

Wirksame Erkennung von Gefahrenstellen und angepasste Verhalten von (Autonomen) Fahrzeugen bei Starkregen Ereignissen **WETSAFE**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2023
VIF 2023

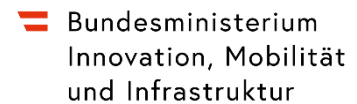
12 2025



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Austro Tower
Schnirchgasse 17
1030 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
Leonhardstrasse 59
8010 Graz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien



Wirksame Erkennung von Gefahrenstellen und angepasste Verhalten von (Autonomen) Fahrzeugen bei Starkregen Ereignissen **WETSAFE**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2023
VIF 2023

Autorinnen und Autoren:

Werner PRETSCHER (JR)
Markus TAUCHHAMMER (JR)
Andreas EBERWEIN (fiC)
Martin SCHUSTER (fiC)
Karl REHRL (SRFG)
Alexander KANN (GS)

Auftraggeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

KURZFASSUNG

Starkregenereignisse stellen infolge des Klimawandels eine zunehmende Herausforderung für die Verkehrssicherheit und Verfügbarkeit hochrangiger Straßeninfrastruktur dar. Insbesondere auf Autobahnen mit hohen Fahrgeschwindigkeiten können lokale Wasseransammlungen, Aquaplaning sowie unerwartete Fließwege zu sicherheitsrelevanten Situationen führen. Bestehende Ansätze berücksichtigen häufig primär den Niederschlag auf der Fahrbahn und vernachlässigen Wechselwirkungen mit dem angrenzenden Gelände, wodurch lokal begrenzte Gefahrenstellen nicht ausreichend erkannt werden.

Das Projekt **WETSAFE** verfolgt das Ziel, eine wirksame und belastbare Methodik zur Erkennung und Bewertung von Gefahrenstellen bei Starkregenereignissen sowie zur Unterstützung eines angepassten Verhaltens von Verkehrsteilnehmenden und (teil-) automatisierten Fahrzeugen zu entwickeln. Der Fokus liegt auf Autobahninfrastruktur, die Methodik ist jedoch grundsätzlich übertragbar. Kern der Methodik ist ein hochau aufgelöster digitaler Zwilling der betrachteten Infrastruktur und ihres Umfelds, erstellt auf Basis von Mobile Laser Scanning, Airborne Laser Scanning, Satellitendaten und Bestandsinformationen. Dieser dient als gemeinsame Grundlage für gekoppelte hydrologisch-hydraulische Simulationen, die sowohl die Beregnung der Fahrbahn als auch Zu- und Abflüsse aus dem angrenzenden Gelände berücksichtigen. In Referenz- und Szenarioberechnungen konnten Wasserfilmbildung, Oberflächenabfluss und lokale Überflutungen mit hoher räumlicher Auflösung analysiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass kritische Gefahrenstellen maßgeblich durch das Zusammenspiel von Niederschlagsintensität, Fahrbahngeometrie, Entwässerungssystemen sowie Zu- und Abflüssen im Umfeld geprägt sind und nicht allein durch den Niederschlag auf der Fahrbahn entstehen. Die Methodik erlaubt eine sehr feinräumige Analyse; für die weitere Nutzung wurden die Ergebnisse jedoch bewusst zu abschnittsbezogenen Risikozonen aggregiert. Ergänzend wurde gezeigt, dass sich die Simulationsergebnisse grundsätzlich in bestehende Informations- und Kommunikationsstandards wie DATEX II und C-ITS integrieren lassen. Insgesamt zeigt WETSAFE, dass die Kombination aus digitalem Zwilling und szenariobasierter hydrologisch-hydraulischer Simulation eine fundierte Grundlage zur Identifikation und Bewertung von Starkregen-Gefahrenstellen auf Autobahnen darstellt und einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Resilienz der Straßeninfrastruktur leistet.

ABSTRACT

Heavy rainfall events are increasingly challenging the safety and availability of high-level road infrastructure due to climate change. On motorways with high driving speeds, local water accumulation, aquaplaning and unexpected flow paths can lead to safety-critical situations. Existing approaches often focus primarily on rainfall on the carriageway itself and neglect interactions with the surrounding terrain, resulting in insufficient identification of locally confined hazard locations.

The project **WETSAFE** aims to develop a robust and effective methodology for detecting and assessing hazard locations during heavy rainfall events and for supporting adapted behaviour of road users and (semi-)automated vehicles. The primary focus is on motorway infrastructure, while the methodology is generally transferable.

At the core of the approach is a high-resolution digital twin of the investigated infrastructure and its surroundings, created using Mobile Laser Scanning, Airborne Laser Scanning, satellite data and inventory information. This digital twin serves as a common basis for coupled hydrological-hydraulic simulations considering both rainfall on the carriageway and inflows and outflows from adjacent terrain. Reference and scenario-based simulations enabled detailed analyses of water film formation, surface runoff and local flooding.

The results demonstrate that critical hazard locations are mainly determined by the interaction of rainfall intensity, road geometry, drainage systems and inflows and outflows from the surrounding area, rather than by rainfall on the carriageway alone. While the methodology allows very fine-grained analyses, the results were aggregated into section-based risk zones for further application. In addition, the study showed that simulation results can in principle be integrated into existing information and communication standards such as DATEX II and C-ITS.

Overall, WETSAFE demonstrates that the combination of a digital twin and scenario-based hydrological-hydraulic simulation provides a sound basis for identifying and assessing heavy rainfall hazard locations on motorways and contributes to improving traffic safety and infrastructure resilience.

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

Konsortialführung

Partnerrolle: wissenschaftl. Partner



JOANNEUM RESEARCH und im speziellen das Institut für digitale Technologien DIGITAL hat eine lange Historie in der Ausführung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Bereich digitaler Zwillinge, Mobile Mapping, Geodaten-Prozessierung und der 3D-Auswertung von Geoinformation, wie beispielsweise die Erstellung von Referenzkarten (UHDmaps) für das Testen von automatisierten Fahrzeugen. Diese Kompetenzen haben sich aus einer 30-jährigen Expertise der Forschungsgruppe "Fernerkundung und Geoinformation" entwickelt und sind dabei von höchster Bedeutung für die Erstellung, Auswertung, Anreicherung und Visualisierung von räumlichen digitalen Zwillingen. Auf Grund der hohen Relevanz von digitalen Zwillingen im Kontext der Erforschung von Lösungen für gesellschaftliche Problemstellungen im Bereich Mobilitäts- und Energiewende wurde von der JOANNEUM RESEARCH 2023 das DIGITAL TWIN LAB gegründet. Die 3D-Vermessung von realer Umgebung, die Ableitung und Visualisierung von simulationsfähigen räumlichen digitalen Zwillingen als auch die KI-basierte automatisierte Auswertung und Ableitung relevanter Informationen aus Vermessungsdaten, als auch die Erforschung praktischer Anwendungsgebiete gehören zu den Hauptaufgaben des DIGITAL TWIN LABS in diesem Projekt.

flussbau iC GesmbH

Konsortialpartner

Partnerrolle: Unternehmenspartner



Die flussbau iC hat bereits mehr als 20 Jahre Erfahrung im Bereich Wasserbau und hydraulischer Modellierung und haben in diesen Jahren eine große Expertise in der Bearbeitung komplexer wasserbaulicher Fragestellungen aufgebaut. Unser Leistungsangebot deckt den gesamten Bereich Wasserbau und wasserwirtschaftliche Planung ab. Die Planungen umfassen jegliche Art von wasserrechtlichen Einreichprojekte,

Generelle Planungen im Hochwasserschutz, Vorstudien, Planungen zu Hangwasserproblematiken, etc. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der hydraulischen Modellierung von Hochwasserereignissen für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen und die Erstellung von Gefahrenzonenplänen. Zusätzlich ist unser Büro auf die Bauaufsicht von Baustellen im Wasserbau, sowie auf Vermessungsleistungen (terrestrische Vermessung und Flussvermessung mittels Echolot) spezialisiert.

Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H.

Konsortialpartner

Partnerrolle: wissenschaftl. Partner



Salzburg Research und insbesondere die Forschungsgruppe Mobility and Transport Analytics bringt als anwendungsorientiertes Forschungsinstitut mit langjähriger Erfahrung im Bereich von Verkehr und Mobilität umfangreiches Know-how im Bereich der Generierung und Kommunikation von Verkehrsinformationen ein. Im Projekt WETSAFE übernimmt Salzburg Research folgende Aufgaben: (i) Generierung von Verkehrsinformationen aus den Prognosemodellen bzw. Simulationsergebnissen zu den Starkregenereignissen, (ii) Kommunikation der Verkehrsinformationen an die Verkehrsteilnehmer:innen bzw. (teil-) automatisierte Fahrzeuge, (iii) Ableitung von Maßnahmen zur Anpassung des Fahrverhaltens.

GeoSphere Austria – Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie

Konsortialpartner

Partnerrolle: wissenschaftl. Partner



Die GeoSphere Austria beruht auf dem Zusammenschluss der 1851 gegründeten Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), dem nationalen Wetter- und Erdbebendienst und der 1849 gegründeten Geologischen Bundesanstalt (GBA), als geologischem Dienst. Laut GeoSphere Austria-Gesetz (Bundesgesetzblatt 1, Nr.60/2022) vom 14. April 2022 ist die GeoSphere Austria als nationaler geologischer, geophysikalischer, klimatologischer und meteorologischer Dienst für die Beratung der

Bundesregierung sowie die Warnung der Öffentlichkeit in geologischen, geophysikalischen, klimatologischen und meteorologischen Angelegenheiten zuständig. Sie leistet einen Beitrag zur Steigerung der gesamtstaatlichen Resilienz und Krisenfestigkeit, zur Verbesserung der Einsatzbereitschaft von Behörden und Einsatzorganisationen im Katastrophenfall, zur Sicherung der geologischen, geophysikalischen, klimatologischen und meteorologischen Lebens- und Wirtschaftsgrundlagen Österreichs, zum vorsorgebasierten Umgang mit dem Klimawandel und dessen Folgen sowie zur nachhaltigen Entwicklung Österreichs. Im Projekt WETSAFE übernimmt die GeoSphere Austria folgende Aufgaben: (i) Aufbereitung und Bereitstellung von Niederschlagsanalysen und -prognosen, (ii) Unterstützung bei der Interpretation und Verwendung der meteorologischen Daten, (iii) Einbringung von Expertise zu aktueller und zukünftiger Wetter- bzw. Klimasituation in Österreich.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	12
1.1. Untersuchungsgebiet.....	13
1.1. Untersuchungszeitraum	14
2. ERSTELLUNG DES DIGITALEN ZWILLINGS	18
2.1. Datenakquise.....	18
2.1.1. Planung	18
2.1.2. Durchführung.....	23
2.2. Datenauswertung	28
2.3. Vorverarbeitung / Preprocessing.....	30
2.4. Weiterverarbeitung der fusionierten Punktwolke	32
2.4.1. Digitales Geländemodell - DGM.....	35
2.4.2. Orthofoto	35
2.4.3. OpenDRIVE.....	36
2.5. Handlungsempfehlungen für die Erstellung digitaler Umgebungsmodelle für hydraulische Simulationen.....	37
2.5.1. Datenerhebung.....	37
2.5.2. Handlungsempfehlung für ASFiNAG	38
3. SIMULATIONSERSTELLUNG.....	39
3.1. Datenanforderungen virtuelles Umgebungsmodell.....	39
3.1.1. Auflösungsstufen	40
3.1.2. Datenlieferung Geländeaufnahme	41
3.1.3. Datenprüfung für Modellerstellung	43
3.2. Grundlagendaten für Modellaufbau.....	45
3.2.1. Einbauten	45
3.2.2. Abgrenzung des Einzugsgebiets.....	47
3.2.3. Niederschlagsdaten	48
3.2.4. Bemessungsregen nach EHYD	50

3.3.	Methodik.....	52
3.3.1.	Allgemeines.....	52
3.3.2.	Vorbereitung Modellaufbau.....	55
3.4.	Modellaufbau.....	56
3.4.1.	Geodatenaufbereitung in QGIS.....	56
3.4.2.	Modellaufbau mit HydroAS MapWorks.....	56
3.4.3.	Netzprüfung und -anpassung in SMS.....	56
3.4.4.	Randbedingungen / Parameter.....	57
3.5.	Optimierung und Validierung des Simulationsmodells.....	57
4.	STARKREGENSIMULATION.....	59
4.1.	Simulationsstufen.....	59
	Simulationsstufe 1 – Berechnung Vorland (Genauigkeit 1,00 m).....	59
	Simulationsstufe 2 - Vorlandabfluss auf Autobahn (Genauigkeit 0,25 m).....	60
	Simulationsstufe 3 - Berechnung Autobahn (Genauigkeit 0,25 m).....	62
	Simulationsstufe 4 - Kombination Berechnung Autobahn inkl. Vorlandabfluss (Genauigkeit 0,25 m).....	64
4.2.	Ergebnisse.....	66
4.2.1.	Gefährdung durch Vorlandzufluss.....	66
4.2.2.	Maßnahmenempfehlung.....	67
4.2.3.	Gefährdung durch Starkregen Autobahn.....	68
4.2.4.	Maßnahmenempfehlung.....	69
4.2.5.	Risikozonen Starkregen.....	69
4.2.6.	Learnings.....	74
4.3.	Handlungsempfehlungen & Erkenntnisse für weitere Autobahnabschnitte.....	75
5.	INFORMATIONSGENERIERUNG.....	77
5.1.	Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen.....	87
5.2.	Räumliche Modellierung der Warnmeldungen.....	89
5.3.	Modellierung auf Basis C-ITS.....	97

5.3.1. Modellierung auf Basis DENM	99
5.4. Modellierung auf Basis des IVI-Services	111
5.5. Handlungsempfehlung & Diskussion	117
6. ZUSAMMENFASSUNG DER PROJEKTERGEBNISSE	118
7. HANDLUNGSEMPFEHLUNG.....	120
7.1. Schaffung der Rahmenbedingungen	120
7.2. Skalierung der Projektergebnisse	121
ANHANG I: TABELLEN- UND FORMELVERZEICHNIS	123
ANHANG II: ABBILDUNGSVERZEICHNIS	125
ANHANG III: LITERATUR-/ & QUELLENVERZEICHNIS	129

1. EINLEITUNG

Das Forschungsprojekt WETSAFE verfolgte das Ziel, die Auswirkungen lokaler Starkregenereignisse auf die Verkehrssicherheit zu untersuchen und neue Methoden zur frühzeitigen Identifikation und Kommunikation von Überflutungs- und Aquaplaninggefahren zu entwickeln. Ausgangspunkt war die zunehmende Relevanz klimabedingter Extremereignisse für hochrangige Straßeninfrastrukturen und der Bedarf einer verbesserten Entscheidungsgrundlage für Infrastrukturbetreiber, Einsatzorganisationen und automatisierte Fahrzeuge.

Im Projekt wurde zunächst ein hochaufgelöster digitaler Zwilling eines ausgewählten Autobahnabschnitts erstellt. Dieser basiert auf einem kombinierten Datensatz aus Mobile Laser Scanning (MLS), Airborne Laser Scanning (ALS), Satellitendaten sowie ergänzenden Bestandsinformationen. Das so erzeugte 3D-Umgebungsmodell bildet die Geometrie, Entwässerungsstrukturen und die umliegenden Geländeformen mit einer Genauigkeit ab, die eine modellbasierte Risikobewertung erlaubt. Die Ableitung der Fahrbahngeometrien in Form von UHDMaps ermöglicht die spurgenaue Verortung und bietet ebenfalls die Möglichkeit weitere Simulationsmodelle (wie z.B. Verkehr) in Zukunft zu integrieren.

Die hydrologisch-hydraulischen Simulationen erlaubten die detaillierte Abbildung von Wasserfilmbildung, Oberflächenabfluss und lokalen Überflutungen in verschiedenen Starkregen-Referenzszenarien. Die Modelle lieferten sowohl die räumliche Ausdehnung als auch die Intensität möglicher Gefahrenstellen und ermöglichten eine objektive Ableitung von Bereichen mit erhöhtem Aquaplaningrisiko. Ergänzend wurden hochaufgelöste meteorologische Analysen, Nowcasts und Prognosedaten (INCA, AROME, Ensembleläufe) genutzt, um typische Starkregensituationen und deren zeitlich-räumliche Variabilität abzuschätzen sowie die Simulationen auf realistische meteorologische Rahmenbedingungen zu beziehen. Die Referenzszenarien werden dazu genutzt, um auftretende Regenereignisse nach bestimmten Schwellenwerten zu kontrollieren und daraufhin die geeigneten Warnmeldungen zu generieren.

Aufbauend auf den Ergebnissen der digitalen Modellierung und der hydraulischen Simulation wurden Mechanismen zur Informationsgenerierung und Verhaltensanpassung entwickelt. Dazu gehörte die Erstellung von beispielhaften Warnmeldungen in DATEX-II- und C-ITS/DENM-Formaten, die sowohl für Fahrer:innen als auch für assistierte oder automatisierte Fahrzeuge nutzbar sind. Bei der Modellierung zeigte sich, dass bestehende Nachrichtentypen zwar grundsätzlich geeignet sind, jedoch für Wasserfilm- und

Kleinüberflutungsszenarien zusätzliche oder bislang ungenutzte Subcodes und Parameter erforderlich sind. Damit liefert das Projekt Impulse für die Weiterentwicklung entsprechender Kommunikationsstandards.

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Kombination aus digitalem Zwilling, meteorologischer Analyse und hydraulischer Simulation eine fundierte Grundlage für zukünftige Frühwarn- und Risikomanagementsysteme bildet. Sie ermöglicht Infrastrukturbetreibern eine objektive Identifikation sicherheitsrelevanter Abschnitte, unterstützt die Integration in operationelle Abläufe und erhöht die Resilienz der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimabedingten Gefahren. Die entwickelten Methoden sind skalierbar und können auf weitere Netzabschnitte oder sogar das gesamte Auto-/Schnellstraßennetz übertragen werden. Damit bildet WETSAFE eine wichtige Grundlage für weiterführende Anwendungen im Bereich der Straßeninfrastruktur, Verkehrssteuerung und automatisierten Mobilität.

1.1. Untersuchungsgebiet

Für das Projekt WETSAFE wurde in Abstimmung mit der ASFINAG und den Projektpartnern ein geeignetes Untersuchungsgebiet ausgewählt. Bei der Auswahl war es wichtig, einen Autobahnabschnitt auszuwählen, wo es aktuell schon zu hohen Oberflächenwassermengen infolge von Regen bzw. Starkregen kommt. Die Wahl fiel dabei auf einen Abschnitt der A2-Südbahn zwischen dem Talübergang Waltersdorf und der Anschlussstelle Sebersdorf-Bad Waltersdorf in der Steiermark. Da dieser Abschnitt teilweise tief ins Gelände eingeschnitten ist und sich im Westen eine große Geländeerhebung befindet, wird durch das umliegende Einzugsgebiet zusätzliches Wasser auf die Fahrbahn der A2 eingebracht.

Das Einzugsgebiet wurde in einem Bereich von 80 m Breite rechts der Richtungsfahrbahn Wien und links der Richtungsfahrbahn Graz mittels 3D-Vermessung erfasst. Dieser Bereich ist in der folgenden Abbildung rot markiert.

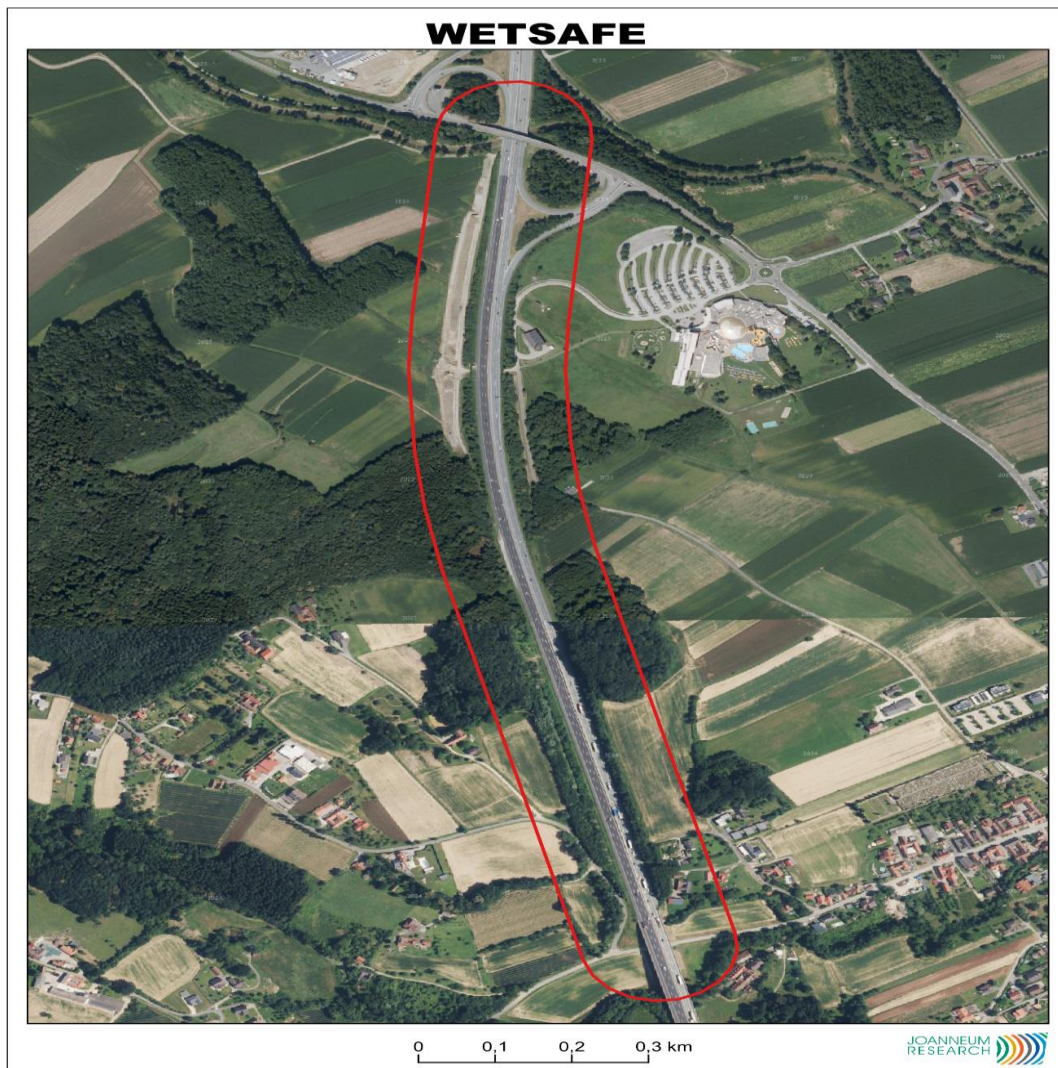


Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets auf der A2-Südautobahn. Rot markiert ist der mittels 3D-Vermessung erfasste Teil der Autobahn und das umliegende Einzugsgebiet.

1.1. Untersuchungszeitraum

Für das Untersuchungsgebiet wurden einerseits bekannte Ereignisse, als auch der Bemessungsniederschlag 2020 gemäß eHYD (Quelle: <https://ehyd.gv.at/>) herangezogen. Bei letzterem wurden vier Dauerstufen ausgewählt.

Die Auswahl des Referenzereignisses erfolge ebenfalls in Abstimmung mit der ASFiNAG. Dabei sollten historische Ereignisse, an denen Wasser auf der Fahrbahn sichtbar bzw. die Abwehranlagen wesentlich überfordert waren, identifiziert werden. Auf Basis von Erfahrungswerten wurden rasch mehrere potenziell interessante Ereignisse erwähnt. Im

Nachgang an den Workshop wurden die Wetterdaten dieser Zeiträume gesichtet, die relevanten Zeiträume identifiziert und auf Eignung zur Verwendung im Projekt geprüft. Im Folgenden wird der Fall vom 1.-7.6.2023 näher betrachtet. Der zweite genannte Fall, in der Nacht vom 11.-12.6.2022, konnte nicht rekonstruiert werden, da in diesem Zeitraum weder an nahegelegenen Stationen noch das Wetterradar einen Niederschlag gezeigt hat.

Fall: 1. - 7.6.2023

Gemäß ASFiNAG gab es zumindest 2 Ereignisse zwischen 1. und 7. Juni 2023, wobei leider keine weiteren Aufzeichnungen vorhanden waren.

Ein erster Überblick über die großräumigen Niederschlagsverhältnisse in diesem Zeitraum anhand der aggregierten INCA-Analysen ergibt ein plausibles Bild mit signifikantem Niederschlag entlang der Alpensüdseite (Abb. 3). Die größten Mengen wurden mit über 300 mm in Slowenien bzw. Norditalien registriert, allerdings wurden auch in Österreich verbreitet über 100 mm verzeichnet.

Ein Zoom in die Testregion Bad Waltersdorf zeigt die räumliche Variabilität der Niederschlagsmengen auf der 1km x 1km Skala (Abb. 4), mit Mengen zwischen 70 und 110 mm. Zu beachten ist, dass es auch innerhalb einer Gitterpunktzone gerade bei konvektivem, sommerlichem Niederschlag zu erheblicher Varianz kommt. Diese subskaligen Unsicherheiten werden jedoch vom System nicht erkannt, da nur ein Mittelwert innerhalb der 1km x 1km Gitterbox angegeben werden kann.

Die Betrachtung der Zeitserie des aggregierten INCA Niederschlags am, der ASt Sebersdorf-Bad Waltersdorf nächstgelegenen, INCA Gitterbox bestätigt sich die Beobachtung des Auftraggebers, dass es innerhalb dieses einwöchigen Zeitraums 2-3 Phasen mit hohem Niederschlagsmengen gab (Abb. 5). Der Hauptteil mit etwa 50% des Gesamtniederschlags fiel in der zweiten Tageshälfte des 4.6.2023, der restliche Niederschlag teilt sich auf den 5. und 6. tagsüber auf.

Fall: 11. - 12.6.2022

Im vom Auftraggeber genannten Zeitraum war kein relevanter Niederschlag in ganz Österreich zu verzeichnen (Ausnahme Vorarlberg), siehe Abb. 6. Diese Periode wurde daher nicht weiter untersucht.

Dem Projektpartner iC Flussbau wurden die Daten der Zeitserie für die Periode 1.-7.6.2023 zur Verfügung gestellt.

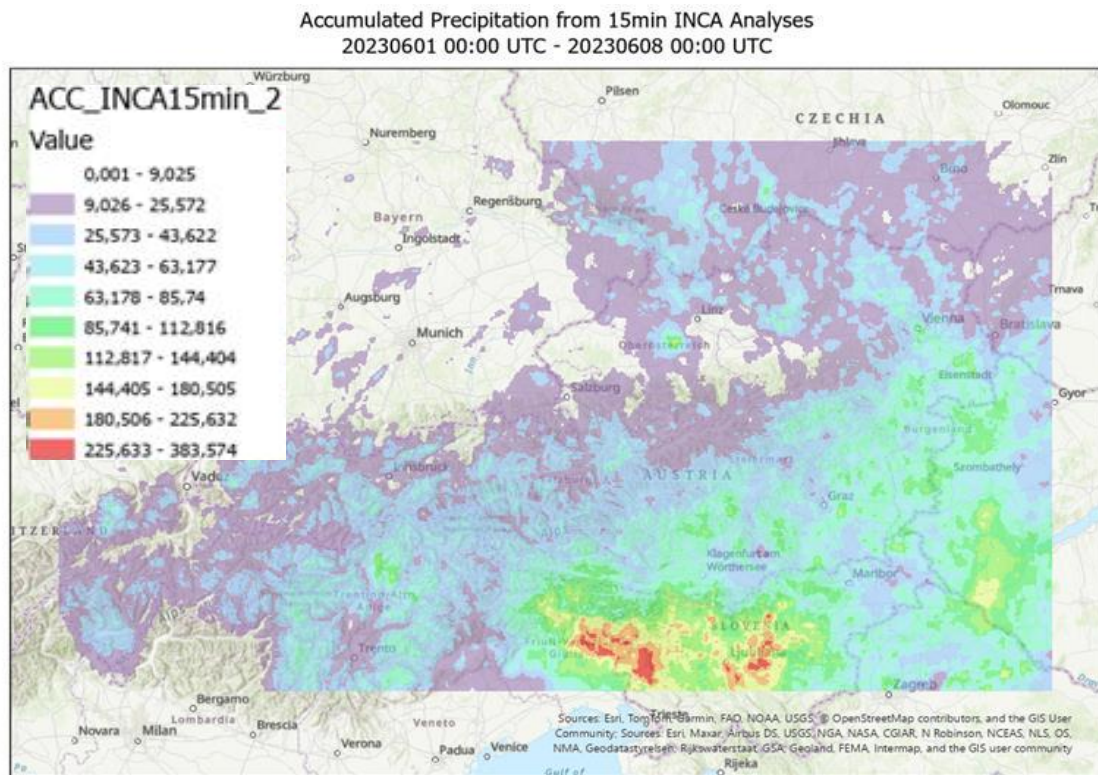


Abbildung 2: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 1.7.2023, 00 UTC bis 8.7.2023, 00 UTC.

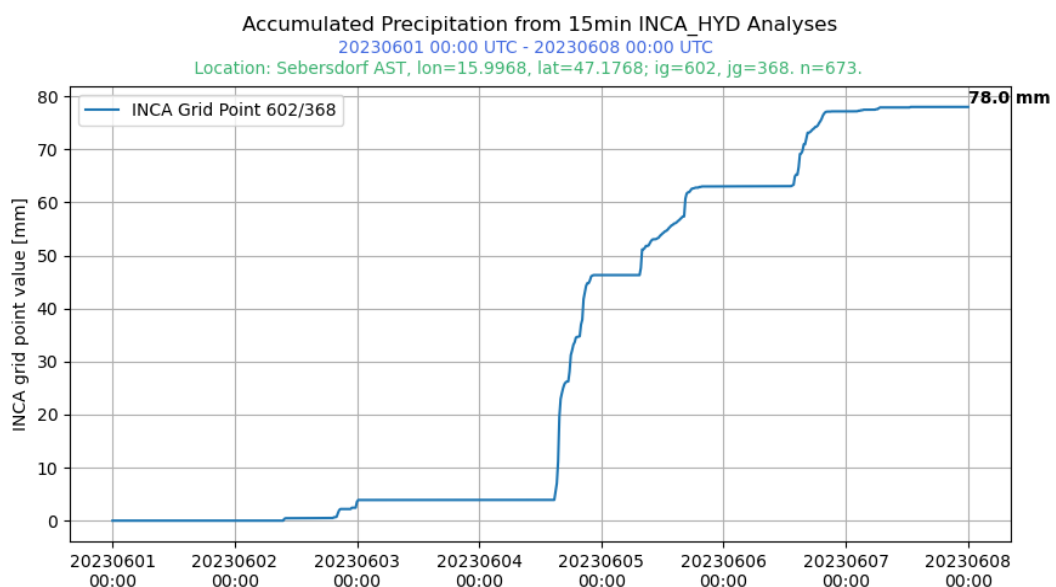


Abbildung 3: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 1.7.2023, 00 UTC bis 8.7.2023, 00 UTC. Zoom in die Testregion Bad Waltersdorf

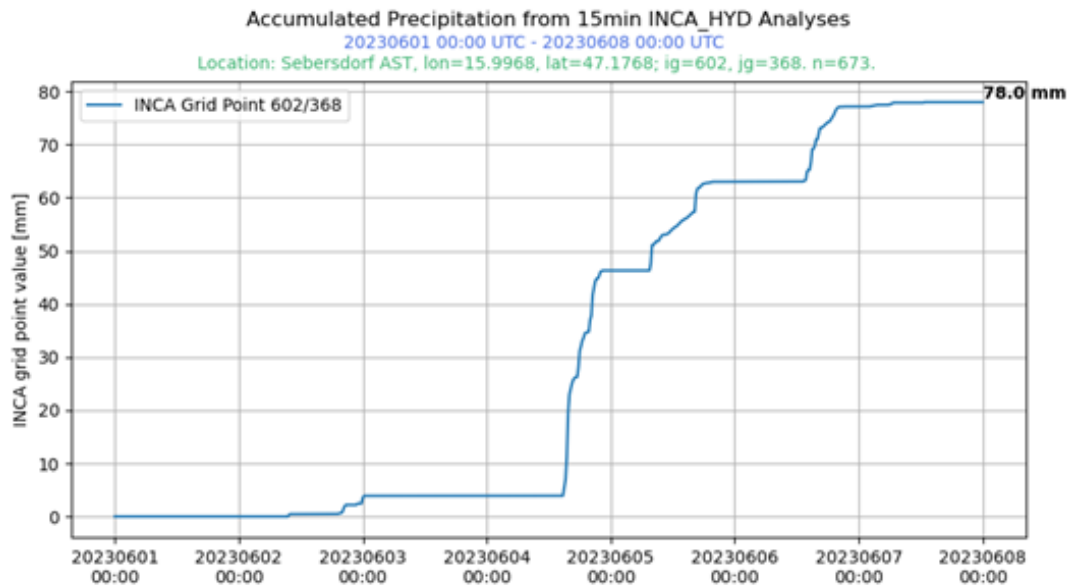


Abbildung 4: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 11.6.22, 00 UTC-13.6.23, 00 UTC.

