

# AUTOMATIZÁLT JÁRMŰIRÁNYÍTÓ RENDSZEREK MODELL-ALAPÚ FEJLESZTÉSE ÉS TESZTELÉSE

## MODEL-BASED DEVELOPMENT AND TESTING OF AUTOMATED DRIVING SYSTEMS

Dr. Németh Huba, Dr. Gyurkó Zoltán

[huba.nemeth@knorr-bremse.com](mailto:huba.nemeth@knorr-bremse.com), Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.

[zoltan.gyurko@knorr-bremse.com](mailto:zoltan.gyurko@knorr-bremse.com), Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.

### ÖSSZEFOGLALÁS

A járműiparban széleskörben használatos a V-modell alapú fejlesztési folyamat, amelynél a magasszintű vevői követelmények csupán a tesztelési folyamat legvégén kerülnek ellenőrzésre, így egy esetleges negatív tesztteredmény az addig kidolgozott megoldás jelentős változtatását vonhatja maga után.

A fenti probléma kiküszöbölésére született az ún. modell-alapú fejlesztési folyamat, amely szimulációs modellek kiterjedt felhasználásával a tesztek és vizsgálatok időigényének jelentős csökkenését, valamint azok korai fázisokban való kivitelezését is lehetővé teszi.

Az cikk áttekinti a modell-alapú módszer egyes lépéseit, és konkrét javaslatokat ad ezek gyakorlati alkalmazására automatizált járműirányító rendszerek fejlesztésénél.

### ABSTRACT

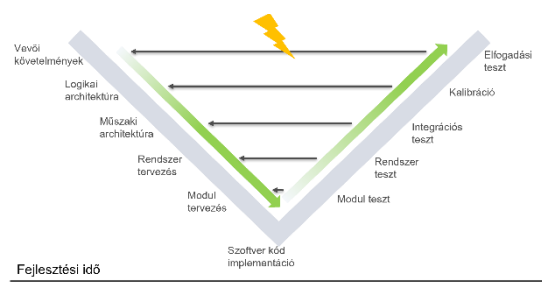
The vehicle industry is widely applying the so-called V-model-based development process, where the customer requirements can be validated rather in the late steps. An occasional negative test result can imply significant design changes in a late development phase.

To overcome the above shortcomings the so-called model-based development process was established, which heavily involves simulation models to significantly reduce testing time and enable tests even in the early development phases.

This paper details the relevant steps of the model-based approach and provides novel methods for automated driving development and testing.

### 1. BEVEZETÉS – A V-MODELL

A járművek funkciói egyre növekvő mértékben szoftver alapúak, így a szoftverfejlesztés területéről származó V-modell széleskörben elterjedt a járműrendszerek fejlesztésénél is az elmúlt évtizedekben [1]. Ebben a követelmények meghatározása és a tervezési lépések végrehajtása áll a V egyik oldalán, a tesztelés és validáció pedig a másikon (1. ábra).



1. ábra. Standard V-Modell

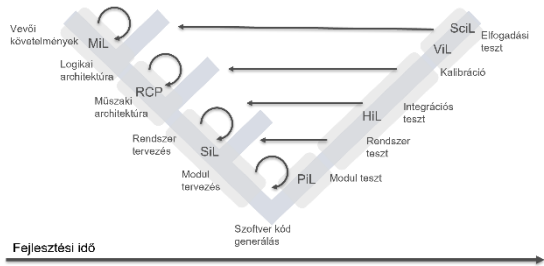
A jobboldali ágból származnak azon visszajelzések és megerősítések, hogy a kivitelezett design működése megfelel-e a V bal oldalán álló követelmények. Azonban a magasszintű vevői követelmények csupán a tesztelési folyamat legvégén kerülnek ellenőrzésre, amelynél esetleges negatív tesztteredmények az addig kidolgozott megoldás jelentős változtatását vonhatják maguk után a fejlesztés utolsó fázisában, ami magas kockázatot és további jelentős fejlesztési időt és erőforrást igényelhet a gyakorlatban.

