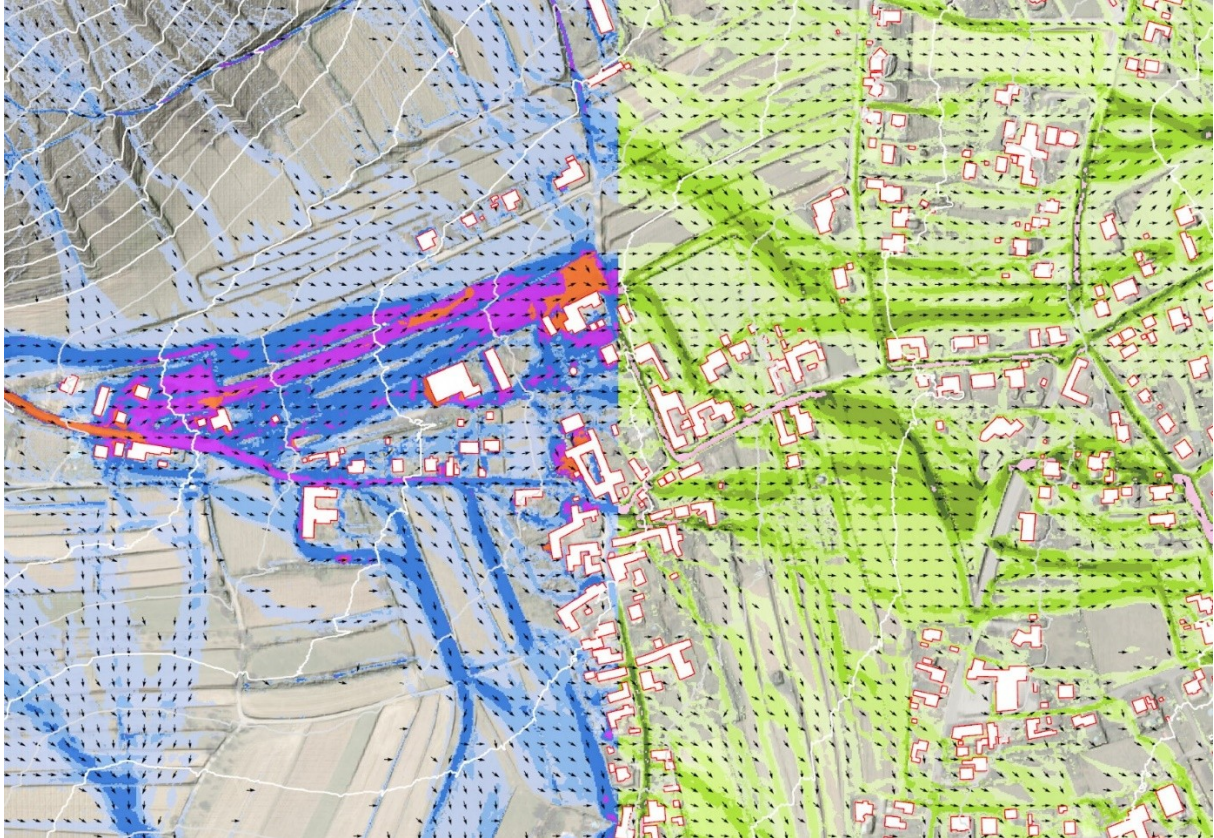


Hangwassermodellierung „Pluviale Überflutungen“

Standard für Niederösterreich



WASSER
NIEDERÖSTERREICH



Standard für die Hangwassermodellierung in Niederösterreich

Juni 2026

Amt der NÖ Landesregierung
Abteilung Wasserwirtschaft
Abteilung Siedlungswasserwirtschaft
Landhausplatz 1, A-3109 St. Pölten

Dieser Standard stellt eine wichtige, jedoch nicht ausschließliche Grundlage für eine fachgerechte Lösung dar. Seine Anwendung entbindet die Anwenderin nicht von der Verantwortung für das eigene Handeln und die sachgerechte Umsetzung im konkreten Fall. Eine Haftung der am Standard Mitwirkenden und der Auftraggeberinnen ist ausgeschlossen.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in diesem Leitfaden ausschließlich die weibliche Form personenbezogener Bezeichnungen verwendet. Sämtliche Angaben beziehen sich gleichermaßen auf Personen aller Geschlechter. Die gewählte Formulierung dient der sprachlichen Vereinfachung und ist ausdrücklich als geschlechtsneutral zu verstehen.

An der Erstellung des Standards haben mitgewirkt:

	<p>Lugitsch und Partner Ziviltechniker GmbH Wielandgasse 2 8010 Graz office@zt.lugitsch.at Christoph König, Julia Hauczinger</p>
	<p>flow engineering OG Ingenieurbüro für Wasserbau und Hydrologie Lessingstraße 30 8010 Graz office@flowengineering.at Clemens Dorfmann, Sebastian Gegenleithner</p>
	<p>IB-NUJIĆ j.d.o.o Okićka 22 A 10430 Samobor, Kroatien office@ib-nujic.de Marinko Nujić</p>
	<p>Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Graz Stremayrgasse 10/II 8010 Graz hydro@tugraz.at Miriam Monschein</p>

Inhaltsangabe

Abkürzungsverzeichnis	vi
1. Einleitung	1
2. Allgemeines	4
2.1. Zielsetzung	4
2.2. Aufgabenstellung	4
2.3. Anwendungsbereich	5
2.4. Verbindlichkeiten	5
2.5. Aufbau des Dokuments	6
3. Empfohlene Vorgehensweise für die Ausarbeitung von pluvialen Abflussuntersuchungen	8
3.1. Vorprojekt zur Festlegung von projektrelevanten Rahmenbedingungen	8
3.2. Empfohlene Vorgehensweise für Sachbearbeiterinnen	9
4. Datengrundlagen	14
5. Festlegung des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche	19
5.1. Begriffsbestimmungen	19
5.2. Richtwerte für Ergänzungen in Feinmodellierungsbereichen	22
6. Hydrologische Modellierung	25
6.1. Einleitung	25
6.2. Niederschlag	26
6.2.1. Niederschlagseingangsdaten	26
6.2.2. Niederschlagsdauerstufen	27
6.2.3. Räumliche Verteilung und flächige Abminderung des Ereignisniederschlags	30
6.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags	31
6.2.5. Zusammenfassende Empfehlungen – Niederschlagseingangsdaten	33
6.3. Abflussbildungsansätze	34
6.3.1. HydroBOD-Verfahren	34
6.3.2. Runoff-Curve-Number-Verfahren (CN-Verfahren)	36
6.3.3. Green-Ampt-Verfahren	38
6.3.4. Kalibrierung, Validierung und Plausibilisierung der Abflussbildung	39
6.3.5. Zusammenfassende Empfehlungen – Abflussbildungsansätze	40
7. Berücksichtigung von Gewässern	41
7.1. Problemstellung	41
7.2. Mögliche Fälle und empfohlene Vorgehensweise	41

7.3.	Zusammenfassende Empfehlungen – Berücksichtigung von Gewässern	44
8.	Zweidimensionale tiefengemittelte pluviale Überflutungsmodellierung	45
8.1.	Einleitung.....	45
8.2.	Grundlagen der 2D Modellierung und Wahl des Modellierungsansatzes	45
8.2.1.	Zweidimensionale Flachwassergleichungen.....	45
8.2.2.	Typen von Berechnungsnetzen	47
8.2.3.	Randbedingungen und Quellterme	49
8.2.4.	Zusammenfassende Empfehlungen – Modellierungsansätze	50
8.3.	Erstellung des Berechnungsnetzes.....	51
8.3.1.	Einleitung	51
8.3.2.	Netzauflösung und Netzqualität	51
8.3.3.	Gewässer	53
8.3.4.	Wasserbauliche Anlagen	54
8.3.5.	Abflussrelevante Strukturen	56
8.3.6.	Gebäude	57
8.3.7.	Zusammenfassende Empfehlungen – Berechnungsnetz	59
8.4.	Berücksichtigung des Fließwiderstands.....	60
8.4.1.	Fließwiderstandsansätze (Rauheitsansätze).....	60
8.4.2.	Wahl der Rauheiten.....	61
8.4.3.	Zusammenfassende Empfehlungen – Wahl der Rauheiten	63
8.5.	Berücksichtigung der Regenwasserkanalisation	63
8.6.	Simulationszeit	64
8.7.	Ergebnisausgabe.....	65
8.8.	Plausibilitätsprüfung der zweidimensionalen Überflutungsmodellierung	65
8.8.1.	Berechnete maximale Wassertiefen.....	65
8.8.2.	Volumen- und Abflussbilanzierung.....	66
8.9.	Modellspezifische Empfehlungen.....	68
9.	Berechnungsszenarien	69
10.	Dokumentation und Darstellungen	72
10.1.	Technischer Bericht	72
10.2.	Plandarstellungen	73
10.3.	Digitale Datenlieferung	75
11.	Zusammenfassung	76
11.1.	Mindeststandards	76
11.2.	Qualitätssicherung.....	80
	Literaturverzeichnis.....	82
	Abbildungsverzeichnis	85



Tabellenverzeichnis	87
Anhang A: Hydrologische Modellierung	88
Anhang A1: HydroBOD, empfohlene Vorgehensweise	88
Anhang A2: CN-Verfahren, empfohlene Vorgehensweise	90
Anhang A3: Green-Ampt-Verfahren, empfohlene Vorgehensweise.....	95
Anhang B: Digitale Datenlieferung	98
Anhang B1: Modelle und Ergebnisdatensätze	98
Anhang B2: GIS-Projekt und Planzeichnungen	99
Anhang B3: Überflutungsflächen	100
Anhang B4: Wassertiefen	101
Anhang B5: Fließgeschwindigkeiten	102
Anhang B6: Fließvektoren	103
Anhang B7: Modellierungsgebiet	104
Anhang B8: Projektgebiet.....	105
Anhang B9: Feinmodellierungsbereiche	106
Anhang B10: Einbauten (Durchlässe, Verrohrungen, Brücken etc.).....	107
Anhang B11: Gewässer	108
Anhang C: Musterkarten.....	109

Abkürzungsverzeichnis

2D Modell	Zweidimensionale tiefengemittelte hydraulische Simulationssoftware
ABU	(Fluviale) Abflussuntersuchung
ALB	Airborne Laser Bathymetrie (Grünlicht-Laserscan)
ALS	Airborne Laserscan, Airborne Lidar
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BMLUK	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft
CFL-Zahl	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
CN-Verfahren	Runoff-Curve-Number-Verfahren
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DKM	Digitale Katastralmappe
DNXXX	Durchlass mit Angabe des Durchmessers in mm (z. B. DN300)
EZG	Einzugsgebiet
FWG	Flachwassergleichungen
GIS	Geoinformationssystem
GSA	GeoSphere Austria
GZP	Gefahrenzonenplanung gemäß Forstgesetz und Wasserrechtsgesetz
MaxModN	Maximierte Modellniederschläge
ÖKOSTRA	Österreichweit koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -Auswertung
RWK	Regenwasserkanalisation
SCS	Soil Conservation Service

1. Einleitung

Unter Starkniederschlägen versteht man Niederschläge von kurzer Dauer, die lokal begrenzt und mit hoher Intensität auftreten. Starkniederschläge können pluviale, also regenbedingte, Überflutungen verursachen. Häufig werden pluviale Überflutungen auch als „Hangwasser“, „Oberflächenabfluss“ oder „Sturzflut“ bezeichnet. Diese Begriffe werden in der Literatur weitgehend synonym verwendet. Pluviale Überflutungen haben wiederholt erhebliche Schäden an bestehender Infrastruktur und an Gebäuden verursacht. Aufgrund ihres plötzlichen Auftretens, ihrer teils stark begrenzten Ausdehnung und fehlender Vorwarnzeit stellen sie eine schwer vorhersehbare Gefährdung dar.

Studien zeigen, dass die jährliche Niederschlagsmenge in Österreich in den letzten Jahrzehnten weitgehend konstant blieb. Jedoch nahm die Anzahl schwacher und moderater Niederschlagstage ab, während Tage mit starkem bis extremen Niederschlag häufiger wurden. Diese Entwicklung variiert regional und saisonal. Im Durchschnitt stieg die Häufigkeit extremer Niederschlagstage in Österreich um 17 % (Chimani et al. 2016). Haslinger et al. (2025) beobachteten in einer Analyse von Daten aus 883 Wetterstationen in Österreich einen Anstieg der Intensität der täglichen Starkregenfälle um 8 % und der stündlichen Starkregenfälle um 15 %, was auf die erhöhte Wasserhaltekapazität einer wärmeren Atmosphäre und veränderte atmosphärische Zirkulationsmuster zurückgeführt wird. Im Jahr 2024 waren die zeitlichen Verschiebungen der Niederschlagsverteilung besonders im September deutlich wahrnehmbar: die Monatssumme des Niederschlags im Flächenmittel in Österreich lag 154 % über dem Mittel von 1991 bis 2020 und 215 % über dem Mittel von 1961 bis 1990 (ZAMG 2025).

Es wird erwartet, dass die Häufigkeit und die Intensität von Starkniederschlägen in Österreich in Zukunft mit steigender Lufttemperatur weiter zunehmen wird, da wärmere Luft mehr Wasser halten kann. Studien prognostizieren, dass die Niederschlagsintensität um 7 % pro Grad Celsius Erwärmung zunehmen wird (Formayer und Fritz 2017, Ban et al. 2015). Es gibt jedoch auch Hinweise darauf, dass in manchen Regionen die Intensität der Niederschläge mit kurzer Dauer stärker zunimmt, als allein aufgrund der atmosphärischen Feuchtigkeit zu erwarten wäre. In einigen Fällen könnten sich diese Intensitäten potenziell verdoppeln, wodurch es lokal zu einer erheblichen Verschärfung von pluvialen Überflutungen kommen könnte (Fowler et al. 2021).

Pluviale Überflutungen entstehen vorrangig durch intensive, konvektive Starkregenereignisse während der Sommermonate. Bei solchen Ereignissen übersteigt die Niederschlagsintensität das Versickerungsvermögen des Bodens, wodurch Oberflächenabfluss entsteht. Das Ausmaß des Oberflächenabflusses wird durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren bestimmt. Dazu zählen die Menge, Dauer sowie die zeitliche und räumliche Verteilung des

Niederschlags, der Grad der Bodenversiegelung, die Landnutzung, die Bodenart und -struktur, die vorliegende Bodenfeuchte sowie die Vegetation und damit auch die Jahreszeit (Maniak 2016).

Weder Starkregen noch die daraus resultierenden Überflutungen lassen sich vollständig verhindern. Doch durch gezielte Maßnahmen können die Auswirkungen deutlich verringert werden. Dazu gehören neben klassischen siedlungs- und schutzwasserbaulichen Maßnahmen, wie beispielsweise Rückhaltebecken, auch die Berücksichtigung gefährdeter Gebiete bei der Planung zukünftiger Bebauung, eine angepasste Landnutzung, Entsiegelung sowie dezentraler Wasserrückhalt durch Rückhaltemulden, abflusshemmende Strukturelemente, verbesserte Versickerung etc.

Im Vergleich zu Gefährdungsbereichen durch Hochwasser an Flüssen (fluviale Hochwasser) besteht in der Bevölkerung jedoch meist weniger Bewusstsein für Gefährdungsbereiche durch pluviale Überflutungen. Darüber hinaus sind die Vorwarnzeiten bei pluvialen Überflutungen meist wesentlich kürzer, weshalb temporäre Schutzmaßnahmen häufig ungeeignet sind. Abbildung 1 skizziert schematisch den Unterschied zwischen pluvialer und fluvialer Überflutung.

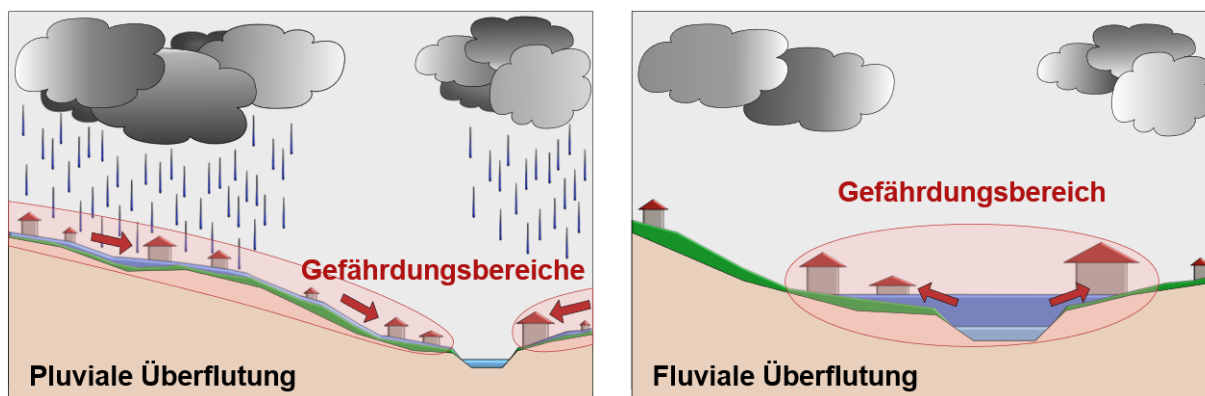


Abbildung 1: Pluviale Überflutung (links): Oberflächenabfluss, der durch Starkregen ausgelöst wird; hat in der Entstehung keinen unmittelbaren Bezug zu Gewässern. Fluviale Überflutung (rechts): bezeichnet das über die Ufer treten von Gewässern, wobei beispielsweise Niederschlag oder Schneeschmelze, auch in großer Distanz zum Überflutungsgebiet, Auslöser sein können.

Entscheidend für den Schutz der menschlichen Gesundheit, der Umwelt und der bestehenden sowie geplanten Infrastruktur und Bebauung vor pluvialen Überflutungen ist das Wissen über besonders gefährdete Bereiche. Nur wenn die potenzielle Gefährdung der jeweiligen Bereiche bekannt ist, kann dies in der Planung zukünftiger Bebauung und der Planung von Maßnahmen zur Risikoreduzierung berücksichtigt werden. Eine Überflutungsanalyse liefert die notwendige Kenntnis der Abflusssituation und bildet die Grundlage für Vorsorgemaßnahmen sowie eine standortangepasste Planung.

Die Analyse der Abfluss-, bzw. Überflutungs-, und damit Gefährdungssituation durch pluviale Überflutungen, kann wie in folgender Tabelle 1 beschrieben, mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt werden.

Tabelle 1: Unterschiedliche Methoden zur Analyse der Abfluss- bzw. Überflutungs- und damit Gefährdungssituation durch pluviale Überflutungen.

<p>Einschätzung auf Basis dokumentierter Schadensfälle und lokaler Expertise</p> <p>Die Hauptabflusswege können teilweise erkannt werden. Undokumentierte Gebiete wie auch lange zurückliegende Starkregenereignisse erlauben keine verlässlichen Aussagen.</p>
<p>Topographische Analyse des Geländemodells (Fließweganalyse)</p> <p>Gibt einen ersten Überblick, welche Wege der Oberflächenabfluss bei Starkregen nehmen kann. Potenzielle konzentrierte Fließwege und mögliche Eintrittspunkte von Oberflächenabfluss in Siedlungsräume können erkannt werden. Hydraulische Strukturen wie beispielsweise Durchlässe bleiben unberücksichtigt. Es ist keine Ausweisung der Überflutungsflächen, Wassertiefen oder Fließgeschwindigkeiten möglich.</p>
<p>Gekoppelte hydrologisch-hydraulische Modellierung des Oberflächenabflusses</p> <p>Modellierung des Abflussbildungsprozesses und hochaufgelöste, instationäre numerische Modellierung des Oberflächenabflusses unter Berücksichtigung der hydraulisch wirksamen Strukturen (Durchlässe, Gräben, Mauersockel, Gehsteigkanten etc.). Die Darstellung der potenziellen Überflutungsflächen, Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten bei den jeweiligen Niederschlagsszenarien ist möglich. Der Detaillierungsgrad des zugrunde liegenden Geländemodells und die Wahl des hydrologischen Modells sind ausschlaggebend für die Belastbarkeit der Ergebnisse.</p>

Die zweidimensionale hydrologisch-hydraulische Modellierung des Oberflächenabflusses stellt den aktuellen Stand der Technik bei der Analyse der Abfluss- und damit Gefährdungssituation durch pluviale Überflutungen dar. Es stehen hierfür eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle und Softwarepakete zur Auswahl. Um sicherzustellen, dass die Modellierungen pluvialer Überflutungen sowie die Bewertungen der Gefährdung systematisch und belastbar durchgeführt werden, sind klare Standards erforderlich. Diese betreffen die Vorgehensweise, die verwendete Datengrundlage, die Modellierung sowie die Darstellung der Gefährdungssituation.

Das vorliegende Dokument definiert einen Standard, um verlässliche, vergleichbare und qualitativ hochwertige Analysen pluvialer Überflutungen zu ermöglichen. Zusätzlich zum Mindeststandard enthält das Dokument Empfehlungen zur Verwendung der Modelle und zeigt Möglichkeiten auf, die – je nach Anwendungsfall – zur detaillierteren Betrachtung und weiteren Verbesserung der Qualität der Ergebnisse herangezogen werden können.

Es wird darauf hingewiesen, dass die zur Verfügung stehenden Daten, Programme und Methoden einer starken Weiterentwicklung unterliegen. Daher wird sich auch der Mindeststandard weiterentwickeln, sodass künftig bei gleichem Aufwand wohl eine deutlich höhere Qualität der Ergebnisse erzielt werden kann.

2. Allgemeines

2.1. Zielsetzung

Ziel dieses Dokuments ist die Vereinheitlichung der verwendeten Datengrundlagen und Berechnungsansätze bei der zweidimensionalen tiefengemittelten Modellierung pluvialer Überflutungen im Land Niederösterreich. Dadurch soll die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verbessert und eine verlässliche, qualitativ hochwertige Grundlage für Entscheidungsprozesse geschaffen werden.

Ein weiteres Ziel ist die Sensibilisierung von Entscheidungsträgerinnen und Sachbearbeiterinnen für die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung. Das Dokument definiert einen Mindeststandard für die Durchführung pluvialer Überflutungsstudien, um eine fachlich fundierte Basis für die Bewertung von Überflutungsrisiken zu schaffen. Die Aussagekraft pluvialer Überflutungsmodellierungen wird unter Einhaltung des festgelegten Standards vergleichbar mit jener aus fluvialen Gefahrenausweisungen (z. B. Abflussuntersuchungen oder Gefahrenzonenplanungen).

Ein zusätzlicher Nutzen der Modellierung besteht darin, dass die erstellten Modelle als belastbare Planungsgrundlage für spätere Maßnahmenplanungen, Varianten- und Szenarioanalysen sowie Detailplanungen genutzt werden können und dadurch nachgelagerte Schritte effizienter umgesetzt werden können.

Der Mindeststandard wurde unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen Arbeitsaufwand und erreichbarer Genauigkeit festgelegt.

2.2. Aufgabenstellung

Die zweidimensionale, tiefengemittelte Modellierung pluvialer Überflutungen dient der Erfassung und Analyse von Überflutungsrisiken infolge von Starkregenereignissen. Auf Grundlage von berechneten Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und davon abgeleiteter Größen kann eine Gefährdungsabschätzung erfolgen und ein möglicher Bedarf an Schutzmaßnahmen festgestellt werden.

Dieses Dokument legt eine standardisierte Vorgehensweise für die Modellierung sowie die dafür geltenden Mindestanforderungen fest. Es dient als Handbuch für Bearbeiterinnen und bietet ihnen und Auftraggeberinnen eine Orientierung zu Modellierungsansätzen, Qualitätsstufen und dem

Umgang mit Unsicherheiten der Modellierung. Zudem werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung vorgestellt, um die Aussagekraft der Modellierungsergebnisse zu gewährleisten.

Die Ausarbeitung des Standards wurde von der Erarbeitung einer Pilotstudie begleitet, in welcher Modellierungsansätze und -methoden analysiert und verglichen wurden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Pilotstudie, Literaturrecherchen sowie den Erfahrungen der Autorinnen wurden die Festlegungen für den Standard getroffen.

2.3. Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument richtet sich an Auftraggeberinnen und Fachleute, die mit der Beauftragung oder mit der Durchführung von Modellierungen pluvialer Überflutungen betraut sind.

Die grundlegenden Prozesse pluvialer Überflutungen werden im vorliegenden Dokument erläutert, sodass sich auch Personen ohne Vorkenntnisse mit dem Thema vertraut machen können. Zudem werden die wichtigsten Regeln, Methoden und Anforderungen für die hydrodynamisch-numerische Modellierung beschrieben, um eine fundierte Bewertung der Eignung eines Modells für den speziellen Anwendungsfall der pluvialen Überflutungsmodellierung zu ermöglichen.

Auftraggeberinnen erhalten einen Überblick über die verschiedenen Qualitätskriterien der Modellierung und können die passende Stufe für ihren Bedarf festlegen. Auftragnehmerinnen profitieren von einer klaren Definition der zu verwendenden Datengrundlage und einer standardisierten Vorgehensweise für die Modellierung.

2.4. Verbindlichkeiten

Im vorliegenden Dokument werden ein Standard und Qualitätskriterien für die Modellierung pluvialer Überflutungen und die dafür zu verwendenden Grundlagendaten beschrieben. Die Standards sind nicht zwingend für jede Modellierung pluvialer Überflutungen in Niederösterreich verbindlich. Sofern sie jedoch im Zuge einer Ausschreibung als Grundlage vereinbart werden, gelten – abhängig von der Wortwahl bzw. farblichen Kennzeichnung – unterschiedliche Verbindlichkeiten. Während einige Vorgaben als Mindestanforderungen definiert sind, werden zusätzlich erweiterte Möglichkeiten und Empfehlungen für eine detailliertere Betrachtung aufgezeigt. Die Formulierungen zu den Verbindlichkeiten orientieren sich an ÖWAV (2019).

Die Differenzierung nach Verbindlichkeit soll es ermöglichen, den erforderlichen Genauigkeitsgrad in Abstimmung mit dem damit verbundenen Arbeitsaufwand bereits bei der Projektausschreibung festzulegen und – sofern erforderlich – während der Projektabwicklung anzupassen. Damit wird eine klare Definition der Erwartungshaltung und des Projektumfangs in jeder Bearbeitungsphase

für alle Beteiligten sichergestellt. Sofern Datensätze oder Methoden verfügbar und anwendbar sind, die zu einer weiteren Erhöhung der Qualität beitragen, kann von den definierten Standards abgewichen werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an aktuelle Entwicklungen und spezifische Projektanforderungen.

Die im Dokument definierten Standards und Empfehlungen werden – ergänzend zur textlichen Beschreibung – in einer Box nachstehend zum jeweiligen Kapitel, übersichtlich zusammengefasst. Box 1 enthält die einheitlichen Formulierungen und Kennzeichnungen der Definitionen, die je nach Verbindlichkeit im gesamten Dokument verwendet werden.

Box 1: Definition der Verbindlichkeiten.

Hohe Verbindlichkeit:

- Rote Textfarbe
- Wortwahl:
 - ist erforderlich
 - ist notwendig
 - ist durchzuführen / muss durchgeführt werden

Mittlere Verbindlichkeit:

- Blaue Textfarbe
- Wortwahl:
 - wird empfohlen / ist empfehlenswert
 - sollte durchgeführt werden

Geringe Verbindlichkeit:

- Grüne Textfarbe
- Wortwahl:
 - ist sinnvoll / kann sinnvoll sein
 - kann durchgeführt werden
 - ist geeignet / kann geeignet sein
 - ist hilfreich / kann hilfreich sein

2.5. Aufbau des Dokuments

Das Dokument gliedert sich in einen Hauptteil und mehrere Anhänge. Der Hauptteil bietet eine umfassende Einführung in die Modellierung pluvialer Überflutungen. Darin werden die Datengrundlagen definiert sowie die erforderliche methodische Vorgehensweise beschrieben. Die theoretischen Grundlagen werden erläutert, und Mindestanforderungen sowohl an die hydrologische Modellierung als auch an die zweidimensionale, tiefengemittelte Überflutungsmodellierung formuliert. Darüber hinaus werden im Hauptteil die Anforderungen an die eingesetzten Modelle definiert, die zu treffenden Annahmen erläutert, Anwendungsbereiche

beschrieben, Empfehlungen zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse gegeben und Maßnahmen zur Qualitätssicherung genannt.

In den Anhängen wird detailliert auf die Vorgehensweise bei der Anwendung der hydrologischen Verfahren eingegangen, die Struktur der digitalen Datenlieferung (Modelle und Ergebnisdatensätze) festgelegt sowie die erforderlichen Inhalte des zu erstellenden und abzugebenden GIS-Projekts beschrieben. Des Weiteren finden sich im Anhang Musterbeispiele für die Kartendarstellungen der berechneten Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten.

3. Empfohlene Vorgehensweise für die Ausarbeitung von pluvialen Abflussuntersuchungen

Eine strukturierte Vorgehensweise, klar definierte Arbeitsschritte und gezielte Qualitätssicherungsmaßnahmen sind entscheidend für die erfolgreiche Durchführung pluvialer Überflutungsmodellierungen.

3.1. Vorprojekt zur Festlegung von projektrelevanten Rahmenbedingungen

Im Vorfeld der Ausschreibung einer Hangwassermodellierung wird der Auftraggeberin empfohlen, ein Vorprojekt zu vergeben. Ziel dieses Vorprojekts ist es, die grundlegenden Rahmenbedingungen für die Angebotseinholung sowie die anschließende Projektausarbeitung festzulegen. Dabei sind insbesondere die in Tabelle 2 angeführten Abgrenzungen und Festlegungen zu treffen.

Tabelle 2: Abgrenzungen und Festlegungen, die im Zuge des Vorprojekts zu treffen sind.

Definition des Projektgebiets (Kapitel 5)
Im Zuge der Definition des Projektgebiets ist zu entscheiden, ob das gesamte Gemeindegebiet oder lediglich Teilbereiche betrachtet werden sollen. Es wird empfohlen, sämtliche Bereiche einer Gemeinde, in denen eine höherwertige Nutzung aktuell gegeben ist oder künftig entwickelt werden soll, zu untersuchen.
Festlegung von Feinmodellierungsbereichen innerhalb des Projektgebiets (Kapitel 5)
In den Feinmodellierungsbereichen ist eine detailliertere Modellierung erforderlich, im Gegensatz zum restlichen Projektgebiet. Dies umfasst die Erhebung und ergänzende Vermessung hydraulisch relevanter Strukturen sowie deren Integration in das Modell. Als Feinmodellierungsbereiche sind insbesondere relevante Siedlungsgebiete, Bauland, Entwicklungsflächen sowie bedeutende Freilandnutzungen zu definieren.
Berücksichtigung von Gewässern in der Hangwassermodellierung (Kapitel 7)
Es ist zu prüfen, ob für die Gewässer im Projektgebiet Abflussuntersuchungen vorliegen. Darauf aufbauend ist für jedes Gewässer zu definieren, auf welche Art dieses in der Modellierung zu berücksichtigen ist.
Berücksichtigung weiterer Besonderheiten im Projektgebiet (Kapitel 8.5)
Es ist eine Abgrenzung von Siedlungsgebieten oder Ortsteilen vorzunehmen, die überwiegend über eine Misch- oder Regenwasserkanalisation entwässert werden. Dabei ist zu bewerten, ob

in diesen Bereichen eine gekoppelte Berechnung von Oberflächenabfluss und Kanalnetz erforderlich ist.

Zudem sind Bereiche zu identifizieren und abzugrenzen, die durch signifikant hohe oder niedrige Versickerung oder besondere Gegebenheiten, wie beispielsweise Verkarstung, gekennzeichnet sind.

Erhebungen vergangener pluvialer Überflutungsereignisse

Im Rahmen der Vorstudie ist eine Erhebung vergangener pluvialer Überflutungen durchzuführen. Es ist zu dokumentieren, welche Informationen über die Ereignisse vorliegen (z. B. Datum, Niederschlagshöhe und -dauer, Schadensaufzeichnungen, Fotodokumentation etc.) und die Schäden räumlich, vorzugsweise mittels eines Geoinformationssystems (GIS), sowie nach Art und Ausmaß zu erfassen.

3.2. Empfohlene Vorgehensweise für Sachbearbeiterinnen

Bei der Erstellung des Angebots für eine Hangwassermodellierung ist – sofern vorhanden – das Vorprojekt (Kapitel 3.1) als Grundlage heranzuziehen. Für die Aufwandskalkulation im Rahmen der Angebotsphase kann die Bieterin für das Gebietsstudium auf verschiedene digitale Informationsquellen zurückgreifen, insbesondere auf die Hangwasser-Gefahrenhinweise im Niederösterreich Atlas (<https://atlas.noel.gv.at>) sowie auf die Gefahrenhinweiskarten für Oberflächenabfluss (<https://hora.gv.at>). Die Gefahrenhinweiskarte Oberflächenabfluss wurde im Rahmen der Umsetzung der Hochwasserrichtlinie erstellt und steht öffentlich und kostenlos zum Download zur Verfügung (<https://www.data.gv.at/>).

In der Projektierungsphase sind die Ergebnisse des Vorprojekts als Grundlage für die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise heranzuziehen. Liegt kein Vorprojekt vor, ist dieses im Zuge der Projektarbeit entsprechend zu erarbeiten.

Bei der Hangwassermodellierung ist eine iterative Vorgehensweise erforderlich. Möglichst frühzeitig sind alle Personen, die über relevantes Wissen und Erfahrungen verfügen, sowie diejenigen, die die Ergebnisse künftig nutzen werden, in den Prozess der Hangwassermodellierung einzubeziehen. Dazu zählen beispielsweise Mitarbeiterinnen im Innen- und Außendienst der Gemeinde, zum Beispiel im Bauamt und Bauhof, die Bürgermeisterin, die Raumplanerin, die Feuerwehrleute sowie externe Fachstellen oder Institutionen mit Bezug zum Untersuchungsgebiet. Die Modelle sind dabei schrittweise zu verfeinern und in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin weiterzuentwickeln. Durch die kontinuierliche Einbindung der unterschiedlichen Personen können lokale Gegebenheiten, Erfahrungswerte und spezifisches Wissen frühzeitig in den Bearbeitungsprozess einfließen. Zugleich stärkt dieser partizipative Ansatz die Akzeptanz der Ergebnisse auf kommunaler Ebene. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die erstellten Modelle und Ergebnisse effizient in bestehende und zukünftige Planungsprozesse

integriert und nachhaltig genutzt werden können. Abbildung 2 veranschaulicht in Form eines Flussdiagramms die iterative Vorgehensweise bei der Hangwassermodellierung. In Tabelle 3 wird der empfohlene Projektablauf detailliert beschrieben. Die entsprechenden Methoden und Erläuterungen können den jeweiligen Kapiteln entnommen werden.

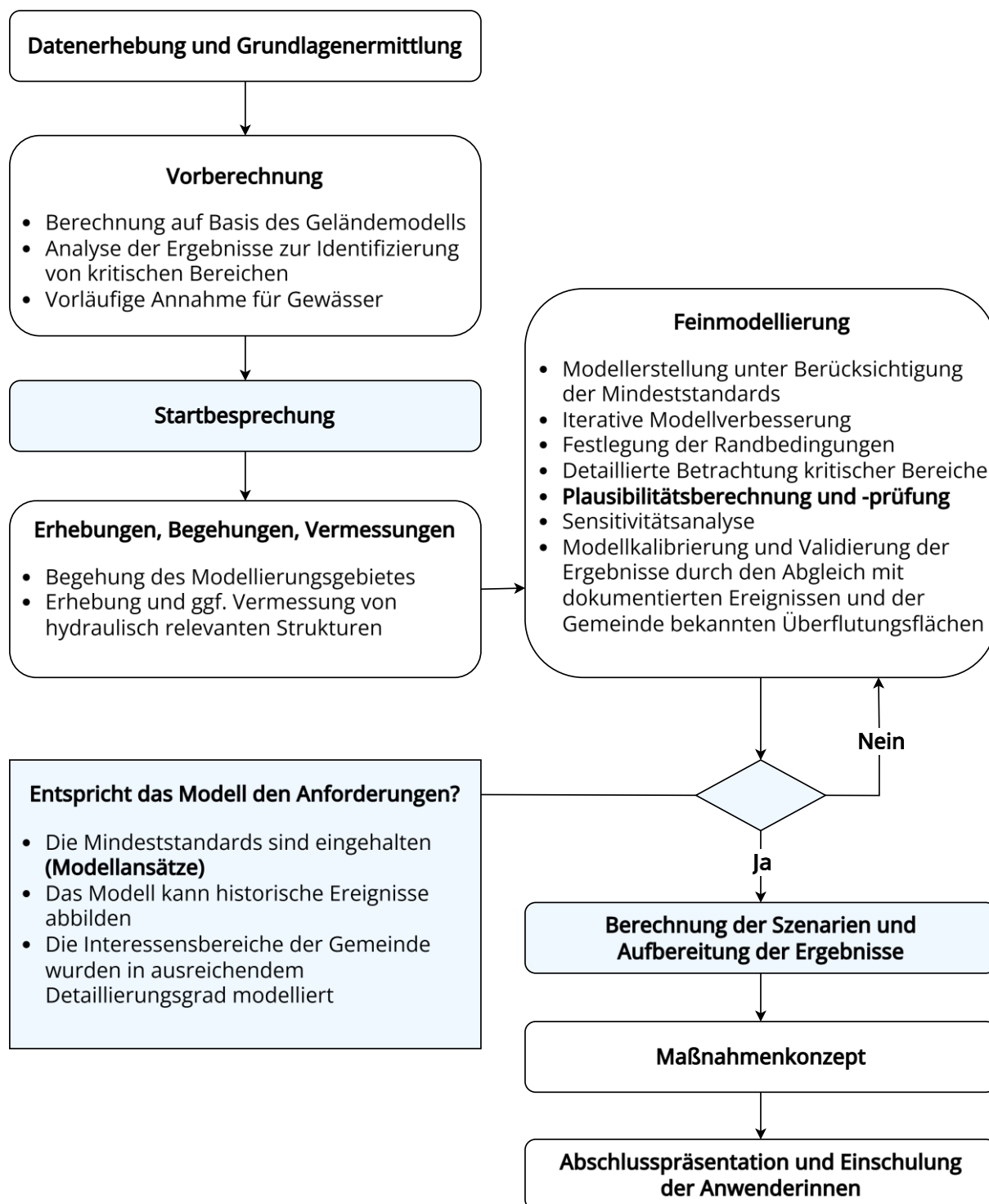


Abbildung 2: Iterative Vorgehensweise für die Hangwassermodellierung.

