

Erosionsrisikomodellierung für Baden-Württemberg

Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie am Beispiel des Glems Einzugsgebiets

Projektbericht

Bearbeitung

ANDRÉ ASSMANN, JESSICA KEMPF, KERSTIN BÜCHE, KASIMIR ORLOWSKI,
KERSTIN HARTSCH, STEFAN LANGEL & JONAS LENZ
geomer GmbH & IPROconsult GmbH

Projektleitung

FRIEDERIKE GERSCHLAUER (RP-Freiburg, LGRB)



IMPRESSUM

- Herausgeber: Regierungspräsidium Freiburg
Abt. 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)
Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.
Telefon: (0761) 208-3000 (Zentrale), -3022 (Vertrieb)
E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de bzw. vertrieb-lgrb@rpf.bwl.de
<https://www.lgrb-bw.de> bzw. <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpf/Abt9>
- Bearbeitung: Dr. ANDRÉ ASSMANN, JESSICA KEMPF, KERSTIN BÜCHE & KASIMIR ORLOWSKI
(geomer GmbH)
Dr. KERSTIN HARTSCH, STEFAN LANGEL & JONAS LENZ (IPROconsult GmbH)
- Projektleitung: Dr. FRIEDERIKE GERSCHLAUER (RP Freiburg-LGRB, Ref. 93)
- Projektbegleitender Arbeitskreis
SÖREN OHM, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
TOBIAS GUMPPER, Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
Baden-Württemberg
SWANTJE APEL, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Dr. HANS-MARTIN WALDNER, Regierungspräsidium Tübingen
MARKUS MOSER, Regierungspräsidium Stuttgart
Dr. MANFRED DEDERER, Regierungspräsidium Stuttgart
TOBIAS MANN, Regierungspräsidium Stuttgart
CHRISTIAN BERNHART, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-
Württemberg
WERNER BORHO, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württem-
berg
Dr. HOLGER FLAIG, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
- Layout: Dr. FRIEDERIKE GERSCHLAUER (Ref. 93) & BETTINA SCHMÜCKING (Ref. 91)
- Bearbeitungsstand: Dezember 2022
- Download: <https://produkte.lgrb-bw.de/schriftensuche/sonstige-produkte/?aid=9>
- © Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
- Bildnachweis (Fotos): Soweit bei den Fotos und Abbildungen nicht anders angegeben, liegen die Rechte
beim LGRB (Urheber: og. Autoren).
- Titelbilder: Abbildungen aus dem Inhalt des Fachberichts

Erosionsmodellierung für Baden-Württemberg (Glemsregion) Projektbericht

Bearbeiter:

Dr. ANDRÉ ASSMANN, JESSICA KEMPF, KERSTIN BÜCHE, KASIMIR ORLOWSKI,
KERSTIN HARTSCH, STEFAN LANGEL & JONAS LENZ

geomer GmbH & IPROconsult GmbH

Projektleitung:

Dr. FRIEDERIKE GERSCHLAUER
RP-Freiburg, LGRB

Gefördert mit Mitteln der Ministerien für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM)
sowie für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR)

Baden-Württemberg

Projekt „Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie Erosionsrisikomodellierung für
Baden-Württemberg anhand des Einzugsgebiets der Glems“

LGRB-Fachbericht	2023/01	118 S.	53 Abb.	20 Tab.	Freiburg i. Br., Dezember 2022
------------------	---------	--------	---------	---------	-----------------------------------

Impressum

Herausgeber: Regierungspräsidium Freiburg
Abt. 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
(LGRB)
Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.
Telefon: (0761) 208-3000 (Zentrale) bzw. -3022 (Vertrieb),
Fax Poststelle: (0761) 208-3029
E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de bzw. vertrieb-lgrb@rpf.bwl.de
<https://www.lgrb-bw.de>

Bearbeitung: Dr. André Assmann, Jessica Kempf, Kerstin Büche, Kasimir
Orlowski (alle: geomer GmbH),
Dr. Kerstin Hartsch, Stefan Langel, Jonas Lenz (alle: IPROcon-
sult GmbH)

Projektbegleitender Arbeitskreis:
Sören Ohm, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirt-
schaft Baden-Württemberg
Tobias Gumpper, Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum
und Verbraucherschutz Baden-Württemberg
Dr. Friederike Gerschlauer, Landesamt für Geologie, Rohstoffe
und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg (Projektleitung)
Swantje Apel, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirt-
schaft Baden-Württemberg
Dr. Hans-Martin Waldner, Regierungspräsidium Tübingen
Markus Moser, Regierungspräsidium Stuttgart
Dr. Manfred Dederer, Regierungspräsidium Stuttgart
Tobias Mann, Regierungspräsidium Stuttgart
Christian Bernhart, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg
Werner Borho, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg
Dr. Holger Flaig, Landwirtschaftliches Technologiezentrum
Augustenberg

Bearbeitungs-
stand: Dezember 2022

Download: [https://produkte.lgrb-bw.de/schriftensuche/sonstige-pro-
dukte/?aid=9](https://produkte.lgrb-bw.de/schriftensuche/sonstige-produkte/?aid=9)

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Inhalt

	Seite
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einführung.....	11
1.1 Veranlassung.....	11
1.2 Aufgabenstellung und Ziel	11
1.3 Methodisches Vorgehen	12
2 Pilotgebiet Glemsregion.....	12
2.1 Geographische Beschreibung.....	12
2.2 Starkregen- und Erosionsproblematik.....	16
2.2.1 Starkregenisikomanagement	16
2.2.2 KliStaR.....	16
3 Praktische Durchführung, Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation..	17
3.1 Ziele	17
3.2 Durchführung	17
3.3 Ergebnisse	19
4 Datengrundlagen und Datenaufbereitung	21
4.1 Eingangsdaten	21
4.1.1 Digitale Datengrundlagen	21
4.1.2 Geländekartierung	23
4.2 Geländemodell.....	24
4.2.1 Integration von Strukturen.....	24
4.2.2 Umgang mit Mulden.....	25
4.3 Landnutzung und landwirtschaftliche Anbaudaten.....	29
4.3.1 Aufbereitung des Landnutzungsmodells	30
4.3.2 Ermittlung der landwirtschaftlichen Schlagabgrenzungen.....	30
4.3.3 Ableitung vereinfachter Kulturartgruppen.....	32
4.3.4 Belegungsszenarien	34
4.3.5 Zeitpunkte	35
4.4 Bodendaten	36
4.5 Niederschlagsdaten	37
5 Erosionsmodellierung mit den Modellen	
openLISEM und EROSION 3D.....	38
5.1 Modellbeschreibungen und -anwendungen	38
5.1.1 openLISEM	38
5.1.2 EROSION 3D.....	40

5.1.3	Konzeptionelle Ähnlichkeiten und Unterschiede	41
5.1.4	Vergleich der Eingabeparameter	42
5.1.5	Vergleich der Ausgabedaten.....	42
5.2	Szenariofestlegungen	44
5.3	Modell-Parametrisierung.....	46
5.3.1	Ableitungsmethodik Boden-/Landnutzungsparameter aus Primärinformationen.....	46
5.3.2	Zuordnung der Boden- und Landnutzungsklassen	49
5.3.3	Plausibilisierung an synthetischen Testhängen	49
5.4	Durchführung der Rechenläufe	52
5.5	Auswertung der Simulationsdaten	53
5.5.1	Darstellung der Ergebnisse.....	53
5.5.2	Frachtquantifizierung auf (Teil-)Einzugsgebietsebene.....	67
5.5.3	Plausibilisierung der Ergebnisse.....	69
5.6	Kartenerstellung und -design	71
6	Modelleignung, Bewertungen und Hinweise	75
6.1	Inhaltlicher Vergleich der Simulationsergebnisse der Modelle.....	75
6.2	Vergleich unterschiedlicher DGM-Auflösungen	75
6.3	Vergleich mit ABAG-Daten/CC-Kulisse.....	75
6.4	Performancevergleich und Aufwandanalyse.....	79
6.5	Hinweise für die Anwendung hinsichtlich unterschiedlicher Anwendungsfelder	80
6.5.1	Anwendungsfelder und Akteure.....	80
6.5.2	Bewertung Modelleignung hinsichtlich Anwendungsfeldern	81
6.5.3	Allgemeine Hinweise.....	82
7	Grundlagen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen in Baden- Württemberg.....	84
7.1	Durchführungskonzept für eine landesweite Bearbeitung.....	86
7.1.1	Empfehlungen für Komponenten auf landesweiter Ebene	86
7.1.2	Zwischenschritt: Regionale Priorisierung	93
7.1.3	Weiterverwendung von Daten aus dem Starkregen-Prozess	93
7.1.4	Zusätzlicher Informationsbedarf.....	93
7.1.5	Supportformate	93
7.1.6	Fortschreibungskonzept.....	94
7.1.7	Qualitätskontrollen	94
7.2	Mustervorgehensweise bei dezentraler (kommunaler) Bearbeitung	95
7.2.1	Ersteinschätzung im Rahmen des SRRM.....	95
7.2.2	Beteiligte am Erosionsrisikomanagement-Prozess (ERM).....	96
7.2.3	Prozessschritte Erosionsrisikomanagement (ERM)	97
7.2.4	Praxistest	99
7.2.5	Empfehlungen für die Ausschreibungsverfahren	99
7.2.6	Abstimmung und Synergien mit dem SRRM-Prozess (Datenmodelle und Prozesse).....	100
7.3	Ausblick	100
8	Entwicklung einer Vorlage eines Erosionsereignis-Katalogs.....	102
8.1	Hintergrund und Ziele	102

8.2	Inhalte	102
8.3	Technische Umsetzung des Prototyps.....	102
8.4	Erfahrungen und Ergebnisse der Erfassung.....	103
9	Literatur	105
10	Anhang	108
10.1	Vergleich der Anteile der Kulturartgruppen zwischen MLR Ackerstatistik 2019 und ECoLaSS Crop Type Prototype	108
10.2	Zuordnung der Objektarten zu den Modell-IDs	109
10.3	Eingabeparameter openLISEM und EROSION 3D.....	112
10.4	Ausgabedaten von openLISEM und EROSION 3D	115
10.5	Digitaler Anhang	118

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Landnutzungsverteilung im Glemseinzugsgebiet (Grundlage: ALKIS Tatsächliche Nutzung, Stand: 2021).....	13
Tab. 2: Feinbodenverteilung in der obersten Bodenschicht (Grundlage: BK 50, Stand: 2021)	13
Tab. 3: Übersicht zu den durchgeführten Besprechungen und Workshops.....	18
Tab. 4: Ergebnisdaten der Erosionsmodellierung und daraus ableitbare Auswertungen.....	20
Tab. 5: Übersicht über die im Rahmen des Projekts verwendeten digitalen Datengrundlagen	22
Tab. 6: Prozessierungsschritte zum Umgang mit Senken im DGM.....	27
Tab. 7: Zuordnung der Kulturart in ECoLaSS Crop Type Prototype zu den vereinfachenden Kulturartgruppen	33
Tab. 8: Zuordnung phänologischer Entwicklungsstadien für verschiedene Kulturarten.....	36
Tab. 9: Übersicht über die im Projekt durchgeführten Modellläufe (Kennzeichnung mit „X“); Simulationen mit 1 m Auflösung wurden für das Teilgebiet Ditzingen gerechnet, alle anderen für das gesamte Glemsgebiet.	45
Tab. 10: Verwendete Eingabeparameter aus den Primärinformationen.....	48
Tab. 11: Vergleich der ABAG-Daten, CC-Erosionskulisse Wasser und der openLISEM/EROSION 3D-Erosionsgefahrenkarten	77
Tab. 12: Zusammenstellung der Anwendungsfelder „Erosionsmodellierung“ in Baden-Württemberg und Akteure.....	80
Tab. 13: Kriterien für Modellauswahl	81
Tab. 14: Mit RoGeR im SRRM berechnete OAK-Szenarien	82
Tab. 15: Vergleich der Anteile der Kulturartgruppen zwischen MLR Ackerstatistik 2019 und ECoLaSS Crop Type Prototype für die Gemeinde Ditzingen	108
Tab. 16: Zuordnung der Objektarten aus dem Basis-DLM "Tatsächliche Nutzung" zu den Modell-IDs	109
Tab. 17: Eingabeparameter openLISEM	112
Tab. 18: Eingangsdatei Boden- und Bodenbedeckungsparameter in EROSION 3D.....	114
Tab. 19: Übersicht zu den Ausgabedaten von EROSION 3D	115
Tab. 20: Übersicht zu den Ausgabedaten von openLISEM.....	116



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Struktur des Projekts	12
Abb. 2: Übersichtskarte und Landnutzungsverteilung Pilotgebiet Glems	14
Abb. 3: Feinboden in der obersten Bodenschicht (Grundlage: BK50)	15
Abb. 4: Workshop in Ditzingen am 20.05.2022	18
Abb. 5: Projektbesprechung in Stuttgart am 15.07.2022	19
Abb. 6: Auszug aus der Überflutungstiefenkarte der hydraulischen Modellierung nach SRRM mit Behebungspunkten für die Kartierung	24
Abb. 7: Vorgehen beim Integrieren von Strukturen in das DGM	25
Abb. 8: Beispielsituation: Füllung von Senken mit einer maximalen Tiefe ≤ 1 m	28
Abb. 9: Beispielsituation: Aufbrechen von mittleren Senken	28
Abb. 10: Beispielsituation: Füllung von tiefen Senken (z. B. Steinbrüche)	28
Abb. 11: Beispielsituationen, in denen die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung bestätigt werden konnten	29
Abb. 12: Beispielsituationen, in denen die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung nicht bestätigt werden konnten	29
Abb. 13: ECoLaSS Crop Type Prototype 2018	31
Abb. 14: Geometrien Basis-DLM Tatsächliche Nutzung und ALKIS Flurstücke	31
Abb. 15: Aus ECoLaSS Crop Type Prototype 2018 und ALKIS Flurstücken abgeleitete Schlaggeometrien	32
Abb. 16: Anteile der vereinfachenden Feldfruchtgruppen im Untersuchungsgebiet auf Grundlage des ECoLaSS Crop Type Prototype 2018	33
Abb. 17: Flächenanteil der Hauptfeldfruchtgruppen bei den unterschiedlichen Belegungen. Für September-Szenarien wird für „Sommergetreide“ der Anbau der Zwischenfrucht „Kleegrass“ angenommen.	34
Abb. 18: Schema zu den Belegungsszenarien	35
Abb. 19: Monatliche Anzahl der Starkregenereignisse in Baden-Württemberg 2001–2021 (Dauerstufe: 1 h, Katalog: W3_Eta), Datengrundlage: DWD Kataloge radar-basierter starker Niederschlagsereignisse (CatRaRE) Dashboard (https://wetterdienst.maps.arcgis.com/apps/dashboards/a490b2b390044ff0a8b8b4c51aa24c60 (letzter Zugriff am 17.11.2022))	36
Abb. 20: Zeitlicher Verlauf der Niederschlagsereignisse. Für die Ereignisse außergewöhnlich und selten ist die Spannweite aller Einzelstationen im Untersuchungsgebiet dargestellt.	37
Abb. 21: Prozessablauf und benötigte Parameter in LISEM (nach Jetten 2002, verändert nach Hölzel 2009)	39
Abb. 22: Prozessablauf und benötigte Parameter in EROSION 3D (Darstellung auf Grundlage von Schmidt 1996 und GeoGnostics 2021)	40
Abb. 23: Ausgabedateien von openLISEM (Version 6.80)	43
Abb. 24: Ausgabedateien von EROSION 3D (Version 3.3.2.2)	44
Abb. 25: Zuordnung der Bodenparameterwerte zu den Karteneinheiten entsprechend der Anforderungen der Modellierungswerkzeuge	49
Abb. 26: Synthetische Testhänge zur Untersuchung von Modellparametern und -optionen. Jede Farbe markiert einen eigenständigen Hang, der von den benachbarten Hängen nicht beeinflusst wird. Die Einheiten der X- und Y-Achsen sind Meter, die Z-Achse ist in Dezimeter	50
Abb. 27: Vergleich der Infiltrationsraten von openLISEM und EROSION 3D für Sommergetreide auf Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen Niederschlagsereignis	51
Abb. 28: Vergleich der Infiltrationsraten von openLISEM und EROSION 3D für Gehölz auf Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen	



Niederschlagsereignis	51
Abb. 29: Vergleich des Abflussverhaltens von openLISEM und EROSION 3D (E3D) für die Landnutzung „Sommergetreide“ auf Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen Niederschlagsereignis	52
Abb. 30: Benutzeroberfläche von openLISEM Version 6.80	53
Abb. 31: Legende und Datengrundlagen der Darstellung der Modellergebnisse (hier sind noch die ursprünglich verwendeten Bezeichnungen für Feldfruchtverteilungen auf den Ackerschlägen dargestellt, siehe Kap. 4.3.3)	54
Abb. 32: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für openLISEM und EROSION 3D (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Real), räumliche Auflösung: 5 m)	55
Abb. 33: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für EROSION 3D bzw. openLISEM mit 1 m, 5 m und 10 m räumlicher Auflösung (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Real)).....	57
Abb. 34: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für die verschiedenen Zeitpunkte für EROSION 3D bzw. LISEM (Szenario: außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Real), räumliche Auflösung: 5 m)	59
Abb. 35: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für die verschiedenen Belegungsvarianten für EROSION 3D bzw. LISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)	61
Abb. 36: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für Good Case und Bad Case für EROSION 3D bzw. LISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m).....	62
Abb. 37: Vergleich der Sedimentfrachtkarten von EROSION 3D für Bad und Good Case (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)	63
Abb. 38: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für Bad Case und Nur Mais für EROSION 3D bzw. LISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m).....	64
Abb. 39: Vergleich der Bodenbearbeitung mit EROSION 3D (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Real), räumliche Auflösung: 5 m)	65
Abb. 40: Vergleich der Niederschlagsereignisse für EROSION 3D bzw. LISEM (Szenario: April, Belegung 1 (2018 Real), räumliche Auflösung: 5 m).....	67
Abb. 41: Mit EROSION 3D modellierter zeitlicher Verlauf des Abflusses und Sedimenteintrags in die Teileinzugsgebiete Böhlachgraben (1,8 km ²) und Aischbach (4,2 km ²). Das größere Einzugsgebiet des Aischbach führt zu längeren Fließzeiten und insgesamt höheren Stofffrachten.	68
Abb. 42: Lokalisierung von Sedimenteinträgen in Gewässer	68
Abb. 43: Mit EROSION 3D modellierter zeitlicher Verlauf des Abflusses und Sedimenteintrags im Teileinzugsgebiet Böhlach in der Realbelegung 2018.....	69
Abb. 44: Auszug aus der Erosions-Depositionskarte mit Darstellung der Überflutungstiefen mit Brennpunkten aus KliStaR (EROSION 3D, Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)	70
Abb. 45: Beispiel-Erosions-Depositionskarte	73
Abb. 46: Auszug aus der Sedimentfrachtkarte (EROSION 3D, Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)	74
Abb. 47: Vergleich der ABAG-Karte mit einer EROSION 3D-Karte.....	76
Abb. 48: Vergleich der CC-Kulissen-Karte mit einer EROSION 3D-Karte	77
Abb. 49: Vergleich der Infiltrationsverläufe zwischen openLISEM bzw. EROSION 3D und der aus den OAK-Werten abgeleiteten Infiltration (Ackerfläche, bei Erosionsmodellierung: Sommergetreide; BK50-Kartiereinheit f45).....	83
Abb. 50: Übersicht über die Empfehlungen für das weitere Vorgehen für das Land Baden-Württemberg.....	85
Abb. 51: Vereinfachte Sedimentfrachtkarten und Minderungspotentialkarte zur	

Risikobewertung für Erosions-Ersteinschätzung mit Vorschlägen für die Einteilung der Klassengrenzen (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad und Good Case und Differenz aus Good und Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m).....89

Abb. 52: Vereinfachte Erosions-Depositionskarte und Minderungspotentialkarte zur Risikobewertung für Erosions-Ersteinschätzung mit Vorschlägen für die Einteilung der Klassengrenzen (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad und Good Case und Differenz aus Good und Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m).....90

Abb. 53: Aufgenommene Erosions- und Verschlammungsspuren nach Starkregen (41 mm/h) in Aidlingen (Landkreis Böblingen) am 29.07.2022104



Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AHK	Gesellschaft für Angewandte Hydrologie und Kartographie mbH
ALKIS	Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem
AMD	Advanced Micro Devices
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AUS	<i>außergewöhnliches</i> Starkregenereignis
AWGN	Amtliches Digitales Wasserwirtschaftliches Gewässernetz
Basis-DLM	Digitales Basis-Landschaftsmodell
BK50	Bodenkarte 1:50.000
CatRaRE	Kataloge der Starkregenereignisse
CPU	central processing unit
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	Deutsche Industrienorm
DPROC	Datenbank-Prozessor (für EROSION 3D)
DTK	Digitale Topographische Karte
DWD	Deutscher Wetterdienst
E3D	EROSION 3D
ERM	Erosionsrisikomanagement
EXT	<i>extremes</i> Starkregenereignis
GeoLa	Geowissenschaftliche Landesaufnahme
GEP	Generalentwässerungsplan
GIS	Geographisches Informationssystem
GKB	Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung
HWGK	Hochwassergefahrenkarte
KLIMOPASS	Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg
KliStaR	Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen
KOSTRA	KOordinierte-STarkregen-Regionalisierungs-Auswertungen
LEL	Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LGL	Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
LISEM	Limburg Soil and Erosion Model
LTZ	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MLR	Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
openLISEM	Limburg Soil and Erosion Model
OAK	Oberflächenabflusskennwerte
RAM	Random-Access Memory
SEL	<i>seltene</i> Starkregenereignis
SRGK	Starkregengefahrenkarte
SRRM	Starkregenrisikomanagement
TK25	Topographische Karte 1:25.000
TU	Technische Universität
TUK200	Topographische Übersichtskarte 1:200.000
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1 Einführung

1.1 Veranlassung

Die Abteilung 9 (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau – LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg koordinierte im Rahmen des Starkregenrisikomanagements Baden-Württemberg die Arbeiten zum Bereich Bodenerosion und leitete das Projekt „Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie Erosionsrisikomodellierung für Baden-Württemberg anhand des Einzugsgebiets der Glems“.

Im Rahmen des Starkregenrisikomanagements werden aktuell dezentral hydraulische Modellierungen für kommunale Starkregengefahrenkarten durchgeführt. Dabei werden u. a. Fließwege, -geschwindigkeiten und Überstauhöhen des Oberflächenabflusses berechnet. Im Gegensatz zu den Hochwassergefahrenkarten (HWGK) werden in den Starkregengefahrenkarten (SRGK) Überflutungen aufgrund von Starkregenereignissen im Gelände dargestellt, die unabhängig vom Gewässer auftreten und auch keine unmittelbaren, rechtlichen Konsequenzen haben. Ein Modellierungsansatz zur Beaufschlagung des Oberflächenabflusses mit Geröll befindet sich in der Entwicklungs- und Testphase.

Ergänzend dazu besteht der Bedarf einer Bodenerosionsrisikomodellierung, um erosionsgefährdete Flächen hinsichtlich von potentiell Bodenabtrag bzw. potentiellem Auftrag von umgelagertem Bodenmaterial im Zusammenhang mit Starkregenereignissen identifizieren zu können. Die bereits landesweit vorliegenden Daten der nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) berechneten Bodenerosion stellen gemittelte jährliche Werte mit einer anderen zeitlichen Dimension als der im Starkregenrisikomanagement genutzten Daten dar. Aus diesem Grund sind im Rahmen des Starkregenrisikomanagements ergänzend physikalische Erosionsmodellierungen zur Risikoabschätzung erforderlich.

Ein wichtiger Impuls zum Bedarf einer physikalischen Erosionsmodellierung kam aus dem Themenbereich des Geschiebetransportes. Bei Ereignissen wie in Braunsbach 2016, spielt neben dem jeweiligen Wasserangebot auch die Menge des verfügbaren Sedimentdargebotes eine erhebliche Rolle für die Ausprägung des anschließenden Geschiebetransportes. Dementsprechend stellen die Ergebnisse der Erosionsmodellierung einen wichtigen Eingangsparameter in die inhaltlich anschließenden Massentransportmodelle dar.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

Ziele und Aufgaben des Projekts sind die Modellierung der Bodenerosion im Testgebiet „Glems“ und die Einbindung der Ergebnisse in das landesweite Starkregenrisikomanagement sowie die Übernahme der Informationen in die kommunalen Starkregengefahrenkarten.

Hauptpunkt ist die Entwicklung einer Standardvorgehensweise zur physikalisch basierten Erosionsrisikomodellierung auf landesweiter bzw. auf kommunaler Ebene. Berücksichtigt werden dabei die beiden planungsbewährten Modelle EROSION 3D und openLISEM. Dabei sind vor allem die unterschiedlichen Anforderungen und Fragestellungen an eine Modellierung zu erfassen und für eine Vorgehensweise auszuwerten. Es wird zu entscheiden sein, welche Fragestellungen besser mit einer kommunalen oder einer landesweiten Vorgehensweise beantwortet werden können.

Weitere Arbeitspunkte sind die Erstellung von Grundlagen und Empfehlungen für die Vorgehensweise sowie die Erstellung einer Methodik zur Erfassung und Qualitätssicherung einer dezentralen Erosionsereignisdokumentation.

1.3 Methodisches Vorgehen

Am Beispiel des Pilotgebiets Glems (Kap. 2) werden Primärdatenquellen identifiziert und entsprechend den Anforderungen der Erosionsmodelle als Eingabedaten für diese aufbereitet (Kap. 4). Eine flächendeckende Verfügbarkeit bzw. Erhebbarkeit der Primärdaten für Baden-Württemberg sollte dabei gegeben sein.

Mit den Modellen EROSION 3D und openLISEM werden verschiedene Nutzungs- und Niederschlagsszenarien der Glemsregion und ausgewählter Teilgebiete modelliert (Kap. 5) sowie die Ergebnisse plausibilisiert und bewertet. Auswirkungen technischer Modellierungsoptionen sowie der Qualität der Primärdaten werden dargestellt (Kap. 6).

Unter Einbeziehung der Erfahrungen und Rückläufe von Akteuren des Starkregenrisikomanagements in Baden-Württemberg, der Kommunen und Landwirtinnen und Landwirte im Pilotgebiet (Kap. 3) werden Empfehlungen zum weiteren Vorgehen in Hinblick auf unterschiedliche Zielrichtungen der Modellierung gegeben (Kap. 7).

Begleitend zu der Modellierung wurde ein Erfassungsbogen für Bodenerosionsereignisse entworfen und durch verschiedene Akteure getestet (Kap. 8).

Die wesentlichen Teilschritte des Projekts sind in Abb. 1 zusammengefasst.

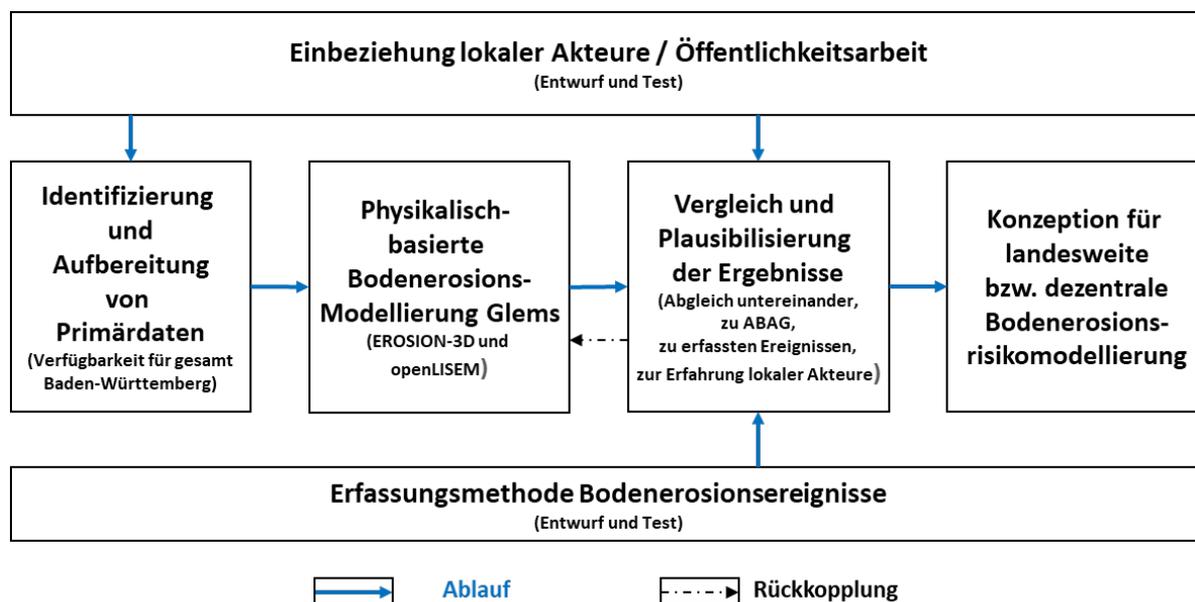


Abb. 1: Struktur des Projekts

2 Pilotgebiet Glemsregion

2.1 Geographische Beschreibung

Untersuchungsgebiet ist das Einzugsgebiet der Glems in den Landkreisen Böblingen und Ludwigsburg mit den Kommunen Ditzingen, Gerlingen, Hemmingen, Korntal-Münchingen, Leonberg, Markgröningen, Schwieberdingen und Stuttgart (s. Abb. 2). Das

Gewässer 2. Ordnung befindet sich nordwestlich von Stuttgart, umfasst ca. 195 km² bei einer Fließlänge von 45 km und gehört zum Neckareinzugsgebiet. Der Quellbereich des Flusses liegt im Süddeutschen Keuperbergland nahe dem Stuttgarter Stadtgebiet bei 460 m ü. NN. Weiter Richtung Nordwesten durchdringt die Glems den Übergang zwischen dem überwiegend bewaldeten Keuperbergland und der Gäulandschaft im Neckarbecken und mündet bei Markgröningen auf einer Höhe von 188 m ü. NN in die Enz. Der südliche Bereich des Einzugsgebiets ist durch Waldflächen geprägt, während der nördliche Teil von landwirtschaftlicher Nutzung auf fruchtbaren Lösslehm Böden dominiert wird. Mit 33 % hat das Ackerland den größten Flächenanteil im Einzugsgebiet, gefolgt von Wald- und Siedlungsflächen (s. Tab. 1, Abb. 2).

Tab. 1: Landnutzungsverteilung im Glemseinzugsgebiet (Grundlage: ALKIS Tatsächliche Nutzung, Stand: 2021)

Nutzung	Fläche [km²]	Anteil [%]
Ackerland	65,2	33,4
Wald	51,0	26,1
Siedlung	33,2	17,0
Verkehr	17,9	9,2
Grünland	17,8	9,1
Sonstiges	10,2	5,2
Gesamt	195,3	100

Im Projektgebiet kommen überwiegend Braunerden und Parabraunerden vor, im nördlichen Teil dominieren Lössböden. Die Bodenarten in der obersten Bodenartenschicht nach BK50 variieren von schwach lehmigen Sanden bis stark schluffigen Tonen, vorwiegend kommen schluffige Lehme und stark tonige Schluffe vor (s. Abb. 3, Tab. 2).