### 2. A MODELL-ALAPÚ FEJLESZTÉSI FOLYAMAT

A fent vázolt probléma kiküszöbölésére született meg az ún. modell-alapú fejlesztési folyamat, amely fő vonalaiban a V-modellen alapul, azonban szimulációs modellek kiterjedt felhasználásával a tesztek és vizsgálatok

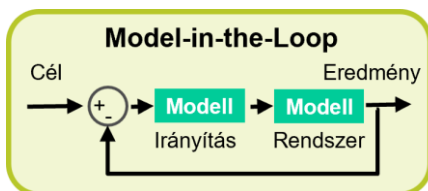
időigényének jelentős csökkenését, valamint azok korai fázisokban való kivitelezését is lehetővé teszi (2. ábra).

Ebben a jelentős újdonság, hogy különböző szimulációs modellek felhasználásával zárt hurkú (ebből a tesztek in-the-Loop elnevezése) tesztelést tesz lehetővé már a követelmények definiálása idején is.



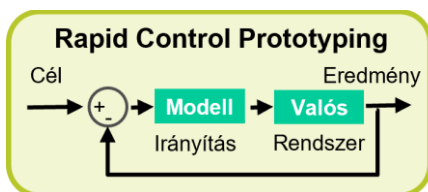
2. ábra. Modell-alapú fejlesztés

Első lépésként a vevői követelmények definiálása során lehetőség nyílik a követelmények ellenőrzésére az ún. Model-in-the-Loop (MIL) tesztelés segítségével (3. ábra), ahol mind az irányított járműrendszer (Plant), mind az ehhez fejlesztendő irányítás (Control) megfelelő modellek segítségével kerülnek reprezentálásra. Így a felállított követelmények jósága már a design létrejötte előtt ellenőrizhető, és szükség szerint módosítható, bővíthető, jelentős költség- és erőforrásvonzat nélkül.



3. ábra. Model-in-the-Loop tesztelés

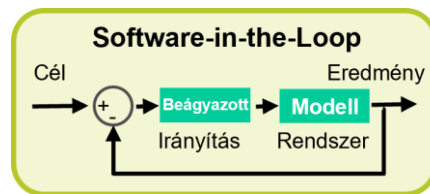
Miután a megvalósítandó rendszer logikai architektúrája elkészült, opcionális lehetőség az ún. Rapid-Control-Prototyping (RCP) lépés (4. ábra), amennyiben az irányított járműrendszer már valamilyen valós kivitelben rendelkezésre áll (pl. korábbi prototípusból vagy megelőző generációs termékből).



#### 4. ábra. Rapid-Control-Prototyping tesztelés

Itt az irányítási funkció kerül modell alapon kivitelezésre, amely automatikus kódgenerálás révén válik valós időben futtathatóvá egy gyors-prototípus hardveren.

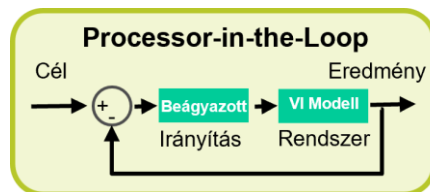
A rendszer műszaki architektúrájának (HW és SW) megtervezése után a rendszerszintű terv és annak moduljainak megtervezése során nyújt jelentős támogatást a Software-in-the-Loop (SIL) tesztelés (5. ábra), amelyben az irányított járműrendszer még egy modellel reprezentált, azonban az irányító funkció a korábbi modell állapotból automatikus kódgenerálás segítségével a beagyazott állapotnak megfelelő módon került implementálásra, azonban a végrehajtás még nem a célhardveren és általában nem valós időben történik.



5. ábra. Software-in-the-Loop tesztelés

Az irányító funkciók beagyazott célhardverre történő kódgenerálása (a V alsó pontja) után, a következő tesztelési lépések már mind valós idejű végrehajtással történnek, egyre csökkenő szimulált járműrendszer és környezeti modellek felhasználásával, ahogy haladunk felfelé a V jobb oldali ágán.

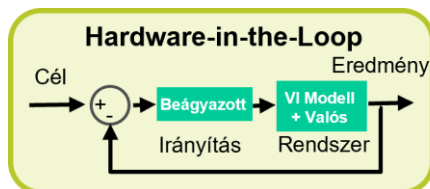
Ennek első lépése az ún. Processor-in-the-Loop (PIL) tesztelés (6. ábra), amelyet gyakran desktop Hardware-in-the-Loop (HIL) tesztnek is hívnak. Itt a fő eltérés a SIL-hez képest, hogy a szimulált járműrendszer modellje is valós idejű végrehajtást igényel, hogy szinkronban visszacsatolható legyen a valós időben futó beagyazott irányító rendszerhez.