Tabelle 3: Beschreibung des empfohlenen Projektablaufs für Sachbearbeiterinnen.

<p>Datenerhebung und Grundlagenermittlung</p> <p>Nach der Auftragserteilung werden die relevanten Grundlagendaten der verschiedenen Bundes- und Landesstellen sowie der Gemeinden erhoben und gesichtet (siehe Kapitel 4). Diese Daten bilden die Basis für die Modellierung und die weiteren Analysen.</p>
<p>Erste Analyse: Fließweganalyse und numerische Vorberechnung</p> <p>Basierend auf dem digitalen Geländemodell (DGM) wird eine erste Fließweganalyse durchgeführt, um die natürlichen Abflusswege, bedingt durch die gegebene Topografie, zu identifizieren. Zusätzlich wird eine numerische Vorberechnung der Oberflächenabflüsse empfohlen, um kritische Bereiche frühzeitig zu identifizieren und Rahmenbedingungen für die weitere Modellierung festzulegen.</p> <p>Dabei werden folgende vereinfachte Modellannahmen getroffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niederschlagsszenario: ein repräsentatives Szenario (siehe Kapitel 9) für die spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse. • Hydrologisches Modell: vereinfachter Ansatz mit Abflussbeiwerten. • Hydraulische Randbedingungen: erste Abschätzung der Rauheitswerte. • Geländemodell: Verwendung eines noch weitgehend unbearbeiteten DGMS als Grundlage für spätere Verfeinerungen.
<p>Startbesprechung mit Workshop-Charakter</p> <p>Zu Beginn des Projekts wird eine Startbesprechung mit folgenden Teilnehmerinnen durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gemeindebedienstete, insbesondere Mitarbeiterinnen des Bauamts und Bauhofs; gegebenenfalls können auch ehemalige Mitarbeiterinnen hinzugezogen werden. • Bürgermeisterin • Feuerwehrleute • Weitere relevante Akteurinnen (beispielsweise externe Fachstellen oder Institutionen mit Bezug zum Untersuchungsgebiet). <p>Ziel 1: Analyse der Vorberechnungsergebnisse unter Berücksichtigung lokaler Erfahrungswerte (<i>Fragestellungen: Werden die vorhandenen Erfahrungswerte nachvollziehbar erfasst und verortet? Können die in den Vorberechnungen identifizierten Hotspots durch lokale Kenntnisse bestätigt werden?</i>).</p> <p>Ziel 2: Validierung der Abgrenzung des Projektgebiets und der Feinmodellierungsbereiche (<i>Fragestellung: Werden alle relevanten Bereiche sowie potenzielle künftige Entwicklungsgebiete vollständig erfasst?</i>).</p>

Örtliche Erhebungen und Begehungen

Auf Basis der Ergebnisse der Vorberechnung und der Startbesprechung werden folgende Erhebungen durchgeführt. Für die Durchführung empfiehlt sich dabei die Verwendung eines mobilen GIS mit Einbindung der Vorberechnungsergebnisse.

- Begehung der relevanten oder kritischen Bereiche zur Validierung der Modellannahmen.
- Erhebung der hydraulisch relevanten Strukturen, die in den vorliegenden Laserscandaten nicht enthalten sind. Dazu zählen unter anderem Durchlässe, Sockelmauern, Gehsteigkanten und Einfriedungen (siehe Kapitel 5.2).
- Durchführung ergänzender terrestrischer Vermessungen von hydraulisch relevanten Strukturen.

Feinmodellierung: Verfeinerung des Modells

Nach den ersten Erhebungen erfolgt eine schrittweise Verfeinerung des Modells. Dies umfasst:

- Modellerstellung unter Berücksichtigung der im vorliegenden Dokument definierten Mindeststandards.
- Iterative Verbesserung des hydrologischen Modells.
- Präzise Definition der hydraulischen Randbedingungen und Überprüfung der Plausibilität dieser Annahmen (z. B. Annahmen für Gewässer, Vorfluter, Kanalisation usw.).
- Integration der neu erhobenen und vermessenen hydraulisch relevanten Strukturen sowie eventuell erforderliche zusätzliche Verfeinerungen des Berechnungsnetzes.
- Detaillierte Betrachtung kritischer Bereiche und Problemstellen.
- Festlegen der Art der Berücksichtigung von Sonderfällen, etwa bei vorhandener Regenwasserkanalisation oder Gewässern.
- Vergleich der verfeinerten Modellierungsergebnisse mit den Ergebnissen der Vorberechnung.
- Validierung der Berechnungsergebnisse durch Abgleich der modellierten Überflutungsflächen mit gegebenenfalls bei vergangenen Ereignissen dokumentierten Überflutungsflächen.
- Plausibilisierung der berechneten Durchflüsse bei relevanten Durchlässen.
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen.

Abschließend:

- Dokumentation von Festlegungen und Zusammenstellung der vorläufigen Ergebnisse der Feinmodellierungsberechnungen.

Zwischenbesprechung

Nach Abschluss der ersten Feinmodellierungsberechnungen wird eine Zwischenbesprechung durchgeführt. Diese umfasst:

<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion der Ergebnisse der ersten Feinmodellierungsberechnungen (mindestens ein Berechnungsszenario und eine Dauerstufe) mit den Beteiligten. • Örtliche Begehung ausgewählter, besonders kritischer Bereiche. • Falls in der Beauftragung vorgesehen: Festlegung von Bereichen für die Ausarbeitung von Maßnahmenkonzepten.
<p>Einbau der Erkenntnisse aus der Zwischenbesprechung</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Falls erforderlich: Durchführung ergänzender örtlicher Erhebungen und Vermessungen. • Anpassung der Modellparameter basierend auf den neuen Erkenntnissen. • Modellkalibrierung bzw. -validierung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der in der Startbesprechung und Zwischenbesprechung gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungsberichte der Gemeinde.
<p>Endgültige Berechnung der Szenarien</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung der endgültigen Berechnungen aller geforderten Szenarien (Kapitel 9). • Ausarbeitung der Plandarstellungen und des technischen Berichts (Kapitel 10).
<p>Ausarbeitung eines Maßnahmenkonzepts (optional)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von geeigneten Maßnahmen zur Minderung der Gefährdung durch pluviale Überflutungen. • Abschätzung der Wirksamkeit möglicher Maßnahmen.
<p>Abschlusspräsentation und Einschulung</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der finalen Ergebnisse vor Gemeindevertreterinnen, Fachstellen und anderen relevanten Akteurinnen. • Einschulung der zukünftigen Anwenderinnen zur Nutzung der Modelle und Daten im Planungsprozess. • Eventuelle Unterstützung bei der Integration der Ergebnisse in kommunale Entscheidungsprozesse.

4. Datengrundlagen

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Datengrundlagen, die für die Durchführung einer Hangwassermodellierung heranzuziehen sind, aufgelistet und erläutert. Weiterführende Informationen zur konkreten Verwendung der Daten finden sich in den Kapiteln 6 bis 9. Datengrundlagen, die in jedem Fall zu verwenden sind, sind in Tabelle 4 **fett** hervorgehoben.

Tabelle 4: Datengrundlagen für die Modellierung pluvialer Überflutungen.

Flächige topografische Daten
<ul style="list-style-type: none"> • Digitales Geländemodell (DGM) aus möglichst aktuellen Laserscan-Befliegungen (ALS) in der höchsten verfügbaren Auflösung (https://geoshop.noel.gv.at oder aus anderer Quelle, z. B. eigene Befliegung). • ALS Punktwolke aus der Befliegung zur Ausarbeitung von Detailstrukturen (https://geoshop.noel.gv.at oder aus anderer Quelle, z. B. eigene Befliegung). • 3D Netze überlagert mit Orthofotos oder RGB Punktwolken. • Airborne Laser Bathymetrie (ALB, Grünlicht-Laserscan): in Bereichen mit relevanten Nassprofilen in Gewässern können zusätzliche Geländeinformationen aus Grünlicht-Laserscandaten gewonnen werden. • Beispiele für flächenhafte topografische Daten sind in Abbildung 3 ff. dargestellt.
Vermessung
<ul style="list-style-type: none"> • Ergänzende terrestrische Vermessung von abflussrelevanten Strukturen (Richtwerte und Beispiele siehe Kapitel 5.2). • Naturbestandsdaten
Orthofotos
<ul style="list-style-type: none"> • Orthofotos (https://geoshop.noel.gv.at): <ul style="list-style-type: none"> ○ Möglichst aktuelle Aufnahmen in hoher Auflösung. ○ Aufnahmen außerhalb der Vegetationsperiode ermöglichen häufig eine bessere Beurteilung der vorhandenen Strukturen.
Lagepläne aus Einreichunterlagen
<ul style="list-style-type: none"> • Bauvorhaben, die aktueller sind als die zur Verfügung stehenden ALS Daten bzw. Orthofotos können gegebenenfalls aus Einreichunterlagen übernommen werden.
Gebäudebestand
Da es in vielen Fällen keinen umfassenden und genauen Gebäudedatensatz gibt, ist aus unterschiedlichen Datengrundlagen ein aktueller Datensatz, der die hydraulischen

Gegebenheiten abbildet, zu erstellen. Hydraulische Besonderheiten, wie zum Beispiel Gebäudedurchgänge (siehe Abbildung 6), sind entsprechend im Berechnungsnetz zu berücksichtigen.

- **Digitale Katastralmappe** (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- **Begehungen**
- **Naturbestandsdaten**
- OpenStreetMap (<https://download.geofabrik.de>)
- ALS DGM / Punktwolke (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- Digitales Landschaftsmodell - Bauwerke (<https://bev.gv.at>)

Landnutzung

Da kein vollständiger und umfassender Landnutzungsdatensatz vorliegt, der die Anforderungen der Modellierung pluvialer Überflutungen erfüllt, ist auf Basis verschiedener Datengrundlagen ein aktueller und detaillierter Datensatz zu erstellen, der den hydrologischen und hydraulischen (z. B. Rauheiten) Anforderungen entspricht. Die verwendeten Datensätze sind zusammenzuführen und bei Bedarf manuell anzupassen bzw. zu korrigieren.

- **Digitale Katastralmappe** (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- **GIP - Straßennetz** (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- **Gewässernetz** (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- Flächenerfassung der AMA (Invekos Daten) (<https://data.gv.at>)
- OpenStreetMap (<https://download.geofabrik.de>)
- Österreichischer Waldentwicklungsplan – Waldfunktionsflächen (<https://geoportal.inspire.gv.at>)
- Orthofotos (Berücksichtigung mehrerer Flugperioden) (<https://geoshop.noel.gv.at>)
- Digitales Landschaftsmodell (<https://bev.gv.at>)
- Corine Landcover (<https://land.copernicus.eu>)
- Landcover Austria-Atlas (<https://data.gv.at>)
- Örtliche Erhebungen

Gewässernetz

- **Gewässernetz** (<https://geoshop.noel.gv.at>)

Durchlässe, Brücken

- **Örtliche Erhebung**
- Naturbestandsdaten der Gemeinden
- Vermessung

Regenwasserkanalisation, Entwässerungssysteme

- **Naturbestandsdaten**

<ul style="list-style-type: none"> • Leitungsinformationssysteme • Qualitative Abgrenzung der kanalisierten Flächen, wenn keine detaillierten Daten vorliegen. • Bescheide
HydroBOD Daten
<ul style="list-style-type: none"> • HydroBOD II – Hydrologische Bodenkenndaten – Endbericht und Rasterdaten Niederösterreich (https://data.gv.at) • HydroBOD II Modell – Das HydroBOD Modell wird vom Land Niederösterreich nach erfolgter Anfrage als eigenständig ausführbares Programm zur Verfügung gestellt.
Bodendaten
<ul style="list-style-type: none"> • eBOD (https://bodenkarte.at)
Hydrologische Gutachten
<p>Zur Evaluierung von Abflüssen in Teileinzugsgebieten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auf Anfrage beim hydrographischen Dienst des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung erhältlich. • NÖ Atlas (https://atlas.no.e.gv.at) - Karte Fließgewässer: zahlreiche Gutachten und Kennwerte für Fließgewässer und Hangwassereinzugsgebietspunkte (https://atlas.no.e.gv.at/atlas_apps/downloads/wasser/Infotext_Abflusskennwerte.pdf).
Bemessungsniederschlag
<ul style="list-style-type: none"> • eHYD (https://ehyd.gv.at)

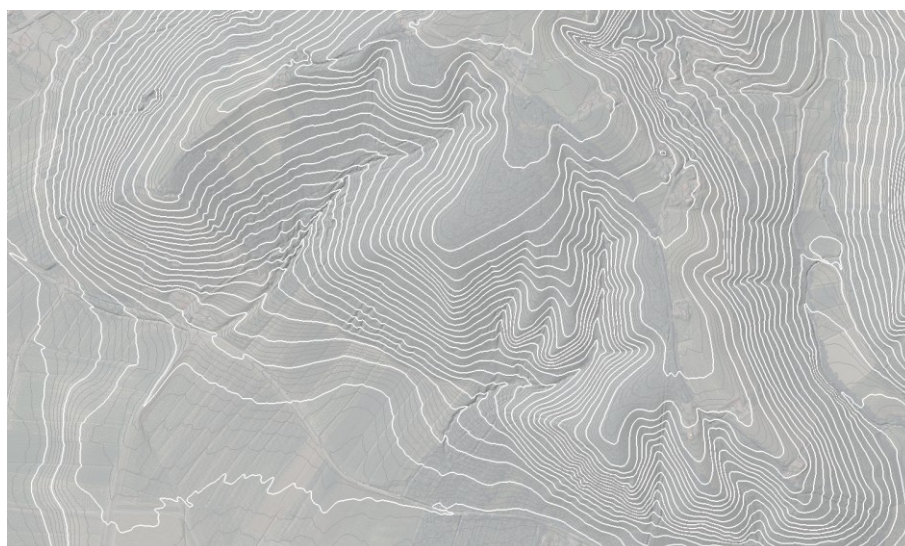


Abbildung 3: Digitales Geländemodell (DGM) eines Airborne Laserscans (ALS), 0,5 m Auflösung (geoland.at), dargestellt mit Höhengichtlinien. Das DGM stellt in der Regel die Grundlage für das Berechnungsnetz dar.

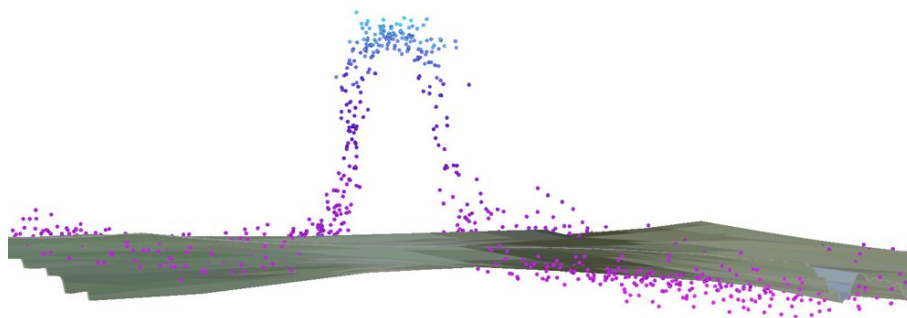


Abbildung 4: Punktwolke eines Airborne Laserscans (ALS). Ersichtlich ist ein Schnitt durch eine Betonmauer. Aus der Punktwolke können gegebenenfalls Strukturen in ausreichender Genauigkeit, ohne terrestrische Vermessung, konstruiert werden.

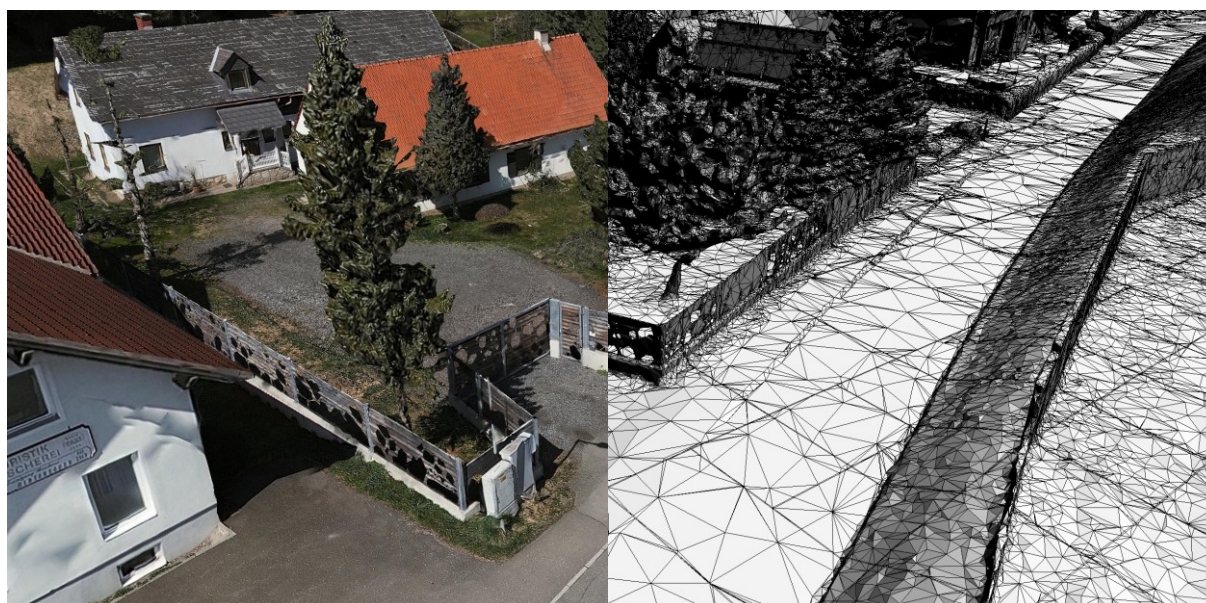


Abbildung 5: 3D Modell – links: überlagert mit Orthofotos, rechts: mit Vermaschung und Schummerung als Grundlage für die Modellierung, insbesondere im bebauten Bereich (aus Drohnenbefliegung).

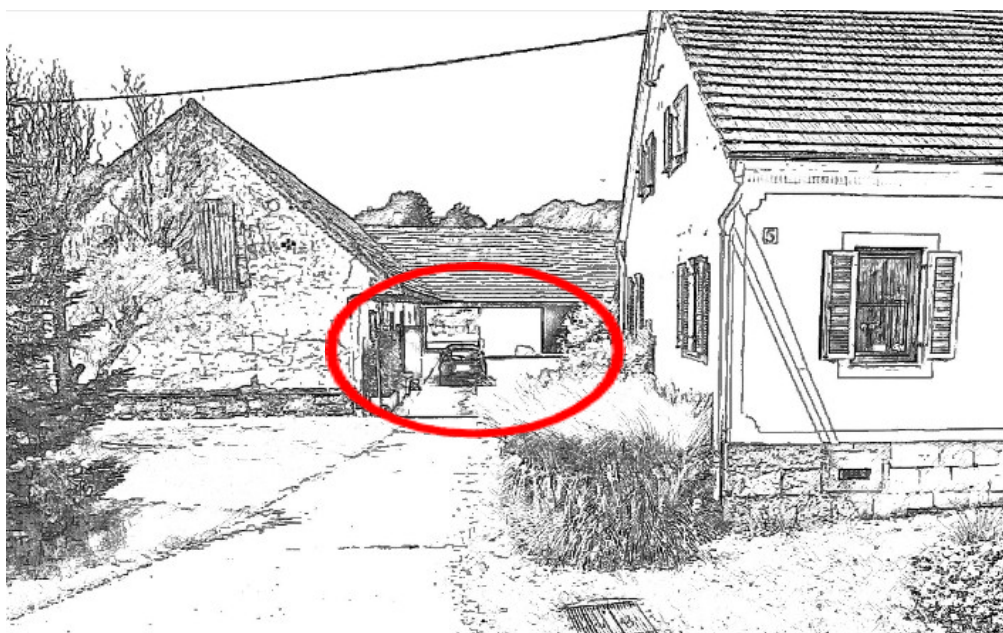


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines Gebäudedurchganges (rot umrandet), der laut der digitalen Katastralmappe (DKM) als Gebäude klassifiziert sein könnte, jedoch durchströmbar ist. Solche Gebäudedurchgänge sind im Rahmen von Begehungen zu erfassen und im Berechnungsnetz entsprechend zu berücksichtigen.

Box 2: Datenquellen und Datenverarbeitung.

- Die Sammlung von Daten aus unterschiedlichen Quellen und deren Prüfung auf Aktualität, Vollständigkeit und Qualität ist erforderlich.
- Datensätze wie beispielsweise Landnutzungs- und Gebäudebestandsdaten sind aus unterschiedlichen Quellen zusammenzuführen und bei Bedarf manuell anzupassen bzw. zu korrigieren.
- Die Erhebung von Informationen über eine gegebenenfalls vorhandene Regenwasserkanalisation ist durchzuführen. Wenn kein umfassendes Wissen über die Anlagen vorhanden ist (z. B. in Form eines digitalen Leitungskatasters oder Lageplänen), sind die kanalisierten Flächen qualitativ abzugrenzen.
- In Bereichen, in denen die topografischen Grundlagendaten nicht mehr aktuell sind, sollten ergänzende Befliegungen von Teilgebieten durchgeführt werden.
- Bei besonders detaillierten Betrachtungen von kleineren Gebieten sowie Modellierung von dicht bebauten Arealen kann die Erstellung von 3D Geländemodellen mit Orthofototexturierung als Grundlage sinnvoll sein.

5. Festlegung des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche

5.1. Begriffsbestimmungen

Das im Vorprojekt beziehungsweise zu Projektbeginn festgelegte Projektgebiet umfasst entweder das gesamte Gemeindegebiet oder klar abgrenzbare Teilbereiche des Gemeindegebiets.

Auf Grundlage des festgelegten Projektgebiets wird zu Beginn des Projekts das Gebiet definiert, innerhalb dessen die Modellierung des Oberflächenabflusses durchgeführt werden soll (Modellierungsgebiet). Dieses kann über die Grenzen des Projektgebiets hinausgehen, da es zusätzlich externe Zuflüsse sowie deren zugehörige Einzugsgebiete bis zur jeweiligen Wasserscheide umfasst. Die Erweiterung des Projektgebiets in Form des Modellierungsgebiets stellt sicher, dass alle hydrologisch relevanten Hangwassereinzugsgebiete und Abflusswege, die das Projektgebiet beeinflussen, in der Modellierung berücksichtigt werden. Die endgültige Festlegung des Modellierungsgebiets erfolgt in Abstimmung mit der Auftraggeberin.

Um die hydrologischen und hydrodynamischen Prozesse mit vertretbarem Aufwand zu modellieren, ist eine Betrachtung mit unterschiedlicher Detailschärfe der einzelnen Teilbereiche innerhalb des Modellierungsgebiets erforderlich. Es erfolgt, basierend auf den jeweiligen Anforderungen des Gebiets, die Unterteilung in zwei Detaillierungsgrade: **Modellierungsgebiet und Feinmodellierungsbereich**. Die räumliche Differenzierung in Projektgebiet, Modellierungsgebiet und Feinmodellierungsbereiche wird in Tabelle 5 beschrieben und in Abbildung 7 exemplarisch dargestellt. **Durch diese Differenzierung wird** eine effiziente und zielgerichtete Modellierung gewährleistet. Diese systematische Vorgehensweise ermöglicht eine Modellierung der Oberflächenabflüsse, die sowohl großräumige als auch lokale Einflüsse adäquat berücksichtigt.

Tabelle 5: Beschreibung des Projektgebiets, des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche.

Projektgebiet
Das Projektgebiet umfasst beispielsweise das Gemeindegebiet oder das beauftragte Untersuchungsgebiet.
Modellierungsgebiet
<ul style="list-style-type: none"> Das Modellierungsgebiet umfasst das gesamte Gebiet, das modelltechnisch abgebildet wird – einschließlich jener Einzugsgebiete, die für die pluviale Überflutung im Untersuchungsgebiet relevant sind, sich jedoch auch außerhalb des Projektgebiets befinden können.

- Im Modellierungsgebiet werden die wesentlichen abflussrelevanten Strukturen wie Gräben, Mulden, Dämme und Fließhindernisse auf Basis des DGMs berücksichtigt sowie grundlegende hydrologische Modellparameter und Rauheiten festgelegt – jedoch ohne eine detaillierte Nachbearbeitung des DGMs. Fließgewässer werden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 7 berücksichtigt. Grundsätzliche Aussagen zu den Abflussverhältnissen sind in jedem Punkt des Modellierungsgebietes möglich. Die Ergebnisse können als Grundlage für künftige Planungen dienen. Eine spätere Verfeinerung des Modells im Modellierungsgebiet ist möglich.
- In diesen Bereichen ist eine geringe Ausdünnung des DGMs entsprechend Kapitel 8.3.2 zulässig.

Feinmodellierungsbereiche

- Befinden sich innerhalb des Modellierungsgebietes.
- Definieren jene Bereiche, in denen eine detaillierte Modellierung erforderlich ist. Die Abgrenzung der Feinmodellierungsbereiche erfolgt bereits im Vorprojekt oder zu Projektbeginn (vgl. Kapitel 3.1) und kann im Zuge der Projektbearbeitung je nach Erfordernis angepasst oder ergänzt werden.
- Feinmodellierungsbereiche umfassen typischerweise Siedlungsgebiete, raumplanerische Entwicklungsflächen sowie Bereiche kritischer Infrastruktur.
- In den Feinmodellierungsbereichen ist eine hohe räumliche Auflösung erforderlich (keine Ausdünnung des DGMs – vgl. Kapitel 8.3.2). Das Modell ist um abflussrelevante Strukturen wie beispielsweise Durchlässe, Brücken, Mauern, Gräben, Gehsteigkanten, Dämme und Misch- bzw. Regenwasserkanalisation zu ergänzen. In relevanten Fällen sind zudem zusätzliche Vermessungs- oder Befliegungsdaten einzubeziehen, um die aktuellen topografischen Gegebenheiten einschließlich baulicher Strukturen im Berechnungsnetz abzubilden.
- Die Datengrundlagen zur Bestimmung hydrologischer Modellparameter sowie zur Definition der Rauheiten werden präzisiert und, falls erforderlich, korrigiert.
- Darüber hinaus erfolgt eine Plausibilisierung der Modellierungsergebnisse, um die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Berechnungen – mit den angewandten Methoden, Annahmen und Festlegungen – sicherzustellen.

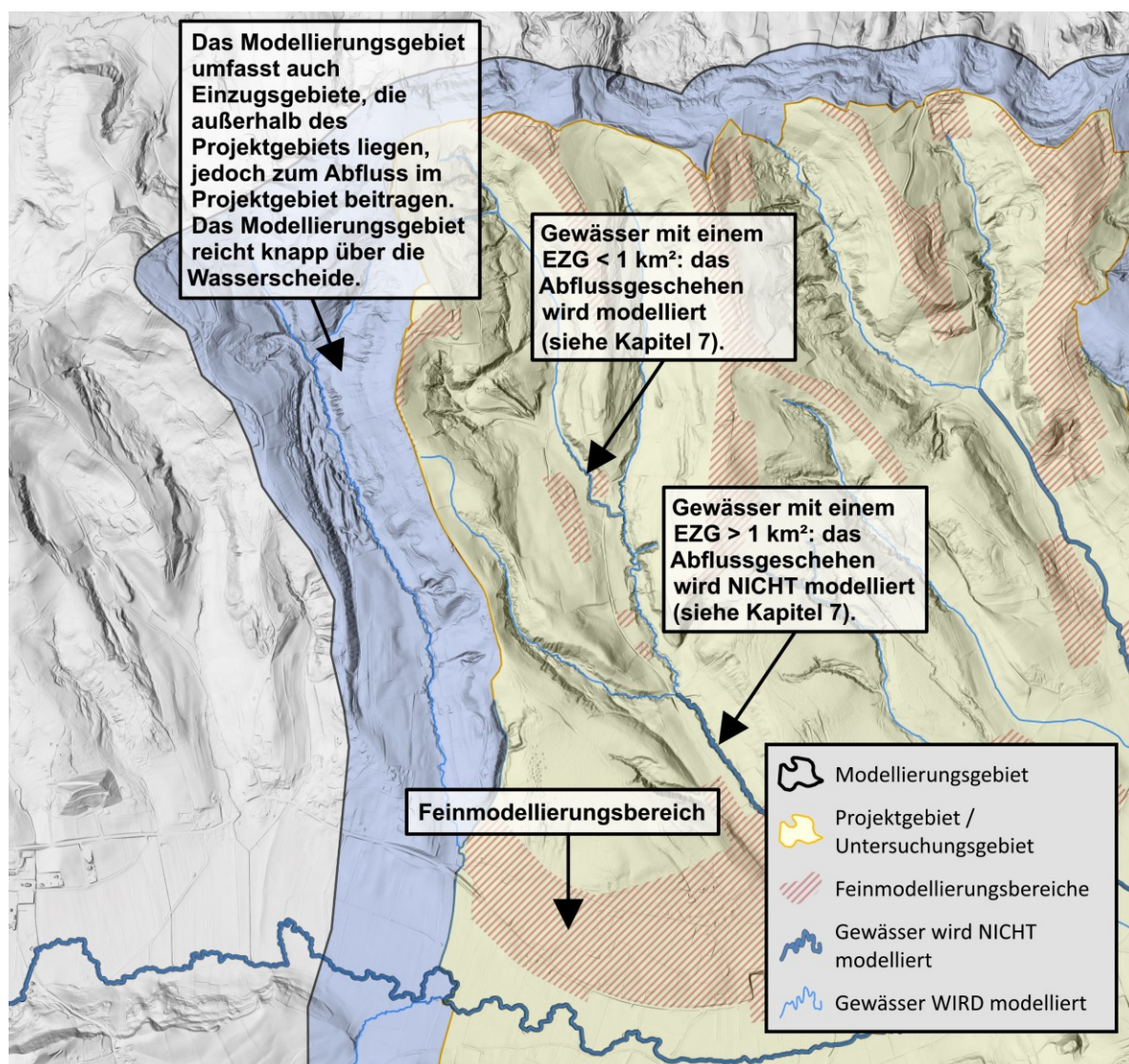


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung des Modellierungsgebiets (schwarz umrandet), des Projektgebiets (gelb umrandet und schraffiert), der Feinmodellierungsbereiche (rot schraffiert) und der Gewässer (blau). Die Einzugsgebiete, die sich außerhalb des Projektgebiets befinden, jedoch zum Abfluss im Projektgebiet beitragen und daher auch modelliert werden, sind blau schraffiert dargestellt (Datengrundlagen: <https://geoland.at>, <https://data.gv.at>).

Box 3: Festlegung des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche.

- Die Abgrenzung des Projektgebiets, des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche ist im Rahmen eines Vorprojektes oder zu Projektbeginn, in Abstimmung mit der Auftraggeberin, erforderlich.
- Eine nachträgliche Erweiterung von Projektgebiet, Modellierungsgebiet und Feinmodellierungsbereiche ist erforderlich, wenn im Zuge der Plausibilitätsprüfung festgestellt wird, dass relevante Abflusswege im Modell nicht ausreichend erfasst werden.

5.2. Richtwerte für Ergänzungen in Feinmodellierungsbereichen

Die nachfolgende Tabelle 6 gibt Richtwerte und Beispiele zur Erhebung, Vermessung und Berücksichtigung abflussrelevanter Strukturen in den Feinmodellierungsbereichen der 2D-Modellierung. Die angegebenen Größen sind als Orientierungswerte zu verstehen und nicht als feste Grenzen zu interpretieren. In Kapitel 8.3 wird detailliert beschrieben, wie die Strukturen im Berechnungsnetz einzubauen sind.

Tabelle 6: Richtwerte und Beispiele zur Erhebung, Vermessung und Berücksichtigung abflussrelevanter Strukturen in den Feinmodellierungsbereichen der 2D-Modellierung.

Beurteilung	Erhebung	Vermessung	2D Modellierung
Gehsteig			
Höhenunterschiede von Gehsteigen gegenüber Straßen sind in modernen Laserscandaten bzw. DGMs aufgrund deren Breite im Verhältnis zur Rastergröße im Regelfall enthalten.	Wenn relevant: Aufmaß und Foto im Feld.	Nur in Sonderfällen.	Wenn relevant, aber im DGM unzureichend erfasst: Ergänzung im Berechnungsnetz.
Struktur: Höhe < 10 cm (Gehsteigkanten, Sockelmauern, Straßenkuppen, Rigole etc.)			
Nur in Sonderfällen relevant, Bewertung anhand Vorberechnung.	Wenn relevant: Aufmaß und Foto im Feld.	Nur in Sonderfällen.	Wenn relevant: Einbau ins Berechnungsnetz.
Struktur: Höhe > 10 cm (Gehsteigkanten, Sockelmauern, Straßenkuppen, Rigole etc.)			
Bewertung, ob im DGM enthalten anhand Vorberechnung und örtlicher Erhebung. Ergänzung bei Bedarf.	Wenn relevant: Aufmaß und Foto im Feld.	Ergänzende Vermessung in Sonderfällen.	Wenn relevant: Einbau ins Berechnungsnetz.

Beurteilung	Erhebung	Vermessung	2D Modellierung
Graben: Breite < 0,5 m (Gewässer, Straßengraben, Entwässerungsgraben, Mulde)			
Im Regelfall relevant.	Beurteilung der Bedeutung und Geometrie im Zuge der Begehung.	Wenn unzureichend in Laserscan erfasst: ggfs. ergänzende terrestrische Vermessung in besonders relevanten Fällen.	Durchgehende Tiefenlinie sicherstellen, Dreiecksquerschnitt mit zwei Elementreihen im Regelfall ausreichend. Rauheitsbelegung beachten.
Graben: Breite 0,5 – 1 m (Gewässer, Straßengraben, Entwässerungsgraben, Mulde)			
Im Regelfall relevant.	Beurteilung der Bedeutung und Geometrie im Zuge der Begehung.	Wenn unzureichend in Laserscan erfasst: ggfs. ergänzende terrestrische Vermessung in relevanten Fällen.	Durchgehende Tiefenlinie mit zwei Sohllinien, ergibt Trapezprofil mit drei Elementreihen im Querschnitt. Rauheitsbelegung beachten.
Graben: Breite > 1 m (Gewässer, Straßengraben, Entwässerungsgraben, Mulde)			
Im Regelfall relevant.	Beurteilung der Bedeutung und Geometrie im Zuge der Begehung.	Wenn unzureichend im DGM erfasst: ergänzende terrestrische Vermessung in relevanten Fällen oder bei komplexer Querschnittsform.	Tiefenlinie mit min. zwei Sohllinien, ergibt Trapezprofil mit min. drei Elementreihen im Querschnitt. Rauheitsbelegung beachten.

Beurteilung	Erhebung	Vermessung	2D Modellierung
Verrohrung > DN300			
Im Regelfall relevant.	Foto, Kartierung Verlauf, Material, Naturmaß (Querschnitt und Grabentiefe)	Evaluierung mittels Naturmaßen und ALS. Falls nicht ausreichend erfasst, ist eine ergänzende Vermessung erforderlich.	Im Regelfall: Einbau in das Modell auf Basis von Laserscan und Naturmaßen.
Verrohrung außerhalb von Feinmodellierungsbereichen			
Einbau nur in Sonderfällen.	Nur in Sonderfällen.		Abschätzung DN mittels Grabentiefe im Laserscan.
Brücke, Verrohrung mit Sonderprofil			
Einbau in Feinmodellierungsbereichen.	Foto, Kartierung Verlauf, Material, Naturmaß (Querschnitt und Grabentiefe)	Ergänzende Vermessung zu den Naturmaßen.	Einbau anhand Fotos, Naturmaßen und Vermessung.

6. Hydrologische Modellierung

6.1. Einleitung

Ziel der hydrologischen Modellierung im Rahmen von Hangwasserstudien ist die Bestimmung des effektiven Niederschlags, also jenem Anteil des Niederschlags, der nicht durch die Vegetation abgefangen (Interzeption), in Mulden zurückgehalten oder in den Boden infiltriert wird, sondern unmittelbar zum Abfluss gelangt. Dieser bildet die Grundlage für die anschließende 2D-Überflutungsmodellierung, in der die zeitliche und räumliche Konzentration des Abflusses simuliert wird.