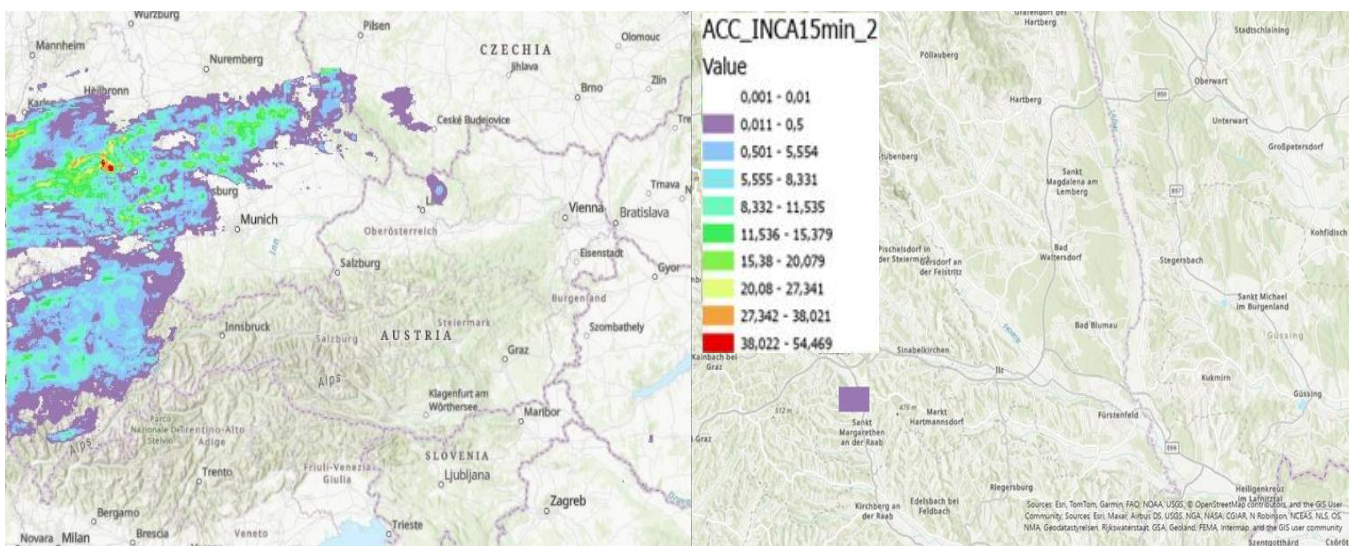


Abbildung 5: Zeitserie des aggregierten Niederschlags am nächstgelegenen INCA Gitterpunkt.

2. ERSTELLUNG DES DIGITALEN ZWILLINGS

2.1. Datenakquise

Für die Datenakquise wurde ein kombinierter Ansatz mit zwei unterschiedlichen 3D-Laserscanning-Systemen gewählt, um deren Stärken zu profitieren. Dies sind das Mobile Mapping System VMX-2HA, kurz MLS, der österreichischen Firma RiegI und der VUX-1LR²² montiert auf einem RiCOPTER, kurz ALS, ebenfalls von der Firma RiegI. Mit dieser Kombination von Messsystemen wird eine komplette Abdeckung des Untersuchungsgebiets gewährleistet. Beide Richtungsfahrbahnen der A2 werden mit dem MLS und das Einzugsgebiet neben der A2 mit dem ALS erfasst. Dadurch werden Datenlücken hintangehalten, beispielsweise hinter Lärmschutzwänden, wenn ausschließlich das MLS verwendet worden wäre.

2.1.1. Planung

Um die höchstmögliche Datenqualität als auch Effizienz bei der Durchführung der Datenakquise zu gewährleisten, ist eine detaillierte Planung im Vorfeld unerlässlich. Dabei muss nicht nur das Untersuchungsgebiet, sondern auch die eingesetzten Messsysteme berücksichtigt werden.

Für die Aufnahme der Richtungsfahrbahnen mittels MLS ist es essenziell, den passenden Aufnahmezeitpunkt zu wählen, um so wenig wie möglich Verkehr auf dieser Hauptverbindung zu haben. Obwohl das MLS aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit, 70 km/h bei der in diesem Projekt gewählten Konfiguration, während der Messfahrt den Verkehr nur minimal beeinflusst, ist ein Sicherungsfahrzeug hinter dem MLS unerlässlich. Einerseits erhöht dies die Sicherheit für die Insassen des Messfahrzeugs, als auch die Sichtbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer:innen. Des Weiteren erhöht dies die Datenqualität, da zumindest für den Großteil der Aufnahme zu dicht auffahrende Fahrzeuge auf das Messfahrzeug vermieden werden. Um Datenlücken zu vermeiden, wurde jede Richtungsfahrbahn des Untersuchungsgebietes mehrfach befahren, das heißt, dass jede Fahrspur der beiden Richtungsfahrbahnen einzeln befahren wurde.

In die Planung der Aufnahme mittels MLS wurde auch die ASFiNAG und die Autobahnmeisterei Ilz miteingebunden. Einerseits um die beste Aufnahmezeit für das

Untersuchungsgebiet zu eruieren, andererseits um das Sicherungsfahrzeug und einen Platz für die Montage des MLS am Messfahrzeug und dessen Kalibration zu organisieren.

Für die Aufnahme des Einzugsgebiets neben der Autobahn mittels ALS, ist primär abzuklären, ob ein Flug möglich ist. Darauf wurde zuvor bei der Auswahl des Untersuchungsgebiets bereits Rücksicht genommen und war flugrechtlich problemlos möglich. In einem nächsten Schritt erfolgt die Planung der Anzahl der Flugmissionen und notwendigen Startpunkte. Wesentlich dabei ist die gewählte Flughöhe und die notwendige Datenqualität. Sobald diese Parameter festgelegt sind, für dieses Projekt waren 6 Startpunkte bzw. Flugmissionen notwendig, können vorab mögliche Startpunkte ausgewählt werden. Diese sind jedoch nicht final, da sich ausgewählte Startpunkte vor Ort oft aus unterschiedlichen Gründen als unbrauchbar erweisen. Bei der Flugplanung ist außerdem zu berücksichtigen, ob sich Erschwernisse, wie beispielsweise Hochspannungsleitungen, im zu befliegenden Gebiet befinden.

Parameter

Bei der Festlegung der Aufnahmeparameter für beide eingesetzten Messsysteme ist die Abdeckung des jeweiligen Messsystems relevant. Das heißt, dass die Parameter für beide Messsysteme so zu wählen sind, dass keine Datenlücken im Übergangsbereich auftreten. Hauptsächlich betrifft dies das ALS, da das MLS durch Lärmschutzwände oder beispielsweise das umliegende Gelände limitiert ist. Daher wurden die Flugpfade des ALS je Flugmission so gewählt, dass sich jeweils ein Flugpfad in unmittelbarer Nähe der Autobahn befindet. Dies ist außerdem von großer Bedeutung, dass im Nachgang die Punktwolken beider Messsysteme fusioniert werden können und somit das gesamte Untersuchungsgebiet abgedeckt ist.

Neben dem MLS und ALS hätte es im Digital Twin Lab weiters die Möglichkeit gegeben einen mobilen Laserscanner (Rucksacksystem) und einen terrestrischen Laserscanner zusätzlich einzusetzen. Bestimmte Use-Cases können verschiedene Geräte zur vollständigen Datenaufnahme benötigen. Da dies an dieser Untersuchungsstelle nicht nötig war und die Schlaggraft mit den beiden eingesetzten Geräten am höchsten ist wurde nur darauf zurückgegriffen.

MLS-Planung

Beim MLS hängen die Parameter, aufgrund der Modularität des Messsystems, von der gewählten Kamerakonfiguration und maximalen Fahrtgeschwindigkeit während der Messkampagne ab. Für das Projekt WETSAFE wurde die Basiskonfiguration mit den Pavement-Kameras gewählt (siehe Abbildung 6). Die Basiskonfiguration besteht aus den zwei fix installierten LiDAR-Scannern mit GNSS-Antenne, GNSS-Heading-Antenne, der Panoramakamera und dem Odometer. Aufgrund der gewählten maximalen Fahrtgeschwindigkeit von 70 km/h, wurde das LiDAR-Scanner-Profil mit 1,8 Mhz und einer maximalen Fahrtgeschwindigkeit von 100 km/h selektiert. Dadurch ist ein Punktabstand je Scanner, innerhalb einer Scanlinie, von unter 1 cm zu erwarten. Für sämtliche Kameras wurde ein Auslöse (Trigger)-Intervall von 1 m festgelegt. Das heißt, dass nach jedem gefahrenen Meter alle Kameras auslösen und somit ein Bild speichern.



Abbildung 6: Messfahrzeug mit montiertem MLS in Basiskonfiguration inkl. Pavement-Kameras

Um Datenlücken aufgrund anderer Fahrzeuge auf ein Minimum zu reduzieren, wurden alle Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn separat befahren. Eine weitere Vorkehrung, um die Anzahl an anderen Fahrzeugen zu reduzieren, ist die Auswahl der Tageszeit bei der Messkampagne. Dies war für das gewählte Untersuchungsgebiet auf der A2 sehr wichtig, da in diesem Bereich verstärkt mit Arbeitspendlern nach und von Graz zu rechnen ist. Aus diesem Grund wurde die Aufnahmezeit mit spätem Vormittag bzw. Mittagszeit festgelegt. In solchen Autobahn-Szenarien spielt das MLS seine Stärken voll aus:

- Hohe Aufnahmegeschwindigkeit: Ermöglicht die Messkampagne während des fließenden Verkehrs, es sind keine Sperrungen von Fahrstreifen notwendig

- Hohe Punktdichten: Aufgrund des Dual-LiDAR-Scanner-Setups, der Ausrichtung der LiDAR-Scanner und dem daraus resultierenden X-Pattern, ist eine nahezu lückenlose sowie hochdetaillierte Erfassung gewährleistet
- Hochgenaue absolute Genauigkeit: Mit der Kombination aus zwei GNSS-Antennen, Inertial Measurement Unit (IMU) und Odometer ist eine Positionsgenauigkeit von bis zu 2 cm horizontal sowie 3 cm vertikal erzielbar.

Als Zusatzmaßnahme können Begleitfahrzeuge (z.B. Privatfahrzeuge oder besser Straßenbahnmeisterei) als Abstandhalter eingesetzt werden. Im Projekt wurde ein Fahrzeug der lokalen Autobahnmeisterei zur Verfügung gestellt.



Abbildung 7: 2 Begleitfahrzeuge der ASFINAG als Abstandshalter (Beispielbild: Projekt Testregion ALP.Lab)

ALS-Planung

Sämtliche Flugparameter beim ALS beeinflussen die zu erzielende Punktdichte der resultierenden Punktwolke. Den wesentlichsten Einfluss hat dabei aber die Flughöhe. In der Regel ist das Ziel, so tief wie möglich zu fliegen, um die höchstmögliche Punktdichte zu erzielen. Die Wahl der Flughöhe hängt dabei zentral von den Geländegegebenheiten und der Vegetation, sprich Bäumen, im Projektgebiet ab. Abhängig davon wurde eine Flughöhe von 60 m über Grund (Above Ground Level - AGL) gewählt. Die weiteren Flugparameter sind in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.



Abbildung 8: RiCOPTER im Einsatz

Flugparameter	Wert
Field of View (FoV)	90 °
Flight height AGL	60 m
Flight speed	6 m/s
Side distance	60 m

Tabelle 1: Gewählte Flugparameter für das ALS zur Aufnahme des Untersuchungsgebiets im Projekt WETSAFE.

Aus den gewählten Flugparametern ist es möglich, vorab die zu erwartende Datenqualität zu berechnen. Dafür wird die Software RiPARAMTER, des Sensorherstellers Riegl, verwendet. Zusätzlich zu den Flugparametern werden sämtliche Sensoreigenschaften bei dieser Berechnung miteinbezogen. Der relevanteste Parameter dieser Berechnung ist mit Sicherheit die zu erwartende Punktdichte, in diesem Fall durchschnittlich 522 Punkte/m², da diese die Auswertemöglichkeiten und Datenqualitäten abgeleiteter Produkte vorgibt. Sämtliche weiteren berechneten Parameter zur erwartbaren Datenqualität sind in Tabelle 2 abgebildet.

Parameter	Wert
Point Distance AVG @ Max. Terrain Altitude	0,0639 m
Footprint Diameter AVG @ Max. Terrain Altitude	0,0239 m
Line Distance	0,03 m
Swath Width	120 m

Lateral Strip Separation	96 m
Sidelap Per Side	20 %
Point Density AVG @ Max. Terrain Altitude	522 pts/m ²

Tabelle 2: Berechnete Parameter zur erwartbaren Datenqualität auf Grundlage der gewählten Flugparameter für das ALS.

2.1.2. Durchführung

Aufnahmen im öffentlichen Raum, im speziellen mit Kameras, haben das Potenzial, personenbezogene Daten zu erfassen. Das sind beispielsweise Bilder von Personen oder Kennzeichen von Fahrzeugen. Dies sind sensible Daten und daher werden sämtliche Bilder, welche solche Informationen beinhalten, automatisiert anonymisiert. Das heißt, dass Gesichter von Personen oder Kennzeichen verpixelt werden. Bei LiDAR-Daten, sogenannten Punktwolken, ist dieses Risiko nicht gegeben, da hier weder Personen noch Kennzeichen identifiziert werden können. Um solche Aufnahmen im öffentlichen Raum durchführen zu dürfen, ist eine datenschutzrechtliche Bewilligung notwendig. Das Digital Twin Lab der Joanneum Research ist im Besitz einer solchen Bewilligung und diese ist auch am Messfahrzeug angebracht.

MLS-Durchführung

Die Datenakquise der Richtungsfahrbahnen Wien bzw. Graz der A2 – Südbahn wurden am 12.11.2024 durchgeführt. Nachdem das MLS am Fahrzeug montiert und die Aufnahmeparameter konfiguriert wurden, muss die IMU und das GNSS kalibriert werden. Das ist ein zweistufiger Prozess. Zuerst wird ein „Static Alignment“ durchgeführt. Hierfür wird das Messfahrzeug auf einem Platz frei von naheliegenden Gebäuden und anderen Strukturen platziert, damit so wenige Satelliten wie möglich verdeckt werden. In diesem Schritt der Kalibration wird die Position des Messfahrzeuges hochgenau, über eine Dauer von fünf Minuten, bestimmt. Danach wird das „Dynamic Alignment“ durchgeführt. Dazu wird das Messfahrzeug auf einem Platz, im Optimalfall mit wenig bis keinen anderen Verkehrsteilnehmer:innen, stark beschleunigt und abgebremst. Im Rahmen des „Dynamic Alignment“ wird das Fahrzeug in fortlaufenden Kreis- und Richtungswechseln (Achterschleifen) dynamisch beansprucht. Dieser Vorgang ist für die Kalibration der IMU bedeutend, damit die Längs- und Querschleunigungswerte korrekt justiert sind. Im Anschluss werden noch Tafeln mit Schachbrettmuster (Checkerboards) ausgelegt und eine

kurze Messung (Record) aufgezeichnet. Hintergrund ist, dass die Bilder sämtlicher Kameras im Nachgang anhand der Punktwolke ausgerichtet werden müssen. Dieser Vorgang wird durch diese Checkerboards erleichtert und präzisiert.

Anschließend wurde die eigentliche Messkampagne mit Sicherungsfahrzeug im Abstand von rund 20 Metern hinter dem Messfahrzeug begonnen. Die Aufzeichnung der Messkampagne wurde auf der Richtungsfahrbahn Wien, vor dem Talübergang Waltersdorf, gestartet und nach Überquerung des Talübergangs auf der Richtungsfahrbahn Graz pausiert bzw. beendet. Das Untersuchungsgebiet wurde als „Rundkurs“ befahren, das heißt, dass die Anschlussstelle Sebersdorf-Bad Waltersdorf bzw. eine Betriebsumkehr der ASFiNAG nach dem Talübergang Waltersdorf als Umkehrschleifen genutzt worden sind. In der ersten „Runde“ wurde jeweils die rechte Fahrspur erfasst, in der zweiten die Überholspur und abschließend die dritte Fahrspur der Richtungsfahrbahn Graz. Die Messkampagne ist anhand der Fahrzeugtrajektorie in Abbildung 9 als violette Linie dargestellt.

Nachdem die Messkampagne erfolgreich durchgeführt wurde, muss vor deren Abschluss, die IMU-/GNSS-Einheit wieder kalibriert werden. Das erfolgt analog zur Kalibration vor der eigentlichen Messfahrt mit Static und Dynamic Alignment.



Abbildung 9: Detailansicht der Trajektorien der eingesetzten Messsysteme auf bzw. entlang der A2-Südautobahn. Die Trajektorie des MLS ist violett und die des ALS pink dargestellt.

ALS-Durchführung

Im Zuge der Planung wurden bereits mögliche Startpunkte für die Flugmissionen identifiziert. Die Startpunkte wurden so gewählt, dass die maximale Flugdistanz, rund 700 m zwischen Drohne und Pilot, optimal genutzt wird. Da sich die geplanten Startpunkte in der Realität als nicht geeignet herausstellen können, aufgrund von Faktoren, die in den Luftbildern nicht ersichtlich sind, müssen diese vorab vor Ort überprüft werden. Diese Überprüfung wurde am Vortag der ALS-Aufnahme, am 12.11.2024, durchgeführt. Es wurden in Summe sechs Startpunkte fixiert. Faktoren welche für einen Startpunkt wichtig sind:

- Sichtweite
- Entfernung zum Untersuchungsgebiet

- Ebenheit des Geländes am Startpunkt
- Möglichst wenige, hohe Objekte in unmittelbarer Nähe
- Erreichbarkeit mit dem Fahrzeug

Im Zuge der Überprüfung der Startpunkte wird auch Kontakt mit möglichen Grundeigentümern aufgenommen. Dadurch sollen mögliche Probleme, vor allem in der Nähe von Siedlungsgebieten, im Vorhinein hintangehalten werden. Des Weiteren wurde auch die zuständige Autobahnpolizei informiert, damit diese bei möglichen Anrufen vorab informiert sind. Am 13.11.2024 wurden die sechs geplanten Flugmissionen durchgeführt. Der grundsätzliche Ablauf einer solchen Flugmission gliedert sich wie folgt:

1. Im Vorfeld: Überprüfung, ob ein Flug wetterbedingt (Wind, Niederschlag, Nebel) möglich ist
2. Montage der Drohne
3. Vor dem ersten Flug, Kompasskalibration der Drohne
4. Erstellung der Flugmission in der Flugplanungssoftware
5. Überprüfung der Drohne nach Checkliste des Herstellers
6. Hochladen der Flugmission auf die Drohne
7. Nach erfolgreichem Start: „Dynamic Alignment“ der IMU
8. Durchführung der Flugmission
9. Vor der Landung: „Dynamic Alignment“ der IMU
10. Nach der Landung: Teilweise Demontage der Drohne
11. Versorgung des Equipments

Sofern mehrere Flugmissionen, wie in diesem Projekt der Fall, an einem Tag durchgeführt werden, werden drei geladene Akku-Sätze für die Drohne und ein zweiter Akku für die Fernsteuerung mitgeführt. Um die Akkus im Feld wieder aufladen zu können, wird ebenfalls ein mobiles Stromaggregat verwendet. Das ist notwendig, um unnötige Warte- bzw. Wegzeiten zu einer Lademöglichkeit zu vermeiden. Dadurch wird die Effizienz und Unabhängigkeit während der Durchführung massiv erhöht.

Eine Herausforderung bei der Erfassung des Umlandes entlang der Autobahn war der Talübergang Waltersdorf. Zur Befliegung wurde eine Flughöhe von 60 m AGL verwendet. Um den Flugpfad in der Planungssoftware korrekt zu berechnen, wird ein Geländemodell zugrunde gelegt. Geländemodell bedeutet, dass keinerlei Gebäude oder Vegetation in diesem Modell abgebildet sind, lediglich das nackte Gelände. Aus diesem Grund wurde auch der Talübergang nicht korrekt dargestellt und das musste in der Flugplanung

berücksichtigt werden. Dies wurde so bewerkstelligt, dass die Flughöhe für die Flugpfade in unmittelbarer Nähe des Talübergangs erhöht werden musste. Wäre das nicht gemacht worden, hätte die Gefahr bestanden, dass die Drohne mit der Brücke kollidiert.

In Summe wurden sechs Flugmissionen á zwei Flugpfade (Abbildung 10) durchgeführt, um das Umland des Untersuchungsgebietes zu erfassen. Dies war ausreichend, um die geforderten 80 m pro Seite neben der Autobahn abzudecken.

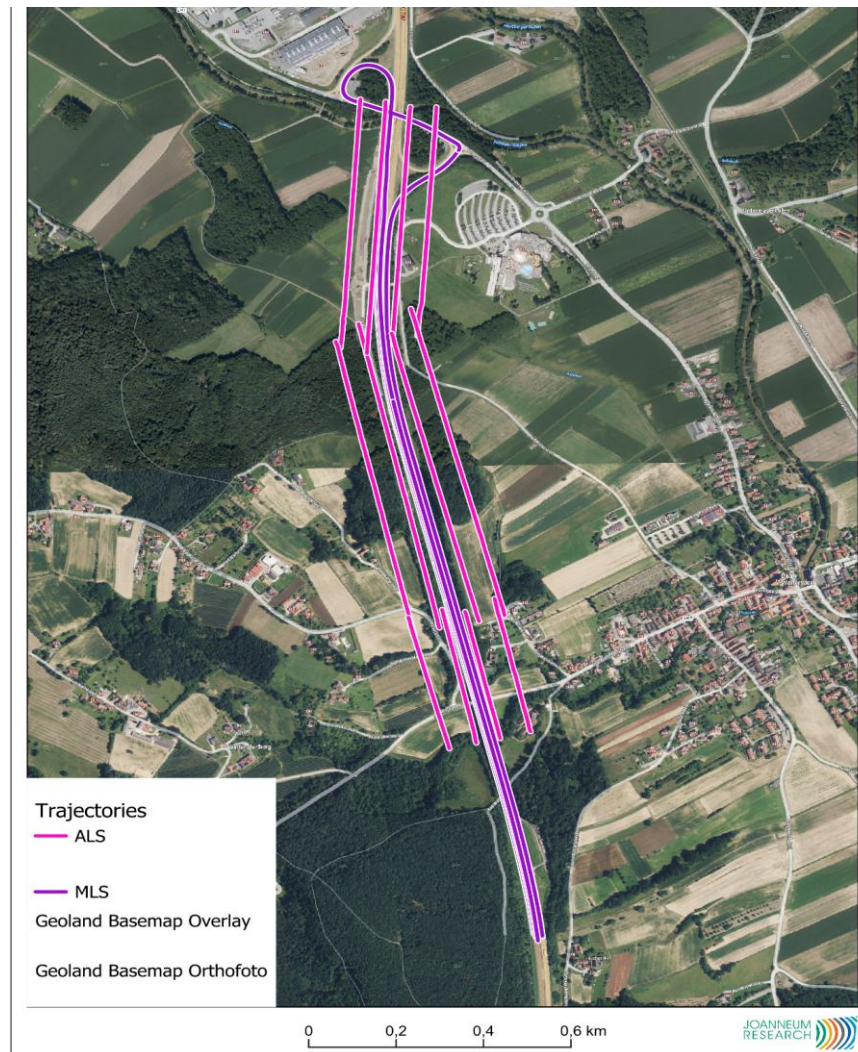


Abbildung 10: Übersicht aller Trajektorien der eingesetzten Messsysteme zur Erfassung des Untersuchungsgebiets. In Violett sind die Trajektorien des MLS und in Pink die Trajektorien des ALS dargestellt.



Abbildung 11: Eine der Startpositionen des ALS

In einem ersten Schritt müssen sämtliche Daten der eingesetzten Messsysteme von denselben heruntergeladen und gesichert werden. Dabei sind nicht zu vernachlässigende Datenmengen angefallen. Die angefallenen Rohdaten sind jedoch stark unterschiedlich je Messsystem.

Beim ALS sind auf einer Trajektorienlänge von insgesamt knapp über sieben Kilometer angefallen:

- LiDAR-Daten: 9,04 GB
- Bilddaten: 27,85 GB

Beim MLS sind auf einer Trajektorienlänge von insgesamt 21,69 km angefallen:

- LiDAR-Daten: 28,73 GB
- Bilddaten: 320,13 GB

Das sind in Summe 385,75 GB an Rohdaten für das Untersuchungsgebiet. Weitere Details sind der Abbildung 12 zu entnehmen.

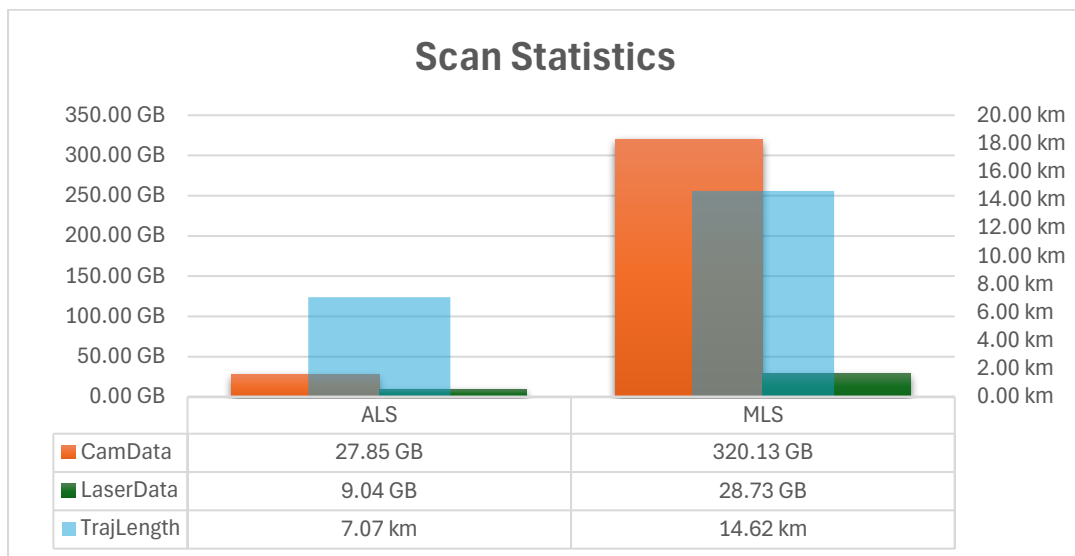


Abbildung 12: Darstellung der Menge der aufgezeichneten Rohdaten und der Länge der Trajektorien je Messsystem als Säulendiagramm.

2.3. Vorverarbeitung / Preprocessing

Bevor die Rohdaten ausgewertet und weiter analysiert werden können, müssen diese zuvor vorverarbeitet (preprocessed) werden. Dieser Prozess gliedert sich im Wesentlichen in:

- PPK-Prozessierung der Trajektorien
- Individuelle Prozessierung der ALS- und MLS-Daten
- Fusionierung der ALS- und MLS-Daten

Während der Aufnahme werden die Positionsdaten beider Messsysteme von IMU und GNSS aufgezeichnet. Im Nachgang werden diese Positionsdaten korrigiert bzw. verbessert, um eine Lagegenauigkeit von bis zu 2 cm zu erreichen. Dafür werden Basisstationsdaten und Expertensoftware verwendet. Dieser Vorgang wird als Post-Processing Kinematic, PPK, bezeichnet. Der Vorteil bei dieser Methode ist, dass während der Aufnahme keine Internetverbindung zur Erhöhung der Lagegenauigkeit benötigt wird. In diesem Fall würde man von Real-Time Kinematic, RTK, sprechen. Basisstationsdaten können von unterschiedlichen Anbietern bezogen werden, in diesem Projekt wurden die Korrekturdaten von Echtzeit Positionierung Austria - EPOSA verwendet. Im Umkreis von 20 km vom Projektgebiet war jedoch keine Basisstation vorhanden. Daher musste eine virtuelle Referenzstation berechnet werden. Dafür werden die Korrekturdaten von mindestens drei nächstgelegenen Basisstationen verwendet und trianguliert.

Anschließend werden die Rohdaten je Messsystem individuell prozessiert. Das umfasst:

- Import der verbesserten Trajektorie
- Prozessierung der LiDAR-Rohdaten
- Weitere Verbesserung der Qualität der Trajektorien
- Import der Bilddaten
- Berechnung der Ausrichtung der Kamera(s)
- Maskierung der Bilddaten
- Kolorierung der Punktwolke
- Filtern der Punktwolke, um Reflektionen und Artefakte zu reduzieren

Nun kann ein erster Qualitätsparameter zu den Punktwolken der beiden Messsysteme berechnet werden, die Punktdichte. Die Punktdichte lässt Aussagen über den zu erwartenden Detailgrad zu. Dabei gilt, je niedriger die Punktdichte, desto niedriger der Detailgrad. Je höher die Punktdichte, desto höher der Detailgrad des erfassten Gebietes. Die Punktdichte wird dabei in Punkte pro Quadratmeter angegeben. Mit dem ALS, und somit für das Einzugsgebiet entlang der Autobahn, konnte im Median eine Punktdichte von

rund 645 pts/m² erreicht werden. Mit dem MLS, und somit für die Autobahn selbst, konnte im Median eine Punktdichte von rund 970 pts/m² erzielt werden. Weitere Details sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 abgebildet.

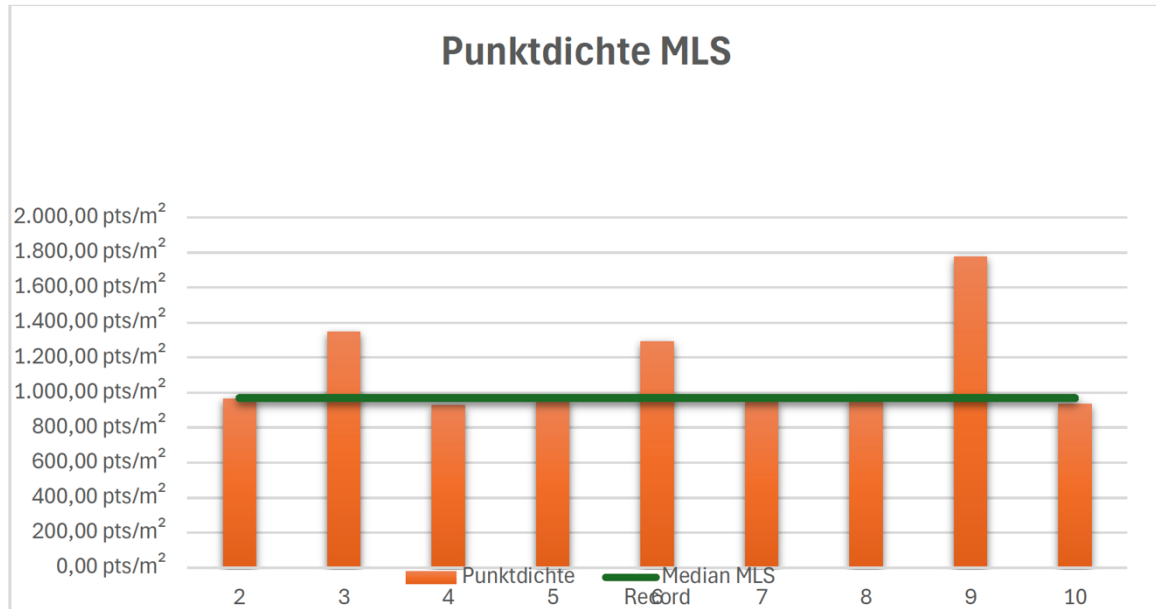


Abbildung 13: Erzielte Punktdichte in Punkte pro Quadratmeter je Record für das MLS, dargestellt als Histogramm.

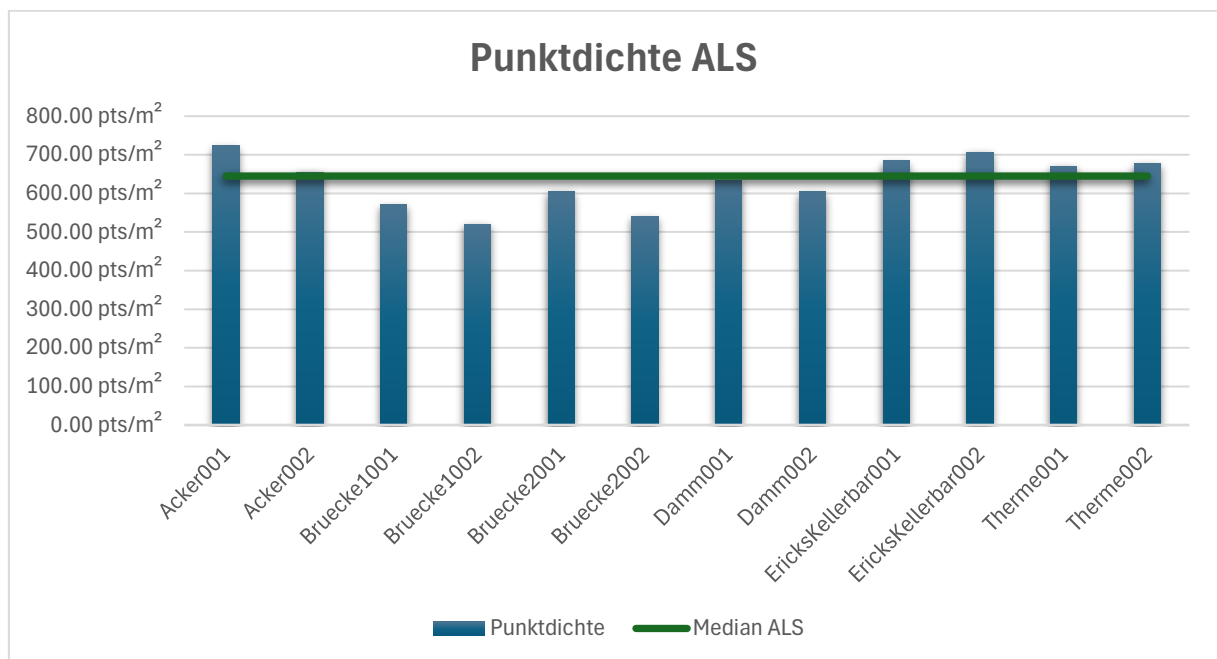


Abbildung 14: Erzielte Punktdichte in Punkte pro Quadratmeter je Flugmission und Flugstreifen für das ALS, dargestellt als Histogramm.

Als letzten Schritt der Vorverarbeitung erfolgt die Fusionierung der Punktwolken von MLS und ALS. Aufgrund der hohen Lagegenauigkeit und der Überlappung in den Übergangsbereichen zwischen Fahrbahn und Einzugsgebiet können die Punktwolken miteinander kombiniert werden. Das Resultat ist ein „Complete Spatial Digital Twin“ der A2-Südautobahn und dessen Einzugsgebiet im Untersuchungsgebiet.