6. ábra. Processor-in-the-Loop tesztelés

A következő vizsgálati szinten helyezkednek az ún. Hardware-in-the-Loop

(HIL) típusú tesztek (7. ábra) különböző járműrendszer absztrakciós szintekkel (pl. Elektro-pneumatikus fékrendszer esetén az 1. HIL szinten csak a közvetlen beavatkozók, mágnesszelepek stb. kerülnek hardveresen kivitelezésre, 2. szinten már a pneumatikus erőátvitel is, 3. szinten pedig a járműdinamikát kivéve a teljes fékrendszer minden komponense valós kivitelű).

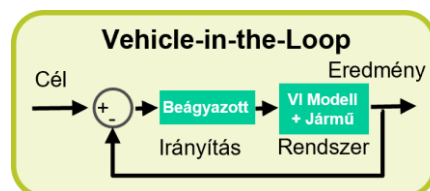


7. ábra. Hardware-in-the-Loop tesztelés

Ezek a tesztek már általában nagyméretű labor tesztpadokat igényelnek, azonban egyre precízebb és a valós járműves üzemet egyre inkább megközelítő eredményt adnak jármű használata nélkül.

A vizsgálatok utolsó fázisa a járműves tesztek végzése. Ennél a fázisnál a magas komplexitású vezetőasszisztens és automatizált járműirányítások számára új típusú és hatékony vizsgálati lépések kínálkoznak a modell-alapú megközelítésnél, mielőtt a közúti tesztekhez szükséges érettségi szint elérésre kerül.

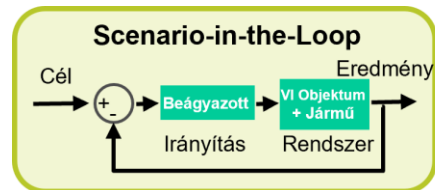
Ennek egyik típusa az ún. Vehicle-in-the-Loop (VIL) teszt (8. ábra), amely a vizsgálat alatt levő jármű környezetében előforduló járműveket és egyéb forgalmi partnereket szimulálja egy valós idejű forgalmi modell alapján, amely objektumok virtuálisan kerülnek beszúrásra a járműirányító rendszer bemenetére, mintha azokat a jármű környezetérzékelő szenzorai érzékelték volna [2-5].



8. ábra. Vehicle-in-the-Loop tesztelés

A másik új típusú teszt az ún. Scenario-in-the-Loop (SciL) teszt (9. ábra), amely a ZalaZONE tesztpálya számára került kifejlesztésre [6], hogy az automatizált járművek teljes érzékelő-döntéshozó-végrehajtó láncát, módosítás nélkül vizsgálható legyen. Itt a teszt a

tesztpályán fizikailag megvalósított forgalmi szereplőkkel zajlik, azonban ezen objektumok mindenkori állapotait egy valós idejű forgalmi szimuláció határozza meg, azaz egy valós forgalmi helyzetbe, scenárióba kerül bele a vizsgált jármű automatizált módon.



9. ábra. Scenario-in-the-Loop tesztelés

A cikk következő fejezetei konkrét példákat adnak a fenti modell-alapú tesztek gyakorlati alkalmazására vezetéstámogató- és automatizált járműirányító rendszerek fejlesztésénél. Ezen rendszerekben magas komplexitású, biztonságkritikus funkcionalitást kell megvalósítani, melynek tesztelése bonyolult és veszélyes. Ez utóbbi területen alkalmazható módszerekre adunk új és korszerű ajánlást.