Die Vorgehensweise bei der Modellierung pluvialer Überflutungen unterscheidet sich grundlegend von der fluvialer Abflussmodellierungen. Während bei fluvialen Modellierungen in der Regel Zuflussganglinien vorgegeben werden, muss bei der pluvialen Überflutungsmodellierung der Niederschlag flächig in das 2D Modell eingespeist werden. Je nach verwendeter 2D-Software werden die effektiven Niederschläge entweder vorab mittels eines hydrologischen Modells berechnet oder direkt durch ein in der 2D-Software implementiertes hydrologisches Modell ermittelt. Bei vorab berechneten Niederschlägen werden die daraus abgeleiteten Niederschlagsganglinien den Modellknoten oder -elementen des 2D Modells zugewiesen.

Die schlussendlich berechneten Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten werden maßgeblich von den gewählten Ansätzen und Annahmen der hydrologischen Modellierung beeinflusst. Dazu zählt die Wahl der verwendeten Niederschlagsjährlichkeit und -dauerstufe (siehe Kapitel 6.2), die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge (siehe Kapitel 6.2.3 und 6.2.4), die Vorfeuchte am Beginn eines Ereignisses sowie die hydrologischen Grundlagendaten und Modellierungsansätze (siehe Kapitel 6.3). Abbildung 8 zeigt schematisch das Zusammenspiel ausgewählter Einflussfaktoren auf den Oberflächenabfluss.

Dementsprechend sind einheitliche Standards und Vorgehensweisen, insbesondere bei den verwendeten hydrometeorologischen Eingangsdaten, Randbedingungen und Modellierungsansätzen, für die Vergleichbarkeit der Modellierungsergebnisse des Oberflächenabflusses bei Starkregenereignissen von großer Bedeutung. Die maßgeblichen Festlegungen sind im vorliegenden Dokument zusammengestellt. Ergänzend dazu wird das ÖWAV-Regelblatt 220 (ÖWAV 2019) als zentrales Nachschlagewerk für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung empfohlen.

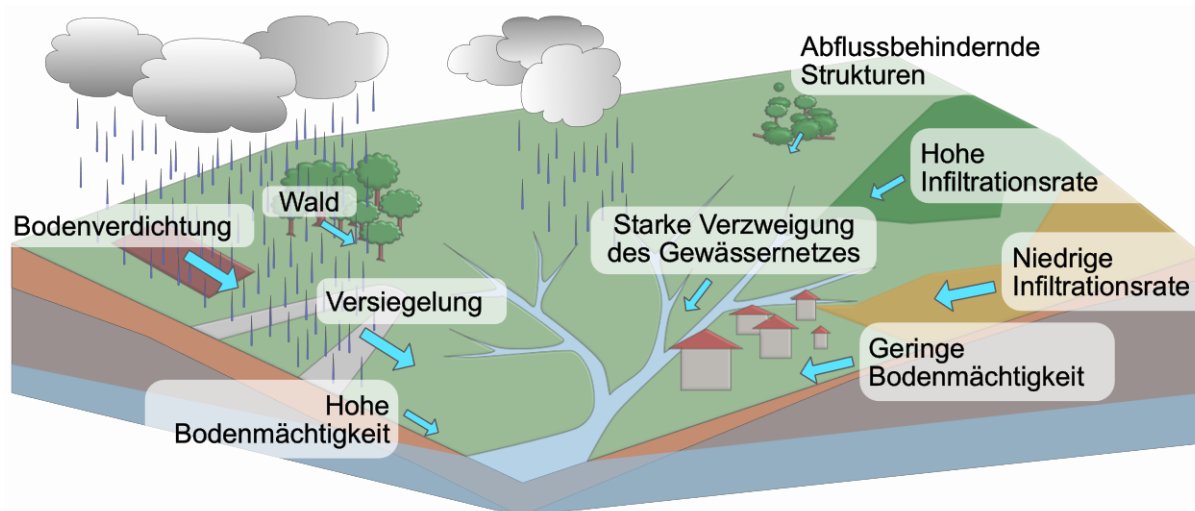


Abbildung 8: Eine Auswahl der Einflussfaktoren auf den Oberflächenabfluss ist dargestellt. Die Größe der Pfeile zeigt schematisch das Ausmaß der resultierenden Abflüsse.

6.2. Niederschlag

6.2.1. Niederschlagseingangsdaten

Eine zentrale Voraussetzung für die Modellierung pluvialer Überflutungen ist die Verwendung zuverlässiger Niederschlagseingangsdaten. Dabei kann grundsätzlich zwischen Aufzeichnungen vergangener Ereignisse und Regenspendenlinien unterschieden werden.

Niederschlagsaufzeichnungen dienen insbesondere der Kalibrierung und Validierung der hydrologischen Modellkomponenten und stammen beispielsweise von Stationsmessungen des Hydrographischen Dienstes oder der GeoSphere Austria (GSA).

Regenspendenlinien werden zur Berechnung von Ereignissen einer bestimmten Jährlichkeit herangezogen. Für das gesamte Bundesgebiet stellt das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) Regenspendenlinien zur Verfügung. Diese sind über die Internetplattform eHYD des Hydrographischen Dienstes in Österreich (<https://ehyd.gv.at>) abrufbar und im Rahmen der zweidimensionalen Modellierung von Starkregenereignissen heranzuziehen.

Die eHYD Regenspendenlinien wurden nach drei Methoden ausgewertet (siehe Tabelle 7) und stehen für Gitterpunkte mit einer Gitterdistanz von ca. 6 km x 6 km zur Verfügung. Sie umfassen Wiederkehrintervalle (Jährlichkeiten) von 1 bis 100 Jahren sowie Niederschlagsdauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tagen (BML 2022).

Tabelle 7: Methoden für die Ermittlung der Regenspendenlinien, die auf eHYD.at für jeden Gitterpunkt verfügbar sind.

<p>ÖKOSTRA: Österreichweit koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und Auswertung</p>	<p>Die ÖKOSTRA-Werte basieren auf extremwertstatistisch ausgewerteten Niederschlagsdaten von Messstationen, die österreichweit räumlich interpoliert wurden (BML 2022). Tendenziell werden die tatsächlich auftretenden Niederschläge bei kurzen Dauerstufen durch ÖKOSTRA unterschätzt (ÖWAV 2019).</p>
<p>MaxModN: Maximierte Modellniederschläge</p>	<p>Die MaxModN-Werte basieren auf meteorologischen Modellen, die mit maximierten Anfangs- und Randbedingungen betrieben wurden (BML 2022). Die MaxModN-Werte übersteigen die ÖKOSTRA-Werte zum Teil signifikant und werden grundsätzlich als eher überschätzend eingestuft. Es wurden jedoch bereits vereinzelt Niederschläge mit einer Niederschlagssumme entsprechend den hundertjährigen MaxModN-Werten beobachtet (ÖWAV 2019).</p>
<p>Bemessungsniederschlag</p>	<p>Da es plausibel scheint, dass die MaxModN-Werte eher Werte des oberen Drittels, die ÖKOSTRA-Werte eher Werte des unteren Drittels der Realisierungen von Bemessungsniederschlägen abdecken, wurden durch eine dauerstufenabhängige, gewichtete Mittelwertbildung zwischen den ÖKOSTRA- und den MaxModN-Werten die Bemessungsniederschlagswerte ermittelt (BML 2022, ÖWAV 2019).</p>

In Abhängigkeit des betrachteten Berechnungsszenarios (siehe Kapitel 9) sind die Bemessungsniederschlagswerte oder die Werte der maximierten Modellniederschläge bei der Modellierung von Starkregenereignissen zu verwenden.

6.2.2. Niederschlagsdauerstufen

Bei der Durchführung von Hangwassermodellierungen ist eine hydrologisch fundierte Wahl der Niederschlagsdauerstufe notwendig.

Die Wahl der Niederschlagsdauerstufe beeinflusst nicht nur die gesamte während eines Ereignisses fallende Niederschlagshöhe (auch Niederschlagsmenge genannt, in mm), sondern auch die Intensität des Niederschlags (in z. B. mm/h). Bei gleicher Jährlichkeit gilt: je kürzer die Dauerstufe, desto höher ist typischerweise die Niederschlagsintensität.

Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt den Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und -intensität in Abhängigkeit der Dauerstufe, exemplarisch dargestellt anhand der eHYD Bemessungsniederschläge an einem ausgewählten Gitterpunkt mit einer Wiederkehrzeit von einem Jahr.

Tabelle 8: Niederschlagsmenge und Intensität, in Abhängigkeit der Niederschlagsdauerstufe, bei einem Ereignis mit der Wiederkehrzeit von einem Jahr eines eHYD Gitterpunkts.

Dauerstufe	Niederschlagsmenge in mm	Intensität in mm/h
5 Minuten	8,5	102
90 Minuten	25	17,1

Bei der Ausweisung der Gefährdung durch pluviale Überflutungen ist es notwendig, jene Dauerstufe einer bestimmten Jährlichkeit auszuwählen, die am jeweiligen Bezugspunkt im Einzugsgebiet die höchsten Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten verursacht.

Hierfür ist die maßgebende Dauerstufe für den Bezugspunkt zu bestimmen, die beispielweise über die Konzentrationszeit abgeschätzt werden kann (Maniak 2016). Die Konzentrationszeit beschreibt die Fließzeit entlang des (hydraulisch) längsten Weges von der Wasserscheide bis zum Bezugspunkt. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass sich bei einer Niederschlagsdauer, die der Konzentrationszeit entspricht – unter der Voraussetzung einer Blockregenverteilung – der Abfluss aller beitragenden Flächen überlagert und der maximale Scheitelabfluss auftritt (Maniak 2016).

Ist die Niederschlagsdauer kürzer als die Konzentrationszeit, trägt nicht das gesamte Einzugsgebiet gleichzeitig zum Abfluss am Bezugspunkt bei. Übersteigt die Niederschlagsdauer hingegen die Konzentrationszeit, trägt zwar das gesamte Gebiet gleichzeitig zum Abfluss am Bezugspunkt bei, die geringere Niederschlagsintensität führt jedoch zu einem abgeschwächten Scheitelabfluss (Seibert und Auerswald 2020). Abbildung 9 zeigt beispielhaft die möglichen maßgebenden Dauerstufen für jeden Punkt innerhalb eines Einzugsgebiets, in Abhängigkeit von der Konzentrationszeit.

Die Annahme, dass die Konzentrationszeit die maßgebende Dauerstufe darstellt, trifft jedoch näherungsweise nur für weitgehend undurchlässige, urbane Einzugsgebiete zu. In überwiegend unversiegelten Einzugsgebieten sind die Prozesse der Abflussbildung komplexer und durch eine hohe räumliche Variabilität der Einflussfaktoren geprägt. Zudem können sich die Einzugsgebiete in ihren strukturellen Eigenschaften erheblich unterscheiden. Die Berechnung der Konzentrationszeit ist daher mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. Daher kann nicht generell davon ausgegangen werden, dass die maximale Wassertiefe am Bezugspunkt bei einer Niederschlagsdauer auftritt, die der Konzentrationszeit entspricht (DWA 2012).

Einen wesentlichen Einfluss auf die maßgebende Dauerstufe haben einerseits die Eigenschaften des Niederschlagsereignisses (zeitliche und räumliche Verteilung des Niederschlags, Zugrichtung etc.) und andererseits die Eigenschaften des Einzugsgebiets (Einzugsgebietsform, Dichte der

Abflussrillen und -rinnen, Lage und Dichte der Bebauung, vorliegende Bodeneigenschaften, Landnutzungen etc.) (Seibert und Auerswald 2020).

Bei der Modellierung pluvialer Überflutungen, beispielsweise auf Gemeindegebietsebene, werden die Überflutungsflächen, Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten nicht nur für einzelne Bezugspunkte, sondern flächig für das gesamte Modellierungsgebiet ermittelt. Da an unterschiedlichen Bezugspunkten im Modellierungsgebiet verschiedene Dauerstufen maßgeblich sind (Abbildung 9), ist es erforderlich, Berechnungen mit mehreren Niederschlagsdauerstufen durchzuführen.

Für jedes der in Kapitel 9 beschriebenen Berechnungsszenarien ist es notwendig, die Abflüsse bei zumindest drei Niederschlagsdauerstufen zu berechnen (Tabelle 9). Abhängig von den lokalen hydrologischen und topografischen Verhältnissen können durchaus auch andere Dauerstufen maßgeblich sein. In diesem Fall sind zusätzliche Szenarien in die Modellierung einzubeziehen.

Tabelle 9: Niederschlagsdauerstufen, die für Hangwassermodellierungen zu berücksichtigen sind.

15 Minuten
30 Minuten
60 Minuten

Die maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten im Modellierungsgebiet werden durch die Zusammenführung der Berechnungsergebnisse aller betrachteten Niederschlagsdauerstufen derselben Jährlichkeit ermittelt und in einer Karte dargestellt (siehe Kapitel 10.2). Die ausgewiesenen Werte treten daher nicht zwingend bei einer einzelnen Niederschlagsdauerstufe auf, sondern stellen die jeweils maximal berechneten Ergebnisse aller Dauerstufen dar.

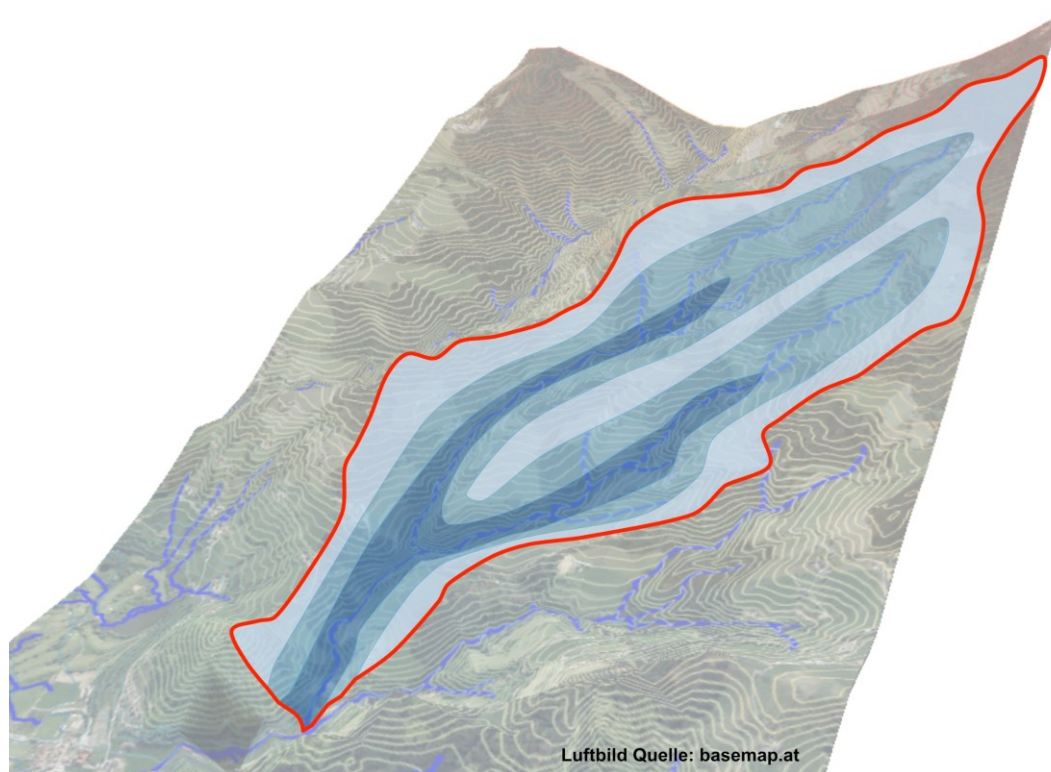


Abbildung 9: Beispielhafte farbliche Darstellung einer möglichen Verteilung der maßgebenden Dauerstufen innerhalb eines Einzugsgebiets (rot umrandet). Innerhalb des hellblauen Bereichs beträgt die maßgebende Niederschlagsdauerstufe 15 Minuten, im mittelblauen Bereich 30 Minuten, im dunkelblauen Bereich 60 Minuten.

6.2.3. Räumliche Verteilung und flächige Abminderung des Ereignisniederschlags

Die Niederschlagsmengen können während eines Ereignisses räumlich innerhalb weniger Kilometer stark variieren. Bodenstationen erfassen den Niederschlag punktuell, sodass räumliche Unterschiede nur bei einem ausreichend dichten Messnetz abgebildet werden können (Maniak 2016). Insbesondere Starkregenereignisse sind häufig konvektiv geprägt, treten lokal begrenzt auf und betreffen nicht zwangsläufig das gesamte Einzugsgebiet. Wird der Niederschlag in der Modellierung räumlich konstant angesetzt, so ist es üblich, die eHYD Niederschläge mithilfe eines Flächenabminderungsfaktors zu reduzieren (ÖWAV 2019).

Für die Modellierung pluvialer Überflutungen ist es jedoch erforderlich, die Bemessungsniederschläge im Modellierungsgebiet ohne Abminderung anzusetzen. Eine Reduktion der Niederschlagshöhen könnte anderenfalls zu einer Unterschätzung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten in bestimmten Bereichen des Einzugsgebiets führen. In spezifischen Fällen ist jedoch eine flächige Abminderung des Niederschlags gerechtfertigt. Dies trifft beispielsweise zu, wenn ein Einzugsgebiet außerhalb der Feinmodellierungsbereiche liegt, jedoch

zum Abfluss innerhalb dieser Bereiche beiträgt und eine gewisse Größe ($> 1 \text{ km}^2$) überschreitet (siehe Kapitel 7). In solchen Fällen kann der Niederschlag außerhalb der Feinmodellierungsbereiche reduziert werden, um eine Überschätzung des Abflusses zu vermeiden. Eine nachvollziehbare fachliche Begründung im technischen Bericht ist dabei erforderlich.

Die Niederschlagshöhen der eHYD Gitterpunkte im Bereich des betrachteten Einzugsgebiets sind zu analysieren. Lässt sich dem Einzugsgebiet kein einzelner Gitterpunkt eindeutig zuordnen, etwa weil es zwischen mehreren eHYD Gitterpunkten liegt oder weil die Niederschlagshöhen der umliegenden Punkte stark variieren ($\pm 10 \%$), so ist das Gebietsmittel der Niederschlagshöhen zu bestimmen. Die Methode zur Ermittlung des Gebietsmittels ist, je nach den spezifischen Gegebenheiten des Einzugsgebiets, begründet zu wählen und zu dokumentieren. Bei Modellierungsgebieten, die sich über mehrere eHYD Gitterpunkte erstrecken, kann es sinnvoll sein, den Niederschlag flächendifferenziert anzusetzen.

6.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Die Form der berechneten Abflussganglinie, und damit auch die auftretenden Überflutungsflächen und maximalen Wassertiefen, hängen bei der Modellierung pluvialer Überflutungen stark von der gewählten zeitlichen Verteilung des Niederschlags ab. Hier sei erwähnt, dass die zeitliche Verteilung des Niederschlags bei jedem Ereignis einmalig ist (DVK 1999).

In der Realität zeigen sich meist komplexe, mehrgipflige Verteilungen der Niederschläge. Die zeitliche Verteilung hängt dabei auch mit der Entstehung der Niederschläge zusammen. Kurzdauernde, konvektive Ereignisse führen häufig zu einem Maximum im ersten bzw. zweiten zeitlichen Quartal, während länger andauernde, advektive Ereignisse ihr Maximum eher in der zweiten Hälfte der Dauer erreichen (Lecher et al. 2021).

Selbst bei langen Niederschlagsaufzeichnungen ist es daher schwierig, eine charakteristische Verteilungskurve zu bestimmen. Auch jedes zukünftige Starkregenereignis wird eine individuelle Verteilung aufweisen, die von den spezifischen Bedingungen des Ereignisses abhängt. Bezüglich des maximalen Abflussscheitels lässt sich feststellen, dass dieser – bei gleicher Niederschlagshöhe – bei anfangsbetonten Ereignissen üblicherweise niedriger ist als bei endbetonten (ÖWAV 2019). Das ist darauf zurückzuführen, dass der Abflussbeiwert mit zunehmender Regendauer ansteigt, was zu einer veränderten Abflussdynamik führt (Seibert und Auerwald 2020).

Um einen Standard für die Modellierung pluvialer Überflutungen zu schaffen und die Ergebnisse vergleichbar zu machen, sind daher synthetische Niederschlagsverteilungen zu verwenden.

Vier Typen möglicher synthetischer Niederschlagsverteilungen werden in Tabelle 10 beschrieben und in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vier Typen möglicher synthetischer zeitlicher Niederschlagsverteilungen.

Anfangsbetonte Niederschlagsverteilung	Der Niederschlag konzentriert sich überwiegend auf die Anfangsphase des Ereignisses, was üblicherweise zu einem niedrigeren Abflussscheitelwert führt (ÖWAV 2019).
Endbetonte Niederschlagsverteilung	Höhere Niederschlagsintensitäten treten gegen Ende des Ereignisses auf. Dies führt tendenziell zu einem höheren Abflussscheitelwert (ÖWAV 2019).
Mittbetonte Niederschlagsverteilung	Der Niederschlag weist starke Intensitäten zwischen 30 % und 50 % der Gesamtdauer auf und hat meist mittlere Abflussscheitelwerte zur Folge (DVWK 1999).
Blockregenverteilung	Der Niederschlag ist gleichmäßig über die gesamte Dauer des Ereignisses verteilt (konstante Niederschlagsintensität über das gesamte Ereignis). Die Blockregenverteilung führt eher zu niedrigeren Abflussscheitelwerten (Seibert und Auerwald 2020).

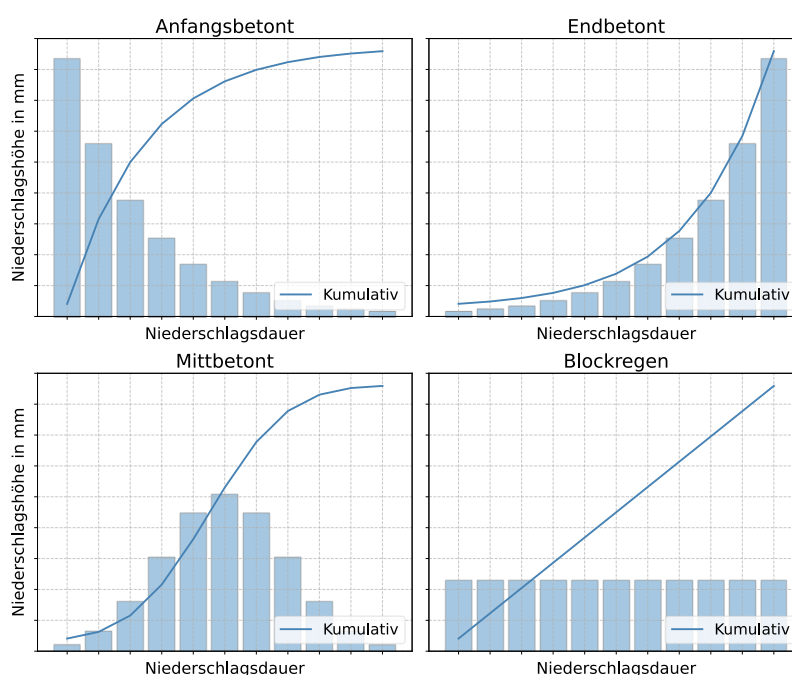


Abbildung 10: Synthetische Niederschlagsverteilungen: mögliche Aufteilungen der gesamten Niederschlagsmenge eines Ereignisses für zeitliche Abschnitte als Balken über die gesamte Niederschlagsdauer, sowie die kumulierte Niederschlagsmenge als blaue Linie dargestellt.

Beim HydroBOD-Verfahren (Kapitel 6.3.1) kann derzeit nur eine **Blockregenverteilung** verwendet werden. Wenn in zukünftigen Versionen von HydroBOD auch andere Niederschlagsverteilungen verfügbar sind, kann eine dieser alternativen Verteilungen gewählt werden. Falls aufgrund spezifischer Anforderungen oder Rahmenbedingungen anstelle des HydroBOD Verfahrens andere

hydrologische Modelle eingesetzt werden, wird empfohlen, die Niederschlagsdaten von Messstationen im oder nahe dem Modellierungsbereich auszuwerten. Falls Muster in der zeitlichen Niederschlagsverteilung erkannt werden können und eine bestimmte Verteilung regelmäßig auftritt, sollte eine synthetische Verteilung gewählt werden, die diesem Muster am nächsten kommt. Wenn keine Muster in der zeitlichen Niederschlagsverteilung erkennbar sind, wird empfohlen, eine synthetische **mittenbetonte Verteilung** zu verwenden (ÖWAV 2019).

6.2.5. Zusammenfassende Empfehlungen – Niederschlagseingangsdaten

Box 4: Niederschlagseingangsdaten.

- Es ist erforderlich, den Niederschlag flächig in das 2D Modells einzuspeisen.
- Für die Szenarienberechnungen sind die Regenspendenlinien von eHYD zu verwenden. Abhängig vom jeweiligen Berechnungsszenario (Kapitel 9) sind entweder die Bemessungsniederschlagswerte oder die MaxModN-Werte heranzuziehen.
- Für jedes Berechnungsszenario sind zumindest die Niederschlagsdauerstufen 15, 30 und 60 Minuten zu berücksichtigen.
- Es ist grundsätzlich keine flächige Abminderung der Bemessungsniederschläge zu verwenden.
- Es sind synthetische, zeitliche Niederschlagsverteilungen zu verwenden. Die Wahl der synthetischen Verteilung ist zu begründen.
- In Ausnahmefällen, wie z. B. bei Einzugsgebieten $> 1 \text{ km}^2$ außerhalb der Feinmodellierungsbereiche mit relevanter Abflusswirkung, kann eine flächige Abminderung gerechtfertigt sein (siehe auch Kapitel 7).
- Die Niederschlagswerte der eHYD Gitterpunkte im Bereich des betrachteten Einzugsgebiets sollten analysiert werden. Gegebenenfalls ist das Gebietsmittel aus mehreren Gitterpunkten zu bilden oder der Niederschlag flächendifferenziert anzusetzen.
- In begründeten Fällen kann es erforderlich sein, zusätzlich weitere Niederschlagsdauerstufen zu berücksichtigen.
- Es kann sinnvoll sein, die zeitliche Verteilung beobachteter Niederschlagsereignisse zu analysieren und die synthetische Verteilung dementsprechend zu wählen (ÖWAV 2019).

6.3. Abflussbildungsansätze

Eine möglichst präzise Quantifizierung des zum Oberflächenabfluss gelangenden Anteils des Niederschlags, der üblicherweise als abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag bezeichnet wird, ist entscheidend für die Genauigkeit der ausgewiesenen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten. Bei kurzzeitiger Betrachtung, wie dies bei Starkregenereignissen der Fall ist, ergibt sich der effektive Niederschlag N_{eff} aus der Differenz zwischen dem gefallenem Niederschlag N und der Änderung des Gebietsrückhalts bzw. Gebietsspeichers ΔS :

$$N_{eff} = N - \Delta S$$

Der Gebietsrückhalt hängt von der Speicherfähigkeit der Vegetation (Interzeption), der Speicherung an der Oberfläche (z. B. Mulden, Mikrotopographie) sowie der Infiltration und Speicherung im Oberboden ab. Die Infiltrationsleistung wird wiederum maßgeblich von den Bodeneigenschaften und der Landnutzung (z. B. landwirtschaftliche Bewirtschaftung und Versiegelungsgrad) bestimmt. Zudem unterliegt die Infiltrationsleistung Schwankungen im jahreszeitlichen Verlauf. So fördern beispielsweise Wurzeln sowie biologische Aktivitäten im Boden die Versickerungsleistung in der Vegetationsperiode, während in der Brachephase erhöhte Abflüsse auftreten können.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Entstehung von Oberflächenabfluss ist die Vorfeuchte des Bodens. So kann eine hohe Bodenfeuchte zu Beginn eines Starkregenereignisses dazu führen, dass die Speicherfähigkeit des Bodens bereits erschöpft ist und selbst kleinere Niederschlagsmengen zu hohen Oberflächenabflüssen führen.

In den folgenden Kapiteln werden drei Verfahren vorgestellt, die für die Modellierung des abflusswirksamen Niederschlags herangezogen werden können. Des Weiteren ist in Anhang A: Hydrologische Modellierung jeweils ein Beispiel für die Anwendung der beschriebenen Verfahren zu finden.

6.3.1. HydroBOD-Verfahren

Modellbeschreibung:

Im Zuge des Projektes *Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreich (HydroBOD II)* wurden flächendeckende hydrologische Bodenkennwerte für das Bundesland Niederösterreich ermittelt (Sotier et al. 2017). Zudem wurde ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell entwickelt, das im Weiteren als HydroBOD bezeichnet wird. HydroBOD ermöglicht die Berechnung von effektiven Niederschlägen auf einem Berechnungsraster in diskreten Zeitintervallen. Der Abflussbildungsprozess wird für jede Berechnungszelle auf Basis einer hydrologischen Bilanz berechnet. Die Bodensäule ist in HydroBOD in fünf Schichten, bestehend aus einer

Infiltrationsschicht, drei Bodenschichten sowie dem geologischen Untergrund, unterteilt. Die Infiltrationsleistung wird auf Basis bodenhydrologischer Parameter berechnet. HydroBOD kann die infiltrationshemmende Wirkung einer Oberflächenverschlammung berücksichtigen, indem die Durchlässigkeit der Infiltrationsschicht dementsprechend modifiziert wird. Grundsätzlich wird bei Hangwassermodellierungen empfohlen, die Verschlammung der Oberfläche zu berücksichtigen. Vor allem in Einzugsgebieten mit einem hohen Anteil an Ackerflächen, kann es sinnvoll sein, den Einfluss der Verschlammung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse genauer zu untersuchen.

Versiegelten Flächen (Siedlungsbereiche und Verkehrsflächen) wird in HydroBOD ein konstanter Abflussbeiwert zugewiesen. Weitere Informationen zum HydroBOD Datensatz und Berechnungsmodell können Sotier et al. (2017) entnommen werden.

Berücksichtigung der Vorfeuchtezustände:

HydroBOD ermöglicht die Berücksichtigung von vier Vorfeuchtezuständen (trocken, mittel, feucht und gesättigt), die den Porenfüllungsgrad am Beginn eines Starkregenereignisses festlegen. Für das **häufige** und **seltene** Berechnungsszenario (siehe Kapitel 9) ist bei der Modellierung mit HydroBOD der mittlere Vorfeuchtezustand zu wählen. Bei diesem Vorfeuchtezustand sind 73 % der nutzbaren Feldkapazität am Beginn eines Ereignisses bereits belegt. Für das **extreme** Berechnungsszenario ist von einer höheren Vorfeuchte auszugehen, weshalb der Vorfeuchtezustand „feucht“ bei der Modellierung zu wählen ist. Bei diesem Vorfeuchtezustand sind 88 % der nutzbaren Feldkapazität belegt.

Anmerkungen und Empfehlungen zum Modell:

HydroBOD wurde an mehreren Standorten in Niederösterreich validiert, weshalb bei der Verwendung des Modells von einer qualitativ hochwertigen und einheitlichen Berechnung der effektiven Niederschläge ausgegangen werden kann. Aus diesem Grund sind die effektiven Niederschläge für die pluviale Überflutungsmodellierung grundsätzlich mit HydroBOD zu ermitteln.

Die Modellierung hat dabei in diskreten Zeitintervallen zu erfolgen. In Sortier et al. (2017) wird die Verwendung von 25 Intervallen empfohlen. Im Rahmen der Hangwassermodellierung erscheint es sinnvoll, die Anzahl der Zeitintervalle entsprechend den jeweiligen Niederschlagsdauerstufen zu wählen. So können beispielsweise 15 Intervalle für die 15- und 30-minütige Dauerstufe, entsprechend einem Zeitschritt von 1 bzw. 2 Minuten, und 30 Intervalle für die 60-minütige Dauerstufe, entsprechend einem Zeitschritt von 2 Minuten, sinnvoll sein.

Aufgrund der Programmstruktur von HydroBOD kann die zeitliche Niederschlagsverteilung in der aktuellen Version nur in Form eines Blockregens abgebildet werden. Wenn in zukünftigen Versionen von HydroBOD auch andere zeitliche Niederschlagsverteilungen verfügbar sind, kann auch eine dieser alternativen Verteilungen in Betracht gezogen werden. Eine räumliche Verteilung der Niederschläge lässt sich in HydroBOD durch die Aufteilung des Modellierungsgebiets in Teilmodelle realisieren. Dies kann zum Beispiel hilfreich sein, wenn für Teile des Einzugsgebiets eine Flächenabminderung verwendet wird.

6.3.2. Runoff-Curve-Number-Verfahren (CN-Verfahren)

Modellbeschreibung:

Das Runoff-Curve-Number-Verfahren (CN-Verfahren) ist eine konzeptionelle Methode zur Berechnung des abflusswirksamen Niederschlags, die vom US Soil Conservation Service (SCS) auf Basis zahlreicher Abflussmessungen in kleineren, überwiegend landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten entwickelt wurde. Die grundlegende Annahme beim CN-Verfahren ist, dass das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und dem maximal möglichen Gebietsrückhalt gleich dem Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und dem möglichen Abfluss ist (NRCS 2004, Chow 1988, ÖWAV 2019).

Der Anfangsverlust I_a („initial abstraction“) in mm wird beim CN-Verfahren proportional mit dem Faktor λ zum Gebietsrückhalt S in mm angesetzt:

$$I_a = \lambda \cdot S$$

In Österreich hat sich ein λ -Wert von 0,05, was einem Anfangsverlust von 5 % des maximalen Gebietsrückhalts S entspricht, als gebräuchlich erwiesen (Merz et al. 2006). Für die Anwendung des CN-Verfahrens wird eine dimensionslose Kurvennummer (CN) benötigt. Diese ist ein Maß für den maximalen Gebietsrückhalt S und ist abhängig vom Versickerungsvermögen, der Landnutzung sowie der Vorfeuchte am Beginn eines Ereignisses und reicht von $CN = 0$ bis 100. Dabei entspricht ein CN-Wert von 0 einer theoretisch unendlich großen Gebietsretention, was bedeutet, dass auch bei theoretisch unendlich lange andauerndem Regen kein Abfluss entsteht. Im Gegensatz dazu kommt bei einem CN-Wert von 100 der gesamte Niederschlag zum Abfluss. Ursprünglich wurden die Kurvennummern unter der Annahme von 20 % Anfangsverlusten ($\lambda = 0,2$) abgeleitet. Rechnet man stattdessen mit 5 % Anfangsverlusten, so müssen die in der Literatur angegebenen Kurvennummern angepasst werden. Die Anpassung kann folgendermaßen erfolgen (ÖWAV 2019):

$$CN_{0,05} = \frac{CN_{0,2}}{(1,42 - 0,0042 \cdot CN_{0,2})}$$

Der potenzielle maximale Gebietsrückhalt S kann über die Kurvennummer bestimmt werden:

$$S = \frac{25400}{CN_{0,05}} - 254$$

Auf Basis dessen lässt sich der effektive Niederschlag N_{eff} in mm aus der Gesamtniederschlagshöhe N in mm über die gesamte Dauer des Niederschlagsereignisses wie folgt berechnen:

$$N_{eff} = \frac{(N - \lambda \cdot S)^2}{N + (1 - \lambda) \cdot S}$$

Im Rahmen der Hangwassermodellierung ist – analog zum HydroBOD-Verfahren – auch beim CN-Verfahren der effektive Niederschlag auf Zeitschrittbasis zu berechnen. Empfehlungen zur Zeitschrittweite können Kapitel 6.3.1 entnommen werden. Wird der effektive Niederschlag mit dem CN-Verfahren in Zeitintervallen berechnet, so kann folgendermaßen vorgegangen werden:

$$F(t) = \frac{S \cdot (N_{kum}(t) - I_a)}{N_{kum}(t) - I_a + S} \quad \text{für } N_{kum}(t) \geq I_a$$

$$F(t) = 0 \quad \text{für } N_{kum}(t) < I_a$$

wobei $F(t)$ der kumulierte Rückhalt zum Zeitpunkt t in mm und $N_{kum}(t)$ der bis zu diesem Zeitpunkt gefallene Niederschlag in mm sind. Die kumulierte effektive Niederschlagshöhe $N_{eff,kum}(t)$ in mm zu jedem Zeitpunkt kann über den Rückhalt $F(t)$, den gefallenen Niederschlag $N_{kum}(t)$ sowie den Anfangsverlusten I_a berechnet werden:

$$N_{eff,kum}(t) = N_{kum}(t) - I_a - F(t)$$

Eine Beispielrechnung ist in Abbildung A2 im Anhang zu finden.

Berücksichtigung der Vorfeuchtezustände:

Die Berücksichtigung des Vorfeuchtezustands kann beim CN-Verfahren über eine Modifikation der Kurvennummern erzielt werden. Grundsätzlich werden beim CN-Verfahren drei Zustände unterschieden, die in der Literatur mit ARC I (Antecedent Runoff Condition), ARC II und ARC III angeführt werden und die Variabilität der CN-Werte beschreiben. Die Variabilität der CN-Werte ist nicht ausschließlich auf die Vorfeuchte zurückzuführen, jedoch können ARC I als eher trockene, ARC II als mittlere und ARC III als eher feuchte Zustände interpretiert werden. Wenn nicht anders angegeben, entsprechen die angegebenen Kurvennummern immer den Bedingungen unter ARC II.