Tab. 2: Feinbodenverteilung in der obersten Bodenschicht (Grundlage: BK 50, Stand: 2021)

Bodenart	Bezeichnung	Anteil [%]
Sl2	schwach lehmiger Sand	1,9
Sl4	stark lehmiger Sand	0,1
Slu	schluffig-lehmiger Sand	1,6
Ls2	schwach sandiger Lehm	5,1
Lt2	schwach toniger Lehm	4,7
Lt3	mittel toniger Lehm	4,8
Lts	sandig- toniger Lehm	0,6
Lu	schluffiger Lehm	25,0
Uls	sandig-lehmiger Schluff	8,6
Ut4	stark toniger Schluff	27,7
Tu3	mittel schluffiger Ton	9,5
Tu4	stark schluffiger Ton	10,4

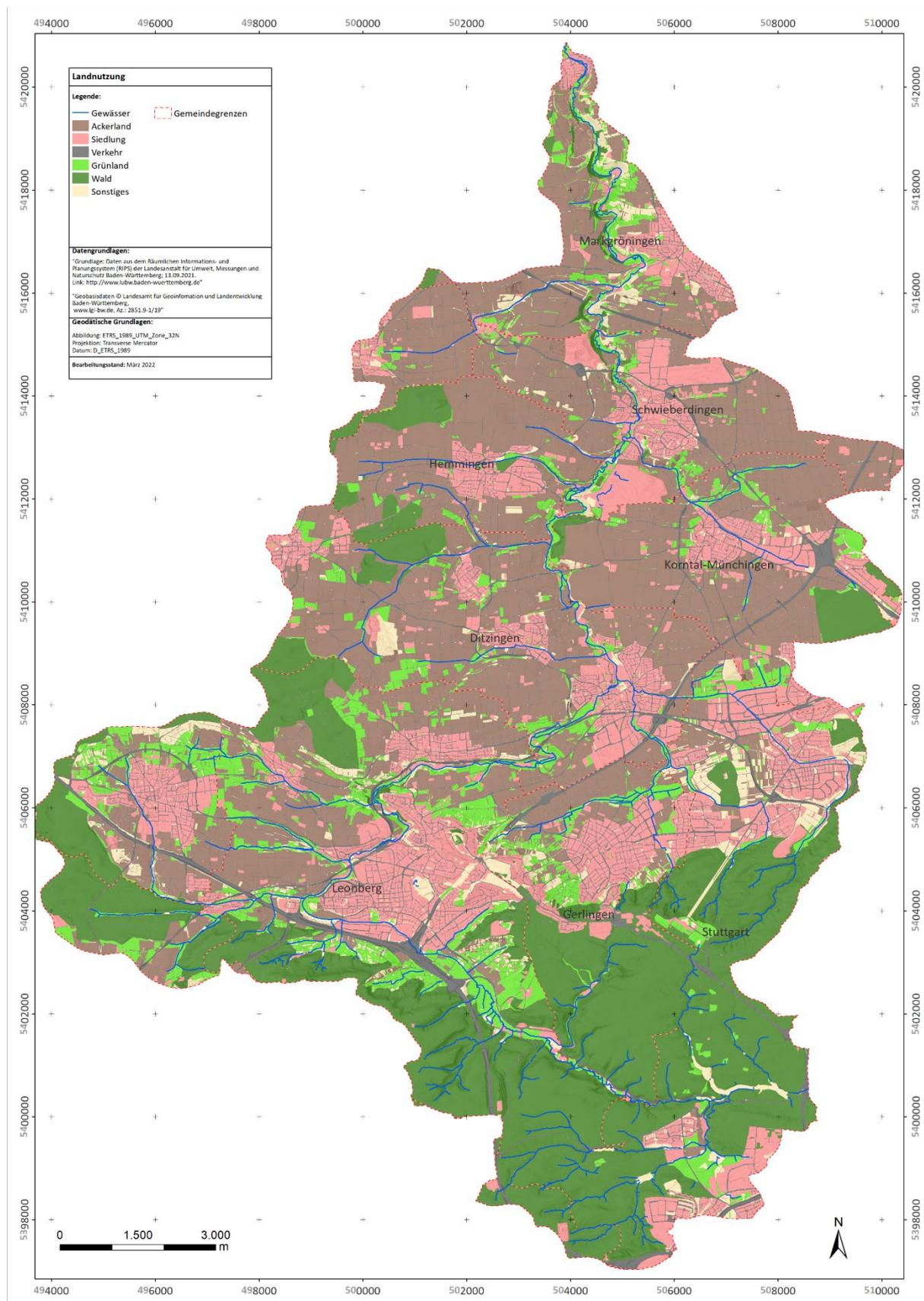


Abb. 2: Übersichtskarte und Landnutzungsverteilung Pilotgebiet Glems

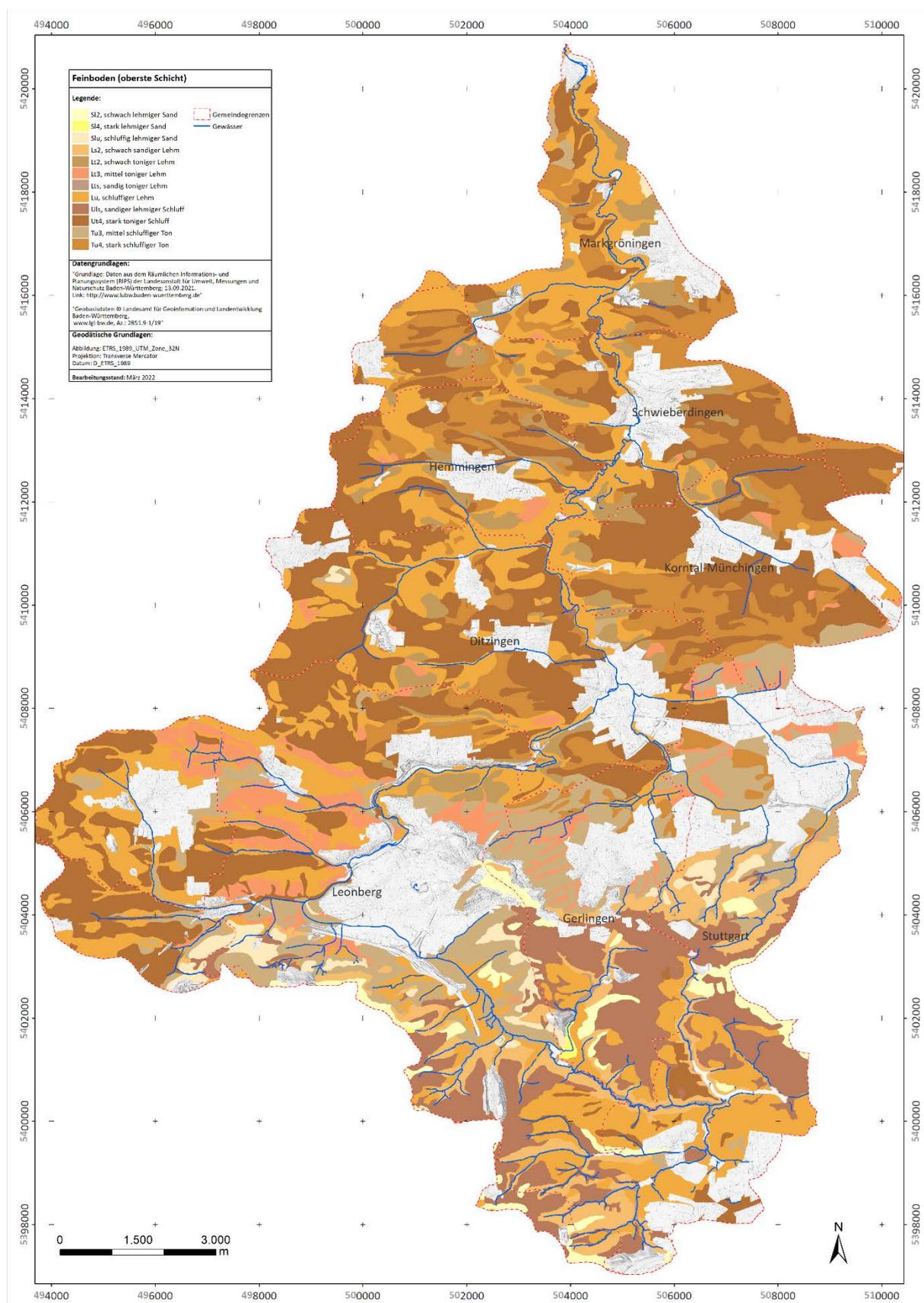


Abb. 3: Feinboden in der obersten Bodenartenschicht (Grundlage: BK50)

2.2 Starkregen- und Erosionsproblematik

2.2.1 Starkregenrisikomanagement

Unter Starkregenabfluss wird das insbesondere bei kurzen sommerlichen Starkregen abfließende Wasser verstanden, das wiederum große Bodenmengen mit sich führen kann. Aufgrund der hohen Niederschlagsintensitäten nutzt das Wasser dabei Wege, Straßen und Geländeeinschnitte als oberirdische Abflusswege und lässt sog. Sturzfluten entstehen. Aufgrund der geringen Vorwarnzeiten und Ausdehnung von Starkregen- und Erosionsereignissen sowie das geringe Risikobewusstsein der Kommunen und der Bevölkerung ist die Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen erschwert (LUBW 2016a).

Im Juli 2010 haben extreme Niederschläge im Glemseinzugsgebiet in kürzester Zeit schlimmste Schäden angerichtet. Nach 2009 war dies bereits das zweite extreme Niederschlagsereignis in kurzer Folge. Niederschläge mit bis zu 180 mm innerhalb von zwei Stunden führten besonders in den Gemeinden Ditzingen und Gerlingen zu wild abfließenden Oberflächenabfluss, der außerhalb von Fließgewässern ungehindert öffentliche Gebäude, Tiefgaragen und auch private Grundstücke unter Wasser setzte. Nach diesen Ereignissen schlossen sich die acht Kommunen des Einzugsgebietes zusammen, um gemeinsam eine Risikomanagement-Strategie zu entwickeln. Im Rahmen des Projekts wurden Gefahrenkarten für Starkregenereignisse erstellt, die den Kommunen als hilfreiches Werkzeug dienten, um Gefahren- und Risikobereiche zu lokalisieren und zu priorisieren. Außerdem wurde eine Risikomanagement-Konzeption entwickelt, bei der die praktische Nutzung der Gefahrenkarten für die Maßnahmenplanungen zum Einsatz kamen (Assmann et al. 2012).

Auch andere lokale Starkregenereignisse in den letzten Jahren (z. B. Killertal 2008, Bretten und Bonndorf 2015, Biberach oder Braunsbach 2016) haben bewusst gemacht, dass es abseits von fließenden Gewässern zu Überflutungen mit enormen Schäden kommen kann, sodass inzwischen in Baden-Württemberg laut den Förderrichtlinien Wasserwirtschaft (FrWw 2015) „die Erstellung von kommunalen Starkregengefahrenkarten mit nachfolgender Risikoanalyse und darauf aufbauendem Handlungskonzept sowie die daraus eventuell resultierenden baulichen Maßnahmen zur Ableitung oder Rückhaltung von Oberflächenabfluss aus den Außengebieten“ (LUBW 2016a, S. 8) gefördert wird, sofern sich das Verfahren an den „Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ hält. Dieser Leitfaden gibt ein standardisiertes und landesweit einheitliches Vorgehen zur Durchführung von Gefährdungs- und Risikoanalysen bezüglich starkregenbedingter Überflutungen vor. Als Grundlage für die Erstellung des Leitfadens diente u. a. das oben genannte „Pilotprojekt“ an der Glems.

2.2.2 KliStaR

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg“ (KLIMOPASS) wurde 2014 das Projekt „Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen (KliStaR)“ im Glemseinzugsgebiet initiiert (Billen et al. 2017). Im Vordergrund der Aktivitäten von KliStaR standen Maßnahmen zur Klimaanpassung, die in kommunalen Außenbereichen helfen sollten, den Bodenabtrag und den Oberflächenabfluss zu verringern sowie den Bodenwasserhaushalt zu verbessern. Das Hauptziel von KliStaR war dabei, Umsetzungsdefizite bei der Klimaanpassung in kommunalen Außenbereichen, wie land- und

forstwirtschaftlichen Flächen, zu erfassen und zu minimieren. Land- und Forstwirte sowie kommunale Vertreter wurden von Anfang an am Planungsprozess beteiligt. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass eine Identifikation mit den vorgeschlagenen Maßnahmen gegeben ist. Dazu wurden den Glemskommunen Informationen bereitgestellt, die im Rahmen der Klimaanpassung erforderlich sind, wie z. B. Karten mit Oberflächenabfluss und Bodenerosion in der Gegenwart und Zukunft. Darüber hinaus wurden ausgewählte Maßnahmen bereits initiiert bzw. umgesetzt. Außerdem wurde im Rahmen des Projekts ein Maßnahmenkatalog für die Land- und Forstwirtschaft entwickelt (Billen et al. 2018). Somit berücksichtigte KliStaR den kommunalen Modell- und Anwendungscharakter und schaffte eine Vernetzung der Handlungsfelder Boden, Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Forstwirtschaft.

3 Praktische Durchführung, Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation

3.1 Ziele

Das Projekt wurde von einem Arbeitskreis mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Wasserwirtschafts-, der Landwirtschafts- und der Bodenschutzverwaltung unter Federführung des LGRB eng begleitet. Im Rahmen des Projekts war eine enge Abstimmung mit den Auftraggebenden sowie auch dem projektbegleitenden Arbeitskreis notwendig. Zwischenergebnisse wurden dem Arbeitskreis vorgestellt und gemeinsam abgestimmt. Die Validierung/Plausibilisierung der erstellten Karten, die Ermittlung von Bedarfen aus den verschiedenen Fachgebieten an die Erosionsmodellierung sowie die Vorstellung und die Abstimmung der Ergebnisse zur landesweiten Vorgehensweise erfolgten überwiegend in Form von Workshops bzw. Projektbesprechungen oder auf bilateralem Weg.

3.2 Durchführung

Während der Projektlaufzeit fand eine enge Abstimmung der Arbeitsgemeinschaft mit der Projektleitung sowie der projektbegleitenden Arbeitsgruppe statt (vgl. Tab. 3).



Tab. 3: Übersicht zu den durchgeführten Besprechungen und Workshops

Datum	Thema	Ort	Beteiligte
21.07.2021	Grundlagendaten und Organisatorisches	Online-Meeting	projektbegleitender Arbeitskreis, Arbeitsgemeinschaft
10.12.2021	Zwischenbericht	Online-Meeting	projektbegleitender Arbeitskreis, Arbeitsgemeinschaft
20.05.2022	Workshop mit Landwirten	Rathaus Ditzingen	Landratsamt Ludwigsburg Fachbereich Boden und Landwirtschaft, Stadt Ditzingen, Markgröningen, Landwirte, Arbeitsgemeinschaft
15.07.2022	Zwischenbericht	MLR Stuttgart	projektbegleitender Arbeitskreis, Arbeitsgemeinschaft
03.11.2022	Vorstellung landesweites Konzept	MLR Stuttgart	projektbegleitender Arbeitskreis, Arbeitsgemeinschaft
03.02.2023	Vorstellung der Projektergebnisse	Rathaus Ditzingen	Landratsamt Ludwigsburg und Böblingen Fachbereich Boden, Stadt Ditzingen, Schwieberdingen, Landwirte, Arbeitsgemeinschaft

Ein wichtiger Termin im Rahmen des Projekts war der Workshop mit Landwirten in Ditzingen am 20. Mai 2022 (s. Abb. 4). Hierbei waren auch Teilnehmende der Stadt Ditzingen, der Gemeinde Markgröningen sowie der Unteren Landwirtschafts- und Bodenschutzbehörde vom Landratsamt Ludwigsburg vertreten.



Abb. 4: Workshop in Ditzingen am 20.05.2022



Hintergrund dieses Workshops war:

- „Erosionsgefahrenkarte“ soll kein Schreibtischprodukt werden.
- Nutzen der Karten für die Landwirtschaft sollen erörtert und optimiert werden. Wo können entsprechende Karten oder Modellierungsdienstleistungen die Arbeit unterstützen?
- Möglichkeit, einen landesweiten Prozess mitzugestalten
- Praktikable Vorschläge für Maßnahmen zum Erosionsschutz bewerten (über Bewirtschaftungsszenarien)

Die präsentierten Erosionsgefahrenkarten waren die Ergebnisse der Simulationen, bei denen die tatsächliche Bewirtschaftungsform unberücksichtigt blieb. Die Teilnehmenden hatten zunächst die Möglichkeit die ausgedruckten Erosionsgefahrenkarten zu validieren und die unterschiedlichen Auflösungen und Modelle zu bewerten. Hierbei ging es in erster Linie darum zu verifizieren, ob die Abtrags- und Akkumulationsflächen auf den Karten plausibel sind und wo inzwischen Nutzungsänderungen (z. B. Acker- zu Grünland) stattgefunden haben. Des Weiteren konnte mitgeteilt werden, welchen Nutzen sich die Landwirte von den Karten erhoffen.

Bei der Projektbesprechung am 15. Juli 2022 in Stuttgart präsentierte die Arbeitsgemeinschaft die Zwischenergebnisse sowie den Erosionserhebungsbogen der Arbeitsgruppe (s. Abb. 5). Ergänzend sollten die Bedarfe der verschiedenen Fachbereiche an die Modellergebnisdaten weiter präzisiert werden.



Abb. 5: Projektbesprechung in Stuttgart am 15.07.2022

Beim Abschlusstreffen der Projektgruppe am 3. November 2022 im MLR stand die Vorstellung der landesweiten Vorgehensweise im Vordergrund. Außerdem wurde die Weiterführung des Erosionserhebungsbogens diskutiert.

Die Ergebnisse des Projekts wurden außerdem den Landwirten, Bodenschutzbehörden und beteiligten Kommunen Anfang Februar 2023 in Ditzingen präsentiert.

3.3 Ergebnisse

Wichtige Rückmeldungen aus dem Workshop mit den Landwirten sowie bei der Abschlussveranstaltung waren u. a.:

- Informationen zur tatsächlichen Bewirtschaftung und reale Daten der Ackerkulturverteilung sind für eine realistische Betrachtung von Erosionsgefährdung sehr wichtig.



- Das Belegungsmuster der tatsächlichen Ackerkulturverteilung von 2018 ist relativ realitätsnah. Die insgesamt drei bis vier Szenarien ergänzt mit den Good-Case- und Bad-Case-Varianten sind als Musterbeispiele gut geeignet.
- Die Modellierung mit einer Auflösung von 1 m erzielt im Vergleich zu der 5 m Auflösung keinen Mehrertrag.
- Es wurde der Wunsch nach einem interaktiven Tool geäußert, mit dem Landwirte online durch eigene Anpassungen von Feldfrüchten/Fruchtfolge und Bewirtschaftungsform eine mögliche Erosionsminderung auf erosionssensiblen Flächen prüfen können.
- Für die untere Bodenschutzbehörde sind die Karten für den vor- und nachsorgenden Bodenschutz sinnvoll; evtl. können Karten im nachsorgenden Bodenschutz als Ersatz/Ergänzung zu Detailuntersuchungen verwendet werden.
- Die Erosionsgefahrenkarten können als Grundlage für Förderanträge sowie für die Beurteilung von Maßnahmen von Nutzen sein.
- Die gewählte Benennung der Hauptfruchtgruppen für die Erosionsrisikomodellierung war hinsichtlich des Bestandsschluss nicht optimal. Im Nachgang der Abschlussveranstaltung wurden in Abstimmung mit den an der Abschlussveranstaltung beteiligten Landwirten und dem projektbegleitenden Arbeitskreis eine Umbenennung der Hauptfruchtgruppen vorgenommen (siehe Kap. 4.3.3), die bei dem zukünftigen landesweiten und dezentralen Prozess berücksichtigt werden sollen (siehe Kap. 7).

Hinsichtlich der Bedarfe und Nutzen der Erosionsmodellierung können aus dem Projektverlauf, die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Aspekte zusammengefasst werden.

Tab. 4: Ergebnisdaten der Erosionsmodellierung und daraus ableitbare Auswertungen

Ergebnisdaten bzw. daraus ableitbare Daten	Beispiele für weitergehende Auswertungen
Erosions-Depositionskarte [kg/m ²] bzw. [t/ha]	Bereiche mit Überschreitung kritischer Abtragswerte identifizieren; Zonale Statistik z. B. Mittelwerte pro Ackerschlag etc.; Vergleiche von Erosion und Deposition nach Einzugsgebiet (1 – 3 km ²);
(Kumulativer) Sedimentzufluss zur Zelle [kg]	Quantifizierung von Sedimenteinträgen, z. B. in Gewässer und auf Infrastruktur; Identifikation von Eintrittsbereichen
Ton-/Schluff-/Sandgehalt des transportierten Sediments [%]	Korngrößenverteilung z. B. für partikelgebundene Phosphat-/Schwermetallverlagerung relevant
(maximale) Fließgeschwindigkeit [m/s]	Bereiche mit Überschreitung kritischer Fließgeschwindigkeiten
(maximale) Wasserhöhe [m]	Bereiche mit Überschreitung kritischer Wasserhöhen

Für den Bodenschutz ist die Bilanzierung der Erosion und Sedimentation auf den einzelnen Flächen sowie die Ausweisung eines möglichen Reduktionspotentials für die Erosion von Interesse. Während für den Objektschutz (z. B. Gebäude, Straßen, Siedlungsfläche) und das Starkregenrisikomanagement Sedimentfrachten sowie mögliche Quantifizierungen von Schadstofffrachten wichtig ist. Für die Landwirtschaft ist die

Identifizierung von Hotspots der Bodenerosion wesentlich relevanter als exakte quantitative Sedimentfrachten. Die physikalisch-prozessorientierte Modellierung bietet gegenüber den bisher verfügbaren ABAG-basierten Erosionsgefährdungskarten den Mehrwert einer räumlich besser differenzierten Ausweisung von Erosionshotspots, sowie die Möglichkeit Sedimentfrachten und Erosions- und Depositionsbereiche zu quantifizieren.

Hinsichtlich des Themas Ereigniserfassung beabsichtigt das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) den Erfassungsbogen in seiner bisherigen Form im Jagst-Projekt über das Pilotprojekt hinaus anzuwenden. Des Weiteren plant das LTZ das Erfassungs-Tool im Rahmen von Weiterbildungsveranstaltungen bei der LEL (Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum) vorzustellen. Weitere Ergebnisse der landesweiten bzw. regionalen Modellierung sind in Kap. 7 und zum Erosionserfassungsbogen in Kap. 8 aufgeführt.

4 Datengrundlagen und Datenaufbereitung

4.1 Eingangsdaten

4.1.1 Digitale Datengrundlagen

Für die Erosionsmodellierung sowie zu Prüf-, Plausibilisierungs- oder Vergleichszwecken wurden topographische, Landnutzungs-, Boden-, Landwirtschafts- und Niederschlagsdaten verwendet (s. Tab. 5). Als Hilfsdatensätze kamen weitere Daten, wie z. B. Orthofotos zum Einsatz.

Einen Überblick über die im Rahmen des Projekts ausgewerteten digitalen Daten gibt Tab. 5. Neben den für die Erosionsmodellierung im Projekt verwendeten Gelände-, Landnutzungs-, Landwirtschafts-, Boden- und Niederschlagsdaten sind in dieser auch Datensätze aufgeführt, die alternativ für die Modellierung verwendet werden können. Auch werden in Tab. 5 Datensätze gelistet, die zu Prüf-, Plausibilisierungs-, Vergleichs- oder Präsentationszwecken verwendet wurden.

Tab. 5: Übersicht über die im Rahmen des Projekts verwendeten digitalen Daten-
grundlagen

	Titel	Quelle	Verwendung im Projekt ¹ (Legende s.u.)	Bemerkungen
Geländedaten	Digitales Geländemodell (DGM), als 0,25 m, 1 m, 5 m bzw. 10 m Raster	LGL Aufbereitet aus dem HydTERRAIN durch AHK	M	Hydroresampling aus DGM0,25 in 1 m, 5 m bzw. 10 m DGMs (vgl. Kap. 4.2.1)
	Laserscan-Daten des Bodenmodells in 0,25-m-Auflösung (HydTERRAIN), Punktdichte: 0,8 Punkten pro m ²	LGL Aus Befliegungsdaten mit Stand 2016 und 2019	P	
Landschaftsdaten	Digitales Basislandschaftsmodell (Basis-DLM)	LGL ausgehändigt 13.09.2021 (LUBW)	M	
	ALKIS (Gebäude-Layer)	LGL ausgehändigt 13.09.2021 (LUBW)	M	
Landwirtschaftsdaten	Kulturartklassifikation ECoLaSS Crop Type Prototype 2018	ECoLaSS https://www.eco-lass.eu/hrl-agriculture	M	Ableitung der Geometrien der Ackerschläge
	Schlagkulissen der landwirtschaftlichen Flächen (mit Nutzungsdaten)	MLR	A	
	Anbauumfang der Feldfrüchte auf den Ackerflächen im Projektgebiet aus der Agrarstrukturerhebung (Agrarstatistik) 2021	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg https://www.statistik.baden-wuerttemberg.de	A	
Bodendaten	Bodenkarte 1:50.000 (BK50)	LGRB (Stand 2021)	M	
	Bodenschätzung		(A)	Zum Stand der Projektlaufzeit noch nicht flächendeckend digital und qualitätsgeprüft vorliegend; Verfügbarkeit aber in naher Zukunft erwartbar
Niederschlagsdaten	Niederschlagsstatistik für die Ereignisse <i>selten</i> , <i>außergewöhnlich</i> und <i>extrem</i>	Uni Freiburg, (ausgehändigt über LUBW am 09.09.2021)	M	
	KOSTRA-DWD	DWD	A	



Weitere Daten	Digitale Orthophotos (DOP)	LGL ausgehändigt 13.09.2021 (LUBW)	P	
	Digitale topographische Karten 1:10.000 (DTK010), 1:25.000 (DTK025) und 1:250.000 (DTK250)	LGL ausgehändigt 13.09.2021 (LUBW)	P	
	Amtliches Digitales Wasserwirtschaftliches Gewässernetz (AWGN)	LUBW ausgehändigt 13.09.2021	P	
	Oberflächenabflusskennwerte (OAK) für die Starkregenmodellierung	LUBW	P	
	Daten zur Bodenerosion in Baden-Württemberg: ABAG (100 m Raster)	LGRB (Stand 2015)	P	
	Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung Ermittlung und Einteilung der Wassererosionsgefährdungsklassen (CC-Klassen)	MLR (Stand 2018)	P	

¹ **Legende zur Spalte „Verwendung im Projekt“**

M Datensatz verwendet für Modellierung

A alternativ verwendbarer Datensatz für Modellierung

P Datensatz zu Prüf-, Plausibilisierungs-, Vergleichs- oder Präsentationszwecken verwendet

4.1.2 Geländekartierung

Zu Plausibilisierungszwecken wurde im Projektgebiet (in der Stadt Ditzingen) eine Geländekartierung durchgeführt, die sich an der standardmäßigen Geländeaufnahme des Starkregenrisikomanagement-Prozesses orientierte. Als Grundlage diente die Überflutungstiefenkarte aus der hydraulischen Simulation mit dem Modell FloodArea. Einen Auszug aus dieser Karte ist in Abb. 6 zu finden. Neben dem Durchmesser von Verrohrungen wurden Mulden- und Senkensituationen untersucht, um die DGM-Aufbereitung (s. Kap. 4.2) zu plausibilisieren.

13 Standorte wurden hierbei überprüft. An acht Standorten wurden die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung bestätigt (vgl. Kap. 4.2.2).

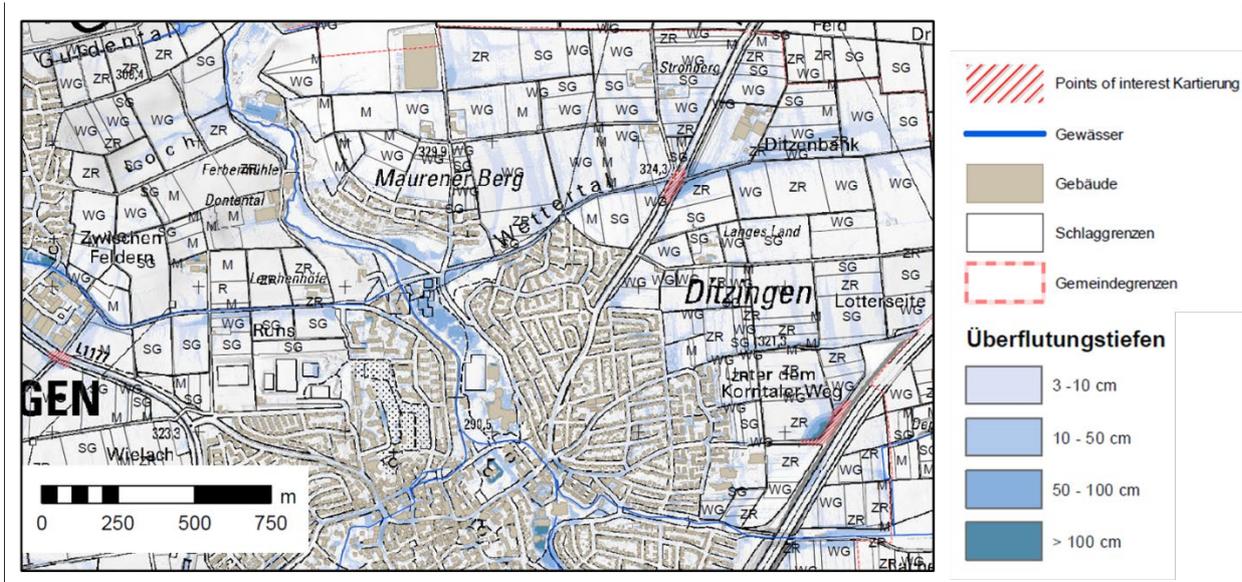


Abb. 6: Auszug aus der Überflutungstiefenkarte der hydraulischen Modellierung nach SRRM mit Begehungspunkten für die Kartierung (als Points of interest markiert, rot schraffiert)

4.2 Geländemodell

Das Geländemodell stellt für die Erosionsmodellierung die räumliche Grundlage dar. Aus dem Geländemodell werden u. a. die Fließrichtung und Geländeneigung abgeleitet, aber auch die automatische Generierung eines Vorfluternetzes ist anhand von Schwellenwerten (kritische Einzugsgebietsgröße) möglich.

4.2.1 Integration von Strukturen

Die Erosionsmodellierungen wurden für 1-m- (nur Ditzingen), 5-m- (Glemsgebiet) und 10-m-Auflösung (Glemsgebiet) durchgeführt. Daher musste das Digitale Geländemodell (DGM) von 0,25 m in die anderen Auflösungen konvertiert werden.

Durchlässe mit begrenzter Kapazität können in beiden Erosionsmodellen im Gegensatz zu den Hydraulik-Modellen nicht berücksichtigt werden. Die Durchgängigkeit der Fließwege muss jedoch für die Erosionsmodellierung gewährleistet sein.

In einem ersten Schritt wurde mit dem DGM in 0,25 m Auflösung ein sogenanntes Hydroresampling in eine gröbere Auflösung (1 m, 5 m und 10 m) durchgeführt. Beim Hydroresampling werden im Vergleich zu einem einfachen Resampling (z. B. mit dem ArcGIS Spatial Analyst Werkzeug „Aggregate“) hydrologisch relevante Strukturen in die Geländedaten explizit mit übernommen. Dabei bleiben Verkehrs- und Gewässerstrukturen sowie die Durchgängigkeit von Fließhindernissen und Gewässerachsen erhalten. Hierbei werden Daten aus der Landnutzung wie abflussrelevante Brücken, Gewässer, Verkehrsflächen und Gebäude berücksichtigt.

Im Projekt wurden folgende Datengrundlagen verwendet:

- Gewässer aus AWGN oder BasisDLM_Gewaesserachse
- Straßenverkehr und Brücken aus BasisDLM_Strassen_oder_Fahrbahnachse und BasisDLM_Wegachse
- Bahnverkehr und Brücken aus BasisDLM_Bahnstrecke
- Gebäude aus ALKIS_Gebaeude



Die Integration der Strukturen in das Geländemodell geschieht in mehreren Schritten und ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt:

1. Geländemodell: Als unterste Ebene ist das aggregierte Geländemodell, welches ohne Berücksichtigung von Strukturen auf 1 m, 5 m und 10 m Auflösung gemittelt wurde. Relevante Strukturen (Gewässer, Straßen, Durchlässe) werden in Rahmen von weiteren „Ebenen“ als Raster darübergelegt und verschnitten.
2. Gebäude: Gebäude werden als Fließhindernisse in das DGM integriert.
3. Gewässernetz und Verkehrswege: Um die maßgeblich hydrologisch relevanten Strukturen zu erhalten und nicht durch eine Mittelung der Geländeoberfläche zu verlieren, wurde im Bereich des Gewässernetzes (hierfür ist eine hohe Lagegenauigkeit unbedingt erforderlich) der Minimumwert abgegriffen und übernommen. Da Gewässer- und Straßennetz oft nah beieinanderliegen und Straßen oftmals eine natürliche Barriere für Fließwege darstellen, wurde das Verkehrsnetz separat behandelt und im Bereich der Verkehrswege der Median des Geländemodells genutzt. So wird vermieden, dass mögliche nahe oder parallelaufende Gewässerbäche fälschlicherweise Verkehrswege absenken, wodurch ein Fließweg entstehen könnte, den es in Realität nicht gibt.
4. Da es keine landesweiten und vollständigen Datensätze zu Durchlässen gibt, wurden Schnittpunkte zwischen Gewässer- und Verkehrsnetz als durchgängig angenommen: Überall wo sich Gewässer- und Verkehrsnetz kreuzen, wird angenommen, dass es einen durchgehenden Fließweg gibt und der Verkehrsweg dementsprechend „durchbrochen“ ist. Mit Hilfe eines Puffers (20 m) wurde der Minimumwert der Umgebung abgegriffen und auf den kreuzenden Gewässerabschnitt übertragen, wodurch eine Durchgängigkeit gewährleistet wurde.

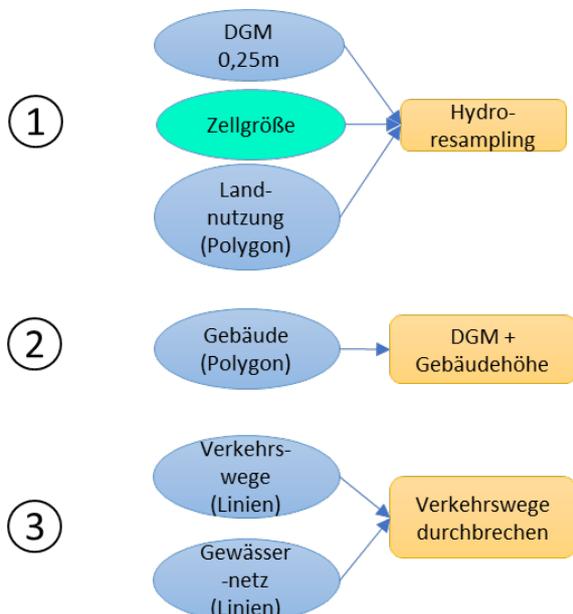


Abb. 7: Vorgehen beim Integrieren von Strukturen in das DGM

4.2.2 Umgang mit Mulden

Mit dem oben beschriebenen Verfahren können Strukturen wie Durchlässe und Verdolungen, die in einem vorliegenden Datensatz enthalten sind, in das Geländemodell integriert werden. Standardmäßig und landesweit sind jedoch nur Informationen zu Durchlässen und Verdolungen im Bereich der im DLM-Gewässernetz verzeichneten

Gewässer verfügbar. Darüber hinaus finden sich jedoch sehr häufig weitere Durchlässe, z. B. an Gräben im Bereich von Straßen-/Bahndämmen. Diese können z. B. im Rahmen einer Vor-Ort-Kartierung erfasst werden, was jedoch nur bei detaillierten Betrachtungen in kleinen Untersuchungsgebieten praktikabel ist. Um Durchlasssituationen auch bei größeren Modellgebieten ohne Vor-Ort-Kartierung zu berücksichtigen, wurden diese beim Umgang mit Mulden im DGM entsprechend berücksichtigt.

Nach der unter 4.2.1 beschriebenen Integration der Durchlässe und Verdolungen auf Basis des Gewässernetzes weist das DGM noch Senken auf, was beispielsweise die folgenden Situationen umfasst:

- natürliche Hohlformen (insbesondere in Karstgebieten),
- anthropogene Hohlformen (z. B. Steinbrüche),
- Hohlform durch Barrieren, wie z. B. Straßen- und Bahndämme, sowie
- Ungenauigkeiten im DGM.

Für die Fließrichtungsberechnung ist sowohl bei openLISEM als auch bei EROSION 3D ein senkenfreies DGM erforderlich, um ein kontinuierliches Abflussnetz zu erhalten. Das bedeutet, dass jede Zelle mindestens einen tiefer liegenden oder zumindest gleich hohen Nachbarn besitzen muss. Der Prozess der allmählichen Füllung der Senken mit Wasser und Sediment sowie die Änderung des Abflussmusters beim Überlaufen der Senke kann von beiden Erosionsmodellen nicht berücksichtigt werden.

Diesbezüglich besteht ein Unterschied zu den hydraulischen Modellen (wie z. B. Flood-Area), die bei der Erstellung von Starkregengefahrenkarten im Starkregenrisikomanagement zum Einsatz kommen. Diese Modelle können den Prozess der Muldenfüllung mit Wasser und des Überlaufens abbilden.

Um Senken in einem DGM zu behandeln, bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Auffüllen der Senke (durch Erhöhung der Höhenwerte der Rasterzellen in der Senke);
- Aufbrechen der Senke (durch Herabsetzen der Höhenwerte benachbarter Rasterzellen der Senke).

Der Fokus liegt dabei nicht auf der exakten Geländehöhe, sondern der anschließenden Ableitung eines durchgängigen Abflussmusters.

Die Eignung der Verfahren ist abhängig von der konkreten Senkensituation. Da im DGM des Untersuchungsgebiets verschiedenste Senkensituationen vorkommen, wurde ein dreistufiges Verfahren angewendet (vgl. Tab. 6), um mit den Senken je nach Situation möglichst adäquat umzugehen und die dabei produzierten Artefakte nach Möglichkeit gering zu halten.

Für die Prozessierung kamen die in Tab. 6 angegebenen Werkzeuge der open-source Geodatenanalyse-Plattform WhiteboxTools (Version 2.0.0) (https://www.whitebox-geo.com/manual/wbt_book/) zum Einsatz. Hierbei können Schwellenwerte zur maximalen Tiefe und zu den maximalen „breach costs“ vorgegeben werden, bis zu denen eine Behandlung der Senken im jeweiligen Prozessierungsschritt erfolgt. Als „breach costs“ werden bei dem verwendeten Algorithmus das akkumulierte Produkt aus Höhenänderung und Distanz entlang des Pfades verstanden.

Da über die Kriterien max. Tiefe/„breach costs“ keine Selektion aller adressierten Situationen möglich ist, wurden die Schwellenwerte iterativ angepasst, sodass ein möglichst plausibles Ergebnis für die Gesamtheit der im vorliegenden Untersuchungsgebiet auftretenden Fälle mit möglichst wenig Artefakten erzielt wird.

