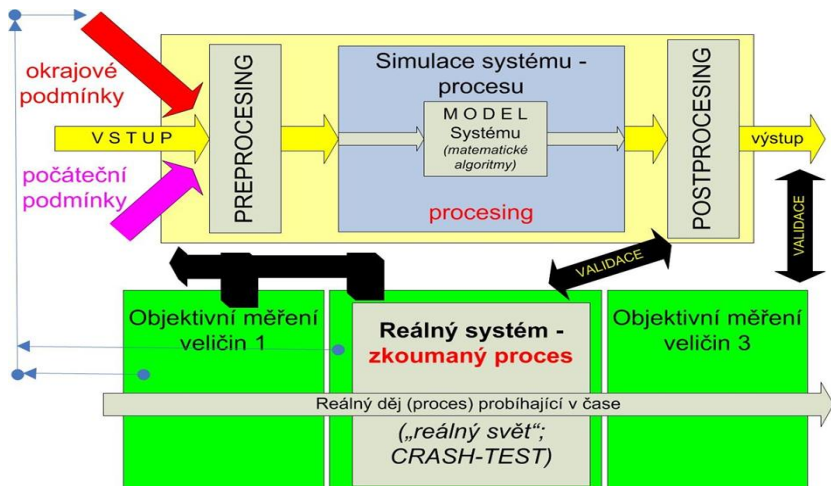
Simulace je tedy výzkumná metoda, která spočívá v tom, že zkoumaný dynamický systém nahradíme modelem a provádíme na něm pokusy s cílem získat informaci o původním zkoumaném objektu. Základní princip zpracování modelu, zjištění okrajových a počátečních podmínek je zachycen na obr. 1.



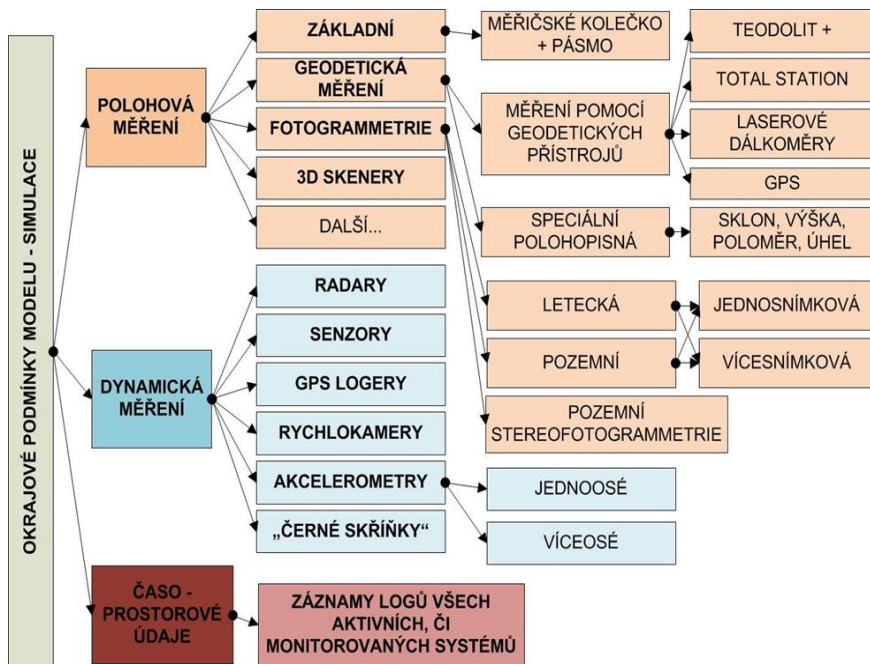
*Obr. 1 - Základní schéma procesu modelování simulací*

Získávání objektivních technických údajů, pro určení počátečních a okrajových podmínek simulací, je dán technickým vybavením (dostupností senzorů, měřících zařízení) a technologickým vývojem. V dopravě, konkrétně v automobilovém průmyslu, je modelování postaveno na validacích modelů, neustálém ověřování pomocí crash testů. Tato ověřování jsou nezbytná pro verifikaci modelů, pro jistotu správných výpočtů, které v konečném důsledku vedou ke zvyšování bezpečnosti. Tento pohled na simulace je zpracován na obr. 2.

Základní požadavek na měření míst dopravních nehod, či nebezpečných úseků, je zjištění rozměrů dokumentovaných objektů, jejich geometrického tvaru, vzájemných poloh a vzdáleností. Zjištěné údaje mohou být zachyceny písemně (popis), anebo graficky (náčrtek, plánek), přičemž musí umožňovat kdykoli provést rekonstrukci objektu nebo situace, jaká byla v čase měření se všemi podrobnostmi s požadovanou přesností. Podklady získané měřením patří mezi objektivně zjištěné v porovnání s ostatními subjektivními podklady (výpovědi účastníků nehody, svědků,...). Tyto zjištěné údaje jsou na vstupu modelovaných simulací. Základní rozdělení možností získání okrajových podmínek je znázorněno v obr. 3.



Obr. 2 - Základní schéma modelování s ověřováním reálného děje



Obr. 3- Základní schéma získávání vstupních parametrů



Praktické řešení analýzy dopravních nehod s podporou softwarových simulací je značně rozsáhlou problematikou.

Při řešení jednotlivých úloh se vždy snažíme z indicií počátečních a okrajových podmínek (zaznamenaných konečných poloh, stop, deformací vozidel...), rekonstruovat celý nehodový děj ať již dopřednými, či zpětnými algoritmy metod nehodové analýzy. I v případě, že se nám podaří namodelovat celou událost beze všech pochybností, můžeme pouze tvrdit, že nehodový děj proběhl s pravděpodobností hraničící s určitou jistotou modelované skutečnosti, ale nikdy nemůžeme mít jistotu stoprocentní.

Vždy musíme mít na paměti obecně platný základní smysl jakéhokoli modelování. Model je složitá struktura, která váže dva systémy, jejich prvky a jejich atributy. Podstatou modelování ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho modelem (systémem, který jej modeluje), jejímž cílem je získat pomocí pokusů s modelem informaci o původním systému. Mohu si tedy vlastně definovat libovolný obraz reality pomocí rozličných technických prostředků, či libovolných softwarových produktů. „Reálný děj“ mohu „zjednodušit“ tak, abych byl schopen vůbec simulace spočítat. Nutné přiblížení uvažovaných parametrů je dáno zkušenostmi řešitele a schopnostmi procesorového výkonu (technickými možnostmi), ale výsledky simulovaného děje, přes rozdílné postupy, či rozsah uvažovaných počátečních a okrajových podmínek, musí vést fyzikálně ke stejnému výsledku.

Modelování s podporou PC má široké možnosti použití, ale nenahrazuje praktické zkušenosti znalců, znalosti tisíců řešených případů. Výpočtové modelování dopravních nehod s praktickými zkušenostmi znalců může vytvořit podmínky pro řešení složitých případů DN. Právě toto je důvodem, proč se znalci a odborníci jednotlivých oborů schází na pravidelných konferencích, publikují v odborných časopisech, aby si vyměnili své poznatky.

V dnešní době se klade velký důraz na používání výpočetní techniky. Nicméně pouhá znalost specializovaného softwaru nestačí, vyžadují se též velké zkušenosti. Z pohledu světa kolem nás dokáže být nepřesná interpretace dat mnohem nebezpečnější, než by se mohlo zdát. Zadávat počáteční a okrajové podmínky se může pokusit vlastně kdokoli a počítač nám vždy vygeneruje „nějaké“ výsledky. Jenže pokud tyto výsledky mohou značně ovlivnit osudy lidí, potom je třeba velké obezřetnosti.

## **1.1. UŽIVATELÉ SOFTWARE VYUŽITELNÝCH PRO ANALÝZU DN**

Programy používané pro analýzu dopravních nehod lze dělit dle mnoha vlastností a kritérií, ale vzhledem k „uzavřenému“ okruhu uživatelů je právě toto kritérium velice závažné a určuje celou řadu parametrů těchto produktů a jejich dostupnost. V automobilovém průmyslu existuje řada počítačových simulačních programů zasahujících do výroby od počátečních fází (návrh) až do fáze testovací (pasivní bezpečnost).

Potenciální uživatelé softwaru se zaměřením na vyhodnocení DN, či crash testů:

- Automobilový průmysl – koncerny (zajímají je především možnosti vývoje, zlepšování bezpečnosti, ověřování použitých technologií – výrobní tajemství, snaha o uzavřenost).
- Soudní znalci – uzavřená komunita (vyhotovování posudků, společnost zvyšuje tlak na používání simulačních softwarů) – posudky a informace kolem jejich zpracování – uzavřeně.
- Vzdělávací a výzkumný sektor – univerzity, ústavy – cíl výzkumné projekty a výchova budoucích expertů schopných využívat tyto prostředky.
- Organizované gangy (skupiny) se zaměřením na manipulace dopravních nehod.

Z tohoto rozdělení plyne jedna důležitá vlastnost týkající se „otevřenosti“, a to složení a omezenost spolupráce všech softwarů používaných pro analýzu nehod (přenos datových formátů). Situaci je možné přirovnat k počátkům Internetu, kde měla také každá firma definovány své komunikační protokoly a počítače od jednoho výrobce byly schopny komunikovat jen mezi sebou, až teprve obrovský boom a tlak trhu zajistil vznik dnešního internet protokolu, jako univerzálního rozhraní. Dnes bereme jako zcela samozřejmé, pokud přijdu s notebookem a připojím se k počítačové síti, tak mohu komunikovat s kýmkoli. Při analýze nehod tato analogie tak zcela neplatí a podobný tlak trhu na vývojáře software není očekáván dnes, a velmi pravděpodobně ani v budoucnu.

## **1.2. KRITÉRIUM VYUŽITELNOSTI (ROBUSTNOSTI) SOFTWARE:**

Z pohledu zpracování úloh lze tyto specializované systémy určené k modelování dopravních nehod rozdělit na:

- Robustní, modulární řešení složené z mnoha softwarových produktů (viz obr.1) určených pro modelování mnoha fyzikálních jevů.
- Jednoúčelově zaměřené produkty určené především pro úzké skupiny osob, či vývojáře (někdy řeší pouze jeden typ úloh). Např.: PC Crash, Virtual Crash, Impulz Expert, Carat, HVE, m-crash, Analyzer Pro, AR Software.