2.4. Weiterverarbeitung der fusionierten Punktwolke

Nach der abgeschlossenen Vorverarbeitung ist ein umfassender Workflow notwendig, um die gewünschten Ergebnisse zu erhalten. Die wesentlichen Schritte dieses Workflows sind:

- Klassifikation der Punktwolke
- Filtern der Punktwolke
- Entfernung von beweglichen Objekten
- Korrektur in bewaldeten Bereichen
- Zuschnitt der Punktwolke auf das Untersuchungsgebiet
- Subsampling (Ausdünnen) der Punktwolke auf Zielwerte

Die Klassifikation der Punktwolke stellt die Basis für alle weiteren Verarbeitungsschritte in diesem Workflow dar. Dafür wird die fusionierte Punktwolke in eine Expertensoftware importiert. Die Klassifikation ist dann ein zweistufiger Prozess. Im ersten Schritt wird zwischen Boden (Ground) und Nicht-Boden (Non-Ground) unterschieden. Die einzelnen verfügbaren Klassen werden durch die LAS Spezifikation 1.4-R14 der American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS) für die Standard-Klassen vorgegeben. Abseits der Standard-Klassen können individuelle Klassen ebenso festgelegt werden. Je nach Art des Geländes, flach, hügelig oder steil, sind die Parameter anzupassen, um den Boden so exakt wie möglich zu erhalten. Alles andere, beispielsweise Vegetation, Fahrzeuge oder Gebäude, werden der Klasse Nicht-Boden zugeordnet. In einem weiteren Klassifikationsschritt wird dann die Klasse Nicht-Boden in die weiteren Klassen unterteilt. Für das Projekt WETSAFE ist jedoch die Klasse Boden von größtem Interesse, um hydraulische Simulationen so realitätsnah wie möglich durchführen zu können.

Anschließend wurde die klassifizierte Punktwolke gefiltert, das heißt im konkreten Anwendungsfall, dass alle Klassen außer der Klasse Boden, ausgeblendet worden sind. Dadurch war ebenfalls eine erste Qualitätskontrolle der Klassifikation möglich. Dabei ist

aufgefallen, dass auch Objekte, welche für die hydraulische Simulation wichtig sind, entfernt wurden. Dies ist, wenn man von der Klasse Boden spricht, soweit korrekt, da es sich um eine Stützmauer im Böschungsbereich, der ins Gelände eingeschnittenen Autobahn, und um die Betonleitwände zur Trennung der Richtungsfahrbahnen handelte. Um diese später korrekt in die Simulation einfließen zu lassen, sind die Stützmauer als auch die Betonleitwände, teildautomatisiert der Klasse Boden hinzugefügt worden.

Bewegliche Objekte, etwa Fahrzeuge, stellen für die meisten Algorithmen eine Herausforderung dar, speziell im Übergang vom Fahrzeug zur Fahrbahn. Dort kann es zu Überresten von Reifenteilen in der Klasse Boden kommen. Für eine hydraulische Simulation muss jedoch die Fahrbahnoberfläche so realitätsnah wie möglich sein, da diese Überreste das Fließverhalten von Wasser beeinflussen. Diese Überreste wurden in einem teildautomatisierten Prozess entfernt.

Aufgrund des eingesetzten Laserscanners am ALS, ist eine Erfassung der Bodenoberfläche auch in bewaldeten Gebieten problemlos möglich. Ermöglicht wird dies durch die Eigenschaft, dass mehrere Reflektionen desselben Laserstrahls (Multi Returns) aufgezeichnet werden. Dadurch ist ein hochdetailliertes Geländemodell von einem Waldgebiet machbar. Da der Waldboden im Untersuchungsgebiet sehr kupiert ist, trat ein ähnliches Bild bei der Klassifikation des Bodens wie bei den Fahrzeugen auf. Wurzelteile und liegendes Totholz wurden teilweise falsch der Klasse Boden zugeordnet. Wiederum wurden diese „Vegetationsreste“ teildautomatisiert entfernt.

Der Bereich, der durch einen Laserscanner aufgenommen wird, nennt sich Schwadbreite (Swath width). In der Regel wird dabei ein größerer Bereich erfasst als notwendig. Das war auch hier der Fall. Bedingt dadurch, muss die Punktwolke auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten werden. Dieser Bearbeitungsschritt bringt weitere Vorteile mit sich als der reine Fokus auf das Untersuchungsgebiet. Des Weiteren wird die Dateigröße minimiert und die nachfolgenden Prozessschritte werden beschleunigt. Die auf das Untersuchungsgebiet zugeschnittene Punktwolke wurde weiter unterteilt, in die Autobahn und das Vorland. Dieser Schritt ist für die hydraulische Simulation notwendig, da hier eine höhere Punktdichte für die Autobahn und eine niedrigere Punktdichte für das Umland von der flussbau iC gefordert ist.

Als letzter Schritt wurde ein Spatial Subsampling (Ausdünnen) der Punktwolken auf die geforderten Zielwerte durchgeführt. Die Charakteristik des Spatial Subsampling ist jene, dass sich in einem definierten Intervall, z.B.: 10 cm, ein Punkt befindet. Dadurch ergibt sich auch ein regelmäßiges Grid (Netz) aus Punkten.

Die notwendigen Auflösungen, definiert durch die flussbau iC, waren wie folgt:

- Autobahn
 - Auflösung 1: 10 cm
 - Auflösung 2: 25 cm
- Vorland
 - Auflösung 1: 25 cm
 - Auflösung 2: 50 cm



Abbildung 15: Punktwolke Fahrbahn und Umgebung von MLS.



Abbildung 16: Punktwolke Fahrbahn und Umgebung von ALS

2.4.1. Digitales Geländemodell - DGM

Die Punktwolken, mit einer Auflösung von 10 cm, der Autobahn und dem Umland wurden nun in ein Digitales Geländemodell (DGM) im Format GeoTIFF konvertiert. Dabei wurden die 3D Punktwolken in 2D Rasterdateien umgerechnet. Für diese Konvertierung wurde die Point Data Abstraction Library (PDAL) und davon der Algorithmus Export Raster verwendet. Dadurch wird aus den Punktwolken ein 2D Raster Grid, mit der angegebenen/vorliegenden Auflösung, berechnet. Sofern man nicht zuvor ein Spatial Subsampling durchgeführt hat, könnte es in diesem Schritt zu Detailverlust oder nicht korrekt dargestelltem Gelände kommen.

Die resultierenden DGMs von Autobahn und Vorland, mit einer Auflösung von 10 cm, wurden der flussbau iC für die hydraulische Simulation bereitgestellt.

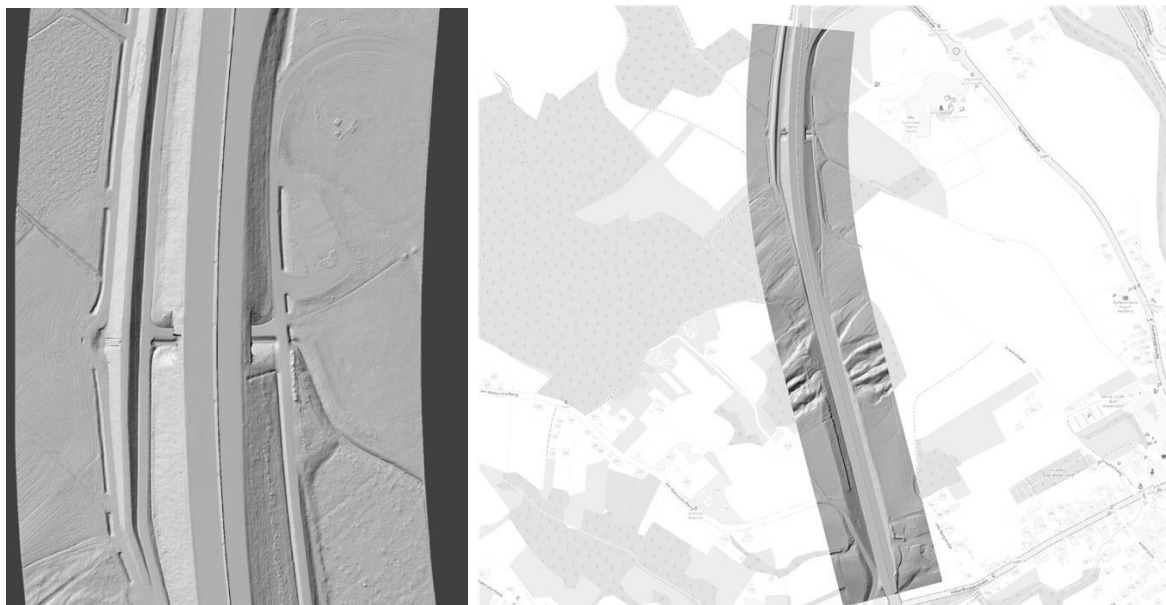


Abbildung 17: Digitales Geländemodell (DGM) aus Mobile Mapping Daten

2.4.2. Orthofoto

Um kleine Objekte, wie beispielsweise Einlaufgitter, leichter identifizieren zu können und bedingt durch das geforderte Ausdünnen der Punktwolke, wurde ebenso ein Orthofoto für das Untersuchungsgebiet erstellt. Das Orthofoto wurde dabei aus der kolorierten Punktwolke, in einer Auflösung von 10 cm, berechnet. Für diese Berechnung wurde ein eigens vom Digital Twin Lab entwickelter Algorithmus genutzt. Dieses Orthofoto wurde im Anschluss der flussbau iC zur Verfügung gestellt.

2.4.3. OpenDRIVE

Im Rahmen des WETSAFE-Projekts wurden zwei detaillierte OpenDRIVE-Files des befahrbaren Bereichs mit einer Länge von 1,6 km erstellt, jeweils eines für die entsprechende Fahrtrichtung des Autobahnabschnitts. Die Anforderungen an die OpenDRIVE-Files erfolgten in enger Abstimmung mit Salzburg Research, um sicherzustellen, dass alle relevanten Aspekte darin abgebildet werden.

Die Erstellung der OpenDRIVE-Szene und der Export der OpenDRIVE-Files wurden in RoadRunner von MathWorks durchgeführt. Als Datengrundlage für die Ableitung der Fahrspuren dienten hochauflösende Orthofotos der einzelnen Fahrbahnen, welche aus den Aufnahmen der Pavement-Kameras des VMX-2HA generiert wurden. Für die genaue Höhenanpassung und präzise Abbildung der Geometrie der Fahrbahnen des Abschnitts wurde ein digitales Geländemodell (DGM) verwendet, das aus der Punktwolke des VMX-2HA generiert wurde (Abbildung 18).

Die erstellten Dateien wurden anschließend mit dem Tool XODR Viewer validiert, um die Konformität mit dem OpenDRIVE-Standard sicherzustellen. Das Ergebnis sind zwei umfassende OpenDRIVE-Daten der Autobahnabschnitte mit allen relevanten Attributen, wie Abbiegebeziehungen, Fahrtrichtung und Geschwindigkeitsbegrenzungen für die jeweilige Fahrspur. Die finalisierten Daten wurden schlussendlich an Salzburg Research übermittelt.

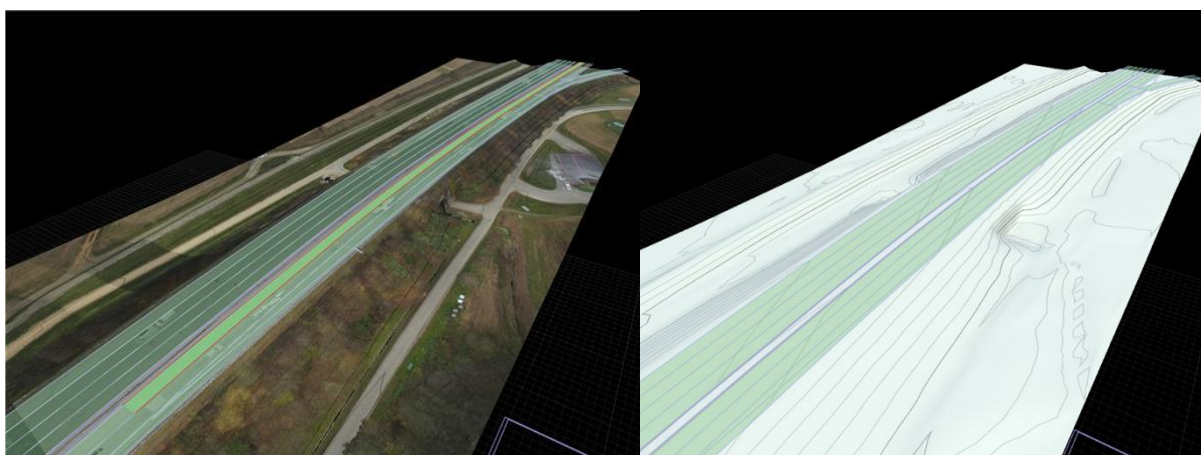


Abbildung 18: Mit digitalem Höhenmodell angepasste Geometrie der Fahrbahnen im Untersuchungsgebiet.

2.5. Handlungsempfehlungen für die Erstellung digitaler Umgebungsmodelle für hydraulische Simulationen

2.5.1. Datenerhebung

Um die hydraulische Simulation in Zukunft effizienter und einfacher zu gestalten, wäre es vorteilhaft, kleine Objekte vorab zu erkennen und entweder zu markieren oder in der Punktwolke zu klassifizieren. Hintergrund ist, dass durch das Subsampling der Punktwolke, kleine Objekte, wie z.B.: Einlaufgitter, in der ausgedünnten Punktwolke schlecht bis gar nicht mehr erkannt werden können. Diese Einlaufgitter sind jedoch für die hydraulische Simulation wesentlich. Daher wäre es anzudenken, Einlaufgitter und ähnliche Objekte entweder auf Grundlage der Bilddaten automatisiert mittels Machine-Learning-Algorithmus zu erkennen und etwa durch Vektordaten zu markieren. Ein anderer Ansatz wäre, auf Basis der erkannten Einlaufgitter, die Punktwolke zu klassifizieren. Dann bräuchte man keine zusätzlichen Daten und die Einlaufgitter wären als Klasse in der Punktwolke verfügbar.

Die Art des Asphalts und dessen Beschaffenheit spielen beim Auftreten von Aquaplaning ebenso eine entscheidende Rolle. Fragen in diesem Zusammenhang sind:

- Um welche Art von Asphalt handelt es sich und wie viel Wasser kann dieser absorbieren, bevor sich ein Wasserfilm auf der Oberfläche bildet?
- Wie steht es um die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) des Asphalts?
- Ist die Asphaltoberfläche bedingt durch die Nutzungsdauer und hohes Verkehrsaufkommen schon stark abgenutzt (glatt)?

Die Asphaltart könnte etwa als Attribut in die Simulation miteinfließen. Die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) des Asphalts wiederum könnte durch die hochaufgelösten LiDAR-Daten abgeleitet werden. Dies ist aktuell Gegenstand der Forschung. Aktuell kann diese Information nur vom Messsystem Roadstar des Austrian Institute of Technology (AIT) geliefert werden. Die Datenerhebung ist jedoch sehr zeit und kostenintensiv, da das Messsystem auf einem LKW montiert ist und dieser jede Fahrspur einzeln befahren muss.

Da für die hydraulische Simulation des Einzugsgebiets/Vorlandes gröber aufgelöste LiDAR-Daten ausreichend sind, könnten LiDAR-Daten aus Befliegungen der Bundesländer, welche als Open Government Data (OGD), unentgeltlich bereitgestellt werden, zurückgegriffen werden. Die Verwendbarkeit der Daten ist jedoch eingeschränkt, da aktuelle Daten in der Regel selten verfügbar sind. Daten aus Befliegungen der Länder, welche schon mehrere Jahre zurückliegen, sind nicht verwendbar. Aufgrund der zeitlichen

Differenz kann es zu erheblichen Veränderungen gekommen sein, welche dann nicht korrekt abgebildet wären. Dafür gibt es auch in diesem Projekt ein passendes Beispiel. Im Bereich der Anschlussstelle Sebersdorf-Bad Waltersdorf wurde neben der Autobahn ein Rückhaltebecken errichtet. Dieses Rückhaltebecken ist aufgrund der zeitlichen Differenz zwischen Errichtung und Befliegung in den LiDAR-Daten des Landes Steiermark nicht enthalten.

2.5.2. Handlungsempfehlung für ASFiNAG

Für die hydraulische Simulation sind die LiDAR-Daten notwendig, die Bildinformation der Pavement-Kameras ist jedoch optional. Diese sind auch der limitierende Faktor der Fahrgeschwindigkeit während der Messfahrt. Wenn man auf die Pavement-Kameras verzichtet, könnte man die maximale Fahrgeschwindigkeit während der Messfahrt nutzen. Das würde die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h auf 100 km/h erhöhen. Somit wäre die Schlagkräftigkeit des Messsystems signifikant erhöht. Beschränkt man sich auf die LiDAR-Daten, wären Messfahrten in der Nacht denkbar, da die Laserscanner nicht auf Tageslicht angewiesen sind. Infolgedessen wäre der mögliche Aufnahmezeitraum stark erhöht.

Eine weitere Effizienzsteigerung stellt die einfache Befahrung jeder Richtungsfahrbahn dar. Das ist mit dem MLS machbar, da bei einer Messfahrt die Fahrspur auf dem sich das Messfahrzeug befindet und jeweils die Fahrspur links und der Pannestreifen rechts neben dem Messfahrzeug erfasst wird. Zu berücksichtigen ist bei dieser Aufnahmestrategie jedoch, dass ein Sicherungsfahrzeug nicht mehr ausreicht. Es müssten dann zwei Sicherungsfahrzeuge eingesetzt werden, die den fließenden Verkehr auf beiden Fahrspuren zurückhalten. Wird trotzdem nur ein Sicherungsfahrzeug eingesetzt, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erheblichen Datenlücken durch überholende Fahrzeuge. Um in kürzester Zeit die gesamte A2-Südautobahn oder gar das gesamte Autobahnnetz zu erfassen, wäre der Einsatz eines Flugzeugs mit Laserscanner anzudenken. Fragen, die vorab einer solchen Messkampagne abzuklären wären, sind:

- Kann die geforderte Punktdichte erreicht werden?
- Wie oft muss ein Autobahnabschnitt beflogen werden, um Datenlücken auf ein Minimum zu reduzieren?
- Ist ein Flug über der Autobahn überall möglich in Abhängigkeit der Flughöhe?

3. SIMULATIONSERSTELLUNG

Zur Erfassung der maßgeblichen topografischen Grundlagen wurde der betroffene Autobahnabschnitt sowie das angrenzende Umfeld mit Laserscannern aus Fahrzeug- und Drohneneinsätzen (Kapitel 2) detailliert aufgenommen. Die hieraus generierten Daten ermöglichen eine hochaufgelöste Abbildung der relevanten Strukturen wie Fahrbahntentwässerungen, Einbauten, Leitwände, Böschungen und Abflussgräben. Ergänzend wurden für den Vorlandbereich Geodaten des Landes Steiermark herangezogen, die in ausreichender Genauigkeit vorliegen und somit die Geländemodellierung komplettieren.

Alle Datensätze wurden im Anschluss geprüft, bereinigt und für die hydraulische Modellierung mit HydroAS MapWork aufbereitet. Auf dieser Grundlage erfolgte die Durchführung der Starkregensimulationen für unterschiedliche Regenintensitäten. Die daraus resultierenden Modellierungsergebnisse ermöglichen die Identifikation von Gefährdungsbereichen entlang der Autobahn, insbesondere hinsichtlich Aquaplaning und Fremdwasserzutritt.

3.1. Datenanforderungen virtuelles Umgebungsmodell

Für die Durchführung der Starkregensimulationen wurden die Autobahn sowie das angrenzende Gelände mit unterschiedlichen Erfassungsgenauigkeiten aufgenommen. Ziel war es, die maßgeblichen Entwässerungsstrukturen, Geländeneigungen und Einbauten möglichst detailliert abzubilden, um verlässliche hydraulische Modellierungen durchführen zu können.

Im Zuge der Modellierungsarbeiten wurde zudem untersucht, inwiefern eine feinere räumliche Auflösung der Laserscandaten zu einer erhöhten Genauigkeit der Simulationsergebnisse führt. Dieser Vergleich bildet eine wesentliche Grundlage für zukünftige Empfehlungen hinsichtlich der optimalen Datenerfassung für ähnliche Untersuchungen.

Das folgende Kapitel beschreibt die verschiedenen eingesetzten Aufnahmeverfahren sowie die jeweils erreichten Genauigkeiten der Geländedaten.

Die Genauigkeit der eingesetzten Geländedaten bildet eine zentrale Grundlage für die Qualität der Starkregensimulationen. Eine zu genaue bzw. verdichtete Punktwolke führt jedoch zu wesentlich längeren Rechenleistungen, wobei sich die Simulationsergebnisse gleichzeitig nicht verbessern. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Auflösungen der Daten angefordert und in weiteren Schritten der Simulation geprüft.

Im Rahmen des Projektes kamen unterschiedliche Erfassungsmethoden zum Einsatz, die jeweils spezifische Punktdichten, Vertikalgenauigkeiten und Abbildungsqualitäten ermöglichen.

Aufnahme der Autobahn mit zwei Auflösungsstufen

Der fahrzeugbasierte Laserscan wurde entlang der Autobahntrasse durchgeführt und liefert eine besonders hohe Detailgenauigkeit im unmittelbaren Bereich der Fahrbahn. Mit dieser Methode konnten Einbauten, Leitwände, Rinnenverläufe sowie lokale Unebenheiten präzise erfasst werden.

3.1.1. Auflösungsstufen

Angeforderte Auflösungen:

- Auflösung 1: 0,25 m Raster
- Auflösung 2: 0,10 m Raster

Aufnahme des Vorlandes mit zwei Auflösungsstufen

Die drohnenbasierte Befliegung ergänzt die fahrzeugbasierte Aufnahme, insbesondere in den Bereichen außerhalb des unmittelbaren Straßenraumes. Durch die Flugperspektive konnte das seitliche Gelände inklusive Böschungen, Vorlandbereiche und Entwässerungseinrichtungen mit hoher räumlicher Auflösung erfasst werden. Die Daten dienen als wichtige Grundlage, um potenzielle Fremdwasserzutritte aus dem Umfeld der Autobahn abzubilden.

Angeforderte Auflösungen:

- Auflösung 1: 0,50 m Raster
- Auflösung 2: 0,25 m Raster

Geodaten des Landes Steiermark

Für die weiter entfernten Vorlandbereiche wurden vorhandene Geländedaten des Landes Steiermark herangezogen. Diese Daten weisen eine geringere Punktdichte auf als die projektspezifischen Laserscans, bieten jedoch eine ausreichende Genauigkeit, um großräumige Fließpfade und Abflussprozesse außerhalb des unmittelbaren Straßenbereichs abzubilden. Für hydraulische Berechnungen bildet ein 1,00 x 1,00 m Raster im Wesentlichen den Stand der Technik ab.

Vorhandene Auflösung:

- 1,00 m Raster

3.1.2. Datenlieferung Geländeaufnahme

Die vom Joanneum Research bereitgestellten Geländedaten aus dem Arbeitspaket 1 und 2 wurden im Koordinatensystem ETRS98 geliefert und umfassten sowohl eine vollständig colorierte Punktwolke als auch ein bereits aufbereitetes und ausgedünntes digitales Geländemodell (DGM).

Die Punktwolke bildet die Grundlage für die detaillierte Darstellung der topografischen Strukturen, während das DGM für eine effiziente Weiterverarbeitung in der hydraulischen Modellierung vorbereitet wurde.

Zur Sichtung, Kontrolle und ersten Bewertung der Datensätze kamen die Open-Source-Programme CloudCompare und QGIS zum Einsatz. Mit CloudCompare wurde insbesondere die Punktwolke hinsichtlich Vollständigkeit, Punktdichte und möglicher Störeinflüsse geprüft. QGIS diente ergänzend zur Visualisierung des digitalen Geländemodells sowie zur Überprüfung der räumlichen Lagegenauigkeit und zur Integration weiterer Projektdaten.

In den folgenden Abbildungen ist ein Auszug der colorierten Punktwolke, sowie der vorab erstellten digitalen Geländemodelle bzw. der Gelände-Schummerung dargestellt.

Die so durchgeführte erste Qualitätskontrolle bildete die Grundlage für die anschließende detaillierte Datenprüfung.



Abbildung 19: Auszug colorierte Punktwolke / Aufnahme Joanneum Research 10/2024



**Abbildung 20: Digitales Geländemodell (DGM) bzw. Gelände-Schummerung des
Vorlandes und der Autobahn**

3.1.3. Datenprüfung für Modellerstellung

Im Rahmen der Vorbereitung der hydraulischen Modellierung wurden die übermittelten digitalen Geländemodelle sowie die abgeleiteten Schummerung-Darstellungen umfassend auf mögliche Fehler und Unregelmäßigkeiten überprüft. Der Schwerpunkt der Prüfung lag auf Strukturen, die das Abflussverhalten beeinflussen und somit die Simulationsergebnisse verfälschen könnten.

Dabei zeigten sich insbesondere im Bereich der Straßenaufnahmen rillenartige Oberflächenstrukturen, welche aus der Verarbeitung der Laserscandaten resultierten. Zusätzlich wurden lokale Datenlücken („Löcher“) im Fahrbahnbereich festgestellt. Im Zuge der Prüfung wurde abgeklärt, ob die beobachteten Vertiefungen auf tatsächliche Straßenschäden zurückzuführen sind; dies konnte jedoch eindeutig ausgeschlossen werden.

In den folgenden Abbildungen werden exemplarisch die festgestellten Datenanomalien dargestellt.

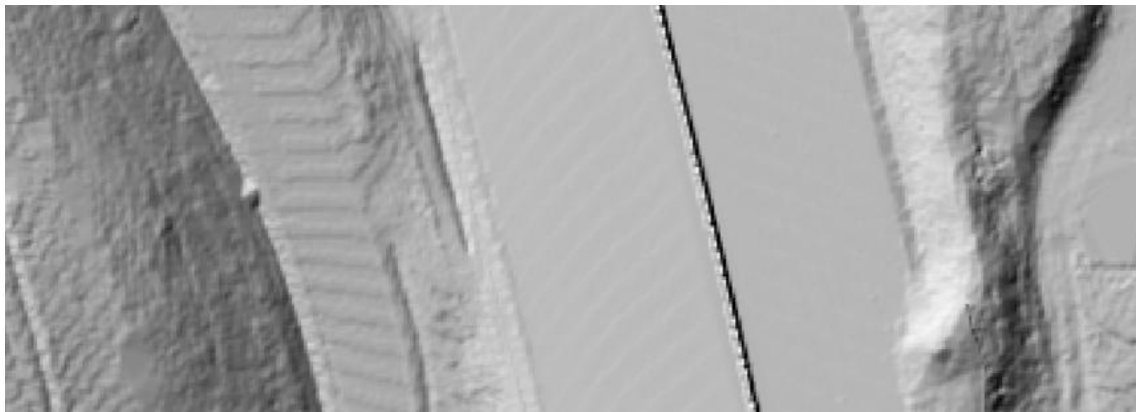


Abbildung 21: Fehlerbild rillenartige Ausbildung der Autobahn.

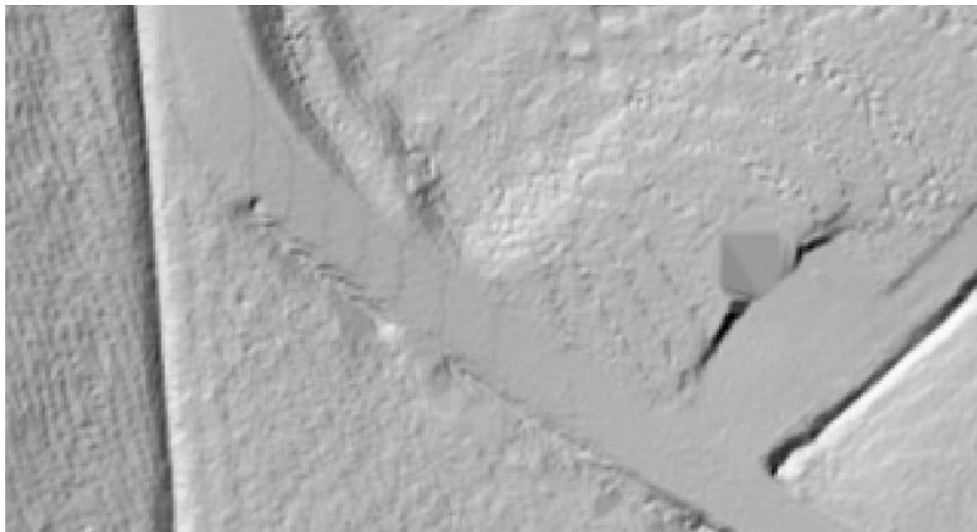


Abbildung 22: Fehlerbild Rillenartige Ausbildung der Feldwege im Umland.



Abbildung 23: Fehlerbild lokale Datenlücken („Löcher“) im Fahrbahnbereich.

Zusätzlich zur Analyse der Geländemodelle wurde die colorierte Punktwolke hinsichtlich abflussrelevanter Strukturen im Vorland überprüft. Die Punktdaten wurden mit den Ergebnissen der Vermessungsaufnahmen sowie ergänzend mittels Google Street View abgeglichen, um die Plausibilität der erfassten Gelände- und Infrastrukturdetails sicherzustellen.



Abbildung 24: Kolorierte Punktwolke des Projektgebietes – Roter Pfeil: Herausgefilterte Stützmauer im Nahbereich der Autobahn.

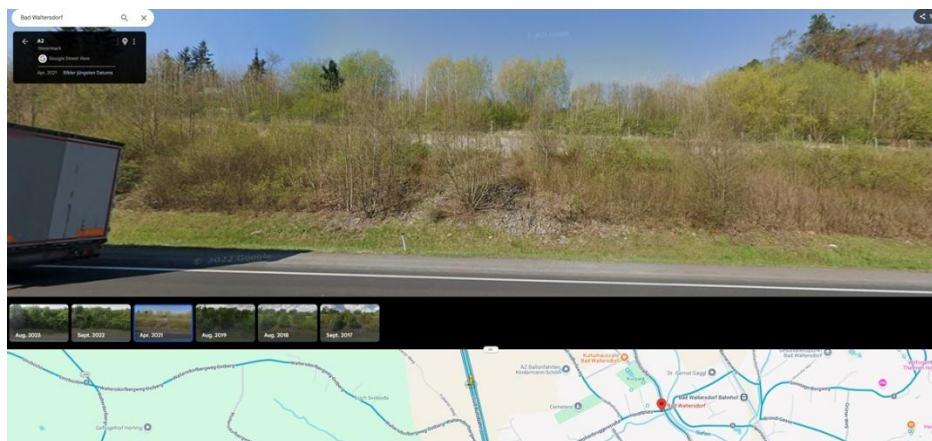


Abbildung 25: Plausibilisierung der Stützmauer mittels Google Street View Daten (Google Maps, April 2021)

Die identifizierten Auffälligkeiten in den Geländemodellen und in der Punktwolke wurden dokumentiert und im Anschluss von Joanneum Research im Arbeitspaket 2 korrigiert. Die bereinigten Daten flossen anschließend in die weitere Modellaufbereitung ein.

3.2. Grundlegenden Daten für Modellaufbau

3.2.1. Einbauten

Die im Bereich der Autobahn vorhandenen Einbauten wurden durch die ASFiNAG bereitgestellt und dienten als zentrale Grundlage für den hydraulischen Modellaufbau. Ergänzend wurden abflusswirksame Strukturen wie Geländeeinschnitte, Entwässerungsgräben und weitere topografische Elemente anhand der hochaufgelösten Drohnenaufnahmen sowie der colorierten Punktwolken identifiziert und erfasst.

Alle relevanten Strukturen wurden anschließend in QGIS digitalisiert und in ein modellgerechtes Format überführt. QGIS diente dabei nicht nur zur Erfassung der Einbauten, sondern kam auch in den weiteren Arbeitsschritten der Datenaufbereitung und Modellparametrisierung zum Einsatz.

Die maßgeblichen Einbauten und erfassten Strukturen sind in der folgenden Abbildung 26 übersichtlich dargestellt.



Abbildung 26: Maßgebliche Einbauten im Projektgebiet.

3.2.2. Abgrenzung des Einzugsgebiets

Mittels Geoinformations-Software wurden die Hangneigungen berechnet und das maßgebliche Einzugsgebiet für die Berechnung abgegrenzt. Anhand der Hangneigungen und des vorhandenen Geländemodells konnten die Einzugsgebietsgrenzen festgelegt bzw. ausgewiesen werden. Dieses Einzugsgebiet wurde in weiterer Folge in der Starkregensimulation berechnet, um so den Oberflächenwasserzufluss aus dem Vorland zu erhalten.

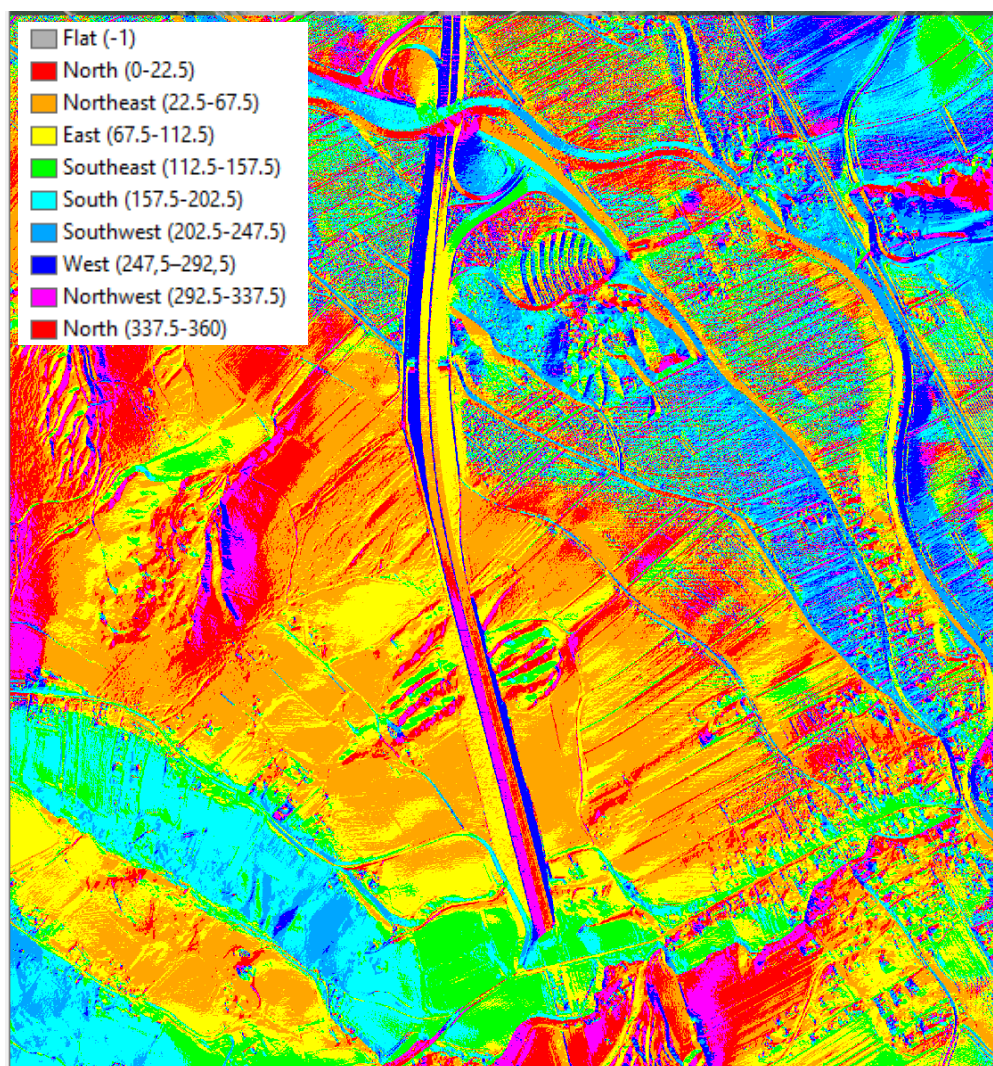


Abbildung 27: Ermittlung der Hangneigungen im Projektgebiet zur Abgrenzung des Einzugsgebietes für Starkregenereignisse



Abbildung 28: Einzugsgebiet für Starkregensimulation, Rot = Berechnung des Vorlandes, Orange = Berechnung der Autobahnflächen.