Nicht behandelte Durchlasssituationen (vgl. Kap. 4.2.1) stellen auch Senken dar. Mit den gewählten Kriterien ergeben sich damit durch die unterschiedlichen Senkenbehandlungsverfahren auch Annahmen bezüglich des Vorhandenseins eines Durchlas-



ses (>1 m Tiefe und Erfüllen der Kriterien zum Aufbrechen). Konkrete Durchlasskapazitäten können in den Erosionsmodellen ohnehin nicht berücksichtigt werden, sodass sich hier durch die Annahme, ob ein Durchlass vorliegt oder nicht, nur Unterschiede in Bezug auf die Neigung und die Fließrichtungen ergeben.

Tab. 6: Prozessierungsschritte zum Umgang mit Senken im DGM

Nr.	Kriterium für Behandlung der Senke im jew. Schritt	Art der Senkenbehandlung	Verwendetes Tool aus Whitebox-Tools v2.0.0 ¹	Annahme bzgl. Fließrichtung/ Abflussverhalten	Adressierte Situation (Beispiele)
1	Senken-Tiefe ≤1 m	Füllung	FillDepressions	Fließrichtung beim Überlaufen einer gefüllten Senke (Annahme: keine Durchlasskapazität vorhanden)	Ungenauigkeit im DGM; Hohlform durch Barrieren (z. B. Dämme von Verkehrswegen, ohne Durchlass); (vgl. Abb. 8)
2	Aufbrechen möglich mit: max. Länge des „breach channels“: 75 m max. „breach costs“: 250	Aufbrechen	BreachDepressions-LeastCost	Entwässerung über 1 Pixel breiten Kanal Entspricht einem Durchlass (Annahme: unbegrenzte Durchlasskapazität)	Hohlform durch Barrieren (z. B. Dämme von Verkehrswegen, mit Durchlass) (vgl. Abb. 9)
3	alle übrigen Senken, die Kriterien von 1. und 2. nicht erfüllen	Füllung		Kein Oberflächenabfluss (Hohe Infiltration)	Steinbrüche (vgl. Abb. 10)

¹ https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/

Die mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse wurden anhand der durchgeführten Geländekartierung (vgl. Kap. 4.1.2) für das Teilgebiet der Gemeinde Ditzingen validiert. An 8 von 13 ausgewerteten Standorten wurden die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung bestätigt (Beispielsituationen finden sich in Abb. 11 und Abb. 12, vgl. Kap. 4.1.2).

Die identifizierten und behandelten Senkenbereiche wurden in die Kartendarstellungen mit aufgenommen (vgl. Kap. 5.6), sodass diese in die Interpretation der Erosions-Depositionskarten mit einbezogen werden können.

Wenn auch nicht in allen Einzelfällen durch das automatische Verfahren ein der tatsächlichen Situation entsprechender Umgang mit den Senken erfolgt, stellt es ein praktikables Verfahren insbesondere für die Anwendung in großräumigen Untersuchungsgebieten und bei Überblicksbetrachtungen dar.

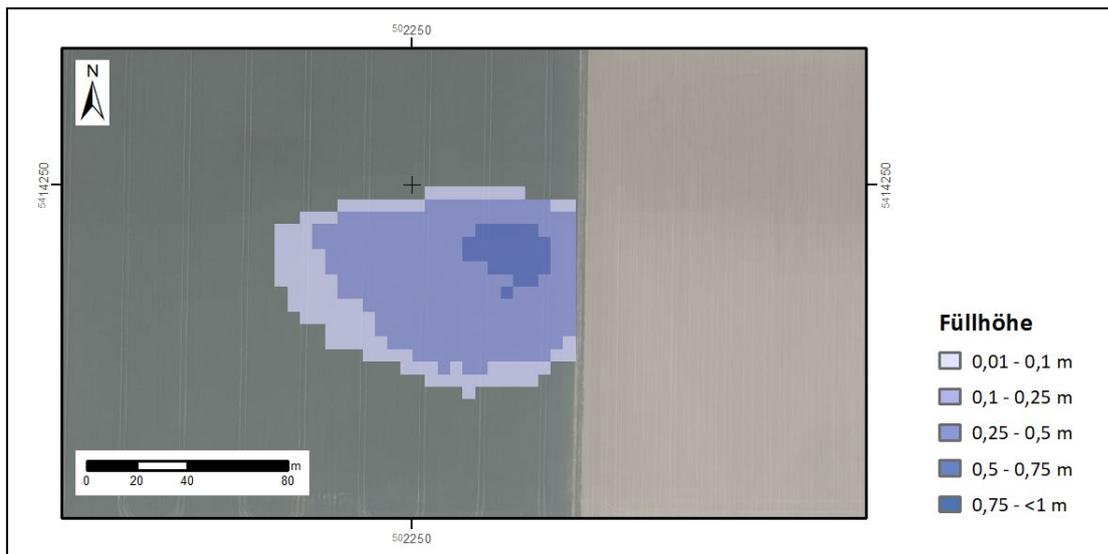


Abb. 8: Beispielsituation: Füllung von Senken mit einer maximalen Tiefe < 1 m



Abb. 9: Beispielsituation: Aufbrechen von mittleren Senken

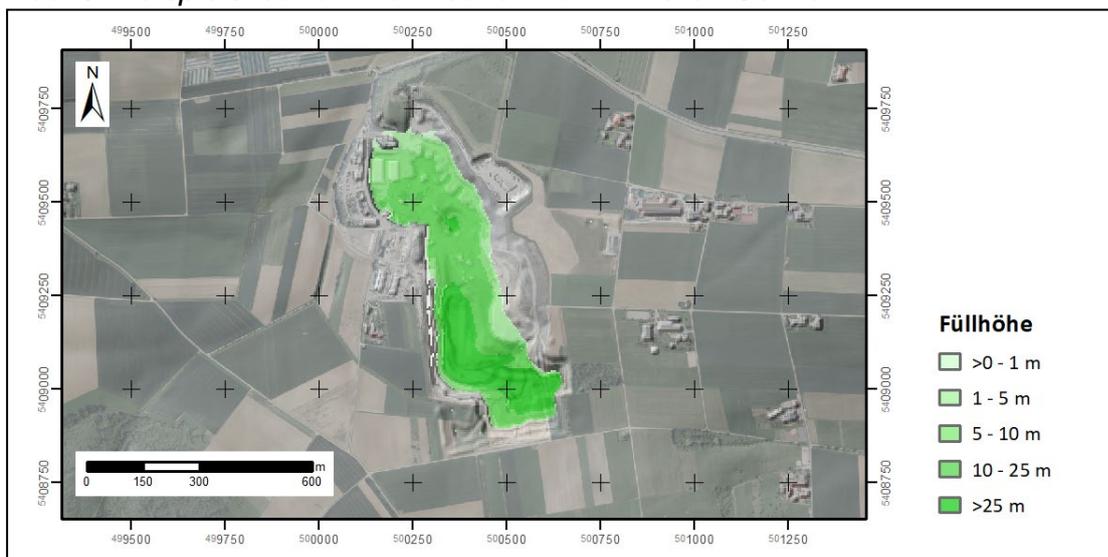


Abb. 10: Beispielsituation: Füllung von tiefen Senken (z. B. Steinbrüche)

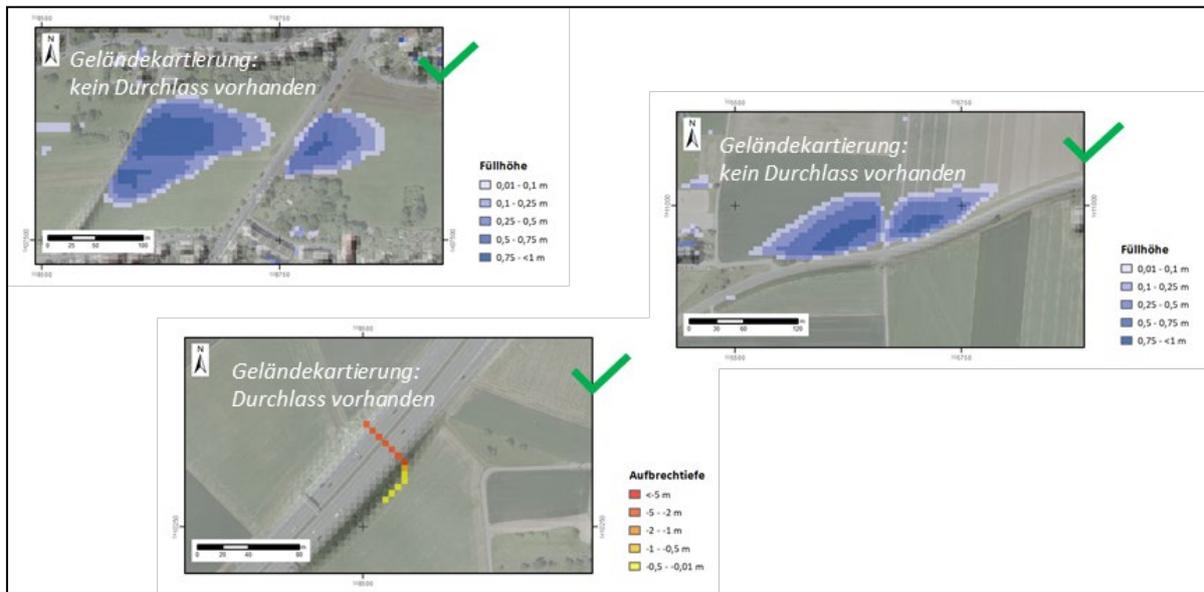


Abb. 11: Beispielsituationen, in denen die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung bestätigt werden konnten

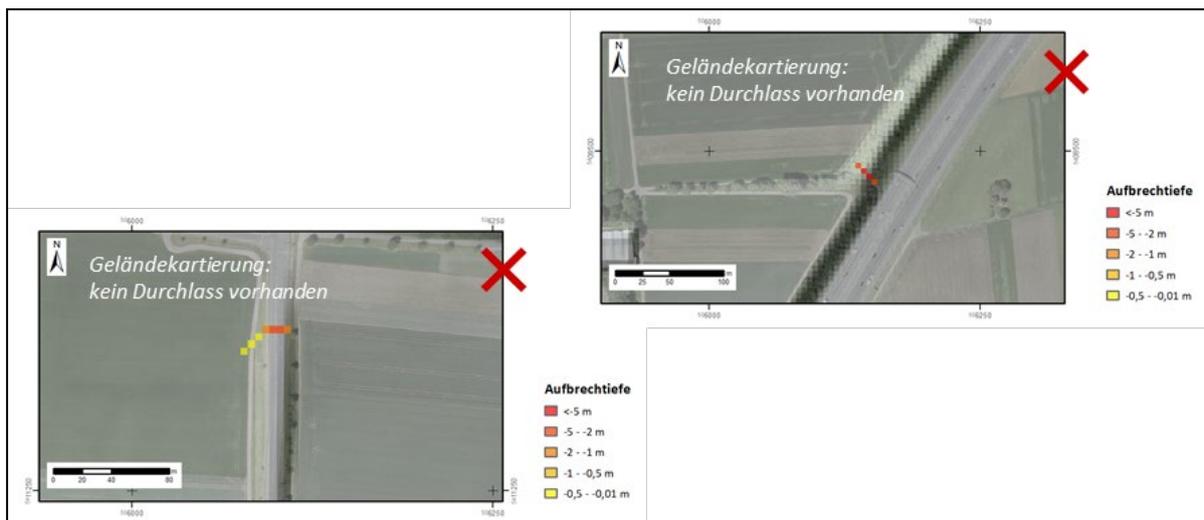


Abb. 12: Beispielsituationen, in denen die Annahmen bzgl. des Vorhandenseins von Durchlässen für das automatisierte Verfahren zur Senkenbehandlung durch die Geländekartierung nicht bestätigt werden konnten

4.3 Landnutzung und landwirtschaftliche Anbaudaten

Analog zum Geländemodell benötigt die Erosionsmodellierung ein Landnutzungsmodell, aus dem z. B. die räumliche Verteilung von Straßen, Wäldern und anderen Landnutzungstypen hervorgeht. Für die Erosionsmodellierung besonders relevant ist eine möglichst akkurate Verortung der angebauten Feldfrüchte, da Erosion insbesondere landwirtschaftliche Flächen betrifft. Auf diesen Flächen können Maßnahmen, wie angepasste Feldfrüchte oder eine Änderung der Bearbeitung, zur Reduktion der Erosion beitragen.

4.3.1 Aufbereitung des Landnutzungsmodells

Als Grundlage zur Ableitung des Landnutzungsmodells wurden die folgenden Layer des ATKIS Basis-DLM bzw. des Liegenschaftskatasters ALKIS genutzt:

- Polygon-Objekte
 - ALKIS_GEBAEUDE
 - BASISDLM_TATSAECHLICHE_NUTZUNG
- Linien-Objekte
 - BASIS_DLM_GEWAESSERACHSE
 - BASIS_DLM_VEGETATION_UND_GELAENDE
 - BASIS_DLM_STRASSEN_ODER_FAHRBAHNACHSE
 - BASIS_DLM_WEGACHSE
 - BASIS_DLM_BAHNSTRECKE

Die Aufbereitung zur Erstellung des Landnutzungsrasters umfasste folgende Bearbeitungsschritte im GIS:

- Selektion der relevanten Objekt(unter)arten (zum Ausschluss von z. B. Tunneln und Brücken)
- Puffern der Linien-Objekte
- Übersetzung der Objekt(unter)arten in die LISEM-/EROSION 3D-Parameterkatalog-Landnutzungs-IDs
- Rastern der Parameter-Landnutzungs-IDs mit Rasterzellenweite des DGMS
- Überlagerung der Raster in der Reihenfolge (von oben nach unten):
 - DLM-Linien-Raster,
 - Schlag-Raster (s. Kap. 4.3.2) und
 - DLM-Polygon-Raster

Die Zuordnung der Objektarten aus dem Basis-DLM und den ALKIS-Daten befinden sich im Anhang (Tab. 16).

4.3.2 Ermittlung der landwirtschaftlichen Schlagabgrenzungen

Die aus dem ATKIS-DLM identifizierten landwirtschaftlichen Flächen müssen für realitätsnahe Landnutzungsszenarien noch weiter differenziert werden, da neben den angebauten Kulturarten auch die Einteilung der Schläge Einfluss auf das Erosionsgeschehen hat. Landesweit stehen Schlaggeometrien aus Datenschutzgründen nicht zur Verfügung.

Für die Ermittlung von Schlagabgrenzungen bieten sich Satellitendaten an. Im Rahmen dieses Projekts wurde auf den bereits aufbereiteten Datensatz ECoLaSS Crop Type Prototype 2018 (<https://www.ecolass.eu/hrl-agriculture>) zurückgegriffen. Dieser umfasst ein Raster (10 m räumliche Auflösung) mit einer pixelbasierten Klassifikation von 19 verschiedenen Kulturartklassen auf Grundlage einer Zeitreihe von Sentinel-1 und Sentinel-2-Satellitendaten für das Jahr 2018. Der Datensatz wurde im Rahmen des EU Horizon2020 Projekts ECoLaSS (Evolution of Copernicus Land Services based on Sentinel data) erzeugt, das die Entwicklung von Prototypen für neue oder verbesserte Copernicus Land Monitoring Services zum Ziel hatte, und wurde für die zukünftige operationelle Integration in Copernicus vorgeschlagen. Eines der Demonstrationsgebiete für den Crop Type Prototyp deckt nahezu ganz Baden-Württemberg ab. Für die thematische Genauigkeit (d. h. die Genauigkeit der Klassifikation) des Datensatzes wird 90 % angegeben.



Die Ermittlung der Schlagabgrenzungen erfolgte, indem zunächst die dominierende ECoLaSS Crop Type-Fruchtartklasse (Abb. 13) je ALKIS-Flurstück (Abb. 14) bestimmt wurde. Anschließend wurden die Flurstücke mit gleicher dominierenden Fruchtartklasse zusammengefasst und mit den Grenzen der ALKIS-Landwirtschaftsflächen (Ackerland, Grünland, Gartenland) zugeschnitten. Im letzten Schritt erfolgte ein Zugschnitt auf die ATKIS-DLM-Ackerflächen. Abb. 15 zeigt beispielhaft die mithilfe des Verfahrens abgeleiteten Schlaggeometrien. Übersetzungen der Legendeneinheiten sind in Tab. 7 enthalten.

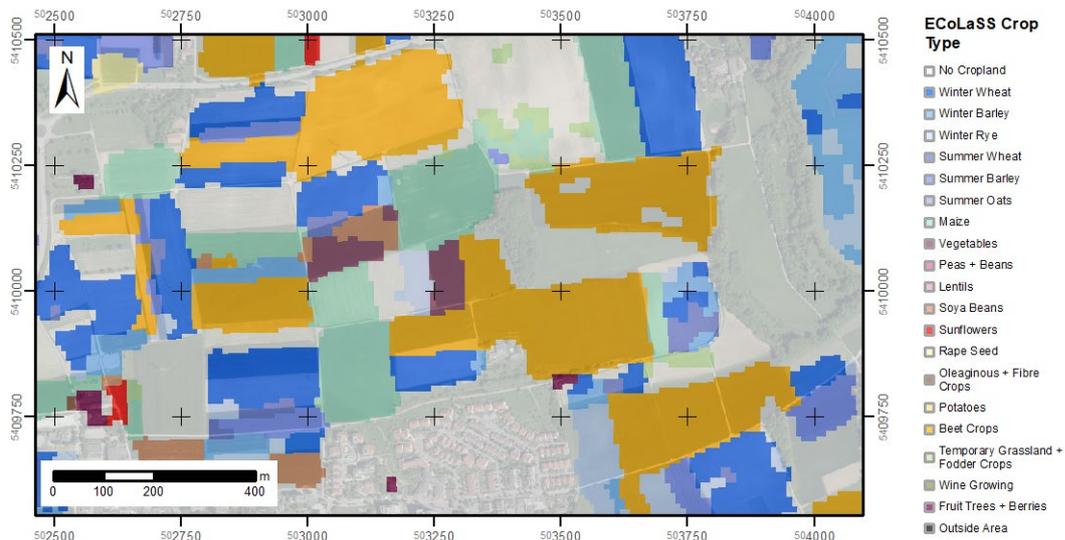


Abb. 13: ECoLaSS Crop Type Prototype 2018

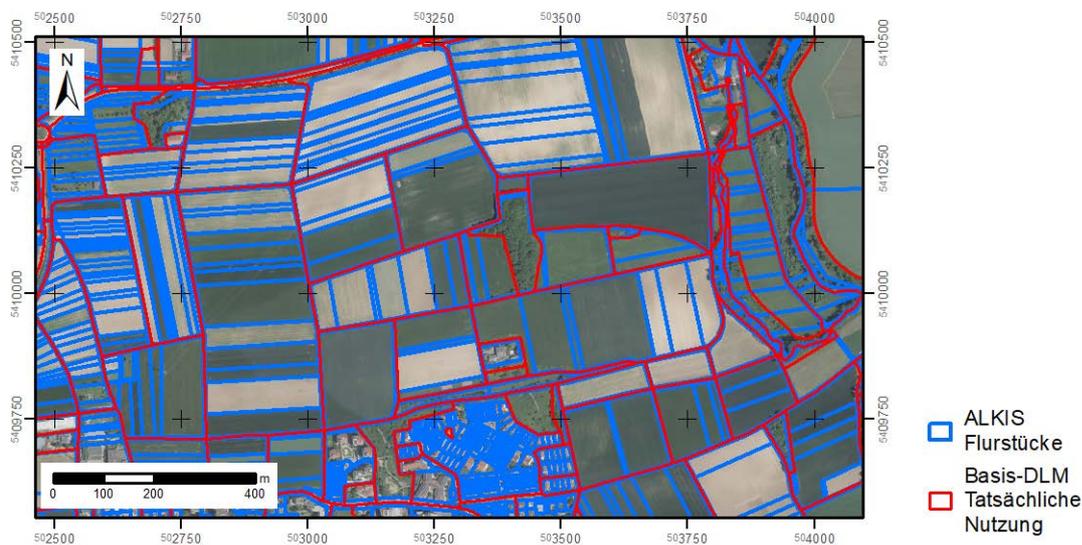


Abb. 14: Geometrien Basis-DLM Tatsächliche Nutzung und ALKIS Flurstücke



Abb. 15: Aus ECoLaSS Crop Type Prototype 2018 und ALKIS Flurstücken abgeleitete Schlaggeometrien

4.3.3 Ableitung vereinfachter Kulturartgruppen

Die im ECoLaSS Crop Type Prototype-Datensatz für das Jahr 2018 verwendeten Kulturartklassen für Ackerflächen wurden den vereinfachten Kulturartgruppen zugeordnet, die nach ihrer jeweiligen Hauptkulturart bezeichnet sind (vgl. Tab. 7). Die Zuordnung zu diesen Gruppen repräsentieren das unterschiedliche Erosions- und Abflussrisiko der Feldkulturen zu unterschiedlichen phänologischen Zeitpunkten. Die NoCropland-Flächen wurden als Grünland klassifiziert. Somit ist für jeden Schlag eine eindeutige Kulturartgruppe zugewiesen. Abb. 16 zeigt den Anteil der im Untersuchungsgebiet vorkommenden vereinfachten Kulturartgruppen.



Tab. 7: Zuordnung der Kulturart in ECoLaSS Crop Type Prototype zu den vereinfachten Kulturartgruppen

Vereinfachte Kulturartgruppe		Kulturart in ECoLaSS Crop Type Prototype	
In diesem Bericht verwendete Bezeichnung*	Zukünftige zu verwendende Bezeichnung*		
Wintergetreide	Wintergetreide u. ä.	Winter Wheat Winter Barley Winter Rye Temporary Grassland + Fodder Crops	Winterweizen Sommergerste Winterroggen Temporäres Grünland + Futterpflanzen
Sommergetreide	Sommergetreide u. ä.	Summer Wheat Summer Barley Summer Oats	Sommerweizen Sommergerste Sommerhafer
Zuckerrübe	Hackfrüchte (früh)	Beet Crops	Rüben
Mais	Hackfrüchte (spät)	Maize Vegetables Peas + Beans Lentils Soya Beans Sunflowers Potatoes	Mais Gemüse Erbsen + Bohnen Linsen Sojabohnen Sonnenblumen Kartoffeln
Raps	Ölfrüchte	Rape Seed Oleaginous + Fibre Crops	Raps Öl- und Faserpflanzen

* Im Nachgang der Abschlussveranstaltung wurden in Abstimmung mit den an der Abschlussveranstaltung beteiligten Landwirten und Teilnehmern aus dem projektbegleitenden Arbeitskreis eine Umbenennung der Hauptfruchtgruppen vorgenommen (siehe Kap. 3.3), die bei dem zukünftigen landesweiten und dezentralen Prozess berücksichtigt werden sollen (siehe Kap. 7).

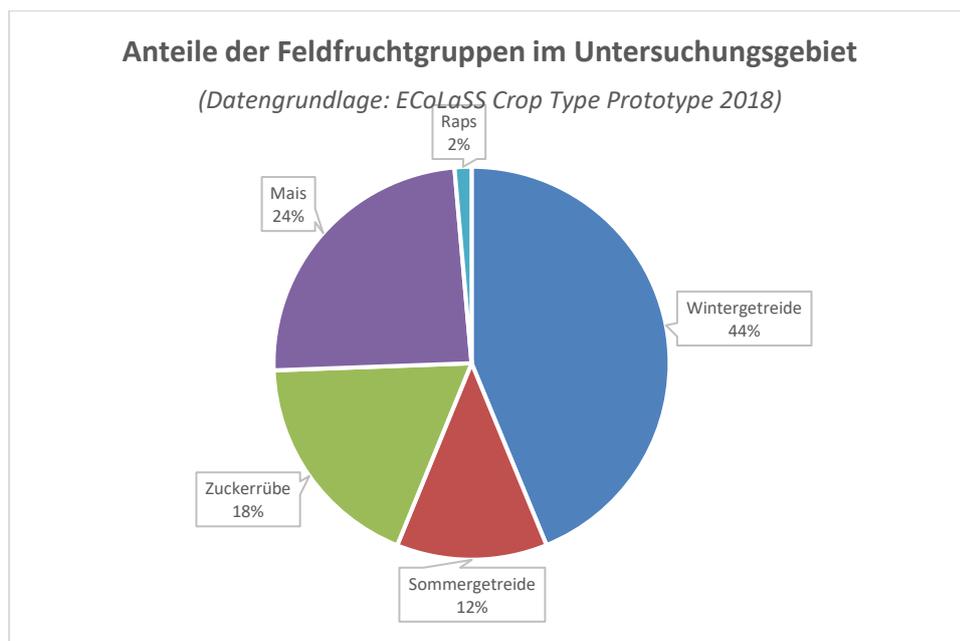


Abb. 16: Anteile der vereinfachten Feldfruchtgruppen im Untersuchungsgebiet auf Grundlage des ECoLaSS Crop Type Prototype 2018



4.3.4 Belegungszenarien

Für das erste Belegungszenario auf den identifizierten landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die Kulturartverteilung entsprechend der Belegung im ECoLaSS Crop Type Prototype-Datensatz für das Jahr 2018 verwendet. Ein exemplarischer Vergleich der Flächenanteile der vereinfachten Feldfruchtgruppen zwischen ECoLaSS Crop Type Prototype-Datensatz 2018 und MLR Ackerstatistik von 2019 für die Gemeinde Ditzingen hatte eine gute Übereinstimmung ergeben (vgl. Anhang 10.1).

Um Reduktionseffekte bei der Umstellung auf andere Feldkulturen abzuschätzen, wurden zu dieser ersten „realen“ Belegung von 2018 drei (September) bzw. vier (April, Juni) weitere Feldfruchtzenarien mittels statistischer Zufallsverteilung erstellt. Hierbei wurde versucht, die Flächenanteile der realen Verteilung der Feldfruchtgruppen beizubehalten und jede Fläche mindestens einmal mit einer erosionskritischen Feldfrucht (je nach Jahreszeit) zu belegen (s. Abb. 17).

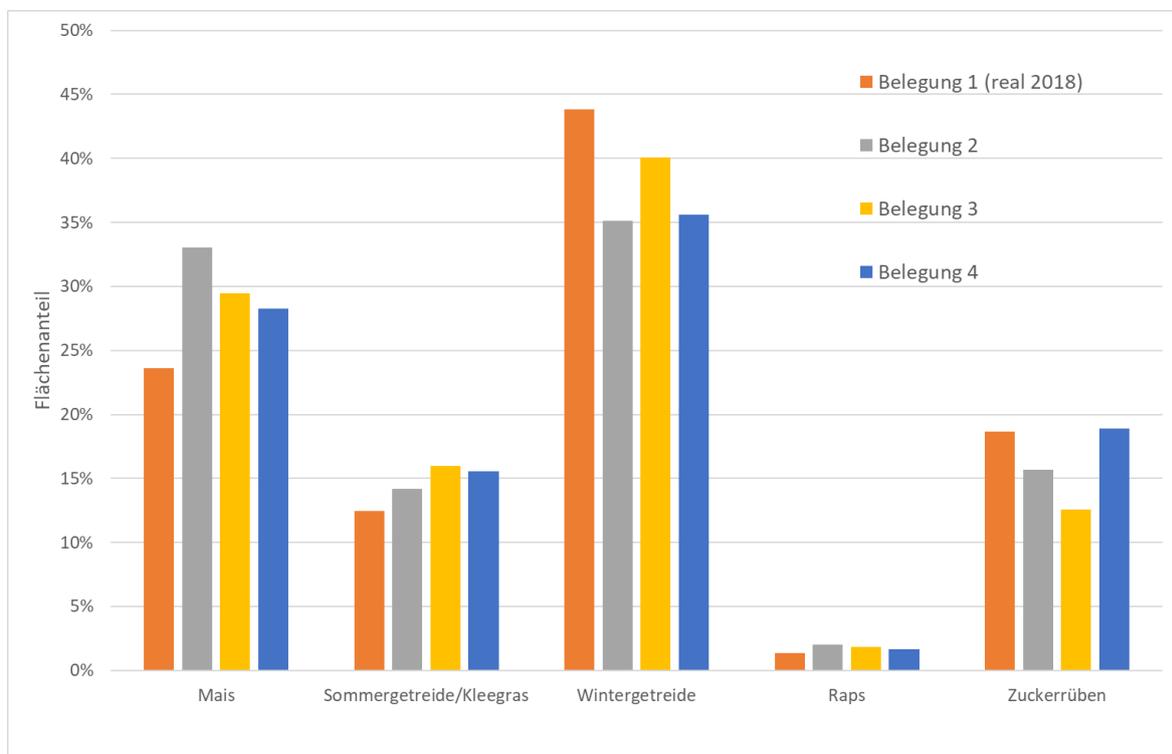


Abb. 17: Flächenanteil der Hauptfeldfruchtgruppen bei den unterschiedlichen Belegungen. Für September-Szenarien wird für „Sommergetreide“ der Anbau der Zwischenfrucht „Kleegras“ angenommen.

Neben den vier Rotationsbelegungen wurden die Ackerflächen zusätzlich noch mit dem flächenhaften Anbau von erosionsmindernden Feldfrüchten (Wintergetreide) belegt und als sog. „Good Case“ bezeichnet. Eine analoge flächendeckende Belegung mit erosionsvulnerablen Feldfrüchten (Mais) wurde als „Nur Mais“ gerechnet, hierbei ist zu beachten, dass dies zu einem Kaskadeneffekt durch Ausflüsse aus Mais- in Maisflächen führen kann, was wiederum eine deutliche Überschätzung von Erosions- bzw. Depositionsprozessen zur Folge hätte.

Aus den Szenarien mit den Rotationsbelegungen 1 bis 3 bzw. 4 wurden pixelgenau die maximalen Erosions- und Depositionsraten zum sog. Bad Case abgeleitet (s. Abb.

18). Bei Pixeln, auf denen zwischen den Szenarien ein Wechsel von Erosion und Deposition stattfindet, geht der höchste Erosionswert in die Bad-Case-Karte ein. Es handelt sich hierbei also nicht um separat durchgeführte Simulationen mit den Erosionsmodellen (vgl. Kap. 5.2). Mit der Ableitung des Bad-Case-Szenarios soll besonders der Kaskadeneffekt des Nur-Mais Szenarios vermieden werden.

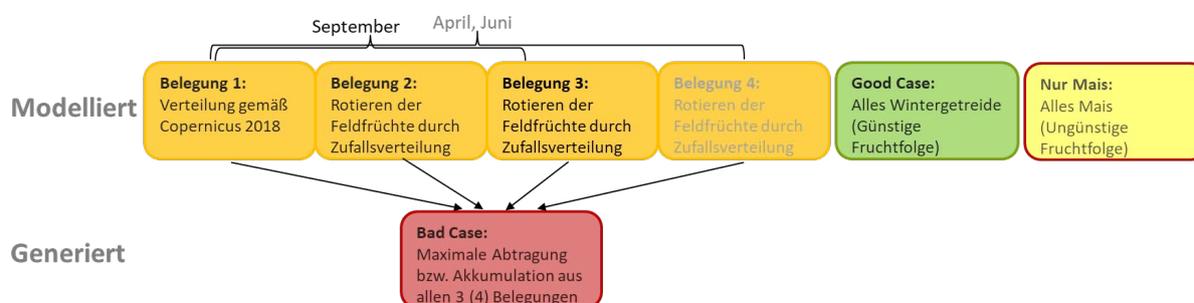


Abb. 18: Schema zu den Belegungsszenarien

4.3.5 Zeitpunkte

Für die Rechenläufe wurden die folgenden drei Zeitfenster unter Berücksichtigung der Saison konvektiver Starkregenereignisse sowie der Bodenbearbeitungszeitpunkte bzw. der Zeiträume mit geringer Bodenbedeckung der verschiedenen Ackerkulturararten ausgewählt:

- Mitte April
- Ende Juni
- Ende September

Konvektive Starkregenereignisse sind in Deutschland im Wesentlichen auf die Monate April bis September konzentriert (https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilung/DE/2021/20210826_pm_beh%C3%B6rdenallianz_news.html). Bezüglich Bodenerosion sind damit insbesondere das späte Frühjahr sowie der Herbst kritisch, weil zu diesen Zeiten die Bodenbearbeitung und Bestellung verschiedener Kulturararten erfolgt. Auf Flächen mit entsprechend bestellten Kulturararten ist die Vegetationsbedeckung zu diesen Zeitpunkten minimal und die Störung des Bodengefüges maximal. Des Weiteren wurde „Ende Juni“ als Zeitfenster mit deutlich gesteigerter Starkregenwahrscheinlichkeit bei gleichzeitig noch nicht vollständiger Entwicklung der spätdeckenden Kulturararten (insbes. Mais) gewählt.

Im weiteren Projektverlauf wurde zudem das Dashboard „Kataloge der Starkregenereignisse“ (<https://wetterdienst.maps.arcgis.com/apps/dashboards/a490b2b390044ff0a8b8b4c51aa24c60> (letzter Zugriff am 17.11.2022)) des DWDs bzgl. der Saisonalität von Starkregenereignisse in Baden-Württemberg ausgewertet (vgl. Abb. 19). Demnach konzentriert sich das Auftreten von Starkniederschlägen kurzer Dauer (1 h) nahezu ausschließlich auf die Monate Mai bis September mit den größten Häufigkeiten im Juni und Juli.

Für zukünftige landesweite Simulationen wird daher aufgrund der sehr geringen Auftretswahrscheinlichkeit von Starkregenereignissen im April empfohlen, den Monat Mai als Zeitfenster zu wählen.

In Tab. 8 sind die Entwicklungsstadien bzw. Bodenbearbeitungszustände aufgeführt, die für die verschiedenen Kulturararten aus den Angaben für Baden-Württemberg in der

phänologischen Jahresstatistik (jeweils mittleres Beobachtungsdatum in Baden-Württemberg (1992-2020) https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno_sta/phaenosta.html) des DWDs abgeschätzt wurden.