Současný vývoj ukazuje u modulárních systémů na investice do vývoje nových modulů, kdy původní zaměření software na preprocessing a postprocessing je doplněno plnohodnotným řešičem a celé systémy (CA aplikací) jsou doplňovány o moduly plnohodnotných řešičů. Snaha firem je zřejmá v tlaku na získání většího podílu trhu, či jeho udržení, ale s novými technologiemi, např. 3D skenování a jeho dostupností, by uživatele mnohem více zajímala pro meshované výpočetní modely výrazně lepší přenositelnost formátů mezi jednotlivými systémy. Netvrším, že nejsou definovány základní standardy formátů, ale realita přenosů modelů a jejich možností je žalostná a není v komerčním zájmu firem ji zlepšovat.

### 1.3. LICENČNÍ POLITIKA

- **Kritérium vlastnictví software**
  - ❖ Pronájem licence – dnes běžný jednoletý pronájem
  - ❖ Nákup licence s automatickým upgrade a ročními zvýhodněnými poplatky
  - ❖ Koupení licence
  - ❖ Open source

V oblasti vlastnictví software se promítá politika gigantů softwarového průmyslu a ve spojení s výší poplatků obvykle velmi negativně ovlivňuje možnosti vzdělávacího sektoru zařadit tyto produkty jako běžnou součást výuky, aby se každý student příslušných studijních oborů mohl alespoň rámcově seznámit s těmito řešeními dříve, než odejde do praxe. V universitních specializovaných učebnách technických oborů by správně měly být dostupné pro výuku a základní seznámení licence „všech“ softwarových řešení a ne jen vybraného (dostupného) produktu.

I v případě jedné licence mohou roční poplatky přesahovat cca 100 000,-Kč (přesné ceny jsou účtovány dnes v euro a cena je závislá na kurzu, uvedená cena je EDU, zlomek komerčních poplatků). Při pohledu na schéma

softwarového řešení (Obr. 1) je zřejmé, jak lehce se poplatky za kompletní možnost plnohodnotného modelování v prostředích používaných běžně v automobilovém průmyslu dostávají na řádově milióny.

- **Kritérium typu licence z pohledu množství instalací**
  - ❖ Síťová multilicence – licenční číslo na počet spuštění, „jednice“ - pro modulární odebírání; hardlock - na počet spuštění.
  - ❖ Jednouživatelská licence na PC – licenční číslo vs. hardlock.

Na FD ČVUT jsou k dispozici licence softwarových produktů PC Crash, VirtualCrash, Impulz Expert, Simpack, ANSYS, (lineární řešič systému ANSYS je též integrován do CA aplikace Inventor).

- **Kritérium typu licence z pohledu možnosti použití**
  - ❖ Komerční
  - ❖ Publikáční a výzkumná
  - ❖ Výuková (classroom)

Komerční licence je bez omezení, zatímco výukovou licenci typu „classroom“ je možno použít pouze na výuku v konkrétní učebně a nesmí být použita ke zpracování závěrečných disertačních prací, výzkumu a zpracování grantů. K těmto účelům je určena licence publikační a výzkumná.

#### **1.4. SPECIFIKA ŘEŠENÝCH ÚLOH PŘI ANALÝZE DN**

Výpočtové robustní, modulární programy jako PAM-CRASH, MADYMO, či HYPERWORKS užívané v průmyslu jsou velice komplexní, ale jsou určené k přesným simulacím střetů a nikoliv k podpoře analýzy silničních nehod, kdy je třeba řešit i předstřetový a poststřetový pohyb, tedy delší časový úsek. To z nich vytváří, společně s jejich finanční náročností, prostředky málo vhodné pro využití v analýze silničních nehod.

V analýze silničních nehod není většinou třeba řešit příliš složité matematické modely a jejich střety za pomoci metody konečných prvků. Proto se ve znalecké praxi osvědčily programy pracující s jednodušším modelem rázu, doplněné o veličiny důležité pro silniční nehody ovlivňující jak střetový, tak před- a poststřetový děj.

Tyto specializované programy se postupně vyvíjely současně s rozvojem výpočetní techniky. Modely se staly složitějšími tak, aby více odpovídaly realitě, ale aby výpočet simulace nebyl na standardním osobním počítači zbytečně zdouhavý. Mnohé obsahují i nadstavby složitějších programů (MADYMO) k přesnějším doplňujícím výpočtům, pokud to je v simulaci zapotřebí. K nejznámějším simulačním programům pro analytiku silničních nehod patří programy PCCrash, VirtualCRASH, CARAT, Impulz-Expert a STARS.

Aktuální stav licencí mezi soudními znalci ukazuje na dominanci dvou základních produktů a to programů PCCrash a VirtualCRASH. Každý z těchto software prošel jiným vývojem a má své výhody a nevýhody. Hraniční možnosti každého software jsou dány operačním systémem a jeho podmínkami v pozitivních i negativních ohledech.

Software PCCrash prošel dlouhým vývojem od vzniku v roce 1990. Pomocí programu lze komplexně simulovat pohyb vozidel od počátku reakcí řidičů, přes náraz až po konečnou polohu. Simulace probíhá buď v rovině 2D či 3D prostoru. Simulovat lze nejen střety automobilů, ale i jízdnicích souprav a samozřejmě je pak i výpočtově náročnější simulace střetů s chodci. Střety s chodci jsou pro přesnější výsledky modelovány pomocí vícetělesových systémů.

K tomu slouží jak samotné prostředí programu s jeho kreslicími funkcemi, ve kterém lze vymodelovat prostorové uspořádání místa dopravní nehody pomocí sklonových polygonů, tak obsáhlá databáze vozidel, se kterými lze pracovat. Databanka vozidel je pravidelně aktualizovaná. Kromě databáze vozidel tvořené tvůrci programu obsahuje PCCrash i databázi vozidel Německého spolkového úřadu pro motorová vozidla a databanku Německého automotoklubu ADAC. Rozsáhlost databází vozidel je výhodou, neboť u všech vozidel není nutno vyplňovat všechny potřebné technické údaje. Pokud se požadované vozidlo nenachází v databázi, pak je samozřejmě možné vytvoření vlastního vozidla, např. dle údajů technického průkazu. Otevřenost systému umožňuje importovat modely z CA modelářů jak do pozice aktivních modelů, tak prostředí.

Systém VirtualCrash je podstatně „mladší“, jeho počátky se datují na začátek třetího tisíciletí, kdy byla maďarskými autory prezentována první verze. Dnes je aktuální verze 3. Ergonomie rozhraní vychází již z filozofie modulárních systémů a principů parametrických modelářů, kdy základem

práce je stromová struktura modelu. Vzorem uživatelského rozhraní vývojářů zde bylo prostředí 3DSMAX studia.

Při použití simulačních (výpočetních) systémů vždy hrozí nebezpečí hrubých chyb při zadávání okrajových podmínek ve snaze docílit ve výsledném stavu simulace shodných koncových poloh s reálným dějem.

Jako akademické pracoviště s tímto zaměřením, spadá mezi hlavní úkoly našeho ústavu i podpora soudních znalců a ověřování softwarových produktů určených pro tuto specifickou skupinu uživatelů.

Skupina specialistů řešení výzkumu a vývoje v oblasti analýzy silničních nehod dává ústavu možnost ověřovat a validovat modely i složitějších nehodových dějů. Při validaci modelu jsou využívány jak možnosti nastavení základních parametrů přes uživatelské rozhraní použitých simulačních programů, tak i možnosti úpravy okrajových podmínek modelu přímou definicí, pomocí skriptů, či vložením vlastních modelů.

Cílem všech akademických pracovišť se zaměřením na analýzu dopravních nehod by mělo být mimo vzdělávání studentů, zpracování posudků, vlastního výzkumu, také sloužit jako centrum vzdělání a podpora pro soudní znalce v oblasti těchto specializovaných softwarů.

## 1.5. ZÁKLADNÍ MATEMATICKÉ MODEL Y POUŽÍVANÉ PŘI ANALÝZE DN

### • Faktor času

Nejdůležitější fází pro vědecký model je způsob zachycení času. Z tohoto hlediska se simulace v zásadě dělí na simulace **spojité** a **diskrétní**. U spojitého modelování probíhají děje bez časových skoků a výsledky modelu se mění průběžně.

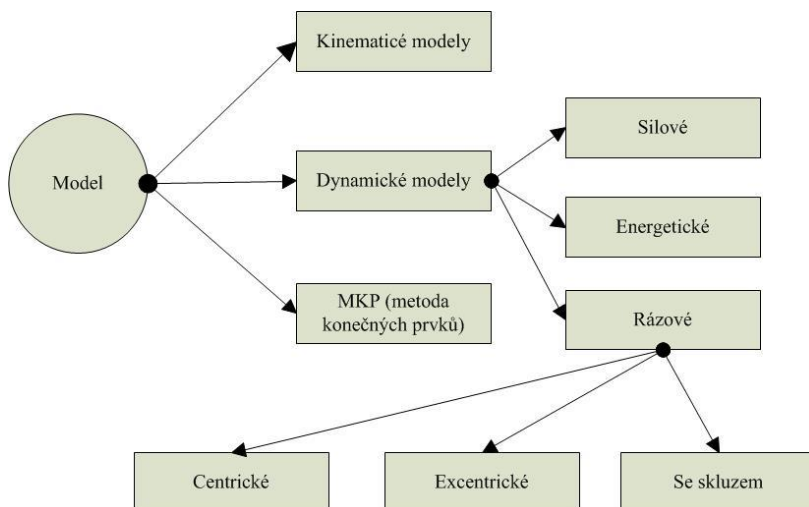
Diskrétní simulace vykazují změny hodnot modelu v případě, že nastane nějaká nová událost, díky níž se změní hodnota nějaké proměnné.

Z pohledu toku času probíhá výpočet chronologicky s časem = **dopředná simulace**, kdy definujeme počáteční a okrajové podmínky modelovaného děje, spouštíme řešič a výsledkem simulace by měl být stav přiblížení se konečným polohám reálného fyzikálního děje. **Zpětná simulace** provádí výpočet proti toku času.

Důležitým faktorem je správná volba použité časové diference – volba **integračního kroku**.