3.2.3. Niederschlagsdaten

Messdaten des TAWES (teilautomatischen) Stationsnetzes der Geosphere Austria: hohe Messgenauigkeit, aber aufgrund ihrer inhomogenen Verteilung nur bedingt für die kleinräumige Darstellung des Ist-Zustandes geeignet.

Radardaten (AustroControl Wetterradare): grundsätzlich zeitlich (5min) und räumlich (1km x 1km) hochauflösend verfügbar, aber als statistische Abschätzung auf Basis von Radarreflektivitäten eine geringere quantitative Genauigkeit.

INCA System

INCA (Integrated Nowcasting Through Comprehensive Analysis, Haiden et al., 2011) ist ein hochaufgelöstes Analyse- und Nowcastingsystem, das seit Jahren an der Geosphere Austria in Verwendung ist und in nationalen sowie internationalen Projekten weiterentwickelt wurde. INCA ist eine gewichtete Kombination von Radar- und interpolierten Stationsdaten mit Gewichtung auf Basis von klimatologisch ermittelten Abschätzungen der Radar-Güte, korrigiert durch aktuelle Stationsdaten. Aufgrund der komplexen Orographie der Alpen wird eine Höhenkorrektur durchgeführt (Haiden und Pistotnik, 2009). Die Analysen werden mit Hilfe von korrelationsbasierten Verlagerungsvektoren für das

Nowcasting verwendet. Die räumliche Auflösung beträgt 1 km, die zeitliche Auflösung ist je nach Version unterschiedlich und reicht von 5-minütig bis stündlich. Das primäre Einsatzgebiet von INCA erstreckt sich vom Ist-Zustand bis zu einem Prognosehorizont von etwa +6 Stunden (Nowcastingzeitraum).

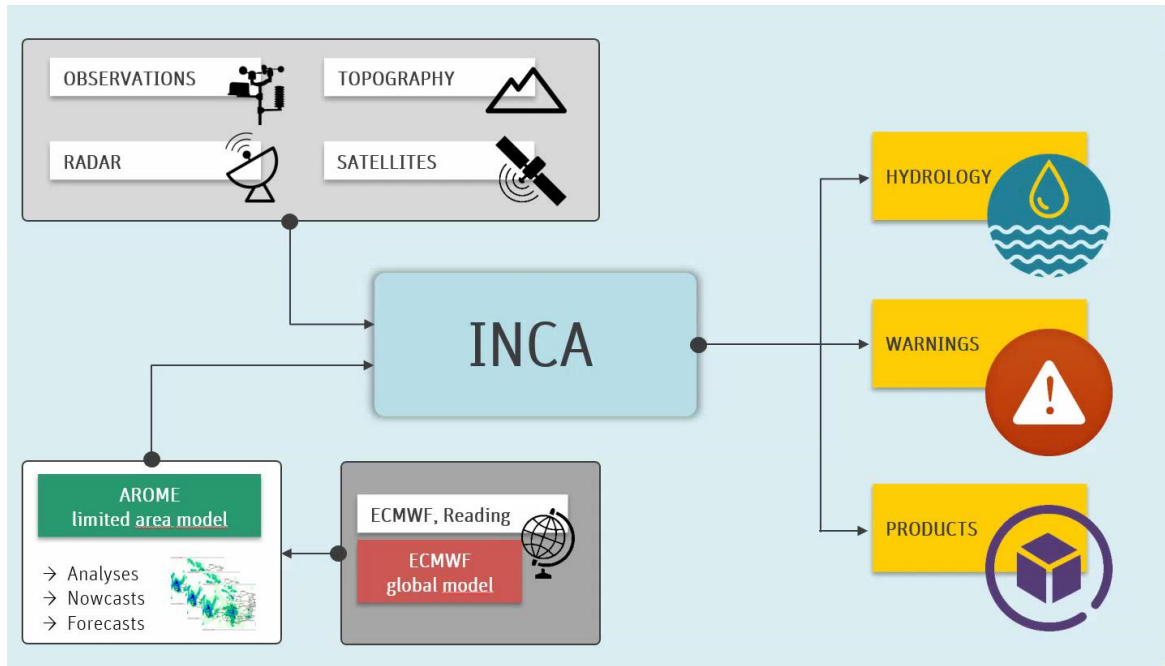


Abbildung 29: Schematischer Ablauf von INCA, Kombination aus Beobachtungsdaten und NWP Prognosen, realtime Anwendungen Hydrologie, Warnungen und andere Produkte für spezifische Nutzer.

Analysis D2 23.04.2018 12:30 UTC (-15min)

Min = 0.00, Max = 23.31, $\mu = 0.06$, $\sigma = 0.49$. $\Delta = 1000m$, Obs = 951.

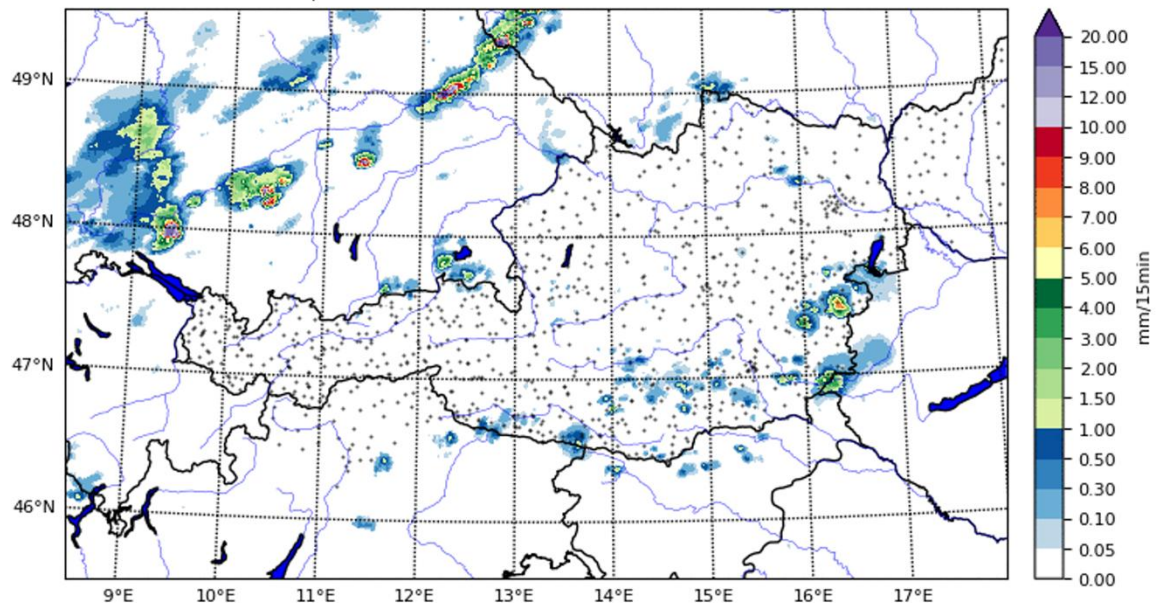


Abbildung 30: Beispiel für eine 15min Analyse + Nowcasts (GIF)

AROME

An der Geosphere Austria ist AROME seit 2014 operationell im Einsatz und bildet heute die Basis für die operationellen NWP-Systeme der Geosphere. Den Kern bildet das deterministische AROME-Aut, welches mit einer Auflösung von 2.5 km acht Mal täglich bis +60 Stunden über Zentraleuropa gerechnet wird. AROME-Aut ist mit dem globalen IFS HRES des EZMWF gekoppelt, von dem es die lateralen Randbedingungen bezieht. Die Initialisierung der Atmosphäre erfolgt mittels einer 3D-Var-Datenassimilation konventioneller (Synop-Bodenstationen, Radiosonden und AMDAR Flugzeugmessungen) sowie Satellitenbeobachtungen (SEVIRI, AMSU-A und -B, MHS, IASI Radianzen, ASCAT Scatterometer und MSG Atmosphärische Bewegungsvektoren). In fast gleicher Konfiguration wird seit November 2019 auch das Ensemblesystem C-LAEF (Convection-permitting – Limited Area Ensemble Forecasting system) gerechnet, welches vier Mal täglich mit 17 Member läuft, um probabilistische Vorhersagen zu ermöglichen. Aktuell ist gerade ein Upgrade des CLAEF Systems in Arbeit, welches ab Jänner 2026 mit einer räumlichen Auflösung von 1km operativ in Betrieb gehen wird.

Für die Wahl der geeigneten Datensätze sind folgende Überlegungen maßgeblich:

- Welche Datensätze erfüllen die inhaltlichen Vorraussetzungen?
- Welche Regionen/Straßenabschnitte?
- Welche Zeiträume?
- Analysen + Prognosen?
- Wenn Prognosen, welche Vorhersagehorizonte?
- Wenn Prognosen, inkl. Unsicherheiten? (Ensembles)
- Format?

3.2.4. Bemessungsregen nach EHYD

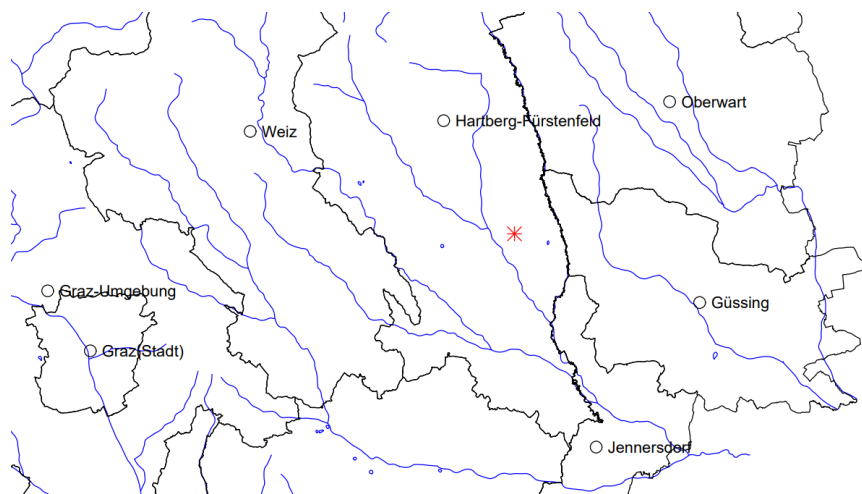
Für den untersuchten Autobahnabschnitt wurde der Bemessungsniederschlag 2020 gemäß eHYD (Quelle: <https://ehyd.gv.at/>) herangezogen. Maßgeblich hierfür ist der Gitterpunkt 5007, der die relevanten Niederschlagsintensitäten für das Projektgebiet abbildet. Die Auswahl der anzusetzenden Dauerstufen erfolgte in Abstimmung mit dem Konsortialpartner Geosphere Austria, um eine konsistente hydrologische Grundlage sicherzustellen.

Bei der Wahl der Starkregenereignisse wurde zusätzlich das reale Regenereignis vom 01.06.2025 – 07.06.2025 berücksichtigt, welches im Rahmen der Starkregensimulationen für die Validation der Ergebnisse herangezogen wurde (siehe 3.4.3).

Für die Starkregensimulationen wurden folgende Dauerstufen definiert:

- 5-jährlich / 5 Minuten
- 5-jährlich / 15 Minuten
- 5-jährlich / 15 Minuten (50% abgemindert)
- 100-jährlich / 30 Minuten

Die folgende Grafik visualisiert die Lage des Gitterpunktes, sowie die gewählten Intensitäten und deren zeitliche Verteilung.



Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm]
 Gitterpunkt: 5007; (M34, R: -22108m, H: 5226212m)
 Flächenabminderung: keine

Wiederkehrzeit (T)	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
Dauerstufe (D)											
5 Minuten	8.1	9.8	10.9	12.3	14.3	16.3	17.0	17.5	19.1	20.3	21.1
	7.9	9.6	10.7	12.0	13.9	15.7	16.4	16.9	18.3	19.4	20.2
	7.7	9.3	10.4	11.7	13.4	15.0	15.6	16.1	17.3	18.3	19.0
10 Minuten	12.2	15.3	17.0	19.3	22.4	25.4	26.5	27.5	30.2	32.4	33.9
	11.9	15.0	16.6	18.8	21.9	24.8	25.8	26.7	29.1	31.1	32.5
	11.6	14.6	16.2	18.3	21.3	24.2	25.1	25.8	28.0	29.7	30.9
15 Minuten	14.7	18.6	21.0	23.9	27.8	31.8	33.1	34.1	37.6	40.4	42.4
	14.3	18.1	20.5	23.3	27.1	31.0	32.3	33.2	36.4	38.9	40.7
	14.0	17.7	20.0	22.7	26.5	30.3	31.5	32.4	35.3	37.5	39.0
20 Minuten	16.4	21.0	23.8	27.3	31.9	36.5	38.0	39.3	42.7	45.5	47.8
	16.0	20.5	23.2	26.6	31.1	35.6	37.1	38.4	41.6	44.3	46.5
	15.7	20.0	22.7	26.0	30.3	34.8	36.2	37.5	40.6	43.2	45.3
30 Minuten	18.9	24.6	27.9	32.0	37.8	43.5	45.3	46.7	51.0	54.3	56.5
	18.4	24.0	27.1	31.2	36.8	42.4	44.1	45.5	49.7	52.9	55.0
	18.0	23.4	26.5	30.5	36.0	41.4	43.1	44.4	48.6	51.7	53.8
45 Minuten	21.4	28.0	31.9	36.7	43.4	50.1	52.1	54.0	58.8	62.6	65.6
	20.8	27.2	31.1	35.7	42.2	48.8	50.8	52.6	57.2	61.0	63.9
	20.3	26.6	30.4	35.0	41.3	47.7	49.7	51.5	56.0	59.7	62.5
60 Minuten	23.0	30.3	34.6	39.8	47.1	54.3	56.8	58.6	64.1	68.3	71.1
	22.4	29.5	33.6	38.7	45.8	52.8	55.2	57.0	62.3	66.4	69.1
	21.9	28.9	32.9	37.9	44.8	51.7	54.1	55.8	61.0	65.0	67.7
90 Minuten	25.5	33.5	38.1	43.9	51.8	59.7	62.4	64.4	70.4	75.3	79.1
	24.8	32.5	37.0	42.6	50.4	58.0	60.7	62.5	68.4	73.0	76.3
	24.3	31.9	36.3	41.8	49.4	56.9	59.5	61.3	67.0	71.4	74.4

Abbildung 31: Lage und Intensitäten des Gitterpunktes gem. EHYD-Bemessungsniederschlag (Quelle: <https://ehyd.gv.at/>, Stand 2020).

3.3. Methodik

3.3.1. Allgemeines

Für die Erstellung des hydraulischen Modells wurden QGIS, HydroAS MapWorks sowie die Surfacewater Modeling Software (SMS) eingesetzt. QGIS diente der Aufbereitung und strukturierten Bereitstellung aller relevanten Geodaten. Mit MapWorks erfolgte der automatisierte Aufbau des hydraulischen 2D-Modells, einschließlich der Zuordnung von Materialklassen und hydraulischen Randbedingungen.

Die anschließende Qualitätsprüfung und Netzoptimierung des Modells wurden in SMS durchgeführt. Die eigentliche Simulation erfolgte mit HydroAS, einer Software zur zweidimensionalen Modellierung von Fließgewässern. Sie ermöglicht die Abbildung

komplexer Strömungsverhältnisse auf Basis der numerischen Lösung der 2D-tiefengemittelten Flachwassergleichungen mittels Finite-Volumen-Diskretisierung. Ein explizites Zeitschrittverfahren gewährleistet eine zeitlich präzise Darstellung des Wellenablaufs. Die Ergebnisverarbeitung wurde wiederum in SMS und QGIS vorgenommen.

Überlegungen zur Definition von Starkniederschlag

Problematik:

- Lokaler Starkregen gilt mitunter als „schwer bis nicht vorhersagbar“
- Schadenspotenzial von Starkregen ist abhängig von Intensität und Dauer
- Oft kein rein meteorologisches, sondern hydro-meteorologisches Phänomen

Objektive Starkregen-Definition:

- Macht Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer miteinander vergleichbar
- Wussow (1922), später überarbeitet von Nachtnebel (2003):

<p> <i>„Starkregen“</i>: $P \geq \sqrt{5t}$ </p> <p> <i>„Platzregen“</i>: $P \geq 1.5 \cdot \sqrt{5t}$ </p> <p> <i>„Wolkenbruch“</i>: $P \geq 2 \cdot \sqrt{5t}$ </p> <p> $P \dots$ Niederschlag $\cdot [mm]$ </p> <p> $t \dots$ Zeit $\cdot [min]$ </p>

Formel 1: Objektive Starkregen-Definition nach Wussow¹, überarbeitet von Nachtnebel²

¹ Wussow, 1922, S.39

² Nachtnebel, 2003, S.376

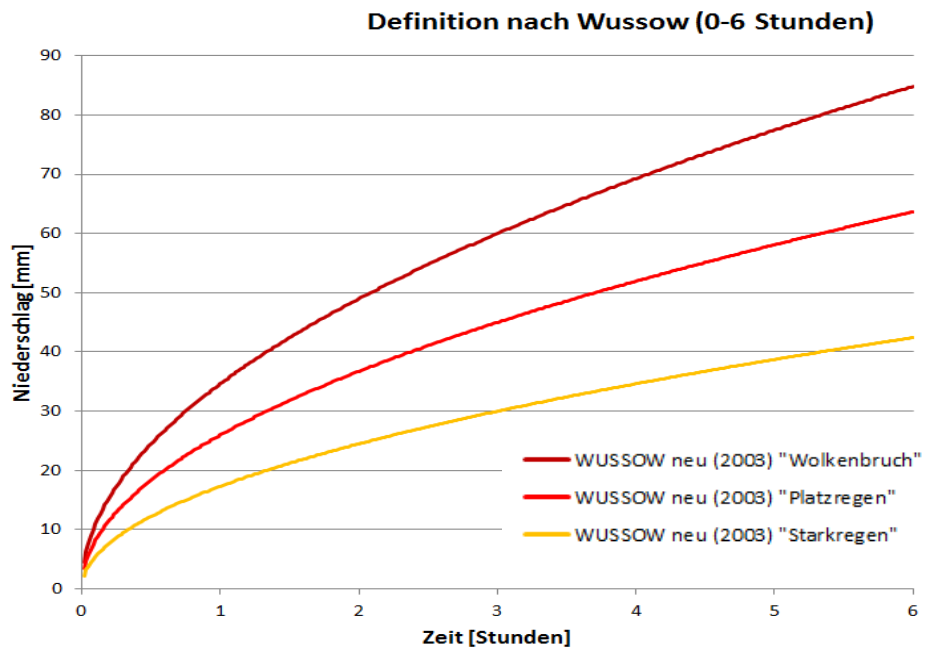


Abbildung 32: 3 Arten von Extremwetterereignissen nach Wussow (0-6 Stunden) (Grafik) ³

Zeitraum [Stunden]	„Starkregen“ [mm]	“Platzregen” [mm]	“Wolkenbruch” [mm]
0.25	9	13	17
0.5	12	18	25
1	17	26	35
2	24	37	49
3	30	45	60
6	42	64	85
12	60	90	120
24	85	127	170

Tabelle 3: 3 Arten von Extremwetterereignissen nach Wussow (0-6 Stunden) in tabellarischer Form (zu Abbildung 32).

³ Wussow, 1922, S.39

3.3.2. Vorbereitung Modellaufbau

Für die Abbildung des großräumigen Vorlandzuflusses wurden die Geodaten des Landes Steiermark herangezogen und zu einem flächendeckenden Vorlandmodell verarbeitet. Die bereitgestellten Daten weisen eine Rasterauflösung von 1 m auf und bilden die Grundlage für die übergeordnete Starkregensimulation.

Parallel dazu wurde die finale Laserscan-Punktwolke mittels Mittelwertmethode ausgedünnt, um ein homogenes digitales Geländemodell mit definierter Rasterweite zu erzeugen. Dabei wurden alle Punkte innerhalb eines $0,25 \times 0,25$ m bzw. $0,10 \times 0,10$ m Rasters zusammengefasst und der jeweilige Höhenmittelwert berechnet. Die Ausdünnung erfolgte mit CloudCompare.

Für die weiteren Simulationsschritte wurden folgende Varianten erstellt:

- Variante 1: Rasterweite 0,25 m
- Variante 2: Rasterweite 0,10 m

Im Anschluss wurde ein Detailmodell für den Autobahnabschnitt und das unmittelbar angrenzende Vorland aufgebaut, basierend auf den hochaufgelösten Drohnendaten. Auch dieses Detailmodell wurde in zwei Auflösungsvarianten umgesetzt:

- Variante 1: 0,25 m
- Variante 2: 0,10 m

Diese Modellgrundlagen bilden den Ausgangspunkt für die anschließende Starkregensimulation.

3.4. Modellaufbau

Der Aufbau des Modells für die Starkregensimulation erfolgte in den Programmen QGIS / MapWorks und SMS.

3.4.1. Geodatenaufbereitung in QGIS

Im ersten Schritt wurden sämtliche relevanten Eingangsdaten in QGIS aufbereitet. Dies umfasste:

- Import und Vereinheitlichung der Geländedaten (DGM, DOM)
- Integration vorhandener Geobasisdaten (Orthofotos, Infrastrukturobjekte)
- Aufbereitung hydrologisch und hydraulisch relevanter Linien- und Flächenobjekte (Bauwerke, Verkehrsflächen)
- Digitalisierung fehlender Strukturelemente
- Ableitung materialbezogener Layer (z. B. Rauheiten, hydrologische Bodenklassen)
- Export der Daten in eine MapWorks-kompatible Geodatenbankstruktur

Die vorbereiteten Layer bildeten die Grundlage für den anschließenden Modellaufbau.

3.4.2. Modellaufbau mit HydroAS MapWorks

Die Erstellung des 2D-Modells erfolgte automatisiert in MapWorks. Hierbei wurden:

- die QGIS-Daten in die MapWorks-Datenbank importiert
- das Berechnungsnetz (Raster oder unregelmäßiges Netz) erzeugt
- Höhenwerte aus dem DGM auf die Netzknoten übertragen
- Materialklassen und Rauheiten zugewiesen
- hydraulische Randbedingungen definiert (Niederschlagsraster, Zuläufe, Abflüsse,)
- die vollständige Modellstruktur für HydroAS generiert

MapWorks stellte damit die konsistente Modellgrundlage für die Simulation bereit.

3.4.3. Netzprüfung und -anpassung in SMS

Zur Qualitätssicherung wurde das erzeugte Modell in SMS importiert und geprüft. Typische Anpassungen umfassten:

- Kontrolle der Netzgeometrie und der Elementqualität
- Nachbearbeitung kritischer Bereiche (Brücken, Engstellen, Steigungen)

- lokale Netzverfeinerungen (z.B. Mittelleitwand) und Glättungen
- Prüfung der Randbedingungen und Abflusswege

SMS diene insbesondere zur Optimierung des Berechnungsnetzes in Bereichen mit hoher hydraulischer Sensitivität.

3.4.4. Randbedingungen / Parameter

Für eine Abbildung realitätsnahe der Abflussprozesse wurden im Modell unterschiedliche Rauigkeiten entsprechend der vorhandenen Untergrundverhältnisse (Straßenflächen, Vorland, Vegetation, Waldbereiche) definiert. Diese Rauigkeiten beeinflussen maßgeblich die Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und die Ausbildung der oberflächlichen Abflusswege im Projektgebiet.

Als weiterer wesentlicher Parameter wurde der Bemessungsregen nach eHYD angesetzt. Die Niederschlagsintensitäten wurden je nach gewählter Dauerstufe angepasst und flächendeckend auf das maßgebliche Einzugsgebiet aufgebracht.

Zusätzlich wurden die Einlaufschächte und Rohrleitungen im Bereich der Autobahn als hydraulisch relevante Randbedingungen berücksichtigt. Für eine korrekte Abbildung der maximal möglichen Ableitungsleistungen wurden die Abflusskapazitäten der Entwässerungselemente auf Basis von Rohrdurchmesser, Gefälle und Verlustbeiwerten berechnet. Diese Kapazitäten wurden anschließend als Randbedingungen in das Simulationsmodell integriert, um naturgetreue Abflussprozesse abzubilden.

3.5. Optimierung und Validierung des Simulationsmodells

Im Rahmen einer Modelloptimierung wurden zwei unterschiedliche Rasterauflösungen des digitalen Geländemodells – 0,10 m und 0,25 m – hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse überprüft. Dabei erfolgte sowohl ein Vergleich der hydraulischen Ergebnisgenauigkeit als auch eine Bewertung der Rechenzeiten und Modelleffizienz.

Da die Forschungsfragestellung maßgeblich auf die Aquaplaninggefährdung abzielt, wurde zusätzlich geprüft, ob mit den beiden Rasterweiten Spurrillen im Fahrbahnbereich identifiziert und im Modell abgebildet werden können. Dies konnte für beide Auflösungen nicht nachgewiesen werden.

Die Analyse ergab folgende Schlussfolgerungen:

- Eine Rasterauflösung von 0,25 m ist für Starkregensimulationen im Projektgebiet ausreichend.
- Eine höhere Auflösung von 0,10 m führt zu keinen erkennbar genaueren hydraulischen Ergebnissen.
- Spurrillen auf der Fahrbahn konnten weder bei 0,10 m noch bei 0,25 m Auflösung erkannt werden, somit können in diesen Bereichen auch keine exakteren Modellergebnisse generiert werden.
- Spurrillen auf der Fahrbahn konnten weder bei 0,10 m noch bei 0,25 m Auflösung erkannt werden, somit können in diesen Bereichen auch keine exakteren Modellergebnisse generiert werden.
- Für die weiteren Simulationsstufen wird daher eine Rasterweite von 0,25 m verwendet.

4. STARKREGENSIMULATION

Die Starkregensimulation wurde in vier separate Simulationsstufen unterteilt, um die unterschiedlichen Gefährdungsszenarien differenziert analysieren zu können. Dadurch lassen sich sowohl der reine Vorlandzufluss, der direkte Starkregen auf die Autobahnflächen als auch die Kombination beider Einwirkungen getrennt bewerten und gegenüberstellen.

Aus Gründen der Recheneffizienz wurden ab der Simulationsstufe 2 die Berechnungen mit dem hochaufgelösten Modell mit einer Rasterweite von 0,25 m durchgeführt. Diese Variante ermöglicht deutlich kürzere Rechenzeiten, da das großflächige Einzugsgebiet aus der Vorlandsimulation nicht bei jedem Modelllauf mitberechnet werden musste. Zusätzlich wurde das Simulationsmodell flächenmäßig auf die Autobahn mit einem Vorlandstreifen reduziert und berechnet, was die Effizienz wesentlich steigert. Stattdessen wurde der Vorlandabfluss dem hydraulischen Modell als Ganglinie am Modellrand hinzugegeben.

Die einzelnen Simulationsstufen und deren jeweilige Zielsetzungen werden in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

4.1. Simulationsstufen

Simulationsstufe 1 – Berechnung Vorland (Genauigkeit 1,00 m)

In der ersten Simulationsstufe wurde das gesamte maßgebliche Einzugsgebiet mit den definierten Starkregenereignissen berechnet. Dadurch konnten die großräumigen Abflussprozesse sowie jene Fließwege identifiziert werden, die direkt auf die Autobahn einwirken. Diese Informationen sind wesentlich für die Bewertung der Gefährdung durch Vorlandzufluss und bilden eine zentrale Grundlage für die nachfolgenden, höher aufgelösten Modellvarianten.

Die Simulation zeigte bereits, dass im Projektgebiet eine partielle Gefährdung der Autobahnflächen durch Vorlandzufluss infolge von Starkregenniederschlägen besteht.

An den Abflussgräben, die in Richtung Autobahn entwässern, wurden die resultierenden Oberflächenabflüsse als Ganglinien aus dem Modell extrahiert. Diese Ganglinien (in der

nachfolgenden Abbildung in Rot dargestellt) dienen als Zuflussrandbedingungen für die Simulationsstufen 2 und 4.

Die Modellläufe wurden für die Dauerstufen 5-jährlich / 5 Minuten, 5-jährlich / 15 Minuten sowie 100-jährlich / 30 Minuten durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der gewählten Niederschlagsparameter findet sich in Kapitel 3.2.3.

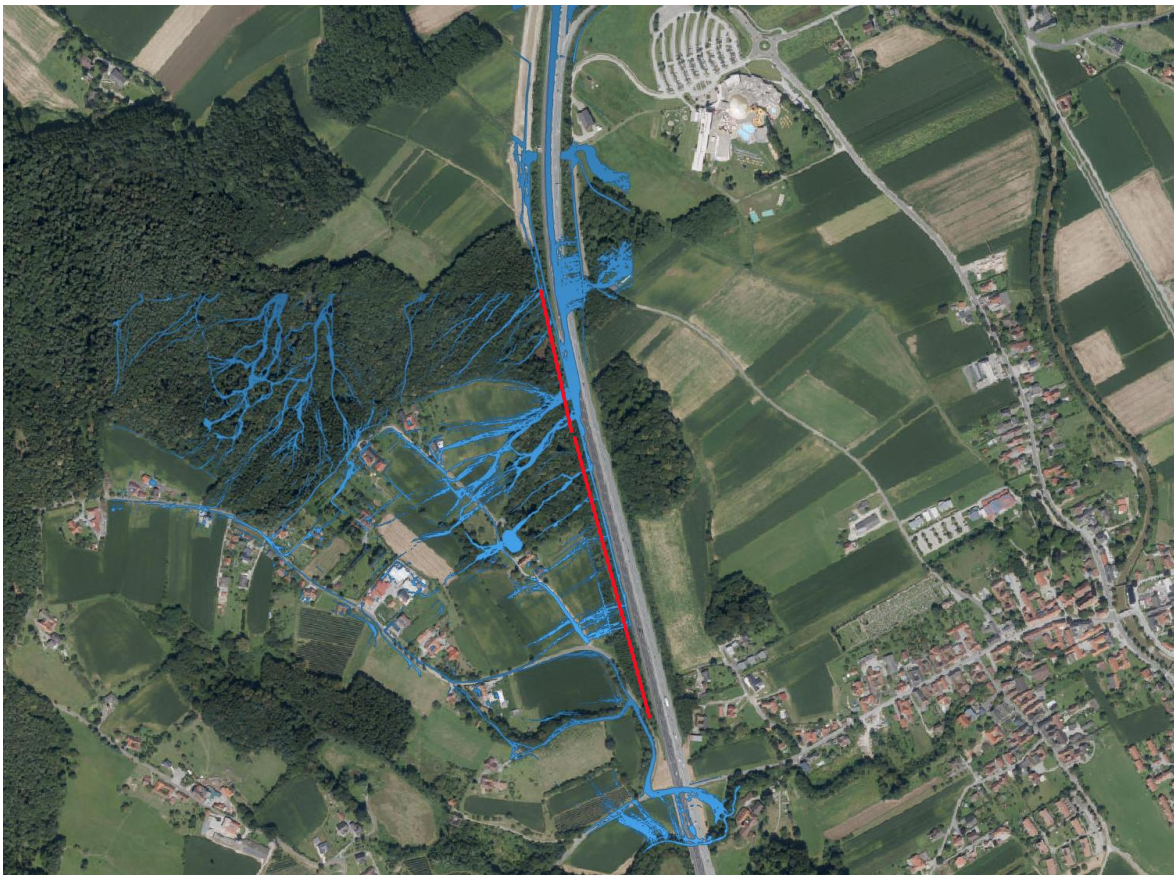


Abbildung 33: Überflutungsflächen / Abfluss durch Starkregen aus dem Vorland - Simulationsstufe 1 (100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis. - Rote Linie: Entnahme Zuflussganglinien für Simulationsstufe 2 und 4.

Simulationsstufe 2 - Vorlandabfluss auf Autobahn (Genauigkeit 0,25 m)

Ab der zweiten Simulationsstufe kam das hochaufgelöste Simulationsmodell mit einer Rasterweite von 0,25 m zum Einsatz. In dieser Modellvariante wurden zudem alle maßgeblichen Einbauten berücksichtigt, einschließlich Mittelleitwand, Einlaufschächten und Entwässerungsleitungen. Ziel dieser Stufe ist die detaillierte Analyse der Gefährdung der Autobahn durch Vorlandzufluss.

Die in der ersten Simulationsstufe ermittelten Abflussganglinien wurden als Zuflussrandbedingungen an den Modellrändern angesetzt. Anschließend erfolgten die Starkregensimulationen erneut für die Dauerstufen 5-jährlich / 5 Minuten, 5-jährlich / 15 Minuten sowie 100-jährlich / 30 Minuten.

Auf dieser Basis konnten die Überflutungsflächen auf der Autobahn im zeitlichen Verlauf dargestellt und Risikobereiche infolge des Vorlandabflusses identifiziert werden.