Tab. 8: Zuordnung phänologischer Entwicklungsstadien für verschiedene Kulturarten; Sz. = Saatzeitpunkt

Fruchtartgruppe	Zustand/Stadium		
	Sz. 1: Mitte April	Sz. 2: Ende Juni	Sz. 3: Ende September
Wintergetreide	Schossen	Fruchtbildung - Reife	Saatbett-/Bestellung bzw. Fruchtwechsel
Winterraps	Blühbeginn	Fruchtbildung	Blattentwicklung
Sommergetreide	Auflaufen-Schossen	Blüte	Zwischenfrüchte (Bestandsentwicklung)
Zuckerrüben	Saatbett/Auflaufen	Bestand (geschlossen)	geerntet (Fruchtwechsel)
Mais (Silomais)	Saatbett	Schossen	Stoppeln

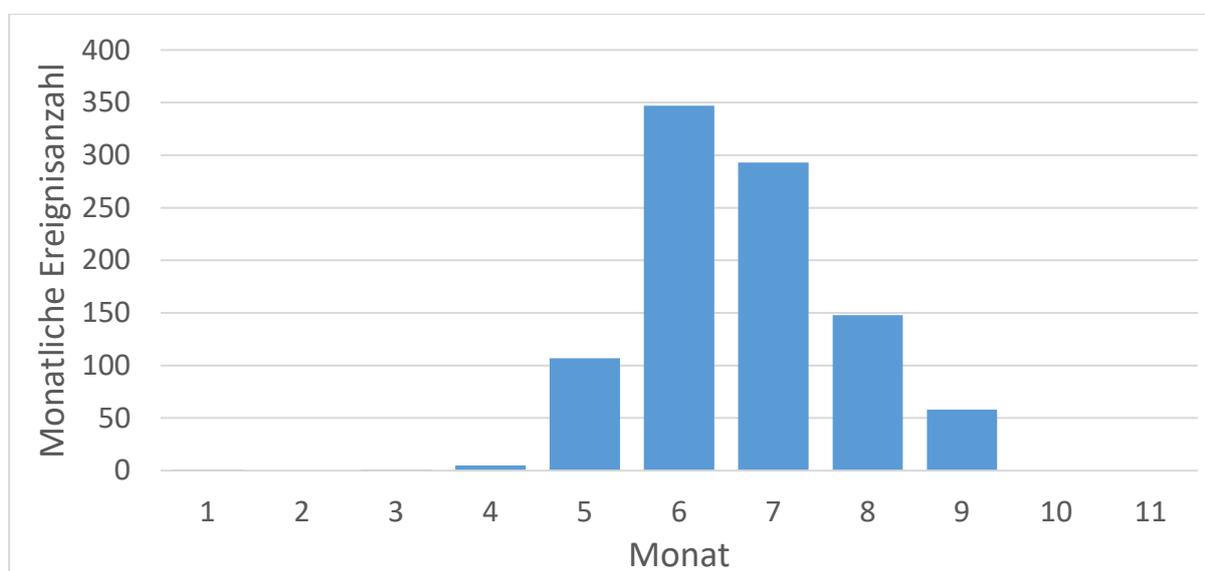


Abb. 19: Monatliche Anzahl der Starkregenereignisse in Baden-Württemberg 2001–2021 (Dauerstufe: 1 h, Katalog: W3_Eta), Datengrundlage: DWD Kataloge radar-basierter starker Niederschlagsereignisse (CatRaRE) Dashboard (<https://wetterdienst.maps.arcgis.com/apps/dashboards/a490b2b390044ff0a8b8b4c51aa24c60> (letzter Zugriff am 17.11.2022))

4.4 Bodendaten

Als Primärinformation zu den Bodendaten wurde die Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:50 000 (GeoLa BK50) für das Glems-Gebiet herangezogen. Die Profilangaben für jede Bodenkundliche Kartiereinheit (KE) umfassen Angaben zu zwei verschiedenen Bodenartenschichten nach BK5011. Im Untersuchungsgebiet liegen 139 Kartiereinheiten der BK 50 vor, wobei eine Kartiereinheit mehreren, voneinander getrennten Flächen zugeordnet sein kann. Den Kartiereinheiten wurden sowohl für openLISEM als auch für EROSION 3D jeweilige IDs zugeordnet. Für die Simulation mit openLISEM wurde die Bodenkarte in GeoTIFFs in 1 m, 5 m und 10 m konvertiert, für EROSION 3D erfolgte die Konvertierung mit dem Hilfsprogramm DPROC.



Die Bodendaten werden zusammen mit den Landnutzungsdaten (Kap. 4.3) zur Modellparametrisierung verwendet (vgl. Kap. 5.3).

4.5 Niederschlagsdaten

Niederschlagsdaten des Starkregenrisikomanagements (SRRM) wurden für drei Auslegungsszenarien zur Verfügung gestellt. Die Szenarien umfassen ein *seltene* (Wiederkehrintervall 30 Jahre), ein *außergewöhnliches* (Wiederkehrintervall 100 Jahre) und ein *extremes* (höchste aufgezeichnete Niederschlagsmenge in Baden-Württemberg in einer Stunde) Ereignis. Die Ereignisse wurden aus einer 346 Stationen umfassenden Niederschlagsstatistik für den Zeitraum von 1950 bis 2015 (mit Schwerpunkt auf 2000 – 2015) abgeleitet (LUBW 2016a, 2016b).

Die zur Verfügung gestellten Niederschlagsrasterdaten liegen in einem 5x5 m Raster vor, wobei die räumliche Datengenauigkeit ein 1x1 km Raster repräsentiert. Jeder Zeitschritt ist in einem separaten georeferenzierten Raster gespeichert. Die drei Niederschlagsszenarien umfassen jeweils eine Dauer von 1 Stunde, aufgeteilt in sechs Zeitschritte zu je 10 Minuten. Einzelne Rasterzellen der Niederschlagsraster enthalten Leerwerte, welche anhand der Werte der umliegenden Zellen gefüllt wurden. In Summe ergeben sich aus den Niederschlagsverläufen (Abb. 20) in dem betrachteten Zeitabschnitt von 1 Stunde 128 mm für das *extreme* Ereignis, zwischen 49 und 57 mm für das *außergewöhnliche* Ereignis und zwischen 38 und 45 mm für das *seltene* Ereignis. Diese Ereignisse liegen damit in der Niederschlagssumme niedriger als die von Assmann et al. (2012) beschriebenen 180 mm, die allerdings über zwei Stunden verteilt auftraten.

Aus den zur Verfügung gestellten Rastern wurden für jede 1x1 km Rasterzelle Stationsnummern für openLISEM abgeleitet und für jede modellierte räumliche Auflösung reprojiziert. Der Niederschlagsverlauf dieser Stationen wurde für jedes Niederschlagsszenario in eine Tabelle übertragen, die den Anforderungen von openLISEM entspricht. Die Niederschlagswerte wurden von mm/5 min in mm/h umgerechnet.

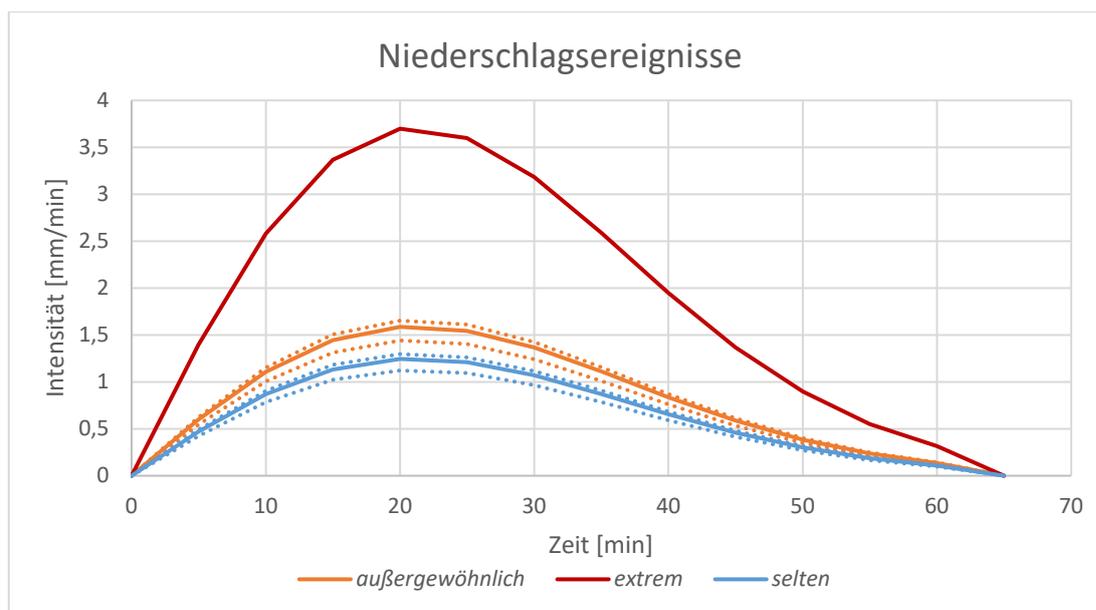


Abb. 20: Zeitlicher Verlauf der Niederschlagsereignisse. Für die Ereignisse *außergewöhnlich* und *seltene* ist die Spannweite aller Einzelstationen im Untersuchungsgebiet dargestellt.

Für EROSION 3D wurden die einzelnen Zeitschrittraster für jede modellierte räumliche Auflösung reprojiziert und als gestapelte Rasterdateien („Rasterstack“) dem Modell zur Verfügung gestellt. Die einzelnen Rasterdateien wurden in einer Textdatei für EROSION 3D referenziert. Die Niederschlagswerte wurden von mm/5 min in mm/min umgerechnet.

5 Erosionsmodellierung mit den Modellen openLISEM und EROSION 3D

5.1 Modellbeschreibungen und -anwendungen

Physikalisch-prozessorientierte Modelle können durch ihre hohe räumliche und zeitliche Auflösung die Prozesse einzelner Starkregenereignisse wiedergeben sowie Erosions-, Transport- und Depositionsflächen in Einzugsgebieten identifizieren. Aufgrund ihrer rasterbasierten räumlichen Diskretisierung eignen sie sich zur Planung von landwirtschaftlichen Nutzungsvarianten und zur Dimensionierung von Erosionsschutzmaßnahmen. Durch die explizite Beschreibung wesentlicher Prozesse ist eine Modellierung von unbekanntem Zuständen plausibler möglich als mit rein empirischen Ansätzen.

Eine Validierung der Modellergebnisse kann für jeden im Modell beinhalteten Teilprozess erfolgen, ist aber üblicherweise im Rahmen der landwirtschaftlichen Planung aufgrund fehlender Beobachtungsdaten nicht möglich. An dieser Stelle kann entweder auf validierte ähnliche Modellierungen verwiesen werden (z. B. Starkloff und Stolte (2014), vgl. Kap. 5.5.3), oder ein Vergleich unterschiedlicher Modellierungsansätze erfolgen. Im Rahmen dieses Projekts werden die beiden Modellierungswerkzeuge EROSION 3D und openLISEM vergleichend angewandt. Beide Werkzeuge wurden in verschiedenen Studien validiert und sind in der Planungspraxis bewährt.

5.1.1 openLISEM

Für die Erosionsmodellierung wird das kostenfreie, physikalisch-rasterbasierte LISEM (Limburg Soil and Erosion Model), openLISEM Version 6.80, verwendet (University of Twente 2018). Es kann unter folgendem Link heruntergeladen werden: <https://sourceforge.net/projects/lisem/files/openLisem%20%28classic%29/>. Die zeitliche Auflösung im Erosionsmodell ist frei wählbar, der minimale Zeitschritt liegt bei 1 Sekunde und die maximale Zeitschrittzahl ist unbegrenzt. Dabei kann LISEM folgende hydrologische Prozesse simulieren: korrigierter Niederschlag, Interzeption, Muldenspeicherung, Infiltration (mit unterschiedlichen Ansätzen) und Wasserleitfähigkeit des Bodenprofils, Oberflächen- und Gerinneabfluss (s. Abb. 21). Die Erosionsprozesse gliedern sich in

- Bodenerosion durch Niederschlag (Splash Detachment),
- Bodenerosion durch Oberflächenabfluss (Flow Detachment),
- Transportkapazität und Deposition.

Aufbau und Prozesse von openLISEM

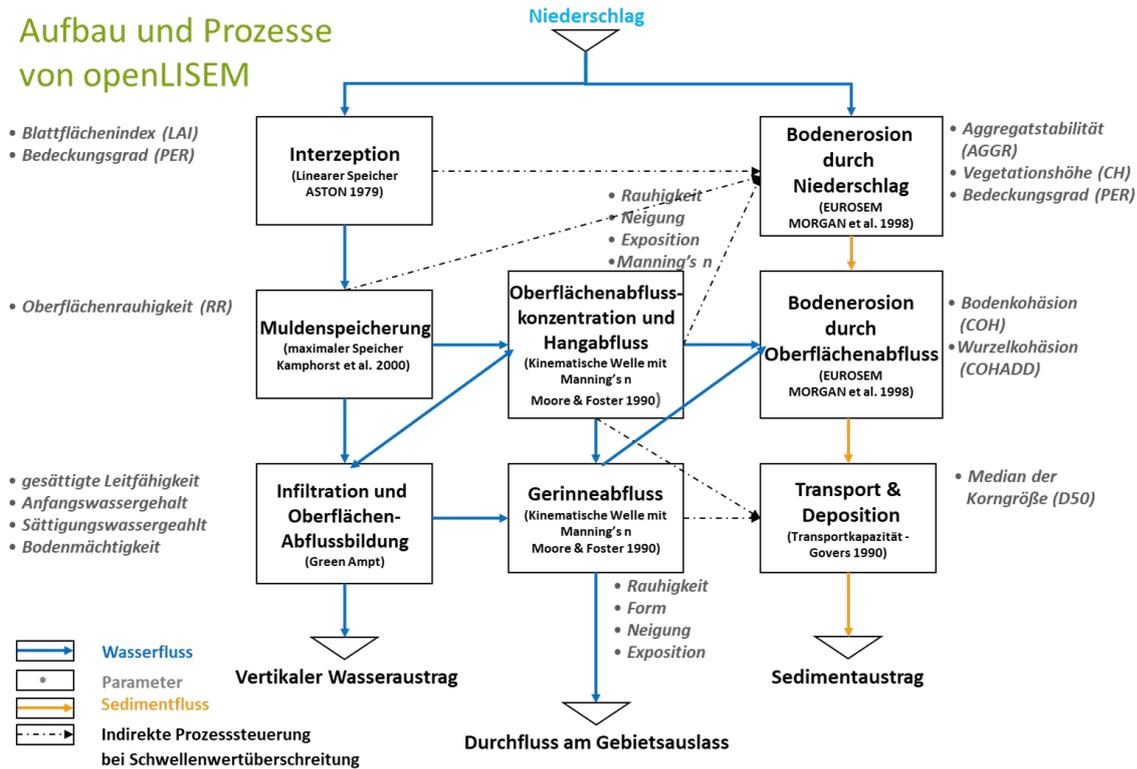


Abb. 21: Prozessablauf und benötigte Parameter in LISEM (nach Jetten 2002, verändert nach Hölzel 2009)

LISEM, das ursprünglich für die lössgeprägte Provinz Limburg in den Niederlanden entwickelt wurde, ist bereits in zahlreichen Ländern weltweit angewendet und validiert worden und frei verfügbar.

LISEM wurde bereits in einem Modellvergleich im Rahmen des KLIWA-Kooperationsvorhabens von den Projektbearbeitern als am besten geeignetes Erosionsmodell ermittelt (vgl. Assmann et al. 2009). Im Folgeprojekt „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ kam es dann zum Einsatz, um das gegenwärtige und zukünftige Erosionsrisiko an sensiblen Modellstandorten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz abzuschätzen (Schipper et al. 2014). Im Teilprojekt „Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen (KliStaR)“ des Forschungsprogramms „Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg“ (KLIMOPASS) wurde LISEM ebenfalls eingesetzt. Hierbei wurden von geomer in Kooperation mit terra fusca ingenieure (ehemals: bodengut) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt in Freiburg Umsetzungsdefizite bei der Klimaanpassung in kommunalen Außenbereichen erfasst und ein Maßnahmenkatalog für eine angepasste Bodenbewirtschaftung und Erhöhung der Infiltration bereitgestellt (Billen et al. 2017). Außerdem wurde das Erosionsmodell von den Projektbearbeitern in weiteren Projekten bereits angewandt und plausibilisiert (Interreg III AMEWAM-Projekt (Agricultural measures for water management and their integration into spatial planning): Assmann et al. 2006, Sedimentdargebot des Lippe-Einzugsgebiets – Pilotstudie Seseke: Assmann et al. 2016). Dadurch liegen Erfahrungen und Parameter-Datensätze für Baden-Württemberg vor. Dies sichert eine effektive Anwendbarkeit und zudem verfügbare Vergleichsergebnisse. Aus verschiedenen gemeinsamen Projekten besteht eine enge Verbindung zur Universität Twente. Bei Problemen kann direkt der Entwickler kontaktiert werden.

5.1.2 EROSION 3D

Für die Erosionsmodellierungen kommt auch das physikalisch-begründete und rasterbasierte Modell EROSION 3D (GeoGnostics 2021) in der Version 3.3.2.2 zum Einsatz. Die Simulation erfolgt ereignisbasiert für einzelne Niederschlagsereignisse. Die theoretischen Grundlagen wurden durch Schmidt (1991) erarbeitet und in die Einzugsgebietsversion EROSION 3D durch von Werner (1995) umgesetzt. Ziel war es, ein einfach zu handhabendes Werkzeug zur Erosionsprognose für die Planung und Bewertung von Boden- und Gewässerschutzmaßnahmen zu schaffen (Schmidt 1996). Das Modell besteht aus zwei Hauptteilkomponenten: Das Infiltrations- und Abflussmodell umfasst die Prozesse Niederschlag, Infiltration (Einschicht- oder Mehrschichtbodenprofil), Oberflächenabflussbildung und -bewegung (s. Abb. 22). Das Erosionsmodell simuliert die Ablösung der Bodenpartikel durch Tropfen, die Ablösung der Bodenpartikel durch den Oberflächenabfluss, den Transport der Bodenpartikel sowie die Deposition der Bodenpartikel und erfolgt differenziert nach den Kornfraktionen.

Aufbau und Prozesse von EROSION-3D

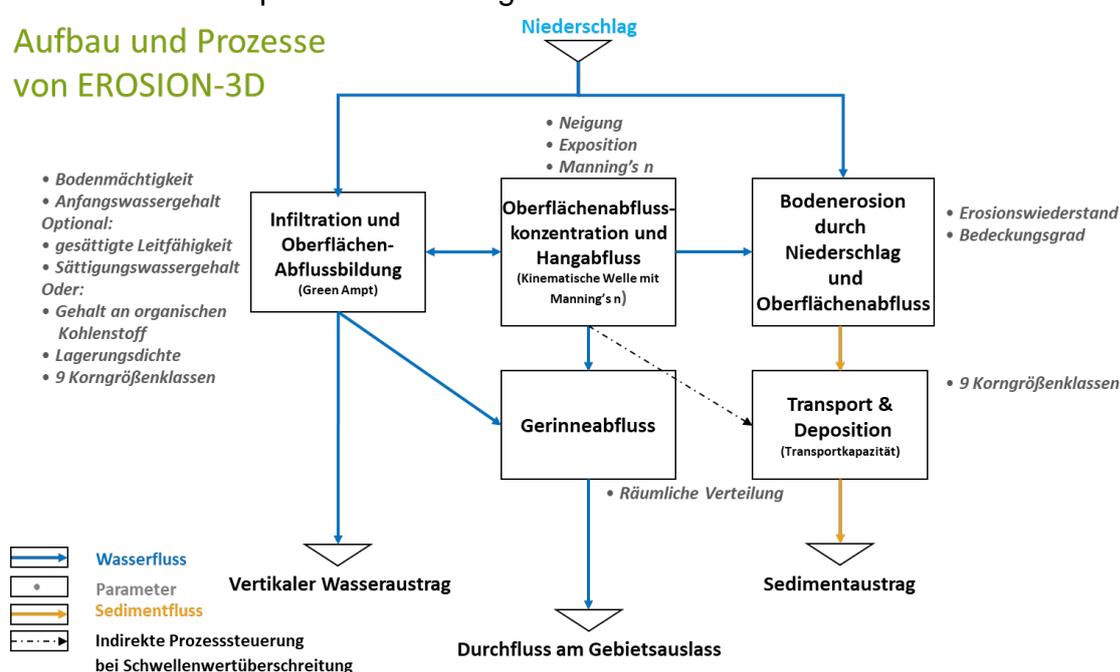


Abb. 22: Prozessablauf und benötigte Parameter in EROSION 3D (Darstellung auf Grundlage von Schmidt 1996 und GeoGnostics 2021)

Es erfolgt eine Differenzierung in Oberflächenabfluss und Vorfluterabfluss. Des Weiteren können optional der Einfluss von Wind auf den Niederschlag, von Bodengefrorenis auf die Infiltration, von Schneeschmelze auf die Abflussbildung sowie der Bearbeitungsrichtung bei Dammkulturen auf die Fließrichtung berücksichtigt werden. Zur Simulation des Wasser- und Sedimentretention in Rückhaltebecken steht in EROSION 3D ein entsprechendes Modul zur Verfügung. Je nach Zielstellung und Gebiet wird für die Simulation üblicherweise eine räumliche Auflösung zwischen 1 m und 20 m (entsprechend der Auflösung des Digitalen Geländemodells) und die Verwendung von Niederschlagsdaten mit einer zeitlichen Auflösung zwischen 1 min und 10 min empfohlen. Multithreading wird softwareseitig standardmäßig unterstützt. Im Rahmen umfangreicher Feldversuche (u. a. Bodenerosionsmessprogramm Sachsen 1992-1996) in langjähriger Zusammenarbeit mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und der TU Bergakademie Freiberg

wurde EROSION 3D validiert und eine umfangreiche Datenbasis der Modellparameter geschaffen (u. a. Michael et al. 1996).

Sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis ist EROSION 3D seit seiner Entstehung häufig und in Untersuchungsgebieten weltweit zum Einsatz gekommen, darunter in mehreren Projekten zur Erarbeitung von Erosionsschutzkonzepten für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung und Flurbereinigungsverfahren. Auch in den Landwirtschaftsverwaltungen in Baden-Württemberg wurde EROSION 3D bereits eingesetzt (Unterseher et. al. 2012).

Aus dem FuE-Vorhaben (2018 – 2020) zur „Erarbeitung von Szenarienkarten Wassererosion mit EROSION 3D für Ackerflächen Sachsens“ (von Werner und Langel 2022) im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) liegen bei GeoGnostics und IPROconsult bereits umfangreiche Erfahrungen in der landesweiten Anwendung des Modells aus Sachsen vor.

Aufgrund der langjährigen Kooperation von IPROconsult mit GeoGnostics sowie der gemeinsamen Weiterentwicklung von EROSION 3D kann bei eventuellen Problemen mit der Modellsoftware direkt eingegriffen werden.

5.1.3 Konzeptionelle Ähnlichkeiten und Unterschiede

Beide Erosionsmodelle enthalten hydrologische und hydraulische Prozesskomponenten zur Beschreibung von Infiltration und Abflussverteilung auf Basis von Niederschlags-, Boden- und Reliefinformationen.

Auf Grundlage hydraulischer Prozesse können beide Modelle die Ablösung, den Transport und die Ablagerung von Partikeln beschreiben. Bei der Ablösung von Partikeln werden in LISEM zwei Eingabeparameter (Aggregatstabilität und Kohäsion) zur differenzierten Beschreibung von Splash und Rillenerosion geführt, während in EROSION 3D beide Prozesse zusammen durch den Parameter Erosionswiderstand beschrieben werden.

Von den in LISEM betrachteten Prozessen (Abb. 21) wird in EROSION 3D Interzeption und Muldenspeicherung vernachlässigt (Abb. 22). Die Eingabeparameter des Infiltrationsmodells (Saugspannung an der Befeuchtungsfront, gesättigte Leitfähigkeit) schätzt EROSION 3D aus einfach zugänglichen Parametern (Gehalt organisch gebundener Kohlenstoff, Textur, Lagerungsdichte, Anfangswassergehalt). EROSION 3D zeigt somit eine gegenüber LISEM vereinfachte Prozessbeschreibung und benötigt dadurch weniger bzw. einfacher zu erhebende Eingabedaten. Die auf landwirtschaftlichen Flächen relevante Infiltrationskomponente „Makroporen“ kann in beiden Modellen über Anpassung von Parameterwerten (Skinfaktor in EROSION 3D, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in LISEM) berücksichtigt werden.

Beide Modelle nutzen rasterbasierte verteilte Eingabedaten, womit sich wesentliche Fließpfade für Wasser und Sediment aus den Reliefeingabedaten ergeben, wenn die Rasterweite ausreichend klein ist. Einzelne Prozesse, die sich nicht aus der Auflösung der Eingabedaten ergeben (z. B. Rillenerosion bei einer Rasterweite > 1 m), werden über aggregierende Parameterwerte (z. B. die hydraulische Rauigkeit oder Erosionswiderstandswerte) wiedergegeben. Insbesondere bei großer Rasterweite können weitere Prozesse nicht mehr in den Eingabedaten dargestellt werden (z. B. Gewässer bei Rasterweite > 10 m). Beide Modelle und die zur Parametrisierung nutzbaren Parametertabellen stimmen mit dem im Projekt anvisierten Rastergrößenbereich von 1 m bis 10 m überein.

Eine detailliertere Gegenüberstellung der Modellansätze in openLISEM und EROSION 3D zur Beschreibung findet sich in Starkloff und Stolte (2014). Zu beachten ist jedoch, dass insbesondere openLISEM im Vergleich zur dort betrachteten Version (2.58) in der Zwischenzeit deutlich erweitert worden ist.

Bei der hydraulischen Modellierung im Rahmen des SRRM liegt der Fokus auf der Modellierung des Wasserabflusses bei gegebenem Infiltrationsüberschuss (OAK-Werte, Effektivniederschlag). Die Modellierung der Infiltrationsprozesse ist damit kein eigentlicher Bestandteil des SRRM. Im Gegensatz dazu muss bei der Erosionsmodellierung die Niederschlagsintensität (und nicht nur der Effektivniederschlag) eingehen, da sonst die Partikellösung durch auftreffende Regentropfen nicht berücksichtigt werden kann.

Im Rahmen der Hydraulik im SRRM stehen die Fließwege und die Beeinflussung derselben durch Strukturen im Vordergrund. Ebenso sind Rückstauphänomene und Fließverteilung bei der Modellierung besonders relevant. Diese lassen sich bei den Erosionsmodellen, ebenso wie Verrohrungen und komplexere hydraulische Phänomene, nicht in der detaillierten Form abbilden. Fließgeschwindigkeiten spielen im SRRM vor allem im Siedlungsbereich auf glatten Oberflächen eine Rolle und sind im Bereich der Landwirtschaft aufgrund der Vereinfachungen bei den angenommenen Kulturen und Bodenbedeckung nur bedingt aussagekräftig.

5.1.4 Vergleich der Eingabeparameter

Eine ausführliche Auflistung der Eingabeparameter von openLISEM und EROSION 3D findet sich im Anhang (Tab. 17, Tab. 18).

Der Vergleich bezüglich gemeinsamer Eingabeparameter bei den Boden- und Landnutzungseingabeparametern zwischen beiden Modellen ergab, dass folgende Parameter bei beiden Erosionsmodellen identisch sind:

- hydraulische Rauigkeit [$s\ m^{-1/3}$]
- Bodenbedeckungsgrad [-] in openLISEM bzw. [%] in EROSION 3D
- Anfangswassergehalt [-] in openLISEM bzw. [Vol. -%] in EROSION 3D
- Sättigungswassergehalt [-] in openLISEM bzw. [Vol. -%] in EROSION 3D (optionaler Eingabeparameter in EROSION 3D)
- Gesättigte Leitfähigkeit [mm/h] in openLISEM bzw. [m/s] in EROSION 3D (optionaler Eingabeparameter in EROSION 3D)

Bei den übrigen Parametern bestehen zwar meist Gemeinsamkeiten in den berücksichtigten Bodeneigenschaften (z. B. Korngrößenverteilung), jedoch werden diese über unterschiedliche Parameter in den beiden Modellen berücksichtigt (z. B. Median Korndurchmesser [μm] in openLISEM bzw. Anteile der 9 Kornfraktionen [Gew.-%] in EROSION 3D).

Unterschiede bestehen außerdem bei der Zahl der möglichen Bodenschichten. Während bei openLISEM bei der hier angewendeten Infiltrationsmethode (Green-Ampt) lediglich zwei unterschiedliche Bodenschichten parametrisiert werden können, sind dies bei EROSION 3D beliebig viele.

5.1.5 Vergleich der Ausgabedaten

Die Ergebnisse der Simulationen wurden im jeweiligen Output-Verzeichnis abgelegt. Umfang der Ausgaben sind über Optionen steuerbar.



Bei openLISEM können zudem unterschiedliche Rasterformate (PCRaster, GeoTIFF) und Einheiten der Ausgabedaten bestimmt werden. Neben den Erosions- und Depositionskarten sowie hydrologischen Karten, werden die Resultate auch als Sediment- und Wasserganglinien pro Zeitschritt erzeugt (s. Abb. 23).

Standardmäßig werden bei openLISEM die Ergebnisse des Gesamtgebiets (z. B. Gesamtbodenabtrag, Gesamtabfluss, Gesamtniederschlag) als Bild- und Textdatei (*.csv) generiert. Außerdem wird eine zonale Statistik des Gesamtbodenabtrags, der Erosion und Deposition nach den unterschiedlichen Nutzungseinheiten erstellt (landunit.csv). Daneben können optional weitere Karten als Zeitreihen ausgegeben werden.

Abb. 23: Ausgabedateien von openLISEM (Version 6.80)

Die Ausgabeparameter von EROSION 3D umfassen sowohl zellen- als auch einzugsgebietsbezogene (querschnittsbezogene) Größen zum Wasser- und Sedimentfluss (vgl. Abb. 24).

Diese können als Raster ausgegeben werden, wobei als Dateiformate GeoTIFF oder SAGA GIS Binary Grid wählbar sind. Für die einzelnen Ausgabeparameter ist zwischen keiner Ausgabe, einer Ausgabe für jedes Intervall und einer Ausgabe für das letzte Intervall des Ereignisses wählbar.

Neben den Ergebnisrastern ist ein tabellarischer Output von Zeitreihen (als csv-Datei) der Ausgabeparameter für über ein Grid oder eine Tabelle zu definierende Rasterzellen möglich.

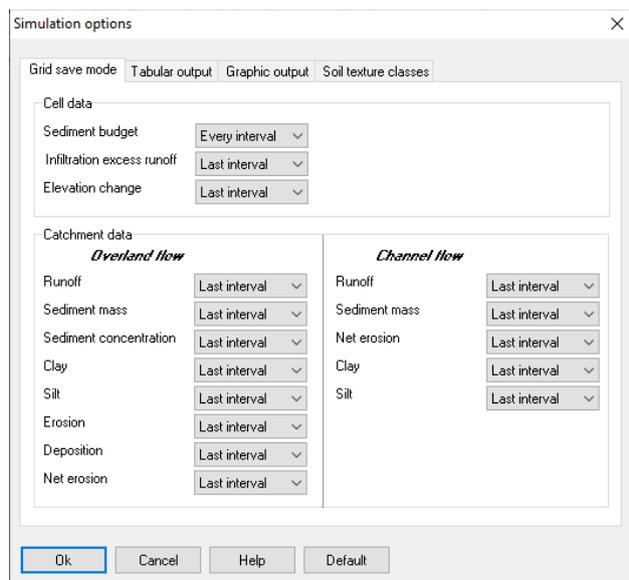


Abb. 24: Ausgabedateien von EROSION 3D (Version 3.3.2.2)

Eine detaillierte tabellarische Übersicht der Ausgabedaten der beiden Erosionsmodelle sind im Anhang zu finden (s. Tab. 19 und Tab. 20).

5.2 Szenariofestlegungen

Neben dem Einfluss der Modellierungswerkzeuge (openLISEM bzw. EROSION 3D) wurde die Auswirkung der folgenden Einflüsse auf die Modellergebnisse mit Szenarien gezielt untersucht:

- die gewählte Rasterauflösung zur Abschätzung der Genauigkeit und des Rechenaufwandes der Modellierung,
- die Änderungen der Ackerkulturverteilung zur Darstellung verschiedener Belegungszenarien (Good Case, Realbelegung, Belegungsrotation, Nur Mais) der landwirtschaftlichen Flächen (s. Kap. 4.3.4),
- die Niederschlagsszenarien entsprechend der SRRM-Szenarien und
- der phänologische Zeitpunkt als erosionsrelevante Eigenschaft der landwirtschaftlichen Flächen (s. folgende Erläuterung).

Aus der Kombination dieser Einflüsse ergibt sich eine Vielzahl an möglichen Szenarien. Zur Begrenzung des Modellierungs- und Auswerteaufwandes wurden die tatsächlich berechneten Szenarien eingegrenzt. Alle im Rahmen des Projekts durchgeführten Szenarienmodellierungen sind in Tab. 9 aufgeführt. Das Realbelegungszenario in 5 m Auflösung des Gesamtgebiets im April mit *außergewöhnlichem* Niederschlag wird dabei als Referenzszenario für weitergehende Vergleiche herangezogen.



Tab. 9: Übersicht über die im Projekt durchgeführten Modellläufe (Kennzeichnung mit „X“); Simulationen mit 1 m Auflösung wurden für das Teilgebiet Ditzingen gerechnet, alle anderen für das gesamte Glemsgebiet.

Zeitpunkt	Niederschlagsereignis	Ackerkulturverteilung	5 m		1 m		10 m	
			LISEM	E3D	LISEM	E3D	LISEM	E3D
Mitte April	selten	Belegung 1 (Real 2018)	X	X				
		Belegung 2		X				
		Belegung 3		X				
		Belegung 4		X				
		Good Case		X				
	außergewöhnlich	Belegung 1 (Real 2018)	X	X	X	X	X	X
		Belegung 2	X	X	X	X		
		Belegung 3	X	X	X	X		
		Belegung 4	X	X				
		Good Case	X	X	X	X		
		Belegung 1 (Real 2018) konservierende Bodenbearbeitung		X				
	Nur Mais	X	X					
	extrem	Belegung 1 (Real 2018)	X	X				
		Belegung 2	X					
		Belegung 3	X					
		Belegung 4	X					
		Good Case	X					
Ende Juni	selten	Belegung 1 (Real 2018)		X				
		Belegung 2						
		Belegung 3						
		Belegung 4						
		Good Case						
	außergewöhnlich	Belegung 1 (Real 2018)	X	X				
		Belegung 2		X				
		Belegung 3		X				
		Belegung 4		X				
		Good Case		X				
	extrem	Belegung 1 (Real 2018)		X				
		Belegung 2						
		Belegung 3						
		Belegung 4						
		Good Case						



Zeitpunkt	Niederschlagsereignis	Ackerkulturverteilung	5 m		1 m		10 m	
			LISEM	E3D	LISEM	E3D	LISEM	E3D
Ende September	selten	Belegung 1 (Real 2018)	X					
		Belegung 2						
		Belegung 3						
		Good Case						
	außergewöhnlich	Belegung 1 (Real 2018)	X	X				
		Belegung 2	X					
		Belegung 3	X					
		Good Case	X					
	extrem	Belegung 1 (Real 2018)	X					
		Belegung 2						
		Belegung 3						
		Good Case						

5.3 Modell-Parametrisierung

Als Eingabedaten für die Modellierung können das DGM und die Niederschlagsverläufe nach der Aufbereitung im Geographischen Informationssystem bei EROSION 3D direkt verwendet werden. Im Gegensatz zu diesen müssen den Landnutzungs- und Bodenkarten konkrete Werte für die Bodenparameter zugewiesen werden.

Für beide Modellierungswerkzeuge existieren Methoden, mit denen typische Parameterwerte anhand von Landnutzungs- und Bodeninformation abgeleitet werden können.

5.3.1 Ableitungsmethodik Boden-/Landnutzungsparameter aus Primärinformationen

Ausgehend von den folgenden Primärinformationen und Randbedingungen erfolgte die Ableitung der Modellparameter (gemäß Kap. 4.3 und 4.4):

- anhand der BK50 Kartiereinheiten,
- des Landnutzungsrasters und
- des phänologischen Zeitpunkts.

Die Ableitung von Parameterwerten aus diesen Primärinformationen erfolgte anhand:

- der EROSION 3D Parameterdatenbank mit dem Hilfsprogramm DPROC und anschließender Anpassung abweichender Parametrisierungen (s. u.)
- sowie hinterlegten Methoden (Renger et al. 2008) und Tabellen mit typischen Parameterwerten (Stolte 2003, De Roo 1994, University of Twente 2018, Bronstert et al. 2000 und Van Genuchten et al. 1991).

Tab. 10 gibt einen Überblick über die im Projekt berücksichtigten Abhängigkeiten der Modellparameter von den Primärinformationen.