- **Faktor silových účinků**

příklad základního dělení modelů:



**Obr. 4 – základní schéma dělení výpočetních modelů**

Kinematický model - popisuje pohyb hmotného bodu bez ohledu na příčiny a vychází ze základní diferenciální pohybové rovnice.

Dynamické modely - dynamika studuje souvislosti mezi pohybem a silami způsobujícími pohyb. Součástí dynamiky je statika, která zkoumá podmínky rovnováhy sil. Klasická mechanika je založena na třech zákonech, které zformuloval Newton.

Nastíněné základní dělení je pouze základní a orientační, vychází z reálné potřeby docílit požadovaného výsledku (výpočtu) pomocí „minimálních“ zdrojů, jež jsou vždy omezené. Cena za „zjednodušení“ spočívá v míře rizika, kdy který model mohou skutečně použít, aby simulace odpovídala reálnému ději.

Každý z těchto typů modelů lze dále dělit, např. současná fyzika rozlišuje pouze čtyři základní typy interakcí (**gravitační** - vyvolané gravitačním

polem; **elektromagnetické** - vyvolané elektrickým a magnetickým polem; **silné** neboli jaderné - zajišťující vazbu částic v atomovém jádře; **slabé** - uplatňující se u radioaktivního rozpadu).

Do klasické mechaniky spadají pouze gravitační síly a elektromagnetické síly. Do této oblasti patří i pružné síly a síly tření, jejichž podstata spočívá ve vzájemném působení molekul příslušných látek, tedy v elektromagnetických interakcích.

## 1.6. RÁZ TĚLES – (příklad řešení)

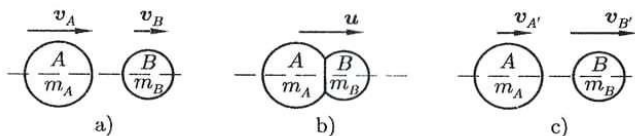
Při řešení úloh o rázu dvou těles má zásadní význam jejich relativní rychlost. Je rovněž důležité v okamžiku dotyku těles uvažovat v bodě styku rovinu tečnou k oběma tělesům. Přímkou kolmá k této rovině a procházející bodem dotyku je normálou rázu. Při rázu těles vznikají nárazové síly, které způsobí deformaci těles a tím i zvýšení jejich potenciální energie. Pružná tělesa se snaží nabýt původního tvaru, takže potenciální energie vykoná práci pomocí odrazových sil, které mají opačný směr než nárazové síly a přemění se v kinetickou energii těles po rázu. U těles, která nejsou dokonale pružná, je ta část energie, vynaložená na trvalou deformaci, ztracena. Podíl této ztracené energie na celkové energii před rázem vyjadřuje koeficient restituice  $k$ .

Při centrálním rázu leží těžiště obou těles na společné normále v bodě dotyku, takže nárazové síly nemají otáčivý účinek a projeví se pouze změnou postupného pohybu. Při excentrickém rázu neprochází společná normála stykových ploch těžišti těles a nárazové síly mají také otáčivý účinek. Jako přímý ráz se označuje takový ráz dvou těles, při kterém relativní rychlost leží ve společné normále. Je-li relativní rychlost skloněna k této normále, jedná se o ráz šikmý.

### • Přímý centrální ráz

Uvažuje dvě tělesa A a B o hmotnosti  $m_A$  a  $m_B$ , jejichž těžiště se pohybují podél téže přímky vpravo známými rychlostmi  $v_A$  a  $v_B$  (obr. 5 a). Jestliže je  $v_A$  větší než  $v_B$ , těleso A narazí na těleso B. Obě tělesa se deformují a rozdíl jejich rychlostí se zmenšuje až do okamžiku, kdy obě tělesa mají stejnou rychlost  $u$  (obr. 5 b). Skončila I. fáze rázu – fáze stlačení (deformace). Kdyby byla tělesa nepružná, skončilo by v tomto okamžiku silové působení. Mají-li však tělesa schopnost vzpružení, nastává II. fáze rázu – fáze vzpružení (restituice). Deformační energie, nahromaděná ve stlačené látce, se postupně mění v kinetickou energii obou těles. Relativní rychlost se mění. Na konci této fáze se tělesa pohybují rychlostmi  $v_A'$  a  $v_B'$  (obr. 5 c).





Obr. 5 - přímý centrální ráz

Zákon zachování hybnosti pro soustavu vede k rovnici:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (1)$$

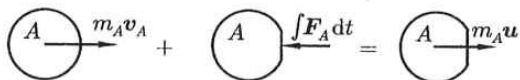
Protože se tělesa pohybují ve stejném směru jedné souřadnicové osy (vhodně zvoleného systému souřadnic), můžeme od vektorové rovnice přejít k rovnici pro velikosti rychlostí. Pro jednotlivé fáze pohybu má zákon zachování hybnosti soustavy tvar

$$\text{I. fáze: } m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B) u, \quad (2)$$

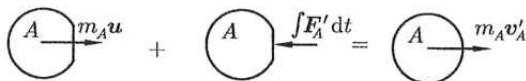
$$\text{II. fáze: } (m_A + m_B) u = m_A v'_A + m_B v'_B. \quad (3)$$

Kladné hodnoty skalárních veličin  $v_A$ ,  $v_B$ ,  $v'_A$ ,  $v'_B$  znamenají, že příslušné vektory rychlostí směřují vpravo. V případě vektorů, které směřují vlevo, budou hodnoty veličin záporné. Abychom určili rychlosti  $v'_A$  a  $v'_B$ , potřebujeme sestavit ještě další vztah mezi skalárními veličinami  $v'_A$  a  $v'_B$ .

Vydeme ze vztahů mezi impulzy a změnami hybnosti ve fázi deformace a ve fázi restituce (obr. 6 a obr. 7).



Obr. 6 - přímý centrální ráz - fáze deformace



Obr. 7 - přímý centrální ráz - fáze restituce

Podle obr. 6 na těleso A působí ve fázi deformace těleso B silou  $F_A$ , takže mezi skalárními veličinami platí vztah (4):

$$m_A v_A - \int_I F_A dt = m_A u \quad (4)$$

Podobně pro fázi restituce pomocí obr. 7 nalezneme rovnici (5)

$$m_A u - \int_{II} F'_A dt = m_A v'_A \quad (5)$$

Kde  $F'_A$  je síla, kterou těleso  $B$  působí na těleso  $A$  během restituce.

Integrály v uvedených rovnicích vyjadřují impulzy  $I_A$ , respektive  $I'_A$  síly působící na těleso  $A$  během I. fáze, respektive během II. fáze rázu. Analogicky lze dospět k rovnicím mezi změnou hybnosti tělesa  $B$  vlivem silového účinku tělesa  $A$ . Výsledky pro jednotlivé fáze uvádí přehledně následující vztahy:

### I. fáze (deformace)

$$I_A = \int_I F_A dt = m_A (v_A - u)$$

$$I_B = \int_I F_B dt = m_B (u - v_B)$$

### II. fáze (restituce)

$$I'_A = \int_{II} F'_A dt = m_A (u - v'_A)$$

$$I'_B = \int_{II} F'_B dt = m_B (v'_B - u)$$

Podle principu akce a reakce jsou síly  $F_A$  a  $F_B$ , resp.  $F'_A$  a  $F'_B$  stejně veliké, ale opačně orientované. Protože jsme jejich směr již uvažovali při odvozování předchozích rovnic, pro impulzy (tzn. pro změny hybnosti) v prvním a ve druhém případě platí:

$$\begin{aligned} I_I = I_A = I_B = m_A (v_A - u) = m_B (u - v_B), \\ I_{II} = I'_A = I'_B = m_A (u - v'_A) = m_B (v'_B - u). \end{aligned} \quad (6)$$

Síly při vzpružování jsou obecně menší než síly při stlačování ( $F' < F$ ), takže  $I_{II} / I_I \leq 1$ . Tímto podílem je definován *součinitel vzpružování (restituce)  $k$* . Pro jeho hodnotu dostaneme

$$k = \frac{u - v'_A}{v_A - u} = \frac{v'_B - u}{u - v_B} = \frac{(u - v'_A) + (v'_B - u)}{(v_A - u) + (u + v_B)} = \frac{v'_B - v'_A}{v_A - v_B}, \quad (7)$$

neboli:

$$k = \frac{v'_A - v'_B}{v_A - v_B} = -\frac{v'_r}{v_r}. \quad (8)$$

Součinitel restituice je roven záporně vzatému poměru relativních rychlostí po rázu ( $v'_r = v'_A - v'_B$ ) a před rázem ( $v_r = v_A - v_B$ ).

Platí:  $k=0$  pro zcela **nepružný ráz**,  
 $k=1$  pro dokonale **pružný ráz**,  
 $0 < k < 1$  pro **obecný** (nepružný) **ráz**

Abychom vypočítali rychlost těles po rázu, použijeme rovnice

$$\begin{aligned} m_A v_A + m_B v_B &= m_A v'_A + m_B v'_B, \\ m_B k(v_A - v_B) &= m_B (v'_B - v'_A). \end{aligned} \quad (9)$$

Jejich řešením vzhledem k  $v'_A$  dospějeme k výsledku

$$v'_A = \frac{(m_A - km_B)v_A + (1+k)m_B v_B}{m_A + m_B} \quad (10)$$

Podobným postupem vypočítáme

$$v'_B = \frac{(1+k)m_A v_A + (m_B - km_A)v_B}{m_A + m_B} \quad (11)$$

Pomocí předchozích vztahů vypočítáme kinetickou energii po rázu:

$$\frac{1}{2} m_A v'^2_A + \frac{1}{2} m_B v'^2_B = \frac{1}{2} m_A v^2_A + \frac{1}{2} m_B v^2_B - (1-k^2) \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (v_A - v_B)^2 \quad (12)$$

Třetí člen na pravé straně vyjadřuje energii ztracenou při nedokonalé pružném rázu, která se přeměnila v teplo.

Z uvedeného jednoznačně plyne, že oblast softwarového modelování a simulací je multidisciplinární problematikou. Pro správné využití pro oblast bezpečnosti provozu, tento obor od uživatelů vyžaduje přehled, znalosti a zkušenosti z oblasti geodetického zaměřování, fotogrammetrie, CA modelářů, (bezpečnosti) dopravních prostředků, dopravně inženýrské, fyziky, mechaniky, sociologické a právní, i výpočetních systémů (preprocesingů, procesingů, postprocesingů).