**Abbildung 34: Überflutungsflächen durch Vorlandabfluss auf Autobahn - Simulationsstufe 2
(100-jährlich / 30-minütiges Starkregenereignis.)**

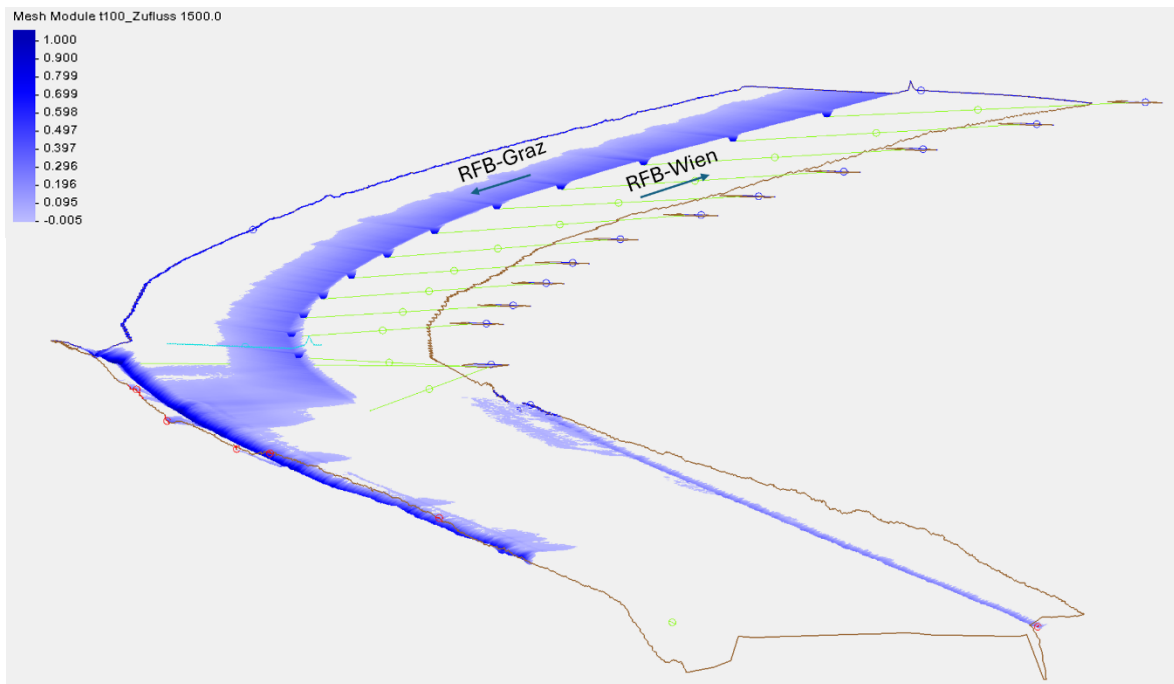


Abbildung 35: Vorlandabfluss auf Autobahn- Ausschnitt Simulationsmodell Stufe 2, Wassertiefen auf den Autobahnflächen.

Simulationsstufe 3 - Beregnung Autobahn (Genauigkeit 0,25 m)

In der dritten Simulationsstufe wurde ausschließlich der Autobahnabschnitt samt einem schmalen Vorlandstreifen beregnet, ohne einen Vorlandzufluss zu berücksichtigen. Für diese Modellierung kam erneut das hochaufgelöste Simulationsmodell (0,25 m) zum Einsatz. Ziel dieser Stufe war die detaillierte Analyse der oberflächlichen Abfluss- und Überflutungssituation unmittelbar auf den Fahrbahnen.

Die Ergebnisse zeigen, dass erhöhte Wassertiefen insbesondere dort auftreten, wo Querneigungswechsel vorhanden sind. Diese Bereiche stellen potenzielle Gefährdungs- und Risikozonen dar, da sich hier das Oberflächenwasser verstärkt ansammelt bzw. länger abfließt.

Die Simulationen wurden, wie in den vorangegangenen Stufen, für die Dauerstufen 5-jährlich / 5 Minuten, 5-jährlich / 15 Minuten sowie 100-jährlich / 30 Minuten durchgeführt.

Mit der angewandten Methodik können Wassertiefen ab 0,5 cm präzise abgebildet werden. Die ermittelten Wassertiefen wurden über den zeitlichen Verlauf analysiert und in zwei Klassen eingeteilt:

- 0,5–1,0 cm
- > 1,0 cm

Die zeitliche Entwicklung dieser Wassertiefen ermöglicht die Ableitung unterschiedlicher Warnstufen, die im Rahmen des Projektes als Risikozonen definiert wurden. Die Beschreibung der Risikoklassen erfolgt in den Kapiteln 4.2 und 4.2.5. Im Arbeitspaket 4 werden diese Warninformationen weiterverarbeitet und so aufbereitet, dass sie künftig an Fahrzeuge in betroffenen Straßenabschnitten mit Starkniederschlägen übermittelt werden können.



**Abbildung 36: Überflutungsflächen durch Starkregen auf Autobahn - Simulationsstufe 3
(100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis)**

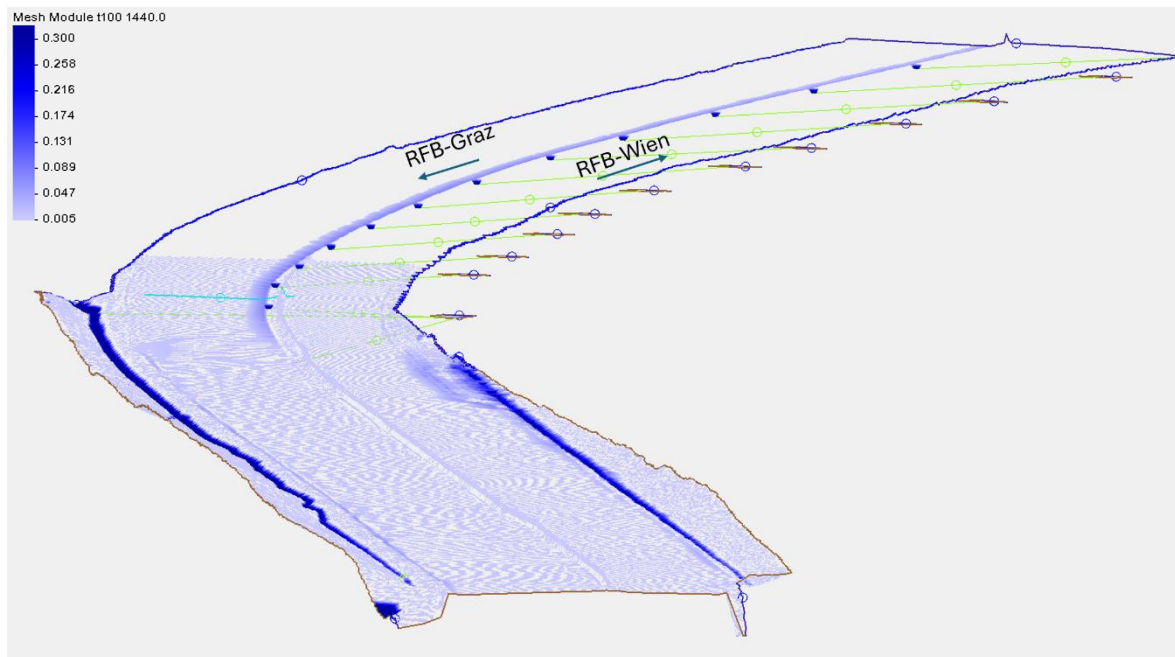


Abbildung 37: Wassertiefen durch Starkregen auf Autobahn - Ausschnitt Simulationsmodell Stufe 3, Wassertiefen auf den Autobahnflächen.

Simulationsstufe 4 - Kombination Beregnung Autobahn inkl. Vorlandabfluss (Genauigkeit 0,25 m)

In der vierten Simulationsstufe wurde eine Kombination der Szenarien aus Simulationsstufe 2 und 3 durchgeführt. Dabei wurden sowohl der Vorlandabfluss als auch die direkte Beregnung der Autobahnflächen gleichzeitig im hochaufgelösten Detailmodell berücksichtigt. Dieses kombinierte Szenario bildet ein maximales Abflussszenario für den betrachteten Autobahnabschnitt ab.

Die Modellierung zeigt eine komplexe Gefährdungslage für Verkehrsteilnehmer:innen, da in diesem Szenario große Teile der Fahrbahn von erhöhten Wassertiefen betroffen sind. Dies führt zu einer deutlichen Einschränkung der Fahrbahnnutzbarkeit (Richtungsfahrbahn Graz) und stellt eine potenzielle Gefährdung bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten dar.

In dieser Simulationsstufe können Gefährdungen aus dem Vorland genau simuliert und dargestellt werden. Die maßgeblichen Problemstellen im Vorland sollen im Rahmen zukünftiger Maßnahmen gezielt entschärft werden, sodass ein derartiger gleichzeitiger Zufluss nicht eintreten kann. Zudem handelt es sich hierbei weniger um eine klassische

Aquaplaninggefahr, sondern vielmehr um ein Risiko eines Hangwasserzuflusses mit möglichem Geschiebetransport. Mit der gegenständlichen Vorgehensweise können derartige Gefahrenstellen jedoch exakt aufgezeigt und in weiterer Folge gelöst werden.

Die Simulationen wurden wiederum für die Dauerstufen 5-jährlich / 5 Minuten, 5-jährlich / 15 Minuten und 100-jährlich / 30 Minuten durchgeführt.

Diese kombinierte Betrachtung liefert lagegenaue Gefahrenstellen für einen Hangwasserzutritt auf die Autobahn, woraus Maßnahmen für eine Sicherung der Autobahn abgeleitet und entschärft werden können.



Abbildung 38: Überflutungsflächen durch Kombination Starkregen und Vorlandabfluss auf Autobahn - Simulationsstufe 4 (100-jährlich / 30-minütiges Starkregenereignis).

4.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsstufen wurden analysiert, dabei konnten Gefährdungen durch einen Vorlandabfluss und durch reinen Starkniederschlag aufgezeigt werden.

4.2.1. Gefährdung durch Vorlandzufluss

In den Starkregensimulationen der Simulationsstufen 1, 2 und 4 wurde im Bereich von Straßenkilometer 127,35 der A2 Süd Autobahn eine deutliche Gefährdung durch Vorlandabfluss festgestellt. Die Modellierung zeigt, dass bei intensiven Niederschlagsereignissen Wasser aus dem angrenzenden Hang- bzw. Vorlandbereich unkontrolliert auf die Fahrbahn zufließen kann.

Diese Gefährdung wurde bereits im Zuge eines realen Ereignisses vom 1.–6. Juni 2023 beobachtet, bei dem ein entsprechender Vorlandabfluss tatsächlich auf die Autobahn gelangte. Die Simulationen bestätigen dieses Abflussverhalten eindeutig und erlauben eine detaillierte Darstellung der betroffenen Flächen und Abflusswege.

Auf Basis der Ergebnisse wurden Empfehlungen abgeleitet, um zukünftig eine schadlose Ableitung des Vorlandabflusses sicherzustellen. Dies umfasst insbesondere bauliche oder geländetechnische Maßnahmen, die den Zufluss auf die Fahrbahn verhindern und kontrolliert ableiten sollen, um eine Gefährdung auf der Autobahn zu verhindern.

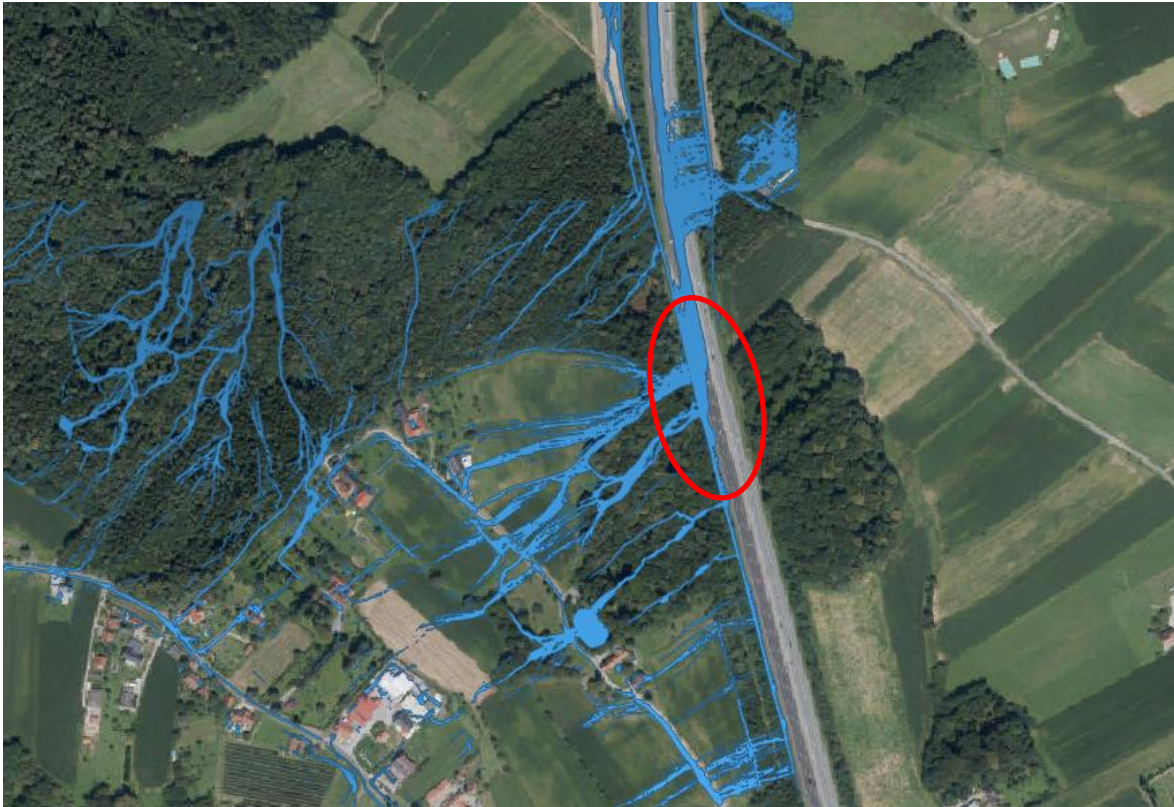


Abbildung 39: Vorlandabfluss durch Starkregen auf Autobahn – Gefahrenstelle bei Straßen-km 127,35 A2 Süd Autobahn.

4.2.2. Maßnahmenempfehlung

Um einen schadlosen Vorlandabfluss zu gewährleisten, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Ertüchtigung und Vergrößerung des Abflussgrabens entlang der Richtungsfahrbahn Graz
- Regelmäßige Wartung bzw. Entfernung des Bewuchses im Abflussquerschnitt

Temporäre Sicherungsmaßnahmen bis zur Umsetzung der Maßnahmen:

- Aufstellen von Betonleitwänden entlang des Abflussgrabens im Bereich des Vorlandzuflusses (Straßen-km 127,21 – km 127,54), um einen schadlosen Abfluss Richtung Norden entlang des bestehenden Abflussgrabens zu gewährleisten.

4.2.3. Gefährdung durch Starkregen Autobahn

Für die Analyse der Starkregenwirkung auf die Fahrbahn wurden zwei maßgebliche Niederschlagsereignisse untersucht:

- 115 mm/h (100-jährlich / 30-minütig)
- 56 mm/h (5-jährlich / 15-minütig, 50 % abgemindert)

Die Simulationen zeigen, dass sich – abhängig von der Niederschlagsintensität – innerhalb weniger Minuten ein flächiger Wasserfilm von 0,5–1,0 cm auf dem betrachteten Autobahnabschnitt ausbildet. In der Folge entstehen oberflächliche Fließwege auf beiden Richtungsfahrbahnen, insbesondere entlang der tiefsten Fahrbahnbereiche (Fahrbahntwässerung) sowie jeweils in den Bereichen der Querneigungsänderungen.

Mit zunehmender Regendauer steigen die Wassertiefen weiter an, bis Wasserfilmdicken über 1,0 cm erreicht werden und sich ein nahezu stationärer Wasserspiegel einstellt. Nach Beendigung der Beregnung nimmt die Wassertiefe rasch ab, der großflächige Wasserfilm ist nach etwa 60 Sekunden nahezu vollständig abgeflossen. Die Fließwege entlang der Fahrbahnränder bleiben jedoch noch weiterhin aktiv, bis der Abfluss durch die vorhandene Fahrbahntwässerung vollständig abgeklungen ist.

Diese Daten werden in weiterer Folge zu Starkregen-Risikozonen umgewandelt, welche im Arbeitspaket 4 weiterverarbeitet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Risikozonen erfolgt im nächsten Kapitel.

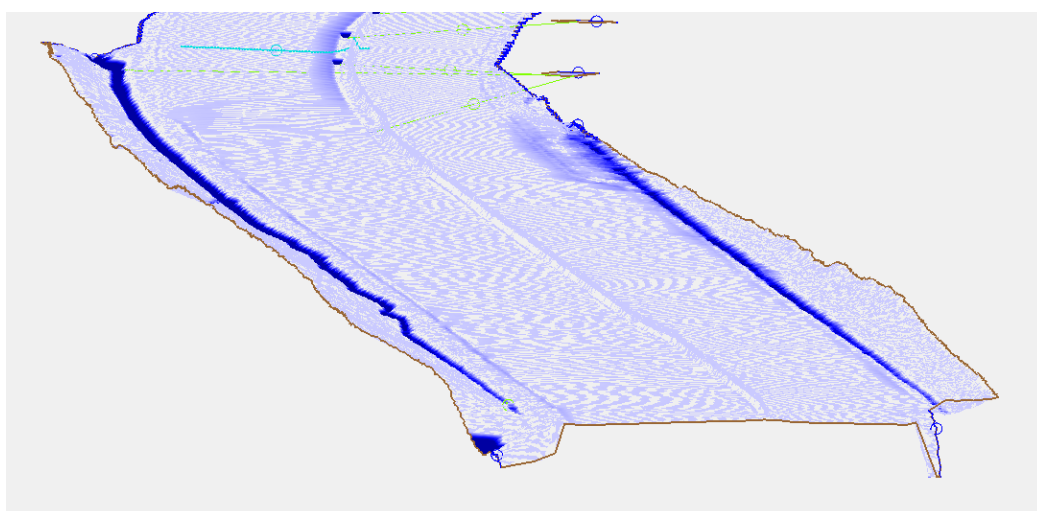


Abbildung 40: Vollständig benetzter Autobahnabschnitt inkl. Abflussgräben durch Beregnung.

4.2.4. Maßnahmenempfehlung

Bei Neubau- und Sanierungsprojekten auf Autobahnen soll zukünftig ein Starkregenereignis (Überlastfall) in die Dimensionierung der Fahrbahntwässerung, sowie der seitlichen Abflussgräben miteinbezogen werden.

4.2.5. Risikozonen Starkregen

Dauerstufe 30-Minuten, 100-jährlich (Stundenniederschlag 115mm)

Für eine zukünftige automatisierte Warnungsgenerierung für Verkehrsteilnehmer:innen mussten die Ergebnisdaten der Starkregensimulation in ein weiter verarbeitbares Format umgewandelt werden.

Hierzu fanden mit dem Konsortialpartner Salzburg Research Abstimmungen statt und es wurden auf Grundlage der Ergebnisse der Starkregensimulation Risikozonen entwickelt, welche die Gefährdungsbereiche anhand ihrer zeitlichen Entwicklung und flächenmäßigen Ausdehnung abbilden. Während die räumlichen Ausdehnungen der Risikozonen bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten ähnlich sind, unterscheiden sie sich in ihrer zeitlichen Ausprägung.

In der folgenden Tabelle sind die Zeitschritte der jeweiligen Risikozone, sowie eine Info über die flächenmäßige Ausdehnung der Risikozone dargestellt. In den Abbildungen sind die Risikozonen ausschnittsweise dargestellt.

Beregnung Autobahn 30 min 100 jährlich (110 mm/h)		
t [sec]	Info	Datei
0	Start Beregnung	-
180	Wasserfilm 0.5 cm - bis 1 cm auf gesamter Autobahn	t_0180.geojson
240	Bildung Fließwege > 1cm	t_0240.geojson
300	Zunahme	t_0300.geojson
360	Zunahme	t_0360.geojson
420	Zunahme	t_0420.geojson
600	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0600.geojson
660	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0660.geojson
660-1800	Gleichbleibender Wasserspiegel	-
1800	Ende Beregnung	t_1800.geojson
1860	Abnahme	t_1860.geojson
1920	Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme Fließwege > 1cm	t_01920.geojson
2520	Wasser aus Modellbereich abgeflossen	-

Tabelle 4: Details zu den Risikozonen - Beregnung 100-jährliche / 30-Minuten.



**Abbildung 42: Risikozone – Wasserfilm
gesamte Fahrbahn > 0,5 cm – 1,0 cm,
Zeitschritt 180 Sekunden.**



Die max. Wassertiefen
befinden sich im Bereich
Fahrbahntwässerung
und im
Bereich der

**Abbildung 41: Risikozone maximale
Ausdehnung – Wasserfilm gesamte
Fahrbahn > 1,0 cm, Zeitschritt 600
Sekunden.**



Abbildung 44: Detail der Risikozone maximale Ausdehnung – Wasserfilm gesamte Fahrbahn > 1,0 cm, Zeitschritt 600 Sekunden.



Abbildung 43: Risikozone nach Ende Beregnung – Wasserfilm gesamte Fahrbahn am Abklingen, Zeitschritt 1800 Sekunden.



Abbildung 45: Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme der Fließwege > 1 cm, Zeitschritt 1920 Sekunden.

Dauerstufe 15-Minuten, 5-jährlich (Stundenniederschlag 115mm)

In der folgenden Tabelle 5 ist eine Übersicht über die Zeitschritte und eine Info für die Dauerstufe

5-jährlich / 15-Minuten dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die zeitliche Ausdehnung der Risikozonen geringer ist, da die Niederschlagsdauer lediglich 15 Minuten beträgt. So erhöht sich beispielsweise die Dauer, bis der Wasserfilm auf der gesamten Fahrbahn verteilt ist.

Die flächenmäßige Ausdehnung für die Warnungsgenerierung ist gleichbleibend, da der Starkregen in der Simulation wiederum auf der gesamten Autobahn angesetzt wurde. Daher wurde in diesem Kapitel auf Abbildungen der Risikozonen verzichtet.

Berechnung Autobahn (56 mm/h)		
t [sec]	Info	Datei
0	Start Berechnung	-
420	Wasserfilm 0.5 cm - bis 1 cm auf gesamter Autobahn	t_0420.geojson
480	Bildung Fließwege > 1cm	t_0480.geojson
540	Zunahme	t_0540.geojson
600	Zunahme	t_0600.geojson
660	Zunahme	t_0660.geojson
720	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0720.geojson
780	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0780.geojson
840-900	Gleichbleibender Wasserspiegel	-
900	Ende Berechnung	t_0900.geojson
960	Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme Fließwege > 1cm	t_0960.geojson
1440	Wasser aus Modellbereich abgefließen	-

Tabelle 5: Details zu den Risikozonen - Berechnung 5-jährliche / 15-Minuten.

Die Starkregen-Risikozonen wurden im Datenformat GeoJSON im Koordinatensystem ETRS89 / UTM Zone 33N erstellt und für die Erstellung der automatisierten Warnungen der Verkehrsteilnehmer:innen übergeben.

4.2.6. Learnings

Die im Projekt angewandte Methodik bietet einerseits viele Vorteile-, weiß jedoch auch Grenzen auf.

Vorteile:

- Hochaufgelöste Datenerfassung mittels Laserscan und Drohne ist zweckmäßig und effizient.
Die eingesetzten Aufnahmemethoden ermöglichen eine detaillierte Abbildung der Fahrbahn- und Vorlandstrukturen. Vorlandmodellierung mit Landes-Laserscandaten (1-m-Auflösung) ist ausreichend.
Für die großräumige Erfassung der Abflussprozesse im Vorland bietet die Datenqualität des Landes Steiermark eine funktional ausreichende Grundlage.
- Die eingesetzte Starkregensimulation mit der Software HydroAS ist funktional und liefert konsistente Ergebnisse.
 - Die Fließwege und Wassertiefen der Starkregenereignisse können realitätsnah dargestellt werden.
 - Die Methodik erlaubt die Erstellung von Risikozonen basierend auf zeitlicher Entwicklung und flächiger Ausdehnung Wassertiefen.
- Gefahrenstellen durch einen Vorlandabfluss resultierend aus Starkregen können effektiv erkannt und Maßnahmen definiert werden.
- Risikozonen können als GeoJSON exportiert und projektübergreifend weiterverarbeitet werden.

Grenzen:

- Hohe Genauigkeit des Fahrzeuglasers, welche nicht zwingend notwendig ist.
Der fahrzeugbasierte Laserscan liefert eine sehr hohe Detailgenauigkeit, welcher bei die Starkregensimulation keine genaueren Ergebnisse liefert. Zusätzlich ist ein Laserscan mittels Drohne wesentlich einfacher zu bewerkstelligen und bildet keine Einschränkungen für den laufenden Verkehr
- Kleinteilige Strukturen im Projektgebiet müssen überprüft werden.
Elemente wie Durchlässe, Einlaufschächte, lokale Abflusshindernisse oder Entwässerungsleitungen müssen in jedem Projektabschnitt individuell kontrolliert und gegebenenfalls eingepasst werden, da deren automatisierte Erfassung und Qualität stark variieren kann.

- Darstellung geringer Wassertiefen mit der gewählten Software HydroAS derzeit begrenzt.

Mit der gewählten Modellierungsmethodik können Wassertiefen ab etwa 5 mm zuverlässig dargestellt werden. Dünnere Wasserfilme oder beginnende Benetzungsvorgänge sind nur eingeschränkt abbildbar.

- Dynamische Echtzeitsimulation auf Basis von Niederschlagsvorhersagen ist nicht möglich.

Eine zeitnahe Simulation zukünftiger Ereignisse kann nur erfolgen, wenn das hydraulische Modell für den jeweiligen Abschnitt bereits vollständig vorbereitet ist.

Eine praktikable Lösung bietet daher die Verwendung von vorab simulierten Niederschlagsintensitäten und den daraus abgeleiteten Risikozonen.

- Hoher Initialaufwand für Modellaufbau.

Die Erstellung eines vollwertigen Simulationsmodells erfordert einen erheblichen Vorbereitungsaufwand (Datenaufbereitung, Prüfung, Digitalisierung, Parametrisierung). Dadurch ist die Übertragbarkeit zwar gewährleistet, jedoch mit einem zeitlichen Grundaufwand verbunden, der je nach Abschnitt variieren kann.

4.3. Handlungsempfehlungen & Erkenntnisse für weitere Autobahnabschnitte

Für die Einrichtung eines flexiblen Warnsystems für Verkehrsteilnehmer:innen bei Starkregenereignissen sind präzise und zeitnahe meteorologische Informationen erforderlich. Da laut Geosphere Austria eine exakte Vorhersage kurzfristiger Starkregenereignisse derzeit nur eingeschränkt möglich ist, bietet sich ein alternativer Ansatz über Risikokarten für einheitliche Regenintensitäten an. Auf dieser Grundlage können automatisiert Warnmeldungen generiert und an Verkehrsteilnehmer:innen übermittelt werden.

Die Risikokarten sollten ein Spektrum an standardisierten Niederschlagsintensitäten (z. B. 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h, 100 mm/h) abbilden. Dadurch wird eine Bandbreite an Starkniederschlägen berücksichtigt, sodass Warnungen direkt aus den Niederschlagsprognosen abgeleitet und situationsabhängig ausgegeben werden können.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass Starkregensimulationen nicht für jedes Ereignis in Echtzeit durchgeführt werden müssen. Die derzeitige Modellierungsmethodik erlaubt keine simultanen Berechnungen für neue Ereignisse, da die Grundlagendaten je nach Autobahnabschnitt individuell aufzubereiten sind und die Bemessungsregenwerte regional variieren. Einheitlich definierte Risikozonen könnten hingegen österreichweit erzeugt und bei Bedarf flexibel anhand der aktuellen Niederschlagsvorhersage angewendet werden.

Die Funktionalität dieses methodischen Ansatzes konnte im Rahmen des Projektes eindeutig nachgewiesen werden. In den folgenden Unterpunkten werden darüber hinaus positive wie negative Erkenntnisse zusammengefasst, die bei der Erstellung zukünftiger Risikozonen für weitere Projektgebiete eine wesentliche Unterstützung darstellen.

5. INFORMATIONSGENERIERUNG

Ziel des Arbeitspakets 4 ist es, digitale Verkehrsinformationen zu generieren, mit denen die Verkehrsteilnehmer:innen bzw. zukünftig auch automatisierte Fahrzeuge vor auftretenden Starkregenereignissen gewarnt werden können. Die Grundlage dafür bildet einerseits die hochgenaue, digitale Modellierung der Verkehrsinfrastruktur (Ultra High Definition – UHD-Karte) aus dem Arbeitspaket 2, andererseits die Ergebnisse der Simulation des Starkregenereignisses aus Arbeitspaket 3. In Arbeitspaket 4 werden beide Ergebnisse genutzt, um daraus Verkehrsinformationen zu generieren.

Sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen

Die **EU-Richtlinie 2010/40/EU**⁴ sowie deren **Änderung (EU) 2023/2661**⁵ definieren den Rahmen zur Einführung von intelligenten Verkehrssystemen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Die EU-Richtlinie 2010/40/EU, die mit dem IVS-Gesetz⁶ in Österreich in nationales Recht umgesetzt wurde (das IVS-Gesetz befindet sich zum Zeitpunkt der Berichtslegung im Oktober 2025 aufgrund der Änderung der EU-Richtlinie in Überarbeitung), schafft auch eine Ermächtigung für die EU-Kommission, delegierte Verordnungen als Ergänzung zur Richtlinie zu erlassen, die unmittelbare Rechtswirksamkeit erlangen. Als prioritäre Maßnahme C definiert die Europäische Kommission die delegierte Verordnung **(EU) 886/2013**⁷, die den Rahmen für die möglichst unentgeltliche Bereitstellung eines Mindestniveaus allgemeiner für die Straßenverkehrssicherheit relevanter Verkehrsinformationen, was auch als **SRTI (Safety Related Traffic Information)** bezeichnet wird, vorgibt. In Artikel 3 der delegierten Verordnung wird eine Liste von Ereignissen und Bedingungen taxativ aufgelistet:

- a) **vorübergehend rutschige Fahrbahn**
- b) Tiere, Personen, Hindernisse, Gegenstände auf der Fahrbahn
- c) ungesicherte Unfallstellen
- d) Kurzzeitbaustellen
- e) **eingeschränkte Sicht**
- f) Falschfahrer

⁴ Vgl. Richtlinie 2010/40/EU, Art. 1–10.

⁵ Vgl. Richtlinie (EU) 2023/2661.

⁶ Vgl. StF 20008275 (Verkehrs-Informationsgesetz).

⁷ Vgl. Delegierte Verordnung (EU) 886/2013.

g) nicht ausgeschilderte Straßenblockierungen

h) außergewöhnliche Witterungsbedingungen

Anhand der taxativen Liste, kann festgehalten werden, dass Starkregenereignisse für die Informationskategorien a, e und h relevant sein können.

Die **Kategorie a** wird in den Begriffsbestimmungen der delegierten Verordnung folgendermaßen definiert: „vorübergehend rutschige Fahrbahn“ bezeichnet einen außergewöhnlichen Zustand der Fahrbahnoberfläche, der dazu führt, dass die Fahrbahn für einen bestimmten Zeitraum eine geringe Haftung für Fahrzeuge aufweist.

Die **Kategorie e** wird folgendermaßen definiert: „eingeschränkte Sicht“ bezeichnet Bedingungen, die die Sichtweite der Fahrer verringern und die Sicherheit beeinträchtigen könnten.

Die **Kategorie h** wird folgendermaßen definiert: „außergewöhnliche Witterungsbedingungen“ bezeichnet ungewöhnliche, widrige oder nicht der Jahreszeit entsprechende Witterungsbedingungen, die die Sicherheit beeinträchtigen könnten.

In Artikel 4 ist der Inhalt der bereitzustellenden Informationen beschrieben: (1) Die Informationen zu den sicherheitsrelevanten Ereignissen oder Bedingungen müssen Folgendes umfassen:

- a) Ort des Ereignisses oder der Bedingungen
- b) Kategorie des Ereignisses oder der Bedingungen gemäß Artikel 3 und, soweit angemessen, kurze Beschreibung
- c) Ratschläge für das Fahrverhalten, soweit angemessen

(2) Die Informationen werden nach dem Ende des Ereignisses oder der Bedingungen eingestellt und bei Änderungen des Ereignisses oder der Bedingungen geändert.

Artikel 7 wiederum definiert, dass die Daten im Format DATEX II (CEN/TS 16157) oder einem mit DATEX II vollständig kompatiblen und interoperablen maschinenlesbaren Format über einen Zugangspunkt zur Verfügung gestellt werden müssen.

Die **Traveller Information Services Association (TISA)**⁸, ein internationaler Verband von Endgeräte-, Automobil-, Kartenherstellern und -dienstleistern, öffentlichen Institutionen, Rundfunkbetreibern beschreibt im Dokument **“Safety related message sets – Selection of DATEX II Situations, DENM rel. 2 and TPEG2-TEC Causes and TMC Events for EC**

⁸ Vgl. TISA (Traveller Information Services Association).

high level Categories of Road Safety related Traffic Information - SRTI⁹ die Nachrichtentypen, die für die unterschiedlichen Kategorien der Delegierten Verordnung 886/2013 verwendet werden sollen. In der Erstellung des Dokuments haben Expertinnen und Experten für unterschiedliche Standards zur Beschreibung von Verkehrsinformationen zusammengearbeitet. Die betrachteten Standards sind **Datex II**, **TMC** bzw. **TPEG2** sowie **DENM** in den jeweils aktuellen Versionen. Datex II und DENM werden später in diesem Bericht behandelt. Bei TMC (Traffic Message Channel) und TPEG2 (ISO-21219) handelt es sich um eine Serie von Datenprotokollen, die verwendet werden, um Verkehrs- und Reiseinformationen vorwiegend über Analogradio (TMC) bzw. Digitalradio bzw. Mobilfunk (TPEG2) zu übertragen. Die Möglichkeiten von TPEG2 sind dabei deutlich umfangreicher¹⁰. Im Projekt WETSAFE wurde nur die Abbildung von Warnmeldungen in Datex II bzw. DENM untersucht. Eine Abbildung in TMC bzw. TPEG2 würde sich analog durchführen lassen. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Nachrichtentypen, die für die Kategorie a „vorübergehend rutschige Fahrbahn“ verwendet werden sollen.