Bei der Modellierung der **häufigen** und **seltene**n Ereignisse (siehe Kapitel 9) ist von ARC II-Bedingungen auszugehen. Für die Berechnung des **extremen** Ereignisses sind ARC III-Zustände heranzuziehen. Die Umrechnung der Kurvennummern von ARC II auf ARC III kann nach Maniak (2016) folgendermaßen erfolgen:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,43 + 0,0059 \cdot CN_{II}}$$

Anmerkungen und Empfehlungen zum Modell:

Ein klarer Vorteil des CN-Verfahrens ist seine einfache Handhabung und Robustheit. Jedoch ist anzumerken, dass CN-Parameter aus Literaturtabellen für österreichische Verhältnisse ungeeignet sein können (Merz et al. 2006). In Standardliteraturtabellen wird Waldgebieten beispielsweise eine eher hohe Durchlässigkeit zugeschrieben. Jedoch ist in Österreich aufgrund der großen Niederschläge und der damit verbundenen hohen Grundwasserstände oft das Gegenteil der Fall (ÖWAV 2019). Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Verwendung des CN-Verfahrens impliziert,

dass die Abflussbildung rein von der Gesamtmenge des gefallen Niederschlags abhängig ist, nicht jedoch von der Intensität (Hawkins et al. 2008).

6.3.3. Green-Ampt-Verfahren

Modellbeschreibung:

Das Green-Ampt-Verfahren (Green und Ampt 1911) gehört der Gruppe der physikalisch basierten Infiltrationsansätze an. Es basiert auf der Annahme, dass der Übergang zwischen der gesättigten und ungesättigten Bodenschicht idealisiert als rechteckige Feuchtefront abgebildet werden kann. Die Dynamik dieser Feuchtefront und damit die potenzielle Infiltrationsrate werden durch eine Kombination der Kontinuitätsgleichung und der Darcy-Gleichung folgendermaßen beschrieben:

$$f(t) = K \left(\frac{(\psi + h_0)\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right)$$

wobei $f(t)$ die potenzielle Infiltrationsrate in mm/h, $F(t)$ die kumulative Infiltration zum Zeitpunkt t in mm, K die effektive hydraulische Leitfähigkeit in mm/h, ψ die Saugspannung an der Feuchtefront in mm und h_0 die Wassertiefe an der freien Oberfläche in mm sind. Der Parameter $\Delta\theta$ quantifiziert das nutzbare Porenvolumen und berechnet sich aus der Differenz zwischen der effektiven Porosität θ_e und dem Initialwassergehalt θ_i : $\Delta\theta = \theta_e - \theta_i$. Die effektive Porosität θ_e ergibt sich durch eine Reduktion der Porosität n um den residualen Wassergehalt θ_r : $\theta_e = n - \theta_r$.

Berücksichtigung der Vorfeuchtezustände:

Eine Berücksichtigung des Vorfeuchtezustandes kann beim Green-Ampt-Verfahren durch eine Modifikation des Initialwassergehalts θ_i erzielt werden. Dabei ist in Anlehnung an HydroBOD für mittlere Vorfeuchtebedingungen ein Porenfüllungsgrad von 73 % und für feuchte Bedingungen ein Porenfüllungsgrad von 88 % zu empfehlen (vgl. Kapitel 6.3.1).

Anmerkungen und Empfehlungen zum Modell:

Bei der Verwendung des Green-Ampt-Verfahrens wird die Wassertiefe h_0 an der Oberfläche bei der Berechnung der potenziellen Infiltrationsrate oftmals vernachlässigt, da von Dünnschichtabfluss (sehr geringe Wassertiefen) ausgegangen wird und somit $\psi \gg h_0$ gilt. Bei der Kopplung des Green-Ampt-Verfahrens mit hochauflösenden 2D hydronumerischen Modellen, die Abflusswege (z. B. Rillen) detailliert abbilden können, soll bedacht werden, dass diese Vereinfachung nicht pauschal gültig ist und sich h_0 durchaus in der Größenordnung von ψ bewegen kann (siehe Rawls et al. 1983). Sollte das verwendete 2D Modell die Möglichkeit bieten, die Wassertiefe h_0 im Green-Ampt-Ansatz zu berücksichtigen, so kann es sinnvoll sein, die Auswirkung dieses Parameters auf die Berechnungsergebnisse im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zu untersuchen.

Die Parameter für die Green-Ampt-Gleichung liegen in tabellierter Form für unterschiedliche Bodenarten vor (Rawls et al. 1983). Es sei hier angemerkt, dass die in der Literatur angegebenen

Werte den Makroporenabfluss nicht direkt berücksichtigen, welcher jedoch für die Abflussbildung häufig eine weitaus größere Rolle spielt als die Wasserbewegung in der Bodenmatrix (ÖWAV 2019). Der Einfluss der Makroporen kann über effektive Parameter, wie dies zum Beispiel in HydroBOD (Sotier et al. 2017) umgesetzt wurde, berücksichtigt werden.

In vielen gängigen 2D hydronumerischen Modellen ist das Green-Ampt-Verfahren implementiert. Dies ermöglicht eine modellinterne, zeitschrittbasierte Kopplung von Infiltration und Oberflächenabfluss, was bei Modellen, die lediglich effektive Niederschläge einspeisen, nicht der Fall ist. Dies kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die Infiltration in der Nachlaufzeit oder an Übergängen zwischen Bereichen mit stark heterogener Infiltrationskapazität von Relevanz ist.

6.3.4. Kalibrierung, Validierung und Plausibilisierung der Abflussbildung

Grundsätzlich ist eine Kalibrierung und Validierung der hydrologischen Modellparameter anhand von Aufzeichnungen historischer Überflutungsereignisse anzustreben. Im Gegensatz zur fluvialen Hochwassermodellierung, bei der häufig Pegeldata zur Modellkalibrierung und -validierung zur Verfügung stehen, gibt es in den seltensten Fällen belastbare Aufzeichnungen und Messdaten, die für die Kalibrierung und Validierung pluvialer Modelle herangezogen werden können.

In solchen Fällen ist ein besonderes Augenmerk auf die Plausibilisierung der Modellergebnisse zu legen. Einen hohen Stellenwert haben dabei Informationen aus **Feldbegehungen**, Aussagen ortskundiger Personen, Aufzeichnungen historischer Ereignisse (z. B. Videos, Fotodokumentationen, Hochwassermarken etc.), Regionalisierungen, vorhandene Studien und Veröffentlichungen sowie landesweite bzw. regionale Fachinformationen (z. B. von Behörden oder Fachinstitutionen). Tabelle 11 listet Beispiele für hilfreiche Informationen auf, die zur Plausibilisierung der Modellergebnisse herangezogen werden können.

Tabelle 11: Mögliche Auswertungen und Datensätze für die Plausibilisierung der Ergebnisse der Abflussbildung.

Abflussbeiwerte	Es ist sinnvoll, die berechneten Ereignisabflussbeiwerte mit Auswertungen von Pegelaufzeichnungen hydrologisch ähnlicher Einzugsgebiete in der Region sowie mit bestehenden Studien und Gutachten (z. B. Merz et al. 2006) zu vergleichen. Des Weiteren wird empfohlen, im Zuge der Begehungen Oberflächenabflussbeiwerte stichprobenartig abzuschätzen (siehe z. B. Markart et al. 2006 oder Seibert und Auerwald 2020).
Hüllkurvenansätze	Hüllkurvenansätze können zur Einordnung der Ergebnisse hilfreich sein. Ein Beispiel dafür ist die Hüllkurve nach Wundt (1949), die mit dem häufig verwendeten Gebietsfaktor von 13,8 folgendermaßen lautet:

	$Q = 13,8 \cdot A_E^{0,6}$ <p>Mit dieser Formel kann der Spitzenabfluss Q in m^3/s abgeschätzt werden, wenn die Einzugsgebietsgröße A_E in km^2 eingesetzt wird.</p>
Hydrologische Gutachten	<p>Für zahlreiche Einzugsgebiete können im Niederösterreich Atlas (https://atlas.noel.gv.at) hydrologische Gutachten (Abflussgutachten) abgerufen werden. Auf Anfrage kann der hydrographische Dienst des Amts der Niederösterreichischen Landesregierung für weitere Gebiete hydrologische Gutachten zur Verfügung stellen.</p>

6.3.5. Zusammenfassende Empfehlungen – Abflussbildungsansätze

Box 5: Abflussbildung (hydrologische Modellierung).

- Die Berechnung der effektiven Niederschläge ist grundsätzlich mit dem HydroBOD Modell durchzuführen.
- Die Berechnung der effektiven Niederschläge ist unabhängig vom gewählten Abflussbildungsansatz auf Zeitschrittbasis durchzuführen.
- Die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung sind jedenfalls auf Plausibilität zu prüfen.
- Sollten es spezifische Projektanforderungen erfordern oder in anderen begründeten Fällen, können auch alternative Abflussbildungsansätze wie das CN- oder das Green-Ampt-Verfahren eingesetzt werden.
- Eine Kalibrierung und Validierung der hydrologischen Modellparameter anhand von Aufzeichnungen historischer Überflutungsereignisse ist anzustreben.

7. Berücksichtigung von Gewässern

7.1. Problemstellung

Die integrale Bewertung von pluvialen Überflutungen und fluvialen Hochwassern oder eine eindeutige Trennung dieser beiden Abflussprozesse ist nicht immer möglich (DWA 2023). Erfahrungen aus der Modellierung pluvialer Abflussprozesse zeigen, dass die Integration von Gewässern in die Modelle mit unterschiedlichen Herausforderungen verbunden ist. Gründe hierfür sind:

- Das Ergebnis der pluvialen Modellierung sollte nicht im Widerspruch zu vorliegenden Abflussuntersuchungen oder Gefahrenzonenplänen stehen.
- Pluviale Überflutungsmodelle basieren meist auf großflächig erfassten Laserscandaten, die in kritischen Bereichen durch terrestrische Vermessungsdaten ergänzt werden. Hingegen sind Gewässer häufig nicht exakt in diesen Laserscandaten abgebildet. Insbesondere gilt das für Bauwerke im oder entlang von Gewässern (Brücken, Durchlässe, Mauern etc.), bei starkem Bewuchs und dem Gelände unterhalb der Wasseroberfläche.
- Entlang von Gewässern kann es zu einer Überschätzung des Abflusses kommen, da die Starkregenmodellierung in der Regel ohne flächenhafte Abminderung des Niederschlags erfolgt. Kritische Bereiche sind hier insbesondere Zusammenflüsse aus verschiedenen Einzugsgebieten.

Diese Faktoren erfordern eine Trennung der Modellierung von pluvialen und fluvialen Prozessen, auch wenn sie in der Natur gleichzeitig auftreten können.

7.2. Mögliche Fälle und empfohlene Vorgehensweise

Die nachfolgend beschriebenen Fälle und Vorgehensweisen stellen eine Entscheidungshilfe für den Umgang mit Gewässern in der Modellierung pluvialer Überflutungen dar.

Es sei darauf hingewiesen, dass von den empfohlenen Vorgehensweisen abgewichen werden kann, wenn entlang eines Gewässers ein besonderer Bedarf für die Ausweisung von Überflutungen aus der Starkregenmodellierung besteht oder andere Sonderfälle auftreten. Sonderfälle sind in Abstimmung mit der Auftraggeberin, der zuständigen Dienststelle des Amtes der niederösterreichischen Landesregierung sowie bei Bedarf mit dem hydrographischen Dienst des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung zu beurteilen. Alle getroffenen Entscheidungen sind im technischen Bericht zu dokumentieren.

Die folgenden beschriebenen Fälle werden in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

Fall 1: Das Gewässer ist im NÖ Atlas (<https://atlas.noe.gv.at>) als Fließgewässer ausgewiesen, eine Abflussuntersuchung (ABU) oder Gefahrenzonenplanung (GZP) liegt vor, oder deren Erstellung ist beabsichtigt:

Das Abflussgeschehen im Gewässer sowie Rückstaueffekte und Ausuferungen aus dem Gewässer werden **nicht** berücksichtigt. Die auftretenden Wassertiefen im Bereich des Gewässers werden nicht dargestellt. Die modelltechnische Umsetzung im 2D Modell kann folgendermaßen erfolgen:

- Artificielle Eintiefung der Gewässersohle um beispielsweise 2 m.
- Entnahme von Wasser entlang der Gewässerachse.
- Falls das Gewässer die Grenze des Modellierungsgebiets bildet, kann das Gebiet entlang der Achse abgeschnitten und eine geeignete Ausflussrandbedingung im Modell gesetzt werden.

Fall 2: Das Gewässer ist im NÖ Atlas (<https://atlas.noe.gv.at>) als Fließgewässer ausgewiesen, es liegt aber keine Abflussuntersuchung (ABU) oder Gefahrenzonenplanung (GZP) vor:

Es muss geprüft werden, ob das Abflussgeschehen im Gewässer im pluvialen Überflutungsmodell berücksichtigt werden soll. Zur Prüfung werden nachfolgend drei Kriterien angegeben. Die angegebenen Grenzwerte sind dabei als Orientierung zu verstehen.

- Einzugsgebietsgröße des Gerinnes: größer als ca. 1 km²
- Abflussspitze bei HQ100: über ca. 10 m³/s
- Konzentrationszeit: übersteigt eine Stunde

Werden die Werte überschritten, so kann das Abflussgeschehen **nicht** mehr eindeutig als pluviales Ereignis bewertet werden. In diesem Fall werden das Abflussgeschehen im Gewässer sowie Rückstaueffekte und Ausuferungen aus dem Gewässer nicht modelliert und die auftretenden Wassertiefen im Bereich des Gewässers nicht dargestellt (siehe **Fall 1** bezüglich der modelltechnischen Umsetzung).

Werden die oben angeführten Grenzwerte der Kriterien nicht überschritten, ist das Gewässer, wie in Kapitel 8.3.3 beschrieben, im Berechnungsnetz zu berücksichtigen.

Die genannten Größen stellen allgemeine Richtwerte dar. Es ist daher erforderlich, in jedem Einzelfall eine gründliche Prüfung vorzunehmen und eine gesonderte Entscheidung zu treffen. Eine unreflektierte Anwendung dieser Richtwerte ohne Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten kann zu falschen Entscheidungen führen.

Fall 3: Ein im NÖ Atlas (<https://atlas.noel.gv.at>) als Fließgewässer ausgewiesenes Gewässer mündet in das Modellierungsgebiet ein:

Das Abflussgeschehen im Gewässer sowie Rückstaueffekte und Ausuferungen aus dem Gewässer werden nicht modelliert und die auftretenden Wassertiefen im Bereich des Gewässers werden nicht dargestellt (siehe Fall 1 bezüglich der modelltechnischen Umsetzung).

Fall 4: Ein konzentrierter Fließpfad, der im NÖ Atlas (<https://atlas.noel.gv.at>) nicht als Fließgewässer ausgewiesen ist, tritt in das Projektgebiet ein:

Das Modellierungsgebiet muss um das Einzugsgebiet des konzentrierten Fließpfads erweitert werden und bildet dadurch eine größere Fläche als das Projektgebiet ab. Wird durch die Erweiterung des Modellierungsbereichs von einer Überschätzung der Zuflüsse im Projektgebiet ausgegangen, wird empfohlen, die Niederschlagseingangsdaten, wie in Regelblatt 220 (ÖWAV 2019) beschrieben, außerhalb des Interessensbereichs abzumindern.

Anmerkungen:

Wenn Gräben, Abflusswege sowie Verrohrungen in Vorfluter einmünden, die im Modell durch eine Eintiefung oder gezielte Wasserentnahme berücksichtigt wurden, wird der in der Natur eventuell auftretende Rückstaueffekt nicht abgebildet. Wenn davon auszugehen ist, dass der Rückstaueffekt einen signifikanten Einfluss auf die berechneten Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten hat, so ist dieser beispielsweise durch das Setzen einer geeigneten Randbedingung am Modellauslass zu berücksichtigen. Die Annahme eines bordvollen Abflusses im Vorfluter ist in vielen Fällen ein plausibles Szenario, von dem in begründeten Fällen (z. B. bei sehr großen Gewässern mit hoher Abflusskapazität, bei denen ein zeitliches Zusammentreffen von Starkregen und fluvialen Hochwasser unwahrscheinlich ist) abgewichen werden kann.

Die Festlegungen sind im technischen Bericht zu dokumentieren!

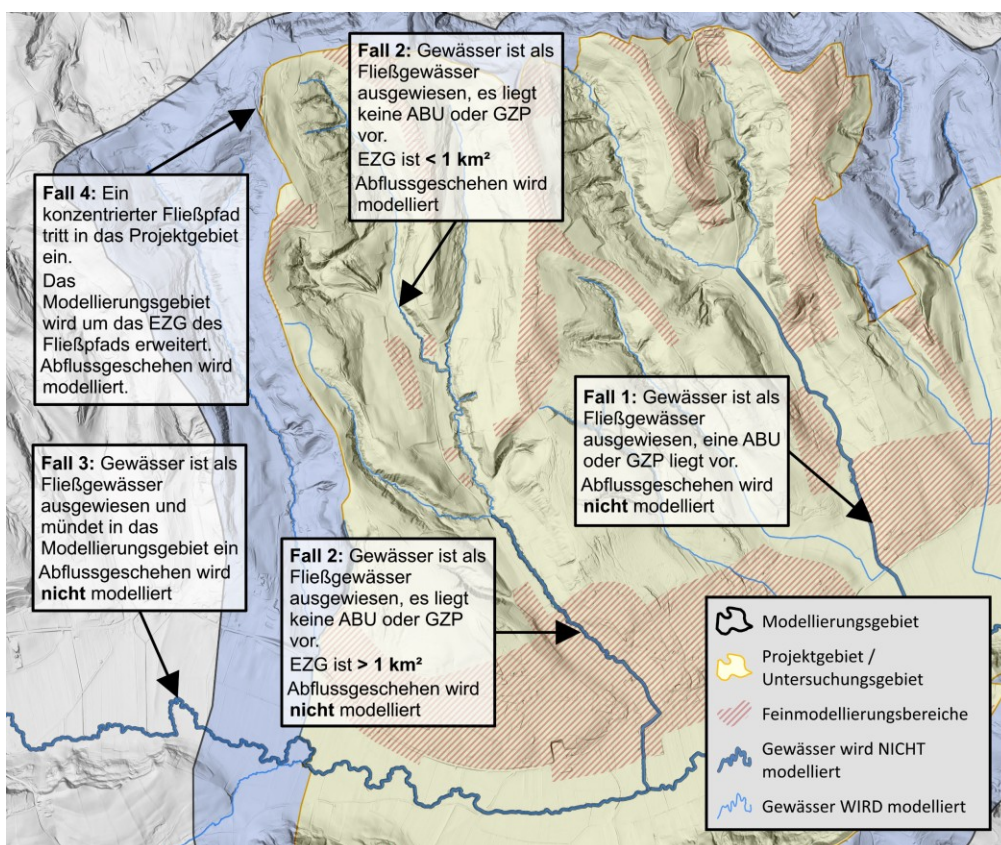


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung unterschiedlicher Fälle der Berücksichtigung von Gewässern (Datengrundlagen <https://geoland.at>, <https://data.gv.at>).

7.3. Zusammenfassende Empfehlungen – Berücksichtigung von Gewässern

Box 6: Berücksichtigung von Gewässern.

- Die Festlegung, wie Gewässer im Projektgebiet bearbeitet werden, hat anhand der vier Standardfälle zu erfolgen. Eine Dokumentation der Entscheidungen im technischen Bericht ist erforderlich.
- Es ist erforderlich, dass die Ergebnisse der pluvialen Modellierung nicht im Widerspruch zu vorliegenden fluvialen Abflussuntersuchungen oder Gefahrenzonenplänen stehen.
- Für die Berücksichtigung der Gewässer sind aus hydrologisch-hydraulischer Sicht plausible Annahmen zu treffen und zu dokumentieren
- Gewässer, die im Modell berücksichtigt werden, sind entsprechend dem Stand der Technik für die fluviale Modellierung abzubilden.
- Je nach Berücksichtigung der Gewässer werden Vergleichsrechnungen mit und ohne eingetieft Gewässer sowie Sensitivitätsrechnungen empfohlen.

8. Zweidimensionale tiefengemittelte pluviale Überflutungsmodellierung

8.1. Einleitung

Es ist Stand der Technik, für die hydraulische Berechnung von pluvialen Überflutungen zweidimensionale (2D) tiefengemittelte hydronumerische Simulationsmodelle einzusetzen.

Im Folgenden werden die Grundlagen der 2D tiefengemittelten hydraulischen Modellierung kurz umrissen. Anhand einiger ausgewählter Beispiele, mit dem Fokus auf die in Österreich gängig benutzten Strömungsmodelle HydroAS und H_Sim-2D, werden Methoden z. B. für die Netzerstellung oder empfohlene Parametereinstellungen erläutert. Im jeweiligen Unterkapitel werden Empfehlungen und Mindeststandards für die 2D Modellierung von pluvialen Überflutungsereignissen definiert.

8.2. Grundlagen der 2D Modellierung und Wahl des Modellierungsansatzes

8.2.1. Zweidimensionale Flachwassergleichungen

Die hydraulische Modellierung der bei Starkregenereignissen räumlich und zeitlich auftretenden Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten wird mittels der numerischen Lösung der zweidimensionalen Flachwassergleichungen (FWG) durchgeführt. Diese Gleichungen werden aus den dreidimensionalen Navier-Stokes Strömungsgleichungen durch die Integration über die Wassertiefe und unter Berücksichtigung der Randbedingungen (z. B. freie Oberfläche) hergeleitet. Dabei werden die über die Wassertiefe gemittelte Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe als räumlich und zeitlich abhängige Variablen eingeführt. Es existieren unterschiedliche Formulierungen dieser partiellen Differentialgleichungen mit diversen Vereinfachungen, die ihre Vor- und Nachteile haben. Die meisten am Markt verfügbaren Modelle (z. B. HydroAS, H_Sim-2D oder Telemac-2D) verwenden die volle Form der 2D Flachwassergleichungen, mit welchen die räumlich und zeitlich verteilten Wassertiefen sowie horizontalen Geschwindigkeitskomponenten berechnet werden können. Die Massenerhaltungsgleichung und die Impulserhaltungsgleichungen können in kompakter Vektor-Form wie folgt geschrieben werden (Tan 1992):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + S = 0$$

$$W = \begin{bmatrix} H \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 - \nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - \nu_t h \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} S_h \\ gh(S_{Rx} - S_{Zx}) \\ gh(S_{Ry} - S_{Zy}) \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} vh \\ uvh - \nu_t h \frac{\partial u}{\partial y} \\ v^2h + 0.5gh^2 - \nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$$

wobei t die Zeit, x, y die Rechts- bzw. Hochkoordinate, g die Erdbeschleunigung, h die Wassertiefe, z die Geländehöhe, $H = (h + z)$ die Wasserspiegelhöhe, u, v die tiefengemittelten Geschwindigkeitskomponenten in x - bzw. in y - Richtung, ν_t die Wirbelviskosität, S_{Zx}, S_{Zy} das Sohlgefälle in x bzw. in y - Richtung ($S_{Zx} = dz/dx$ bzw. $S_{Zy} = dz/dy$), S_{Rx}, S_{Ry} das Reibungsgefälle in x - bzw. in y - Richtung und S_h Quellterme (z. B. Niederschlag, Versickerung oder Einläufe/Austritte von Kanalschächten) sind.

Bei der Herleitung der oben angeführten Flachwassergleichungen aus den Navier-Stokes Gleichungen werden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Die Wassertiefe ist deutlich kleiner als die horizontale Ausdehnung des Wassers.
- Hydrostatische Druckverteilung über die Wassertiefe.
- Die vertikale Geschwindigkeitskomponente ist im Vergleich zu den horizontalen Geschwindigkeitskomponenten sehr viel kleiner.
- Das Sohlgefälle in lokaler Hauptströmungsrichtung ist kleiner als 1:10.

Bei pluvialen Überflutungsmodellierungen kann das Gelände lokal oft höhere Neigungen als 10 % aufweisen, jedoch zeigen die Erfahrungen, dass der dadurch induzierte Fehler in den berechneten Überflutungsflächen vernachlässigbar ist. Unter der Annahme eines gleichförmigen Abflusses (Reibungskräfte in Gleichgewicht mit Gravitation) ist der Fehler in den berechneten Fließgeschwindigkeiten bzw. Wassertiefen proportional zum vorhandenen Neigungswinkel. Z. B. bei einer Hangneigung von 20 % beträgt der Fehler in den Fließgeschwindigkeiten rund 1 % und in den Wassertiefen rund 0,5 %. Bei einer sehr großen Hangneigung von 20°deg (ca. 36 %) beträgt der Fehler in den berechneten Fließgeschwindigkeiten rund 3 % und in den Wassertiefen rund 1,5 %.

Die Turbulenz in der Strömung wird in 2D tiefengemittelten Modellen meistens mittels algebraischer Wirbelviskositätsmodelle berücksichtigt. Beispiele für solche Turbulenzmodelle sind der Ansatz der konstanten Wirbelviskosität, das tiefengemittelte parabolische Viskositätsmodell oder das tiefengemittelte Mischungswegmodell. Bei einigen am Markt erhältlichen 2D Modellen wird die Turbulenz nicht berücksichtigt. 2D Modelle wie z. B. HydroAS oder H_Sim-2D verwenden das tiefengemittelte parabolische Viskositätsmodell in Kombination mit dem Ansatz der konstanten Wirbelviskosität. Bei diesen können in der Regel die Standardeinstellungen

herangezogen werden. Bei 2D Modellen, welche als Standardeinstellung den Ansatz der konstanten Wirbelviskosität verwenden, soll für Hangwasseruntersuchungen die Wirbelviskosität auf den Wert der laminaren kinematischen Viskosität oder auf Null gesetzt werden.

In 2D Modellen, welche eine Form der vereinfachten Flachwassergleichungen lösen, werden für schnellere Rechenzeiten und größere Stabilität die konvektiven bzw. die nichtlinearen Trägheitsterme in den oben angeführten Gleichungen oft vernachlässigt. So wird z. B. beim Ansatz der kinematischen Welle ein Gleichgewicht zwischen Reibungskraft und Gravitation unter Vernachlässigung aller anderen Terme angenommen. Mit der Annahme von gleichförmiger Strömung in jedem Berechnungsknoten können unter anderem lokale Rückstauereffekte nicht berücksichtigt werden. Deshalb sind für die Modellierung pluvialer Überflutungen, z. B. in urbanen Gebieten, Modelle mit vereinfachten Ansätzen nicht zu empfehlen, da diese zu größeren Ungenauigkeiten in der Lösung führen können.

Bei der zeitlichen Diskretisierung der Flachwassergleichungen unterscheidet man im Wesentlichen zwischen zwei Methoden: explizite Zeitintegration und implizite Zeitintegration. Bei der expliziten Zeitintegration, wie sie z. B. im Modell HydroAS implementiert ist, muss das Courant-Friedrichs-Lewy-Kriterium (CFL) mit der maximalen CFL-Zahl gleich 1 eingehalten werden. Die implizite Zeitintegration, wie sie z. B. in den Strömungsmodellen H_Sim-2D oder Telemac-2D implementiert ist, erlaubt CFL-Zahlen größer als 1, weshalb der numerische Zeitschritt größer gewählt und damit die Rechenzeit gegenüber expliziten Zeitschrittverfahren reduziert werden kann.

Die Reibungsterme in den oben beschriebenen Flachwassergleichungen, welche den Fließwiderstand ausdrücken, werden mittels semi-empirischer Widerstandsgesetze berechnet. Diese müssen in der Regel kalibriert werden. Gute Praxis sollte sein, vor allem bei mangelnden Kalibrierungsdaten, eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um die Bandbreite der berechneten Ergebnisse angeben zu können.

8.2.2. Typen von Berechnungsnetzen

Die oben beschriebenen Modellgleichungen werden in der Regel numerisch gelöst. Dafür wird das zu modellierende Gebiet in eine bestimmte Anzahl von diskreten Elementen unterteilt. Unterschiedliche Modelle verwenden für die Abbildung des Untersuchungsgebiets verschiedene räumliche Diskretisierungen bzw. Arten der sogenannten Berechnungsnetze. Manche 2D Modelle führen die Modellierung auf einem regelmäßigen Raster (strukturiertes Netz) durch. Andere Modelle wie z. B. HydroAS, H_Sim-2D oder Telemac-2D verwenden hingegen sogenannte unstrukturierte Netze, bestehend aus drei- und / oder viereckigen Elementen. Einige gängige Netztypen sind in der folgenden Abbildung 12 dargestellt.

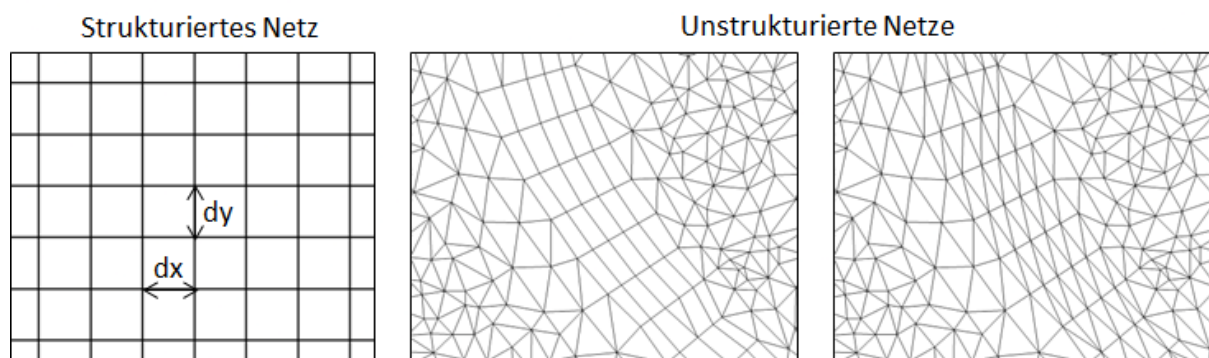


Abbildung 12: Beispiele für unterschiedliche Typen von Berechnungsnetzen.

Der Hauptvorteil eines unstrukturierten Netzes gegenüber einem strukturierten Netz ist, dass es eine sehr flexible Anpassung an diversen Strukturen im zu modellierenden Gebiet wie Gebäude, Gräben-, Deich- und Mauerverläufe erlaubt.

Der Einfluss des gewählten Berechnungsnetzes (strukturiert vs. unstrukturiert) und der Netzauflösung, z. B. auf die Förderfähigkeit eines Gerinnes, wird im folgenden Beispiel illustriert. Es werden vier verschiedene Berechnungsnetze für die räumliche Diskretisierung eines rund 1 m breiten Gerinnes verglichen. Im unstrukturierten Netz wird das Gerinne mit seinen Bruchkanten exakt abgebildet. In den strukturierten Netzen mit Zellgrößen von 0,25 m, 0,50 m und 1,0 m ist das Gerinne jeweils im Winkel von 45°deg zur Rasterausrichtung angeordnet. Die folgende Abbildung 13 zeigt für die vier untersuchten Berechnungsnetze die mit dem jeweiligen Berechnungsnetz diskretisierte Sohle im Querprofil, die jeweiligen Berechnungsnetze mit Geländehöhen im Lageplan sowie eine Tabelle mit den jeweils berechneten bordvollen Abflüssen für die zwei untersuchten Sohlneigungen 1 % und 4 %. Wie in den Ergebnissen und im Schnitt A-A (Abbildung 13) anhand der extrahierten Querprofilhöhen ersichtlich, kann z. B. mit dem 1,0 m Raster das Gerinne geometrisch nicht abgebildet (rote Querprofilinie) und die Förderfähigkeit des Gerinnes keineswegs korrekt erfasst werden. Die Werte für die bordvollen Abflüsse legen dar, dass selbst auf einem 25 cm Raster der Fehler bei der Ermittlung des bordvollen Abflusses im Vergleich zum an die Hauptströmung angepassten unstrukturierten Netz immer noch ca. 25 % beträgt.

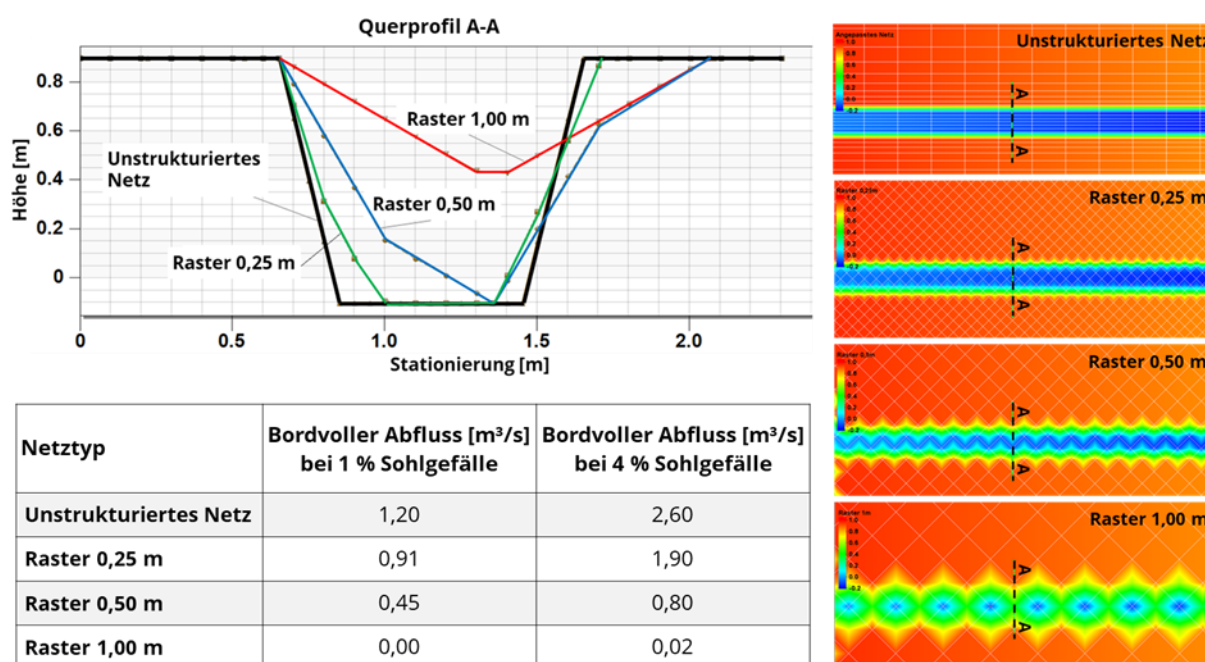


Abbildung 13: Bordvoller Abfluss in einem Gerinne für zwei Sohlgefälle, berechnet auf unterschiedlichen Berechnungsnetzen; links: Querprofilschnitte: schwarze Linie: unstrukturiertes Netz, grüne Linie: 0,25m Raster, blaue Linie: 0,5m Raster, rote Linie: 1m Raster; rechts: Darstellung des jeweiligen Berechnungsnetzes mit Geländehöhen.

Dieses Beispiel zeigt, dass lediglich bei Gerinnen mit einer 5- bis 6-fachen Breite der Rasterzellengröße der Abfluss korrekt berechnet wird. Folglich werden z. B. durch die Verwendung eines 1 m Rasters Gerinne mit Breiten geringer als 2 m bis 4 m geometrisch nur grob fehlerbehaftet bis gar nicht erfasst. Der dadurch bedingte Fehler beim ermittelten Abfluss kann dabei sogar mehrere m³/s betragen, was erhebliche Auswirkungen auf die ermittelte Überflutungsfläche haben kann.

Das Beispiel unterstreicht zum einen die Bedeutung der Verwendung von an die Strukturen angepasste, unstrukturierte Netze und zum anderen, wie wichtig es ist, solche Strukturen im Netz detailliert zu erfassen.

8.2.3. Randbedingungen und Quellterme

Die Flachwassergleichungen benötigen für deren Lösung Anfangs- und Randbedingungen. Bei pluvialen Abflussuntersuchungen wird in der Regel als Anfangsbedingung die Sohle bzw. das Gelände als nicht mit Wasser benetzt, also trocken angenommen.

Bei den Randbedingungen kann man zwischen äußeren und internen Randbedingungen unterscheiden. Die äußeren Randbedingungen sind z. B. ein vorgegebener zeitlich veränderlicher Zufluss in das Modell oder die Modellauslassrandbedingung in Form eines Pegelschlüssels.

Die Strömungsverhältnisse bei Bauwerken, wie Wehrüberfällen, Durchlässen, Brücken etc., können mit den Flachwassergleichungen in der Regel nicht exakt abgebildet werden. Diese Bauwerke müssen deshalb durch interne Randbedingungen parametrisiert werden, z. B. mittels der Wehrüberfallformel nach Poleni oder einer Formel für den Ausfluss unter Druck.

Die gesetzte Modellauslassrandbedingung in Form z. B. eines Pegelschlüssels, einer Energielinienneigung oder der Definition eines freien Ausflusses (Froude-Zahl > 1) ist, wenn diese nicht aus gemessenen bzw. bekannten Daten stammt, in der Regel mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb ist darauf zu achten, dass die Modellauslassrandbedingungen in ihrer Lage so positioniert werden, dass diese keinen künstlichen bzw. ungewollten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse im Interessensgebiet haben.