Für die Eingabeparameter Rauigkeit und Bedeckungsgrad, die in beide Modelle eingehen (vgl. Kap. 5.1.4), wurde auf Grundlage der bisher verwendeten Datenquellen ein gemeinsamer Parametersatz abgeleitet. Da diese (z. B. in der Parameterdatenbank Sachsen) als monatliche Werte vorlagen, erfolgte eine Plausibilisierung und ggf.

nötige Anpassung der Werte in Bezug auf die für die Szenarien abgeleiteten Entwicklungsstadien.

Der Parameter Anfangsbodenfeuchte, Sättigungswassergehalt, hydraulische Leitfähigkeit und Matrixpotential wurde für openLISEM mit einem Bodenwassermodell (Renger et al. 2008) bestimmt, in dem der wassergesättigte Boden drei Tage abtrocknen (Versickerung und Evaporation) konnte.

Für EROSION 3D wurde der Anfangswassergehalt so berechnet, dass eine Saugspannung von pF 2,5 für alle Bodeneinheiten erreicht wird.

Bei der Parametrisierung von nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden erkannte Abweichungen der Modellannahmen hinsichtlich der Abflussbildung und des Erosions-/Akkumulationsverhaltens durch Anpassung der Parameterwerte angeglichen, um Unterschiede in den Modellergebnissen zu minimieren. Beispielweise wurde für asphaltierte Straßen eine hohe Abflussbildung, aber keine Erosion angenommen.



Tab. 10: Verwendete Eingabeparameter aus den Primärinformationen

Parameter	Einheit	Modell	Schicht		Primärinformation			
			1.	2.	Landnutzung/ Kulturart (DLM/ECOLaSS)	Monat	Boden- art (BK50)	Schichttiefe (BK50)
Untergrenze Bodenschicht	[mm]	LISEM	X	X				X
Nr. der Bodenschicht und Schichtmächtigkeit	[-] [m]	E3D	X	X				X
Korngrößenverteilung in 9 Fraktionen	[Gew.-%]	E3D	X	X			X	
Korndurchmesser bei 50% und 90% (D50, D90)	[µm]	LISEM	X	X			X	
C_{org}-Gehalt	[Gew.-%]	E3D	X	X			X	
Lagerungsdichte	[kg/m ³]	E3D	X	X	X	X	X	
Saugspannung an Befeuchtungsfront	[cm]	LISEM	X	X			X	
Sättigungswassergehalt	[-]	LISEM	X	X			X	
Anfangswassergehalt	[-] [Vol. -%]	LISEM E3D	X	X			X	
Gesättigte Leitfähigkeit (K_s)	[mm/h]	LISEM	X	X			X	
Skinfaktor	[-]	E3D	X	X	X	X	X	
Bedeckungsgrad (per)	[-] [%]	LISEM E3D	X		X	X		
Blattflächenindex (lai)	[m ² /m ²]	LISEM	X		X	X		
Vegetationshöhe (ch)	[m]	LISEM	X		X	X		
Hydraulische Rauigkeit (n)	[s m ^{-1/3}]	LISEM E3D	X		X	X		
Oberflächenrauigkeit	[cm]	LISEM	X		X	X		
Aggregatstabilität	[-]	LISEM	X		X	X		
Kohäsion (coh, cohadd)	[kPa]	LISEM	X		X	X		
Erosionswiderstand	[kg m ⁻¹ s ⁻²]	E3D	X		X	X	X	
Straßenbreite / Siedlungsfläche (Anteil an Zellfläche)	[m]	LISEM	X		X			

5.3.2 Zuordnung der Boden- und Landnutzungsklassen

Um einzelnen Flächen Parameterwerte zuzuordnen und diese den Modellierungswerkzeugen zugänglich zu machen, werden die Klassen der Boden- und Landnutzungskarten in numerische IDs übersetzt. Je nach verwendetem Modellierungswerkzeug werden diese IDs dann mit Werten der Boden- und Landnutzungsparameter in Beziehung gesetzt (Abb. 25).

Für openLISEM werden die IDs mit dem Batch-Programm `mapgen.bat` in Parameterwertkarten übersetzt. Die Zuordnung einzelner Parameterwerte zu einzelnen Landnutzungs- und Bodenklassen ist über die numerischen IDs eineindeutig möglich.

Parametrisierung in openLISEM und EROSION-3D

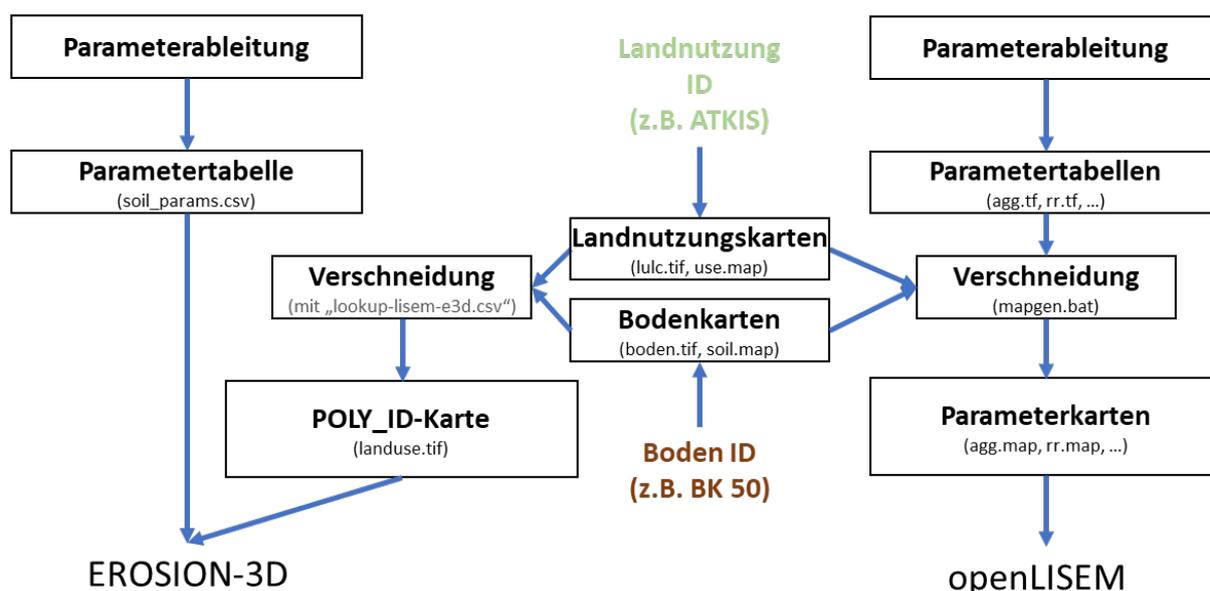


Abb. 25: Zuordnung der Bodenparameterwerte zu den Karteneinheiten entsprechend der Anforderungen der Modellierungswerkzeuge

Welche Nutzung aus dem Basis-DLM "Tatsächliche Nutzung" welcher openLISEM – bzw. EROSION 3D-ID zugeordnet wurde, ist in Tab. 16 im Anhang zu finden.

EROSION 3D nutzt ein einziges Landnutzungsgrid und eine Tabelle mit Parameterwerten als Eingabedaten. Die Zuordnung der Parameterwerte erfolgt über POLY_IDs, die mit dem Hilfsprogramm DPROC für EROSION 3D automatisch erstellt werden.

5.3.3 Plausibilisierung an synthetischen Testhängen

Parallel zur eigentlichen Modellierung des Gesamteinzugsgebiets werden die abgeleiteten Bodenparameter mit einer Modellierung von synthetischen Testhängen untersucht. Die Testhänge werden durch ein künstlich erzeugtes Geländemodell dargestellt (Abb. 26) und erlauben eine gezielte Untersuchung einzelner Modellparameter und Modelloptionen in ihrer Wirkung auf ausgesuchte Modellergebnisse sowie den Vergleich zwischen den beiden verwendeten Erosionsmodellen. Solche Testhänge wurden in Kombination mit EROSION 3D in vorhergehenden Arbeiten zur Parameter- und Optionenanalyse eingesetzt (Lenz 2017). Im Rahmen dieses Projekts erfolgte erstmals eine Anwendung dieser Methode in Kombination mit LISEM.



Zur Modellierung des Gesamtgebiets wird von divergierendem Fließen des Wassers ausgegangen. D. h. das Wasser, das eine Rasterzelle verlässt, wird anteilig an alle niedriger liegenden Zellen weitergeleitet. Abweichend dazu kann für die Testhänge abfließendes Wasser nur an eine tiefergelegene Rasterzelle weitergeleitet werden. Beispielhaft wurde ein Einzelhang von 22 m Länge und 1 m Breite mit 5 % Neigung unter dem Niederschlagsverlauf einer ausgewählten Rasterzelle der Niederschlagsdaten des *außergewöhnlichen* Ereignisses im Untersuchungsgebiet simuliert. Hier wurden Abbildungen erzeugt, die ein Vergleich der Modellergebnisse hinsichtlich der Simulationsgrößen, Sedimentbudget, Filmgeschwindigkeit und Filmdicke ermöglichen. Abb. 27 zeigt beispielhaft, dass beide Modelle ähnliche Infiltrationsraten auf landwirtschaftlich genutzten Flächen berechnen, während sich die Annahmen der Modelle zur Infiltration unter Gehölzstreifen unterscheiden (Abb. 28).

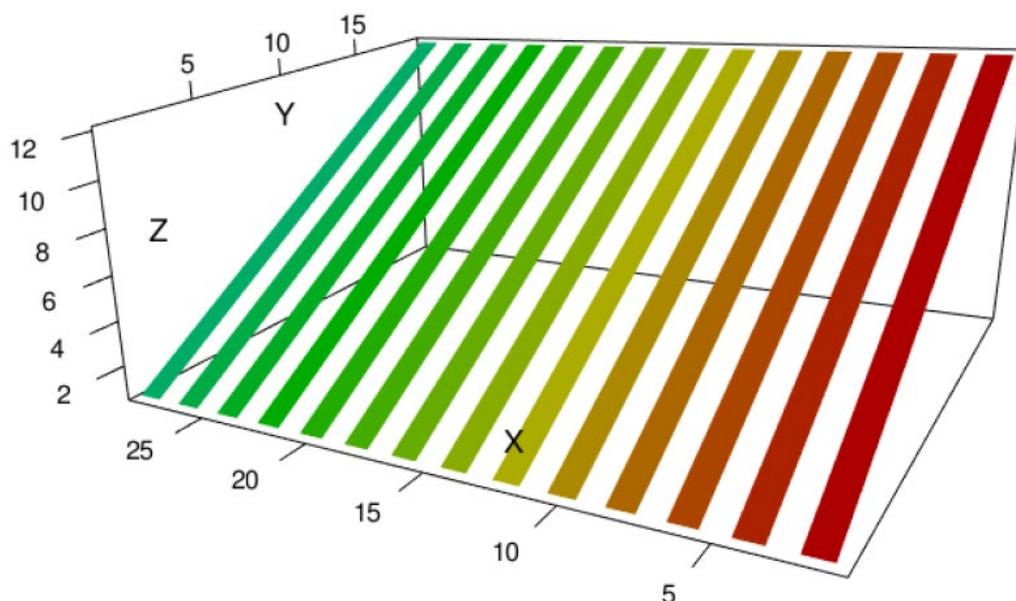


Abb. 26: Synthetische Testhänge zur Untersuchung von Modellparametern und -optionen. Jede Farbe markiert einen eigenständigen Hang, der von den benachbarten Hängen nicht beeinflusst wird. Die Einheiten der X- und Y-Achsen sind Meter, die Z-Achse ist in Dezimeter.

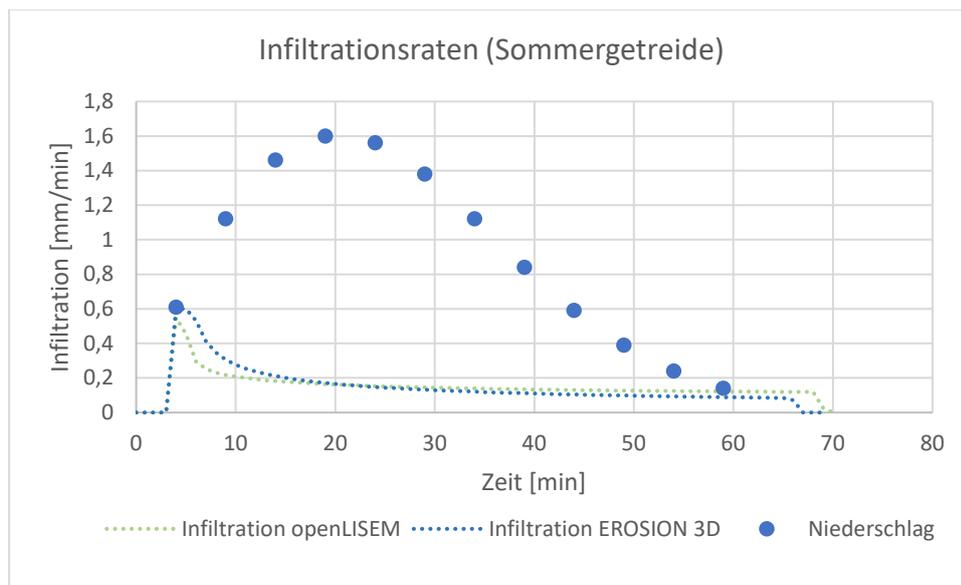


Abb. 27: Vergleich der Infiltrationsraten von openLISEM und EROSION 3D für Sommergetreide auf der BK50-Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen Niederschlagsereignis

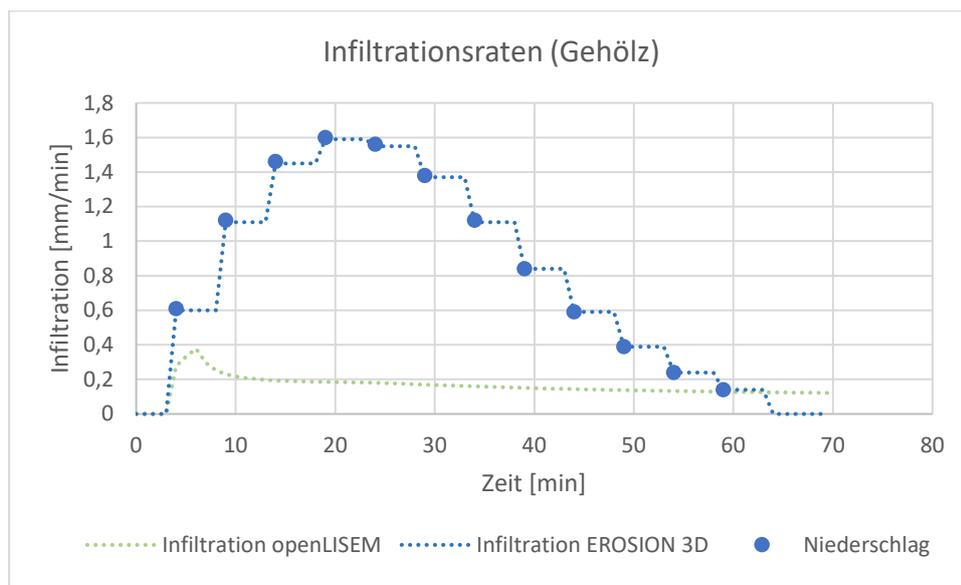


Abb. 28: Vergleich der Infiltrationsraten von openLISEM und EROSION 3D für Gehölz auf der BK50-Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen Niederschlagsereignis

Zur Einschätzung des simulierten Abflussverhaltens können die maximalen simulierten Abflussgeschwindigkeiten und die maximale Filmdicke betrachtet werden. Als Beispiel für einen solchen Vergleich zeigt Abb. 29, dass die berechneten maximalen Fließgeschwindigkeiten bei ähnlichem Infiltrationsverlauf von beiden Werkzeugen ähnlich berechnet werden. Die maximale Dicke des Wasserfilms wird in openLISEM ca. doppelt so groß berechnet als in EROSION 3D. Ursächlich für die Abweichung können die unterschiedlichen Lösungsansätze zur Hydraulik in den beiden Werkzeugen sein.

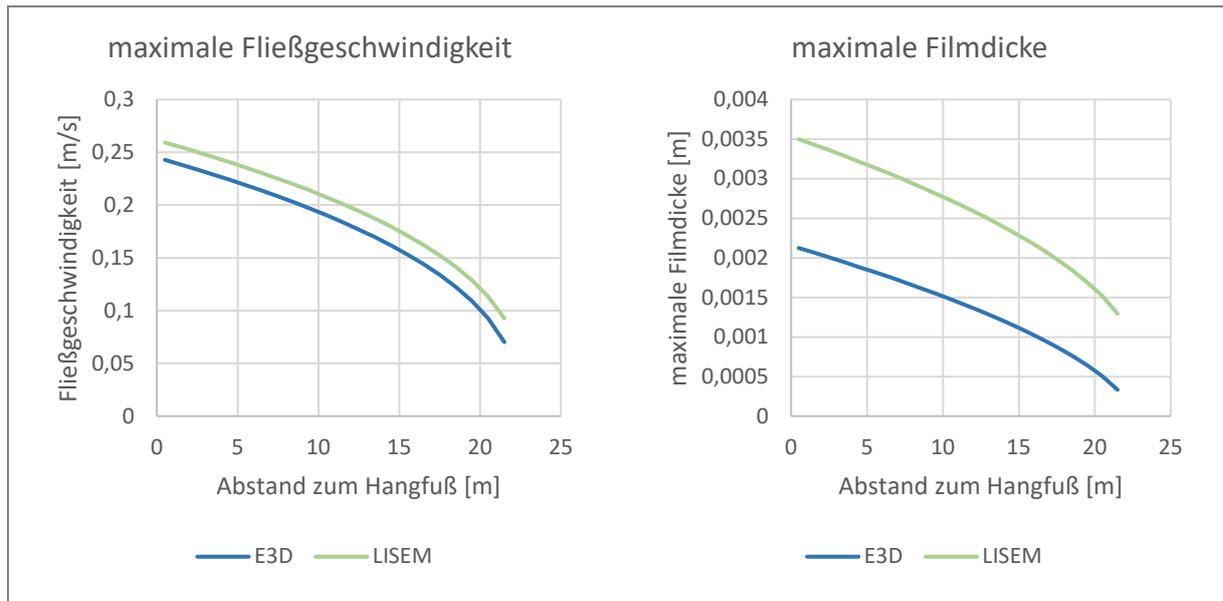


Abb. 29: Vergleich des Abflussverhaltens von openLISEM und EROSION 3D (E3D) für die Landnutzung „Sommergetreide“ auf Kartiereinheit f45 (kalkhaltiges Kolluvium) im April bei dem außergewöhnlichen Niederschlagsereignis

5.4 Durchführung der Rechenläufe

Sowohl EROSION 3D als auch openLISEM bieten eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) (s. z. B. Abb. 30), sind aber auch über die Kommandozeile (CLI) steuerbar. Die graphische Benutzeroberfläche erlaubt eine direkte Interaktion des Modellanwenders mit den Programmen. Insbesondere die Darstellung von Modellergebnissen und Eingabedaten kann eine schnelle Einschätzung ermöglichen. Im Gegensatz dazu bietet die Kommandozeile die Möglichkeit, sich wiederholende Aufgaben effektiv über extern programmierbare Skripte zu steuern. In der Projektdurchführung wurden die Szenariensimulationen über die GUI durchgeführt, während die Simulation der Testhänge von der CLI Gebrauch machte.

Die Eingabedaten müssen für die Werkzeuge in einem lesbaren Datenformat aufbereitet sein. Für openLISEM wurde für Rasterdaten das PC-Rasterformat *.map verwendet (Van Deursen und Wesseling 1992), in EROSION 3D das Rasterformat *.tif. In beiden Werkzeugen erfolgt mit weiterer Entwicklung eine zunehmende Unterstützung weiterer Eingabeformate.

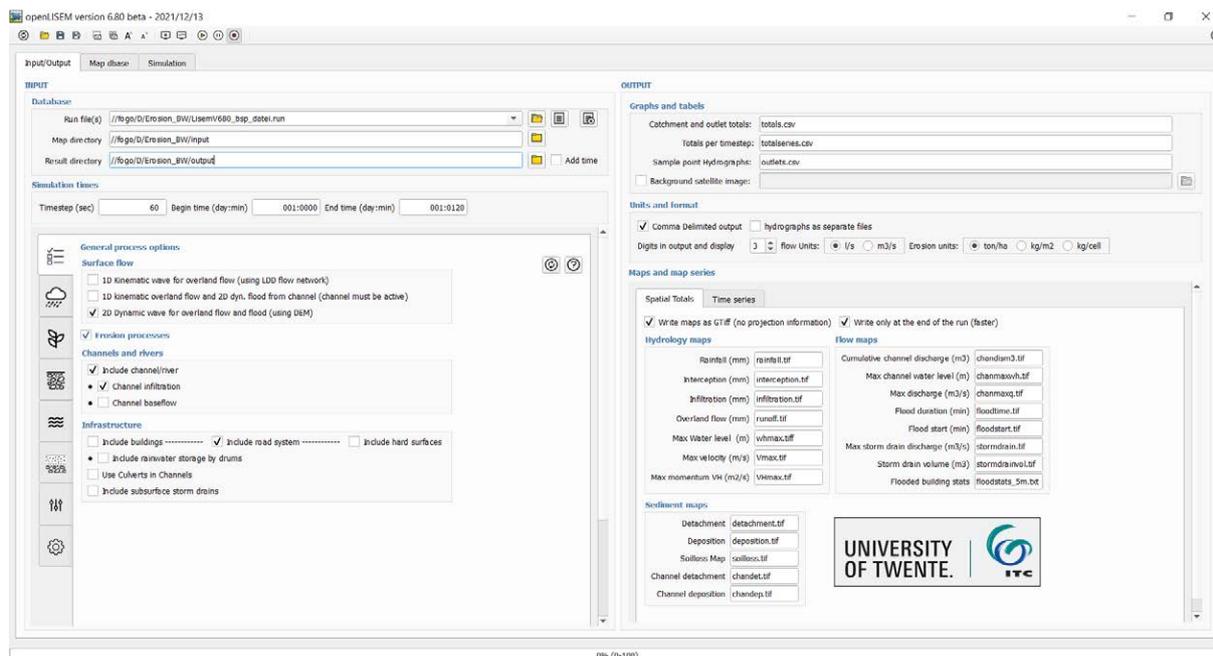


Abb. 30: Benutzeroberfläche von openLISEM Version 6.80

In beiden Methoden stehen neben den eigentlichen Eingabedaten (Relief, Niederschlag, Bodenparameter) noch weitere Einstellungsmöglichkeiten der Werkzeuge zur Verfügung. Zum Teil können diese Einstellungsmöglichkeiten die Simulationsergebnisse signifikant beeinflussen.

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Einstellungsmöglichkeiten erprobt: openLISEM

- Das maximale Durchflusslimit in Vorfluterzellen kann in der Rasterdatei „channel-maxq.map“ definiert werden. In orientierenden Simulationen konnten keine wesentlichen Änderungen der Hydraulik festgestellt werden, weshalb bei weiteren Simulationen diese Möglichkeit nicht betrachtet wurde.
- Die Zeitschrittweite kann im Programm eingestellt werden und wurde in Übereinstimmung mit EROSION 3D auf 60 s festgesetzt.
- Neben der im Projekt verwendeten Green&Ampt Infiltration stehen auch weitere Infiltrationsmodelle zur Verfügung.

EROSION 3D:

- Die interne zeitliche Auflösung betrug 60 s.
- Die Modelloption „Abflussverzögerung“ (kinematische Welle) zur realistischeren Darstellung des Dünnschichtabflusses wurde genutzt.
- Die Green&Ampt Infiltration wurde mit mehreren Bodenschichten parametrisiert.

5.5 Auswertung der Simulationsdaten

5.5.1 Darstellung der Ergebnisse

Der Vergleich der Ergebnisse erfolgte zum einen rein visuell über die erzeugten Erosionsgefahrenkarten und zum anderen über eine quantitative Auswertung durch die Erstellung sog. zonaler Statistiken aus den Erosionsrastern (sedbudget und soilloss) über die Summe aller Nutzungen. Die Ergebnisvergleiche dienen einerseits zur Plausibilisierung der Modelle, andererseits als Grundlage für die Empfehlungen des landesweiten Vorgehens (s. Kap. 7) bei der Erosionsmodellierung.

Es wurden folgende unterschiedlichen Aspekte miteinander verglichen:

- Modelle: EROSION 3D und openLISEM
- Räumliche Auflösung: 1 m, 5 m und 10 m
- Zeitpunkte: April, Juni und September
- Belegungsrotationen: Belegungen 1 bis 4
- Szenarien: Bad Case und Good Case; Bad Case und Nur Mais
- Bodenbearbeitung (nur EROSION 3D): konventionell und konservierend
- Niederschlagsereignisse: *selten, außergewöhnlich, extrem*

In den folgenden Abbildungen werden Kartenausschnitte und zonale Statistiken der Vergleiche gegenübergestellt. Die verwendeten Legenden und Datengrundlagen sind in Abb. 31 dargestellt.



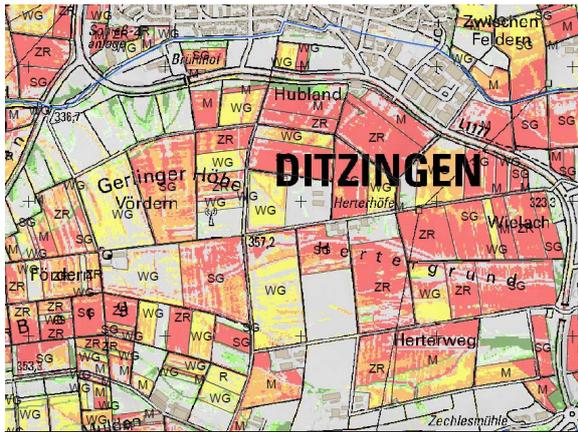
Abb. 31: Legende und Datengrundlagen der Darstellung der Modellergebnisse (hier sind noch die ursprünglich verwendeten Bezeichnungen für Feldfruchtverteilungen auf den Ackerschlägen dargestellt, siehe Kap. 4.3.3)

Modelle

Die Auswertung der zonalen Summen der Modellierungsergebnisse (Zeitpunkt April) in Abb. 32 zeigt, die höchsten Austragssummen auf Mais-, Rüben- und Sommergetreideflächen. Hier sind die Werte bei den beiden Modellen EROSION 3D und openLISEM sehr ähnlich. Ein deutlicher Unterschied kann bei den Wintergetreide-Flächen festgestellt werden: Während bei EROSION 3D in Summe der Abtrag überwiegt, ist es bei openLISEM die Deposition. Die höchsten Summen bei der Deposition traten in beiden Modellen auf den Wiesenflächen auf, wobei der Wert bei openLISEM etwa doppelt so groß ist wie bei EROSION 3D.

In der Gesamtbilanz für das Gebiet ist die Austragssumme im Simulationslauf mit openLISEM um 36 % geringer bezogen auf den Wert bei EROSION 3D.

EROSION 3D



openLISEM

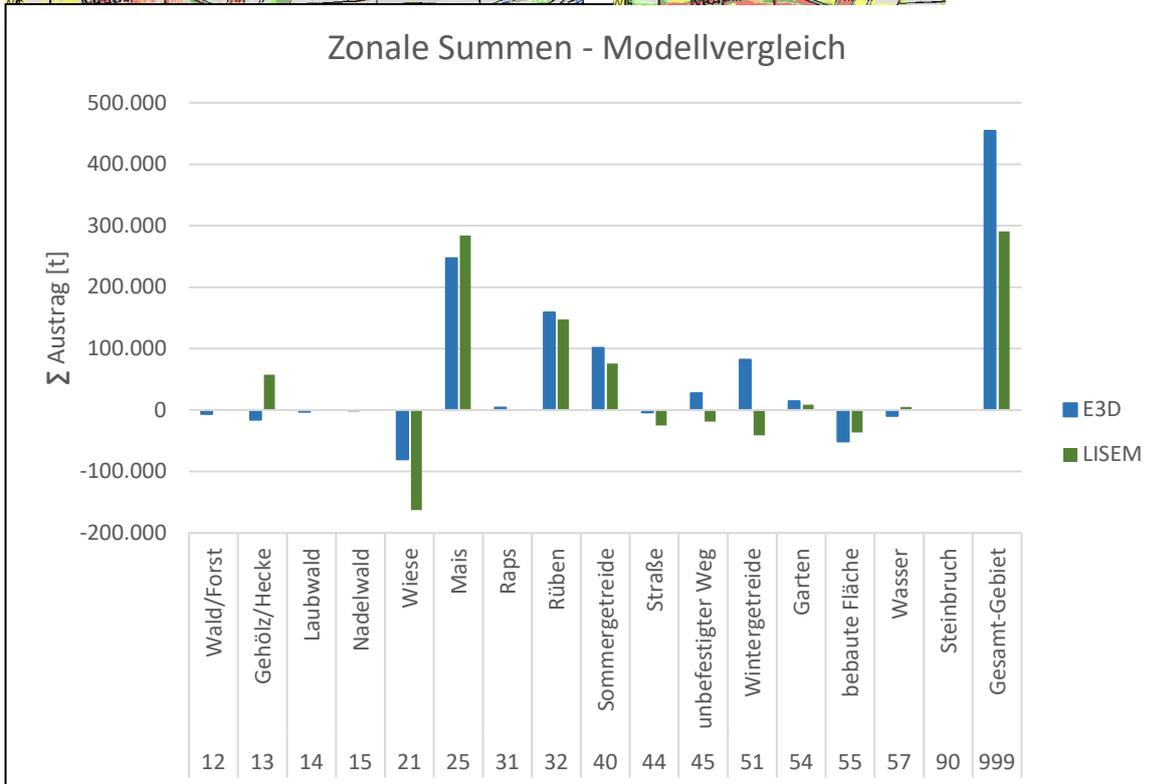
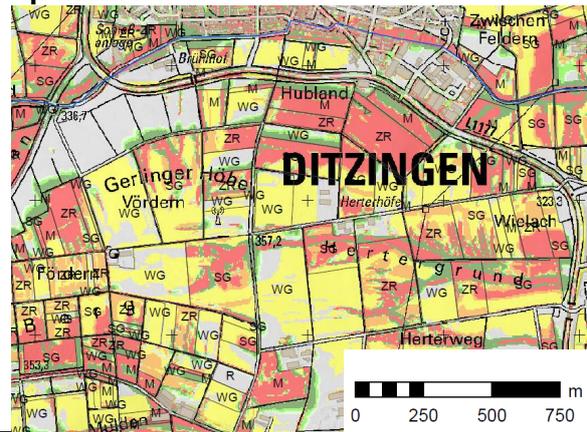
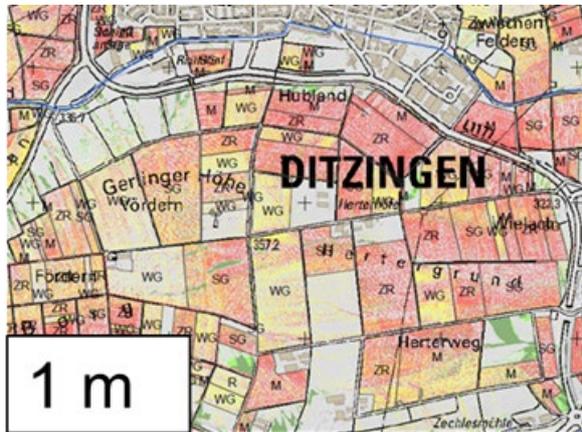


Abb. 32: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für openLISEM und EROSION 3D (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Realbelegung), räumliche Auflösung: 5 m)

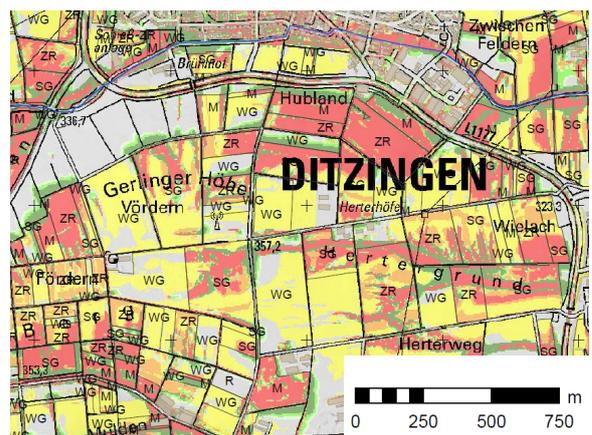
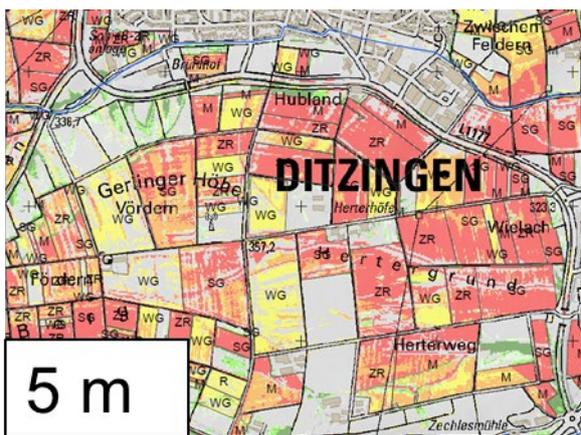
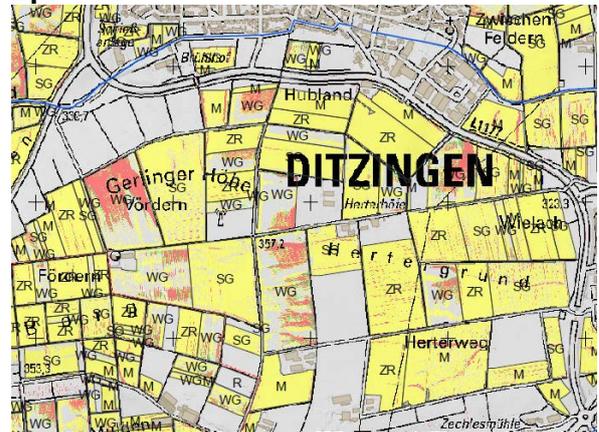
Räumliche Auflösung

Wie Abb. 33 zeigt, sind die Unterschiede in den zonalen Summen bei den Simulationen mit 5 m bzw. 10 m räumlicher Auflösung relativ gering. Auch auf den Karten sind kaum Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Rastergrößen zu erkennen. In der Gesamtbilanz sind die Werte bei 10 m Auflösung leicht erhöht – bei openLISEM um 5 % und bei EROSION 3D um 13 % – im Vergleich zur jeweiligen Simulation mit 5 m Auflösung. Die für Ditzingen durchgeführten Simulationen im 1-m-Raster sind in der zonalen Statistik nicht aufgeführt, da die Modellergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Bezugsfläche nicht mit dem Gesamtgebiet vergleichbar sind. In der Kartendarstellung sind die 1-m-Raster auch dargestellt. Auffällig ist die feinere, pixel-genaue Erosions- und Depositionsmuster bei EROSION 3D, bei der stellenweise sogar die Bearbeitungsrichtung zu erkennen ist. Bei openLISEM scheinen hingegen die Akkumulationsbereiche bei der 1-m-Simulation so gering zu sein, dass sie nicht mehr angezeigt werden. Zudem gab es hier einige Null-Werte, was darauf hinweist, dass openLISEM mit der 1-m-Modellierung bei der Gebietsgröße Probleme hat und diese nicht vollständig berechnen kann (vgl. Kap. 6).