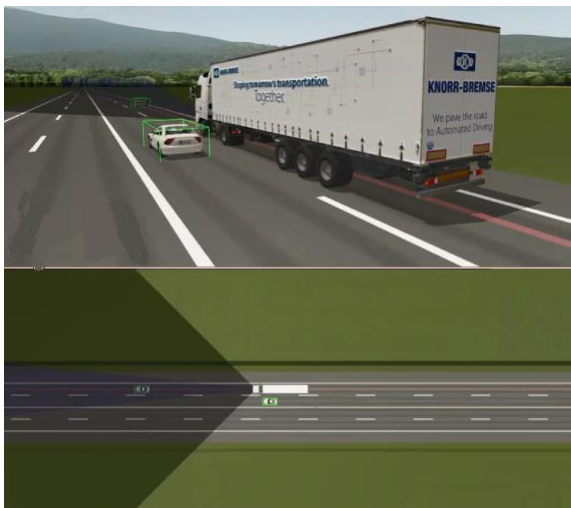
3. SOFTWARE- IN-THE-LOOP TESZTELÉS  
SIL tesztelés során a fő cél az irányítószoftver modultesztnél komplexebb környezetben való tesztelése, oly módon, hogy az még mindig gyors, biztonságos, pontosan megismételhető, valamint jól automatizálható legyen.

Autópálya-pilóta rendszer fejlesztése során SIL tesztelést alkalmaztunk az integrált rendszer tesztelésére (10. ábra). A rendszer kifejezetten komplex volt, amelynek az egyes almoduljai külön-külön is modultesztelésre kerültek, valamint köztes lépésként készült egy integrációs modell is, amely szintén átesett modulteszteken. Az itt készült integrációs modell került a későbbiekben mind SIL, mind pedig járműves tesztekre, így biztosítva, hogy a SIL teszteken megfelelt szoftver kerüljön tesztelésre a további tesztfázisokban.

Ennél a rendszernél a fő cél a döntéshozó logika, valamint a járműirányítási rendszer fejlesztése volt, a környezetérzékelést valamint a járműmodellt szimulációs szoftver biztosította, mindezt oly módon, hogy a bemeneti és kimeneti interfészek megegyezők legyenek a valós járművön található interfészekkel. A rendszer SIL tesztelése automatizált módon történt, előre definiált tesztkatalógus, valamint kritériumok alapján. Az automatizált rendszer felépítése erőforrásigényes, azonban ennek elkészülte után

nagymértékben gyorsítja a fejlesztési folyamatot. Egy új integrációs modell (és abból generált kód) elkészülte után a rendszer automatikusan lefuttatta a definiált teszteseteket, kiértékelte őket és végül egy tesztriportot bocsátott a fejlesztők rendelkezésére, amelyből egyből látható volt, ha valamely tesztkritériumban nem felelt meg a szoftver. A SIL tesztek során mentésre kerültek a mért jeleken kívül a szituációt bemutató videó fájlok, amelyek segítenek értelmezni a fejlesztő számára egy-egy komplexebb forgalmi szituációt, így hozzásegítve egy esetleges hibaforrás feltárásához. SIL tesztelés során lehetőségünk van a környezeti paraméterek modulációjára egy-egy teszteseten belül (pl. útfelület tapadási tényezője), amellyel jól vizsgálható a rendszer érzékenysége a külső hatásokra.

SIL tesztelésre a fejlesztés későbbi fázisában is érdemes lehet visszatérni, például amikor valós járműves tesztek során olyan szituációval találkozunk, amelyet a rendszer ismeretlen okok miatt nem a követelményeknek megfelelően kezel. Az autópálya-pilóta funkció tesztelése során az ilyen járműves tesztek mérései alapján generáltunk újabb teszteseteket, amelyekben aztán a már módosított szoftvert is újra lehet tesztelni, hogy lássuk a módosítás vajon megoldotta-e a feltárt problémát.



10. ábra. Autópálya pilóta rendszer Software-in-the-Loop teszt közben

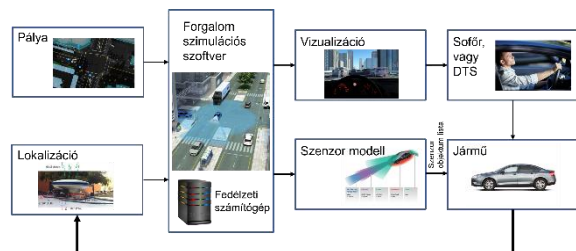
SIL tesztek alkalmaztunk például tolatástámogató asszisztens funkció tesztelésére is. Ennél a funkciónál kifejezetten fontos volt a megfelelő járműmodell megléte, hogy a megállás pontosságát vissza tudjuk ellenőrizni már a fejlesztés korai fázisában is. Ehhez egy

valós méréseken validált járműmodellt használtunk, amely össze lett integrálva a szimulációs környezettel.