Der Niederschlag sowie die Versickerung, oder die Definition von Quellen und Senken z. B. für die Kopplung mit einem Kanalnetzmodell, werden mittels des Quellterms S_h in der Massenerhaltungsgleichung berücksichtigt. Dieser ist sowohl zeitlich als auch räumlich variabel, $S_h = f(x, y, t)$. Der Quellterm S_h kann in der Regel entweder direkt im Modell berechnet oder aber über externe Dateien räumlich und zeitlich variabel definiert werden.

8.2.4. Zusammenfassende Empfehlungen – Modellierungsansätze

Box 7: Modellierungsansätze.

- Das 2D Modell muss die vollständigen Flachwassergleichungen (Massenerhaltung und Impulserhaltung) lösen.
- Das 2D Modell muss die Lösung der Flachwassergleichungen auf Basis von unstrukturierten Berechnungsnetzen erlauben.
- Das 2D Modell muss die Möglichkeit zur Berücksichtigung hydraulisch relevanter Strukturen wie z. B. Wehre, Durchlässe, Brücken etc. haben.
- Das 2D Modell muss die zeitlich und räumlich verteilte Zugabe von Niederschlag ermöglichen.
- Das 2D Modell muss als Anfangsbedingung die Annahme einer trockenen Sohle erlauben.
- Es ist zu überprüfen, ob die gewählten Positionierungen der Modellauslassrandbedingungen künstliche bzw. ungewollte Einflüsse auf das berechnete Abflussgeschehen im Interessensgebiet haben.
- Unter Umständen ist die zeitlich und räumlich verteilte Infiltration zu berücksichtigen. Dafür ist ein 2D Modell mit einem Infiltrationsansatz erforderlich.
- Unter Umständen muss das 2D Modell die bidirektionale Kopplung mit einem Kanalnetzmodell erlauben. Der Kopplungsalgorithmus muss validiert sein.

8.3. Erstellung des Berechnungsnetzes

8.3.1. Einleitung

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass Hangwasserabflussmodelle im Vergleich zu Abflussmodellen von Fließgewässern wesentlich sensibler auf die Topografie reagieren bzw. dass selbst relativ kleine Strukturen im Gelände wie kleine Gräben, Straßenborde, Durchlässe etc. großen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben können. Deswegen ist es wichtig, all diese Strukturen genau zu erfassen und korrekt im Modell abzubilden. Es wurde unter anderem von Sauer und Ortlepp (2021) und Feldmann et al. (2023) gezeigt, welchen Einfluss die Elementgröße auf das Ergebnis haben kann und dass eine (starke) Ausdünnung, wie dies bei der Modellierung des Vorlandes von fluvialen Gewässern üblich ist, hier nicht zu empfehlen ist. Generell kann gesagt werden, dass je höher die Auflösung des Berechnungsnetzes ist, desto besser ist die Approximation sowohl an die exakte Lösung der Flachwassergleichungen als auch an das Gelände sowie darin vorhandenen Strukturen. Mit der Verwendung eines hochaufgelösten Berechnungsnetzes können selbst kleine Fließwege (Rinnen) gut erfasst werden, außerdem wird dadurch auch die Wahl der Rauheitswerte erleichtert bzw. man kann sich an den experimentell ermittelten Werten sowie an den Empfehlungen (Kapitel 8.4.2) orientieren.

Die Modellerstellung erfolgt auf Basis der aufbereiteten und geprüften Daten entsprechend dem Kapitel 4 Datengrundlagen. Der erste Schritt ist dabei die Erstellung des Berechnungsnetzes. Mit der räumlichen Diskretisierung des Modellgebiets, d. h. mit dem Berechnungsnetz, werden sowohl das Gelände mit seinen Gegebenheiten als auch Bauwerke sowie sonstige sich im Gebiet befindende Strukturen abgebildet. Mit dem Berechnungsnetz werden anschließend die Rauheiten, Anfangs- und Randbedingungen (z. B. Niederschläge) und andere Modellparameter, die für die Simulation benötigt werden, direkt oder indirekt verknüpft.

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die empfohlene Netzauflösung für die pluviale Überflutungsuntersuchung sowie auf die modelltechnische Berücksichtigung von Gewässern, hydraulisch wirksamen Bauwerken und Strukturen wie Straßen, Dämmen, Mauern und Gebäuden eingegangen. Wie bereits oben angemerkt, wird der Fokus dabei auf die in Österreich gängig benutzten Strömungsmodelle HydroAS und H_Sim-2D gelegt, wobei die angeführten Empfehlungen auch für andere 2D Strömungsmodelle gelten.

8.3.2. Netzauflösung und Netzqualität

Die Wahl der Netzauflösung ist ein entscheidendes Merkmal für die Qualität des Berechnungsergebnisses. Grundsätzlich gilt: je höher die räumliche Auflösung, d. h. je detaillierter das Gelände und die Geländestrukturen aufgenommen und in das Netz integriert sind, desto

realistischer können die Abflusswege des Wassers modelliert werden, bzw. desto genauer ist das Berechnungsergebnis. Es sei hier angemerkt, dass die erforderlichen Qualitätskriterien für die Erstellung des Berechnungsnetzes bzw. die Anforderungen, welche das verwendete 2D Strömungsmodell an die Qualität des Berechnungsnetzes stellt, dem jeweiligen Benutzerhandbuch zu entnehmen sind und diese berücksichtigt werden sollen.

Pluviale Überflutungsmodellierungen basieren üblicherweise auf Vermessungen des Geländes mittels Airborne Laserscan (ALS) Rasterdaten und lokalen terrestrischen Aufnahmen. Die Rasterdaten bilden das Hintergrundnetz und haben aktuell in der Regel eine Auflösung von 0,5 m oder 1,0 m. Im Berechnungsnetz auf Basis der Rasterdaten und terrestrischer Vermessungen sollen alle strömungsrelevante Strukturen, welche in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden, mit einer gewählten Netzauflösung integriert werden, sodass die lokalen Strömungsverhältnisse hydraulisch möglichst korrekt abgebildet werden.

Eine Ausdünnung der Rasterdaten, wie es für fluviale Modellierungen gängige Praxis ist, soll für pluviale Überflutungsmodellierungen, insbesondere in den Feinmodellierungsbereichen, nicht durchgeführt werden, da mit der Ausdünnung eventuell wichtige Geländeinformationen z. B. von kleinen Rinnen oder Straßenborden verloren gehen und dadurch die Abflusswege verfälscht werden können. Sind die Modellierungsgebiete sehr groß, ist gegebenenfalls eine schwache Ausdünnung außerhalb der Feinmodellierungsbereiche zweckmäßig, um die Rechenzeiten zu reduzieren. In diesem Fall wird empfohlen, dass in Ausdünnungsmodellen, wie z. B. in HydroAS Mesh (vormals Laser_AS-2D) oder R_Sim, die eingestellte Höhentoleranz maximal 5 bis 6 cm und der eingestellte Punktabstand für die Bruchkanten maximal 0,5 bis 1,0 m betragen soll, damit relevante Strukturen, wie kleine Rinnen oder Straßenborde, trotzdem noch erfasst werden.

Mit der folgenden Abbildung 14 soll der Einfluss der gewählten Netzauflösung anhand der im Zuge einer Hangwasserstudie berechneten maximalen Wassertiefen exemplarisch verdeutlicht werden. Im linken Ausschnitt wurde für die 2D Modellierung ein stark ausgedünntes Berechnungsnetz mit einer Auflösung von ca. 50.000 Knoten pro km² verwendet. Die Ausdünnung des Rasters wurde dabei entsprechend den üblichen Kriterien für die Abbildung des Vorlandes bei fluvialen Abflussuntersuchungen durchgeführt. Im rechten Ausschnitt sind die berechneten maximalen Wassertiefen auf Basis des nicht-ausgedünnten Berechnungsnetzes (ca. 4 Millionen Knoten pro km²) dargestellt. Wie zu erkennen ist, können mit dem höher aufgelösten Berechnungsnetz die Fließwege im Vergleich zum Berechnungsnetz mit geringerer Auflösung deutlich realistischer simuliert werden. So unterscheiden sich in diesem Beispiel nicht nur die maximal auftretenden Wassertiefen teilweise stark, sondern auch generell die berechneten Überflutungsbereiche.

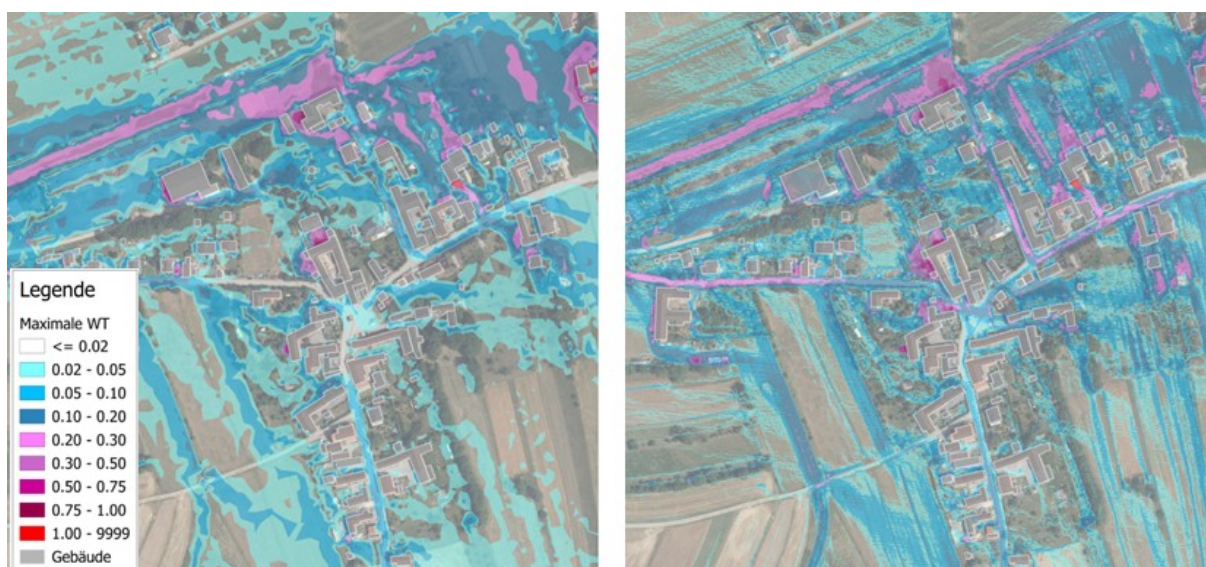


Abbildung 14: Hangwasserstudie, Ausschnitt, berechnete Wassertiefen, links: Netzauflösung 50.000 Knoten/km², rechts: Netzauflösung 4.000.000 Knoten/km².

8.3.3. Gewässer

In diesem Kapitel wird die geometrische Modellierung von Gewässern beschrieben. Der Begriff Gewässer umfasst in diesem Kontext sämtliche abflusswirksame Gerinne (Flüsse, Bäche, Flutmulden, Straßengräben etc.).

Die allgemeine Vorgehensweise bezüglich Gewässer und Kriterien zur Berücksichtigung dieser im Modell sind in Kapitel 7 beschrieben. Es ist zu beachten, dass in den ALS Daten die Wasseroberfläche aus den nächstliegenden Geländepunkten interpoliert wird und nicht die Gewässersohle erfasst ist. Daher ist zu prüfen, ob mit den ALS Daten als Grundlage ein großer Fehler im Bereich der wasserbenetzten Flächen erzeugt wird und eventuell eine terrestrische Vermessung von Gewässerprofilen oder eine Vermessung mittels Grünlichtlaserscans erforderlich ist. Das Berechnungsnetz soll, ähnlich wie bei fluvialen Abflussmodellierungen, an die Gewässerläufe angepasst werden (Abbildung 15). Unabhängig von der Wahl des verwendeten 2D Modells soll bei Gewässern mit Breiten kleiner als 0,5 m die Tiefenlinie mit mindestens einem Berechnungsknoten und bei Breiten zwischen 0,5 m und 1,0 m mit mindestens zwei Knoten in Querrichtung erfasst werden (siehe auch Tabelle 6). Für größere Gewässer soll die Anzahl der Knoten an der Gewässersohle mindestens 6 bis 8 betragen. Generell gilt, je größer das Gewässer, desto mehr Netzknoten sollen verwendet werden. Das Verhältnis vom Knotenabstand in Strömungsrichtung zum Knotenabstand in Querrichtung (Aspektverhältnis) soll 1:1 bis maximal 3:1 betragen. Sowohl die Böschungsoberkanten als auch, sofern vorhanden, die Böschungunterkanten, sollen mittels Bruchkanten lage- und höhenmäßig in das Berechnungsnetz übertragen werden. Die Netzauflösung im Übergangsbereich zwischen

Gewässernetz und Rasternetz soll graduell so erhöht bzw. verringert werden, dass ein lokales Aspektverhältnis von 3:1 eingehalten wird.

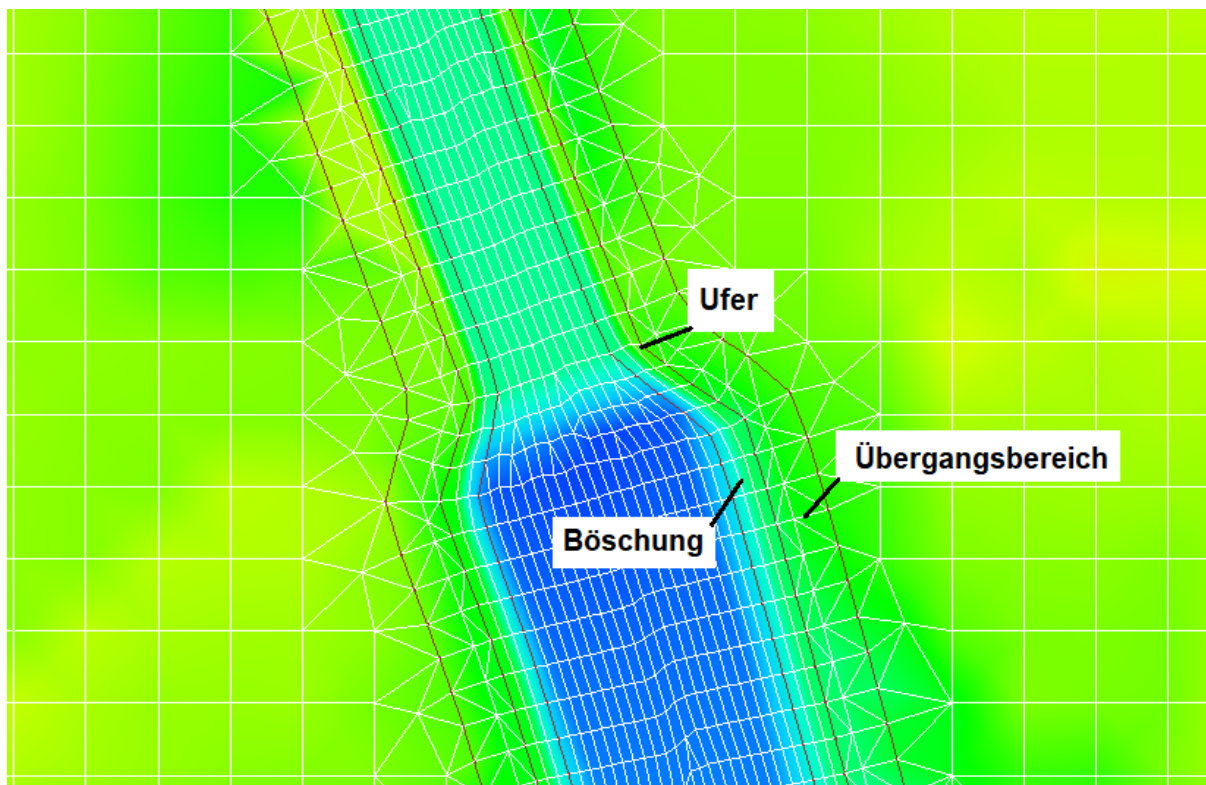


Abbildung 15: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz im Bereich des Gewässers.

8.3.4. Wasserbauliche Anlagen

Der Einfluss von hydraulisch wirksamen Bauwerken wie Wehren, Durchlässen, Brücken und Verdolungen auf das lokale Abflussgeschehen wird in der 2D tiefengemittelten Modellierung in der Regel mittels semi-empirischer Formeln parametrisiert. Die Berücksichtigung dieser Bauwerke im verwendeten 2D Modell bzw. Berechnungsnetz muss anhand des jeweiligen Benutzerhandbuchs erfolgen. Das Berechnungsnetz muss im Bereich des Bauwerks in der Regel angepasst werden. Je nach Größe z. B. eines Durchlasses ist die Anzahl der Zugabe- bzw. Entnahmepunkte oder die Anzahl der Netzknoten so zu definieren, dass eine korrekte Berechnung der Übergaberandbedingung gewährleistet wird. So sind z. B. bei größeren Brückenöffnungen, die zweidimensional modelliert werden, mindestens sechs bis acht Knotenreihen in Querrichtung erforderlich. Die folgende Abbildung 16 zeigt schematisch ein Beispiel der modelltechnischen Berücksichtigung eines Durchlasses in einem Berechnungsnetz für die Anwendung in einer HydroAS oder H_Sim-2D Simulation.

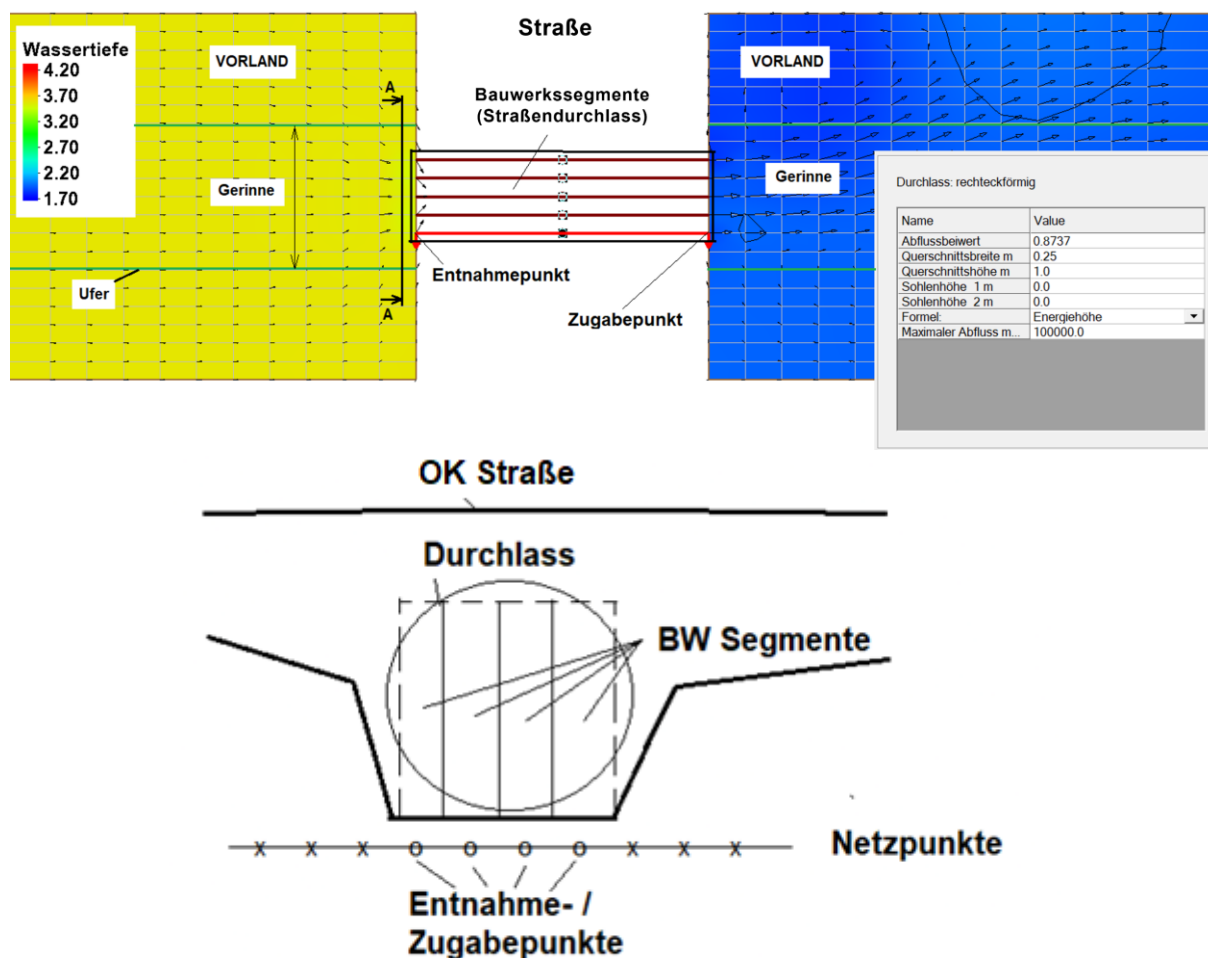


Abbildung 16: Darstellung von Bauwerken im Netz, oben: Draufsicht, unten: Querschnitt A – A.

Es wird empfohlen, durchströmbare Bauwerke ab einer Größe von DN300 im 2D Modell zu berücksichtigen. Verklausungen von Durchlässen und Einlaufschächten sind bei Starkregenereignissen ein häufiges Problem. Als pragmatischer Ansatz wird empfohlen, eine Vergleichsrechnung mit pauschal reduzierter Kapazität aller Durchlässe um z. B. 25 oder 50 % durchzuführen, welche in weiterer Folge je nach Szenario für die Ausweisung verwendet wird. Eine individuelle Bewertung des möglichen Verklausungsgrads von erfahrungsgemäß verklausungsanfälligen Anlagenteilen oder basierend auf Vorortbegehungen kann dabei sinnvoll sein.

Hochwasserschutzanlagen, insbesondere Rückhaltebecken, sind im Berechnungsnetz volumengetreu zu berücksichtigen und eventuell, wenn vorhanden, mit entsprechenden Regelabgaben, zu steuern.

8.3.5. Abflussrelevante Strukturen

Abflussrelevante Strukturen im Modellgebiet, z. B. Dämme, Mauern oder eventuell auch Straßenborde oder Bordsteinkanten, stellen ein Abflusshindernis dar und können die Strömungsrichtung lokal maßgeblich verändern. Dementsprechend sollen diese Strukturen mittels Bruchkanten in der Lage und Höhe im Berechnungsnetz realitätsnah abgebildet werden. Generell wird empfohlen, unabhängig von der Wahl des verwendeten 2D Modells, die Struktur, d. h. die Krone (z. B. Damm- oder Maueroberkante), mit mindestens zwei bis drei Netzknoten in Querrichtung zu diskretisieren. Je breiter die Struktur, desto mehr Netzknoten sollen verwendet werden. Das Verhältnis vom Knotenabstand in Längsrichtung zum Knotenabstand in Querrichtung soll 1:1 bis maximal 3:1 (bei Mauern bis 5:1) betragen. Der Knotenabstand in Längsrichtung sollte annähernd dem Abstand der Netzknoten im betreffenden Bereich entsprechen, damit ein gradueller Übergang zum restlichen Netz gewährleistet wird.

Bei Strukturen mit trapezförmigem Querschnitt, z. B. Dämmen, soll nach Möglichkeit die Böschungsunterkante in das Berechnungsnetz lagemäßig korrekt integriert werden. Bei Strukturen mit senkrechten Wänden, z. B. Mauern, wird empfohlen, dass der horizontale Abstand zwischen Mauerunterkante und Maueroberkante mindestens 10 bis 20 cm beträgt.

Breite Strukturen wie z. B. Straßen oder größere Dämme, welche bereits in den ALS Rasterdaten ausreichend genau erfasst wurden (d. h. mindestens zwei bis drei ALS Punkte auf der Krone in Querrichtung), müssen nicht gesondert in das Berechnungsnetz eingearbeitet werden, sondern können aus dem Raster direkt übernommen werden. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass die Linienführung mittels Bruchkanten erfasst werden soll. Abbildung 17 zeigt schematisch den geometrischen Einbau einer Mauer in das Berechnungsnetz.

Generell wird auch auf die entsprechenden Vorgaben bzw. das Benutzerinnenhandbuch der jeweiligen Softwareprodukte zur modelltechnischen Erfassung von Strukturen verwiesen.

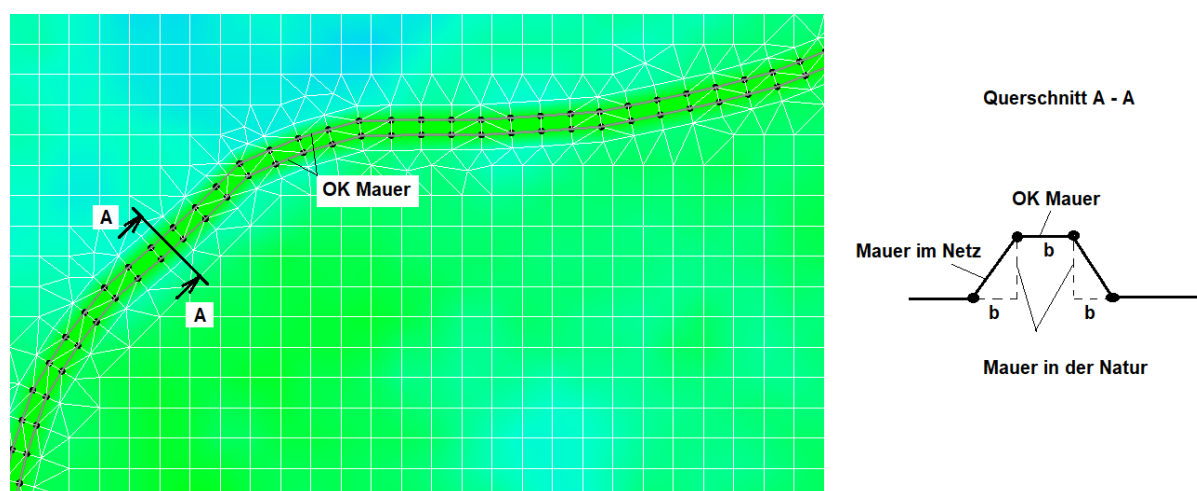


Abbildung 17: Einbau einer Mauer in das Berechnungsnetz.

8.3.6. Gebäude

Gebäude stellen, wie z. B. Dämme und Mauern, ein Abflusshindernis dar und können das lokale Abflussgeschehen bzw. die Abflusswege maßgeblich beeinflussen. Darüber hinaus können Dachflächen von Gebäuden gerade im urbanen Gebiet eine große Rolle für das auftretende Abflussgeschehen spielen. Der Niederschlag auf große Dachflächen, z. B. von großen Hallen oder von vielen kleineren Dachflächen im dicht besiedelten Gebiet, wird unter Umständen direkt in den Regenwasserkanal entwässert. Diese sind aber bei Starkregen und vor allem bei extremen Ereignissen oft überlastet und es kann zu einem Wiederaustritt des Wassers an einem tiefer liegenden Kanalschacht kommen. Deshalb soll bereits am Beginn der Untersuchung unbedingt geklärt werden, ob und wie die Dachflächen bei der Modellierung berücksichtigt werden sollen. Der Abflussanteil von vereinzelt kleineren Gebäuden kann in der Regel vernachlässigt werden.

In der 2D Modellierung kann ein Gebäude oder ein anderes nicht durchströmbares Bauwerk grundsätzlich auf folgende vier Arten berücksichtigt werden:

- Bauwerk als Volumenkörper durch Hochsetzen der interpolierten Geländepunkte am Standort des Gebäudes
- Maskieren bzw. deaktivieren der Netzelemente des Bauwerks (inaktiv setzen)
- Ausstanzen des Bauwerks im Berechnungsnetz
- Zuweisung einer stark erhöhten Rauheit (z. B. Strickler-Rauheitswert von $1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$)

Bei allen vier Arten sind Gebäude bzw. Bauwerke über Bruchkanten im Berechnungsnetz in ihrer Lage exakt abzubilden. Grundlagendaten dafür sind in erster Linie Orthofotos, der Kataster und / oder örtliche Vermessungen. In der modelltechnischen Implementierung sind eventuell durchströmbar Bauwerke (z. B. Carports und Flugdächer), welche oft nur durch **Ortsbegehungen** oder virtuelle Begehungen identifiziert werden können, zu beachten.

Das Ausstanzen des Gebäudes im Berechnungsnetz oder das Maskieren der Netzelemente des Gebäudes bedeutet die Modellierung des Gebäudes als nicht durchströmbares Hindernis. Die Belegung der Gebäudefläche mit einer stark erhöhten Rauheit bedeutet, dass eine, wenn auch nur sehr geringe, Durchströmung stattfinden kann. Mit dieser Methode wird der Abfluss zwischen nahe beieinander liegenden Gebäuden, z. B. im Stadtbereich, nur bedingt realistisch abgebildet, da die Fließgeschwindigkeiten entlang der Gebäudeumrisse stark unterschätzt werden.

Die korrekte Berücksichtigung des Niederschlags auf Gebäudeflächen ist vor allem in stark besiedelten Gebieten von Bedeutung, da dieser Niederschlagsanteil in diesem Fall einen nicht unbedeutenden Einfluss auf das Abflussvolumen bzw. die Volumenbilanz haben kann. Für die pluviale Überflutungsmodellierung wird deshalb empfohlen, Gebäude als Volumenkörper abzubilden. Das bedeutet, die Gebäude werden als dreidimensionale Blöcke im Berechnungsnetz abgebildet, sind nicht durchströmbar und von den Dächern der Gebäude kann der auftretende Niederschlag auf das umliegende Gelände abfließen. Spezialfälle – beispielsweise, wenn bekannt

ist, dass das Entwässerungssystem eine ausreichende Förderfähigkeit bis in den Regenwasserkanal aufweist – sind gesondert zu betrachten (z. B. bei großen Hallen).

Für die Implementierung eines Gebäudes in das Berechnungsnetz als Volumenkörper wird empfohlen, den Gebäudeumriss aus den Katasterdaten zu definieren und die Gebäudehöhe auf 3 bis 5 m zu setzen. Der horizontale Abstand zwischen Gebäudeunterkante und Gebäudeoberkante soll dabei mindestens 10 bis 20 cm betragen. Abbildung 18 und Abbildung 19 veranschaulichen die Berücksichtigung der Gebäude im Berechnungsnetz als Volumenkörper.

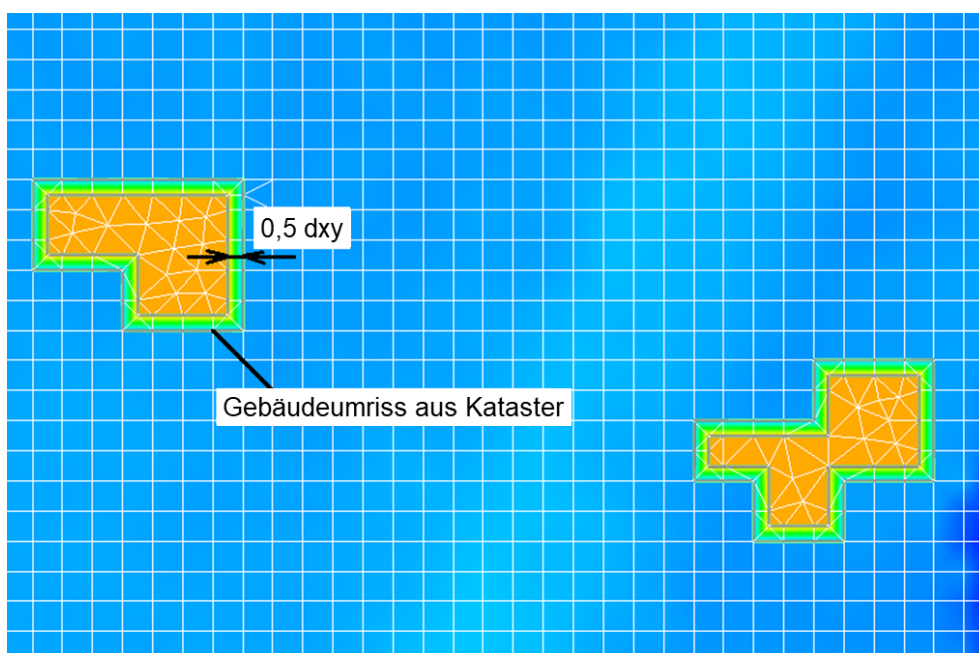


Abbildung 18: Einbau von Gebäude als Volumenkörper in das Berechnungsnetz, Lageplan.

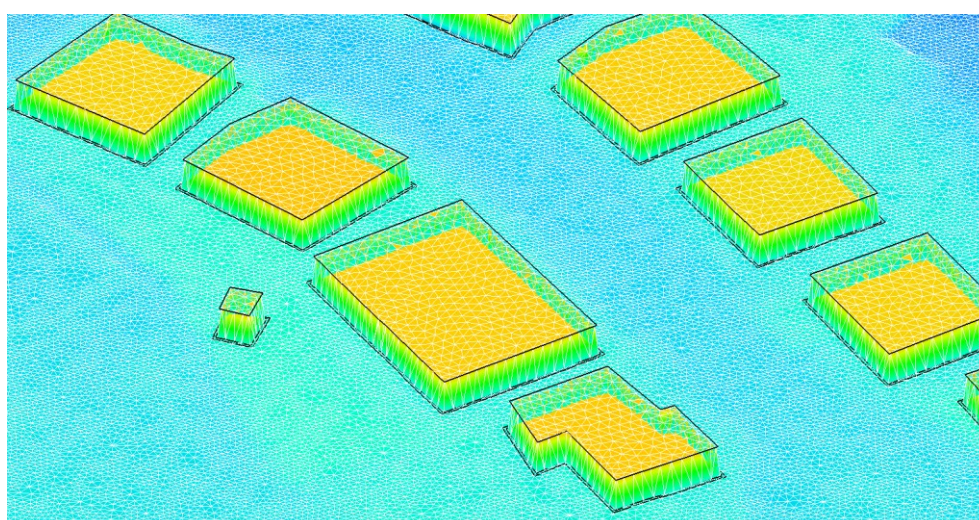


Abbildung 19: 3D Darstellung der Gebäude (Volumenkörper) im Berechnungsnetz.

8.3.7. Zusammenfassende Empfehlungen – Berechnungsnetz

Box 8: Erstellung des Berechnungsnetzes.

- Die Erstellung des Berechnungsnetzes hat sich nach den geforderten Qualitätskriterien entsprechend dem jeweiligen Benutzerhandbuch des 2D Modells zu richten.
- Für die Erstellung des Hintergrundnetzes müssen Rasterdaten mit einer maximalen Auflösung von 0,5 m verwendet werden. Ist die Auflösung der zur Verfügung gestellten Rasterdaten geringer, z. B. 1 m, so sind diese zu verwenden.
- In Feinmodellierungsbereichen dürfen die Rasterdaten nicht ausgedünnt werden.
- Wenn Rasterdaten außerhalb der Feinmodellierungsbereiche ausgedünnt werden, darf in den Ausdünnungsmodellen die Höhentoleranz maximal 5 – 6 cm und der Punktabstand für die Bruchkanten maximal 0,5 bis 1,0 m betragen.
- Gebäudeflächen sind lagerichtig im Berechnungsnetz abzubilden.
- Durchströmbare Bauwerke, wie z. B. Durchlässe oder Verdolungen, ab einer Größe von DN300, sind im Berechnungsnetz und modelltechnisch mittels interner Randbedingungen zu erfassen.
- Besonders wichtige Durchlässe, z. B. größere Ableitungen durch Siedlungen, sind detailliert zu betrachten und die ermittelte Durchflussleistung zu prüfen.
- Wasserbauliche Anlagen, wie Wehre oder Brücken, sind im Berechnungsnetz und modelltechnisch mittels interner Randbedingungen zu erfassen und zu berücksichtigen.
- Abflussrelevante Strukturen wie z. B. Mauern und Deiche müssen lage- und höhenmäßig im Berechnungsnetz abgebildet werden.
- Es wird empfohlen, Gebäude als Volumenkörper abzubilden, d. h. als Blöcke im Modell abzubilden, die nicht durchströmbare sind und von denen das Wasser von den Dächern auf das umliegende Gelände abfließen kann.
- Für die Modellierung der Dachflächenentwässerung, z. B. bei großen Hallen, kann es sinnvoll sein, diese über einen gezielten Abzug des Dachflächenwassers aus dem Modell zu berücksichtigen.

8.4. Berücksichtigung des Fließwiderstands

8.4.1. Fließwiderstandsansätze (Rauheitsansätze)

Die Quantifizierung des Fließwiderstandes, also jener Kraft, die einer sich bewegenden Flüssigkeit entgegenwirkt, ist eine wichtige Aufgabe in der wasserbaulichen Praxis und der hydronumerischen Modellierung. Fließwiderstände ergeben sich aufgrund von Wandreibungen, topographischen Irregularitäten, Vegetation, Gebäuden etc. In der wasserbaulichen Praxis existieren eine Vielzahl von semi-empirischen Fließwiderstandsformeln, die einen Zusammenhang zwischen den Fließwiderständen und den hydraulischen Größen (Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe) herstellen. Beispiele dafür sind die Fließformel nach Darcy-Weisbach mit dem Parameter der äquivalenten Sandrauheit, die Fließformel nach Chezy mit dem Parameter des Chezy-Rauheitswerts oder die Fließformel nach Gauckler, Manning und Strickler mit dem Parameter des Strickler-Rauheitswerts oder des Manning-Rauheitswerts.