## 2. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VOZOVKY JAKO OKRAJOVÁ PODMÍNKA SIMULACE - NOVÁ NAVRŽENÁ ODVOZENÁ METODA

Snaha o objektivní zjišťování okrajových podmínek dopravních nehod a vývoj nových technologií vede k nutnosti navrhování nových metod, postupů a odvození, které umožní využívat efektivně tohoto technologického pokroku ve prospěch jednotlivých vědních oborů a celé společnosti. Zde je cílovým záměrem zvyšování bezpečnosti silničního provozu.

S využitím navržených technologií umožňuje navržená odvozená metoda alternativní zjišťování potřebných údajů vlastností vozovek, které zároveň ale budou využitelné pro virtuální modelování. Při výzkumu (testování) byly navrženy algoritmy postupů, které je nutné dodržet.

Vybraná oblast je vždy nejprve geodeticky zaměřena. Zaměření testovaných vzorků bylo provedeno bezhranolovou elektronickou totální stanicí Topcon 7003i. Stanice je vybavena počítačem s 32 bitovým operačním systémem Windows CE a softwarovým vybavením TopSURV. Pro minimalizaci chyb je vybavena automatickým dvouosým kompenzátořem s dosahem dálkoměru na 1 hranol až 3000 m a bez hranolu 250 m. Přesnost v normálním měřicím módu je  $\pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ . U zaměřovaných bodů (objektů) je možné automaticky zaznamenat i fotodokumentaci oblasti (širokoúhlý objektiv) a detail. Stanici jsou postupně zaznamenávány polohy skenovaných oblastí vozovky.



*Obr. 8 - Geodetické zaměření oblasti*

Jako vztažná, běžně používaná měření, byla využita odměrná metoda v kombinaci s dynamickým zaměřením pomocí kyvadla značky Stanley London splňující požadavky normy ČSN EN 13036-4. Pro dodržení normy byl pro další měření celý postup zaměřením pomocí kyvadla algoritmován pro jednoznačný postup při větším počtu měření – viz. habilitační práce.

Střední hloubka textury (MTD - Mean Texture Depth) byla zjišťována odměrnou metodou. Pro tuto metodu bylo použito plných skleněných kuliček (balotina) zmitosti 0,18 až 0,25 mm, stěrky se spodní plochou určenou k rozestírání a tvořenou tvrdou pryžovou hmotou, kartáče k očištění povrchu vozovky a pravitka.

## 2.1. NÁVRH NOVÉ METODY ZAMĚŘENÍ VOZOVKY S VYUŽITÍM 3D SKENOVÁNÍ

K zaměření vzorků byl použit handy skener VIUscan s technologickými parametry viz Obr. 9 – Technické vlastnosti VIUscan

Technické vlastnosti VIUscan	
<b>Hmotnost</b>	1.3 kg
<b>Rozměry</b>	172 x 260 x 216 mm
<b>Rychlost snímání</b>	18.000 snímků/sekundu
<b>Třída laseru</b>	2 (bezpečný pro oči)
<b>Rozlišení</b>	0.100 mm
<b>Přesnost</b>	více než 0.050 mm
<b>Objemová přesnost</b>	0.020 mm + 0.200 mm/m
<b>Objemová přesnost s MAX SHOT 3D</b>	0.020 mm + 0.025 mm/m
<b>Vzdálenost skeneru od snímaného objektu</b>	300 mm (12 in.)
<b>Velikost laserového kříže</b>	210 mm x 210 mm
<b>Rozlišení textury</b>	50 - 250 DPI
<b>Barva textury</b>	24 bits SRGB-calibrated
<b>Software</b>	VXelements
<b>Výstupní formáty</b>	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr

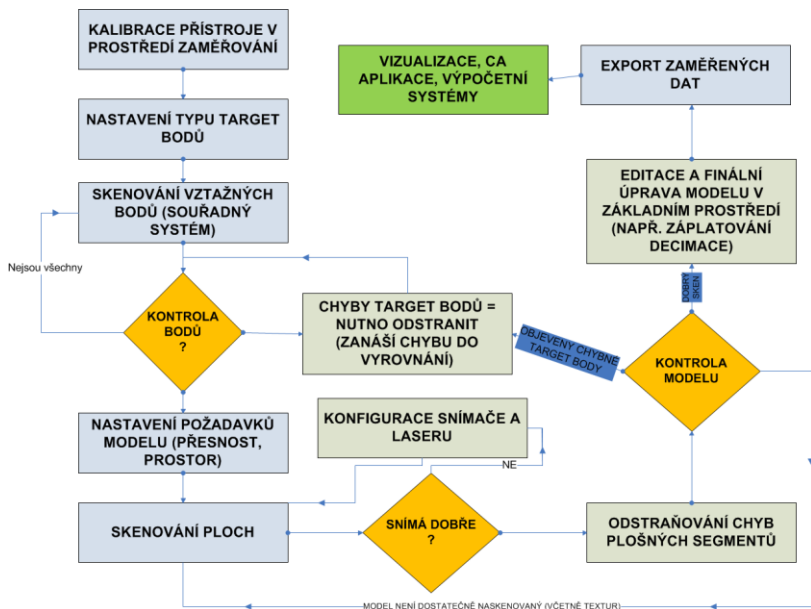
*Obr. 9 - Technické vlastnosti VIUscan*

Uváděné technické hodnoty jsou pouze teoretické a platí při dodržení požadovaných postupů a při pravidelné (roční) kalibraci u výrobce. Aby bylo možné docílit požadované přesnosti, je nutné kompenzovat i výrobní rozdíly mezi jednotlivými vyrobenými kusy i v jedné sérii, tento požadavek

je splněn jedinečnou kalibrační deskou, která je vázána na výrobní číslo skeneru.

Základní postup skenování je zpracován jako blokové schéma, viz Obr. 10. Nejprve je nutné zařízení kalibrovat v prostředí, ve kterém bude skenování prováděno. Kalibrace spočívá v nasnímání kalibrační desky ve 14 základních polohách a vyhodnocení (vyrovnání) zaměřených výsledků se skutečnými rozměry na kalibrační desce. Následuje skenování vztažných bodů, v podstatě jde o určení jednoznačných bodů v prostoru vůči snímanému objektu. Vztažné body mohou být umístěny přímo na zkoumaném objektu, či na ploše pod objektem, nebo na skleněné desce nad objektem. Během celého zpracování modelu se nesmí změnit poloha vztažných bodů vůči objektu, ale je možné dle potřeby přidávat další požadované vztažné body. Druh použitých „target“ (vztažných) bodů určuje i možnosti přesnosti výsledného modelu. Pro skenování byly použity body s černou konturou určené pro velmi přesné skenování. Princip jednoznačnosti každého vztažného bodu je založen na principu rozdílných vzdáleností mezi jednotlivými body (nemožnosti nalepit target body do stejné vzdálenosti vzhledem k dané přesnosti snímání a vyhodnocování délek). Během celého skenování je nutné dodržet plynulý pozvolný pohyb skenovacího zařízení bez rychlých skoků (pohybů). Při rychlejším pohybu, či nedostatku viditelnosti dostatečného počtu vztažných bodů se zařízení začne ztrácet v prostoru a generuje chyby, které je nutné odstranit. Po naskenování všech vztažných bodů je nutné provést jejich vizuální kontrolu, případně odstranit „ztracené“ v prostoru. Po vyrovnání vztažných bodů může začít snímání požadovaných objektů.

Zařízení ViuScan umožňuje sejmutí jak ploch, tak textury snímaného objektu. Vzhledem k povaze snímání a požadovaných výsledků, při zaměřování vozovek bude snímání textury vypnuto, ušetří se systémové prostředky a zkrátí doba snímání. Před zahájením snímání je potřeba nastavit přesnosti a snímanou plochu. Během celé práce je nutné provádět změnu konfigurace laserových paprsků (snímače), neboť se mění povrchové vlastnosti snímaných objektů. Opakovaně je třeba kontrolovat stav snímaného objektu, vztažných bodů a odstraňovat případné šумы.



Obr. 10 - Postup skenování

## 2.2. NÁVRH ZÁKLADNÍ MĚŘICÍ DESTIČKY – SOUŘADNÝ SYSTÉM

Pro měření povrchu vozovky (textury) jsem navrhl a vyrobil základní měřicí destičku s vnitřním otvorem cca 10x10 cm což odpovídá navržené základní snímané ploše a využívá charakter měřicího zařízení. Základní plocha 100x100 mm umožňuje jedním skenováním vybranou plochu zpracovat s maximální přesností.

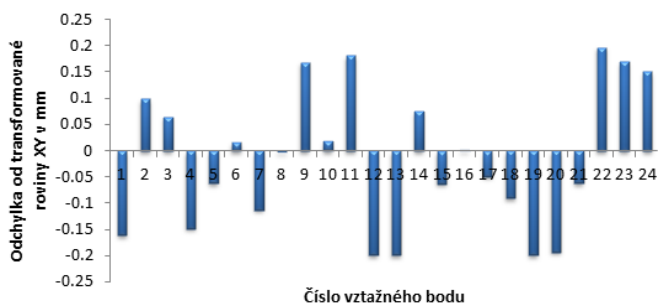
Pro skenování textury vozovky bude zvolena vysoká přesnost skenování v rozlišení 0,2 mm. Deska je vyrobena z plastu, jednotlivé vtažné body s černou konturou (určené pro velmi přesné skenování) jsou umístěny na destičku tak, aby umožňovaly v každém okamžiku snímání udržet prostorovou orientaci skeneru. Zároveň s fotodokumentací a geodetickým zaměřením umožňuje destička se vztažnými body jednoznačné prostorové určení a orientaci na vozovce. Pro určení souřadného systému a základní roviny poslouží naskenované vypočtené středy vztažných bodů. Pozice v rovině XY je garantována správným použitím přístroje, ale Z souřadnice

vychází z předpokladu, že destička je dostatečně „rovná“ a lepicí terčíky mají srovnatelnou výšku a množství „lepidla“. Nutno ověřit základní analýzou skenovaných vztažných bodů.