Jól definiált SIL környezet esetén a fejlesztés alatt álló szoftver magasabb fokú érettséget tud elérni a következő, jóval költségesebb, tesztfázisba lépéskor, ezzel is csökkentve a szükséges tesztek és fejlesztési-tesztelési iterációk számát.

#### 4. VEHICLE-IN-THE-LOOP TESZTELÉS

Egy tipikus VIL tesztrendszer architektúrája látható a 11. ábrán. Ennek központi eleme egy a jármű fedélzetén, valós idejű számítógépen futó forgalomszimulációs modell, amelybe a tesztelendő jármű a pillanatnyi mért GNSS koordinátája alapján kerül beszúrásra. A jármű körül szimulált objektumok pedig megfelelő szenzor modellek felhasználásával a jármű környezetérzékelőit megkerülve kerülnek beszúrásra a járműirányító rendszer bemenetére.



11. ábra. Vehicle-in-the-Loop tesztrendszer architektúrája

A VIL tesztek egy sarkalatos pontja, hogy hozzáférést és módosítást igényel a járműben a tesztek végrehajtásához, amely által a környezetérzékelő rendszert megkerüli, azaz ez a része a járműnek nem kerül tesztelésre és értékelésre. Azonban a virtuális objektumok beszúrása jelentősen csökkenti a potenciális (ütközés)veszélyt a tesztek során és alacsony költséggel, hatékonyan lehetséges változatos forgalmi helyzetek hatását vizsgálni.

Az autópálya-pilóta rendszer fejlesztése során a járműintegrációt követően alkalmaztunk VIL tesztelést. A VIL tesztek során olyan szituációkban vizsgáltuk a rendszert, amelyekben fennállt a potenciális ütközés veszélye. Ilyenek voltak például:

- nagysebességről álló (vagy alacsony sebességű) objektumra való fékezések és megállások (különös tekintettel azokra az esetekre, amikor az objektum a jármű féktávolsága határán tűnik fel);

- autópályán gyakran előforduló elévágási szituációk;
- vagy a dinamikus előzési manőverek.

A tesztek során virtuális objektumokat injektáltunk a környezetérzékelő rendszer és döntéshozó funkció közötti interfészre, amely virtuális objektumok különböző manővereket hajtottak végre a tesztelt jármű körül. A definiált rendszer képes volt egy vagy több virtuális objektum autópályás környezetben előforduló tipikus manővereinek végrehajtására (gyorsítás, lassítás, sávkövetés, sávváltás). A virtuális objektumok mozgása definiálható relatív a tesztjárműhöz képest vagy az abszolút koordináták révén is.

Ez a tesztfázis egy előnyös és biztonságos módja, hogy teszteljük az járműirányítófunkció interakcióját valós járművel és járművezetővel együtt, olyan szituációkban is, amikor ez valós forgalmi partnerrel magas kockázatú lenne. Az eljárás másik előnye volt a projektünkben, amelyben a környezetérzékelő rendszer fejlesztése párhuzamosan zajlott az autonóm funkció fejlesztésével, hogy párhuzamosan voltak elvégezhetőek már járműves tesztek az irányító funkción, mialatt a környezetérzékelő rendszer még fejlesztés alatt állt.

## 5. SCENARIO-IN-THE-LOOP TESZTELÉS

A szcenárió alapú automatizált tesztrendszer architektúrája a 12. ábrán látható.



12. ábra. Scenario-in-the-Loop tesztrendszer architektúrája

A VIL-lel szemben a SciL tesztek nem igényelnek a járműben módosítást, így a jármű minden rendszere a közúti forgalmi viszonyoknak megfelelő módon üzemel a tesztek során. Itt azonban a vizsgált jármű körül elhelyezkedő forgalmi objektumok egy külső szerveren futó forgalmi szimulációs modell állapotának megfelelő pozíciót és sebességet vesznek fel, amelyet ún. automatizált dummy tesztplatformok vagy robotizált valós járművek valósítanak meg (13. ábra). A forgalmi

szimulációs modellbe a tesztjármű a pillanatnyi mért koordinátaival kerül beszurásra, hogy a forgalmi helyzet virtuálisan is előálljon (digital-twin), amelyben a megvalósított forgalmi interakciók a teszt során valós időben kivitelezésre kerülnek.