In mitteleuropäischen Ländern wird für die Berücksichtigung der Oberflächenrauheit wohl meistens der Strickler-Rauheitswert nach der Fließformel von Gauckler, Manning und Strickler herangezogen. In der Literatur findet man zahlreiche Referenzen für die Wahl der Strickler-Rauheit als Funktion der Korngröße des Sohlsubstrats im Gerinne oder der Landnutzung, z. B. Acker, Wiese, Wald. Darüber hinaus sind Untersuchungen hinsichtlich des physikalischen Mechanismus von verschiedenen Vegetationsarten (z. B. kleine, große, dicke, dünne Bäume, dichter und dünner Bewuchs, Saisonalität usw.) auf den Einfluss der resultierenden Reibungskräfte und deren modelltechnische Umsetzung mittels semi-empirischer Formeln in hydronumerischen Modellen aktuelle Forschungsthemen.

Studien haben gezeigt, dass bei geringen Verhältnissen zwischen Wassertiefe und Rauheit des Sohlsubstrats das logarithmische Geschwindigkeitsprofil in Wandnähe nicht mehr gültig ist und die Oberflächenrauheit von der Wassertiefe abhängt, siehe z. B. Limerinos (1970), Bezzola (2002), Ferguson (2010) und Oberle et al. (2021). Bei der Modellierung des Hochwasserabflussgeschehens in Flüssen ist das Verhältnis zwischen Wassertiefe und Rauheit in der Regel sehr groß, d. h. es muss in der Regel kein wassertiefenabhängiger Rauheitswert angewendet werden. Wie verschiedene Experimente bzw. Veröffentlichungen zeigen, ist hingegen bei der Modellierung von Starkregenereignissen mit flächig geringen Überflutungstiefen der Ansatz der wassertiefenabhängigen Oberflächenrauheit notwendig, um den auftretenden Oberflächenabfluss physikalisch korrekter zu erfassen, siehe z. B. Barros und Colello (2001), Rai et al. (2010), Oberle et al. (2021). Die folgende Abbildung 20 aus Oberle et al. (2021) zeigt exemplarisch den aus Laborversuchsergebnissen ermittelten Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Strickler-Rauheit beim Abfluss auf Kunstrasen bei sehr geringen Wassertiefen.

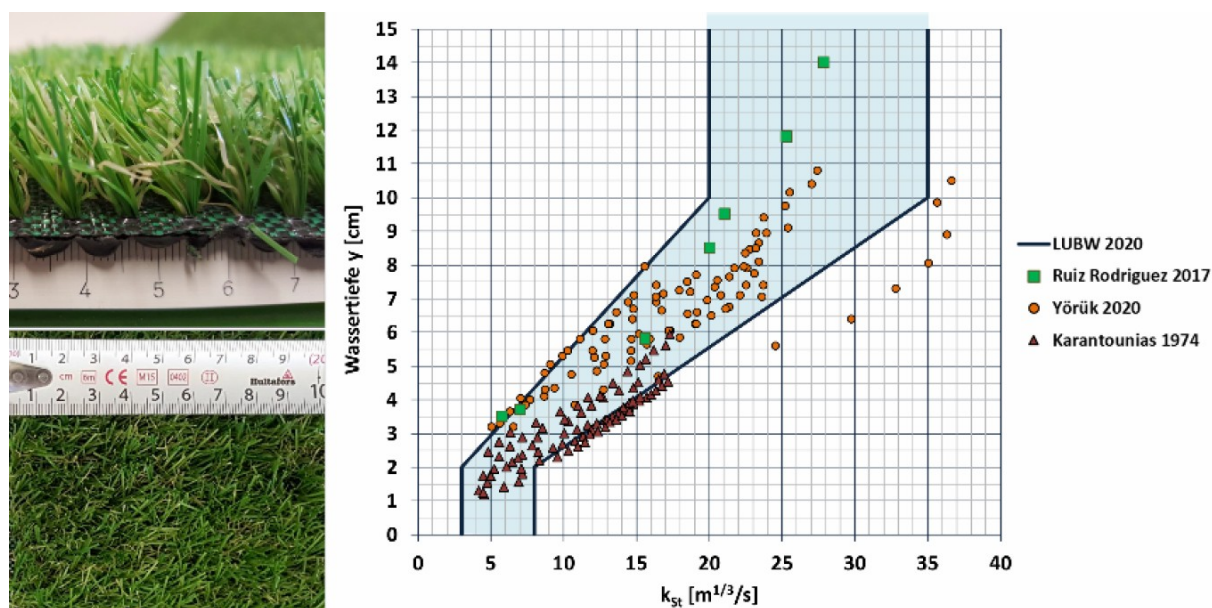


Abbildung 20: Homogener Kunstraseneinsatz im Laborversuch (links) und Ergebnisse ausgewählter Laboruntersuchungen zum (Dünnschicht-) Abfluss auf Kunstrasen und Festlegung eines tiefenabhängigen Wertebereichs für den Rauheitswert k_{st} (aus Oberle et al. 2021).

8.4.2. Wahl der Rauheiten

Für die 2D Modellierung pluvialer Überflutungen wird empfohlen, wassertiefenabhängige Rauheitswerte vor allem für Landnutzungen wie Gras, Wiesen, Agrarflächen und Wald zu verwenden. Für Gewässer, Betonflächen, Dachflächen, Straßen oder Parkplätze können konstante, d. h. wassertiefenunabhängige, Rauheitswerte angenommen werden.

Auf Basis von aktuellen Forschungsarbeiten sind in der folgenden Tabelle 12, adaptiert nach LUBW (2020), Empfehlungen für die Wahl der wassertiefenabhängigen Rauheiten für den Berechnungsansatz nach der Fließformel von Gauckler, Manning und Strickler (k_{st} -Werte), in Abhängigkeit unterschiedlicher Landnutzungsarten, angeführt. Wie in Rodriguez und Guthörl (2021), wird in Bezug auf Tabelle 12 für die Anwendung der wassertiefenabhängigen Strickler-Rauheitswerte folgende Grenzziehung vorgeschlagen:

- Bis zu einer Wassertiefe von 2 cm wird der Strickler-Rauheitswert für „Dünnschicht“ Abfluss verwendet.
- Ab einer Wassertiefe von 10 cm wird der Strickler-Rauheitswert in der letzten Spalte herangezogen. Diese Werte entsprechen auch den in der Literatur angegebenen gängigen Rauheitswerten.
- Zwischen Wassertiefen von 2 cm und 10 cm werden die Rauheitswerte linear interpoliert.

Tabelle 12: Empfehlungen für wassertiefenabhängige Rauheitswerte nach Gauckler-Manning-Strickler (k_{st} -Werte) zur Modellierung von Starkregen (basierend auf LUBW 2020, adaptiert).

Landnutzung	Rauheit nach Gauckler-Manning-Strickler k_{st} in $m^{1/3}/s$	
	Wassertiefe Dünnfilm bis 2 cm	Wassertiefe ab 10 cm
Ackerland	10	22
Ackerland, verschlämmt	13	27
Gartenland	4	10
Wald, Gehölz, Laub- und Nadelholz	4	12
Grünland	8	27
Rasen	6	27
Siedlungsfläche	10	15
Dachflächen	55	
Fließgewässer, stehendes Gewässer	15 – 35	
Fließgewässer, verschlammmt	25 – 50	
Fließgewässer, stark bewachsen	5 – 50	
Wildbach	10 – 15	
Gerinne, gemauert, Beton	50	
Landwirtschaftlicher Weg (Kies, Schotter)	30	
Straße, Weg (Asphalt)	50	
Straße, Weg (gepflastert)	40	

Die in Tabelle 12 angeführten Rauheitswerte dienen als Orientierung für die Bearbeitung von pluvialen Überflutungsmodellierungen, jedoch ersetzen sie nicht die per se notwendige Kalibrierung eines 2D Modells. Messdaten z. B. in Form von flächig gemessenen Wassertiefen von pluvialen Überflutungsereignissen für eine mögliche Kalibrierung sind meistens nicht vorhanden. Des Weiteren sind die Oberflächenrauheiten unter anderem saisonal und auch von der Landbewirtschaftung abhängig. Deshalb wird empfohlen, eine Sensitivitätsanalyse mit Variation der Rauheitswerte durchzuführen, um die Bandbreite der berechneten Ergebnisse abzuschätzen.

8.4.3. Zusammenfassende Empfehlungen – Wahl der Rauheiten

Box 9: Wahl der Rauheiten.

- Es ist erforderlich, landnutzungs- und wassertiefenabhängige Rauheiten zu verwenden.
- Wenn keine Kalibrierung des Modells möglich ist, sind plausible landnutzungs- und wassertiefenabhängige Rauheitswerte k_{st} anzusetzen und es ist eine Sensitivitätsanalyse mittels Variation der Strickler-Rauheitswerte k_{st} im Bereich von $k_{st} + 15\%$ und $k_{st} - 15\%$ durchzuführen.
- Es wird empfohlen, auch wenn eine Modellkalibrierung durchgeführt werden kann, eine Sensitivitätsanalyse für ein maßgebendes Berechnungsszenario durchzuführen, mit Variation der Strickler-Rauheitswerte k_{st} im Bereich von $k_{st} + 20\%$ und $k_{st} - 20\%$.
- Die Berücksichtigung der Saisonalität der Landnutzung (Bewuchs, Ackeranbau etc.) kann sinnvoll sein.

8.5. Berücksichtigung der Regenwasserkanalisation

Eine teilweise Ableitung des Niederschlags in die Regenwasserkanalisation (RWK) kann je nach Charakteristik des Projektgebiets einen maßgeblichen Einfluss auf die mit dem 2D Modell berechneten Überflutungen haben.

Oftmals ist die Datenlage hinsichtlich modellierungstauglicher Regenwasserkanaldaten unzureichend. Zudem sind derzeit nur wenige 2D Oberflächenabflussmodelle am Markt, welche eine zutreffende bidirektionale Kopplung mit einem 1D Kanalnetzmodell erlauben bzw. ist die Kompatibilität zwischen 1D Kanalnetzmodellen und 2D Oberflächenabflussmodellen häufig eingeschränkt. Dennoch wird empfohlen, im Zuge der Projektbearbeitung den Einfluss der Regenwasserkanalisation auf das Abflussgeschehen an der Oberfläche zu prüfen und gegebenenfalls diese anhand der in der nachfolgenden Tabelle 13 angegebenen Methoden zu berücksichtigen.

Tabelle 13: Methodenauswahl für die Berücksichtigung der Entwässerung in den Regenwasserkanal.

	Keine Berücksichtigung	Modellierung einzelner Ableitungen (plus Einlaufschächte)	Flächenhafte Abminderung des Niederschlags (DWA 2016) ^(a)	Bidirektionale Kopplung 2D Modell mit 1D Kanalnetz
Streusiedlung	X			
Kleine Siedlung mit Einzugsgebiet hangaufwärts, Einfluss der RWK nicht wesentlich		X		
Kleine Siedlung mit Einzugsgebiet hangabwärts, Einfluss der RWK gegeben			X	
Dicht verbautes bzw. urbanes Gebiet, Einfluss der RWK gegeben				X

^(a)Der Ansatz der flächenhaften Abminderung des Niederschlags bezieht sich auf DWA (2016) und sieht vor, in Gebieten mit Regenwasserkanalisation die Niederschlagshöhe entsprechend der Bemessungsjährlichkeit bzw. der Niederschlagsspende (z. B. $120 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$) zu reduzieren.

8.6. Simulationszeit

Als Richtwert für die Simulationszeit kann angegeben werden: Simulationszeit = Niederschlagsdauer + 1 Stunde Nachlaufzeit. Für die Nachlaufzeit sind Werte von mindestens einer Stunde üblich. Diese kann, je nach Modellgebietsgröße, aber auch mehrere Stunden betragen. Jedenfalls ist die Simulationsdauer so zu definieren, dass in jedem Berechnungsknoten im Modellierungsgebiet zumindest der Wellenscheitel bzw. die größte Wassertiefe erreicht wird.

8.7. Ergebnisausgabe

Berechnungsergebnisse, insbesondere Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten, sollen aufgrund der bei Starkregenereignissen auftretenden hochstationären Abflussprozesse in einem Ausgabeintervall von maximal 5 Minuten ausgegeben werden.

An geeigneten oder erforderlichen Positionen im Modellgebiet sollen Kontrollquerschnitte für die Ausgabe des Durchflusses definiert werden. Die Abflüsse an Kontrollquerschnitten und Modellauslässen sollen in einem Ausgabeintervall von 30 bis 60 Sekunden ausgegeben werden.

8.8. Plausibilitätsprüfung der zweidimensionalen Überflutungsmodellierung

Die Berechnungsergebnisse der simulierten Szenarien sollen, vor allem in dicht besiedelten Bereichen, detailliert auf ihre Plausibilität geprüft werden. Im Allgemeinen gilt: falls die Ergebnisse als unplausibel erscheinen, sollen entsprechende Korrekturen vorgenommen werden, um plausible Simulationsergebnisse zu erreichen.

Die nachfolgenden Fragestellungen sind im Zuge der Plausibilitätsprüfung zu beantworten:

- Sind die effektiven Niederschläge plausibel (falls direkt vom 2D Modell berechnet, Plausibilisierung laut Kapitel 6.3.4)?
- Sind die Strömungsgeschwindigkeiten und die Wassertiefen plausibel?
- Sind die Abflüsse an Ausläufen und Kontrollquerschnitten plausibel?
- Sind die Abflüsse an Bauwerken (Wehre, Durchlässe etc.) plausibel? Gegebenenfalls händisch, anhand Formeln nachrechnen.
- Gibt es unnatürliche Oszillationen in der Lösung bzw. in den berechneten zeitlich veränderlichen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (Instabilitäten)? Wenn diese unrealistisch erscheinen, müssen Maßnahmen zur Beseitigung vorgenommen werden.

8.8.1. Berechnete maximale Wassertiefen

Als Ergebnis werden, wie z. B. in den 2D Modellen HydroAS und H_Sim-2D standardmäßig, auch die auf Zeitschrittbasis berechneten maximalen Wassertiefen oder Wasserspiegellagen während des Ereignisses ausgegeben. Diese Werte sollen mit den Wassertiefen (Wasserspiegellagen), die bei verschiedenen Zeitpunkten ausgegeben wurden, nahe des Maximums, verglichen werden. Falls Wellen oder Oszillationen in der Lösung vorhanden sind, können zwischen den beiden Werten größere Differenzen entstehen. In diesem Fall dürfen die maximalen Werte für die Darstellung

nicht herangezogen werden und das 2D Modell ist auf eventuelle Probleme hinsichtlich des Berechnungsnetzes oder der globalen Einstellungen zu prüfen und zu korrigieren.

8.8.2. Volumen- und Abflussbilanzierung

Im 2D Modell ist es erforderlich, Kontroll- und Auslaufquerschnitte vorzusehen, anhand derer eine Bilanzierung des Oberflächenabflusses durchzuführen ist. Wie in LUBW (2020) beschrieben, sind die Positionen der Kontrollquerschnitte wie nachfolgend angeführt und in Zusammenarbeit mit der Auftraggeberin festzulegen. Es ist empfehlenswert, eine Vorsimulation durchzuführen, um die Hauptabflusswege vor der Festlegung der Lage der Kontrollquerschnitte ersichtlich zu machen. Jedenfalls ist es erforderlich, nach dem Einbau hydraulisch relevanter Strukturen die Lage der Kontrollquerschnitte zu überprüfen, um sicherzustellen, dass sich der jeweilige Kontrollquerschnitt über die gesamte Breite des Abflussweges erstreckt und die erforderlichen Qualitätskriterien für die Positionierung eines Kontrollquerschnittes eingehalten werden.

Es ist notwendig, an folgenden Positionen im 2D Modell Kontrollquerschnitte zu definieren (in Anlehnung an LUBW 2020):

- Mehrfach entlang von Hauptabflusswegen, aber jedenfalls unmittelbar vor dem Eintritt in Siedlungsbereiche oder an relevanten Stellen in Siedlungsbereichen. Die Auswertung von mehreren Kontrollquerschnitten entlang von ein und demselben Fließweg ermöglicht die Analyse der instationären Abflussprozesse.
- Mehrfach entlang von Gewässern, wenn diese modelliert und nicht eingetieft werden bzw. Wasser entlang der Gewässerachse entnommen wird.
- An Zusammenflüssen von Gewässern bzw. relevanten Fließwegen (jeweils kurz vor und nach dem Zusammenfluss).
- An potenziellen Standorten von Maßnahmen zum Schutz vor pluvialen Überflutungen (Rückhaltebecken, Dämme, Durchlässe etc.).

Es ist notwendig, folgende Qualitätskriterien bei der Definition von Kontrollquerschnitten einzuhalten:

- Geradliniger Verlauf, möglichst im rechten Winkel zur Hauptfließrichtung (Abbildung 21).
- Anordnung in Bereichen, wo die Strömung gleichmäßig verläuft (d. h. Bereiche mit bedeutender Änderung der Wassertiefe / Fließgeschwindigkeit sind generell nicht dafür geeignet) und wo keine Rückströmungen zu erwarten sind.
- Eindeutige Bezeichnung jedes Kontrollquerschnitts, beispielsweise mit einer fortlaufenden Nummer.

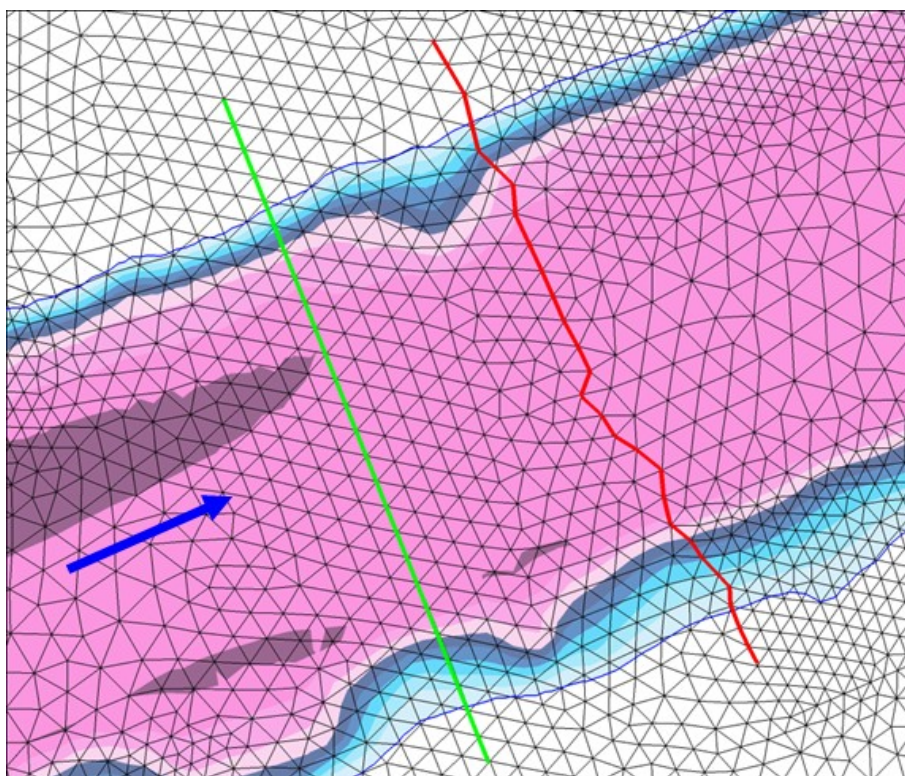


Abbildung 21: Definition eines Kontrollquerschnitts: empfohlener geradliniger Verlauf – rechtwinklig zur Hauptfließrichtung: grüne Linie. Negativbeispiel zur Definition eines Kontrollquerschnitts: rote Linie. Blauer Pfeil: Hauptfließrichtung.

In Abstimmung mit der Auftraggeberin sind ausgewählte Abflusszeitreihen der Kontroll- und Auslaufquerschnitte in tabellarischer Form und / oder als Liniendiagramm abzugeben, wobei die Zuordnung zur Lage des jeweiligen Querschnitts über die laufende Nummer und die Plandarstellung bzw. Beschreibung im technischen Bericht eindeutig möglich sein muss.

Für die händische Kontrolle der im 2D Modell berechneten Volumina gilt: das Gesamtvolumen des effektiven Niederschlags muss der Summe des Volumens der Direktabflussganglinie im Auslaufrand und dem beim letzten Berechnungsschritt auf der Einzugsgebietsfläche befindenden Wasservolumen entsprechen (Restvolumen auf dem Modellierungsgebiet).

8.9. Modellspezifische Empfehlungen

Viele am Markt verfügbare 2D Modelle wie z. B. HydroAS oder H_Sim-2D wenden eine sogenannte **minimale Wassertiefe (h_{\min})** an, um für die numerische Lösung der Flachwassergleichungen die Grenze zwischen trockenem und wasserbenetztem Bereich zu definieren. Bei fluvialen Abflussmodellierungen wird die minimale Wassertiefe häufig auf 1 cm oder noch höher gesetzt. Solch hohe Werte können aber gerade bei pluvialen Überflutungsmodellierungen zu viel Wasservolumen im Gebiet zurückhalten. Deswegen wird empfohlen, die minimale Wassertiefe auf höchstens 1 mm zu setzen: **minimale Wassertiefe: $h_{\min} \leq 1 \text{ mm}$**

Bei 2D Modellen wie z. B. HydroAS oder H_Sim-2D wird manchmal der sogenannte **A_{\min} Parameter (minimale erlaubte Fläche der Kontrollvolumina)** verwendet, um die Rechenzeiten zu verringern. Zu beachten ist dabei, dass mit der Verwendung von zu großen Werten die Kontrollvolumina maßgeblich verfälscht werden können und damit gerade bei instationären Berechnungen das zeitliche Abflussgeschehen nicht korrekt wiedergegeben werden kann. **Die Wahl des A_{\min} -Werts hat gemäß dem jeweiligen Benutzerinnenhandbuch zu erfolgen.**

Bei großen Sohl- bzw. Hangneigungen oder glatter Sohle können hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten, sodass in Modellen wie z. B. HydroAS oder H_Sim-2D der Wert für die **maximale Geschwindigkeit** ausreichend hoch gesetzt werden soll: **maximale Geschwindigkeit: $v_{\max} > 10 \text{ m/s}$**

9. Berechnungsszenarien

Im Rahmen der 2D Modellierung pluvialer Überflutungen ist es erforderlich, drei unterschiedliche Szenarien zu modellieren: ein **häufiges**, ein **seltenes** und ein **extremes** Ereignis. Diese Szenarien basieren auf verschiedenen Niederschlagseingangsdaten und unterschiedlichen Modellparametern, die maßgeblich die Überflutungssituation bestimmen.

Bei der Modellierung pluvialer Überflutungen ist zu beachten, dass die Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags und die daraus resultierende Überflutung nicht mit der Hochwasserjährlichkeit der sich im Einzugsgebiet befindenden Gewässer (fluviale Überflutungen) gleichzusetzen ist (Merz et al. 2006). Aus einem 100-jährlichen Bemessungsniederschlag bzw. Niederschlagsereignis entsteht nicht unbedingt ein 100-jährliches Hochwasser des Gewässers im modellierten Einzugsgebiet. Unter anderem, um Verwechslungen mit der Jährlichkeit fluvialer Hochwasser zu vermeiden, wurden die Bezeichnungen „häufiges“, „seltenes“ und „extremes“ Ereignis gewählt. So wird sichergestellt, dass pluviale Überflutungen als eigenständige Ereignisse betrachtet werden.

Die zu berechnenden Szenarien mit den Kombinationen der Niederschlagseingangsdaten und Modellparameter sind in Tabelle 14 dargestellt. Diese ermöglichen eine differenzierte Bewertung der Überflutungsgefährdung unter verschiedenen Randbedingungen. Ein wichtiger Aspekt bei der Hangwassermodellierung ist dabei die Berücksichtigung von Verklausungen. Durchlässe mit einem Durchmesser von \leq DN 300 (300 mm) werden als verklaust angenommen (modelltechnisch nicht abgebildet), da kleinere Strukturen während Starkregenereignissen besonders anfällig für Verklausungen durch beispielsweise Äste, Blätter oder Ähnliches sind. Jedoch wird empfohlen, in spezifischen Sonderfällen auch Durchlässe \leq DN 300 zu modellieren, wenn bekannt ist, dass diese das kleinräumige Abflussgeschehen signifikant beeinflussen.

Während mit den Ergebnissen des **häufigen** Ereignisses Problemstellen identifiziert werden können, die häufig von Überflutungen betroffen sind und daher besondere Aufmerksamkeit erfordern, können die Ergebnisse des **seltenen** Ereignisses als Grundlage für weiterführende Planungen, etwa in den Bereichen Raumordnung, Bauwesen und Überflutungsschutz, dienen.

Das **extreme** Ereignis dient dazu, darzustellen, wie sich die Überflutungssituation bei derselben Niederschlagsjährlichkeit wie beim seltenen Ereignis darstellt, jedoch unter zusätzlichen ungünstigen Randbedingungen.

Für aussagekräftige Modellierungsergebnisse ist es erforderlich, die Berechnungen der drei Szenarien zumindest mit den drei relevanten Niederschlagsdauerstufen 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2) durchzuführen. Durch deren Überlagerung mittels Maximumbildung werden

die maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten im Einzugsgebiet ermittelt und dargestellt.

Tabelle 14: Erforderliche Kombinationen der Niederschlagseingangsdaten bzw. der Modellparameter zur Abbildung von drei unterschiedlichen pluvialen Überflutungsszenarien.

Szenario	Niederschlag	Modellparameter	Kommentar
Häufiges Ereignis	<p>Wiederkehrzeit: 10 Jahre, Verwendung des aktuell für den Modellierungsbereich gültigen eHYD Bemessungsniederschlags (gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA, Beschreibung siehe Kapitel 6.2) Dauerstufen: 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2)</p>	<p>Boden Vorfeuchtezustand: mittel Durchlässe \leq DN 300 werden im Modell nicht berücksichtigt (werden als verklaust angenommen), außer in spezifischen Sonderfällen.</p>	<p>Es handelt sich um ein Ereignis, das so häufig auftritt, dass es innerhalb einer Generation mehrfach erlebt werden kann. Die Ergebnisse dieses Szenarios dienen der Identifizierung von Problemstellen mit häufigen Überflutungen, welche daher besondere Aufmerksamkeit erfordern.</p>
Seltenes Ereignis	<p>Wiederkehrzeit: 100 Jahre, Verwendung des aktuell für den Modellierungsbereich gültigen eHYD Bemessungsniederschlags (gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA, Beschreibung siehe Kapitel 6.2) Dauerstufen: 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2)</p>	<p>Boden Vorfeuchtezustand: mittel Durchlässe \leq DN 300 werden im Modell nicht berücksichtigt (werden als verklaust angenommen), außer in spezifischen Sonderfällen. Die Querschnittsfläche der Durchlässe $>$ DN 300 ist um 25 % abzumindern. Durchlässe über DN 1000 und Brücken sind gesondert zu beurteilen.</p>	<p>Es handelt sich um ein Ereignis, das üblicherweise nicht von jeder Generation erlebt wird. Die Ergebnisse dieses Szenarios können die Grundlage für weiterführende Planungen, wie Raumplanung, Bauverfahren und Schutzmaßnahmen, darstellen.</p>

<p>Extremes Ereignis</p>	<p>Wiederkehrzeit: 100 Jahre, Verwendung des aktuell für den Modellierungsbereich gültigen eHYD maximierten Modellniederschlags (MaxModN) (Beschreibung siehe Kapitel 6.2) Dauerstufen: 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2)</p>	<p>Boden Vorfeuchtezustand: feucht Durchlässe \leq DN 300 werden als verklaust angenommen (keine Berücksichtigung im Modell). Die Querschnittsfläche der Durchlässe $>$ DN 300 ist um 50 % abzumindern. Durchlässe über DN 1000 und Brücken sind gesondert zu beurteilen.</p>	<p>Es handelt sich um ein Ereignis, das so außergewöhnlich ist, dass die Erinnerung über Generationen nachwirkt. Die Ergebnisse dieses Szenarios zeigen, mit welchen Überflutungen unter ungünstigen Randbedingungen zu rechnen ist, wenn dieselbe Niederschlagsjährlichkeit wie im Szenario „seltenes Ereignis“ zugrunde gelegt wird und dienen vor allem dem Katastrophenschutz.</p>
---------------------------------	---	--	--

Box 10: Berechnungsszenarien.

- Es ist erforderlich, die Berechnungen der drei Szenarien häufig, selten und extrem mit den drei relevanten Niederschlagsdauerstufen 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2) durchzuführen.
- Es ist erforderlich, für jedes der drei Szenarien durch die Überlagerung der Ergebnisse der drei berechneten Dauerstufen die maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten im Einzugsgebiet zu ermitteln (Maximumbildung) und darzustellen.

10. Dokumentation und Darstellungen

10.1. Technischer Bericht

Der technische Bericht dient der nachvollziehbaren Dokumentation der angewandten Vorgehensweisen und der Ergebnisse.

Der technische Bericht soll jedenfalls die folgenden Punkte enthalten:

- Verwendete Datengrundlagen und deren Erhebungsdatum
- Verwendete Programme mit Versionsangabe
- Verwendete Literatur
- Methode der Fließweganalyse
- Abgrenzung des Projektgebiets, Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche
- Dokumentation der Ortsbegehung
- Beschreibung, welche Strukturen terrestrisch vermessen (Datumsangabe) und im Modell berücksichtigt wurden
- Wenn vorhanden: Beschreibung historischer Überflutungsereignisse
- Verwendetes hydrologisches Modell und Methodik der hydrologischen Modellierung (Modellansatz, Jährlichkeiten, Dauerstufen, Niederschlagsverteilungen etc.)
- Festlegungen für die Modellierung wie Berücksichtigung der Gewässer, Berücksichtigung der Regenwasserkanalisation, gegebenenfalls Berücksichtigung der Versickerung in der Nachlaufzeit etc.
- Numerisches Modell und hydraulische Modellierung (Software, eingestellte Parameter, verwendete Rauheiten etc.)
- Beschreibung der Berechnungsszenarien
- Beschreibungen zur Ergebnisdarstellung sowie zur Ausweisung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten
- Angewendete Maßnahmen zur Qualitätssicherung
- Ergebnisse, Abflussganglinien (tabellarisch und / oder als Diagramm)
- Gegebenenfalls: Maßnahmenkatalog
- Protokolle der Besprechungen

10.2. Plandarstellungen

Für die Visualisierung der Ergebnisse sind die in Tabelle 15 gelisteten Karten zu erstellen. Die Karten sind gut lesbar und in einem einheitlichen Layout zu gestalten und im PDF-Format bereitzustellen. Das jeweils dargestellte Berechnungsszenario ist deutlich im Plankopf hervorzuheben.

Tabelle 15: Visualisierung der Modellierungsergebnisse der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für verschiedene Berechnungsszenarien.

<p>Wassertiefenkarten</p>	<p>Für jedes der drei Berechnungsszenarien wird eine separate Wassertiefenkarte erstellt, die flächig und farbig die Modellierungsergebnisse der Wassertiefen darstellt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Häufiges Ereignis • Seltenes Ereignis • Extremes Ereignis <p>Jede Karte zeigt das Maximum der Wassertiefen, gebildet aus den drei berechneten Niederschlagsdauerstufen (siehe Kapitel 6.2.2). Darüber hinaus werden Fließrichtungspfeile in ausgedünnter Form zur Beurteilung der Abflussverhältnisse bzw. Fließwege dargestellt.</p>
<p>Fließgeschwindigkeitskarten</p>	<p>Für jedes der drei Berechnungsszenarien wird eine separate Fließgeschwindigkeitskarte erstellt. Diese Karten stellen die modellierten Fließgeschwindigkeiten flächendeckend und farblich dar, während die Fließrichtungen durch Pfeile visualisiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Häufiges Ereignis • Seltenes Ereignis • Extremes Ereignis <p>Jede Karte zeigt das Maximum der Fließgeschwindigkeiten, gebildet aus den drei berechneten Niederschlagsdauerstufen (siehe Kapitel 6.2.2). Darüber hinaus werden Fließrichtungspfeile in ausgedünnter Form zur Beurteilung der Abflussverhältnisse bzw. Fließwege dargestellt.</p>

Je nach Detaillierungsgrad und Verwendungszweck der Karten sind die in Tabelle 16 genannten Maßstäbe und Papierformate sinnvoll.

Tabelle 16: Sinnvolle Maßstäbe und Papierformate für die Plandarstellungen.

Verwendungszweck	Maßstab	Papierformat
Detaillierte Analysen in Siedlungsgebieten und zur Beurteilung kleinräumiger Strukturen.	1:2.500	A4 Formate werden empfohlen, welche als Mappe (Atlas) gebunden werden.
Übersichtsdarstellung größerer Gebiete und Gemeinden mit Fokus auf übergeordnete hydrologisch-hydraulische Zusammenhänge.	1:5.000	Ein Format größer gleich A0 wird empfohlen.

Je nach Planmaßstab ist der in Tabelle 17 genannte Planinhalt erforderlich. Musterkarten finden sich in Anhang C: Musterkarten

Tabelle 17: Erforderlicher Planinhalt in Abhängigkeit des Planmaßstabs.

Pläne, Maßstab 1:5.000
<ul style="list-style-type: none"> ● Allgemeine Informationen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Modellierungsgebiet ○ Projektgebiet ○ Feinmodellierungsbereiche ○ Verwaltungsgrenzen (Gemeinde, Katastralgemeinde) ● Geländedarstellung: Höhenschichtenlinien und Geländeschummerung (starke Transparenz) ● Wassertiefen ● Fließgeschwindigkeiten ● Fließvektoren: Fließrichtungspfeile zur Orientierung ● Fließwege nach Einzugsgebietsgröße in ha ● Gewässerinformationen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Gewässerrouten mit Gewässernamen ○ Differenzierte Darstellung, abhängig davon in welcher Art das jeweilige Gewässer im Modell berücksichtigt wird ○ Stehende Gewässer ○ Vorhandene Hochwasserausweisungen von Gewässern im Projektgebiet. Darstellung der HQ30 bzw. HQ100 Anschlaglinie ● Hochwasserrückhaltebecken: punktuelle Darstellung

Pläne, Maßstab 1:2.500

Zusätzlich zum Inhalt für Pläne im Maßstab 1:5.000 ist bei Plänen im Maßstab 1:2.500 erforderlich:

- Grundstücksgrenzen mit Grundstücksnummern aus der DKM
- Durchlässe / Verrohrungen / Brücken
- Bauland

Jeder Karte muss eine umfangreiche und klar strukturierte Legende enthalten, die alle dargestellten Elemente und Informationen verständlich erklärt. Ein Beispiel ist in Abbildung 22 dargestellt.

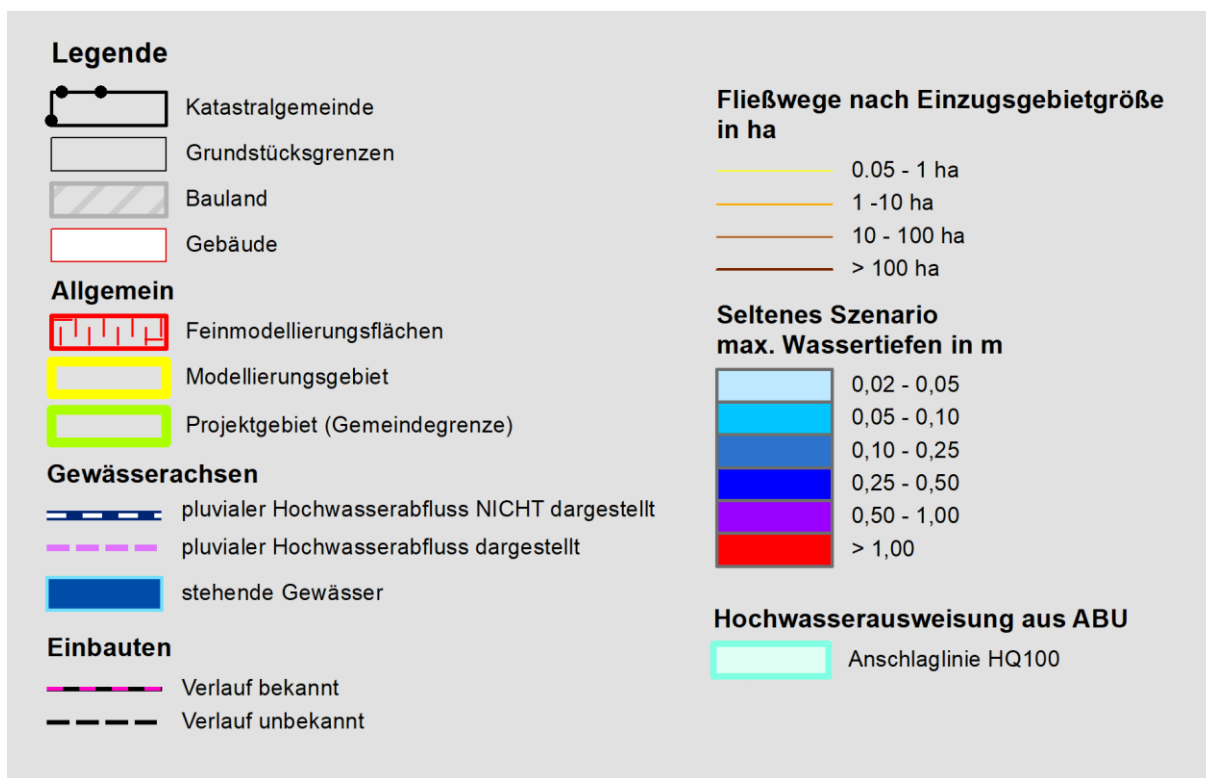


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der Legende eines Wassertiefenplans.