**Obr. 11 – Navržená měřicí deska**

Při naskenování měřicí šablony (destičky) byly vyexportovány vyrovnané vztažné body, pro použití dle předpokladu je nutné zkontrolovat jejich výšky.



Průměrná odchylka od ideální roviny vychází 0,12 mm, ale je třeba vzít v úvahu, že vlastně každý zaměřovaný bod je jedinečný a jeho výšky nemohou být zcela stejné. Maximální odchylka od transformované výšky je 0,197 mm, takže je menší než nastavené rozlišení měřicí techniky. Ve snaze o maximální přiblížení interpretovatelné rovnoběžnosti rovin,

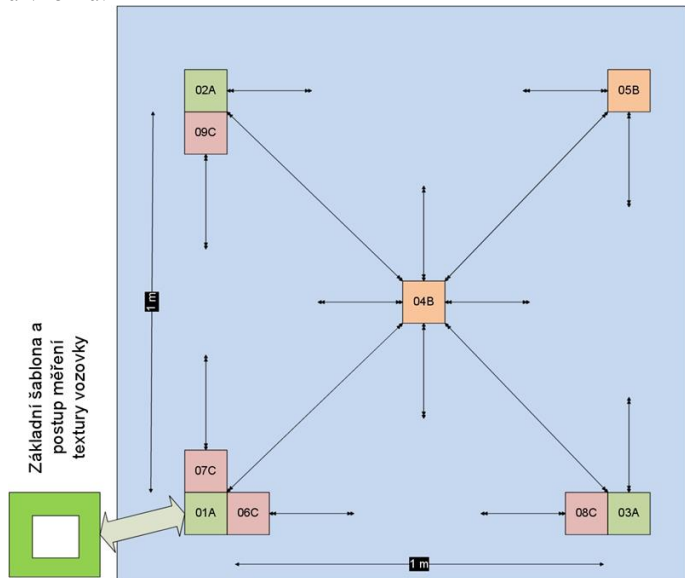


bude u všech vzorků rovina XY počítána z bodů 5, 15, 21 v naskenované databázi

Experimentálním zaměřením a výpočtem analyzovaných hodnot bylo prokázáno, že destička určuje základní rovinu pro všechny nasnímané vzorky a její poloha na vozovce by měla zaručovat „rovnoběžnost“ s terénem a pro virtuální zpracování bude tato plocha výchozím souřadným systémem

### 2.3. NÁVRH POSTUPU ZAMĚŘENÍ SKENOVANÝCH OBLASTÍ

Metoda zaměření a modelování textury vozovky vychází z omezené možnosti skenovat plochu vozovky s tak vysokým požadavkem na přesnost. Optimálním se ukazuje naskenovat a zpracovat menší zóny a z nich generovat zprůměrovaný (či interpolovaný) terén vozovky na základě modelů vzorků.



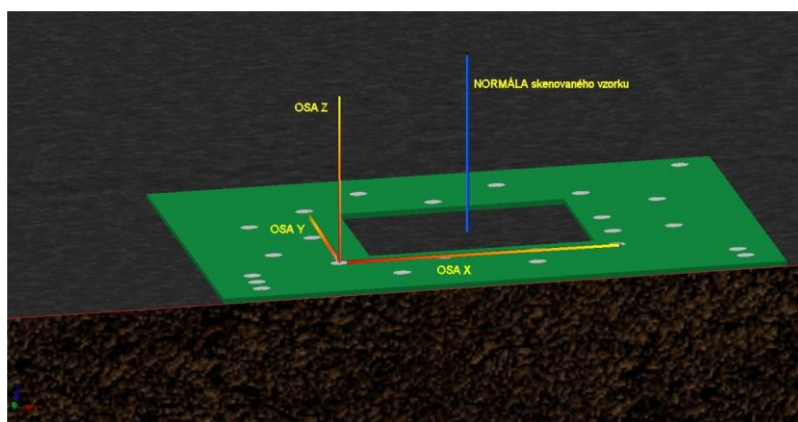
Obr. 12 - Návrh metriky zaměřování textury vozovky - schéma

Pro modelování povrchu vozovky je nutné naskenovat vzorky textury dle navrženého postupu viz. Obr. 12.

Návrh metriky měření vychází z oblasti větší než 1 m<sup>2</sup>. Tato plocha je větší než testovaná plocha běžnou odměrnou metodou v kombinaci s kyvadlem.

Dle předpokladů by na každém stanovišti mělo dojít k zaměření zón označených písmenem A (viz Obr. 12). Zaměření výchozí zóny A musí být provedeno i geodetickým situačním zaměřením, aby bylo možné i zpětně se navázat na již analyzované plochy, při požadavku na opakovaná měření. Pokud analýzy plochy A1, A2 a A3 prokáží dostatečnou povrchovou „shodnost“, nebude nutné další měření provádět a bude možné rovnou modelovat terén. Pro možnost určení modelu textury vozovky i v případě rozdílnosti analyzovaných modelů v zóně A, jsou v metrice měření navrženy ještě dva stupně rozšíření pomocí zón B a C. Výsledkem by vždy měl být použitelný vzorek pro modelování vozovky v dané oblasti. Pro experimentální zhodnocení navrhovaného postupu bude využito čtyř měření v zóně 01A, 02A, 03A, 06C.

Potenciální hrozbou, jako u všech laserových snímačů je příliš slunečního svitu a špatné snímání odražených (snímaných) paprsků od povrchu vozovky. Pro zpracování je nutné použít výkonnou pracovní stanici, neboť v terénu za provozu bude vždy nutné, aby měření probíhala co možná nejrychleji, tzn. filtrování bodů, odstranění šumů a matematické vyrovnání bude provedeno vždy až následně. Základní předpoklad souřadného systému vychází z pragmatické úvahy, že destička položená na komunikaci by měla být s touto komunikací rovnoběžná. Pokud by oba povrchy byly hladké, potom toto tvrzení je pravdivé, ale shoda byla experimentálně ověřena i v případě umístění destičky na reálnou vozovku.

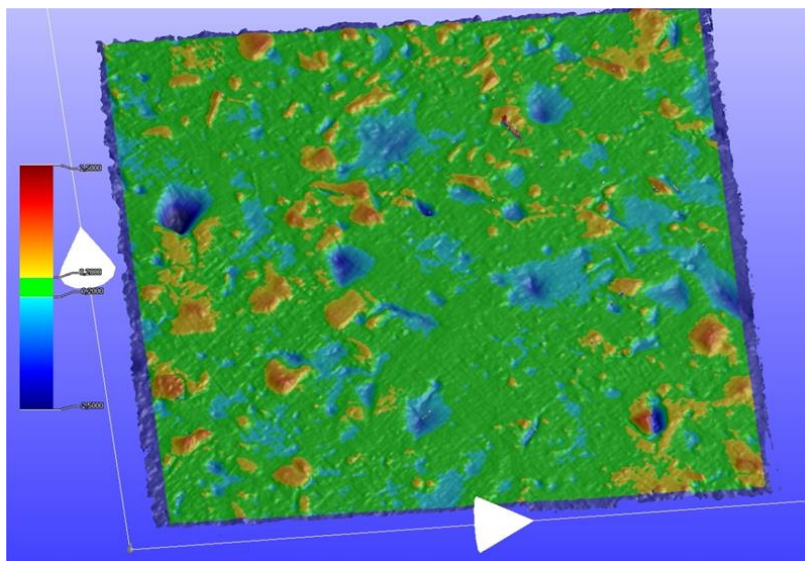


**Obr. 13 - Souřadný systém měřicí destičky a normála vzorku vozovky**

Obr. 14 vypovídá o struktuře povrchu vozovky, kdy zelené plochy v rozmezí tolerance  $+0,2$  mm až  $-0,2$  mm zobrazují všechny plochy (body),

kteře spadají do tohoto tolerančního pásma. Jedná se o optimalizovanou rovinu s minimální chybou výchylek zaměřeného vzorku. Červenou barvou jsou zachyceny všechny výstupky, modrou všechny propadliny. Tato základní analýza vychází ze skenovacího rozhraní systému VIUscan – Vxelement.

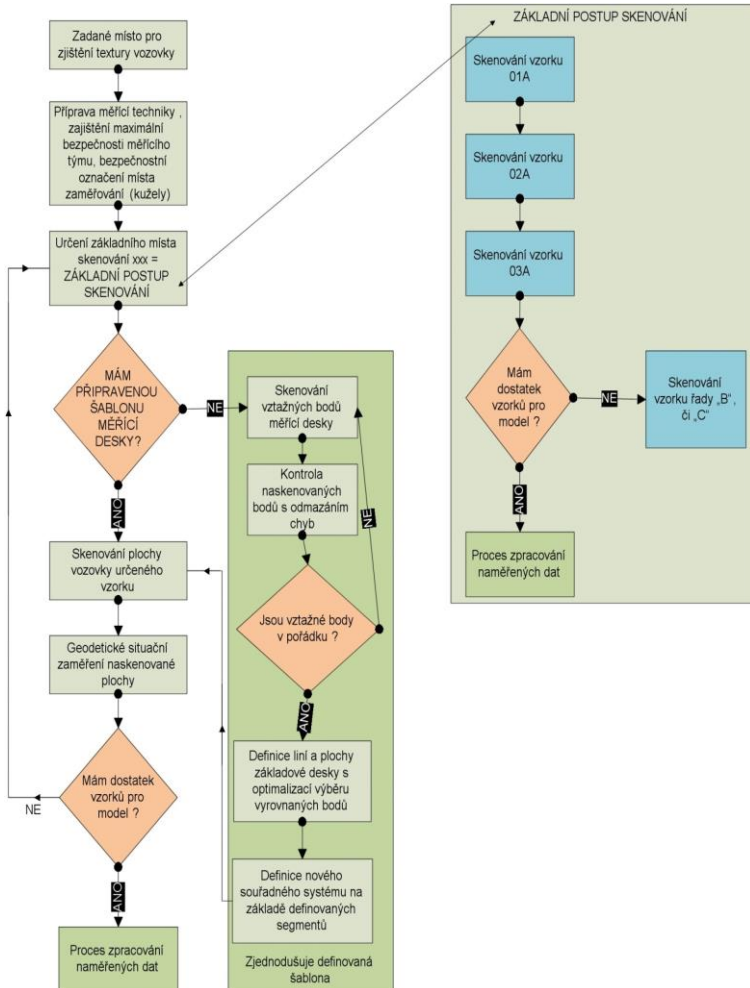
Experimentálním zaměřením, zpracováním a vyhodnocením čtyř základních vzorků byla potvrzena hypotéza, že normála měřicí desky se shoduje s normálou optimalizované plochy skenovaného vzorku. Shoda byla s přesností na 4 desetinná místa (všechny výpočty a rozměry vychází z rozměrů vzorků zaměřovaných v mm). Z toho plyne, že je možné skutečně použít souřadný systém vztahený k měřicí destičce, který byl v rámci experimentálního zaměřování vypočítán a určen jako nový vztahný systém (všechna další měření mohou startovat z takto předpřipraveného prostředí – uložena nová šablona základu).