DATEX II (EN 16157-3)		TMC Events (EN ISO 14819-2)		TPEG2-TEC (ISO/TS 21219-15)				DENM (ETSI EN 302 637-3)		
DATEX Class	Type	Text (EN-English)	Code	Cause Code	Sub Cause Code	Warning Level	Text	Cause Code	Sub Cause Code	Text
EnvironmentalObstruction	flooding	flooding. Danger	908	5	1	3	flooding	9	0	hazardous location - surface condition
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	danger of aquaplaning	1002	7		3	aquaplaning	7	0	aquaplaning
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	surface water hazard	1041	7		3	aquaplaning	7	0	aquaplaning
WeatherRelatedRoadConditions	slippery	slippery road (above Q hundred metres)	1003	6		3	slippery road	6	0	adverse weather condition - adhesion
NonWeatherRelatedRoad Conditions	mudOnRoad	mud on road. Danger	1055	6	3	3	mud on road	6	3	mud on road
NonWeatherRelatedRoad Conditions	looseChippings	loose chippings. Danger	1056	6	8	3	loose chippings	6	8	loose chippings
NonWeatherRelatedRoad Conditions	oilOnRoad	oil on road. Danger	1057	6	7	3	oil on road	6	7	oil on road
NonWeatherRelatedRoad Conditions	petrolOnRoad	petrol on road. Danger	1058	6	2	3	fuel on road	6	2	fuel on road
WeatherRelatedRoadConditions	ice	ice (above Q hundred metres)	1006	6	5	3	ice on road	6	5	ice on road
WeatherRelatedRoadConditions	blackIce	black ice (above Q hundred metres)	1008	6	6	3	black ice on road	6	6	black ice on road
WeatherRelatedRoadConditions	snowDrifts	snow drifts (above Q hundred metres)	1016	9	5	3	snow drifts	9	5	snow drifts
WeatherRelatedRoadConditions	icyPatches	icy patches (above Q hundred metres)	1047	6	5	3	ice on road	6	5	ice on road

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Nachrichtentypen für die Category a Temporary Slippery Road.

⁹ Vgl. TISA Safety-Related Message Sets (Rev. 4, 2020).

¹⁰ Schmidt et al. (2009), S. 30–35.

TISA merkt in ihrem Bericht an: „Categories such as heavy snowfall or heavy rain are not relevant in this category, because they are part of category “h) exceptional weather conditions”.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Nachrichtentypen, die für die Category h verwendet werden können.

DATEX II (EN 16157)		TMC Events (EN ISO 14819-2)		TPEG2-TEC (ISO/TS 21219-15)				DENM (ETSI EN 302 637-3)		
DATEX Class	Type	Text (CEN-English)	Code	Cause Code	Sub Cause Code	Warning Level	Text	Cause Code	Sub Cause Code	Text
PoorEnvironmentConditions	heavySnowfall	heavy snowfall (Q)	1101	19	2	3	heavy snowfall	19	2	heavy snowfall
PoorEnvironmentConditions	heavyRain	heavy rain (Q)	1109	19	1	3	heavy rain	19	1	heavy rain
PoorEnvironmentConditions	hurricaneForceWinds ⁵	storm force winds (Q) ⁵	1204	17	1	3	strong winds ⁵	17	3	hurricane ⁵
PoorEnvironmentConditions	stormForceWinds ⁵	storm force winds (Q) ⁵	1204	17	1	3	strong winds ⁵	17	1	strong winds ⁵
PoorEnvironmentConditions	strongWinds ⁵	strong winds (Q) ⁵	1205	17	1	3	strong winds ⁵	17	1	strong winds ⁵
PoorEnvironmentConditions	crosswinds ⁵	crosswinds (Q) ⁵	1210	17	1	3	strong winds ⁵	17	1	strong winds ⁵
PoorEnvironmentConditions	strongWinds ⁵	strong winds (Q) ⁵ affecting high-sided vehicles	1211	17	1	3	strong winds ⁵	17	1	strong winds ⁵
PoorEnvironmentConditions	hail ⁷	hail (visibility reduced to Q)	1106	17	2	3	damaging hail	17	2	damaging hail
PoorEnvironmentConditions	thunderstorms	thunderstorms (visibility reduced to Q)	1108	17	4	3	thunderstorm	17	4	thunderstorm

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Nachrichtentypen für die Category h Exceptional Weather Conditions.

Auf Basis dieser Informationen von TISA ergeben sich für die nähere Betrachtung der Generierung von Warnmeldungen im Projekt WETSAFE folgende Möglichkeiten:

Datex II Klasse	Datex II Type	DENM Cause Code	DENM Sub Cause Code
EnvironmentalObstruction	Flooding	9 hazardousLocation-surfaceCondition	0
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	7 aquaplaning	0
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	6 adverseWeatherCondition - adhesion	0

PoorEnvironmentConditions	heavyRain	19 adverseWeatherCondition - Precipitation	1 heavyRain
---------------------------	-----------	--	----------------

Tabelle 8: Möglichkeiten in Datex II und DENM zur Warnung vor Starkregenereignissen lt. TISA.

Es ist allerdings anzumerken, dass die Abbildung von TISA nicht vollständig ist und beispielweise die Sub Cause-Codes der DENM nicht näher betrachtet werden. Darüber hinaus gibt es beispielsweise auch in Datex II die Möglichkeit den weatherRelatedRoadConditionType „streamingWater“ abzubilden, was ebenfalls in der TISA-Abbildung nicht betrachtet wird.

Datex II Klasse	Datex II Type	DENM Cause Code	DENM Sub Cause Code
EnvironmentalObstruction	Flooding	9 hazardousLocation-surfaceCondition	11 Flooding
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	7 aquaplaning	
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	6 adverseWeatherCondition - adhesion	11 Flooding
WeatherRelatedRoadConditions	surfaceWater	6 adverseWeatherCondition - adhesion	12 waterOnRoad
PoorEnvironmentConditions	heavyRain	19 adverseWeatherCondition - Precipitation	1 heavyRain

Tabelle 9: Ergänzte Möglichkeiten mit Datex II und DENM zur Warnung vor Starkregenereignissen.

Warnung vor Starkregenereignissen

Betrachtet man die in Tabelle 8 dargestellten Möglichkeiten in Datex II sowie DENM, um vor Starkregenereignissen zu warnen, ergeben sich folgende Herangehensweisen für die Generierung einer Warnung im Projekt WETSAFE:

- **PoorEnvironmentConditions/heavyRain (Datex II) bzw. 19 adverseWeatherCondition – Precipitation/heavyRain (DENM):** Diese Warntypen sind vorgesehen, um vor einem Starkregenereignis zu warnen. Dabei steht das

Ereignis im Vordergrund und weniger die Auswirkungen des Regenereignisses auf die Fahrbahnverhältnisse wie Aquaplaning oder rutschige Fahrbahn. Im Projektkontext von WETSAFE stellt sich dabei die Frage, wie ein Starkregenereignis als solches definiert wird, sowie räumlich und zeitlich abgegrenzt werden kann. Um den betroffenen Straßenabschnitt räumlich abgrenzen zu können, würde man entweder ein dichtes Netz an Messstationen entlang der Autobahn benötigen. Diese Messstationen können die Messwerte liefern, nach denen die Starkregenwarnung räumlich und zeitlich abgegrenzt werden kann. Eine andere Quelle wären INCA-Daten¹¹, die ebenfalls eine räumliche und zeitliche Abgrenzung von Starkregenereignissen zulassen. Allerdings ist bei beiden Methoden fraglich, ob der notwendige räumliche und zeitliche Detailgrad erreicht werden kann, um tatsächlich auf wenige Meter und wenige Minuten genaue Warnmeldungen zu generieren, wie sie sowohl für Datex II als auch DENM-Warnungen notwendig sind und auch erwartet werden. Daher werden generelle Starkregenwarnungen eher nicht empfohlen.

- **WeatherRelatedRoadConditions/surfaceWater** oder **streamingWater** sowie **6 adverseWeatherCondition – adhesion/11 Flooding** bzw. **12 waterOnRoad** und **7 aquaplaning**: Diese Warntypen sind vorgesehen, um vor Wasser auf der Fahrbahn bzw. vor Aquaplaning zu warnen. Im Projektkontext von WETSAFE sind diese Meldungstypen insofern relevant, da die Simulationen jene räumlichen Bereiche der Fahrbahn ausweisen, an denen es verstärkt zu surfaceWater bzw. streamingWater kommt. Zur Warnung vor Aquaplaning ist anzumerken, dass diese nur schwer auf Basis von Regenmengen generiert werden kann, da die individuelle Aquaplaning-Gefahr von vielen Faktoren wie beispielsweise der Menge von Wasser auf der Fahrbahn aber auch von der Profiltiefe der Reifen bzw. der Geschwindigkeit abhängt. Hermann, 2008 gibt einen guten Überblick zur Berechnung des Aquaplaning-Risikos¹². Entscheidend ist dabei auch die Wasserfilmdicke (WFD) auf der Fahrbahn, die beispielsweise durch geeignete Sensorik gemessen werden kann. Aber selbst bei einer genauen Messung der WFD ist das Aquaplaning-Risiko lt. Hermann, 2008 sehr unterschiedlich. Eine generelle Warnung bei Starkregen erscheint daher wenig zielführend. Daher können eigentlich nur die Ergebnisse der

¹¹ Vgl. ZAMG INCA-Analyse.

¹² Herrmann (2008), o.S.

Simulationsberechnungen in AP 3 und dabei vor allem die Fließwege > 1 cm als Datengrundlage für die Warnung mit den Warntypen **WeatherRelatedRoadConditions/streamingWater** sowie **6 adverseWeatherCondition – adhesion/11 Flooding** herangezogen werden. Der DENM Cause Code aquaplaning ist vorwiegend für die Warnung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug vorgesehen und sollte ausschließlich für Warnungen durch Fahrzeuge verwendet werden, wodurch er für WETSAFE nicht geeignet ist.

- **EnvironmentalObstruction/Flooding** bzw. **9 hazardousLocation-surfaceCondition/11 Flooding**: Diese Warntypen sind vorgesehen, um vor einer Überflutung der Fahrbahn durch äußere Umstände wie beispielweise über die Ufer getretene Flüsse, die die Fahrbahn überfluten, zu warnen. Auch diese Warnmeldungstypen sind prinzipiell für die Abbildung in WETSAFE geeignet, da es sich bei den Simulationsergebnissen um Fließwasser auf der Fahrbahn handelt, das durch eine Überflutung der Umgebung ausgelöst wird.

Letztlich wird aber einerseits die weitere Profilierung in der C-Roads-Plattform bzw. im Car2Car-Konsortium zeigen, welche Cause Codes tatsächlich verwendet werden. Entscheidend ist vor allem die Umsetzung der Fahrzeughersteller, da die Warnungen letztlich ja im Fahrzeug angezeigt werden müssen. Bei der Generierung der Warnmeldungen müssen die zwischen der C-Roads Plattform und dem Car2Car-Konsortium abgestimmten Use Cases und Profile berücksichtigt werden.

Szenarien für Starkregenereignisse

Im Projekt WETSAFE wurden zwei Szenarien eines Starkregenereignisses betrachtet: Szenario 1: 30-Minuten Beregnung mit 56mm/h (lt. Hermann, 2008) „Schwerer Regenguss“ und Szenario 2: 30-Minuten Beregnung mit 110mm/h (lt. Hermann, 2008) „Schwerster Gewitterregen“. Für beide Szenarien wurden vom Projektpartner iC Flussbau im Arbeitspaket 3 Simulationen für einen Abschnitt der A2 Südautobahn südlich der AST Sebersdorf / Bad Waltersdorf aus AP 3 Simulationsdaten durchgeführt. Die Simulationsdaten wurden an Salzburg Research zur Informationsgenerierung in Arbeitspaket 4 übergeben. Die Simulationsdaten modellieren den Wasserfilm auf der Autobahn zw. 0,5 und 1,0cm sowie die Fließwege >1cm über die Zeit. Der Export des georeferenzierten Wasserfilms auf der Autobahn bzw. der Fließwege erfolgte bei starken Änderungen in einem Minutenraster, ansonsten nur bei relevanten Änderungen im GeoJSON-Format. gibt einen Überblick über die gelieferten Daten für das Szenario 1:

Berechnung der Autobahn für 30 Minuten mit 56 mm/h Niederschlag. t[sec] stellt dabei die Sekunden nach Start der Berechnung dar, Info beschreibt den Zustand und Datei gibt die Ergebnisdatei im GeoJSON-Format an.

Berechnung Autobahn (56 mm/h, 15min)		
t [sec]	Info	Datei
0	Start Berechnung	-
420	Wasserfilm 0.5 cm - bis 1 cm auf gesamter Autobahn	t_0420.geojson
480	Bildung Fließwege > 1cm	t_0480.geojson
540	Zunahme	t_0540.geojson
600	Zunahme	t_0600.geojson
660	Zunahme	t_0660.geojson
720	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0720.geojson
780	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0780.geojson
840-900	Gleichbleibender Wasserspiegel	-
900	Ende Berechnung	t_0900.geojson
960	Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme Fließwege > 1cm	t_0960.geojson
1440	Wasser aus Modellbereich abgeflossen	-
t_max_generalisiert	Maximale Wassertiefenausdehnung generalisiert (Punktdichte)	

Tabelle 10: Szenario 1: Berechnung der Autobahn für 15 Minuten, 56 mm/h Niederschlag.

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die bereitgestellten Simulationsdaten für das Szenario 2: Berechnung der Autobahn für 30 Minuten mit 110mm/h, was einem 100-jährlichen Ereignis entspricht.

Beregnung Autobahn 30 min 100 jährlich (110 mm/h)		
t [sec]	Info	Datei
0	Start Beregnung	-
180	Wasserfilm 0.5 cm - bis 1 cm auf gesamter Autobahn	t_0180.geojson
240	Bildung Fließwege > 1cm	t_0240.geojson
300	Zunahme	t_0300.geojson
360	Zunahme	t_0360.geojson
420	Zunahme	t_0420.geojson
600	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0600.geojson
660	Maximale Ausdehnung der Wasserfläche > 1cm	t_0660.geojson
660-1800	Gleichbleibender Wasserspiegel	-
1800	Ende Beregnung	t_1800.geojson
1860	Abnahme	t_1860.geojson
1920	Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme Fließwege > 1cm	t_01920.geojson
2520	Wasser aus Modellbereich abgeflossen	-
t_max_generlisiert	Maximale Wassertiefenausdehnung generalisiert (Punktdichte)	

Tabelle 11: Szenario 2: Beregnung der Autobahn 30 Minuten, 110 mm/h Niederschlag.

Abbildung 46: Visualisierung des Wasserfilms 0,5 – 1,0cm auf der Autobahn kurz nach dem Start der Beregnung und Abbildung 47: (a) Wasserfilm 0,5-1,0cm sowie Fließwege > 1cm im gesamten Abschnitt, (b) Detaildarstellung des Wasserfilms 0,5-1,0cm sowie der Fließwege > 1cm in einem Bereich zeigen die visualisierten Simulationsdaten im Forschungswerkzeug C-ITS-Monitor von Salzburg Research.

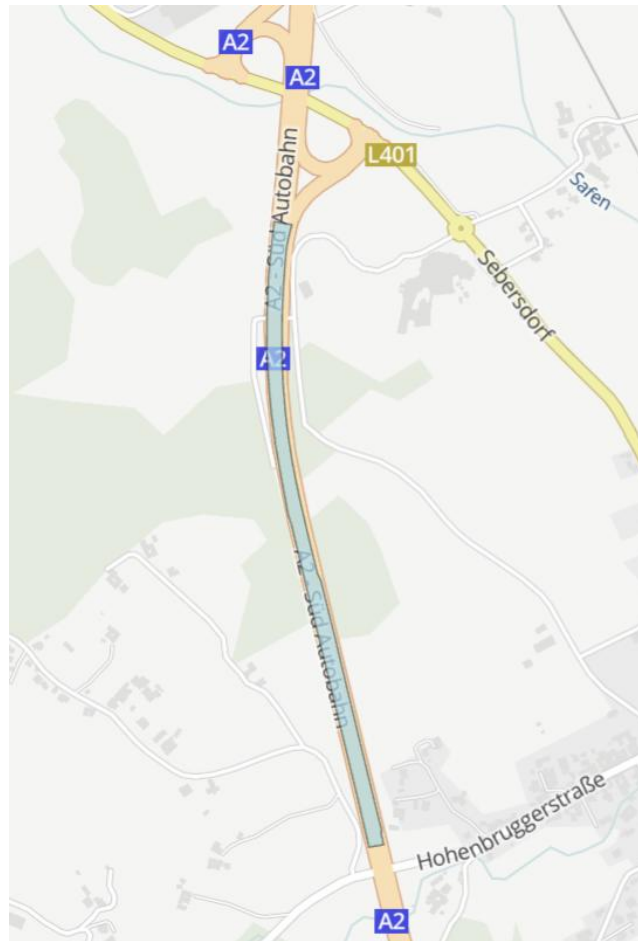


Abbildung 46: Visualisierung des Wasserfilms 0,5 – 1,0cm auf der Autobahn kurz nach dem Start der Beregnung



Abbildung 47: (a) Wasserfilm 0,5-1,0cm sowie Fließwege > 1cm im gesamten Abschnitt, (b) Detaildarstellung des Wasserfilms 0,5-1,0cm sowie der Fließwege > 1cm in einem Bereich

5.1. Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen

Abbildung 48: Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 1 zeigt die zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 1. Zu Minute 0 beginnt die Beregnung des Straßenabschnitts mit 56 mm/h Regenintensität. Eine allgemeine Warnmeldung zu Precipitation / heavyRain müsste bereits zu Beginn der Beregnung starten. Nach 7 Minuten Beregnungszeit ist die Fahrbahn mit einem Wasserfilm zw. 0,5 und 1 cm bedeckt. Zu diesem Zeitpunkt müsste eine Warnmeldung zu surfaceWater bzw. WaterOnRoad starten. Nach 8 Minuten Beregnungszeit bilden sich Fließwege > 1cm. Zu

diesem Zeitpunkt müsste auch die Warnmeldung zu streamingWater bzw. Flooding beginnen. Die Beregnung endet wieder nach 15 Minuten. Damit kann die Warnmeldung Precipitation / heavyRain beendet werden. 1 Minute später ist lt. Simulationsdaten der Wasserfilm von 0,5 – 1 cm von der Fahrbahn verschwunden. Damit kann auch die Warnmeldung surfaceWater bzw. WaterOnRoad enden. Die Fließwege bleiben aber noch bis zur Minute 24 bestehen, erst danach ist lt. Simulation sämtliches Wasser von der Fahrbahn verschwunden. Die Warnmeldung zu streamingWater bzw. Flooding dürfte damit erst nach 24 Minuten enden.

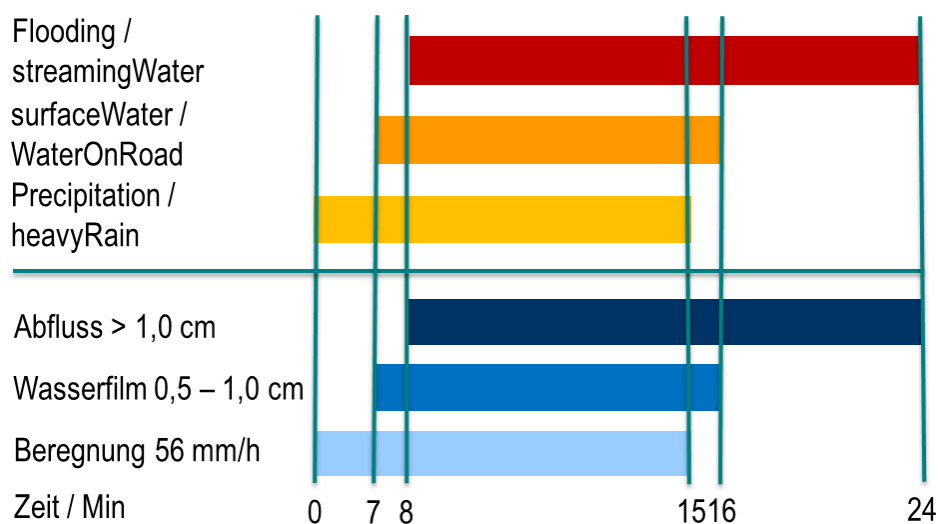


Abbildung 48: Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 1

Abbildung 48 zeigt die zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 2 Beregnung des Straßenabschnitts für 30 Minuten mit einer Regenintensität von 110 mm/h. Die Beregnung startet zu Minute 0. Zu diesem Zeitpunkt müsste bereits eine Warnmeldung Precipitation / heavyRain erfolgen. Bereits nach 3 Minuten hat sich lt. Simulation ein Wasserfilm auf der Fahrbahn zw. 0,5 und 1 cm gebildet. Zu diesem Zeitpunkt müsste eine Warnmeldung surfaceWater bzw. WaterOnRoad erfolgen. Ab Minute 4 bilden sich Fließwege > 1cm, d.h. die Warnmeldung Flooding bzw. streamingWater müsste ab diesem Zeitpunkt beginnen. Die Beregnung endet nach 30 Minuten, damit kann auch die Warnmeldung Precipitation / heavyRain enden. 2 Minuten später ist der Wasserfilm auf der Fahrbahn verschwunden. Damit kann auch die Warnmeldung surfaceWater / WaterOnRoad enden. Der Abfluss dauert noch weitere 12 Minuten. In dieser Zeit müsste die Warnmeldung Flooding / streamingWater aktiv bleiben. Nach 42 Minuten ist das Szenario beendet.

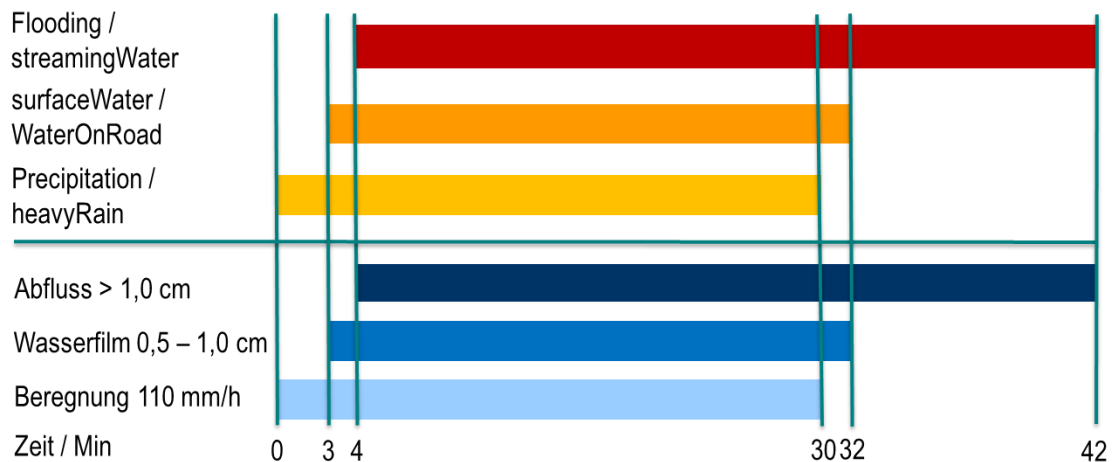


Abbildung 49: Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 2.

5.2. Räumliche Modellierung der Warnmeldungen

Wie bereits angemerkt, ist die räumliche Abgrenzung eines Starkregenereignisses nicht ohne weiteres möglich. Wenn man Sensorik entlang der Autobahn als Datenquelle heranzieht, dann könnte eine räumliche Abgrenzung des betroffenen Straßenabschnitts anhand der Positionen der Sensorik erfolgen. In diesem Fall würden die Sensorpositionen die lineare, räumliche Ausdehnung der Warnmeldung entlang des Straßenabschnitts definieren. Steht keine Sensorik entlang der Straße zur Verfügung, dann müsste man den Starkregenbereich aus anderen Datenquellen wie beispielsweise INCA-Daten ableiten. In diesem Fall würde sich eine Modellierung des Starkregengebiets als Polygon eignen. Alternativ könnte auch eine geometrische Verschneidung mit dem Straßennetz erfolgen, wodurch sich wieder eine lineare räumliche Ausdehnung des Starkregengebiets ableiten ließe. Sowohl Datex II als auch C-ITS bieten Möglichkeiten, um eine lineare bzw. eine flächenhafte Ausdehnung zu modellieren.

Die räumliche Modellierung der Warnmeldungen in Bezug auf den Wasserabfluss gestaltet sich einfacher, da die Fließwege aus der Simulation räumlich klar definiert sind. In diesem Fall müssen die Warnmeldungen jedenfalls die jeweils maximale räumliche Ausdehnung der Fließwege zu den unterschiedlichen Simulationszeitpunkten berücksichtigen.

Um die Meldung auf der Richtungsfahrbahn exakt zu verorten, wurde die UHD-Karte für den gewählten Abschnitt der A2 Südautobahn südlich der AST Sebersdorf / Bad Waltersdorf verwendet, die vom Projektpartner Joanneum Research im Arbeitspaket 2 im OpenDRIVE-Format erstellt und an Salzburg Research zur Informationsgenerierung übergeben wurde. In der OpenDRIVE-Datei sind die Fahrspuren je Richtungsfahrbahn modelliert. Diese Fahrspuren werden für die Generierung der Informationen verwendet.

Modellierung der Warnmeldung mit Datex II

Der europäische Referenzstandard Datex II¹³ ist als standardisierte, formale Struktur für den Austausch von Verkehrs- bzw. Reiseinformationen zwischen Straßenbetreibern, Straßenbetreibern und Dienst Anbietern vorgesehen. Die Entwicklung von Datex II wird seit 2021 von den Mitgliedern der NAPCORE-Gruppe¹⁴ koordiniert und erfolgt durch das CEN Technical Committee 278, Road Transport and Traffic Telematics¹⁵. Datex II besteht mittlerweile aus 15 Unterbereichen (Subdomains) für die Abbildung von unterschiedlichen Typen von Verkehrsinformationen (Abbildung 51). Für die Kommunikation von straßenbezogenen Situationen bzw. sicherheitsrelevanten Verkehrsinformationen ist vor allem der Unterbereich Road Situation (Part 3 Situation Publication) relevant (vgl. Abbildung 51).

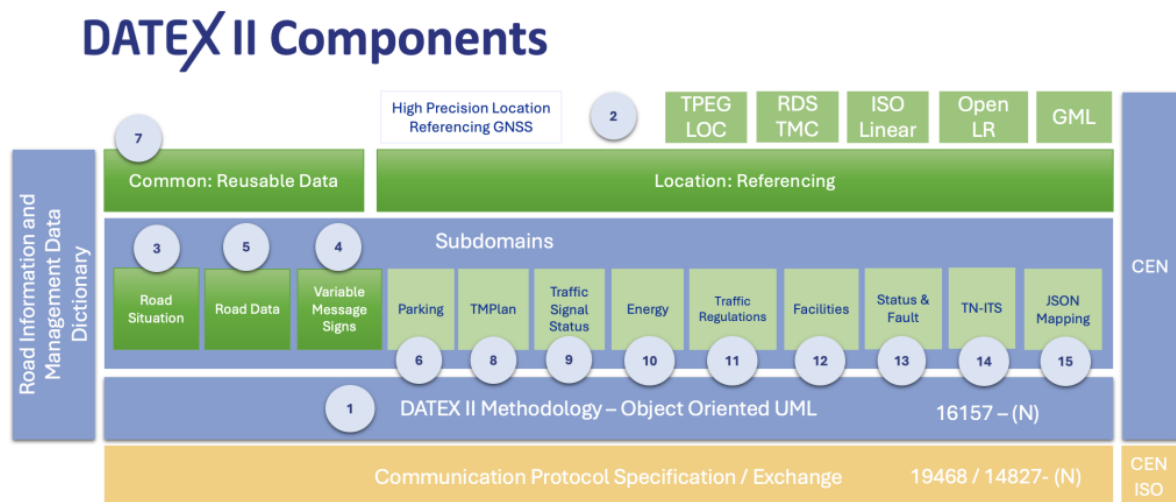


Abbildung 50: Komponenten von Datex II

¹³ Vgl. Datex II-Standard (datex2.eu)

¹⁴ Vgl. NAPCORE-Datenportal (napcore.eu)

¹⁵ Vgl. Informationsportal ITSstandards.eu (ITSstandards.eu)

Die Situation Publication wird dazu genutzt, abnormale Fahrsituationen wie beispielweise Baustellen oder ungewöhnliche Ereignisse abzubilden. Die Situation wird durch einen oder mehrere Situation Records beschrieben (Abbildung 51). Wichtig ist, dass das Attribut `safetyRelatedMessage` auf „true“ gesetzt wird, sofern es sich um eine Warnmeldung in Bezug auf die Delegierte Verordnung (EU) 886/2013 handelt.

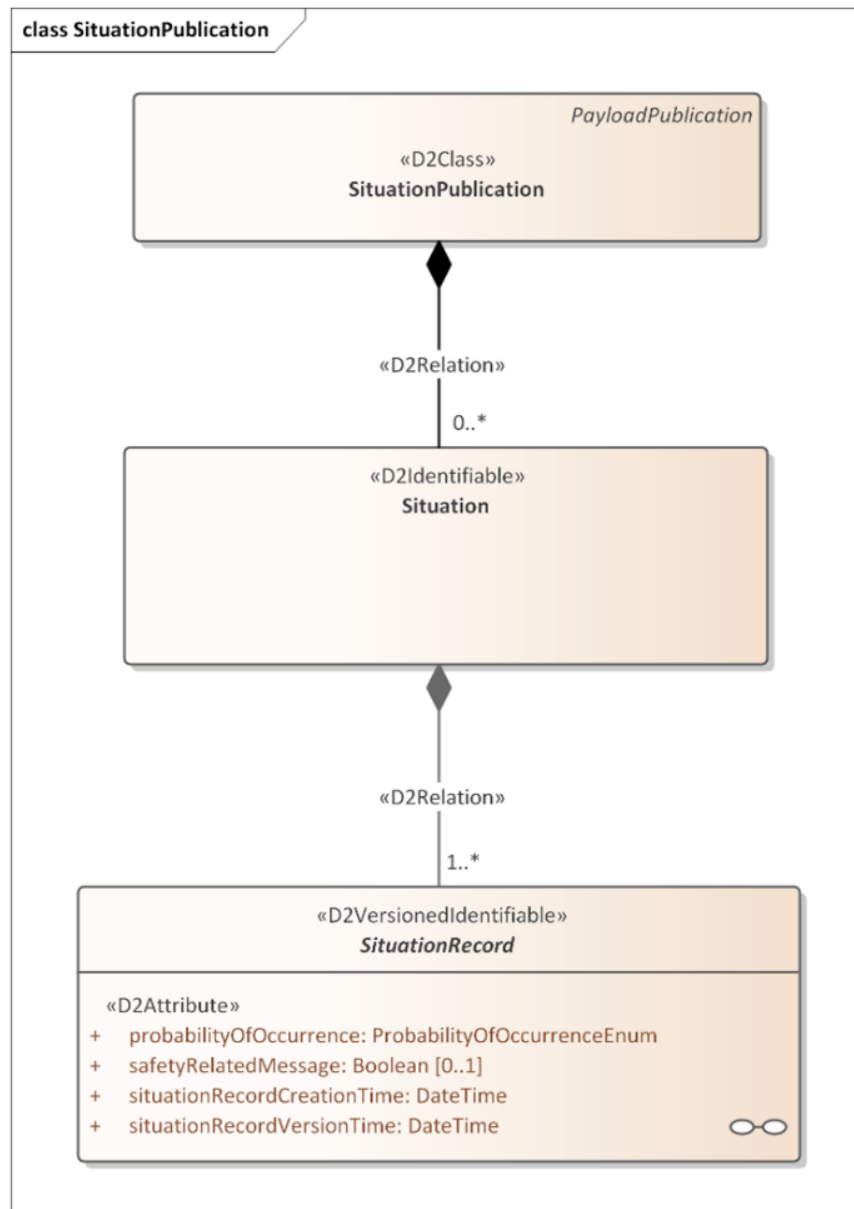


Abbildung 51: SituationPublication in Datex II mit einem oder mehreren SituationRecords

Für die Abbildung der Warnmeldungen der Delegierten Verordnung (EU) 886/2013 sind in Datex II eigene **Recommended Reference Profiles (RRP)** definiert. Für die Kategorie h

außergewöhnliche Witterungsbedingungen ist das RRP Exceptional weather conditions vorgesehen¹⁶.

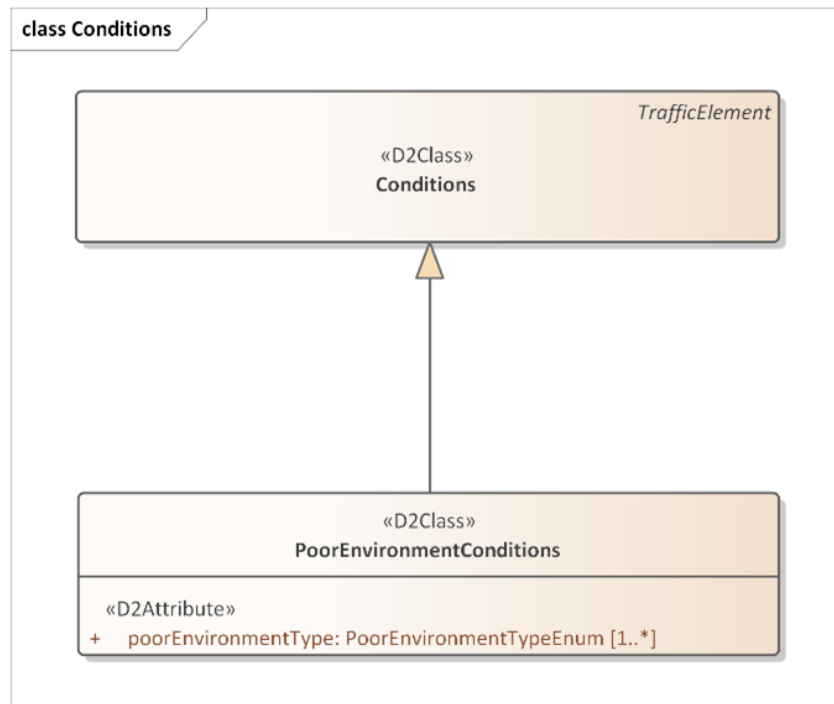


Abbildung 52: PoorEnvironmentConditions-Klasse in Datex II

Die Modellierung des Typs der Warnmeldung erfolgt über die **PoorEnvironmentConditions-Klasse** (Abbildung 52), deren Attribut **poorEnvironmentType** viele unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann¹⁷. Von diesen möglichen Ausprägungen (**PoorEnvironmentTypeEnum**) ist **heavyRain** für die Modellierung der Starkregenwarnung geeignet. Das Datex II **Recommended Service Profile (RSP)** roadweatherinformation¹⁸ bietet noch weitere Möglichkeiten, um die Warnmeldung mit zusätzlichen Informationen anzureichern. Abbildung 53 zeigt mögliche weitere Informationskategorien, die zur näheren Beschreibung des Ereignisses verwendet werden können wie beispielsweise nähere Informationen zum Niederschlag (**PrecipitationDetail**).