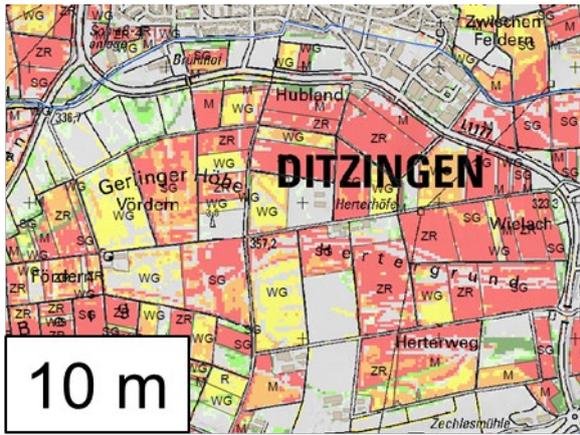
EROSION 3D



openLISEM



EROSION 3D



openLISEM

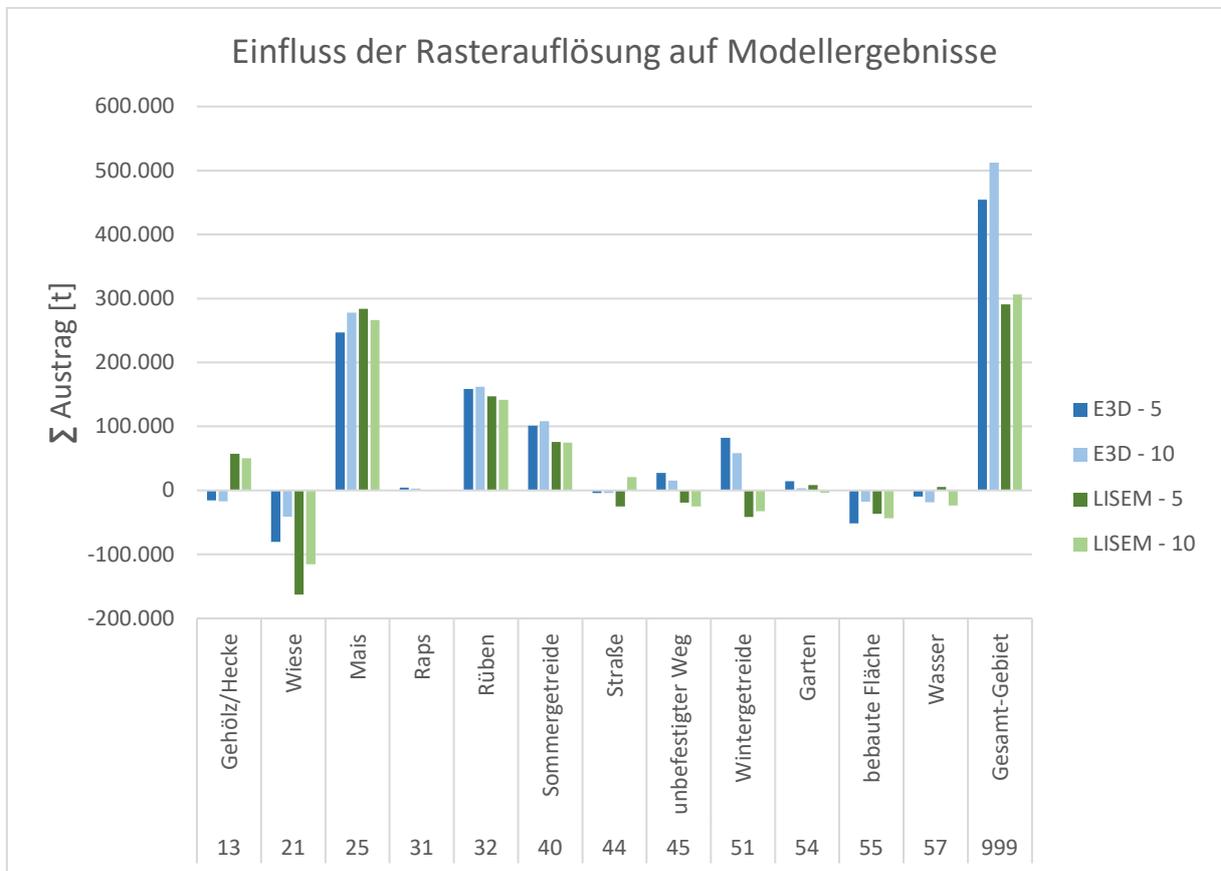
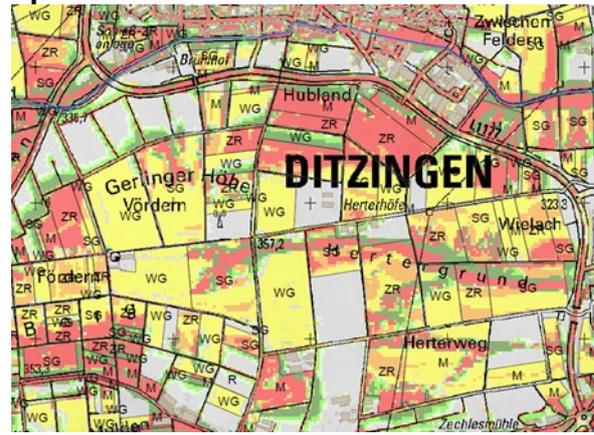


Abb. 33: Vergleich der Erosionskarten für EROSION 3D bzw. openLISEM mit 1 m, 5 m und 10 m räumlicher Auflösung (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Realbelegung))

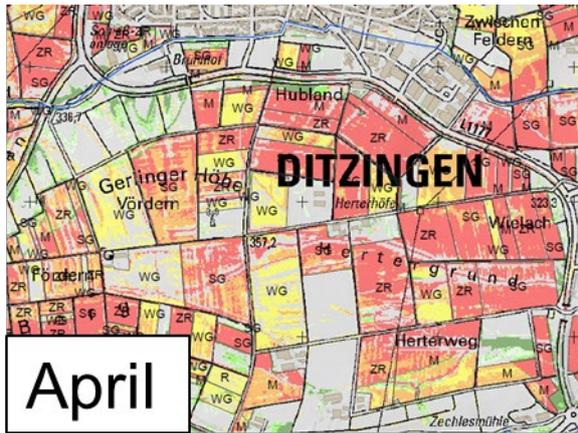
Bei den zonalen Summen werden nur die Austragssummen für die 5 m und 10 m Simulationen dargestellt, da diese für das gesamte Untersuchungsgebiet gerechnet wurden. Die 1-m-Raster Simulationen für die Gemeinde Ditzingen sind in der zonalen Statistik nicht aufgeführt, da die Modellergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Bezugsfläche nicht mit dem Gesamtgebiet vergleichbar sind.



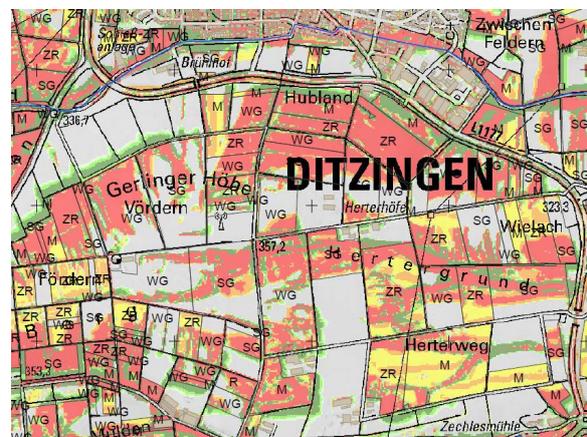
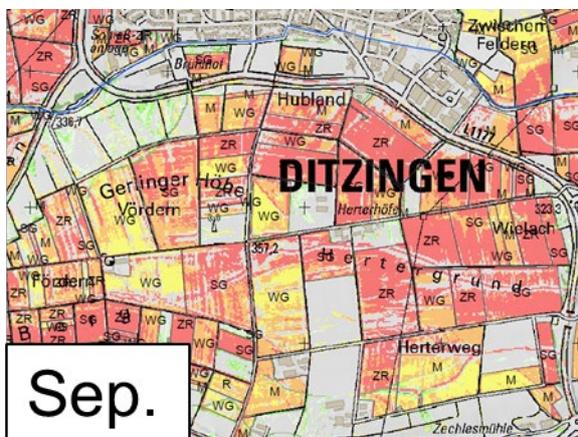
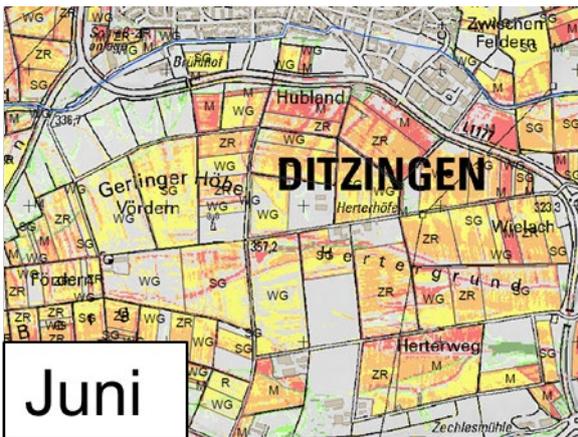
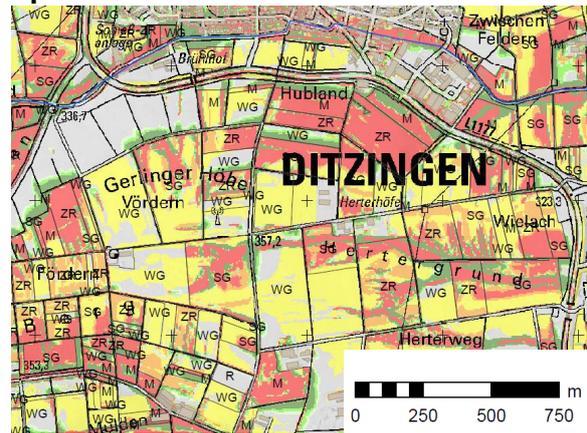
Zeitpunkte

Abb. 34 zeigt insgesamt sowohl im April als auch September hohe Austräge, im Juni sind diese geringer. Bei den Kulturarten kommt es im Jahresverlauf zu einer Verschiebung: Während im April die höchsten Austragssummen von den Maisflächen ausgehen, sind dies im September die Wintergetreideflächen, die zu diesem Zeitpunkt schon geerntet sind.

EROSION 3D



openLISEM



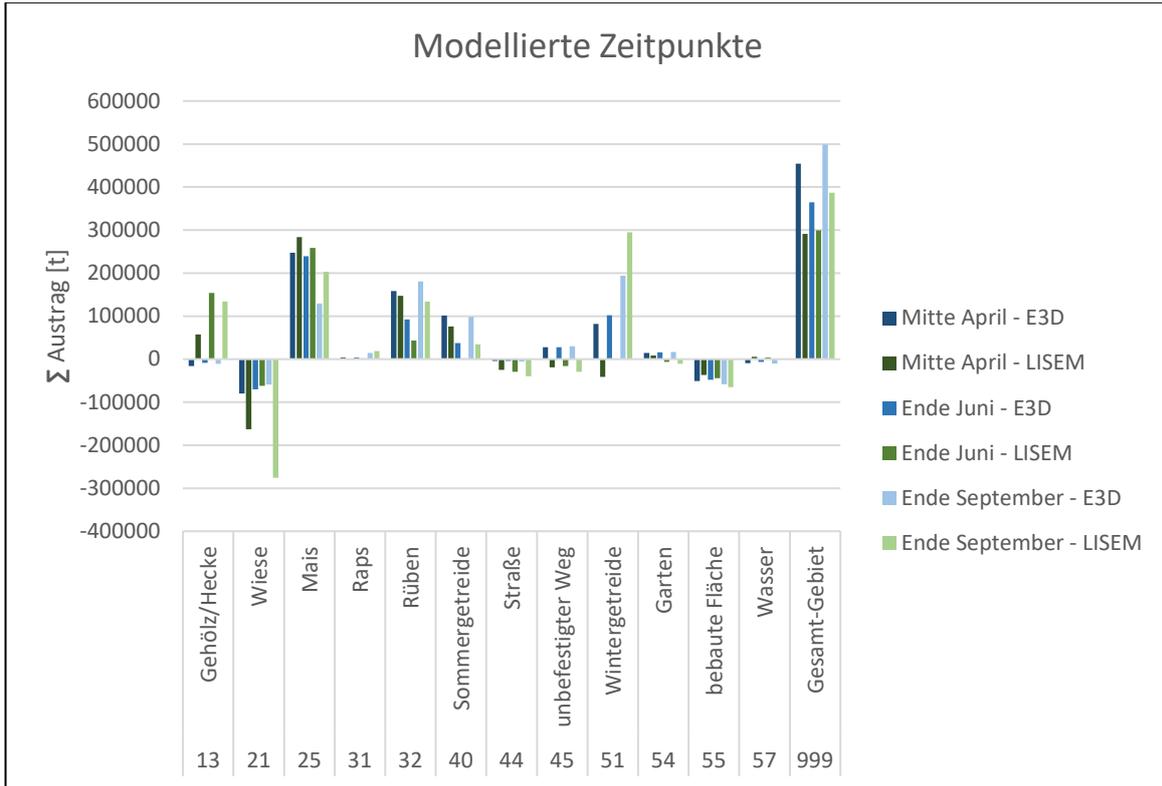
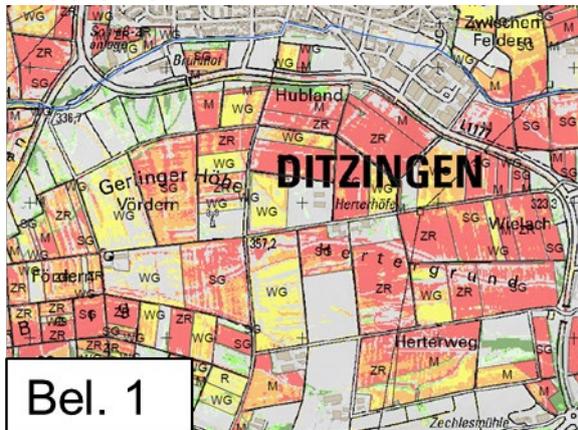


Abb. 34: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für die verschiedenen Zeitpunkte für EROSION 3D bzw. openLISEM (Szenario: außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Realbelegung), räumliche Auflösung: 5 m)

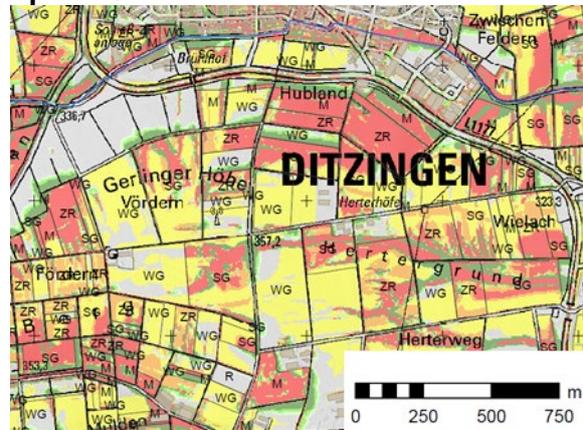
Belegungsrotation

Wie Abb. 35 zeigt, kommt es bei der Belegungsrotation zu einer Änderung im Erosions-/Depositionsmuster, die Unterschiede bei den gebietsweiten zonalen Summen sind hingegen nur sehr gering. Einzelne Ackerschläge, z. B. im Bereich Gerlinger Höhe, zeigen deutliche Unterschiede, je nachdem mit welcher Feldfrucht sie belegt sind.

EROSION 3D

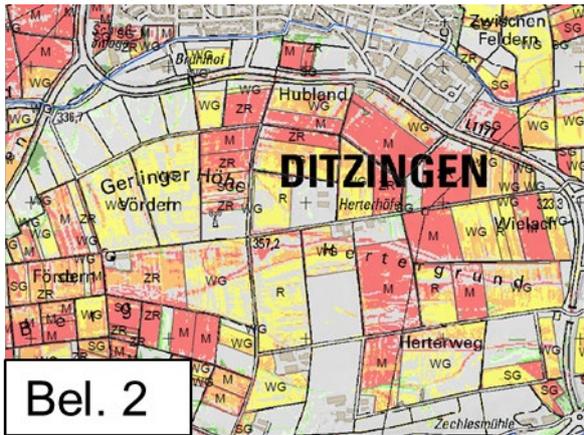


openLISEM

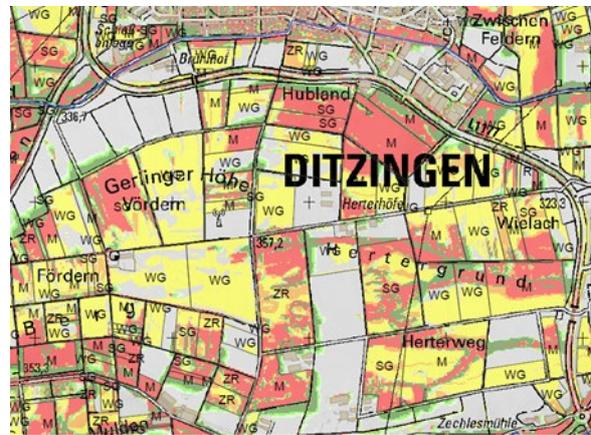
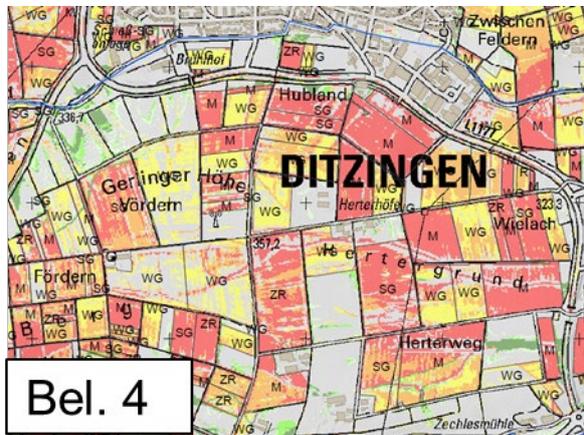
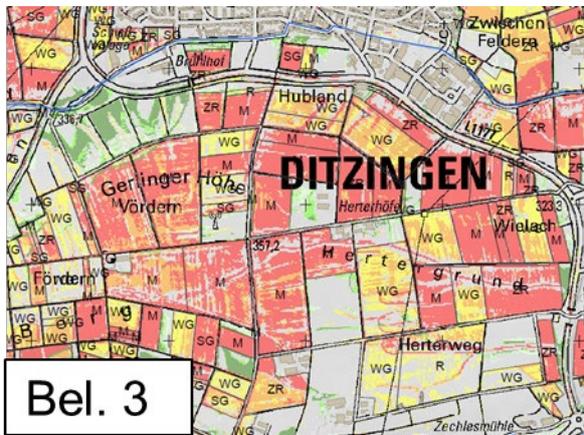
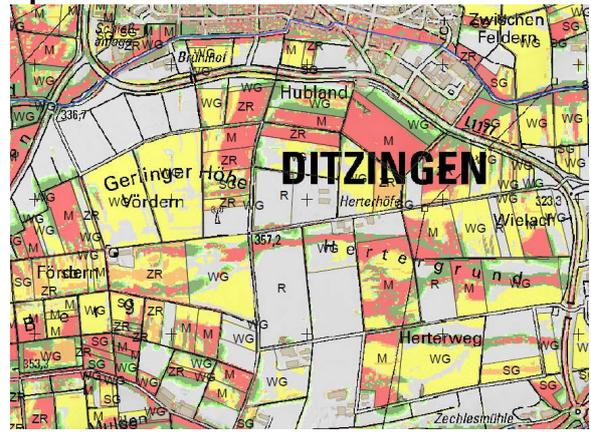


Bel. 1

EROSION 3D



openLISEM



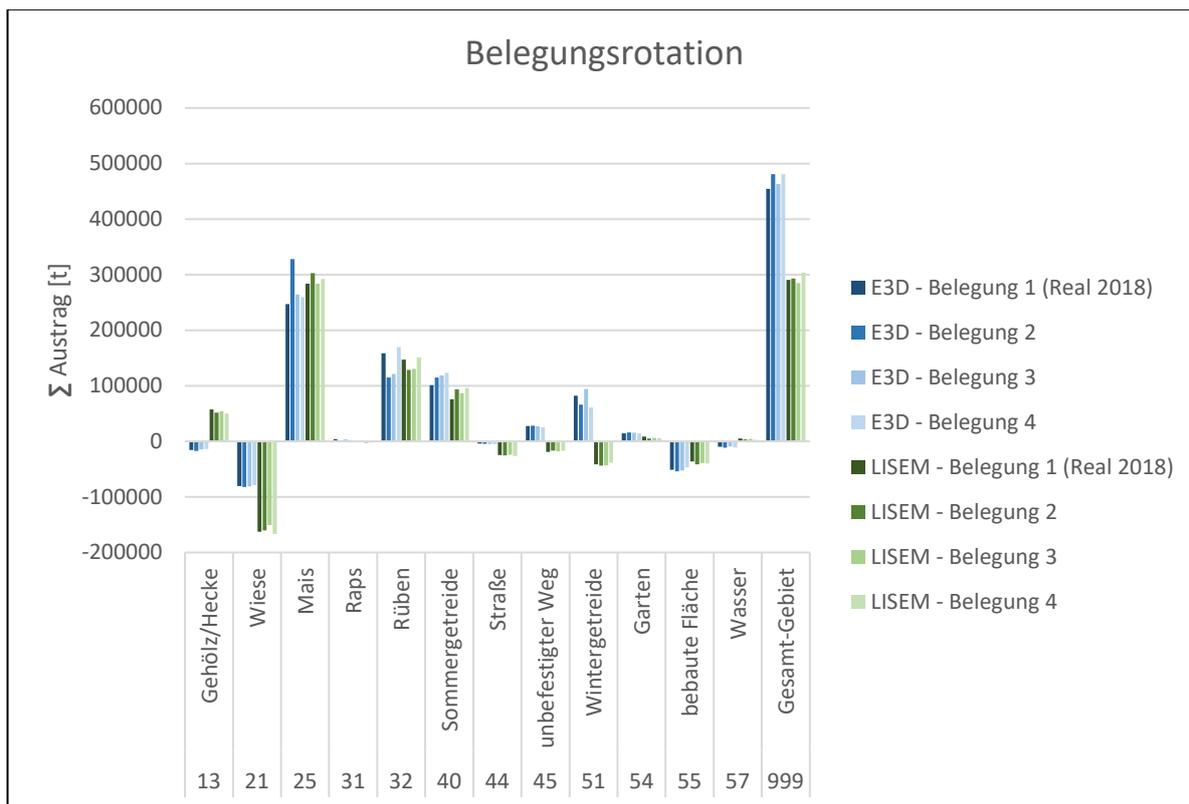


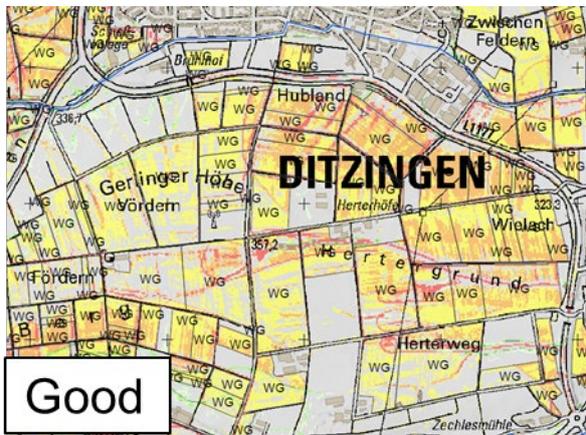
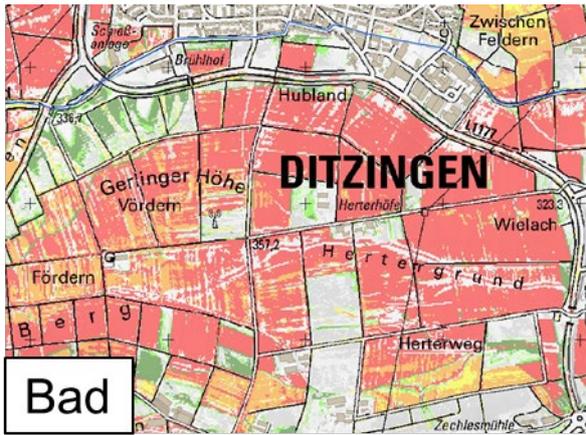
Abb. 35: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für die verschiedenen Belegungsvarianten für EROSION 3D bzw. openLISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)

Bad Case/Good Case

Bei Gegenüberstellung von Good Case zu Bad Case Szenario (s. Abb. 36) ist eine deutliche Abnahme des Bodenabtrags auf allen Flächen des Good Case Szenarios zu erkennen. Auch in den zonalen Summen zeigt sich bei beiden Modellen ungefähr eine Halbierung des Austrags aus den Ackerflächen.

Der Anstieg des Gesamtaustrags bei openLISEM vom Good Case zum Bad Case Szenario erklärt sich durch eine geringere Deposition in Gehölzstreifen/Hecken und Wiesenflächen. Hier ergeben sich offenbar geänderte Ablagerungsmuster.

EROSION 3D



openLISEM

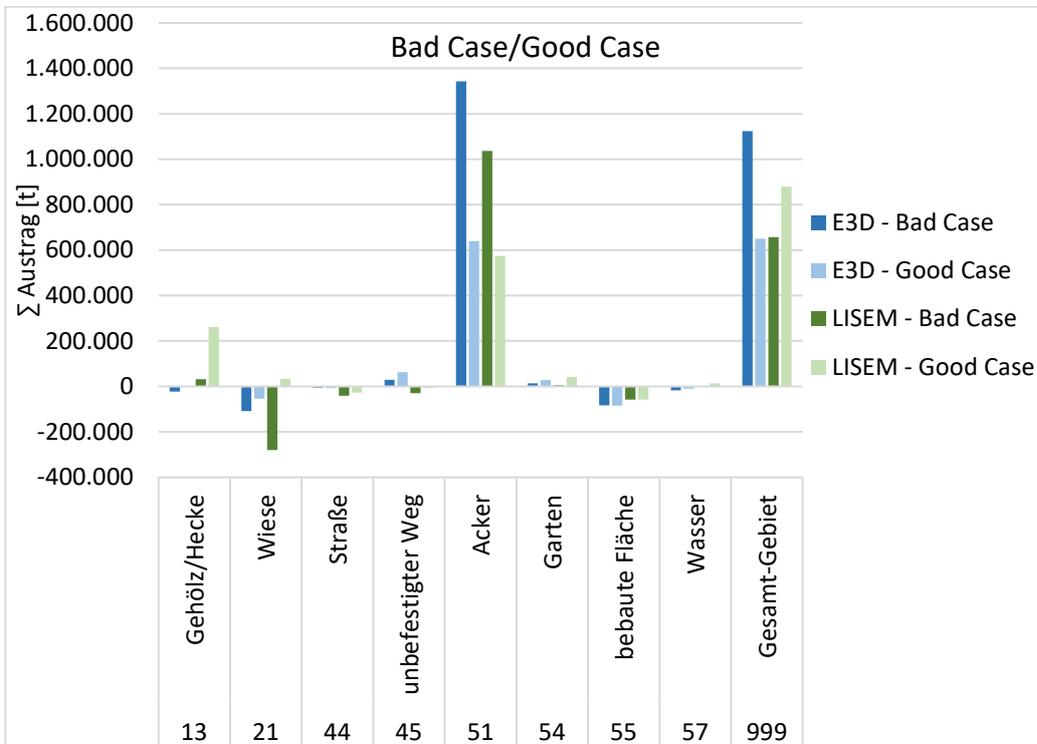
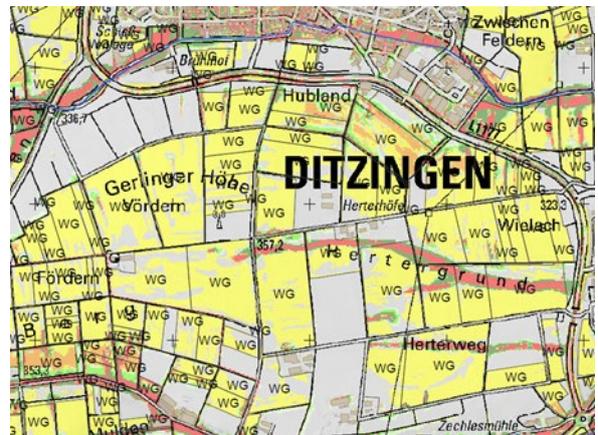
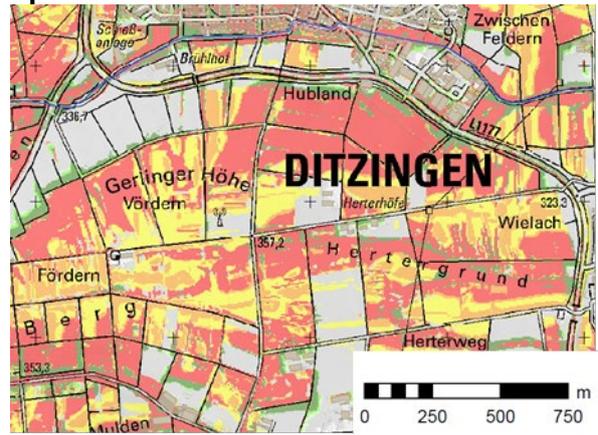


Abb. 36: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für Good Case und Bad Case für EROSION 3D bzw. openLISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)

Für diese Szenarien werden neben den Erosions-Depositionskarten außerdem in Abb. 37 exemplarisch die Sedimentfrachtkarten von EROSION 3D gegenübergestellt, die die Sedimentflüsse im Gebiet darstellen (vgl. Kap. 5.6).

Bei den Sedimentfrachten wird ebenfalls eine deutliche Reduktion im Good-Case-Szenario gegenüber dem Bad Case deutlich.

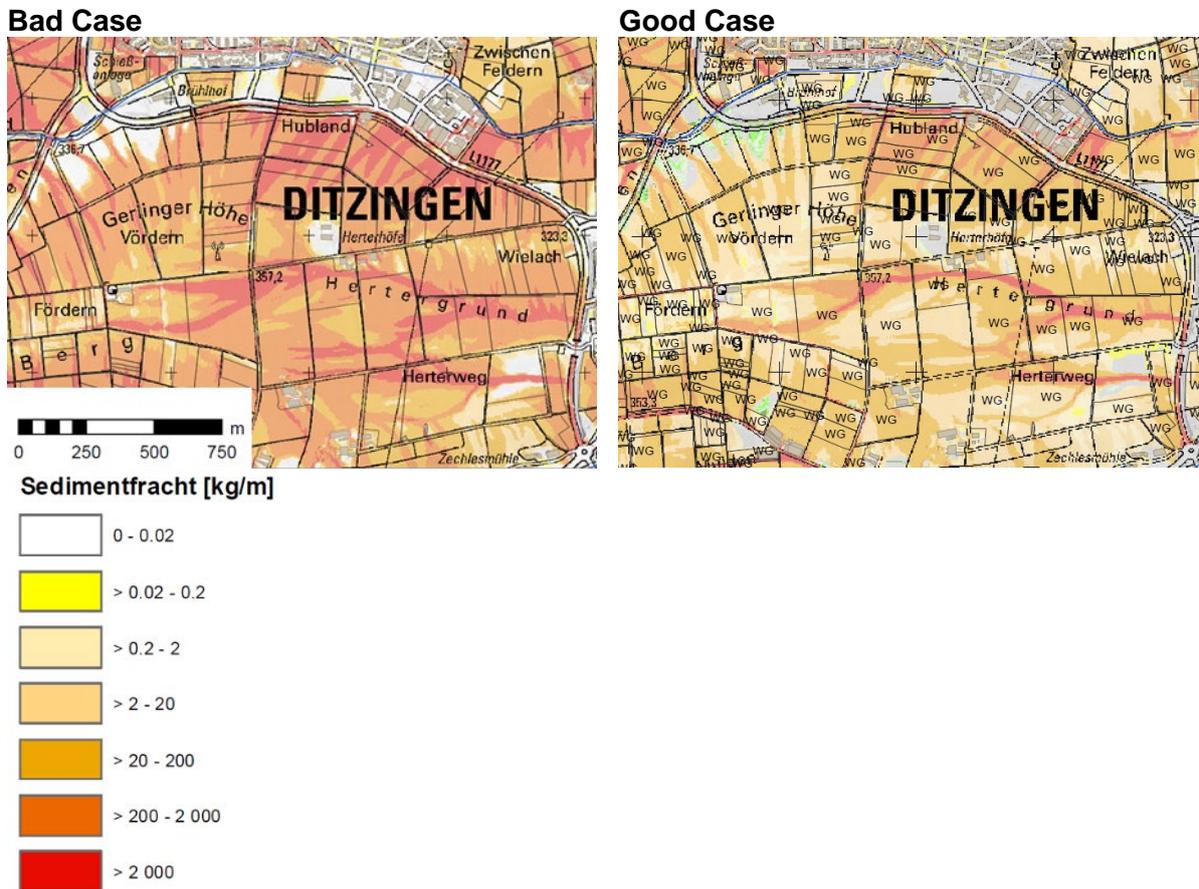


Abb. 37: Vergleich der Sedimentfrachtkarten von EROSION 3D für Bad und Good Case (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)

Bad Case/Nur Mais

Für das *außergewöhnliche* Szenario im April im 5-m-Raster wurde zudem eine Simulation mit „Nur Mais“ mit beiden Modellen durchgeführt (s. Kap. 5.2). Beim Vergleich dieses Szenarios mit dem Bad Case, fällt vor allem bei openLISEM die stärkere Akkumulation bei „Nur Mais“ auf (vgl. Abb. 38).

In den zonalen Summen zeigt sich beim Szenario Nur Mais ein deutlich geringer Gesamtaustrag im Vergleich zum Bad Case, was aus unterschiedlichen Erosionsmustern bei den verschiedenen Belegungen resultiert, wobei in den Bad Case jeweils der höchste Erosions- bzw. Depositionswert eingeht.