**Obr. 14 - Zobrazení „chybové“ analýzy roviny skenované plochy vozovky**

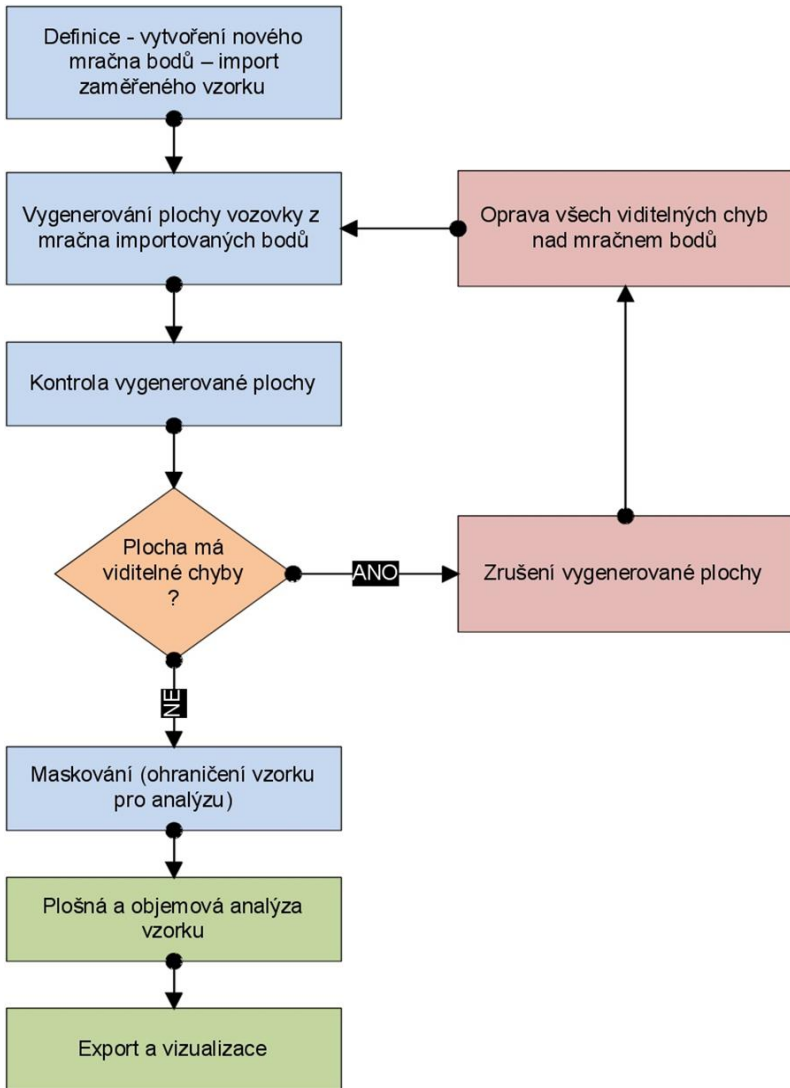
Při zpracování naskenovaných vzorků, pro možnost „rychlé“ analýzy v prostředí Vxelement jsou největším rizikem šumy vygenerované skenerem, které se umístěním blíží skutečnému povrchu vozovky. Tyto chyby jsou velmi pracně a problematicky definovatelné, ale mohou významně posouvat výsledné hodnoty!

Při ověření všech potřebných hypotéz pro použití nové odvozené metody (viz. habilitační práce) se ukazuje jako největší problém zpracování mračen bodů ve smyslu odstranění šumů měření v terénu, ale přitom nepoškodit vypovídací schopnost skenovaných dat. Byla navržena čtyřstupňová filtrace dat.



Obr. 15 - Základní algoritmus skenování vzorků vozovky

## 2.4. NÁVRH ZPRACOVÁNÍ S VYUŽITÍM ROZHŘANÍ PARAMETRICKÉHO CA MODELÁŘE



Obr. 16 - Algoritmus zpracování zaměřeného mračna bodů v CA modeláři

## 2.5. ANALÝZA ZAMĚŘENÝCH VZORKŮ VOZOVKY

Z analyzovaných dat mračen bodů naměřených vzorků vyplývají důležité informace o povrchu vozovky, která na první, subjektivní pohled, vypadá texturově stejná v celém rozsahu povrchu.

Vzhledem k přesnosti snímání je však jisté, že analyzované plochy se parametricky mohou sobě pouze blížit, neboť každý vzorek je jedinečnou částí povrchu. Možnosti shody jsou vlastně patrné již z analýzy povrchu navržené měřicí desky osazené target měřícími body, kdy body v „rovné“ ploše vykazují odchylky do 0,2 mm.

Celá navržená metoda vychází ze zaměření potřebného počtu ploch 100 mm x 100 mm, kdy ideální, rovná teoretická plocha vzorku (průmět) vychází 10 000 mm<sup>2</sup>. Největší vygenerovaná plocha vzorku o průmětu 100 x 100 mm byla u měřeného vzorku 06C (vzorek 04) a to 10 671 mm<sup>2</sup>, nejmenší u vzorku 01A (vzorek 01) a to 10 480 mm<sup>2</sup>. Průměrná hodnota plochy, ze které by měl být generován povrch vozovky ze všech zaměřených vzorků, vychází 10 592 mm<sup>2</sup>. „Odchylka“ analyzovaných ploch zaměřených vzorků odpovídá čtvercové ploše o hraně cca 10 mm. Výsledný průměrný nárůst plochy oproti průmětu vychází průměrně na plochu čtverce o hraně cca 25 mm.

Pro zjištění změny povrchu vozovky v rámci jednotlivých zaměřených oblastí (zjištění „stability“ vzorku), byl každý vzorek rozdělen na čtyři kvadranty, kdy každá zóna byla modelována a analyzována jako samostatný povrch. Pro možnost relativního porovnání byly všechny analyzované modely přepočítány na bezrozměrný procentuální nárůst vypočítaný jako podíl plochy modelovaného povrchu ku teoretickému průmětu. Očekávaně došlo k výkyvům v kvadrantech dle viditelné makrotextury, ale celková průměrná hodnota kvadrantů skutečně zapadá do shody modelu jedné vozovky.

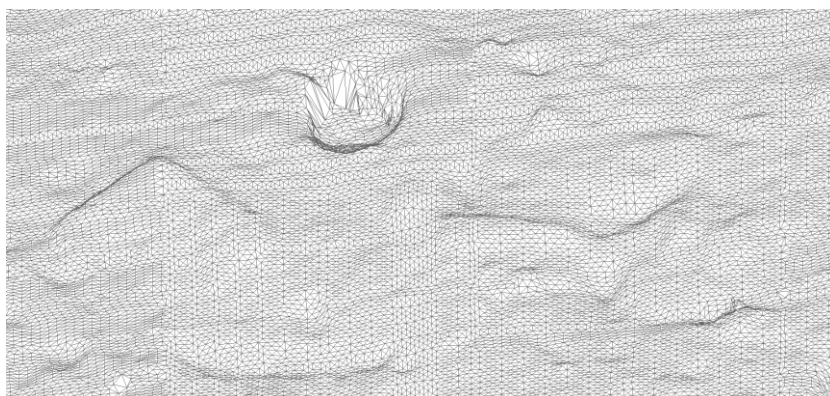
Aby modelované povrchy nemohly být ovlivněny chybami okraje snímané oblasti (šum způsobený materiálovou tloušťkou měřicí desky a hranice oblasti vozovky), byl modelován a analyzován každý vzorek zmenšený i na čtvercovou plochu 90 x 90 mm.

Pro určení klasifikační třídy texturových vlastností vozovky, či generování povrchu modelu vozovky by měly být vypočteny průměrné hodnoty vzorků ze zaměřené oblasti. Průměrné hodnoty relativního nárůstu ploch vyjádřené v procentech vykazují požadovanou shodu viz následující tabulka:

(tabulka všech hodnot vzorků viz. habilitační práce).

plocha průmětu (mm <sup>2</sup> )	průměrná plocha vzorku (mm <sup>2</sup> )	průměrný nárůst (%)
10 000	10 592	<b>105.9%</b>
8 100	8 569	<b>105.8%</b>
2 500	2 647	<b>105.9%</b>

Relativní průměrný nárůst (vyjádřený v procentech) vykazuje potřebnou shodu pro možnost modelování potřebné celistvé části vozovky vygenerované ze zaměřených vzorků určených a zpracovaných navrženým postupem - metodou.