13. ábra. Nagyteherbírású tesztplatform és borítása [7]

Sávváltóasszisztens funkció testelése során különböző SciL tesztek alkalmaztunk, ahol a vizsgált járművön kívüli forgalmi szereplők automatizált objektumok voltak, amelyek egy előre meghatározott pályát jártak be. Ezen tesztípus jelentős előnye a tesztesetek kiváló reprodukálhatósága (a dummy objektum minden teszt során azonos sebességprofilal, ugyanazt a pályát járja be) valamint a nagyobb biztonság, hiszen az objektum, amivel potenciálisan ütközés fordulhat elő a teszt során egy könnyűszerkezetű borítással rendelkező, azonban nagy teherbíró képességű platform (14. ábra), így egy esetleges ütközés során keletkező kár minimálisra redukálható.



14. ábra. Sávváltó asszisztens funkció SciL tesztje nagyteherbírású tesztplatformmal [7]

Amennyiben a kifejlesztett funkció elért egy szükséges érettségi állapotot úgy a dummy tesztplatform lecserélhető vezetőrobottal ellátott valódi tesztjárművekre (15. ábra), amelyek minden jellemzőjükben megegyeznek a közúti

járművekkel (pl. radarkeresztmetszet), azonban a tesztesetek végrehajtása hasonlóan precíz és jól reprodukálható a dummy tesztplatformmal megvalósítottéhoz hasonlóan (16. ábra).



15. ábra. Vezetőrobottal ellátott forgalmi partner



16. ábra. Sáv váltó asszisztens funkció SciL teszthez robotizált valós járművekkel

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A modell-alapú fejlesztési folyamat a klasszikus járműipari V-modell alapú fejlesztési folyamatot egészíti ki oly módon, hogy abban nagyobb szerepet kap a korai fázisban történő tesztelés, amellyel a vevői követelményeknek való megfelelésség nagyobb valószínűséggel biztosítható. A folyamat során egyre komplexebb környezetekben teszteljük a funkcióinkat kezdve a Model-in-the-Loop teszteltől egészen a Scenario-in-the-Loop tesztrendszerig. A folyamat minél több elemének alkalmazásával már a fejlesztés korai fázisában jelentős rendszerérettség érhető el szimulációs modellek kiterjedt alkalmazásával, ezzel csökkentve a költséges járműves tesztek számát.

Ezáltal az tesztelésre szükséges összes idő is csökkenthető, valamint biztonságosabbá válik egy új vezetéstámogató vagy autonóm funkció tesztelése. Az eljárás előnyeit gyakorlati példákön szemléltettük, ahol különböző tesztelési szintek alkalmazását mutattuk be egy-egy vezetéstámogató- vagy autonóm funkción.

## 7. IRODALOM

[1] The V-Model. <https://en.wikipedia.org/wiki/V-Model> (Felkeresve: 2022.09.13)

[2] Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern durch rechts abbiegende Lkw, BASt-Bericht F 54, <http://www.bast.de/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-f/2007-2000/f54.html> (Felkeresve: 2022.09.13)

[3] Bock T. (2008) Vehicle-in-the-Loop – Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme. Audi Dissertationsreihe, Vol. 10, Vieweg, Göttingen

[4] von Neumann-Cosel K., Dupuis M., Weiss C. (2009) Virtual test drive provision of a consistent toolset for [D,H,S,V]-in-the-Loop. In: Proceedings of the driving simulation conference. DSC, Monaco

[5] Berg G. (2014) Das Vehicle in the Loop – Ein Werkzeug für die Entwicklung und Evaluation von sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München

[6] Németh H., Hány A., Szalay Zs., Tihanyi V., Tóth B. (2019) Proving Ground Test Scenarios in Mixed Virtual and Real Environment for Highly Automated Driving, Mobilität in Zeiten der Veränderung: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte, Springer Fachmedien Wiesbaden (2019) 579 p. pp. 199-210. Paper: Chapter 15, 12 p.

[7] ADAS targets. <https://www.abdynamics.com/> (Felkeresve: 2022.09.13)