¹⁶ Vgl. Datex II Safety-Related Message Sets – Kategorie H (docs.datex2.eu)

¹⁷ Vgl. Datex II UML Model Element EA1395 (docs.datex2.eu)

¹⁸ Vgl. Datex II Recommended Profile „Road Weather Information“ (docs.datex2.eu)

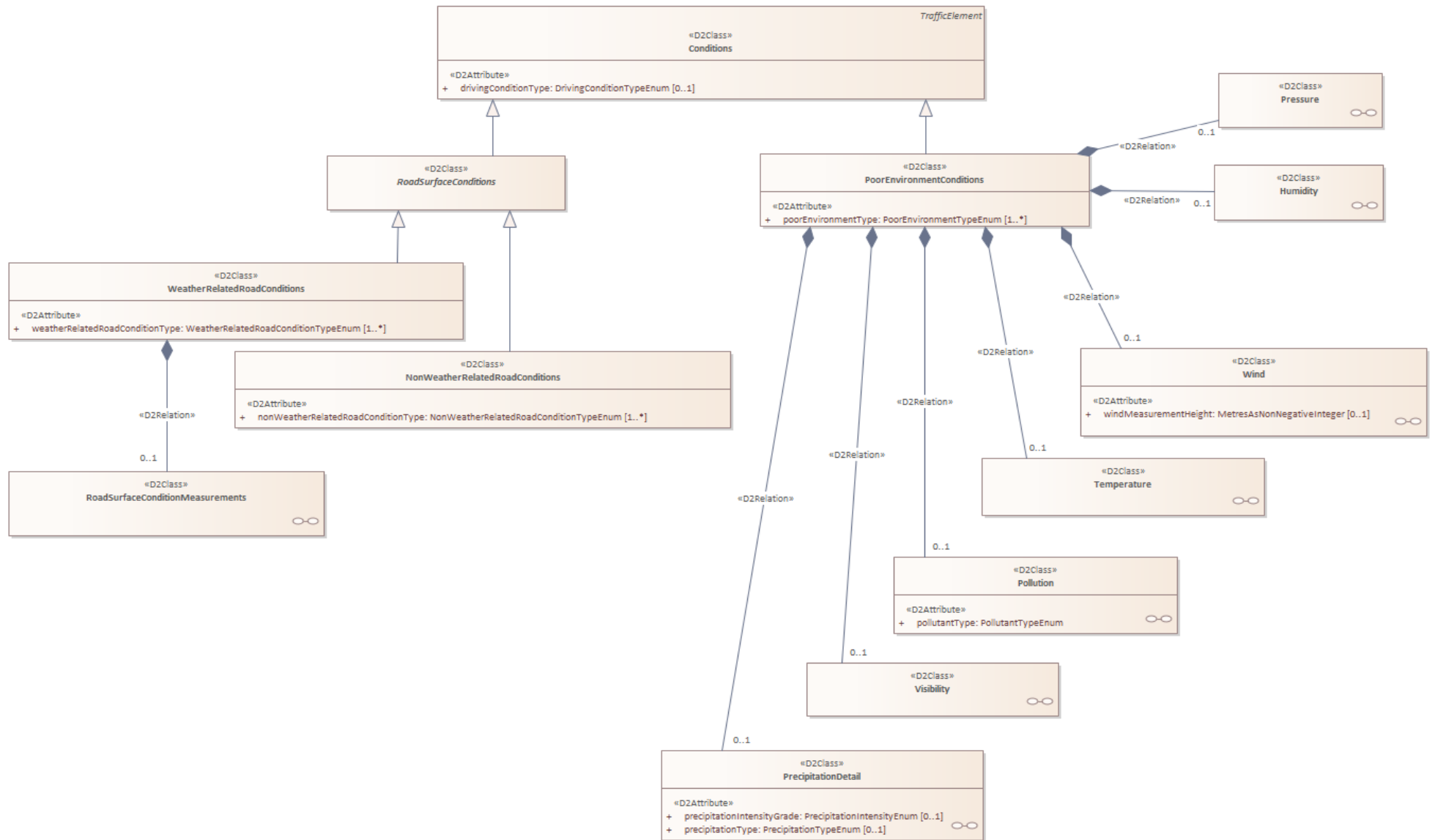


Abbildung 53: Mögliche Ausprägungen der Conditions-Klasse (PoorEnvironmentConditions oder WeatherRelatedRoadConditions)

Ein weiteres RRP ist für die Kategorie A „vorübergehend rutschige Fahrbahn“ der Delegierten Verordnung (EU) 886/2013 vorgesehen¹⁹. Es kann entweder eine **EnvironmentalObstruction** (Abbildung 54) oder die **RoadSurfaceCondition** als **WeatherRelatedRoadCondition** bzw. **NonWeatherRelatedRoadCondition** (Abbildung 53) modelliert werden. Für das Attribut **environmentalObstructionType** der EnvironmentalObstruction-Klasse gibt es wieder viele unterschiedliche Ausprägungen (**EnvironmentalObstructionTypeEnum**)²⁰, von denen **flooding** am besten für die Modellierung der Warnmeldung betreffend der Fließwege in WETSAFE geeignet ist.

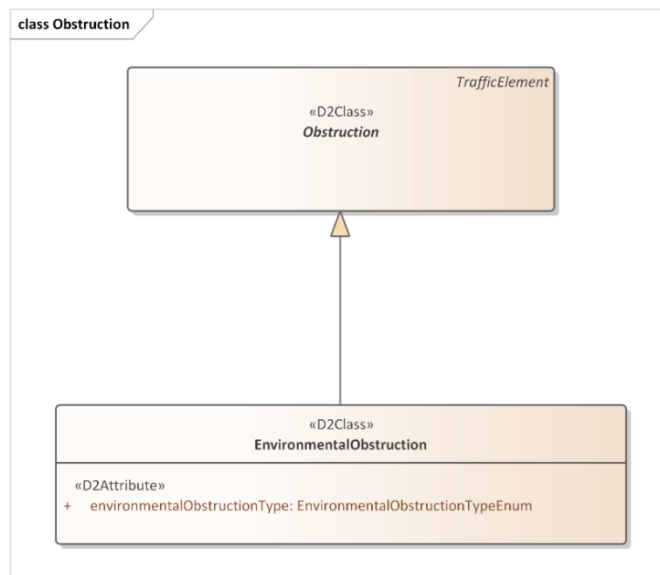


Abbildung 54: Datex II-Klasse EnvironmentalObstruction

Zur Abbildung von Fahrbedingungen wird die Sub-Klasse **WeatherRelatedRoadConditions** (Abbildung 53) der Conditions-Klasse verwendet. Vom Attribut **weatherRelatedRoadConditionType** gibt es ebenfalls viele Ausprägungen (**WeatherRelatedRoadConditionTypeEnum**). Definierte Ausprägungen sind: blackIce, deepSnow, dry, freezingOfWetRoads, freezingPavements, freezingRain, freshSnow, glaze, ice, iceBuildUp, iceWithWheelBarTracks, icyPatches, looseSnow, moist, normalWinterConditionsForPedestrians, notDry, packedSnow, rime, roadSurfaceMelting, slippery, slushOnRoad, slushStrings, snow, snowDrifts, snowOnPavement,

¹⁹ Vgl. Datex II Safety-Related Profiles, Kategorie A (docs.datex2.eu)

²⁰ Vgl. Datex II UML Model Element EA1370 (docs.datex2.eu)

wetAndIcyRoad, snowOnTheRoad, wetIcyPavement, **streamingWater**, **surfaceWater**, wet, other.

Auf Basis der möglichen Ausprägungen eignen sich für die Warnungen in WETSAFE entweder **streamingWater** oder **surfaceWater**, wobei streamingWater definiert ist als „From (2 mm) water film thickness over the sensor“ und surfaceWater als „Water is resting on the roadway which provides an increased hazard to vehicles“. Lt. dieser Definition muss bereits die Warnung vor dem Wasserfilm auf der Fahrbahn als **streamingWater** erfolgen.

Auf Basis der Möglichkeiten in Datex II ergeben sich für die Modellierung der Simulationsszenarien in WETSAFE folgende Optionen:

Warnung	Modellierung in Datex II
Warnung vor Starkregen	PoorEnvironmentConditions/heavyRain
Warnung vor Wasser auf der Fahrbahn	WeatherRelatedRoadConditions/streamingWater
Warnung vor den Abflüssen	EnvironmentalObstruction/flooding

Tabelle 12: Mögliche Datex II Codes

Beispiel für eine Datex II-Warmmeldungen

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde für das Szenario 1 folgendes Beispiel einer WeatherRelatedRoadConditions/streamingWater-Warnung in Datex II generiert:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<d2LogicalModel modelBaseVersion="2" xmlns="http://datex2.eu/schema/2/2_0"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <exchange>
    <supplierIdentification>
      <country>at</country>
      <nationalIdentifier>WETSAFE</nationalIdentifier>
    </supplierIdentification>
  </exchange>
  <payloadPublication xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:type="SituationPublication" lang="de">
    <publicationTime>2025-10-06T14:30:00+02:00</publicationTime>
    <publicationCreator>
      <country>at</country>
      <nationalIdentifier>WETSAFE</nationalIdentifier>
    </publicationCreator>
    <situation id="CITS_DENM_3334_102" version="1">
      <headerInformation>
        <confidentiality>noRestriction</confidentiality>
        <informationStatus>real</informationStatus>
      </headerInformation>

      <!-- WeatherRelatedRoadConditions from DENM (causeCode=6,
subCauseCode=12: Water on Road) -->
      <situationRecord xsi:type="WeatherRelatedRoadConditions"
id="WRC_3334_102" version="1">
        <situationRecordCreationTime>2025-10-
06T14:30:00+02:00</situationRecordCreationTime>
        <situationRecordVersionTime>2025-10-
06T14:30:00+02:00</situationRecordVersionTime>
        <probabilityOfOccurrence>certain</probabilityOfOccurrence>
        <validity>
          <validityStatus>active</validityStatus>
          <validityTimeSpecification>
            <overallStartTime>2025-10-
06T14:30:00+02:00</overallStartTime>
            <overallEndTime>2025-10-06T14:38:00+02:00</overallEndTime>
          </validityTimeSpecification>
        </validity>
      </situationRecord>
    </situation>
  </payloadPublication>
</d2LogicalModel>
```

```

    <weatherRelatedRoadConditionType>streamingWater</weatherRelated
RoadConditionType>

    <groupOfLocations xsi:type="Linear">
      <linearExtension>
        <extendedLinearForGipLink>
          <gipLinkLinearLocationReference>
            <gipLink index="0">
              <gipLink>
                <linkId>461023610</linkId>
                <linkPercentageFrom>
                  <percentageDistanceAlong>12.0</perc
entageDistanceAlong>
                </linkPercentageFrom>
                <linkPercentageTo>
                  <percentageDistanceAlong>18.0</perc
entageDistanceAlong>
                </linkPercentageTo>

                <referenceDirection>fromTo</referenceDirection>
              </gipLink>
            </gipLink>
          </gipLinkLinearLocationReference>
        </extendedLinearForGipLink>
      </linearExtension>
    </groupOfLocations>
  </situationRecord>
</situation>
</payloadPublication>
</d2LogicalModel>

```

**Formel 2: Code 1: Beispielnachricht Datex II für Szenario 1:
 WeatherRelatedRoadConditions/streamingWater-Warnung
 (Datex II Szenario 1: über 2 Seiten)**

5.3. Modellierung auf Basis C-ITS

C-ITS steht für **Cooperative Intelligent Transport Systems** und beschreibt die kooperative Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur zum Austausch von Informationen in Echtzeit mit dem Ziel, die Verkehrssicherheit und Effizienz zu erhöhen. C-

ITS ermöglicht die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Vehicle-to-Vehicle, V2V), zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) sowie mit weiteren Verkehrsteilnehmer:innen. Die Kommunikation erfolgt entweder direkt über eine spezielle Funktechnologie (IEEE 802.11p bzw. der Nachfolger 802.11bd) oder über einen C-ITS-Broker, der mit dem Backend von vernetzten Fahrzeugen kommuniziert. Sowohl die Funktechnologie als auch die auszutauschenden Nachrichtenformate werden von ETSI standardisiert²¹.

Im **C-ITS-Ökosystem**²² gibt es mehrere Möglichkeiten, um Informationen der Infrastruktur an die Verkehrsteilnehmenden im Falle von Starkregenereignissen zu kommunizieren. Der C-ITS-Dienst **Decentralized Environmental Notification (DEN)**, der als **ETSI TS 103 831 Release 2** in der aktuellen Version **V2.1.1** spezifiziert ist²³, wird sowohl für die Übertragung von Warnmeldungen zw. Fahrzeugen als auch zw. Infrastruktur und Fahrzeugen verwendet. Der Dienst verwendet für die Übertragung die C-ITS-Nachricht **DENM (Decentralized Environmental Notification Message)**. Für die Beschreibung der Nachrichten wird auch das Common Data Dictionary (**ETSI TS 102 894-2 in der aktuellen Version V2.1.1**²⁴) verwendet. In diesem Data Dictionary sind die konkreten Ausprägungen von Nachrichtentypen definiert. Die C-Roads-Plattform²⁵, eine Kooperation der europäischen Mitgliedsstaaten mit den Betreibern von Straßeninfrastruktur zur Implementierung von C-ITS-Diensten, definiert in der C-ITS Service and Use Case Definitions, Version 2.3.0 den C-ITS-Dienst **Hazardous Location Notification (HLN)**, mit dem eine Gruppe von **Use Cases** auf Basis der **DENM (Decentralized Environmental Notification Message)** beschrieben werden. In dieser Service-Spezifikation sind die Use Cases **Weather Condition Warning (HLN-WCW)** und **Temporary Slippery Road (HLN-TSR)** enthalten, die für die Warnung vor Starkregenereignissen in Frage kommen.

Neben dem C-ITS-Dienst DEN wurde der C-ITS-Dienst **Infrastructure to Vehicle Information Service (IVI)** in **ETSI TS 103 301** in der aktuellen Version **V2.2.1** spezifiziert. Dieser Dienst wird vor allem für die Übertragung von Verkehrsinformationen der Infrastruktur (z.B. verkehrliche Maßnahmen) in die Fahrzeuge verwendet. Der Dienst nutzt die C-ITS-Nachricht **IVIM (Infrastructure to Vehicle Information Message)**. Die C-Roads-

²¹ Vgl. ETSI Automotive Intelligent Transport (etsi.org)

²² Vgl. C-ROADS Operations v0.91 (c-roads.eu)

²³ Vgl. ETSI TS 103 831 V2.1.1 (DENM)

²⁴ Vgl. ETSI TS 102 894-2 V2.1.1 (CDD)

²⁵ Vgl. C-ROADS (c-roads.eu)

Plattform definiert in der C-ITS Service and Use Case Definitions, Version 2.3.0 den Dienst **In-Vehicle Signage (IVS)** mit Use Cases zur Übertragung von Verkehrszeichen und Freitext. Der Use Case **Traffic Signs (IVS-TS)** ist für die Übertragung von Verkehrszeichen vorgesehen und eignet sich für die Übertragung von Warnzeichen bzw. Geschwindigkeitsbeschränkungen.

5.3.1. Modellierung auf Basis DENM

In der C-Roads C-ITS Service and Use Case Definitions, Version 2.3.0 sind die Use Cases **Hazardous Location Notification – Weather Condition Warning (HLN-WCW)** und **Hazardous Location Notification – Temporary Slippery Road (HLN-TSR)** beschrieben. Beide Use Cases dienen dazu, die Verkehrsteilnehmer:innen oder zukünftig auch automatisierte Fahrzeuge vor einer potentiell gefährlichen Wettersituation bzw. vor einem gefährlichen Fahrbahnzustand zu warnen, sodass diese die Fahrgeschwindigkeit anpassen können, um Unfälle zu vermeiden. Beide Use Cases nutzen die **DENM (Decentralized Environmental Notification Message)** in der aktuellen Version **ETSI TS 103 831 v2.1.1**²⁶ als Warnnachricht. Da die DENM für viele unterschiedliche Warnungen verwendet werden kann, wird die konkrete Ausprägung einer DENM über den so genannten **Cause-Code** sowie optional über einen **Sub Cause-Code** definiert. Die Cause-Codes sowie Sub Cause-Codes der DENM sind im **ETSI ITS Common Data Dictionary (ETSI TS 102 894-2 V2.1.1)** definiert.

Use-Case HLN-WCW Use Case

Für den HLN-WCW Use Case sind folgende spezifische Ausprägungen (Cause Codes) der DENM-Nachricht vorgesehen²⁷:

- 17 adverseWeatherCondition-ExtremeWeatherCondition
- 18 adverseWeatherCondition-Visibility
- 19 adverseWeatherCondition-Precipitation

Der **Cause Code 17 adverseWeatherCondition-ExtremeWeatherCondition** kann mit folgenden Ausprägungen (Sub Cause Codes) genutzt werden

Sub Cause Code	Bedeutung
----------------	-----------

²⁶ Vgl. ETSI TS 103 831, Version 2.2.1 (DENM)

²⁷ Vgl. ETSI TS 102 894-2, Version 2.1.1 (CDD)

0	unavailable
1	strongWinds
2	damagingHail
3	Hurricane
4	Thunderstorm
5	Tornado
6	Blizzard

Tabelle 13: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 17.

Wie aus der Liste der Sub Cause-Code hervorgeht, ist der Cause Code 17 adverseWeatherCondition-ExtremeWeatherCondition nicht für die Warnung vor Starkregen geeignet.

Der **Cause Code 18 adverseWeatherCondition-Visibility** kann mit folgenden Sub Cause Codes verwendet werden:

Sub Cause Code	Bedeutung
0	Unavailable
1	Fog
2	Smoke
3	heavySnowfall
4	heavyRain
5	heavyHail
6	lowSunGlare
7	Sandstorms
8	swarmsOfInsects

Tabelle 14: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 17.

Der **Sub Cause-Code 4 heavyRain** ist somit für Starkregenereignisse geeignet, allerdings als Begründung für eingeschränkte Sicht. Diese kann aber durch die Starkregensimulationen im Projekt WETSAFE nicht ermittelt werden, wodurch sich auch diese Cause Code / Sub Cause Code-Kombination nicht für die Starkregenwarnungen im Rahmen von WETSAFE eignet.

Der **Cause Code 19 adverseWeatherCondition-Precipitation** ist spezifisch für die Warnung vor Regenereignissen vorgesehen. Die vorgesehenen Sub Cause-Codes sind:

Sub Cause Code	Bedeutung
0	Unavailable
1	heavyRain
2	heavySnowfall
3	softHail

Tabelle 15: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 19.

Der **Sub Cause-Code 1 heavyRain** ist für die Warnung vor Starkregen vorgesehen. Somit ist die Cause Code / Sub Cause-Code-Kombination 19/1 für die Warnung vor Starkregen in WETSAFE geeignet. Im Unterschied zu den Angaben von TISA sollte der Sub Case Code 1 verwendet werden.

Use Case HLN-TSR

Für den Use Case HLN-TSR sind folgende spezifische Ausprägungen (Cause Codes) der DENM-Nachricht vorgesehen:

- 6 adverseWeatherCondition-Adhesion
- 9 hazardousLocation-SurfaceCondition

Der **Cause Code 6 adverseWeatherCondition-Adhesion** ist für die Warnung vor Ereignissen vorgesehen, die die Bodenhaftung reduzieren. Folgende Sub Cause-Codes sind vorgesehen (die Codes 11 und 12 sind derzeit nur vorgeschlagen und nicht Teil des Releases, dürften aber in der nächsten Version ergänzt werden²⁸):

Sub Cause Code	Bedeutung
0	Unavailable
1	heavyFrostOnRoad
2	fuelOnRoad
3	mudOnRoad
4	snowOnRoad
5	iceOnRoad
6	blackIceOnRoad
7	oilOnRoad

²⁸ Vgl. ETSI TS 102 894-2 CDD ASN.1 (forge.etsi.org)

8	looseChippings
9	instantBlackIce
10	roadsSalted
11	Flooding
12	waterOnRoad

Tabelle 16: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 6.

Wie aus der Liste der Sub Cause-Codes hervorgeht, ist der Cause Code 6 adverseWeatherCondition-Adhesion in der aktuellen Version nicht für die Warnung vor Starkregenereignissen vorgesehen. Allerdings sind zwei Sub Cause-Codes (11 – flooding und 12 – waterOnRoad) vorgeschlagen, die spezifisch die Use Cases abbilden, die im Projekt WETSAFE betrachtet werden.

Der **Cause Code 9 hazardousLocation-SurfaceCondition** ist für die Warnung vor gefährlichen Fahrbahnbedingungen vorgesehen. Die vorgesehenen Sub Cause-Codes sind:

Sub Cause Code	Bedeutung
0	Unavailable
1	Rockfalls
2	earthquakeDamage
3	sewerCollapse
4	Subsidence
5	snowDrifts
6	stormDamage
7	burstPipe
8	volcanoEruption
9	fallingIce
10	Fire
11	Flooding

Tabelle 17: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 9

Von diesen Sub Cause-Codes ist nur der Sub Cause Code 11 für die Warnung vor Überflutung geeignet, d.h. die Cause Code- / Sub Cause-Code-Kombination 9/11 könnte für die Warnung von Fließwegen verwendet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass folgende Cause Code- / Sub Cause-Code-Kombinationen einer DENM-Nachricht für die Warnung vor Starkregenereignissen geeignet sind:

Warnung	DENM Cause Code	DENM Sub Cause Code
Warnung vor Starkregen	19 adverseWeatherCondition- Precipitation	1 heavyRain
Warnung vor Wasser auf der Fahrbahn	6 adverseWeatherCondition- Adhesion	11 flooding bzw. 12 waterOnRoad
Warnung vor Fließwegen	9 hazardousLocation- SurfaceCondition	11 flooding

Tabelle 18: Zusammenfassung der relevantesten DENM Cause Codes

5.3.1.1. *Warnung vor Starkregen (C-Roads Use Case HLN-WCW)*

- causeCode: 19 adverseWeatherCondition-Precipitation
- subCauseCode: 1 heavyRain
- informationQuality: 6
- PrecipitationIntensity: 1100
- eventPosition
 - eventPosition shall be set to the centre of the area subject to the event.
 - awarenessDistance shall be provided using values 0 to 6.
 - 0 lessThan50m: for distances below 50 m.
 - 1 lessThan100m: for distances below 100 m.
 - 2 lessThan200m: for distances below 200 m.
 - 3 lessThan500m: for distances below 300 m.
 - 4 lessThan1000m: for distances below 1000 m.
 - 5 lessThan5km: for distances below 5000 m.
 - 6 lessThan10km: for distances below 10000 m.
 - trafficDirection shall be set to allTrafficDirections (0).
 - eventZone shall not be provided
- Zeitliche Modellierung
 - Start mit der Beregnung
 - Ende mit Ende der Beregnung

- Aktualisierung: alle 60 Sekunden
- Wiederholrate: jede Sekunde
- Gültigkeit: 120 Sekunden

5.3.1.2. *Warnung vor Wasser auf der Fahrbahn (C-Roads Use Case HLN-TSR)*

- **causeCode:** 6 adverseWeatherCondition-Adhesion oder 9 hazardousLocation-SurfaceCondition
- **subCauseCode:** 11 flooding
- **informationQuality:** 6
- **eventPosition**
 - Beginn der Fließwege > 1cm
- **trace**
 - Anfahrt zur eventPosition
 - 1000 Meter vor der eventPosition
- **Längsmodellierung**
 - Für jede Richtung eine Meldung
 - Längsverlauf aus UHD-Karte
 - Bei zwei Spuren: Trennlinie zw. 1. und 2. Spur
 - Bei drei Spuren: Mitte von 2. Spur
- **Zeitliche Modellierung**
 - Start mit Fließwege > 1cm
 - Ende mit vollständigem Abfluss
 - Aktualisierung: alle 60 Sekunden
 - Wiederholrate: jede Sekunde
 - Gültigkeit: 120 Sek.

Beispiel einer DENM-Warnmeldung adverseWeatherCondition-Adhesion/flooding

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde für das Szenario 1 folgendes Beispiel einer DENM 6 adverseWeatherCondition-Adhesion/11 flooding-Warnung generiert:

```
{
  "header": { "protocolVersion": 2, "messageId": 1, "stationId": 3334 },
  "denm": {
    "management": {
      "actionId": { "originatingStationId": 3334, "sequenceNumber": 101 },
      "detectionTime": 686822685816,
```

DENM Szenario 1: Seite 1/7

```
"referenceTime": 686822685816,
"eventPosition": {
  "latitude": 471752877,
  "longitude": 159969095,
  "positionConfidenceEllipse": {
    "semiMajorConfidence": 100,
    "semiMinorConfidence": 100,
    "semiMajorOrientation": 0
  },
  "altitude": { "altitudeValue": 0, "altitudeConfidence": "alt-000-10" }
},
"validityDuration": 120,
"stationType": 15
},
"situation": {
  "informationQuality": 6,
  "eventType": { "ccAndSc": { "adhesion6": 11 } }
},
"location": {
  "eventPositionHeading": { "value": 1829, "confidence": 127 },
  "detectionZonesToEventPosition": [
    [
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 202,
          "deltaLongitude": -28,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 1365,
          "deltaLongitude": -181,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 755,
          "deltaLongitude": -98,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 725,
          "deltaLongitude": -91,
          "deltaAltitude": 0
        }
      }
    ]
  ]
}
```

```
}  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 749,  
    "deltaLongitude": -83,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 660,  
    "deltaLongitude": -72,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 656,  
    "deltaLongitude": -66,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1306,  
    "deltaLongitude": -102,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1830,  
    "deltaLongitude": -132,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 926,  
    "deltaLongitude": -58,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 935,  
    "deltaLongitude": -50,
```

```
        "deltaAltitude": 0
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 1323,
          "deltaLongitude": -55,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 1318,
          "deltaLongitude": -24,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 865,
          "deltaLongitude": -11,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 785,
          "deltaLongitude": 1,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 531,
          "deltaLongitude": 5,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 656,
          "deltaLongitude": 15,
          "deltaAltitude": 0
        }
      },
      {
        "pathPosition": {
          "deltaLatitude": 815,
```

```
"deltaLongitude": 28,  
  "deltaAltitude": 0  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 831,  
    "deltaLongitude": 42,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1167,  
    "deltaLongitude": 78,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1308,  
    "deltaLongitude": 87,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1515,  
    "deltaLongitude": 128,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 608,  
    "deltaLongitude": 58,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {  
    "deltaLatitude": 1667,  
    "deltaLongitude": 173,  
    "deltaAltitude": 0  
  }  
},  
{  
  "pathPosition": {
```



```
        "deltaLatitude": 1065,  
        "deltaLongitude": 121,  
        "deltaAltitude": 0  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 602,  
            "deltaLongitude": 73,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 574,  
            "deltaLongitude": 74,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 1232,  
            "deltaLongitude": 166,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 1510,  
            "deltaLongitude": 204,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 1153,  
            "deltaLongitude": 164,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {  
        "pathPosition": {  
            "deltaLatitude": 1309,  
            "deltaLongitude": 187,  
            "deltaAltitude": 0  
        },  
    },  
    {
```

```

    "pathPosition": {
      "deltaLatitude": 2184,
      "deltaLongitude": 322,
      "deltaAltitude": 0
    }
  },
  {
    "pathPosition": {
      "deltaLatitude": 767,
      "deltaLongitude": 113,
      "deltaAltitude": 0
    }
  },
  {
    "pathPosition": {
      "deltaLatitude": 1631,
      "deltaLongitude": 239,
      "deltaAltitude": 0
    }
  },
  {
    "pathPosition": {
      "deltaLatitude": 18550,
      "deltaLongitude": 2758,
      "deltaAltitude": 0
    }
  }
],
"linkedIvims": [
  {
    "serviceProviderId": {
      "countryCode": "0A40",
      "providerIdentifier": 667
    },
    "iviIdentificationNumber": 201
  }
]
}

```

**Formel 3: Code 2: Beispielnachricht DENM für Szenario 1: adverseWeatherCondition-Adhesion/flooding.
 (DENM Szenario 1: über 7 Seiten)**

Abbildung 55 zeigt eine Visualisierung der DENM-Warnung 6 adverseWeatherCondition-Adhesion/11 flooding für den simulierten Abschnitt der A2.



Abbildung 55: Visualisierung der DENM-Warnung 6 adverseWeatherCondition-Adhesion/11 flooding für das Szenario 1

5.4. Modellierung auf Basis des IVI-Services

Neben dem DEN-Service gibt es im C-ITS-Ökosystem noch einen zweiten Dienst, der für die Kommunikation von Informationen an Fahrzeuge bzw. die Verkehrsteilnehmer:innen geeignet ist. Es handelt sich dabei um das **Infrastructure to Vehicle Information Service (IVI)**, das in **ETSI TS 103 301** in der aktuellen Version **v 2.2.1**²⁹ spezifiziert ist. Dieser Dienst ist dazu geeignet, um Informationen wie Verkehrszeichen aber auch weitere Informationen digital in das Fahrzeug zu übertragen. Dazu wird die **Infrastructure to Vehicle Information Message (IVIM)** verwendet. In der C-Roads-Plattform wird der Dienst **In-vehicle Signage (IVS)** genannt. Es gibt derzeit zwei definierte Use Cases, nämlich **Traffic Signs (IVS-TS)**

²⁹ Vgl. ETSI TS 103 301 V2.2.1 (etsi.org)

und **Free Text (IVS-FT)**, wobei in der Regel der Use Case IVS-TS verwendet werden soll und nur dann der Use Case IVS-FT, wenn die Informationen nicht über standardisierte Verkehrszeichen kommuniziert werden können. Die Kommunikation über Freitext birgt das Problem, dass die Informationen nicht maschineninterpretierbar sind und daher zwar möglicherweise für menschliche Verkehrsteilnehmer:innen lesbar (dabei gilt es auch das Sprachenproblem zu berücksichtigen), aber nicht für automatisierte Fahrsysteme interpretierbar sind.

Die Nutzung des Use Cases IVS-TS schafft den Vorteil, dass die Beschreibung der Verkehrsschilder auf Basis eines international genormten Vokabulars, dem **Graphic Data Dictionary (GDD) (ISO 14823-1:2024)**³⁰, erfolgt. Dadurch kann die Eindeutigkeit in der Übertragung und Interpretation der Schilder international gewährleistet werden, was einen erheblichen Vorteil gegenüber Freitext oder nationalen Lösungen hat. Da der C-Roads Use Case IVS-TS derzeit allgemein für alle im GDD definierten Schilder spezifiziert ist, gibt es keinen spezifischen Use Case für Starkregenwarnungen. Um passende Piktogramme zu identifizieren, muss daher direkt das GDD analysiert werden.

Generell können IVIs mit unterschiedlichen Typen generiert werden. Die Parameter einer IVI sind in **CEN ISO / TS 19321**³¹ spezifiziert. Dabei muss einerseits ein passender Typ einer IVI (Parameter iviType) ausgewählt werden. Folgende Typen einer IVI gibt es:

Value	Name	Usage
0	Immediate danger warning messages	Information regarding immediate danger warning.
1	Regulatory messages	Information regarding regulatory messages.
2	Traffic-related information messages	Traffic-related information which is not linked to immediate danger.
3	Pollution messages	Information messages and warning messages excluding driving prohibitions and obligations.
4	Not traffic-related information messages	Other information not linked to the traffic.

Tabelle 19: Typen einer IVI-Nachricht, Parameter iviType.

Als iviType bietet sich lt. Tabelle 19 der **Typ 0 (Immediate danger warning messages)** an. Der iviType 1 setzt eine verordnete Verkehrsmaßnahmen einer Verkehrsbehörde

³⁰ Vgl. ISO 76963 (iso.org)

³¹ Vgl. ISO 82956 (iso.org)

voraus, die bei einer Starkregenwarnung in der Regel nicht vorliegt. Die iviTypes 2-4 sind nicht für Warnungen vorgesehen.

Weiters müssen ein **Service Category Code** (Main Category und Sub Category) sowie ein **Pictogram Category Code** (Nature Category Code und Serial Number) lt. ISO 14823-1:2024 gesetzt werden. Der Standard enthält eine Vielzahl von möglichen Kombinationen, die nicht für Regenwarnungen geeignet sind. Daher werden hier nur jene Kombinationen genannt, die für Regenwarnungen in Frage kommen:

Pictogram code (with-out country code)		Description		Status
Service category code	Pictogram category code	Pictogram code name	Definition	
31	111	Rainfall	Warns that it is raining en route to a certain place.	D
	112	Slippery section of road ahead because of ice or snow	Warns that it is snowing or icing en route to a certain place.	D
	113	Fog	Warns that it is foggy en route to a certain place.	D
	114	Poor visibility through snow, rain or fog	Warns that visibility is poor due to snow, rain or fog.	D
	115~358	Reserved for future use.	Reserved for future use.	D
	359	Strong side wind	Warns that there is a strong side wind en route to a certain place.	D
	361	Flood	Warns of flooding en route to a certain place.	D
	362~999	Reserved for future use.	Reserved for future use.	D

Tabelle 20: Service Category & Pictogram Category Codes für ambientConditions.

Der **Service Category Code 31** (Main Category-Code 3 und Sub Category-Code 1) ist zur Kommunikation von Informationen zur Umgebung vorgesehen. Der **Pictogram Category Code 111** (Nature Category-Code 1 und Serial Number 11) ist zur Kommunikation von Regen vorgesehen. Der **Pictogram Category Code 361** (Nature Category Code 3 und Serial Number 61) ist zur Kommunikation von Überflutung vorgesehen. Damit bietet sich vor allem der Pictogram Category Code 361 für die Warnung vor Wasser auf der Fahrbahn an. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch IVIM für die Generierung von Warnmeldungen eingesetzt werden können. Folgende Optionen ergeben sich:

Warnung	Service Code	Pictogram Category Code
Warnung vor Starkregen	31	111
Warnung vor Wasser auf der Fahrbahn	31	361
Warnung vor Fließwegen	31	361

Tabelle 21: Mögliche Pictogram Category Codes von DENM Service Category Code 31.

- iviType: 0
- Service category lt. EN ISO 14823-1
 - Main category: ambientConditions [3]
 - Sub-category: ambientConditions [1]
- Pictogram category code lt. EN ISO 14823-1
 - Nature category number + serial number: 361 (Flood)
- Detection Zone
 - Lineare Detection Zone
 - 1000 Meter vor Beginn der Fließwege > 1cm
- Relevance Zone
 - Lineare Zone von Beginn der Fließwege bis Ende
- Längsmodellierung
 - Für jede Richtung eine Meldung
 - Längsverlauf aus UHD-Karte
 - Bei zwei Spuren: Trennlinie zw. 1. und 2. Spur
 - Bei drei Spuren: Mitte von 2. Spur
- Zeitliche Modellierung
 - Start/Ende mit Fließwegen > 1cm
 - Aktualisierung: alle 60 Sekunden
 - Gültigkeit: 120 Sekunden
 - Wiederholrate: jede Sekunde

Beispiel einer IVI-Warnmeldung

Nachfolgend wird das Beispiel einer IVI-Warnmeldung „Flooding“ gezeigt:

IVI „Flooding“: Seite 1/3