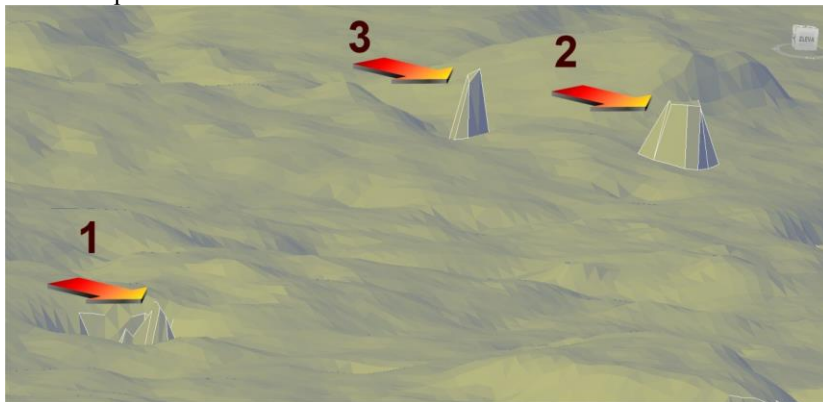


*Obr. 17 - Ukázka vygenerované triangulované sítě vozovky*

## 2.6. CHYBY A FILTRACE VZORKŮ

Přes čtyři stupně filtrování vzorků mračen dat se ukazuje právě tato algoritmicke jako nejvíce problematická, neboť od třetího stupně filtrování již není zcela jednoznačné, jak filtr nastavit správně. První stupeň v softwarovém rozhraní 3D skeneru - Vxelement umožňuje hrubé odfiltrování přebytečně nasnímaných dat v grafickém rozhraní, kde je třeba nepoškodit samotný povrch vozovky. Druhý stupeň filtrace vychází z práce se surovými daty a odříznutí bodů mezi určenými limitními hranicemi, kde ze zpracovávaných vzorků vyplývá průměrné odebrání 84 chyb (bodů na vzorek) ve druhém stupni filtrace. Tento způsob filtrace zaměřených bodů

využívají i analyzované metody, které se dnes běžně využívají. Na obrázku 18 jsou zobrazeny chyby, které ve vzorku zůstaly i po filtrování prvními dvěma stupni.



*Obr. 18 - Chyby v naskenovaném vzorku*

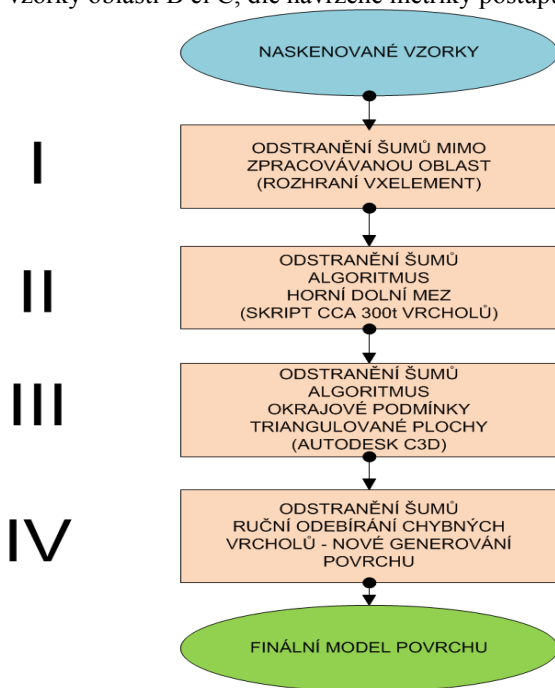
Třetí stupeň filtrace vychází z možnosti definovat nové okrajové podmínky vytvoření triangulovaných ploch skenovaných vzorků. Přebudování povrchu skenovaných součástí dle parametrů patří k běžným postupům v parametrickém modelování při úpravě (změně) vrcholů definované sítě. Obecně lze zparametrizováním nastavení délek hran a hlavně omezením úhlů navazujících hran tyto šумы odstranit, ale nelze obecně určit „správné“ okrajové podmínky, neboť automaticky zde může již docházet ke zkreslení skutečných povrchů a vynechání vrcholů, které do modelu patří – to znamená změnu reálného povrchu. Přebudování povrchů z mračen bodů je sice standardní metodou, ale úprava okrajových podmínek triangulace může vést ke znehodnocení zaměřených dat.

Čtvrtý stupeň odfiltrování šumů předpokládá ruční opravu zbylých chyb. Ruční práce je sice možná, ale byla by neefektivní s nejistým výsledkem, kdy největší problém je tyto chyby nalézt. Vzhledem k jejich malému rozsahu a vlivu na analyzované plochy vzorku, byly tyto šумы zanedbány. Po finální úpravě vrcholů sítě je nezbytné provést nový přepočít triangulovaných ploch (povrch vzorku).

Návrh metriky skenování vzorků vozovky vychází z minimální analýzy tří vzorků modelované oblasti. V experimentálním, či ověřovacím zpracování vzorků, se předpokládá geodetické vztažné zaměření všech skenovaných



míst, aby bylo možné případně vzorky prověřit, či doplnit o další zaměřované vzorky oblastí B či C, dle navržené metriky postupu.



*Obr. 19 - Schéma algoritmu odstranění šumů obsažených v naskenovaném vzorku*

### 3. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Při použití modelů reálných dějů musíme mít na paměti vždy obecně platný základní smysl jakéhokoli modelování. Podstatou modelování ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho modelem (systémem, který jej modeluje), jejímž cílem je získat pomocí pokusů s modelem informaci o původním systému. Mohu si tedy vlastně definovat libovolný obraz reality pomocí rozličných technických prostředků, či libovolných softwarových produktů. „Reálný děj“ mohu „zjednodušit“ tak, abych byl schopen vůbec simulace spočítat. Nutné přiblížení uvažovaných parametrů je dáno zkušenostmi řešitele a schopnostmi procesorového výkonu (technickými možnostmi), ale výsledky simulovaného děje, přes

rozdílné postupy, či rozsah uvažovaných počátečních a okrajových podmínek, musí směřovat fyzikálně ke stejnému výsledku.

Modelování s podporou PC má široké možnosti použití, ale nenahrazuje praktické zkušenosti znalců, znalosti tisíců řešených případů. Výpočtové modelování dopravních nehod s praktickými zkušenostmi znalců může vytvořit podmínky pro řešení složitých případů DN. Právě toto je důvodem, proč se znalci a odborníci jednotlivých oborů schází na pravidelných konferencích, publikují v odborných časopisech, aby si vyměnili své poznatky.

V dnešní době se klade velký důraz na používání výpočetní techniky. Nicméně pouhá znalost a funkčnost specializovaného softwaru nestačí, vyžadují se též veliké zkušenosti. Z pohledu světa kolem nás dokáže být nepřesná interpretace dat mnohem nebezpečnější, než by se mohlo zdát. Zadávat počáteční a okrajové podmínky se může pokusit vlastně kdokoli a počítač nám vždy vygeneruje „nějaké“ výsledky. Jenže pokud tyto výsledky mohou značně ovlivnit osudy lidí, potom je třeba veliké obezřetnosti.

Softwarové simulace a modelování, přes veškeré problémy, na které se při studiu této problematiky naráží, je tou správnou cestou vývoje v oblasti řešení dopravních nehod, vývoje automobilového průmyslu, či zvyšování bezpečnosti provozu.

Dokonce se dá předpokládat, že již v blízké budoucnosti spojené s dalším rozvojem elektrotechniky a definice přístupnosti dat z řídicích jednotek, nebude možné úlohy tohoto typu řešit bez PC, neboť technické informace nehodových dějů a časových okamžiků těsně před střety budou obsaženy v „černých skříňkách“ jednotlivých vozidel a tato data po přetažení do PC budou kompatibilní se vstupními daty jednotlivých výpočetních procesingů, ať již přímo či po přípravě speciálních preprocesingů.

Kvalita a objektivnost modelů je dána parametry okrajových a počátečních podmínek nehodových dějů. Zjišťování celé řady vstupních parametrů je dáno technickými možnostmi dostupných zařízení pro měření těchto údajů. Technologický vývoj vede k nutnosti navrhování nových postupů, metodik a norem, aby bylo možné nová zařízení a technologie využívat. Ve výzkumné činnosti jsem se zaměřil na možnost využití 3D skenování pro zjištění adhezních podmínek, jako vstupního parametru do simulačních modelů.

Experimentálně se podařilo prokázat využitelnost nové odvozené metody. Přes očekávané problémy se skenováním povrchu vozovek, kdy odrazivost

materiálu není ideální a proměňující se podmínky prostředí mohou zhoršovat kvalitu naměřených dat. Navržená, zpracovávaná místa na vozovce - použité vzorky se podařilo technicky zaměřit velice rychle v dostatečné kvalitě. Ke zpracování bylo použito vybavení a licence softwarů dostupné na ČVUT.

Při reálném použití, zaměřování více vzorků, lze očekávat zhoršené podmínky dle aktuálního počasí. Zaměření více malých oblastí vychází z analýzy problematiky možností současných zařízení, kdy souvislá plocha o rozloze  $1\text{m}^2$  je skenována při požadované přesnosti  $0,2\text{ mm}$  řádově 10 hodin (včetně přípravy na místě, kalibrace a konfigurací skeneru). Na vozovce komunikace není možné (bezpečné) tak dlouhá měření provádět. Pro možnou simulaci pohybu vozidla na modelované vozovce je však třeba vždy modelovat větší plochy, navržená metoda tedy vychází z principu průměrování zaměření malých oblastí o ploše  $100\text{ cm}^2$ , kdy výsledkem může být pole základních vzorků, či přepočtená charakteristika vlastností na požadované rozměry.

Pro vstup do simulačních prostředí je sice možné použití plně prostorově triangulované plochy textury (definovaných polí vzorků), ale vzhledem k velikosti a množství takto zpracovávaných modelovaných dat se ukazuje výhodnější druhá varianta, kdy na vstupu simulačního prostředí jsou definovány smykové (adhezí) vlastnosti určených segmentů ploch. Pro praktické použití druhé varianty bude nutné navázat texturové analýzy vozovky z 3D skeneru na dynamická měření smyku.

Podařilo se prokázat použitelnost využití základní šablony měření, ve které je umístěn souřadný systém i pro naskenovaný povrch vozovky, což značně usnadní další použitelnost navržené metody postupu a výrazně urychlí zpracování a analýzu všech vzorků. Umožňuje nadefinovat základní jednotné filtrování mračen bodů od chyb.

Myšlenka využití technologie skenování povrchu objektů k navržení nových klasifikací, analýzy vzorků, či kontrole výroby je dnes experimentálně ověřována v celé řadě odvětví jako dostupná varianta k dnes platným používaným normám. Na Fakultě stavební jsou experimentálně měřeny a vyhodnocovány povrchy lomů betonových vzorků. Experimentuje se s vyhodnocováním skenovaných ploch plavebních komor k vyhodnocování jejich průhybů. Navržená odvozená metoda přímo navazuje na tyto trendy a předpokládá, jako jeden z dalších kroků, vytvoření vlastní klasifikace povrchů vozovek, vycházející z analýz povrchů skenovaných vzorků, v návaznosti na objemové charakteristiky dnes využívaných norem.