10.3. Digitale Datenlieferung

Die Definitionen in welcher Art GIS Daten und Modelldaten zu übermitteln sind, sind Anhang B: Digitale Datenlieferung zu entnehmen.

11. Zusammenfassung

11.1. Mindeststandards

Das vorliegende Dokument definiert Mindeststandards für die Modellierung und Ausweisung von pluvialen Überflutungen. Ziel ist eine niederösterreichweite Vereinheitlichung der verwendeten Datengrundlagen und Berechnungsansätze, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und eine verlässliche Grundlage für Entscheidungsprozesse zu schaffen.

Im Folgenden sind die in den vorherigen Kapiteln definierten Mindeststandards und Empfehlungen zusammengefasst. Es sei angemerkt, dass wesentliche weiterführende bzw. ergänzende Informationen den vorherigen Kapiteln zu entnehmen sind.

Datenquellen und Datenverarbeitung (Kapitel 4)

- Die Sammlung von Daten aus unterschiedlichen Quellen und deren Prüfung auf Aktualität, Vollständigkeit und Qualität ist erforderlich.
- Datensätze wie beispielsweise Landnutzungs- und Gebäudebestandsdaten sind aus unterschiedlichen Quellen zusammenzuführen und bei Bedarf manuell anzupassen bzw. zu korrigieren.
- Die Erhebung von Informationen über eine gegebenenfalls vorhandene Regenwasserkanalisation ist durchzuführen. Wenn kein umfassendes Wissen über die Anlagen vorhanden ist (z. B. in Form eines digitalen Leitungskatasters oder Lageplänen), sind die kanalisierten Flächen qualitativ abzugrenzen.
- In Bereichen, in denen die topografischen Grundlagendaten nicht mehr aktuell sind, sollten ergänzende Befliegungen von Teilgebieten durchgeführt werden.
- Bei besonders detaillierten Betrachtungen von kleineren Gebieten sowie Modellierung von dicht bebauten Arealen kann die Erstellung von 3D Geländemodellen mit Orthofototexturierung als Grundlage sinnvoll sein.

Festlegung der Modellierungsgebiete und Feinmodellierungsbereiche (Kapitel 5)

- Die Abgrenzung des Projektgebiets, des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche ist im Rahmen eines Vorprojektes oder zu Projektbeginn, in Abstimmung mit der Auftraggeberin, erforderlich.
- Eine nachträgliche Erweiterung von Projektgebiet, Modellierungsgebiet und Feinmodellierungsbereiche ist erforderlich, wenn im Zuge der Plausibilitätsprüfung festgestellt wird, dass relevante Abflusswege im Modell nicht ausreichend erfasst werden.

Niederschlag – hydrologische Modellierung (Kapitel 6.2)

- Es ist erforderlich, den Niederschlag flächig in das 2D Modells einzuspeisen.
- Für die Szenarienberechnungen sind die Regenspendenlinien von eHYD zu verwenden. Abhängig vom jeweiligen Berechnungsszenario (Kapitel 9) sind entweder die Bemessungsniederschlagswerte oder die MaxModN-Werte heranzuziehen.
- Für jedes Berechnungsszenario sind zumindest die Niederschlagsdauerstufen 15, 30 und 60 Minuten zu berücksichtigen.
- Es ist grundsätzlich keine flächige Abminderung der Bemessungsniederschläge zu verwenden.
- Es sind synthetische, zeitliche Niederschlagsverteilungen zu verwenden. Die Wahl der synthetischen Verteilung ist zu begründen.
- In Ausnahmefällen, wie z. B. bei Einzugsgebieten $> 1 \text{ km}^2$ außerhalb der Feinmodellierungsbereiche mit relevanter Abflusswirkung, kann eine flächige Abminderung gerechtfertigt sein (siehe auch Kapitel 7).
- Die Niederschlagswerte der eHYD Gitterpunkte im Bereich des betrachteten Einzugsgebiets sollten analysiert werden. Gegebenenfalls ist das Gebietsmittel aus mehreren Gitterpunkten zu bilden oder der Niederschlag flächendifferenziert anzusetzen.
- In begründeten Fällen kann es erforderlich sein, zusätzlich weitere Niederschlagsdauerstufen zu berücksichtigen.
- Es kann sinnvoll sein, die zeitliche Verteilung beobachteter Niederschlagsereignisse zu analysieren und die synthetische Verteilung dementsprechend zu wählen (ÖWAV 2019).

Abflussbildungsansätze – hydrologische Modellierung (Kapitel 6.3)

- Die Berechnung der effektiven Niederschläge ist grundsätzlich mit dem HydroBOD Modell durchzuführen.
- Die Berechnung der effektiven Niederschläge ist unabhängig vom gewählten Abflussbildungsansatz auf Zeitschrittbasis durchzuführen.
- Die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung sind jedenfalls auf Plausibilität zu prüfen.
- Sollten es spezifische Projektanforderungen erfordern oder in anderen begründeten Fällen, können auch alternative Abflussbildungsansätze wie das CN- oder das Green-Ampt-Verfahren eingesetzt werden.
- Eine Kalibrierung und Validierung der hydrologischen Modellparameter anhand von Aufzeichnungen historischer Überflutungsereignisse ist anzustreben.

Berücksichtigung von Gewässern (Kapitel 7)

- Die Festlegung, wie Gewässer im Projektgebiet bearbeitet werden, hat anhand der vier Standardfälle zu erfolgen. Eine Dokumentation der Entscheidungen im technischen Bericht ist erforderlich.
- Es ist erforderlich, dass die Ergebnisse der pluvialen Modellierung nicht im Widerspruch zu vorliegenden fluvialen Abflussuntersuchungen oder Gefahrenzonenplänen stehen.
- Für die Berücksichtigung der Gewässer sind aus hydrologisch-hydraulischer Sicht plausible Annahmen zu treffen und zu dokumentieren
- Gewässer, die im Modell berücksichtigt werden, sind entsprechend dem Stand der Technik für die fluviale Modellierung abzubilden.
- Je nach Berücksichtigung der Gewässer werden Vergleichsrechnungen mit und ohne eingetiefte Gewässer sowie Sensitivitätsrechnungen empfohlen.

2D Modellierungsansätze (Kapitel 8.2)

- Das 2D Modell muss die vollständigen Flachwassergleichungen (Massenerhaltung und Impulserhaltung) lösen.
- Das 2D Modell muss die Lösung der Flachwassergleichungen auf Basis von unstrukturierten Berechnungsnetzen erlauben.
- Das 2D Modell muss die Möglichkeit zur Berücksichtigung hydraulisch relevanter Strukturen wie z. B. Wehre, Durchlässe, Brücken etc. haben.
- Das 2D Modell muss die zeitlich und räumlich verteilte Zugabe von Niederschlag ermöglichen.

- Das 2D Modell muss als Anfangsbedingung die Annahme einer trockenen Sohle erlauben.
- Es ist zu überprüfen, ob die gewählten Positionierungen der Modellauslassrandbedingungen künstliche bzw. ungewollte Einflüsse auf das berechnete Abflussgeschehen im Interessensgebiet haben.
- Unter Umständen ist die zeitlich und räumlich verteilte Infiltration zu berücksichtigen. Dafür ist ein 2D Modell mit einem Infiltrationsansatz erforderlich.
- Unter Umständen muss das 2D Modell die bidirektionale Kopplung mit einem Kanalnetzmodell erlauben. Der Kopplungsalgorithmus muss validiert sein.

Erstellung des Berechnungsnetzes – 2D Modellierung (Kapitel 8.3)

- Die Erstellung des Berechnungsnetzes hat sich nach den geforderten Qualitätskriterien entsprechend dem jeweiligen Benutzerhandbuch des 2D Modells zu richten.
- Für die Erstellung des Hintergrundnetzes müssen Rasterdaten mit einer maximalen Auflösung von 0,5 m verwendet werden. Ist die Auflösung der zur Verfügung gestellten Rasterdaten geringer, z. B. 1 m, so sind diese zu verwenden.
- In Feinmodellierungsbereichen dürfen die Rasterdaten nicht ausgedünnt werden.
- Wenn Rasterdaten außerhalb der Feinmodellierungsbereiche ausgedünnt werden, darf in den Ausdünnungsmodellen die Höhentoleranz maximal 5 – 6 cm betragen.
- Gebäudeflächen sind lagerichtig im Berechnungsnetz abzubilden.
- Durchströmbare Bauwerke, wie z. B. Durchlässe oder Verdolungen, ab einer Größe von DN300, sind im Berechnungsnetz und modelltechnisch mittels interner Randbedingungen zu erfassen.
- Besonders wichtige Durchlässe, z. B. größere Ableitungen durch Siedlungen, sind detailliert zu betrachten und die ermittelte Durchflussleistung zu prüfen.
- Wasserbauliche Anlagen, wie Wehre oder Brücken, sind im Berechnungsnetz und modelltechnisch mittels interner Randbedingungen zu erfassen und zu berücksichtigen.
- Abflussrelevante Strukturen wie z. B. Mauern und Deiche müssen lage- und höhenmäßig im Berechnungsnetz abgebildet werden.
- Es wird empfohlen, Gebäude als Volumenkörper abzubilden, d. h. als Blöcke im Modell abzubilden, die nicht durchströmbare sind und von denen das Wasser von den Dächern auf das umliegende Gelände abfließen kann.
- Für die Modellierung der Dachflächenentwässerung, z. B. bei großen Hallen, kann es sinnvoll sein, diese über einen gezielten Abzug des Dachflächenwassers aus dem Modell zu berücksichtigen.

Wahl der Rauheiten – 2D Modellierung (Kapitel 8.4)

- Es ist erforderlich, landnutzungs- und wassertiefenabhängige Rauheiten zu verwenden.
- Wenn keine Kalibrierung des Modells möglich ist, sind plausible landnutzungs- und wassertiefenabhängige Rauheitswerte k_{st} anzusetzen und es ist eine Sensitivitätsanalyse mittels Variation der Strickler-Rauheitswerte k_{st} im Bereich von $k_{st} + 15\%$ und $k_{st} - 15\%$ durchzuführen.
- Es wird empfohlen, auch wenn eine Modellkalibrierung durchgeführt werden kann, eine Sensitivitätsanalyse für ein maßgebendes Berechnungsszenario durchzuführen, mit Variation der Strickler-Rauheitswerte k_{st} im Bereich von $k_{st} + 20\%$ und $k_{st} - 20\%$.
- Die Berücksichtigung der Saisonalität der Landnutzung (Bewuchs, Ackeranbau etc.) kann sinnvoll sein.

Berechnungsszenarien (Kapitel 9)

- Es ist erforderlich, die Berechnungen der drei Szenarien häufig, selten und extrem mit den drei relevanten Niederschlagsdauerstufen 15, 30 und 60 Minuten (siehe Kapitel 6.2.2) durchzuführen.
- Es ist erforderlich, für jedes der drei Szenarien durch die Überlagerung der Ergebnisse der drei berechneten Dauerstufen die maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten im Einzugsgebiet zu ermitteln (Maximumbildung) und darzustellen.

11.2. Qualitätssicherung

Die Qualität der Ergebnisse von Hangwassermodellierungen hängt wesentlich von einer systematischen und nachvollziehbaren Vorgehensweise ab. Auch wenn eine Kalibrierung und Validierung der Hangwassermodelle aufgrund fehlender Daten häufig nicht möglich ist, kann durch einen iterativen Modellierungsprozess sichergestellt werden, dass das Modell sorgfältig aufgebaut, sensitivitätsgeprüft und die Ergebnisse plausibilisiert sind. Auf diese Weise lassen sich auch bestehende Unsicherheiten der Modellierung realistisch abschätzen.

Grundsätzlich stellt jedes Modell eine vereinfachte Abbildung der Realität dar. Die zentrale Frage bei der Bewertung eines Modells lautet daher nicht, ob es die „Wirklichkeit“ exakt wiedergibt – was definitionsgemäß nicht möglich ist –, sondern ob seine Genauigkeit ausreicht, um die spezifische Fragestellung beantworten zu können.

Eine belastbare Modellierung setzt die Prüfung der Eingangsdaten – etwa digitales Geländemodell, Landnutzung und Niederschlag – auf Aktualität, Vollständigkeit und Plausibilität voraus. Das hydrologische Modell muss die relevanten Prozesse der Abflussbildung infolge von Starkregen-

ereignissen adäquat abbilden können. Die ermittelten Abflussbeiwerte sind mithilfe von Literaturwerten, empirischen Ansätzen und / oder bestehenden Gutachten auf Plausibilität zu prüfen.

Für die hydraulische Modellierung ist ein 2D-Modell einzusetzen, das dem Stand der Technik entspricht und für die Simulation pluvialer Abflüsse geeignet, dokumentiert und validiert ist. Wird das 2D-Modell mit einem Kanalnetzmodell (1D) gekoppelt, gelten für beide Modellkomponenten sowie für den Kopplungsmechanismus entsprechende Anforderungen.

Darüber hinaus sind modelltechnische Vorgaben – beispielsweise zur Modellgeometrie, zur Berücksichtigung von Gewässern, Bauwerken und abflussrelevanten Strukturen – einzuhalten; Abweichungen sind nachvollziehbar zu begründen. Eine Sensitivitätsanalyse, insbesondere im Hinblick auf Rauheitswerte, wird ausdrücklich empfohlen, um die Bandbreite möglicher Modellreaktionen abzuschätzen.

Die Ergebnisse sind abschließend durch Plausibilitätsprüfungen zu bewerten. Dies schließt auch eine örtliche Kontrolle kritischer Stellen – etwa bei auffälligen Wasserständen im Bereich von Gebäuden – mit ein.

Alle zur Qualitätssicherung erforderlichen Maßnahmen sind in den entsprechenden Kapiteln des vorliegenden Dokuments im Detail beschrieben und bei der Durchführung von Hangwassermodellierungen zu berücksichtigen. Die durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen sind nachvollziehbar und vollständig im technischen Bericht zu dokumentieren.

Literaturverzeichnis

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015), Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?. *Geophysical Research Letters*, 42:1165–1172. <https://doi.org/10.1002/2014GL062588>
- Barros AP, Colello JD (2001), Surface Roughness for Shallow Overland Flow on Crushed stone surfaces. *Journal of Hydraulic Engineering* 127 (1), 38–52. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2001\)127:1\(38\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2001)127:1(38))
- Bezzola G R (2002), Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Band 173 von *Mitteilungen, Hydrologie und Glaziologie* Zürich Versuchsanstalt für Wasserbau, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004288999>
- BML (2022), eHYD - Fachkarte: Bemessungsniederschlag 2020 Erläuterungen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, Wien
- Chimani B, Heinrich G, Hofstätter M, Kerschbaumer M, Kienberger S, Leuprecht A, Lexer A, Peßenteiner S, Poetsch MS, Salzmann M, Spiekermann R, Switanek M, Truhetz H (2016), ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988), *Applied hydrology*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, New York, ISBN 0-07-010810-2
- DWVK (ed) (1999), Hochwasserabflüsse: I. Einsatz von Niederschlag-Abfluß-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen. II. Extreme Hochwasserabflüsse - Möglichkeiten zur Abschätzung und Anwendung. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
- DWA (2023), Integrale Starkregen- und Hochwassergefahrenkarten, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.8, Korrespondenz Abwasser, Abfall, Heft 10, DOI: 10.3242/kae2023.10.001
- DWA (ed) (2012), Arbeitsblatt DWA-A 531 Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Sept. 2012. DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall e.V, Hennef
- DWA (ed) (2016), Merkblatt DWA-M 119 Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, Sept. 2016. DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall e.V, Hennef
- Feldmann D, Laux P, Heckl A, Schindler M, Kunstmann H (2023), Near surface roughness estimation: A parameterization derived from artificial rainfall experiments and two-dimensional hydrodynamic modelling for multiple vegetation coverages. *Journal of Hydrology* 617:128786. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128786>
- Ferguson R (2010), Time to abandon the Manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(15), <https://doi.org/10.1002/esp.2091>
- Formayer H, Fritz A (2017), Temperature dependency of hourly precipitation intensities - surface versus cloud layer temperature. *Int J Climatol* 37:1–10. <https://doi.org/10.1002/joc.4678>

- Fowler HJ, Lenderink G, Prein AF, Westra S, Allan RP, Ban N, Barbero R, Berg P, Blenkinsop S, Do HX, Guerreiro S, Haerter JO, Kendon EJ, Lewis E, Schaer C, Sharma A, Villarini G, Wasko C, Zhang X (2021), Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ* 2:107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- Green WH, Ampt GA (1911) *Studies on Soil Physics, Part 1, the Flow of Air and Water through Soils.* *J Agric Sci* 4:1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Haslinger K, Breinl K, Pavlin L, Pistotnik G, Bertola M, Olefs M, Greilinger M, Schöner W, Blöschl G (2025), Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. *Nature* 639:667–672. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2>
- Hawkins RH, Ward TJ, Woodward DE, Van Mullem JA (2008), *Curve number hydrology: State of the practice.* American Society of Civil Engineers
- Hübl J, Tschanner S, Kyriazis G, Nagl G (2015), *Abflussuntersuchung und Darstellung der Überflutungsflächen in der Region Linz-Urfahr*, IAN Report 163, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
- Lecher K, Lühr H-P, Zanke U (eds) (2021), *Taschenbuch der Wasserwirtschaft: Grundlagen – Maßnahmen – Planungen*, 10. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Limerinos JT (1970), *Determination of Manning's Coefficient for Measured Bed Roughness in Natural Channels.* Water Supply Paper 11898-B, Washington DC, 10.3133/wsp1898B
- LUBW (2020), *Anhänge 1 a,b,c zum Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg.* Stand März 2020. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, ISBN 978-3-88251-391-2
- Maniak U (2016), *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure.* Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49087-7>
- Merz R, Blöschl G, Parajka JD (2006), Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(1), 2-11, <http://hdl.handle.net/20.500.12708/173657>
- Markart G., Kohl B, Sotier B, Schauer T, Bunza G, Stern R (2006), *Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen – Grundzüge und erste Erfahrungen.* ÖWAV-Seminar „Methoden der hydrologischen Regionalisierung“ im Lebensministerium, 18.-19.5.2006, Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer
- NRCS (2009), *Hydrologic soil groups.* National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 7. Natural Resources Conservation Service US Department of Agriculture, Washington
- NRCS (2004), *National engineering handbook: Part 630—hydrology.* Natural Resources Conservation Service USDA Soil Conservation Service: Washington, DC, USA, 11-5
- Oberle P, Kron A, Kerlin T, Rodriguez ER, Nestmann F (2021), *Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandsparametrisierung zur Simulation von Oberflächenabflüssen infolge Starkregen.* Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel.* Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 129-139. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107539>

- ÖWAV (2019), ÖWAV-Regelblatt 220 "Niederschlag-Abfluss-Modellierung", Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien
- Rai RK, Upadhyay A, Singh VP (2010), Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology* 382 (1–4), 115–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.022>
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Miller N (1983), Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering* 109 (1), 62 – 70, 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)
- Rodriguez ER, Guthörl N (2021), Projekt KLIMPRAX Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen, Hinweise zur Berechnung und Erstellung von Starkregengefahrenkarten in Hessen, Wiesbaden
- Sauer A, Ortlepp R (2021), Parameter Uncertainties in Flood Hazard Analysis of Heavy Rain Events. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A Civil Engineering*, March 2021, DOI: 10.1061/AJRUA6.0001125
- Seibert SP, Auerswald K (2020), Hochwasserminderung im ländlichen Raum: Ein Handbuch zur quantitativen Planung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Sotier B, Klebinder K, Bauer T, Markart G, Strauss P (2017), Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreich – HYDROBOD NÖ II, zweite Projektphase: Endbericht inkl. Ergänzungen, Land Niederösterreich und Wildbach und Lawinenverbauung, St. Pölten und Wien
- Smith RE, Parlange JY (1978), A parameter-efficient hydrologic infiltration model, *Water Resources Research*, 14(3), 533–538, DOI:10.1029/WR014i003p00533
- Tan WY (1992), *Shallow Water Hydrodynamics: mathematical Theory and Numerical Solution for a Two-dimensional System of Shallow-water Equations*, Elsevier, Amsterdam
- Woolhiser DA, Smith RE, Goodrich DC (1990), KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- Wundt W (1949), Die größten Abflussspenden in Abhängigkeit von der Fläche. *Die Wasserwirtschaft*, 40:59–64
- ZAMG (13. Februar, 2025), Abweichung des Niederschlags in Österreich von Januar 2024 bis Januar 2025 (gegenüber dem Mittel 1991-2020) [Graph]. In Statista. Zugriff am 07. März 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/886566/umfrage/niederschlagsabweichung-in-oesterreich-nach-monaten/>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pluviale Überflutung (links): Oberflächenabfluss, der durch Starkregen ausgelöst wird; hat in der Entstehung keinen unmittelbaren Bezug zu Gewässern. Fluviale Überflutung (rechts): bezeichnet das über die Ufer treten von Gewässern, wobei beispielsweise Niederschlag oder Schneeschmelze, auch in großer Distanz zum Überflutungsgebiet, Auslöser sein können.....	2
Abbildung 2: Iterative Vorgehensweise für die Hangwassermodellierung.....	10
Abbildung 3: Digitales Geländemodell (DGM) eines Airborne Laserscans (ALS), 0,5 m Auflösung (geoland.at), dargestellt mit Höhenschichtenlinien. Das DGM stellt in der Regel die Grundlage für das Berechnungsnetz dar.	16
Abbildung 4: Punktwolke eines Airborne Laserscans (ALS). Ersichtlich ist ein Schnitt durch eine Betonmauer. Aus der Punktwolke können gegebenenfalls Strukturen in ausreichender Genauigkeit, ohne terrestrische Vermessung, konstruiert werden.	17
Abbildung 5: 3D Modell – links: überlagert mit Orthofotos, rechts: mit Vermaschung und Schummerung als Grundlage für die Modellierung, insbesondere im bebauten Bereich (aus Drohnenbefliegung).	17
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines Gebäudedurchganges (rot umrandet), der laut der digitalen Katastralmappe (DKM) als Gebäude klassifiziert sein könnte, jedoch durchströmbar ist. Solche Gebäudedurchgänge sind im Rahmen von Begehungen zu erfassen und im Berechnungsnetz entsprechend zu berücksichtigen.	18
Abbildung 7: Exemplarische Darstellung des Modellierungsgebiets (schwarz umrandet), des Projektgebiets (gelb umrandet und schraffiert), der Feinmodellierungsbereiche (rot schraffiert) und der Gewässer (blau). Die Einzugsgebiete, die sich außerhalb des Projektgebiets befinden, jedoch zum Abfluss im Projektgebiet beitragen und daher auch modelliert werden, sind blau schraffiert dargestellt (Datengrundlagen: https://geoland.at , https://data.gv.at).	21
Abbildung 8: Eine Auswahl der Einflussfaktoren auf den Oberflächenabfluss ist dargestellt. Die Größe der Pfeile zeigt schematisch das Ausmaß der resultierenden Abflüsse.	26
Abbildung 9: Beispielhafte farbliche Darstellung einer möglichen Verteilung der maßgebenden Dauerstufen innerhalb eines Einzugsgebiets (rot umrandet). Innerhalb des hellblauen Bereichs beträgt die maßgebende Niederschlagsdauerstufe 15 Minuten, im mittelblauen Bereich 30 Minuten, im dunkelblauen Bereich 60 Minuten.	30
Abbildung 10: Synthetische Niederschlagsverteilungen: mögliche Aufteilungen der gesamten Niederschlagsmenge eines Ereignisses für zeitliche Abschnitte als Balken über die gesamte Niederschlagsdauer, sowie die kumulierte Niederschlagsmenge als blaue Linie dargestellt. 32	
Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung unterschiedlicher Fälle der Berücksichtigung von Gewässern (Datengrundlagen https://geoland.at , https://data.gv.at).	44

Abbildung 12: Beispiele für unterschiedliche Typen von Berechnungsnetzen.....	48
Abbildung 13: Bordvoller Abfluss in einem Gerinne für zwei Sohlgefälle, berechnet auf unterschiedlichen Berechnungsnetzen; links: Querprofilschnitte: schwarze Linie: unstrukturiertes Netz, grüne Linie: 0,25m Raster, blaue Linie: 0,5m Raster, rote Linie: 1m Raster; rechts: Darstellung des jeweiligen Berechnungsnetzes mit Geländehöhen.....	49
Abbildung 14: Hangwasserstudie, Ausschnitt, berechnete Wassertiefen, links: Netzauflösung 50.000 Knoten/km ² , rechts: Netzauflösung 4.000.000 Knoten/km ²	53
Abbildung 15: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz im Bereich des Gewässers.	54
Abbildung 16: Darstellung von Bauwerken im Netz, oben: Draufsicht, unten: Querschnitt A – A.	55
Abbildung 17: Einbau einer Mauer in das Berechnungsnetz.	56
Abbildung 18: Einbau von Gebäude als Volumenkörper in das Berechnungsnetz, Lageplan.	58
Abbildung 19: 3D Darstellung der Gebäude (Volumenkörper) im Berechnungsnetz.	58
Abbildung 20: Homogener Kunstraseneinsatz im Laborversuch (links) und Ergebnisse ausgewählter Laboruntersuchungen zum (Dünnschicht-) Abfluss auf Kunstrasen und Festlegung eines tiefenabhängigen Wertebereichs für den Rauheitswert k_{st} (aus Oberle et al. 2021).	61
Abbildung 21: Definition eines Kontrollquerschnitts: empfohlener geradliniger Verlauf – rechtwinklig zur Hauptfließrichtung: grüne Linie. Negativbeispiel zur Definition eines Kontrollquerschnitts: rote Linie. Blauer Pfeil: Hauptfließrichtung.....	67
Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der Legende eines Wassertiefenplans.	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiedliche Methoden zur Analyse der Abfluss- bzw. Überflutungs- und damit Gefährdungssituation durch pluviale Überflutungen.	3
Tabelle 2: Abgrenzungen und Festlegungen, die im Zuge des Vorprojekts zu treffen sind.	8
Tabelle 3: Beschreibung des empfohlenen Projektablaufs für Sachbearbeiterinnen.	11
Tabelle 4: Datengrundlagen für die Modellierung pluvialer Überflutungen.	14
Tabelle 5: Beschreibung des Projektgebiets, des Modellierungsgebiets und der Feinmodellierungsbereiche.....	19
Tabelle 6: Richtwerte und Beispiele zur Erhebung, Vermessung und Berücksichtigung abflussrelevanter Strukturen in den Feinmodellierungsbereichen der 2D-Modellierung.	22
Tabelle 7: Methoden für die Ermittlung der Regenspendenlinien, die auf eHYD.at für jeden Gitterpunkt verfügbar sind.....	27
Tabelle 8: Niederschlagsmenge und Intensität, in Abhängigkeit der Niederschlagsdauerstufe, bei einem Ereignis mit der Wiederkehrzeit von einem Jahr eines eHYD Gitterpunkts.	28
Tabelle 9: Niederschlagsdauerstufen, die für Hangwassermodellierungen zu berücksichtigen sind.	29
Tabelle 10: Vier Typen möglicher synthetischer zeitlicher Niederschlagsverteilungen.	32
Tabelle 11: Mögliche Auswertungen und Datensätze für die Plausibilisierung der Ergebnisse der Abflussbildung.	39
Tabelle 12: Empfehlungen für wassertiefenabhängige Rauheitswerte nach Gauckler-Manning- Strickler (k_{st} -Werte) zur Modellierung von Starkregen (basierend auf LUBW 2020, adaptiert).	62
Tabelle 13: Methodenauswahl für die Berücksichtigung der Entwässerung in den Regenwasserkanal.....	64
Tabelle 14: Erforderliche Kombinationen der Niederschlagseingangsdaten bzw. der Modellparameter zur Abbildung von drei unterschiedlichen pluvialen Überflutungsszenarien.	70
Tabelle 15: Visualisierung der Modellierungsergebnisse der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für verschiedene Berechnungsszenarien.....	73
Tabelle 16: Sinnvolle Maßstäbe und Papierformate für die Plandarstellungen.	74
Tabelle 17: Erforderlicher Planinhalt in Abhängigkeit des Planmaßstabs.	74

Anhang A: Hydrologische Modellierung

Anhang A1: HydroBOD, empfohlene Vorgehensweise

Die hydrologische Modellierung erfolgt in HydroBOD räumlich verteilt auf einem 50 x 50 m Berechnungsraster. Die Abflussbildung wird über eine Wasserbilanz der gesamten Bodensäule auf Basis von bodenhydrologischen Parametern für jede Zelle berechnet. Die Bodensäule wird von oben nach unten in Abhängigkeit der Infiltrations- bzw. Perkolationsleistung durchlaufen und ist in fünf Schichten unterteilt: Infiltrationsschicht, Bodenschicht 1, Bodenschicht 2, Bodenschicht 3 und geologischer Untergrund. Für jede Schicht und jedes Zeitintervall wird der Oberflächenabfluss berechnet und ausgegeben. Versiegelte Flächen werden in HydroBOD, in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad und der Neigung der Oberfläche, über einen festgelegten Abflussbeiwert (zwischen 0,52 und 0,97) berücksichtigt, der am Ende über das Berechnungsergebnis gelegt wird.

Da Informationen zu versiegelten Flächen in HydroBOD lediglich in einer Rasterauflösung von 50 m vorliegen und dies für die Modellierung pluvialer Überflutungen zu grob ist, sind die HydroBOD Berechnungen in einem ersten Schritt ohne Berücksichtigung von versiegelten Flächen durchzuführen. Dies kann durch eine Modifikation des „hybod_sied“ Rasterlayers (alle Rasterwerte werden auf 0 gesetzt), der in den Modelleingangsdaten zu finden ist, erzielt werden. Im Anschluss müssen die HydroBOD Berechnungsergebnisse mit einem höher aufgelösten Landnutzungslayer verschnitten werden. Dabei können den versiegelten Flächen konstante Abflussbeiwerte, wie dies auch im HydroBOD Endbericht (Sotier et al. 2017) beschrieben ist, zugewiesen werden. Alternativ können die konstanten Abflussbeiwerte der versiegelten Flächen unter Anwendung des CN-Verfahrens (die CN-Werte können Tabelle A3 entnommen werden) in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\psi_{konstant} = \frac{N_{eff}}{N} \text{ mit } N_{eff} = \frac{(N - \lambda \cdot S)^2}{N + (1 - \lambda) \cdot S} \text{ und } S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Bei der Modellierung mit HydroBOD ist die Option „zeitliche Ausgabe als Raster“ zu aktivieren. Es wird empfohlen, 15 Zeitintervalle für die 15- und 30-minütige Dauerstufe, entsprechend einem Zeitschritt von 1 bzw. 2 Minuten und 30 Intervalle für die 60-minütige Dauerstufe, entsprechend einem Zeitschritt von 2 Minuten, zu verwenden.

Die restlichen Parameter können üblicherweise auf den Standardeinstellungen belassen werden. Bei der Programmausführung werden von HydroBOD ein Ausgabeordner erstellt und eine Vielzahl von Ergebnissen im Rasterformat ausgespielt. Für die Kopplung mit dem 2D Modell sind die Ausflüsse der einzelnen Modellschichten (Vout_0, Vout_1, Vout_2, Vout_3 und Vout_4) von Relevanz.

Die Ausflüsse werden von HydroBOD kumulativ für jeden Zeitschritt in mm als Raster ausgegeben. Für die Umrechnung auf mm/h, was von vielen gängigen 2D Modellen benötigt wird, müssen die Ausflüsse aus den Speichern summiert, die Differenz gebildet und daraus die effektiven Niederschläge berechnet werden. Abbildung A1 stellt diese Vorgehensweise grafisch dar.

Schritt 1: Summierung der Abflüsse

$$\begin{aligned} \Sigma V_{out, t=1} &= V_{out_0, t=1} + V_{out_1, t=1} + V_{out_2, t=1} + V_{out_3, t=1} + V_{out_4, t=1} \\ \Sigma V_{out, t=2} &= V_{out_0, t=2} + V_{out_1, t=2} + V_{out_2, t=2} + V_{out_3, t=2} + V_{out_4, t=2} \\ &\vdots \\ \Sigma V_{out, t=n} &= V_{out_0, t=n} + V_{out_1, t=n} + V_{out_2, t=n} + V_{out_3, t=n} + V_{out_4, t=n} \end{aligned}$$

Schritt 2: Ermittlung der Niederschlagsintensität

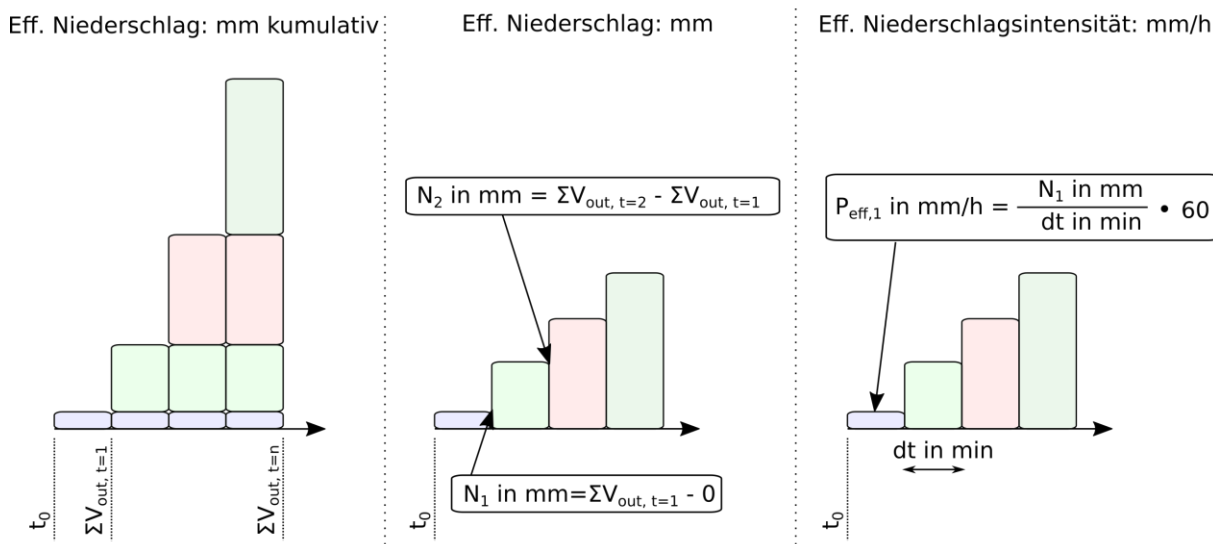


Abbildung A1: Umrechnung der HydroBOD Modellergebnisse in mm/h für die 2D Modellierung. In einem ersten Schritt müssen die Speicherausflüsse für jeden Zeitschritt summiert werden. Auf Basis dessen kann die effektive Niederschlagsintensität in mm/h berechnet werden.

Die effektiven Niederschlagsintensitäten stehen sodann im Rasterformat zur Verfügung und können dem 2D Modell zugeführt werden. Wie oben beschrieben, sind die versiegelten Flächen in der Zugabe der effektiven Niederschläge zu berücksichtigen. Bei der Zugabe in das 2D Modell ist des Weiteren darauf zu achten, wie das jeweilige Modell die Niederschläge einspeist. Informationen dazu können der jeweiligen Softwaredokumentation entnommen werden. Jedenfalls ist die dem Modell zugeführte Niederschlagssumme auszuwerten und den von HydroBOD ausgegebenen Abflussbeiwerten gegenüberzustellen.

Anhang A2: CN-Verfahren, empfohlene Vorgehensweise

Bei der hydrologischen Modellierung mit dem CN-Verfahren sind die in Kapitel 6.3.2 angeführten Grundgleichungen zu verwenden. Es wird empfohlen, die Berechnungen mit einem Anfangsverlust von 5 % ($\lambda = 0,5$) durchzuführen. Bei der Verwendung des CN-Verfahrens ist es jedenfalls notwendig, die Modellierung flächendifferenziert (z. B. Unterteilung in Hydrotupe) und zeitlich variabel durchzuführen. Dabei sind zumindest 15 Zeitintervalle (siehe Kapitel 6.3.1) zu verwenden. Für die Anwendung des CN-Verfahrens ist eine Klassifizierung des Bodens sowie der Landnutzung nötig.

Das CN-Verfahren unterscheidet vier hydrologische Bodengruppen (A bis D), die anhand ihres Versickerungsvermögens bzw. ihrer Abflussbereitschaft klassifiziert sind. Böden der Gruppe A sind stark durchlässig, während Böden der Gruppe D kaum durchlässig sind und zu mehr Oberflächenabfluss führen. Eine Beschreibung der vier Bodengruppen sowie entsprechende Wertebereiche für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit findet sich in Tabelle A1. Die Klassifizierung der Bodengruppen kann auf Basis des HydroBOD Datensatzes sowie der österreichischen Bodenkarte eBOD erfolgen. Falls vorhanden, können auch weitere Datengrundlagen miteinbezogen werden. Bei der Klassifizierung der Böden ist zu bedenken, dass der entstehende Oberflächenabfluss nicht nur eine Funktion vom Infiltrationsüberschuss (die Niederschlagsintensität übersteigt die Leitfähigkeit des Bodens), sondern auch vom Sättigungsüberschuss (z. B. ausgelöst durch Stauprozesse in den oberen Bodenschichten) sein kann. Beim CN-Verfahren können solche Stauprozesse über die Zuweisung der Bodenklasse berücksichtigt werden. So wird im National Engineering Handbook (NEH) des Soil Conservation Service beispielsweise vorgeschlagen, Böden mit seicht liegenden Stauschichten (< 50 cm von der Oberfläche) und Böden mit hohen Grundwasserständen (< 60 cm von der Oberfläche) die Bodengruppe D zuzuweisen (NRCS 2009).