```
{
  "header": { "protocolVersion": 2, "messageID": 6, "stationID": 9999999 },
  "ivi": {
    "mandatory": {
      "serviceProviderId": { "countryCode": "0A40", "providerIdentifier": 667 },
      "iviIdentificationNumber": 201,
      "timeStamp": 686822685816,
      "validFrom": 686823045000,
      "validTo": 686823165000,
      "iviStatus": 0,
      "connectedDenms": [
```

```

    { "originatingStationID": 3334, "sequenceNumber": 101 }
  ],
  "optional": [
    {
      "giv": [
        {
          "detectionZoneIds": [2],
          "relevanceZoneIds": [1],
          "driverAwarenessZoneIds": [2],
          "iviType": 0,
          "roadSignCodes": [
            {
              "code": {
                "iso14823": {
                  "pictogramCode": {
                    "serviceCategoryCode": {
                      "ambientOrRoadConditionPictogram": "ambientCondition"
                    },
                    "pictogramCategoryCode": {
                      "nature": 3,
                      "serialNumber": 61
                    }
                  }
                }
              }
            }
          ]
        }
      ]
    }
  ],
  {
    "glc": {
      "referencePosition": {
        "latitude": 471752810,
        "longitude": 159969104,
        "positionConfidenceEllipse": {
          "semiMajorConfidence": 4095,
          "semiMinorConfidence": 4095,
          "semiMajorOrientation": 3601
        },
        "altitude": {
          "altitudeValue": 800001,
          "altitudeConfidence": "unavailable"
        }
      },
      "parts": [
        {

```

```

    "zoneId": 1,
    "zone": {
      "segment": {
        "line": {
          "absolutePositions": [
            { "latitude": 471752810, "longitude": 159969104 },
            { "latitude": 471748154, "longitude": 159969853 },
            { "latitude": 471744873, "longitude": 159970565 },
            { "latitude": 471740417, "longitude": 159971756 },
            { "latitude": 471736072, "longitude": 159973095 },
            { "latitude": 471734753, "longitude": 159973523 },
            { "latitude": 471734693, "longitude": 159973543 },
            { "latitude": 471734012, "longitude": 159973770 }
          ]
        }
      }
    },
    {
      "zoneId": 2,
      "zone": {
        "segment": {
          "line": {
            "absolutePositions": [
              { "latitude": 471752877, "longitude": 159969095 },
              { "latitude": 471758563, "longitude": 159968427 },
              { "latitude": 471761558, "longitude": 159968213 },
              { "latitude": 471765627, "longitude": 159968055 },
              { "latitude": 471767589, "longitude": 159968047 },
              { "latitude": 471776456, "longitude": 159968668 },
              { "latitude": 471783661, "longitude": 159969625 },
              { "latitude": 471806952, "longitude": 159973080 }
            ]
          }
        }
      }
    }
  ]
}

```

**Formel 4: Code 3: Beispielnachricht IVI für „Flooding“
 (IVI „Flooding“ über 3 Seiten)**

5.5. Handlungsempfehlung & Diskussion

Die rechtliche Grundlage für Warnungen im Zusammenhang mit Starkregenereignissen bilden die EU-Richtlinie 2010/40/EU sowie deren Novellierung durch die Richtlinie (EU) 2023/2661 und die Delegierte Verordnung (EU) 886/2013 zu sicherheitsrelevanten Verkehrsinformationen. Die darin definierten Kategorien werden sowohl in DATEX II-Profilen als auch in den C-Roads-Spezifikationen aufgegriffen. Im Projekt WETSAFE wurde untersucht, inwieweit sich Simulationsergebnisse zu Starkregenereignissen in bestehende Standards wie DATEX II und C-ITS integrieren lassen. Grundsätzlich stehen geeignete Nachrichtentypen zur Verfügung, um vor Wasser auf der Fahrbahn oder verschlechterten Fahrbedingungen zu warnen. Dabei ist klar festzuhalten, dass es sich um Warnungen zu Fahrbahnzuständen auf konkreten Straßenabschnitten handelt und nicht um allgemeine Starkregenwarnungen für die Bevölkerung. Eine Herausforderung stellt die dynamische Weiterentwicklung der Standards dar. Nicht immer ist eindeutig geregelt, welche Nachrichtentypen oder Subcodes für welche Art von Warnung eingesetzt werden sollen. Teilweise fehlen klare Zuordnungen oder relevante Subcodes, insbesondere im Bereich der C-ITS-Meldungen. Dies erschwert eine konsistente und standardkonforme Umsetzung. Im Projekt zeigte sich zudem, dass die räumliche Abgrenzung von Warnmeldungen besonders anspruchsvoll ist. Während Warnungen punktuell oder abschnittsbezogen erfolgen müssen, sind Starkregenereignisse häufig flächenhaft ausgeprägt. In den Abstimmungen mit dem Auftraggeber wurde daher deutlich, dass generelle Starkregenwarnungen als wenig zielführend eingeschätzt werden. Deutlich sinnvoller sind Warnungen vor konkreten Auswirkungen wie Wasser auf der Fahrbahn oder unerwarteten Fließwegen, da diese für Verkehrsteilnehmer:innen und automatisierte Systeme nicht unmittelbar erkennbar sind. Auf Basis der Simulationsergebnisse können solche Warnungen räumlich besser abgegrenzt und automatisiert generiert werden. Die Wahl geeigneter Subtypen (z. B. streaming water oder flooding) ist dabei abhängig von Intensität und Ausdehnung der Ereignisse und kann nicht pauschal festgelegt werden. Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden im Projekt bewusst nicht weiterverfolgt, da diese rechtlich zu verordnen sind und über digitale Kanäle derzeit keine bindende Wirkung entfalten. Die entwickelten Warnkonzepte sind sowohl für manuell gesteuerte als auch für (teil-)automatisierte Fahrzeuge relevant. Aufgrund der flächenhaften Ausdehnung der betrachteten Ereignisse

sind fahstreifenspezifische Warnungen zwar technisch denkbar, für die untersuchten Szenarien jedoch nicht zweckmäßig.

6. ZUSAMMENFASSUNG DER PROJEKTERGEBNISSE

Im Projekt WETSAFE wurde eine durchgängige Methodik zur Identifikation, Bewertung und Kommunikation von sicherheitsrelevanten Gefahrenstellen infolge von Starkregenereignissen auf Autobahnen entwickelt und exemplarisch angewendet. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass Starkregenereignisse im Zuge des Klimawandels an Häufigkeit und Intensität zunehmen und insbesondere auf hochrangiger Straßeninfrastruktur mit hohen Fahrgeschwindigkeiten zu erheblichen Risiken führen können. Lokale Wasseransammlungen, Aquaplaning sowie unerwartete Fließwege entstehen dabei häufig nicht allein durch den Niederschlag auf der Fahrbahn, sondern durch das komplexe Zusammenspiel von Fahrbahngeometrie, Entwässerungssystemen sowie Zu- und Abflüssen aus dem angrenzenden Gelände.

Ein zentrales Projektergebnis ist die erfolgreiche Erstellung eines hochaufgelösten digitalen Zwillings eines ausgewählten Autobahnabschnitts einschließlich des relevanten Umfelds. Der digitale Zwilling basiert auf einer Kombination aus Mobile Laser Scanning (MLS), Airborne Laser Scanning (ALS), Satellitendaten sowie ergänzenden Bestands- und Fachdaten. Er bildet die Fahrbahn, bauliche Elemente wie Betonleitwände, Entwässerungseinrichtungen sowie Geländeformen im Vorland mit der für hydraulische Simulationen erforderlichen Genauigkeit ab. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass nicht für alle Bereiche gleichermaßen hochaufgelöste Daten notwendig sind: Während für die Fahrbahn selbst eine sehr hohe geometrische Genauigkeit entscheidend ist, können für angrenzende Flächen vielfach vorhandene Geodaten verwendet werden, sofern deren Aktualität und Qualität gewährleistet sind. Diese Differenzierung stellt eine wesentliche Grundlage für eine wirtschaftliche Anwendung der Methodik dar.

Aufbauend auf dem digitalen Zwilling wurden hydrologisch-hydraulische Modelle erstellt und in mehreren Simulationsstufen angewendet. Die Simulationen umfassten sowohl die Beregnung des Vorlands, den Abfluss aus dem angrenzenden Gelände auf die Autobahn, die direkte Beregnung der Fahrbahn als auch kombinierte Szenarien. Durch diese mehrstufige Vorgehensweise konnten die Wirkmechanismen von Starkregenereignissen detailliert analysiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Gefährdungen auf der Fahrbahn häufig durch zusätzliche Zuflüsse aus dem Umfeld verstärkt werden, während in anderen Bereichen Abflüsse aus der Fahrbahn in das Gelände zu einer Entlastung führen können.

Damit wurde bestätigt, dass eine isolierte Betrachtung der Fahrbahn nicht ausreicht, um sicherheitsrelevante Situationen realistisch zu erfassen.

Die durchgeführten Referenz- und Szenariosimulationen erlaubten eine sehr feinräumige Analyse der Wasserfilmbildung, der Fließwege und der Überflutungsdynamik. In einzelnen Bereichen konnten Gefährdungen bis auf Spur- bzw. Teilabschnittsebene identifiziert werden. Für die weitere Nutzung der Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Informationsgenerierung, wurden diese detaillierten Ergebnisse bewusst zu abschnittsbezogenen Risikozonen aggregiert. Dadurch wird eine robuste und verlässliche Bewertung ermöglicht, die Unsicherheiten in den Eingangsdaten und natürlichen Variationen realer Ereignisse berücksichtigt.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis des Projekts ist die Festlegung eines szenariobasierten Ansatzes zur Nutzung der Simulationsergebnisse. Die im Projekt erstellten Modelle dienen nicht der ereignisbezogenen Echtzeitsimulation, sondern bilden eine Referenzbasis für definierte Niederschlagsintensitäten und -dauern, einschließlich realer Starkregenereignisse sowie synthetischer Bemessungsszenarien. Auf dieser Grundlage können Schwellenwerte und Triggerpunkte abgeleitet werden, bei deren Überschreitung von einer erhöhten Gefährdung auszugehen ist. Dieser Ansatz ermöglicht eine frühzeitige Aktivierung von Warnungen, ohne für jedes Ereignis neue Simulationen durchführen zu müssen.

Ergänzend zur Modellierung und Simulation wurde untersucht, wie die gewonnenen Erkenntnisse in bestehende Informations- und Kommunikationssysteme integriert werden können. Im Projekt wurde gezeigt, dass Warnungen vor konkreten Fahrbahnzuständen, wie Wasser auf der Fahrbahn oder unerwarteten Fließwegen, grundsätzlich mit bestehenden Standards wie DATEX II und C-ITS modelliert werden können. Dabei wurde deutlich, dass weniger allgemeine Starkregenwarnungen zielführend sind, sondern vielmehr Hinweise auf konkrete, für Verkehrsteilnehmende und Fahrzeugsysteme nicht unmittelbar erkennbare Auswirkungen. Gleichzeitig wurden Grenzen bestehender Nachrichtentypen und Subcodes identifiziert, insbesondere im Hinblick auf die räumliche Abgrenzung flächenhafter Ereignisse.

Zusammenfassend zeigt das Projekt WETSAFE, dass die entwickelte Methodik technisch funktionsfähig ist und eine fachlich belastbare Grundlage zur Identifikation und Bewertung von Starkregen-Gefahrenstellen auf Autobahnen darstellt. Die Kombination aus digitalem Zwilling, hydrologisch-hydraulischer Simulation und standardkonformer Informationsableitung ermöglicht eine realistische Abbildung komplexer

Wirkzusammenhänge und schafft die Voraussetzungen für eine frühzeitige, situationsgerechte Information von Verkehrsteilnehmenden und (teil-)automatisierten Fahrzeugen. Gleichzeitig wurden im Projekt zentrale Anforderungen und Abhängigkeiten identifiziert, die für eine nachhaltige Anwendung und Weiterentwicklung der Methodik von Bedeutung sind und in den nachfolgenden Handlungsempfehlungen vertieft behandelt werden.

7. HANDLUNGSEMPFEHLUNG

Die im Projekt WETSAFE gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die entwickelte Methodik sowohl technisch funktionsfähig als auch fachlich relevant ist. Gleichzeitig wurde deutlich, dass eine nachhaltige Anwendung über das Projekt hinaus nicht allein eine technische Fragestellung darstellt, sondern maßgeblich von geeigneten organisatorischen, rechtlichen und strukturellen Rahmenbedingungen sowie von einer durchdachten Skalierungsstrategie abhängt. Die nachfolgenden Handlungsempfehlungen fassen die zentralen Erkenntnisse zusammen und ordnen sie in einen übergeordneten Kontext ein.

7.1. Schaffung der Rahmenbedingungen

Eine wesentliche Voraussetzung für die Weiterführung und Anwendung der Projektergebnisse ist die frühzeitige Klärung fachlicher, organisatorischer und rechtlicher Rahmenbedingungen. Insbesondere im Bereich der sicherheitsrelevanten Parameter zeigte sich, dass technische Machbarkeit allein nicht ausreichend ist. Schwellenwerte, räumliche Abgrenzungen von Warnungen sowie die Art der Informationsausspielung müssen in enger Abstimmung mit dem Straßenbetreiber definiert werden, da diese Aspekte auch betriebliche Abläufe und rechtliche Verantwortlichkeiten berühren.

Im Projekt wurde deutlich, dass generelle Starkregenwarnungen aus Sicht des Straßenbetreibers nur eingeschränkt zielführend sind. Deutlich relevanter sind Warnungen vor konkreten Auswirkungen auf die Fahrbahn, wie Wasseransammlungen oder unerwartete Fließwege. Für eine operative Umsetzung ist daher eine klare Festlegung erforderlich, welche Ereignisse als sicherheitsrelevant gelten und in welcher Form diese standardkonform kommuniziert werden sollen. Dies betrifft insbesondere die Nutzung bestehender Standards wie DATEX II und C-ITS sowie die Auswahl geeigneter Nachrichtentypen und Subcodes.

Darüber hinaus sind stabile und aktuelle Datengrundlagen eine zentrale Rahmenbedingung. Für die Fahrbahn selbst sind hochaufgelöste Vermessungsdaten

essenziell, während für angrenzende Bereiche vielfach bestehende Geodaten genutzt werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichende Aktualität der Daten. Organisatorische Prozesse zur regelmäßigen Aktualisierung und Qualitätssicherung dieser Datengrundlagen sind daher ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Umsetzung. Nicht zuletzt zeigte das Projekt, dass die Integration unterschiedlicher Fachdisziplinen – Vermessung, Hydraulik, Meteorologie und Verkehrstelematik – klare Schnittstellen und abgestimmte Prozesse erfordert. Die im Projekt etablierten Abstimmungsmechanismen haben sich bewährt und sollten auch bei einer Weiterführung oder Ausweitung der Methodik beibehalten werden.

7.2. Skalierung der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse zeigen ein hohes Potenzial für eine Übertragung auf weitere Autobahnabschnitte und perspektivisch auf größere Teile des Autobahnnetzes. Voraussetzung für eine skalierbare Anwendung ist eine klare Differenzierung zwischen Bereichen, in denen hochaufgelöste Daten zwingend erforderlich sind, und solchen, in denen vorhandene Datensätze ausreichend sind. Diese Erkenntnis ermöglicht eine wirtschaftlich sinnvolle Priorisierung von Datenerhebungen und reduziert den Aufwand bei einer großflächigen Umsetzung.

Ein zentraler Ansatz für die Skalierung liegt in der Nutzung vorab berechneter Risikokarten für definierte Niederschlagsintensitäten. Durch diesen Ansatz können Warnungen automatisiert aus aktuellen Niederschlagsprognosen abgeleitet werden, ohne dass für jedes Ereignis neue Simulationen erforderlich sind. Die im Projekt validierte Methodik eignet sich daher besonders für eine österreichweite Anwendung, sofern die regionalen Besonderheiten bei der Erstellung der Risikokarten berücksichtigt werden.

Für eine weitere Skalierung ist zudem die Standardisierung der Informationsableitung entscheidend. Die im Projekt identifizierten Potenziale und Grenzen bestehender Kommunikationsstandards zeigen, dass eine konsistente Nutzung vorhandener Formate möglich ist, gleichzeitig aber weiterer Klärungsbedarf hinsichtlich der konkreten Anwendung besteht. Eine vertiefende Abstimmung zwischen Straßenbetreibern, Standardisierungsgremien und Forschungseinrichtungen kann dazu beitragen, die Projektergebnisse in bestehende Datenökosysteme zu integrieren.

Zusammenfassend zeigt das Projekt WETSAFE, dass die entwickelte Methodik eine belastbare Grundlage für ein skalierbares, simulationsbasiertes Frühwarnsystem bei Starkregenereignissen auf Autobahnen darstellt. Die Kombination aus technischen Ergebnissen, validierten Prozessen und klar identifizierten Rahmenbedingungen bietet eine

solide Basis für weiterführende Projekte und eine schrittweise Überführung in den operativen Betrieb.

ANHANG I: TABELLEN- UND FORMELVERZEICHNIS

Tabellen:

Tabelle 1: Gewählte Flugparameter für das ALS zur Aufnahme des Untersuchungsgebiets im Projekt WETSAFE.....	22
Tabelle 2: Berechnete Parameter zur erwartbaren Datenqualität auf Grundlage der gewählten Flugparameter für das ALS.	23
Tabelle 3: 3 Arten von Extremwetterereignissen nach Wussow (0-6 Stunden) in Tabellarischer Form (zu Abbildung 32).	54
Tabelle 4: Details zu den Risikozonen - Berechnung 100-jährliche / 30-Minuten.	69
Tabelle 5: Details zu den Risikozonen - Berechnung 5-jährliche / 15-Minuten.	73
Tabelle 6: Gegenüberstellung der Nachrichtentypen für die Category a Temporary Slippery Road.	79
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Nachrichtentypen für die Category h Exceptional Weather Conditions.....	80
Tabelle 8: Möglichkeiten in Datex II und DENM zur Warnung vor Starkregenereignissen lt. TISA.	81
Tabelle 9: Ergänzte Möglichkeiten mit Datex II und DENM zur Warnung vor Starkregenereignissen.	81
Tabelle 10: Szenario 1: Berechnung der Autobahn für 15 Minuten, 56 mm/h Niederschlag.	84
Tabelle 11: Szenario 2: Berechnung der Autobahn 30 Minuten, 110 mm/h Niederschlag.	85
Tabelle 12: Mögliche Datex II Codes	95
Tabelle 13: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 17.....	100
Tabelle 14: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 17.....	100
Tabelle 15: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 19.....	101
Tabelle 16: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 6.....	102
Tabelle 17: Mögliche Sub-Cause Codes von DENM Code 9.....	102
Tabelle 18: Zusammenfassung der relevantesten DENM Cause Codes	103
Tabelle 19: Typen einer IVI-Nachricht, Parameter iviType.	
Tabelle 20: Service Category & Pictogram Category Codes für ambientConditions.	113
Tabelle 21: Mögliche Pictogram Category Codes von DENM Service Category Code 31.	113

Formeln/Codes:

Formel 1: Objektive Starkregen-Definition nach Wussow, überarbeitet von Nachtnebel ..	53
Formel 2: Code 1: Beispielnachricht Datex II für Szenario 1: WeatherRelatedRoadConditions/streamingWater-Warnung	97
Formel 3: Code 2: Beispielnachricht DENM für Szenario 1: adverseWeatherCondition-Adhesion/flooding.	110
Formel 4: Code 3: Beispielnachricht IVI für „Flooding“	116

ANHANG II: ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets auf der A2-Südautobahn. Rot markiert ist der mittels 3D-Vermessung erfasste Teil der Autobahn und das umliegende Einzugsgebiet.	14
Abbildung 2: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 1.7.2023, 00 UTC bis 8.7.2023, 00 UTC.	16
Abbildung 3: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 1.7.2023, 00 UTC bis 8.7.2023, 00 UTC. Zoom in die Testregion Bad Waltersdorf.....	16
Abbildung 5: Zeitserie des aggregierten Niederschlags am nächstgelegenen INCA Gitterpunkt.	17
Abbildung 4: Aggregierte INCA Niederschlagsanalysen für den Zeitraum 11.6.22, 00 UTC-13.6.23, 00 UTC.	17
Abbildung 6: Messfahrzeug mit montiertem MLS in Basiskonfiguration inkl. Pavement-Kameras	20
Abbildung 7: 2 Begleitfahrzeuge der ASFINAG als Abstandshalter (Beispielbild: Projekt Testregion ALP.Lab).....	21
Abbildung 8: RiCOPTER im Einsatz	22
Abbildung 9: Detailansicht der Trajektorien der eingesetzten Messsysteme auf bzw. entlang der A2-Südautobahn. Die Trajektorie des MLS ist violett und die des ALS pink dargestellt.	25
Abbildung 10: Übersicht aller Trajektorien der eingesetzten Messsysteme zur Erfassung des Untersuchungsgebiets. In Violett sind die Trajektorien des MLS und in Pink die Trajektorien des ALS dargestellt.	27
Abbildung 11: Eine der Startpositionen des ALS.....	28
Abbildung 12: Darstellung der Menge der aufgezeichneten Rohdaten und der Länge der Trajektorien je Messsystem als Säulendiagramm.	29
Abbildung 13: Erzielte Punktdichte in Punkte pro Quadratmeter je Record für das MLS, dargestellt als Histogramm.....	31
Abbildung 14: Erzielte Punktdichte in Punkte pro Quadratmeter je Flugmission und Flugstreifen für das ALS, dargestellt als Histogramm.....	31
Abbildung 15: Punktwolke Fahrbahn und Umgebung von MLS.....	34
Abbildung 16: Punktwolke Fahrbahn und Umgebung von ALS	34
Abbildung 17: Digitales Geländemodell (DGM) aus Mobile Mapping Daten	35

Abbildung 18: Mit digitalem Höhenmodell angepasste Geometrie der Fahrbahnen im Untersuchungsgebiet.	36
Abbildung 19: Auszug colorierte Punktwolke / Aufnahme Joanneum Research 10/2024 .	42
Abbildung 20: Digitales Geländemodell (DGM) bzw. Gelände-Schummerung des Vorlandes und der Autobahn	42
Abbildung 21: Fehlerbild rillenartige Ausbildung der Autobahn.	43
Abbildung 22: Fehlerbild Rillenartige Ausbildung der Feldwege im Umland.	44
Abbildung 23: Fehlerbild lokale Datenlücken („Löcher“) im Fahrbahnbereich.....	44
Abbildung 24: Kolorierte Punktwolke des Projektgebietes – Roter Pfeil: Herausgefilterte Stützmauer im Nahbereich der Autobahn.	45
Abbildung 25: Plausibilisierung der Stützmauer mittels Google Street View Daten (Google Maps, April 2021).....	45
Abbildung 26: Maßgebliche Einbauten im Projektgebiet.	46
Abbildung 27: Ermittlung der Hangneigungen im Projektgebiet zur Abgrenzung des Einzugsgebietes für Starkregenereignisse	47
Abbildung 28: Einzugsgebiet für Starkregensimulation, Rot = Beregnung des Vorlandes, Orange = Beregnung der Autobahnflächen.....	48
Abbildung 29: Schematischer Ablauf von INCA, Kombination aus Beobachtungsdaten und NWP Prognosen, realtime Anwendungen Hydrologie, Warnungen und andere Produkte für spezifische Nutzer.	49
Abbildung 30: Beispiel für eine 15min Analyse + Nowcasts (GIF)	49
Abbildung 31: Lage und Intensitäten des Gitterpunktes gem. EHYD-Bemessungsniederschlag (Quelle: https://ehyd.gv.at/ , Stand 2020).....	52
Abbildung 32: 3 Arten von Extremregenereignissen nach Wussow (0-6 Stunden) (Grafik)	54
Abbildung 33: Überflutungsflächen / Abfluss durch Starkregen aus dem Vorland - Simulationsstufe 1 (100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis. - Rote Linie: Entnahme Zuflussganglinien für Simulationsstufe 2 und 4.	60
Abbildung 34: Überflutungsflächen durch Vorlandabfluss auf Autobahn - Simulationsstufe 2 (100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis.	61
Abbildung 35: Vorlandabfluss auf Autobahn- Ausschnitt Simulationsmodell Stufe 2, Wassertiefen auf den Autobahnflächen.....	62
Abbildung 36: Überflutungsflächen durch Starkregen auf Autobahn - Simulationsstufe 3 (100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis	63

Abbildung 37: Wassertiefen durch Starkregen auf Autobahn - Ausschnitt Simulationsmodell Stufe 3, Wassertiefen auf den Autobahnflächen.	64
Abbildung 38: Überflutungsflächen durch Kombination Starkregen und Vorlandabfluss auf Autobahn - Simulationsstufe 4 (100-jährlich / 30- minütiges Starkregenereignis).	65
Abbildung 39: Vorlandabfluss durch Starkregen auf Autobahn – Gefahrenstelle bei Straßen- km 127,35 A2 Süd Autobahn.	67
Abbildung 40: Vollständig benetzter Autobahnabschnitt inkl. Abflussgräben durch Berechnung.	68
Abbildung 41: Risikozone maximale Ausdehnung – Wasserfilm gesamte Fahrbahn > 1,0 cm, Zeitschritt 600 Sekunden.	70
Abbildung 42: Risikozone – Wasserfilm gesamte Fahrbahn > 0,5 cm – 1,0 cm, Zeitschritt 180 Sekunden.	70
Abbildung 43: Risikozone nach Ende Berechnung – Wasserfilm gesamte Fahrbahn am Abklingen, Zeitschritt 1800 Sekunden.	71
Abbildung 44: Detail der Risikozone maximale Ausdehnung – Wasserfilm gesamte Fahrbahn > 1,0 cm, Zeitschritt 600 Sekunden.	71
Abbildung 45: Ende Wasserfilm auf der gesamten Autobahn, Abnahme der Fließwege > 1 cm, Zeitschritt 1920 Sekunden.	72
Abbildung 46: Visualisierung des Wasserfilms 0,5 – 1,0cm auf der Autobahn kurz nach dem Start der Berechnung	86
Abbildung 47: (a) Wasserfilm 0,5-1,0cm sowie Fließwege > 1cm im gesamten Abschnitt, (b) Detaildarstellung des Wasserfilms 0,5-1,0cm sowie der Fließwege > 1cm in einem Bereich	87
Abbildung 48: Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 1	88
Abbildung 49: Zeitliche Modellierung der Warnmeldungen für das Szenario 2.	89
Abbildung 50: Komponenten von Datex II	90
Abbildung 51: SituationPublication in Datex II mit einem oder mehreren SituationRecords	91
Abbildung 52: PoorEnvironmentConditions-Klasse in Datex II	92
Abbildung 53: Mögliche Ausprägungen der Conditions-Klasse (PoorEnvironmentConditions oder WeatherRelatedRoadConditions)	93
Abbildung 54: Datex II-Klasse EnvironmentalObstruction	94
Abbildung 55: Visualisierung der DENM-Warnung 6 adverseWeatherCondition- Adhesion/11 flooding für das Szenario 1	111

ANHANG III: LITERATUR-/ & QUELLENVERZEICHNIS

Europäisches Parlament und Rat (2010): Richtlinie 2010/40/EU zur Rahmenregelung für die Bereitstellung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für die Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. Amtsblatt der Europäischen Union L 207, 6.8.2010, S. 1–13. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Europäisches Parlament und Rat (2023): Richtlinie (EU) 2023/2661 zur Änderung der Richtlinie 2010/40/EU und zur Festlegung von Vorschriften für sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen. Amtsblatt der Europäischen Union L 249, 17.10.2023, S. 1–57. Online verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2661/oj>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Europäische Kommission (2013): Delegierte Verordnung (EU) Nr. 886/2013 der Kommission vom 25. April 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/40/EU im Hinblick auf die Bereitstellung sicherheitsrelevanter Verkehrsinformationen. Amtsblatt der Europäischen Union L 249, 26.9.2013, S. 1–10. Online verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2013/886/oj

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Österreichische Bundesregierung (2012): Verkehrs-Informationsgesetz 2012 – VIG, BGBl. I Nr. 38/2012 i.d.g.F.; Stammfassung 20008275. Online verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008275>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ETSI (2021): ETSI TS 103 831 V2.1.1 – Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Environmental Notification Message (DENM). European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar unter:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103800_103899/103831/02.01.01_60/ts_103831v020101p.pdf
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ETSI (2023): ETSI TS 103 831 V2.2.1 – Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Environmental Notification Message (DENM). European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar unter: https://forge.etsi.org/rep/ITS/asn1/denm_ts103831/-/tree/v2.2.1
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ETSI (2021): ETSI TS 102 894-2 V2.1.1 – Intelligent Transport Systems (ITS); Common Data Dictionary (CDD). European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289402/02.01.01_60/ts_10289402v020101p.pdf
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ETSI (o.J.): ETSI TS 102 894-2 – Common Data Dictionary (CDD), ASN.1-Definition. European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar unter: https://forge.etsi.org/rep/ITS/asn1/cdd_ts102894_2/-/blob/WI-001998/ETSI-ITS-CDD.asn
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ETSI (2025): ETSI TS 103 301 V2.2.1 – Intelligent Transport Systems (ITS) Standards. European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103300_103399/103301/02.02.01_60/ts_103301v020201p.pdf
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): Datex II – Datenmodell für Verkehrsinformationen. Online verfügbar unter: <https://datex2.eu/>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): Recommended Profiles – Safety-Related Profiles, Kategorie H.
Online verfügbar unter: <https://docs.datex2.eu/recommended-profiles/rrp/srti/categoryH/>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): Recommended Profiles – Safety-Related Profiles, Kategorie A.
Online verfügbar unter: <https://docs.datex2.eu/recommended-profiles/rrp/srti/categoryA/>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): Recommended Profile – Road Weather Information. Online verfügbar
unter: <https://docs.datex2.eu/recommended-profiles/rsp/roadweatherinformation/>

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): UML Model Element EA1395. Online verfügbar unter:
https://docs.datex2.eu/_static/data/v3.6/umlmodel/html/EARoot/EA4/EA6/EA2/EA1395.htm

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Datex II (o.J.): UML Model Element EA1370. Online verfügbar unter:
https://docs.datex2.eu/_static/data/v3.6/umlmodel/html/EARoot/EA4/EA6/EA2/EA1370.htm

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

C-ROADS (o.J.): C-ROADS Operations v0.91. Online verfügbar unter:
https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_operations_v0.91.pdf

(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

C-ROADS (o.J.): C-ROADS – Cooperative Intelligent Transport Systems Network.
Online verfügbar unter: <https://www.c-roads.eu/>
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

NAPCORE (o.J.): NAPCORE – Network of Authorities for the Provision of Core
Transport Data. Online verfügbar unter: <http://www.napcore.eu/>
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ITSstandards.eu (o.J.): ITS Standards Information Portal. Online verfügbar unter:
<https://www.itsstandards.eu/>
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

TISA (o.J.): Traveller Information Services Association. Online verfügbar unter:
<https://tisa.org/>
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

TISA (2020): SRTITF25001 – Safety-Related Message Sets (DATEX II, DENM,
TPEG-TEC, TMC), Revision 4, Version 1.0. Traveller Information Services
Association. Online verfügbar unter: [https://tisa.org/wp-
content/uploads/SRTITF25001_SafetyrelatedMessage-Sets-
DATEXII_DENM_TPEG-TEC_TMC_Revision4-v10.pdf](https://tisa.org/wp-content/uploads/SRTITF25001_SafetyrelatedMessage-Sets-DATEXII_DENM_TPEG-TEC_TMC_Revision4-v10.pdf)
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

ZAMG (o.J.): INCA – Integrated Nowcasting Through Comprehensive Analysis.
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Online verfügbar unter:
<https://www.zamg.ac.at/incaanalyse/>
(zuletzt geprüft: 31.10.2025).

Schmidt, M., Kwella, B. & Pieth, N. (2009): TPEG löst TMC ab – Eine neue
Generation der Navigation. ATZelektronik 4, S. 30–35.
<https://doi.org/10.1007/BF03223985>

Herrmann, S. R. (2008): Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen.

Wussow, G. (1922): Untere Grenzwerte dichter Regenfälle. Meteorologische Zeitschrift 39 (Heft 6), S. 173–178.

Nachtnebel, H. P. (2003): Hydrologie, Studienblätter. IWHW – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, 376 S.