Využití navržené experimentálně ověřené metody spočívá v možnosti jejího použití pro:

- klasifikaci textur povrchů vozovek,
- smykových vlastností vozovek,
- vytvoření modelu vozovek v simulačních prostředích.

Na ústavu soudního znaleství je vytvořen výzkumný projektový tým věnující se problematice určení adhezních vlastností vozovek. Jeho úkolem bude s využitím navržené metody provést dostatečné množství měření vozovek, dle navržené odvozené metody a platných norem.

- Textura vozovky – cílem měření a výzkumu na základě analyzované skenované plochy je sestavit vlastní klasifikační třídy textur vozovek, oproti stávající metodě, kdy je analyzován objem použitého materiálu. Pro měření a sestavení klasifikačních tříd by mělo být použito skenování povrchu s plošnou analýzou vzorků dle navržené metody oproti odzkoušeným odměrným metodám. Navázat klasifikační třídy textur vozovek vztažnou tabulkou současných objemových hodnot na plochy skenovaných vzorků.
- Smykové vlastnosti vozovek – rozšířit prováděná měření o měření kyvadlem s vyhodnocením smykových vlastností. Smykové vlastnosti vozovek jsou běžně používanou okrajovou podmínkou v simulačních prostředích. Pro možnost validování modelů budou prováděna dynamická měření ve vozidle za použití akcelerometrů. Cílovým stavem by mohlo být až virtualizování smykových vlastností vozovek s využitím 3D skenování za jízdy a paralelním dynamickým snímáním normovaného smýkaného kola s online vyhodnocením.

Technické trendy jednoznačně podporují využití navržené metody k praktickému použití. Zapotřebí bude vytvořit k navrženým postupům dostatečně ověřené klasifikace a normy, aby uživatel po zaměření základních vzorků měl ihned dostupné informace o vlastnostech vozovky, či okrajových parametrech pro simulační programy. Současný stav neumožňuje dostatečnou cenovou dostupnost, ale dle předpokládaného vývoje je velký předpoklad, že během příštích pár let se i skenovací zařízení s garantovanou přesností měření  $0,1 \text{ mm}^2$  dostanou pod magickou hranici 100 000,- Kč.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DISERTAČNÍ PRÁCE; SOFTWAREOVÉ SIMULACE A ANALÝZY DOPRAVNÍCH NEHOD; Ing. Drahomír Schmidt, Praha 2006
- [2] Schmidt, D.: Road Adhesion as an Input Parameter for Accident Process Simulation. 1. ed. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013, p.185, ISBN 978-3-659-51045-8.
- [3] Schmidt, D. - Mičunek, T. - Marek, Z.: Kontinuální prostorové skenování komunikace. Silnice železnice. 2012, roč. 7., č. 2, s. 92-93. ISSN 1801-822X.
- [4] Schmidt, D. - Frydrýn, M. - Marek, Z.: Použití 3D skeneru pro dokumentaci míst dopravních nehod. In Dopravní nehodovost a návrh opatření na její eliminaci. Jihlava: Vyšší policejní škola Ministerstva vnitra v Jihlavě, 2012, s. 135-144. ISBN 978-80-260-3621-0
- [5] Schmidt, D. - Frydrýn, M. - Marek, Z.: Možnosti získání nových informací z policejní fotodokumentace a způsoby verifikace její kvality a přesnosti. In Vehicle Forensic Science 2011. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Ústav soudního inženýrství, 2011, s. 82-91. ISBN 978-80-214-4294-8
- [6] ČSN ISO 13473-2 Popis textury vozovky pomocí profilů povrchu - Část 2: Terminologie a základní požadavky vztahující se k analýze profilu textury vozovky
- [7] SN P CEN/TS 15901-3 Povrchové vlastnosti vozovek pozemních komunikací a letištních ploch - Část 3: Postup pro stanovení protismykových vlastností vozovek za použití zařízení s podélným řízeným skluzem (LFCA) - Zařízení ADHERA.
- [8] J. Šachl, Problematika měření protismykových kvalit povrchu vozovek, Kandidátská disertace, VÚD - Výzkumná oblast pozemních komunikací, 1974.
- [9] Gustáv Kasanický, Pavol Kohút, Martin Lukášik: Teória pohybu a rázu při analýze a simulácii nehodového deja, EDIS 2001, ISBN 80-7100597-5
- [10] Miroslav Liška: Fyzika a matematika při analýze dopravních nehod, Akademické nakladatelství CERM, 2004

## **Ing. DRAHOMÍR SCHMIDT, Ph.D.**

Narozen 26.5.1971 v Praze, národnost: česká, e-mail: [schmidt@fd.cvut.cz](mailto:schmidt@fd.cvut.cz)

### **Vzdělání:**

- 2007 Ph.D. (doktor); ČVUT v Praze Fakulta dopravní; Praha (*obor „Dopravní systémy a technika“ se zaměřením na počítačové simulace a analýzy dopravních nehod*)
- 1999 Ing. (dopravní inženýr); ČVUT v Praze Fakulta dopravní; Praha (*obor „Dopravní infrastruktura v území“ s projektovým zaměřením – Náhodné procesy a jejich aplikace v dopravě*)

### **Zaměstnání:**

1997-2006	Správa informační sítě FD ČVUT. Zařazení: správce počítačové sítě FD ČVUT (oddělení 16302)
od 2001	Odborný asistent na FD ČVUT na ústavu 16114 (Ústav informatiky a telekomunikací v dopravě)
od 2005	Spolupracovník ústavu 16622 (Ústav soudního znalectví v dopravě) - zaměření simulace a modelování DN, zaměřování míst DN
od 2006	tajemník fakulty dopravní ČVUT v Praze

### **Vědecké zaměření:**

Počítačové modelování a simulace dopravních nehod, zaměřování míst dopravních nehod, CA aplikace, počítačové sítě, přenosové datové technologie, informační systémy.

### **Pedagogická praxe:**

*Přednášky* Měřicí metody a technika v dopravě (622MMT)  
Software v bezpečnosti dopravy (14SBD)  
Sítě a protokoly (614SIAP)  
Informační systémy (614IFS)

*Cvičení* Základy simulací (22Y2SM)  
Simulace nehod (22Y1SM)  
Simulace a kinematické modelování (22SKM)  
Digitální zobrazování 5,6 (550DZ5,6)  
Konstruování s podporou počítačů (14KSP)  
Aplikované měřicí metody v dopravě (22AMM)  
Měřicí metody a technika v dopravě (22MMT)

Počítačová podpora dopravního projektování (14PPD)  
Základy parametrického modelování (14ZM)  
Pokročilé techniky parametrického modelování (14PT)  
Informatická praktika 1,2 (14IP1,2)

*Projektově orientovaná výuka*

vedení projektu „Analýza dopravních nehod“

bakalářský projekt 22X1AD

3x vedená práce získala pochvalu děkana

magisterský projekt 22X2AD

1x vedená práce získala pochvalu děkana

1x vedená práce získala cenu prof. Vlčka

*Vedení doktorandů (od 2009)*

Školitel 5 Ph.D. studentů (3 po SDZ), školitel specialista

1 Ph.D. studenta

**Prestížní publikace:**

*monografie*

Schmidt, D.: Road Adhesion as an Input Parameter for Accident Process Simulation. 1. ed. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013, p.185, ISBN 978-3-659-51045-8.

*článek v impaktovaném časopise*

- Schmidt, D. - Schejbalová, Z. - Mičunek, T.: Access Bridge Design Measures for Safety Increase of the Road Infrastructure. PROMET - Traffic&Transportation. 2013, vol. 25, no. 6, p. 543-554. ISSN 0353-5320.
- Schmidt, D. - Schejbalová, Z. - Mičunek, T.: Biomechanical analysis of the dummy responses in case of child pedestrian/cyclist collision with passenger car In: Neural Network World. 2013, vol. 23, no. 6, p. 609-622. ISSN 1210-0552.

*Udělený patent národní*

- Moos, P. – Jíra, J., - Schmidt, D., - Jiroušek, O.: Zapojení pro řízení tuhosti v kmitajících elektromechanických systémech. Patent Úřad průmyslového vlastnictví, 303922. 2013-06-26.
- Moos, P. – Jíra, J., - Schmidt, D., - Jiroušek, O.: Zapojení pro řízení hmotnosti v kmitajících elektromechanických systémech. Patent Úřad průmyslového vlastnictví, 303923. 2013-06-26.

*článek v mezinárodním recenzovaném časopise*

- Schmidt, D. - Schejbalová, Z. - Mičunek, T.: Dynamic Response of the Dummy in Case of Child Cyclist Collision with Passenger Car. International Journal of Engineering Research and Development 2013, vol. 11, no. 11, p. 26 - 34. ISSN 2278-800X.

*příspěvek na mezinár. konf.*

- Schmidt, D. - Mičunek, T. - Frydrýn, M.: Využití 3D skenování při analýze dopravních nehod. In Najnovšie poznatky znaleckej činnosti a výskumu v odbore doprava cestná. Žilina 2013, ISBN
- Schmidt, D. - Jiroušek, O. - Zlámal, P. - Jandejsek, I. - Kytýř, D.: Inverse Estimation of Rat Vertebrae Stiffness using Large-Scale Micro-Structural Finite Element Models. In: Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Stirling: Civil-Comp Press Ltd, 2013, . ISSN 1759-3433. ISBN 978-1-905088-57-7.

*funkční vzory*

- Schmidt, D. - Mičunek, T.: Automatický trigger pro spuštění záznamu vysokorychlostní kamery. [Funkční vzorek]. 2013.
- Schmidt, D. - Mičunek, T. - Schejbalová, Z.: Zařízení pro stabilizaci a následné uvolnění objektů nebo soustav během testů pasivní bezpečnosti. [Funkční vzorek]. 2012

*jiné*

- spoluúčast na zpracování 50 soudních posudků v posl. 5 letech
- vyzvaná účast na mezinárodních CRASH-testech konaných ve zkušebních prostorách v Šale, zaměřeno na střety MPV s chodcem, testování nových figurin vyvinutých organizací Ingenieur- und Kfz-Sachverständigenburos Priester und Weyde. (metodika, provedení a zpracování polohových měření), květen 2013.

**Projekty (posledních 5let)**

odpovědný řešitel 4 projektů

spoluřešitel 3 projektů