EROSION 3D

openLISEM

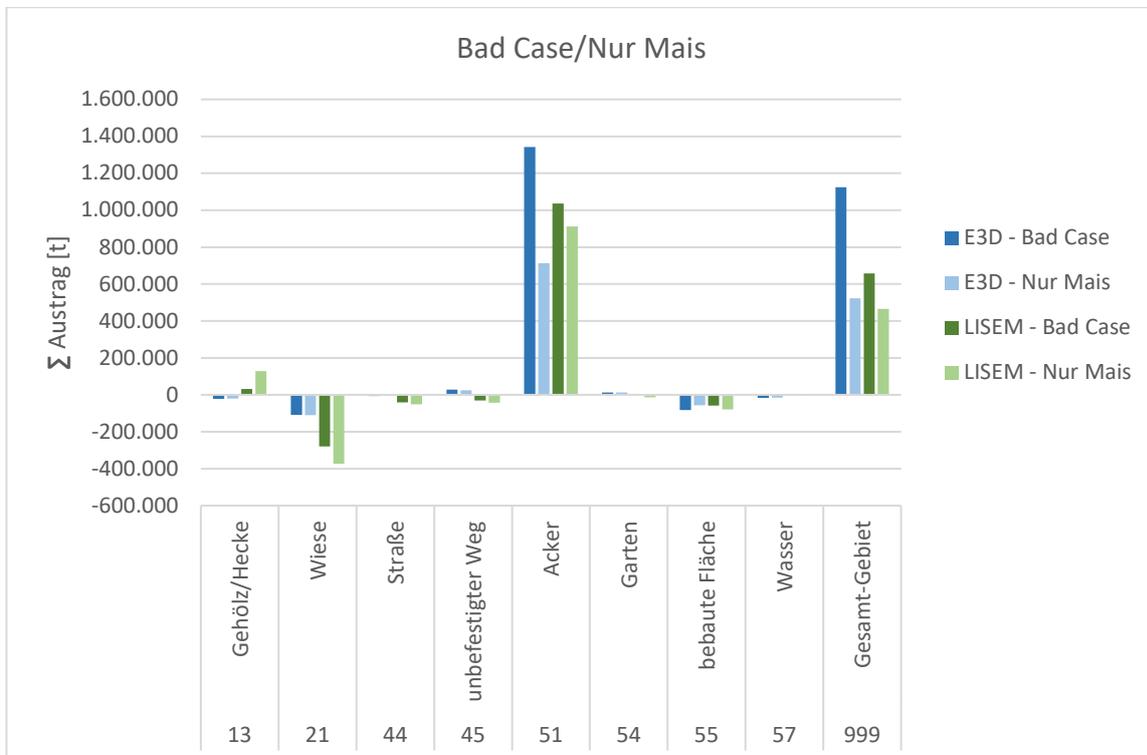
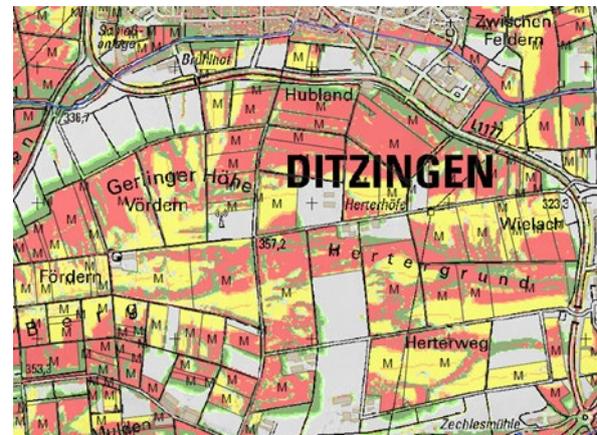
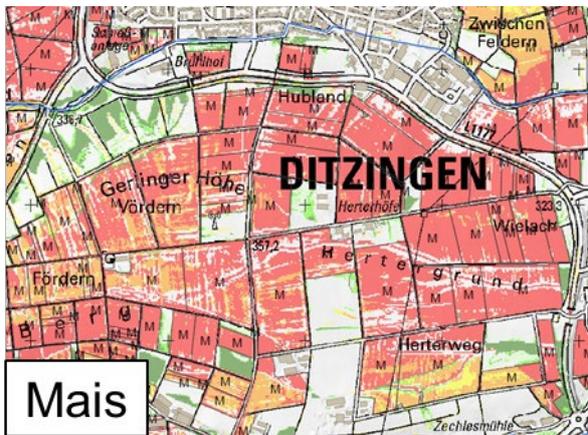
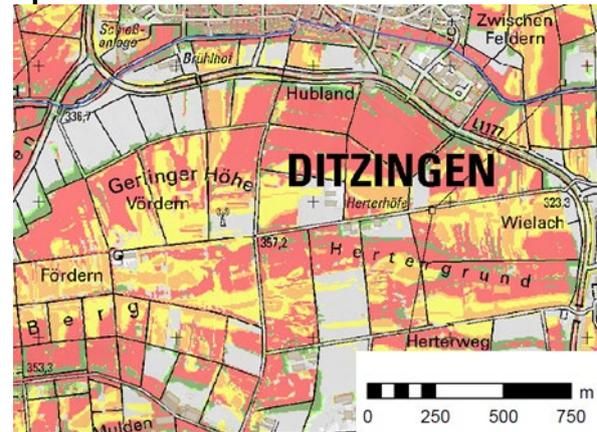
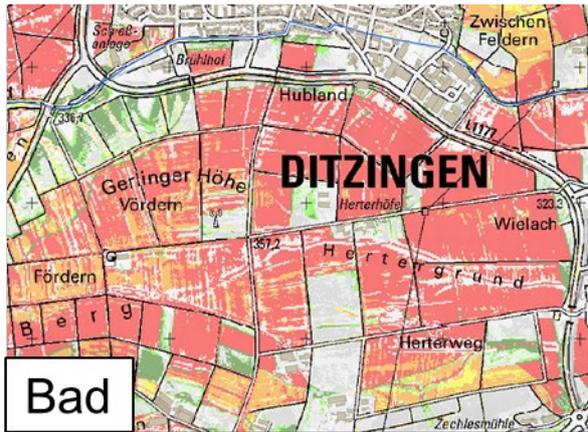


Abb. 38: Vergleich der Erosionskarten und zonalen Summen für Bad Case und Nur Mais (= Mais) für EROSION 3D bzw. openLISEM (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, räumliche Auflösung: 5 m)

Konservierende Bodenbearbeitung

Mit EROSION 3D wurde zusätzlich zu den konventionellen Bewirtschaftungsszenarien, auch eine Simulation mit konservierender Bodenbearbeitung durchgeführt, da die hierfür notwendigen Parametersätze vorhanden sind.

Unter Annahme einer konservierenden Bodenbearbeitung für alle Ackerflächen ergab die Simulation eine Reduktion von 34 % der Austragssumme für das Gesamtgebiet im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (s. Abb. 39).

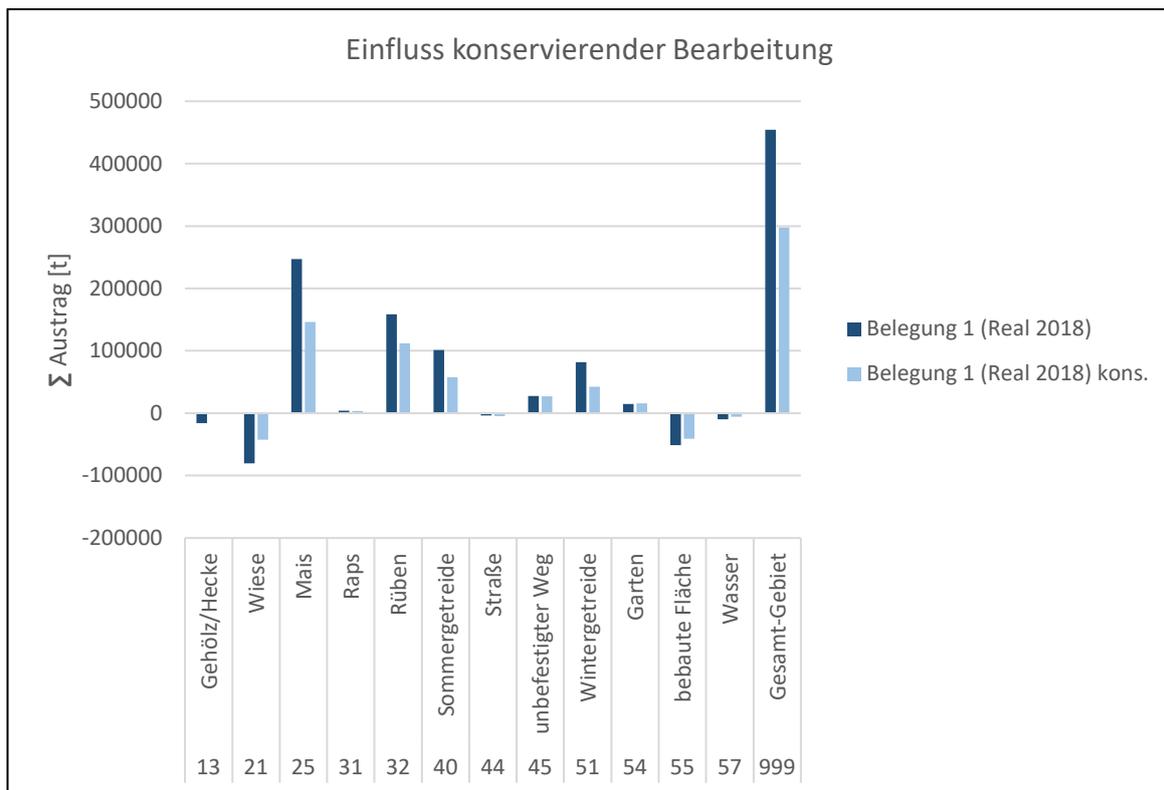
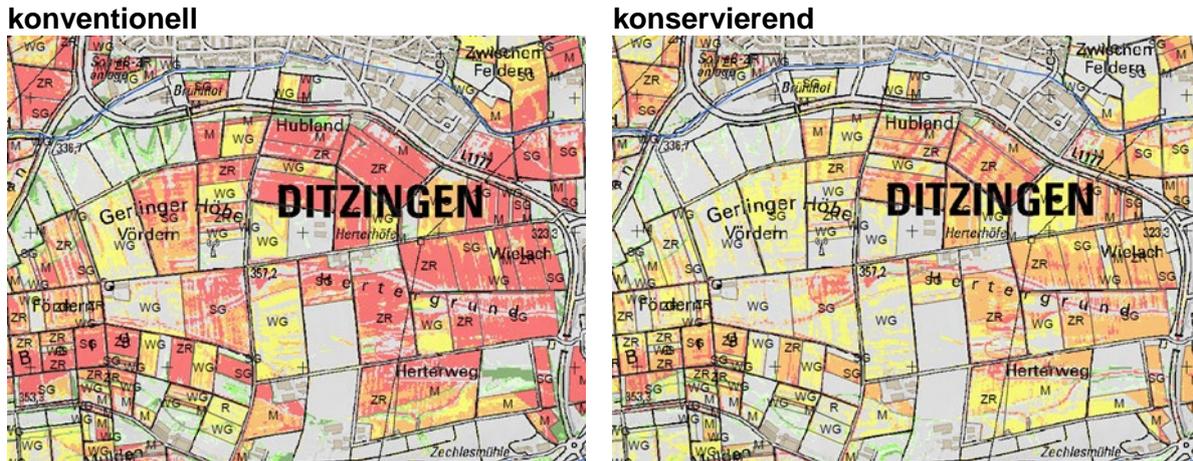


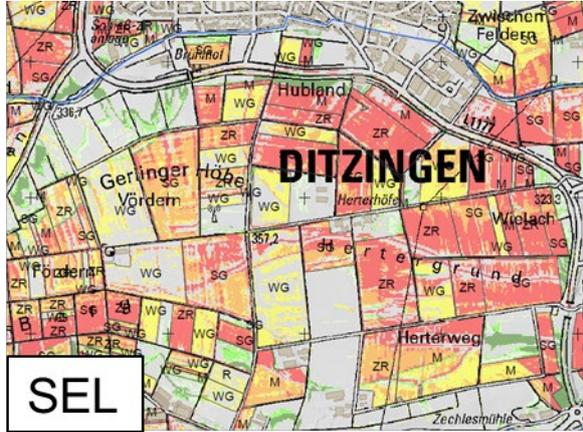
Abb. 39: Vergleich der Bodenbearbeitung mit EROSION 3D (Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Belegung 1 (2018 Realbelegung), räumliche Auflösung: 5 m)



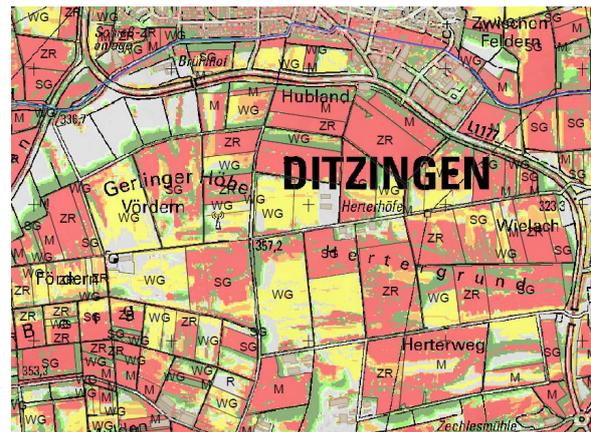
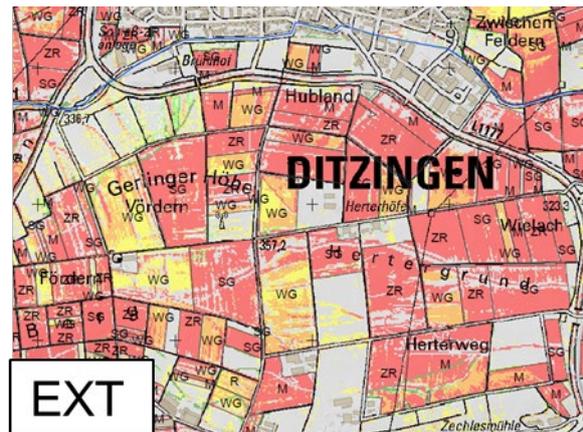
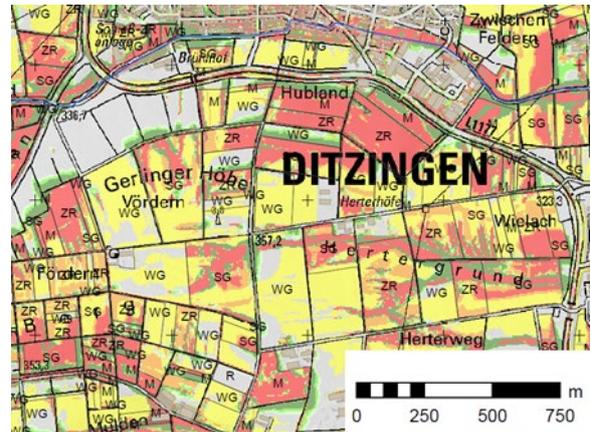
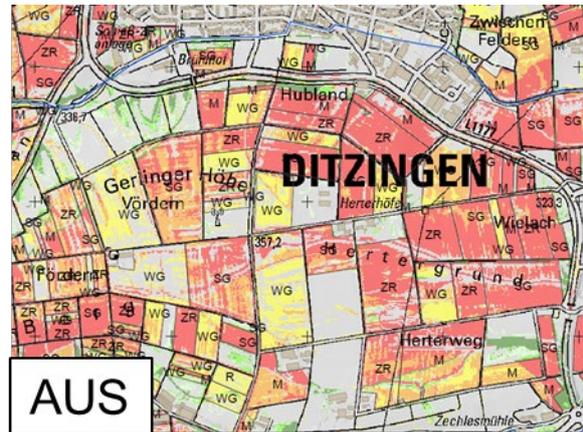
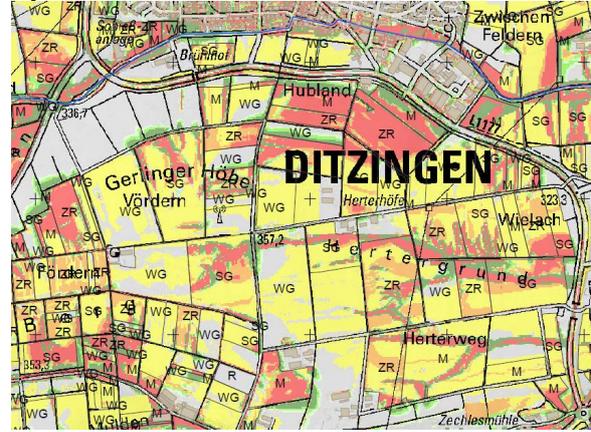
Niederschlagsereignisse

Für das *extreme* Niederschlagsereignis wurde im Vergleich zum *außergewöhnlichen* ein mehr als 4-fach höherer Austrag ermittelt. Beim *selteneren* Niederschlagsereignis beträgt der Austrag ca. 1/3 der Werte vom *außergewöhnlichen* Ereignis (vgl. Abb. 40).

EROSION 3D



openLISEM



SEL = seltenes Niederschlagsereignis
AUS = außergewöhnliches Niederschl.
EXT = extremes Niederschlagsereignis

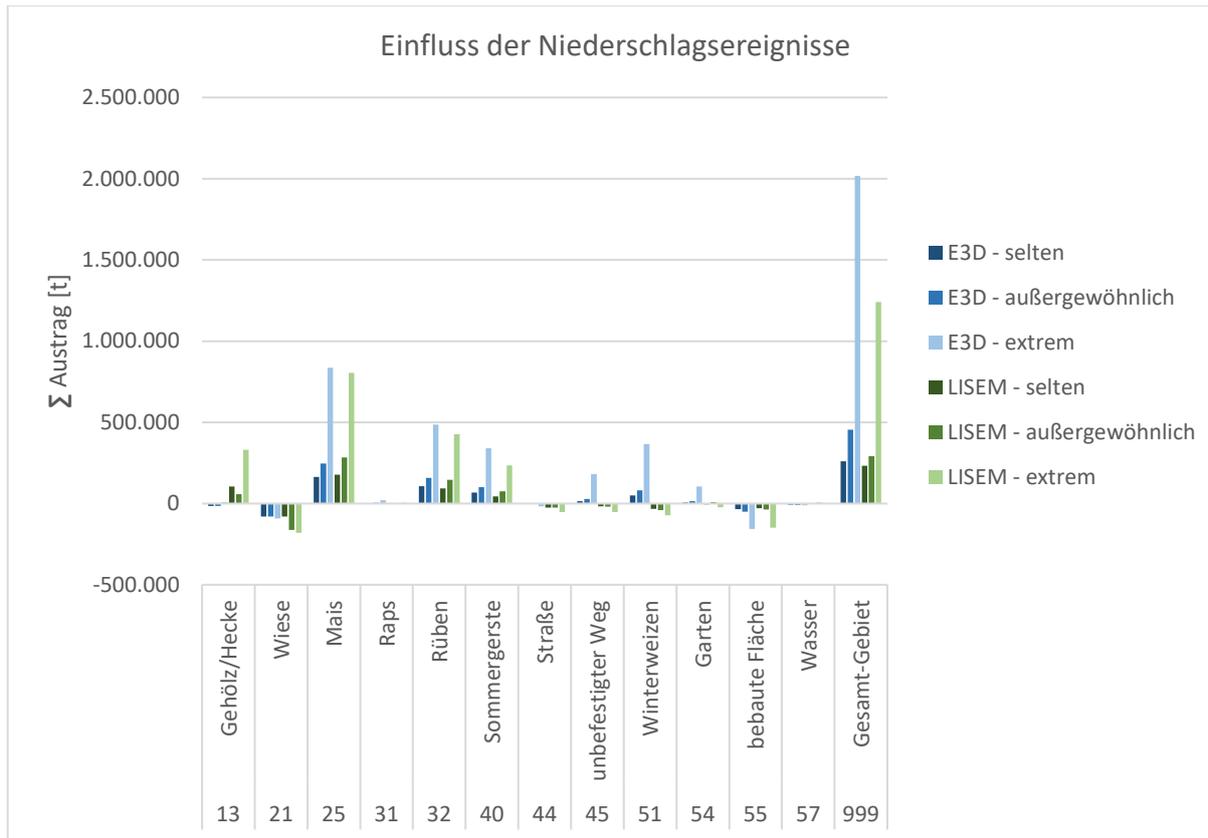


Abb. 40: Vergleich der Niederschlagsereignisse für EROSION 3D bzw. openLISEM (Szenario: April, Belegung 1 (2018 Realbelegung), räumliche Auflösung: 5 m)

5.5.2 Frachtquantifizierung auf (Teil-)Einzugsgebietsebene

Die Identifizierung von Eintragspfaden und die Quantifizierung der Stoffeinträge in Gewässer ist u. a. im Rahmen der WRRL von großer Bedeutung. Beide Modellierungswerkzeuge bilden die Transportpfade Oberflächenabfluss für gelöst transportierte Stoffe und Sedimentverlagerung für partikulär gebundene Stofffrachten ab. Diese Pfade sind z. B. zur Quantifizierung von Phosphor- und Schwermetallfrachten maßgeblich. Die Korngrößenverteilung des transportierten Materials kann dabei erheblichen Einfluss auf die tatsächlichen, partikelgebundenen Frachten haben. Zum Beispiel sind Schwermetalle und Phosphor vorrangig an kleine Korngrößen (Ton und Schluff) gebunden, wobei eine Separation der Korngrößen während des Transportprozesses erfolgen kann.

Beispielhaft wurden die zwei Teileinzugsgebiete „Böhlachgraben“ (ca. 1,8 km²) und „Aischbach“ (ca. 4,2 km²) in der Good-Case-Modellierung der gesamten Glemsregion mit dem *außergewöhnlichen* Ereignis im April betrachtet.

Eine korngößenspezifische Abschätzung des ausgetragenen Materials ist mit EROSION 3D möglich, da Ton- und Schluffanteile am transportierten Sediment separat berechnet werden. Die Ausgabe dieser Anteile erfolgte für im Vorfluternetz kumulierte Frachten in der Ergebnisdatei pp_data.csv für zur Beobachtung definierte Rasterpunkte.

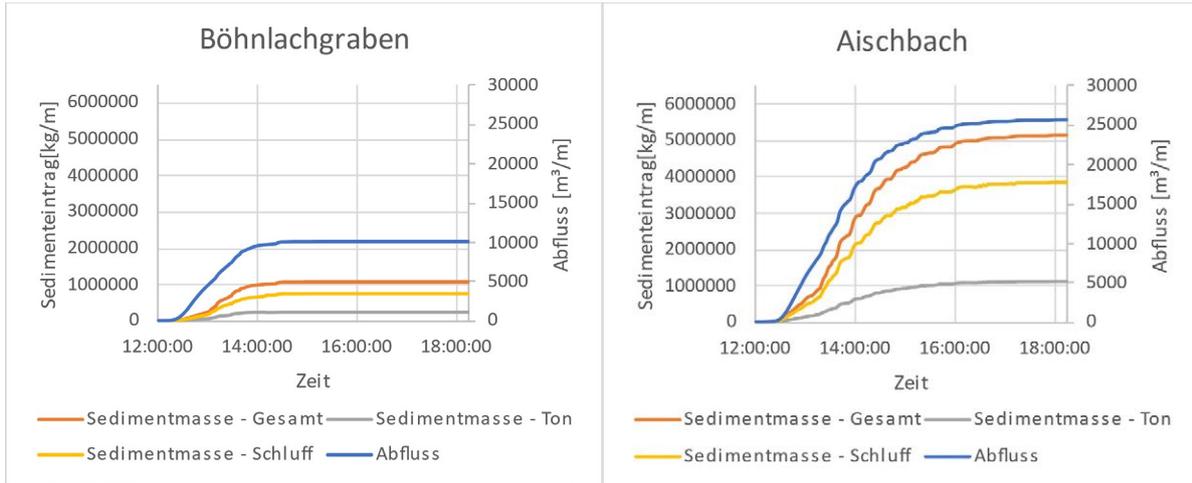


Abb. 41: Mit EROSION 3D modellierter zeitlicher Verlauf des Abflusses und Sedimenteintrags in die Teileinzugsgebiete Böhnlachgraben (1,8 km²) und Aischbach (4,2 km²). Das größere Einzugsgebiet des Aischbachs führt zu längeren Fließzeiten und insgesamt höheren Stofffrachten.

Zur konkreten Identifikation von Übertrittspunkten entlang Gewässerachsen haben Schindewolf und Schmidt (2012) den kumulierten Sedimentmassenstrom (sum_sedvol.*) mit dem Vorfluternetz verschnitten. Die Berechnung der Stofffrachten erfolgte dann anhand der Korngrößen-spezifischen mittleren Konzentrationen und der transportierten Sedimentmasse in den Korngrößenklassen. Der Gesamteintrag in das Vorfluternetz im Oberlauf eines bestimmten Punktes kann im Ergebnistraster ch_sum_sedvol.* abgefragt werden. Zutrittspunkte, die durch Schluff- bzw. Toneinträge dominiert sind, können anhand der standardmäßig ausgegebenen Ergebnistraster clayfrac.* und siltfrac.* ermittelt werden.

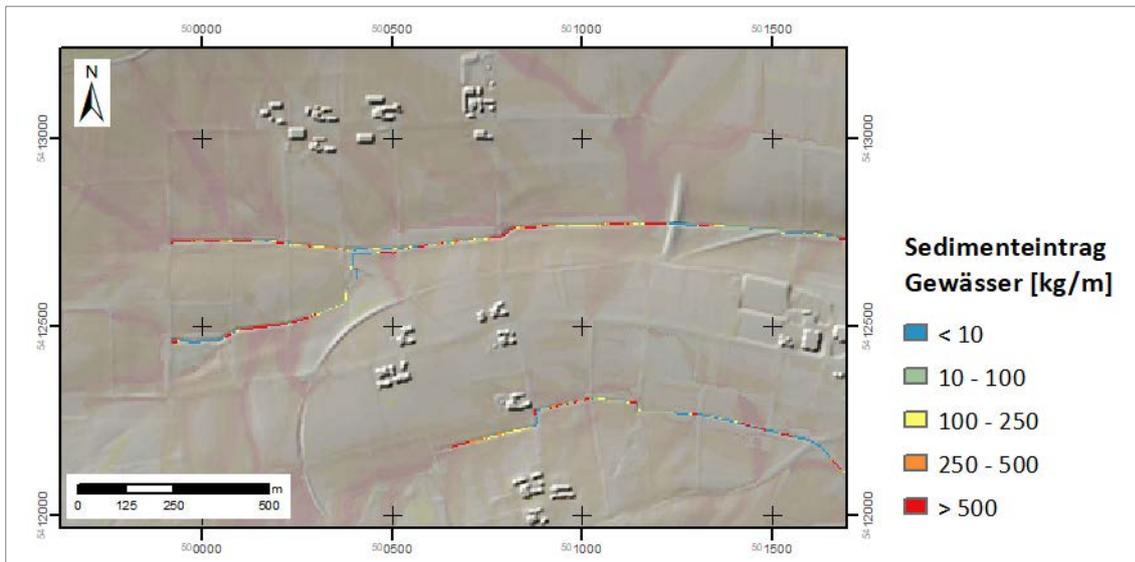


Abb. 42: Lokalisierung von Sedimenteinträgen in Gewässer

Im Vergleich der Good-Case-Belegung zur Realbelegung zeigt sich, dass für den Böhnlachgraben geringere Sedimentfrachten modelliert wurden.

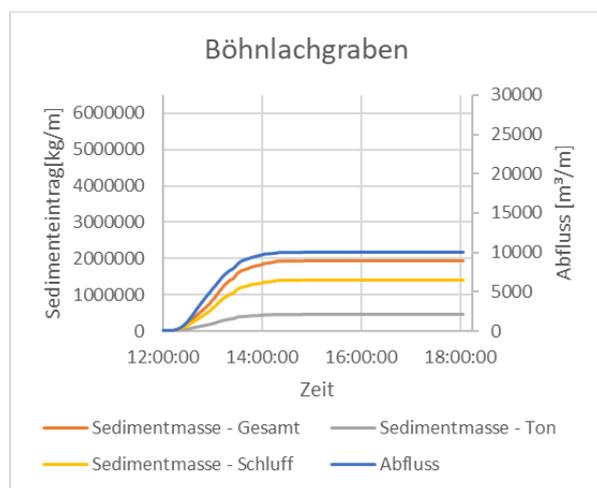


Abb. 43: Mit EROSION 3D modellierter zeitlicher Verlauf des Abflusses und Sedi-
menteintrags im Teileinzugsgebiet Böhlach in der Realbelegung 2018

Eine Aufnahme von Ganglinien an Beobachtungspunkten ist in openLISEM prinzipiell auch möglich. Mit den gesetzten Beobachtungspunkten würden aufgrund der Ausuferung die Sediment- und Wasserfrachten im gesamten Fließquerschnitt in openLISEM nicht erfasst.

Bei openLISEM kann eine zeitschrittweise Ausgabe des in Bewegung befindlichen Sediments aktiviert werden. Anhand dieser ausgegebenen Karten kann eine Summenkarte der Sedimentbewegung analog der `sum_sedvol.*` in EROSION 3D erstellt und entsprechend weiter ausgewertet werden. Dabei ist zu beachten, dass durch Ausuferung des Wassers aus den Kanälen die berechnete Sedimentmassenbilanz wiederum beeinflusst werden kann. Zum Beispiel kann in Bereichen, die im Modelllauf überflutet sind, Sediment abgelagert werden. Bei einem Wiedereintritt von sedimentbeladenem Wasser kann die ins Gewässer gelangende Sedimentfracht überschätzt werden.

5.5.3 Plausibilisierung der Ergebnisse

Die in den Szenarien angenommenen Randbedingungen weichen von möglichen realen Ereignissen ab (z. B. zeitliche Verteilung und Intensität von Niederschlagsspitzen, Überregnungsanteil des Einzugsgebiets). Eine Validierung der Ergebnisse an konkreten Messwerten kann daher nicht erfolgen, weshalb eine Plausibilisierung durchgeführt wurde. Im Zeitraum des Projekts wurden keine Ereignisse im Projektgebiet mit dem Erfassungsbogen (Kap. 8.4) erfasst, die zur Validierung unter realistischen Randbedingungen hätten genutzt werden können.

Über verschiedene Vergleiche der Modellergebnisse untereinander, durch den Abgleich mit Meldungen zu Brennpunkten aus dem KliStaR-Projekt (vgl. Kap. 2.2.2) und durch die Präsentation der Karten bei dem Workshop mit Landwirten und kommunalen Vertretern, konnten die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden. Im Folgenden sind diese Plausibilisierungen zusammengefasst.

Vergleich openLISEM – EROSION 3D

Der Vergleich der Modellergebnisse (s. Kap. 5.5.1) zeigt, dass die Größenordnungen des Gesamtaustrags bei beiden Werkzeugen ähnlich sind, was auf plausible Ergebnisse hindeutet. Die Erosions- und Depositionsmuster unterscheiden sich zum Teil allerdings deutlich.



Plausibilisierung mit Stakeholdern

Bei der Projektvorstellung und Präsentation der Erosions-Depositionskarten im Workshop mit den Landwirten, kommunalen Vertreterinnen / Vertretern und Teilnehmenden der Unteren Bodenschutz- und Landwirtschaftsbehörden wurden die Ergebnisse plausibilisiert (vgl. Kap. 3). Einige Rückmeldungen sind hier nochmals aufgeführt:

- Abweichung Erfahrung – Kartendarstellung an einzelnen Punkten
- Aktualität der Landnutzung (Acker – Grünland)
- Übertrittspunkte/Tiefenlinie teilweise falsch, Verwallungen → lokale Abweichung im DGM → Berücksichtigung in Detailmodellierung
- Bearbeitungsmethoden nicht berücksichtigt – Bearbeitungsrichtung, Direktsaat
- Sedimentationsvergleiche wurden bei LISEM als plausibler wahrgenommen
- Lokal wechselnde Hangneigung, teilweise nicht hinreichend in Karten erkennbar

Vergleich zu KliStaR Ergebnissen

Im Rahmen des KliStaR-Projekts (s. Kap. 2.2.2, Billen et al. 2017) wurden bei Workshops bereits auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen durch kommunale Vertreter gekennzeichnet, die als kritische Bereiche für Abfluss und Erosion, sog. Brennpunkte, bereits bekannt waren. Diese befanden sich in den folgenden Kommunen: Ditzingen, Eberdingen, Korntal-Münchingen, Leonberg, Markgröningen und Schwieberdingen. Ein Abgleich dieser Schwerpunkte mit der Erosionsgefahren- und Überflutungstiefenkarte zeigt, dass an vielen Stellen Erosion und Deposition hohe Beträge aufweisen bzw. der Abfluss recht hoch ist. Einen Auszug aus dieser Karte kann Abb. 44 entnommen werden. Von den 55 KliStaR-Brennpunkten liegen 44 auf Flächen mit hohen und sehr hohen Erosions- oder Depositionsbeträgen beim *außergewöhnlichen* Bad-Case Szenario im April von EROSION 3D. Daraus kann man schließen, dass die Modellergebnisse plausibel sind.

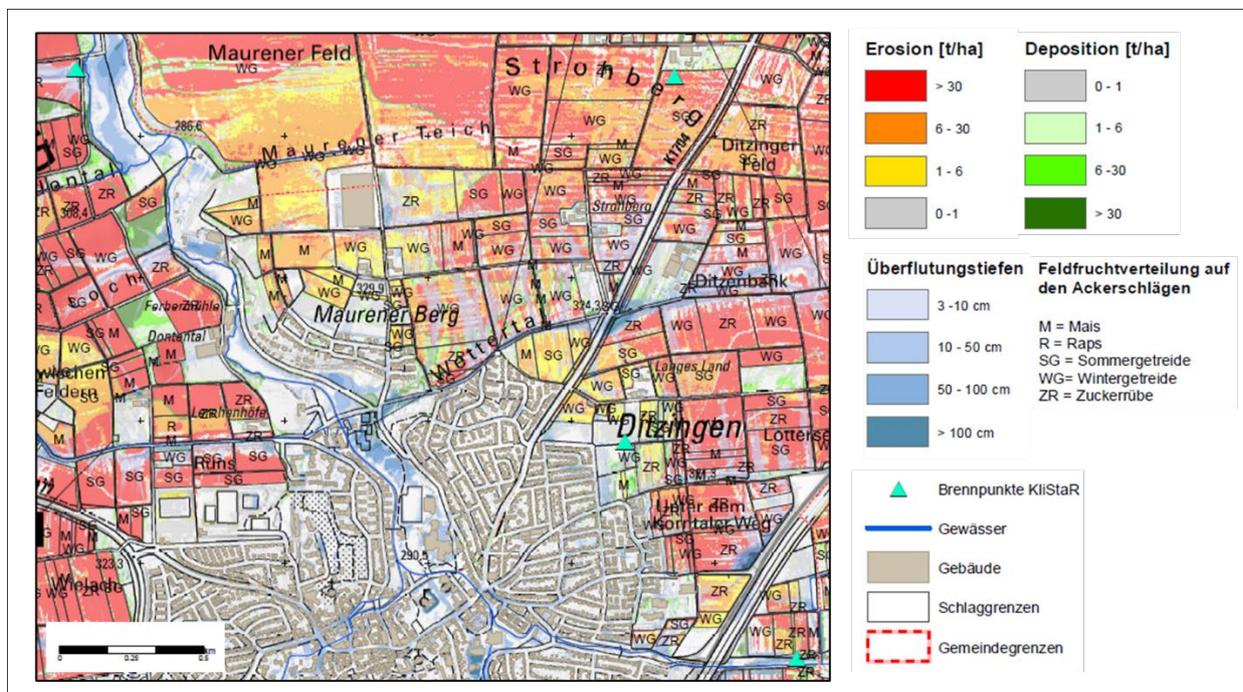


Abb. 44: Auszug aus der Erosions-Depositionskarte mit Darstellung der Überflutungstiefen mit Brennpunkten aus KliStaR (EROSION 3D, Szenario: April, außergewöhnliches Niederschlagsereignis, Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)

Berücksichtigung anderer Modellvergleichen Starkloff und Stolte (2014)

Starkloff und Stolte (2014) führten einen angewandten Modellvergleich von LISEM und EROSION 3D in einem vorwiegend landwirtschaftlich genutzten kleinen Einzugsgebiet (4,5 km²) in Südnorwegen durch, bei dem auch der Einfluss unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösungen betrachtet wurde.