Tabelle A1: SCS-Bodengruppen nach NRCS (2009), Seibert und Auerswald (2020) und Maniak (2016).

SCS-Bodengruppe	Beschreibung
A	Böden dieser Gruppe haben ein geringes Abflusspotenzial auch bei hoher Vorfeuchte. In diese Gruppe fallen vor allem gut drainierte Böden mit hohem Sand und / oder Kiesanteil. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist üblicherweise > 8 mm/h (\cong 192 mm/Tag).
B	Böden dieser Gruppe weisen ein mittleres Versickerungsvermögen auf. In diese Gruppe fallen vor allem mittel- bis tiefgründige Böden mit mittlerer bis guter Drainagierung. Beispielsweise können flache Sandböden oder auch sandige Lehmböden in diese Gruppe fallen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist üblicherweise im Bereich zwischen 4 und 8 mm/h (\cong 96 – 192 mm/Tag).

C	<p>Böden dieser Gruppe weisen ein geringes Versickerungsvermögen bei höherer Vorfeuchte auf. Vor allem lehmige Böden oder Böden mit einer wasserstauenden Schicht können in diese Gruppe fallen.</p> <p>Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist üblicherweise im Bereich zwischen 1 und 4 mm/h (\cong 24 – 96 mm/Tag)</p>
D	<p>Böden dieser Gruppe weisen ein sehr geringes Versickerungsvermögen auf. Vor allem Böden mit sehr hohem Tongehalt, Böden über nahezu undurchlässigem Material und Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel können in diese Gruppe fallen.</p> <p>Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist üblicherweise < 1 mm/h (\cong 24 mm/Tag)</p>

Die Klassifizierung der vorliegenden Bodengruppe kann des Weiteren über die in eBOD verfügbaren Durchlässigkeitsklassen erfolgen. Für die Wahl der SCS-Bodengruppe auf Basis der eBOD-Klassifizierung schlägt Hübl et al. (2015) die in folgender Tabelle A2 angegebenen Zuordnungen vor.

Tabelle A2: eBOD Bodenklassifizierung und die dazugehörige SCS-Bodengruppe nach Hübl et al. (2015).

eBOD-Code	eBOD Beschreibung	SCS-Bodengruppe
0	nicht beschrieben	-
1	sehr gering	D
2	sehr gering bis gering	D
3	gering	C
4	gering bis mäßig	C
5	mäßig	B
6	mäßig bis hoch	B
7	hoch	B
8	hoch bis sehr hoch	A
9	sehr hoch	A

Die für das CN-Verfahren benötigten Kurvennummern können auf Basis der Bodengruppe sowie der Landnutzungsart nach Tabelle A3 bestimmt werden. Die Tabelle weist die Kurvennummern für Anfangsverluste von 20 % aus. Diese Werte müssen, wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben, auf 5 % Anfangsverluste umgerechnet werden.

Tabelle A3: CN-Werte für unterschiedliche Bodengruppen und Landnutzungen nach Seibert und Auerwald (2020), NRCS (2004) und Maniak (2016). Die angeführten Kurvennummern beziehen sich auf Anfangsverluste von 20 % und sind auf 5 % Anfangsverluste umzurechnen.

Landnutzung	A	B	C	D
Offene Wasserflächen und Fließgewässer	100	100	100	100
Parkplätze	98	98	98	98
Straßen				
Straßen in urbanen Gebieten mit zum Beispiel Gehsteigkanten	98	98	98	98
Landesstraßen mit Entwässerungsmulden	83	89	92	93
Schotterstraßen	76	85	89	91
Unbefestigte Straßen (z. B. Forststraßen oder Feldwege)	72	82	87	89
Wald				
Hohe Abflussneigung (nahezu keine Büsche, junge Bäume oder Waldbodenstreu)	45	66	77	83
Mittlere Abflussneigung	36	60	73	79
Niedrige Abflussneigung (hoher Anteil an Büschen, jungen Bäumen oder hoher Anteil an Waldbodenstreu)	30	55	70	77
Obstplantagen	43	65	76	82
Streuobstwiesen	32	58	72	79
Wiesen (gemäht für Heu)	30	58	71	78
Weiden	39	61	74	80
Wein terrassiert	64	73	79	82
Reihenfrüchte^(a)	72	81	88	91
Getreide^(b)	65	76	84	88
Sport-/Golfplätze	39	61	74	80
Friedhöfe	49	69	79	84
Begrüntes Bauland	39	61	74	80
Gebäude	98	98	98	98
Brach liegende Flächen	77	86	91	94
Garten	68	79	86	89
Bahnanlage	76	85	89	91
Deponie	81	88	91	93
Abbauflächen (z. B. Steinbrüche)	77	86	91	94
Werksgelände	81	88	91	93

^(a)Dazu zählen Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Ackerbohnen, Spargel usw. Die angegebenen Werte repräsentieren eine relative hohe Abflussneigung, die bei einer noch nicht vollständig etablierten Vegetation auftreten kann.

^(b)Dazu zählen Weizen, Gerste, Hafer, Roggen, Dinkel usw. Die angegebenen Werte repräsentieren eine relative hohe Abflussneigung, die bei einer noch nicht vollständig etablierten Vegetation auftreten kann.

Basierend auf den Kurvennummern und den in Kapitel 6.3.2 angeführten Gleichungen können die zeitlich verteilten effektiven Niederschlagsintensitäten berechnet werden. Ein Beispiel dafür ist in der nachfolgenden Abbildung A2 gegeben.

Berechnungsbeispiel: CN-Verfahren (siehe z. B. Chow, 1988)

N	100 mm	Niederschlagsmenge
CN _{0,2}	49 -	Kurvennummer (20% Anfangsverluste)
D	60 min	Dauer des Ereignisses
λ-Wert	0.05 -	5% Anfangsverluste
dt	6 min	Berechnungszeitschritt
CN _{0,05}	40.36 -	Angepasster CN-Wert für λ=0,05
S	375.40 mm	Maximal möglicher Gebietsrückhalt
I _a	18.77 mm	Anfangsverluste

Zeit min	Kum. N mm	Kum. I _a mm	Kum. F mm	Kum. N _{eff} mm	N _{eff} Int. dt mm/dt	N _{eff} Int. mm/h
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	10	10.00	0.00	0.00	0.00	0.04
12	20	18.77	1.23	0.00	0.32	3.22
18	30	18.77	10.90	0.33	0.81	8.10
24	40	18.77	20.09	1.14	1.26	12.62
30	50	18.77	28.83	2.40	1.68	16.82
36	60	18.77	37.15	4.08	2.07	20.72
42	70	18.77	45.08	6.15	2.43	24.35
48	80	18.77	52.64	8.59	2.77	27.74
54	90	18.77	59.87	11.36	3.09	30.90
60	100	18.77	66.78	14.45		

Bilanz

Σ F	66.78 mm
Σ N _{eff}	14.45 mm
Σ I _a	18.77 mm
Σ	100.00 mm

Kontrolle N_{eff}

$$N_{eff} = \frac{(N - \lambda \cdot S)^2}{N + (1 - \lambda) \cdot S}$$

Σ N _{eff}	14.45 mm
--------------------	----------

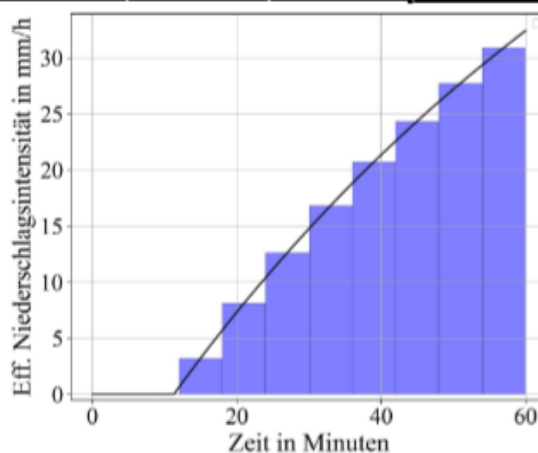


Abbildung A2: Berechnungsbeispiel CN-Verfahren. Die berechneten Werte können über eine Bilanzierung sowie mithilfe der Formel für den effektiven Niederschlag über die Gesamtdauer des Ereignisses überprüft werden.

Anhang A3: Green-Ampt-Verfahren, empfohlene Vorgehensweise

Für die Parametrisierung des Green-Ampt-Modells können die niederösterreichweit zur Verfügung stehenden HydroBOD Daten (Sotier et al. 2017) verwendet werden. Tabelle A4 fasst die für die Anwendung des Green-Ampt-Verfahrens notwendigen Parameter sowie die entsprechenden HydroBOD Datensätze zusammen. Die Tabelle untergliedert sich in Bodenparameter, Anfangsverluste (Interzeption und Muldenrückhalt) sowie den Umgang mit versiegelten Flächen. Es ist jedenfalls erforderlich, auch bei der Anwendung des Green-Ampt-Verfahrens Anfangsverluste sowie die stark reduzierte Infiltrationsleistung versiegelter Flächen zu berücksichtigen.

Tabelle A4: Green-Ampt Modellparameter und dazugehörige HydroBOD Datensätze.

Green-Ampt Parameter	HydroBOD Daten	Beschreibung
Bodenparameter		
Effektive hydraulische Leitfähigkeit K: Einheit: mm/h	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit: hybod_k1, hybod_k2 und hybod_k3 Einheit: mm/d	Für die effektive hydraulische Leitfähigkeit kann die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit herangezogen werden. Es wird empfohlen, die hydraulische Leitfähigkeit um den in HydroBOD implementierten Makroporenfaktor zu modifizieren.
Effektive Porosität θ_e: $\theta_e = n - \theta_r$ Einheit: mm/mm	Gesamtporenvolumen: gpv1_mm, gpv2_mm und gpv3_mm Einheit: mm	Die effektive Porosität, θ_e (alternativ wird hier häufig θ_s verwendet) kann über das Gesamtporenvolumen n und den residualen Wassergehalt θ_r berechnet werden. Der residuale Wassergehalt kann Standardtabellen (z. B. Rawls 1983, Chow 1988) entnommen werden.
Initialer Wassergehalt θ_i: Einheit: mm/mm	Nutzbare Feldkapazität: hybod_s1_nfk, hybod_s2_nfk und hybod_s3_nfk Einheit: mm	Analog zu HydroBOD kann der initiale Wassergehalt in Abhängigkeit der nutzbaren Feldkapazität berechnet werden.
Saugspannung ψ: Einheit: mm	Kapillarer Porenfluss:	Der in HydroBOD vorhandene kapillare Porenfluss kann als effektive

	hybod_g1, hybod_g2 und hybod_g3 Einheit: mm	Saugspannung gesehen und somit für die Berechnung mit Green-Ampt herangezogen werden (Woolhiser et al. 1990, Smith und Parlange 1978).
Anfangsverluste (Interzeption und Muldenrückhalt)		
Interzeptionsverluste Einheit: mm	Interzeptionspeicher: hybod_s0 Einheit: mm	Die Anfangsverluste können beim Green-Ampt-Verfahren beispielsweise durch eine Reduktion des Niederschlags am Beginn des Ereignisses berücksichtigt werden.
Muldenrückhalt Einheit: mm	Neigungsklasse: hybod_slope Einheit: klassifiziert	HydroBOD berücksichtigt bei sehr flachen Neigungen ($\leq 2\%$) einen zusätzlichen Oberflächenspeicher. Die Neigung kann der klassifizierten HydroBOD Karte entnommen werden, wobei Klasse 1 einer Neigung ($\leq 2\%$) entspricht. Für diese Flächen berücksichtigt HydroBOD beispielsweise einen zusätzlichen Speicher von 10 mm, was auch bei der Anwendung des Green-Ampt-Verfahrens sinnvoll sein kann.
Landnutzung (versiegelte Flächen)		
Berücksichtigung von versiegelten Flächen	-	Die versiegelten Flächen ergeben sich aus den Landnutzungsdatensätzen. Für solche Flächen können, wie in Anhang A 1 beschrieben, konstante Abflussbeiwerte angesetzt werden. Alternativ können versiegelte Flächen auch über eine geringe hydraulische Leitfähigkeit berücksichtigt werden.

HydroBOD bildet die Bodensäule in mehreren vertikalen Schichten ab, wohingegen Green-Ampt-Ansätze in gängigen 2D Modellen häufig nur die Verwendung einer homogenen Bodenschicht erlauben. Bei solchen Implementierungen des Green-Ampt-Ansatzes muss daher die in den HydroBOD Daten enthaltene Bodenschichtenheterogenität angemessen berücksichtigt werden. Für die Modellierung der Infiltration sollen jene Bodenschichten herangezogen werden, die maßgeblich die Entstehung des Oberflächenabflusses bei Starkregenereignissen beeinflussen (z. B. Staueffekte von tieferen Schichten). Für diese Bodenschichten sind sinnvolle effektive Parameter, die den Abflussbildungsprozess bei Starkregenereignissen beschreiben, zu wählen.

Einen wichtigen Aufschluss gibt auch die in HydroBOD zur Verfügung stehende speicherwirksame Bodenmächtigkeit.

Anhang B: Digitale Datenlieferung

Anhang B1: Modelle und Ergebnisdatensätze

Nachfolgende Tabelle fasst die Form der Lieferung der Modelle und Ergebnisdateien zusammen.

Szenario	Pfad	Inhalt	Inhalt Info.txt
Häufiges Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\haeufig\15min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Häufiges Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\haeufig\30min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Häufiges Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\haeufig\60min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Seltenes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\selten\15min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Seltenes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\selten\30min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Seltenes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\selten\60min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Extremes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\extrem\15min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Extremes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\extrem\30min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe
Extremes Ereignis	...\Projekt-Bez\Modelle\extrem\60min	Modelldatei, Ergebnisdateien, Info.txt	Modell, Version, Szenario, Dauerstufe

Anhang B2: GIS-Projekt und Planzeichnungen

Die Geodatenätze sind in einer vorgegeben Ordnerstruktur und verknüpft in einem GIS-Projekt mit der Bezeichnung „projektnamen_gebiet_jahr.aprx /qgs“, welches mit ArcGIS Pro oder QGIS geöffnet werden kann, zu übermitteln. Die einzelnen Layer sind je nach Anforderung als GeoTIFF oder Shape-Dateien zu speichern.

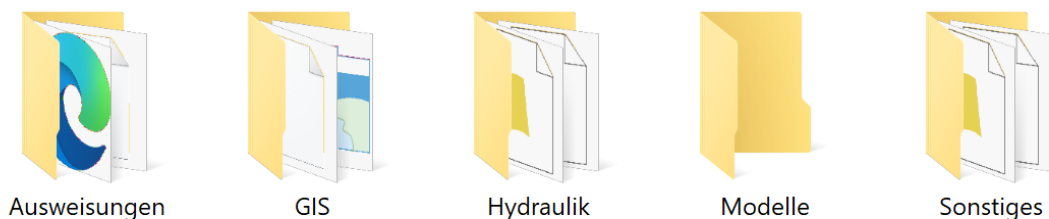
Die nachfolgend definierten Planzeichen sind auch für die Lagepläne zu verwenden.

Bezugs-Koordinatensystem

Die Dateien sowie das zugehörige GIS-Projekt sind einheitlich im Koordinatensystem des Bundesmeldenetzes (BMN) bereitzustellen, wobei abhängig von der geografischen Lage innerhalb Niederösterreichs der Meridianstreifen M34 bzw. M31 zu verwenden ist.

Speicherpfade

Im Ordner Projekt-Bez gibt es folgende Unterordner:



Speicherpfad GIS Projekt

...\Projekt-Bez\GIS\projektnamen_gebiet_jahr.aprx oder

...\Projekt-Bez\GIS\projektnamen_gebiet_jahr.qgs

Speicherpfad Ergebnisse

...\Projekt-Bez\Ausweisungen

...\Projekt-Bez\Hydraulik

In diesen Ordnern sind die nachfolgend definierten Datensätze abzuspeichern.

Anhang B3: Überflutungsflächen


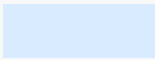

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polygon

Gespeichert unter:

Pfad und Bezeichnung	Inhalt der Textdatei
...\Projekt-Bez\Ausweisungen\haeufig.shp	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\Projekt-Bez\Ausweisungen\selten.shp	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\Projekt-Bez\Ausweisungen\extrem.shp	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware

Planzeichnung für analoge Darstellung

Szenario	RGB	
Häufiges Ereignis	0/127/255	
Seltenes Ereignis	178/221/247	
Extremes Ereignis	255/255/137	

Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Wiederkehrwahrscheinlichkeit	SZENARIO	TEXT	haeufig / selten / extrem (0 für keine Spezifizierung)
Beschreibung	INFO_TXT	TEXT	Kurzbeschreibung

Bearbeitungshinweise

Die Überflutungsfläche stellt eine Zusammenfassung aller Dauerstufen eines Ereignisses mit einer Wassertiefe größer 2 cm dar. Überflutungsflächen im Vektorformat, die aus hochaufgelösten Hangwassermodellierungen erstellt werden, weisen sehr viele Stützpunkte auf. Eine leichte Filterung bzw. Generalisierung der Polygone wird daher empfohlen. Die Generalisierung sollte im Lageplan bei einem Maßstab von 1:2.500 weniger als 1 mm, sprich 2,5 m in der Natur, Abweichung verursachen. Bei der Generalisierung ist die Topologie mit den anderen Überflutungshäufigkeiten zu erhalten, d. h. Polygon Häufiges Ereignis ≤ Seltenes Ereignis ≤ Extremes Ereignis.

Anhang B4: Wassertiefen

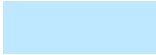
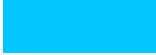




Typ und Speicherort

Raster-Datei, Dateityp: TIFF

Gespeichert unter:

Pfad und Bezeichnung	Inhalt der Textdatei
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_haeufig.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_haeufig.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_selten.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_selten.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_extrem.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\wt_extrem.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware

Planzeichnung für analoge Darstellung

Maximale Wassertiefe	RGB	
0.02 – 0.05 m	190/232/255	
0.05 – 0.10 m	0/197/255	
0.10 – 0.25 m	43/115/204	
0.25 – 0.50 m	0/0/255	
0.50 – 1.00 m	153/0/255	
> 1.00 m	255/0/0	

Bearbeitungshinweise

Die Wassertiefen stellen eine Zusammenfassung aller Dauerstufen eines Ereignisses mit einer Wassertiefe größer 2 cm dar.

Anhang B5: Fließgeschwindigkeiten







Typ und Speicherort

Raster-Datei, Dateityp: TIFF

Gespeichert unter:

Pfad und Bezeichnung	Inhalt der Textdatei
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_haeufig.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_haeufig.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_selten.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_selten.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_extrem.tif ...\\Projekt-Bez\\Hydraulik\\v_extrem.txt	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware

Planzeichnung für analoge Darstellung

Maximale Fließgeschwindigkeiten	RGB	
0.01 – 0.1 m/s	233/255/190	
0.10 – 0.25 m/s	209/255/115	
0.25 – 0.50 m/s	152/230/0	
0.50– 0.75 m/s	112/168/0	
0.75 – 1.00 m	38/85/0	
> 1.00 m	255/190/232	

Bearbeitungshinweise

Die Fließgeschwindigkeiten stellen eine Zusammenfassung aller Dauerstufen eines Ereignisses für Bereiche mit einer Wassertiefe größer 2 cm dar.

Anhang B6: Fließvektoren

Typ und Speicherort

Raster-Datei, Dateityp: TIFF

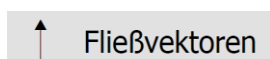
Gespeichert unter:

Pfad und Bezeichnung	Inhalt der Textdatei
...\Projekt-Bez\Hydraulik\vekt_haeufig.tif	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\Projekt-Bez\Hydraulik\vekt_selten.tif	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware
...\Projekt-Bez\Hydraulik\vekt_extrem.tif	Kurzbeschreibung: Ereignis, Regendauerstufen, Modellierungssoftware

Planzeichnung für analoge Darstellung

Die Dichte der Fließvektoren in der Kartendarstellung ist so zu wählen, dass die Abflusssituation gut abgebildet wird. Eine Ausdünnung der Fließvektoren wird empfohlen – sinnvollerweise sollte auf einem Lageplan im Maßstab 1:2.500 eine gute Lesbarkeit gegeben sein.

Da die Darstellung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten mittels einer Zusammenfassung mehrerer Datensätze (Maximum der Dauerstufen) erfolgt, die einen hochinstationären Prozess abbilden, kann die Fließvektorendarstellung nicht in allen Bereichen exakt sein. Diese ist somit als qualitative Ergänzung zum besseren Verständnis des Abflussbildes zu verstehen. Zur Ausgabe wird ein Zeitschritt der mittleren Dauerstufe ungefähr am Ende der Berechnungsdauer empfohlen. Dieser liefert in den meisten Bereichen repräsentative Ergebnisse. Diese Annahme ist im Einzelfall zu prüfen. Die Darstellung der Vektoren erfolgt mit einem schwarzen Pfeil:



Bearbeitungshinweise

Die Darstellung der Fließvektoren erfolgt nur in Bereichen mit Wassertiefen > 2 cm.

Anhang B7: Modellierungsgebiet

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polygon

Gespeichert unter:

...\Projekt-Bez\Sonstiges\Modell.shp

Planzeichnung für analoge Darstellung

Die Grenzen des 2D Modells werden mit einer gelben Linie (RGB 255/255/0) dargestellt.

Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Gebiet / Gemeinde	Gebiet	TEXT	Kurzbeschreibung
Beschreibung	INFO_TXT	TEXT	Kurzbeschreibung
Aktualisierungsdatum	AK_DATUM	DATUM	Aktualisierungsdatum <TT.MM.JJJJ> des Datensatzes

Anhang B8: Projektgebiet

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polygon

Gespeichert unter:

...\Projekt-Bez\Sonstiges\Projektgebiet.shp

Planzeichnung für analoge Darstellung

Die Grenzen des 2D Modells werden mit einer grünen Linie (RGB 128/204/77) dargestellt.

Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Gebiet / Gemeinde	Gebiet	TEXT	Kurzbeschreibung
Szenarien	SZENARIO	TEXT	betrachtete Szenarien auflisten: häufig, selten, extrem
Beschreibung	INFO_TXT	TEXT	Kurzbeschreibung
Aktualisierungsdatum	AK_DATUM	DATUM	Aktualisierungsdatum <TT.MM.JJJJ> des Datensatzes

Anhang B9: Feinmodellierungsbereiche

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polygon

Gespeichert unter:

...\Projekt-Bez\Sonstiges\Feinmodellierungsbereiche.shp

Planzeichnung für analoge Darstellung



RGB (255/0/0)

Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Gebiet/ Gemeinde	Gebiet	TEXT	Kurzbeschreibung
Beschreibung	INFO_TXT	TEXT	Kurzbeschreibung
Aktualisierungsdatum	AK_DATUM	DATUM	Aktualisierungsdatum <TT.MM.JJJJ> des Datensatzes

Anhang B10: Einbauten (Durchlässe, Verrohrungen, Brücken etc.)

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polylinie

Gespeichert unter:

...\Projekt-Bez\Sonstiges\Einbauten.shp

Planzeichnung für analoge Darstellung

Einbauten mit bekanntem Verlauf werden als pink (RGB 255/0/197) – schwarz strichlierte Linie dargestellt. Einbauten mit unbekanntem Verlauf werden als schwarz strichlierte Linie dargestellt.

Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Typ	TYP	TEXT	„Durchlass“ „Brücke“ „Sonstiges“
Form	FORM	TEXT	„Kreisförmig“ „Rechteck“ „Quadrat“ „Sonstiges“
Abmessung Kreisdurchlässe	DN	ZAHL	Durchmesser in mm
Abmessung lichte Weite bei Rechteckdurchlässe oder Brücken	LW	ZAHL	Lichte Weite in mm
Abmessung lichte Höhe bei Rechteckdurchlässe oder Brücken	LH	ZAHL	Lichte Höhe in mm



Anhang B11: Gewässer

Typ und Speicherort

Shape-Datei, Objekttyp: Polylinie

Gespeichert unter:

...\Projekt-Bez\Sonstiges\Gewaesserachsen.shp

Planzeichnung für analoge Darstellung

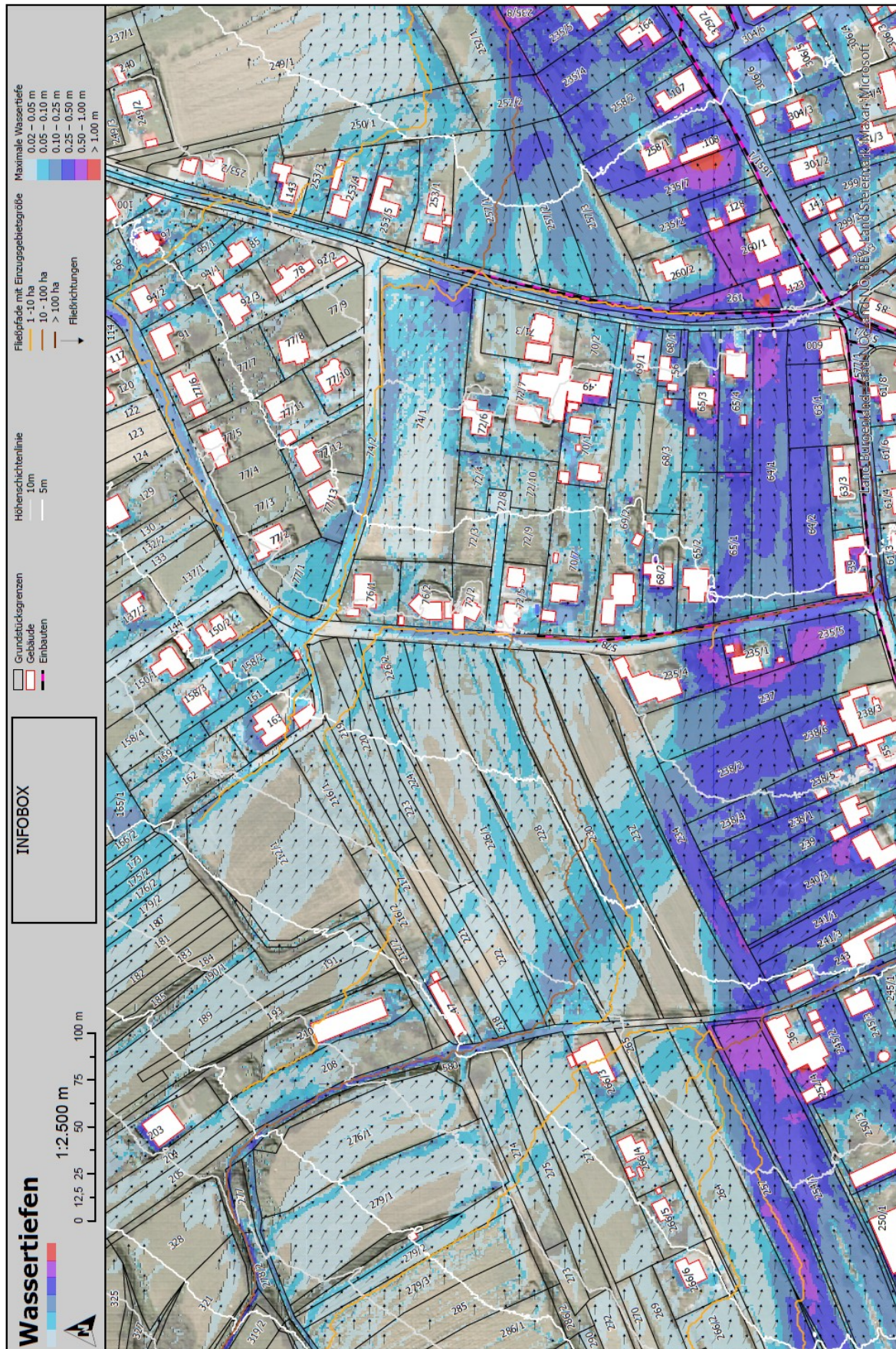
- Gewässer, deren Überflutungen nicht modelliert wurden, werden als blau (RGB 0/38/115) – weiß strichlierte Linie dargestellt.
- Gewässer, deren Hochwasserabfluss modelliert wurde, werden durch eine strich-punktierte Linie dargestellt (RGB 255/127/223).

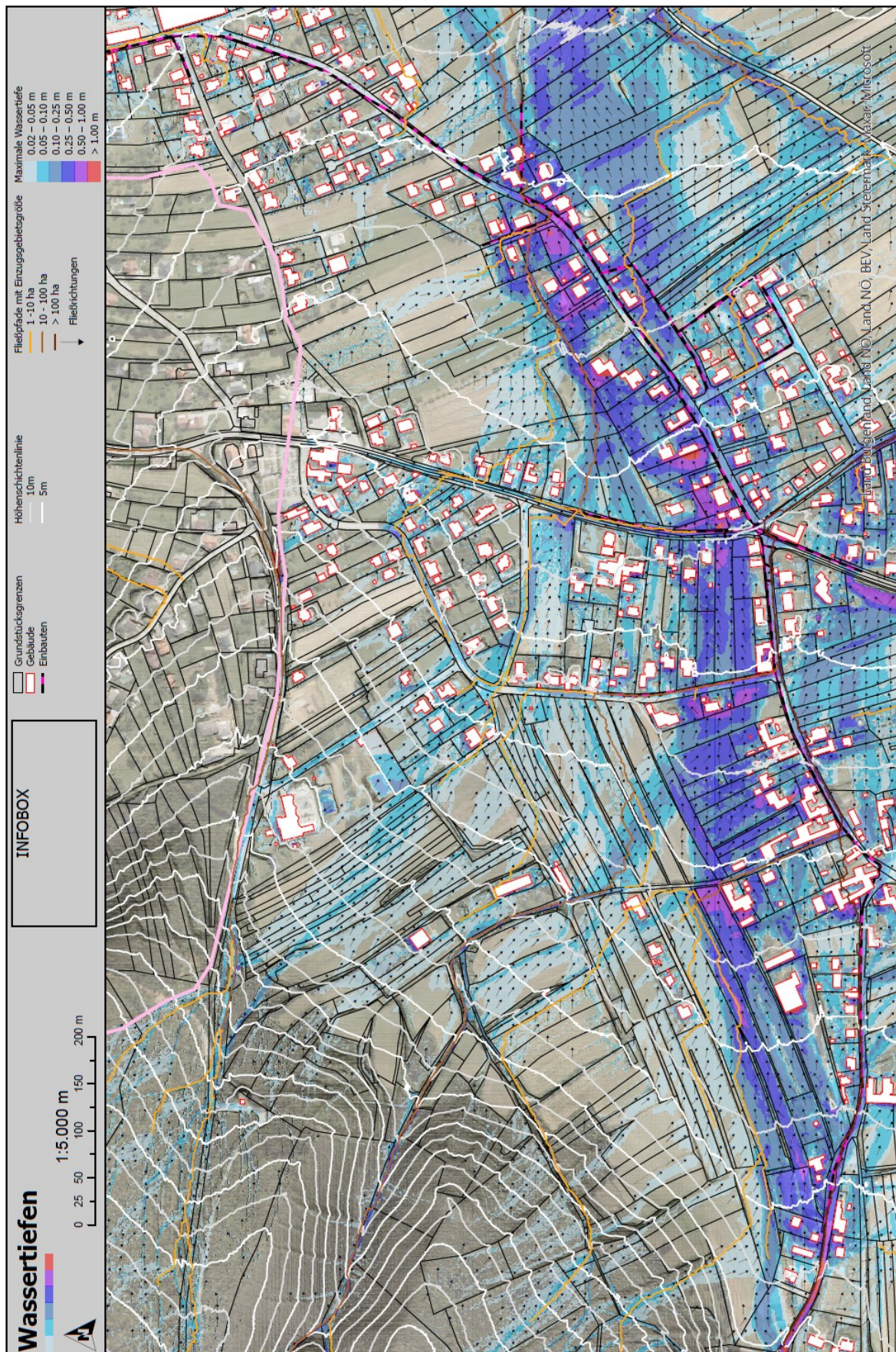
Attributtabelle

Bezeichnung	Feld	Feldeigenschaft	Bemerkung
Name	NAME	TEXT	Name des Gewässers
WIS-ID	WIS	ZAHL	WIS-ID des Gewässers
Model	MODEL	TEXT	„pluvialer Hochwasserabfluss NICHT dargestellt“ oder „pluvialer Hochwasserabfluss dargestellt“
Aktualisierungsdatum	AK_DATUM	DATUM	Aktualisierungsdatum <TT.MM.JJJJ> des Datensatzes

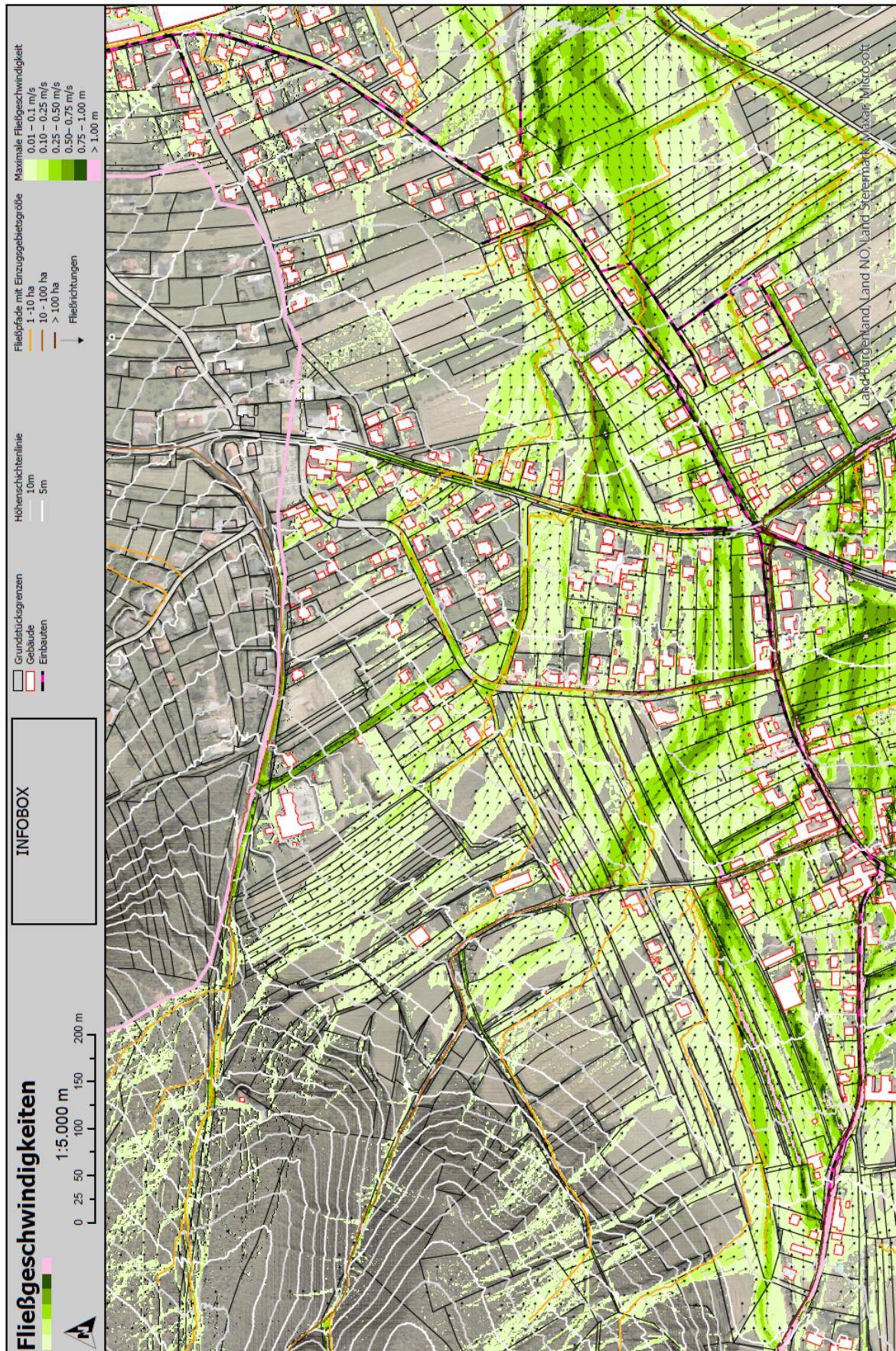
Anhang C: Musterkarten

Wassertiefen	
1	Maßstab 1:2.500
2	Maßstab 1:5.000
Fließgeschwindigkeiten	
3	Maßstab 1:2.500
4	Maßstab 1:5.000









AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG
Gruppe Wasser

A-3109 St. Pölten, Landhausplatz 1, Haus 2
Tel.: +43/2742/9005-14271; Email: post.wa@noel.gv.at

www.noel.gv.at