LISEM (Version 2.58) und EROSION 3D (Modellversion aus dem Jahr 2011) wurden anhand des Hydrographen einer Abflussmessstation eines Teileinzugsgebiets für ein Starkregenereignis kalibriert.

Mit beiden Modellen konnten die Ganglinien mit zufriedenstellender Genauigkeit simuliert werden, wobei bei EROSION 3D ein deutlich stärkerer Einfluss unterschiedlicher räumlicher bzw. zeitlicher Auflösungen sowie verwendeter DGMs auf die simulierte Abflussganglinie beobachtet wurde als bei LISEM. In den simulierten Erosions-/Depositionsmustern zeigten sich sehr deutliche Unterschiede zwischen beiden Modellen. In einem qualitativen Vergleich mit einem zur Verfügung stehenden Orthofoto werden die Erosions-/Depositionsmuster von EROSION 3D als plausibler eingeschätzt.

Die Autoren schlussfolgern, dass beide Modelle für die Vorhersage und Lokalisierung des Erosionsrisikos eingesetzt werden können. Jedoch wird LISEM als die bessere Wahl für die Untersuchung hydrologischer Prozesse in Einzugsgebieten angesehen, während sich EROSION 3D besser als Planungsinstrument eignet.

Unterschiede in den Erosions-Depositionsmustern wurden bei den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Simulationen im Glems-Gebiet ebenfalls festgestellt, auch wenn diese nicht so ausgeprägt waren wie bei den Simulationen von Starkloff und Stolte (2014). Der Effekt unterschiedlicher Rasterauflösungen auf die Ergebnisse war im aktuellen Projekt ebenfalls bei EROSION 3D stärker ausgeprägt als bei openLISEM (vgl. Kap. 5.5).

5.6 Kartenerstellung und -design

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Karten im PDF-Format erstellt:

- Erosionsgefahrenkarten:
 - o Erosions-Sedimentationskarten der gerechneten und generierten Szenarien in t/ha und vereinfachten Klassen
 - o Sedimentfrachtkarten: Sedimentfracht bei EROSION 3D in kg/m und vereinfachten Klassen
- Muldenkarte: Übersicht zu den im Projektgebiet vorkommenden Senken
- Nutzungskarten: Übersichtskarten zu den Belegungsszenarien
- Berichtskarten: diverse Karten für die Dokumentation im Bericht

Zu beachten ist, dass in den Legenden der im Rahmen des Projekts erstellten sowie der hier im Bericht dargestellten Karten noch die ursprünglich verwendeten Bezeichnungen für Feldfruchtverteilungen auf den Ackerschlägen dargestellt sind. Im Nachgang der Abschlussveranstaltung erfolgte eine Umbenennung der Hauptfruchtgruppen, die bei dem zukünftigen landesweiten Prozess berücksichtigt werden sollen (siehe Kap. 4.3.3)

Erosionsgefahrenkarten: Erosions-Depositions- und Sedimentfrachtkarten

Die Erosionsgefahrenkarten bestehen aus zwei Themenkarten: Erosions-Depositionskarten und Sedimentfrachtkarten.

In der Erosions-Depositionskarte wird das Abschwemmen (= Erosion in t/ha) und Anlanden (= Sedimentation in t/ha) von Bodenmaterial dargestellt, so wie es bei den simulierten Starkregen von ca. 43 mm (SEL), ca. 54 mm (AUS) und ca. 128 mm (EXT) in einer Stunde erwartet wird.

Die Klassifikation sowie die Farbgebung wurden mit der Arbeitsgruppe abgestimmt. Die Erosion wird in den Karten mit zunehmendem Ausmaß in Gelb- über Orange- bis zu Rottönen dargestellt. Die Stärke der Sedimentation ist in zunehmend kräftigeren Grüntönen dargestellt (s. Abb. 31). Dadurch ergeben sich Hinweise auf die Risiken von Verschmutzungen und Schäden auf Straßen, auf Wegen, in Gewässern und an Gebäuden. Neben den Gemeindegrenzen, Gewässern und Gebäuden sind auf den Karten auch die Schlaggrenzen sowie die Belegung der Ackerflächen aus den jeweiligen Szenarien enthalten.

Die Erosions-Depositionskarten werden außerdem zum einen als Übersichtskarten für das gesamte Glemsgebiet zu je drei Blättern im Maßstab 1:25.000 sowie einzelne Szenarien als Detailkarten für die Stadt Ditzingen (Maßstab ca. 1:13.000) in DIN A1 Größe zur Verfügung gestellt. Die Namensbezeichnung beinhaltet folgende Elemente:

- Art der Karte: Erosions-Depositionskarte
- Gebiet: Glems, Ditzingen
- Maßstab: 1:25.000 (Übersichtskarte), ca. 1:13.000 (Ditzingen)
- Modell: EROSION 3D, openLISEM
- Auflösung: 1 m, 5 m, 10 m
- Monat: 04, 06, 09
- Starkregenereignis: SEL, AUS, EXT
- Belegung: Beleg 1 bis Beleg 4, Good Case, Bad Case, konservierend
- Kartenblattnummer (nur bei Übersichtskarte): 1, 2, 3

Als Beispiel zeigt Abb. 45 das dritte Kartenblatt der Erosions-Depositionskarte des *extremen* Ereignisses im September mit der Belegung 1, gerechnet mit dem Erosionsmodell EROSION 3D mit einer Auflösung von 5 m im Maßstab 1:25.000: Erosions-Depositionskarten_Glems_M25000_E3D_5m_09_EXT_Beleg1_3.pdf

Eine Beispielkarte für das *außergewöhnliche* Starkregenereignis im April mit der realen Belegung 1 modelliert mit EROSION 3D ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

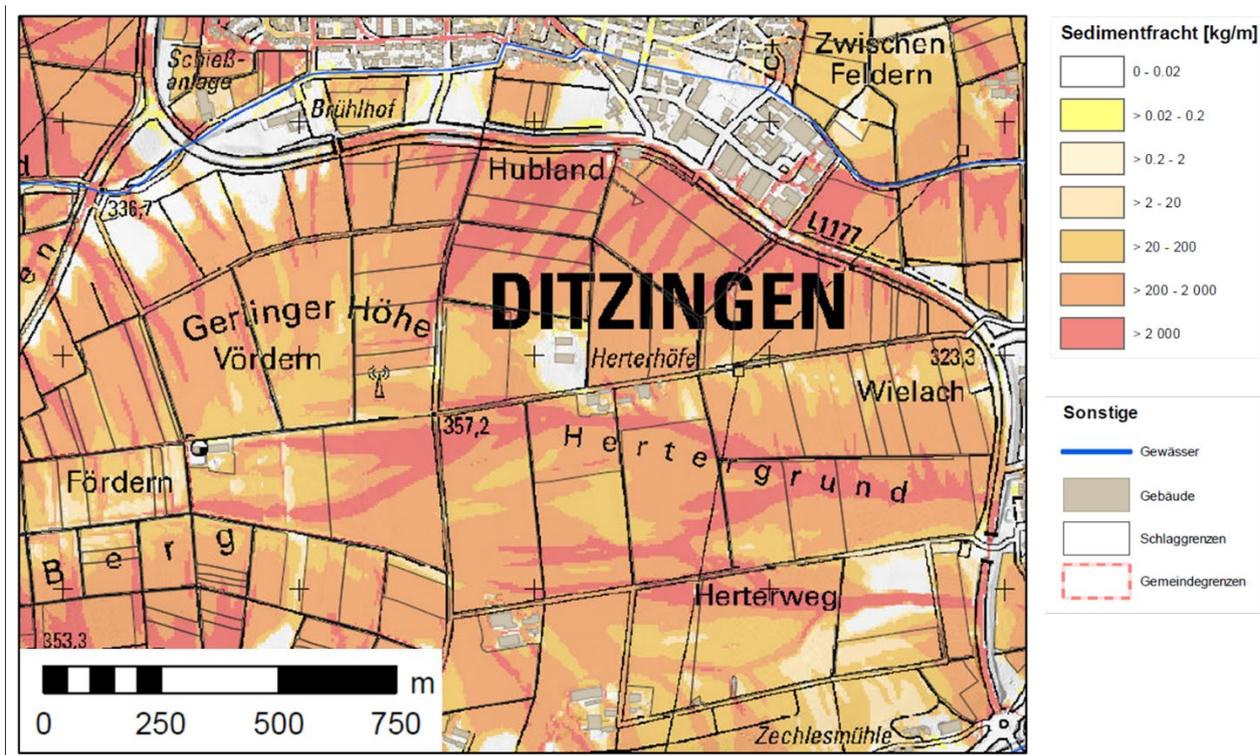


Abb. 46: Auszug aus der Sedimentfrachtkarte (EROSION 3D, Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)

Sonstige Karten

Neben den oben genannten Karten wurden vor allem für Berichtszwecke bzw. für die Workshops weitere Karten erstellt. Übersichtskarten gibt es zu den vier Belegungsrotationen, den Mulden/Senken (vgl. Kap. 4.2.2), den Brennpunkten aus dem KliStaR-Projekt (vgl. Kap. 2.2.2, 4.1.2 und 5.5.3), CC-Erosionsgefährdung und ABAG (vgl. Kap. 6.3) sowie „Erosionsgefahrenkarte Baden-Württemberg“ und Minderungspotentialkarten als landesweite Kartengrundlage (vgl. Kap. 7.1).

6 Modelleignung, Bewertungen und Hinweise

6.1 Inhaltlicher Vergleich der Simulationsergebnisse der Modelle

Die Auswertung der Erosions-Depositionskarten (vgl. Abb. 32) ergab eine gute Übereinstimmung zwischen openLISEM und EROSION 3D insbesondere bei den Austragungssummen.

Deutlichere Unterschiede zwischen beiden Modellen zeigten sich hingegen in den Ablagerungsmustern: Während bei openLISEM beim Übertritt von sedimentbeladenem Wasser auf eine Wintergetreide- oder Wiesenfläche eine Deposition meist innerhalb relativ kurzer Distanzen modelliert wurde, ergab die Simulation mit EROSION 3D einen Transport über deutlich weitere Distanzen (vgl. Abb. 32).

Unterschiede zwischen in den Erosions-Depositionsmustern bestehen zudem im Bereich der Vorfluter. Da bei openLISEM im Gegensatz zu EROSION 3D auch der Aus- und Wiedereintritt von Wasser und Sediment aus bzw. in Vorfluter modelliert wird, zeigen sich bei openLISEM entlang dieser deutliche Erosions-/Depositionsmuster (vgl. Abb. 32).

6.2 Vergleich unterschiedlicher DGM-Auflösungen

In den zonalen Summen für das Gesamtgebiet zeigten sich relativ geringe Unterschiede zwischen Simulationen mit 5 m und 10 m räumlicher Auflösung (vgl. Abb. 33). In den Erosions-Depositionsmustern sind geringe Unterschiede erkennbar: Mit steigender Rasterweite können feine Strukturen zunehmend schlechter abgebildet werden. Vor dem Hintergrund der typischen Breite hydraulisch relevanter Strukturen wie z. B. Wege, ist davon auszugehen, dass diese Dammstrukturen bei einer räumlichen Auflösung von 10 m nicht mehr abgebildet werden können.

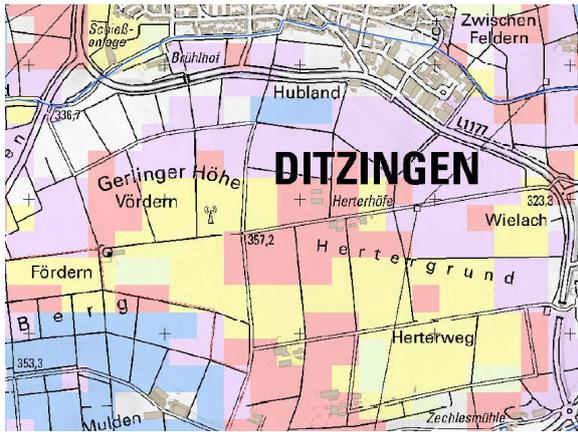
Ein erheblicher Unterschied in Erosions-Depositionsmustern ergab sich bei den Simulationen mit 1 m räumlicher Auflösung im Vergleich zu 5 m bzw. 10 m (vgl. Abb. 33). Hier zeigen sich bei beiden Modellen die feinen bodenbearbeitungsbedingten Oberflächenstrukturen der Ackerflächen zum Zeitpunkt der Laserscan-Befliegung im DGM auch deutlich in den Erosions-Depositionskarten.

Aufgrund der fehlenden Depositionsbereiche und Null-Werte erscheinen die Ergebnisse bei der 1 m Simulation mit openLISEM unplausibel, sodass die hier verwendete Version von openLISEM (6.80) nicht für Simulationen mit 1 m Auflösung empfohlen wird. Bei großen Datenmengen von großen, zusammenhängenden Gebieten müssen die Ergebnisse geprüft werden.

6.3 Vergleich mit ABAG-Daten/CC-Kulisse

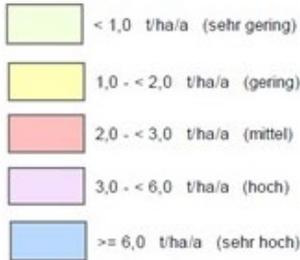
Vergleicht man die Erosionskarten der physikalisch-basierten Modellierung mit der ABAG-Karte (s. Abb. 47), fällt vor allem die unterschiedliche Auflösung auf. Während die Karten von EROSION 3D und openLISEM im feineren 5-m-Raster dargestellt werden, liegen die ABAG-Daten im groben 100-m-Raster vor. Im Gegensatz zur ABAG-Karte sind die im Projekt erzeugten Karten räumlich besser differenziert und erlauben damit z. B. die Identifikation von Abflussbahnen. Die erosionshemmende Wirkung von Dauergrünland und Waldflächen wird in den Karten ebenso sichtbar, wie Depositionsflächen.

ABAG

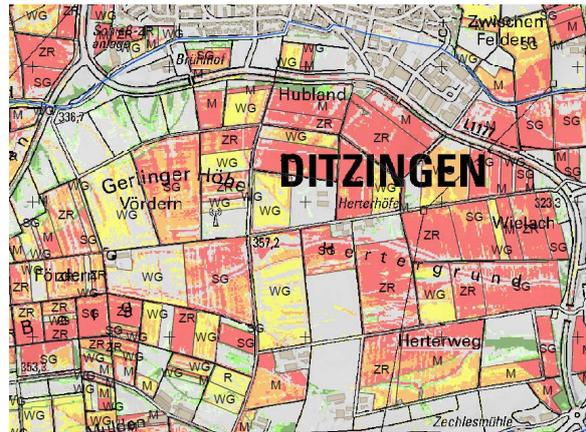


Legende:

Erosionsklassen

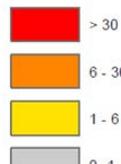


EROSION 3D

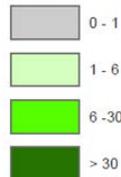


Legende:

Erosion [t/ha]



Deposition [t/ha]



Sonstige



Feldfruchtverteilung auf den Ackerschlägen

M = Mais
R = Raps
SG = Sommergetreide
WG = Wintergetreide
ZR = Zuckerrübe

Abb. 47: Vergleich der ABAG-Karte mit einer EROSION 3D-Karte

Die Einteilung der Ackerflächen nach Wassergefährdungsklassen (CC-Erosionskategorie) sind zwar flurstücksgenau, beruhen aber auf dem Produkt aus Bodenerodierbarkeits- und Hangneigungsfaktor (K- und S-Faktor). Reb-, Grün- und sonstige Landnutzungsflächen finden in diesen Karten keine Berücksichtigung im Gegensatz zu den Erosions-Depositionskarten aus den physikalisch-basierten Modellierungen. Die genauen Erosions- und Akkumulationsbereiche sind auch hier nicht zu identifizieren (vgl. Abb. 48)

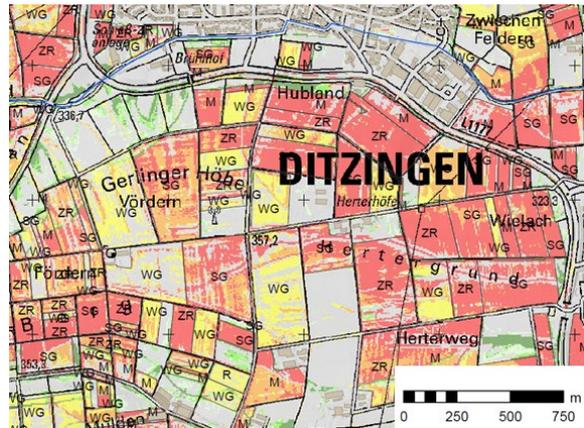
CC-Kulisse



Wassererosionsgefährdungsklassen

- CC 0 (geringe - keine)
- CC 1 (mittlere)
- CC 2 (hohe)

EROSION 3D



Legende:

- Erosion [t/ha]**
 - > 30
 - 6 - 30
 - 1 - 6
 - 0 - 1
- Deposition [t/ha]**
 - 0 - 1
 - 1 - 6
 - 6 - 30
 - > 30
- Sonstige**
 - Gewässer
 - Gebäude
 - Schlaggrenzen
 - Gemeindegrenzen
- Feldfruchtverteilung auf den Ackerschlägen**
 - M = Mais
 - R = Raps
 - SG = Sommergetreide
 - WG = Wintergetreide
 - ZR = Zuckerrübe

Abb. 48: Vergleich der CC-Kulissen-Karte mit einer EROSION 3D-Karte

Ein Vergleich der Berechnungsmethodik, der zugrundeliegenden Daten und der dargestellten Größen zwischen den ABAG-Daten, der CC-Kulisse sowie den im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Erosionsgefahrenkarten mittels openLISEM bzw. EROSION 3D ist in Tab. 11 dargestellt (Daten zur CC-Kulissen-Karte stammen vom MLR).

Tab. 11: Vergleich der ABAG-Daten, CC-Erosionskulisse Wasser und der openLISEM/EROSION 3D-Erosionsgefahrenkarten

	ABAG-Daten 100 m Raster¹	CC-Erosions- kulisse Wasser²	Erosionsgefahrenkarten (Glems) mit openLISEM bzw. EROSION 3D
Dargestellte Größe	langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/ha/a] (klassifiziert)	Wassererosionsgefahrenklassen (aus dem Produkt von K-Faktor * S-Faktor)	Erosion/Deposition [t/ha] Sedimentfracht [kg/m] (für Einzelniederschlagsereignisse), zur Darstellung klassifiziert
Erhebungsbereich	Acker- und Rebflächen	ackerbaulich genutzte Flurstücke (außer Rebland)	flächendeckend
Räumliche Einheit	100-m-Raster	Flurstücke	5-m-Raster



	ABAG-Daten 100 m Raster¹	CC-Erosions- kulisse Wasser²	Erosionsgefahrenkarten (Glems) mit openLISEM bzw. EROSION 3D
Eingangsdaten: Relief- informationen	S-Faktor aus Median der Hangneigung (aus DGM5) des landwirtschaftlich genutzten Flurstückteils	S-Faktor aus mittlerer Hangneigung (aus DGM5) des landwirtschaftlich genutzten Flurstückteils	Rasterzellenweise Reliefanalyse und Fließwegberechnung auf Basis des DGM5 (u. a. Hangneigung, Fließrichtung, Abflussakkumulation)
	L-Faktor aus flurstücksgruppenweise berechneter Hanglänge (aus Höhendifferenz und mittlere Hangneigung)	---	
Eingangsdaten: Bodeninformationen	K-Faktor abgeleitet aus Bodenschätzung (je Flurstück)	K-Faktor aus den Klassenzeichen der Bodenschätzung	Bodenparameterdatensatz mit BK50 Bodenart und Schichttiefe
Eingangsdaten: Landnutzungs- informationen	C-Faktor aus Gemeindeangaben zur Bodennutzungshaupterhebung von 2007 unter Berücksichtigung der Mulchsaat- und Zwischenfruchtanteile (räuml. Auflösung: Gemarkung)	---	Boden-Nutzungsparameterdatensatz auf Grundlage Basis-DLM und aus ECoLaSS Crop Type Prototype 2018 abgeleiteten Schlägen mit 4 Belegungsrotationen (räumliche Einheiten: Schläge von 2018) Bad-Case-Szenario: Maximum aus den 4 Belegungs-szenarien
Eingangsdaten: Bodenbearbeitung	konstanter P-Faktor von 0,75	---	Boden-/Bodenbedeckungsparameter flächendeckend für konventionelle Bodenbearbeitung parametrisiert
Eingangsdaten: Niederschlagsinformation	R-Faktor aus Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (500 m Raster)	---	Modellregen für Einzelereignis von 60 min Dauer (<i>selten, außergewöhnlich, extrem</i> gemäß SRRM) (1 km Raster, 10 min Zeitschritte)



	ABAG-Daten 100 m Raster ¹	CC-Erosions- kulisse Wasser ²	Erosionsgefahrenkarten (Glems) mit openLISEM bzw. EROSION 3D
Bemerkungen		Berücksichtigung von Geringfügigkeitsschwellen: Die Endbewertung eines Flurstücks hängt von den CC-Bewertungen in der Umgebung ab. Durch die Generalisierung wird kein Flurstück schlechter gestellt (Verschlechterungsverbot).	

¹ Methodik: siehe LGRB (2015)

² Methodik: siehe LGRB (2008)

6.4 Performancevergleich und Aufwandanalyse

Neben dem inhaltlichen Vergleich wurde ebenso ein Vergleich über das Leistungsverhalten der beiden Werkzeuge gemacht. Hierzu wurden Simulationen des gesamten Glemseinzugsgebiets (ca. 4 Mio. Rasterzellen) mit openLISEM und EROSIO 3D des einstündigen *außergewöhnlichen* April Szenarios mit der Belegung 1 im 10-m-Raster auf einem PC mit einem Prozessor CPU Intel Xeon (3,6 GHz) mit vier Kernen und einem Arbeitsspeicher von 32 Gigabyte RAM durchgeführt.

Die Modelleinstellungen wurden von den bisherigen Simulationsläufen übernommen. Dabei wurde bei beiden Modellsimulationen parallel auf allen vier Kernen gerechnet. Während die Simulationsläufe mit EROSION 3D durchschnittlich ca. 30 Minuten benötigten, brauchte openLISEM durchschnittlich ca. zwei Stunden.

Bei openLISEM wurde festgestellt, dass sich die Ergebnisse deutlich unterscheiden, wenn mit einer unterschiedlichen Anzahl von Rechenkernen simuliert wird. Bei einem Test des gesamten Glemseinzugsgebiets (ca. 16 Mio. Rasterzellen) des einstündigen *extremen* April Szenarios mit der Belegung 3 im 5 m Raster auf einem Server Computer mit einem Prozessor AMD (2,35 GHz) mit 32 Kernen und einem Arbeitsspeicher von 256 Gigabyte RAM mit einer parallelen Simulation auf sechs Kernen gab es einen Unterschied bei der Erosion von 5,6 % im Vergleich zu derselben Simulation gerechnet auf demselben Server mit einem Kern. Die Rechendauer bei der parallelen Simulation auf sechs Kernen benötigte hierbei sechs Stunden, während der Simulationslauf auf einem Kern mit ca. 34 Stunden deutlich länger lief. Der Modellentwickler beschreibt, dass das Rechnen auf mehreren Kernen zwar schneller, aber auch fehleranfälliger bei großen Gebieten ist, weshalb das Verwenden von nur einem Rechenkern empfohlen wird.

Hinsichtlich der Bedienbarkeit handelt es sich bei beiden Modellen um Experten-Software, die eine gewisse Einarbeitung und Expertise erfordert. Hohen Aufwand erfordert u. a. die Daten-Prozessierung bei openLISEM, während der Parameterdatensatz bei

EROSION 3D überschaubarer ist. Es ist zu beachten, dass bei beiden Modellen viele verschiedene Einstellungen möglich sind, die z. T. unterschiedliche Ergebnisse liefern.

6.5 Hinweise für die Anwendung hinsichtlich unterschiedlicher Anwendungsfelder

6.5.1 Anwendungsfelder und Akteure

Aus einer Bedarfsanalyse bei den Akteurs-Workshops (vgl. Kap. 3) sowie auf Basis des rechtlichen und förderpolitischen Rahmens in Baden-Württemberg wurden die Anwendungsfelder für Bodenerosionsmodellierungen zusammengestellt (vgl. Tab. 12).

Tab. 12: Zusammenstellung der Anwendungsfelder „Erosionsmodellierung“ in Baden-Württemberg und Akteure

Anwendungsfall	Ebene	Akteure	Kurzbeschreibung/Anforderungen
Ersteinschätzung bzgl. Erosion im SRRM	Kommunal	SRRM-Beteiligte	<ul style="list-style-type: none"> - Ersteinschätzung Bodenerosion im SRRM - geringe bodenkundliche/erosionsmodellierungs-Expertise - Schutzziel: Objektschutz (Sedimenteinträge in vulnerable kommunale Infrastruktur)
Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft	Schlag	Landwirte/Landwirtinnen; Landwirtschaftlich Beratende; Landwirtschaftsbehörden; Boden-schutz-behörden	<ul style="list-style-type: none"> - Szenarien zu Bodenbearbeitung, landwirtschaftlichen Schutzmaßnahmen (Schlaggestaltung, Grünstreifen etc.) - Schutzziele: Bodenschutz (vor Abträgen auf Ackerflächen), Objektschutz (z. B. vor Einträgen auf Infrastruktur) - Beratung von Landwirten zu z. B. konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren erfordert hohes Maß sowohl an pflanzenbaulicher als auch bodenschutzfachlicher Expertise
Erosions-einstufung für Förderkulissen	Schlag/Flurstück (landesweit)	Ministerien	<ul style="list-style-type: none"> - Schutzziele: Bodenschutz (Schutz vor Bodenabträgen auf Ackerflächen)
Bewertung der Phosphat-Einträge in Gewässer	Kleine/mittlere Einzugsgebiete	Wasserbehörden; Landwirtschaftsbehörden	<ul style="list-style-type: none"> - Schutzziel: Gewässer (partikelgebundene Phosphat-Einträge) - Abschätzung des (korngrößen-spezifischen) partikelgebundenen Transports



6.5.2 Bewertung Modelleignung hinsichtlich Anwendungsfeldern

Auf Grundlage der vergleichenden Auswertung der Simulationsergebnisse (Kap. 5.5) sowie des Performancevergleichs und der Aufwandsanalyse (Kap. 6.4) wurden in Tab. 13 Kriterien zusammengestellt, die für die Modellauswahl herangezogen werden können. Es wird zu beiden Modellen jeweils eine kurze Einschätzung/Bewertung gegeben.

Tab. 13: Kriterien für Modellauswahl

	Kriterium	openLISEM	EROSION 3D
Technisch	Performance	längere Rechenzeiten v. a. bei großen Gebieten	größere Stabilität/deutlich kürzere Rechenzeit (insbesondere bei großen Gebieten)
	Modelleinstellungen	größere Auswahl (kann Anwender überfordern; insbesondere Forschungswerkzeug)	überschaubarere Auswahlmöglichkeiten
Fachlich	Abbildung der Akkumulation	Unterschiede zwischen beiden Modellen (vgl. Kap. 5.5.1): Eine Einschätzung, welche Annahmen plausibler sind, ist schwierig bis nicht möglich, aufgrund Unsicherheiten in Prozessverständnis und fehlender Validierungsdaten.	
	Bodenbearbeitungsverfahren	Parameterdatensatz zu unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren müsste für openLISEM erst zusammengestellt werden; detaillierter abbildbar (größerer Parameterumfang und Prozessbeschreibung)	bestehender Parameterdatensatz mit Berücksichtigung der Bodenbearbeitungsverfahren aus Sachsen als Grundlage verwendbar
	Vorfluter-Hydraulik und Ausuferung von Vorflutern	kann berücksichtigt werden	wird nicht berücksichtigt
	Differenzierung bei der Transportberechnung zwischen den verschiedenen Korngrößenklassen	keine	differenziert nach Korngrößenklassen (Ton, Schluff, Sand)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass openLISEM aufgrund der detaillierteren Prozessbeschreibung sowie Parametrisierungsmöglichkeiten insbesondere Vorteile bei Fragestellungen bietet, bei denen der Fokus auf der Hydraulik liegt bzw. die tendenziell wissenschaftlich sind.

Bei Anwendungsfällen in der Praxis, bei denen die Performance, ein überschaubarer Parameterumfang, die Korngrößendifferenzierte Sedimentfrachtberechnung (z. B. für die Abschätzung des partikelgebundenen Nähr- bzw. Schadstofftransportes) sowie die Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren von Bedeutung ist, bietet hingegen EROSION 3D Vorteile gegenüber openLISEM.



6.5.3 Allgemeine Hinweise

Systemeinstellungen

Die verwendete openLISEM Version (6.80) beachtet die Systemeinstellungen des Computers zur Festlegung der Dezimal- und Tausendertrennzeichen. Es muss daher sichergestellt werden, dass die in der *.run Datei verwendete Dezimaltrennung der Systemeinstellung entspricht. Als Dezimaltrennzeichen wird daher bei der Zahlenformateinstellung „Punkt“ empfohlen.

Boden- und Landnutzungsparameter

Unsicherheiten ergeben sich zum einen aufgrund der komplexen Parametrisierung der Eingabedaten der Erosionsmodelle, zum anderen durch die unterschiedliche Schätzmethode zur Parametrisierung der Boden- und Landnutzungsparameter. Die Parameterwerte wurden von Katalogen bzw. Literaturquellen übernommen, die teilweise aus Feldversuchen abgeleitet wurden. So wurden beispielsweise für die bodenphysikalischen Daten (hydraulische Leitfähigkeit, Matrixpotential, Anfangs- und Sättigungswassergehalt) Wassergehalte von zwei bis drei Tage nach einem Niederschlagsereignis angenommen (vgl. Kap. 5.3.1). Neben der Niederschlagsintensität und Vorbodenfeuchte haben auch weitere Faktoren wie z. B. die Bodenbedeckung Einfluss auf die Bodenerosion. Diese Pflanzenparameter können sich z. B. durch den Klimawandel zukünftig noch ändern und müssen ggf. angepasst werden.

Oberflächenabflusskennwerte

Für die hydraulische Modellierung zur Erstellung der Starkregengefahrenkarten im Rahmen des SRRM werden Oberflächenabflusskennwerte (OAK) als Datengrundlage bereitgestellt.

Diese wurden mit dem Modell RoGeR (Runoff Generation Research) für verschiedene Szenarien zum Niederschlag und der Verschlammung des Bodens (vgl. Tab. 14) in Abhängigkeit von Niederschlag, Landnutzung und Boden landesweit bestimmt.

Bezüglich des Bodenzustands (u. a. Vorfeuchte und Verschlammungszustand, aus BK50 K-Faktoren) wurde eine Situation im Sommer angenommen. Eine Differenzierung nach unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen erfolgte nicht.

Tab. 14: Mit RoGeR im SRRM berechnete OAK-Szenarien

	SEL	AUS	EXT
Verschlämmt	X	X	X
Nicht verschlämmt	X	X	

Da die Erosionsmodelle so konzipiert sind, dass diese mit Niederschlagsdaten als Eingangsdaten und eigenen Infiltrationsmodellen arbeiten (vgl. Kap. 5.1), können die OAK-Werte nicht für die Erosionsmodellierung als Eingangsdaten genutzt werden. Bei der Erosionsmodellierung muss die Niederschlagsintensität (und nicht nur der Effektivniederschlag, den die OAKs repräsentieren) eingehen, da ansonsten die Partikellösung durch auftreffende Regentropfen nicht berücksichtigt werden kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Szenarien (Zeitpunkt, Differenzierung von Feldfrüchten), der verwendeten Infiltrationsmodelle und dabei berücksichtigten (Teil-)Prozesse sind Unterschiede zwischen den OAKs und den im Rahmen der hier durchgeführten Erosionsmodellierungen ermittelten Infiltrationswerten bzw. Oberflächenabflüssen erwartbar. Abb. 49 zeigt dies exemplarisch für ein Beispiel auf einer Ackerfläche.

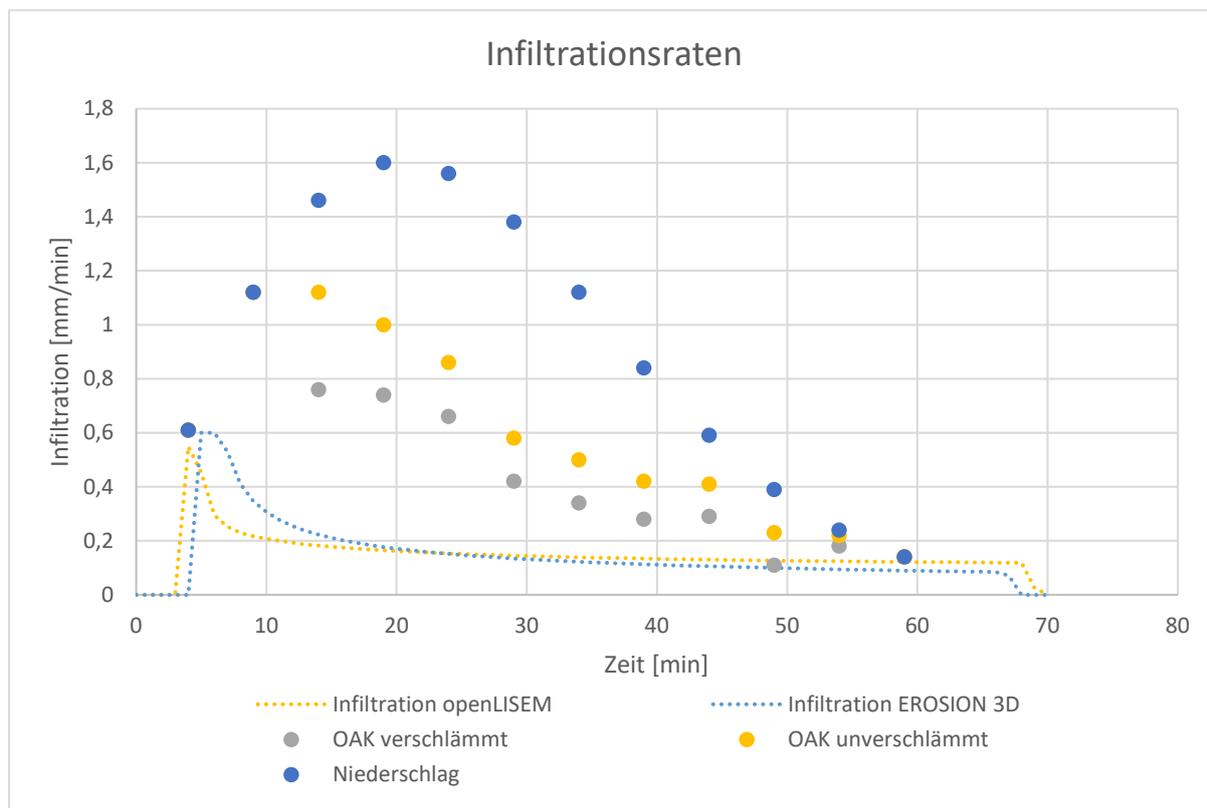


Abb. 49: Vergleich der Infiltrationsverläufe zwischen openLISEM bzw. EROSION 3D und der aus den OAK-Werten abgeleiteten Infiltration (Ackerfläche, bei Erosionsmodellierung: Sommergetreide; BK50-Kartiereinheit f45)

Für die Zukunft wird bei Aktualisierungen und Fortschreibungen eine Abstimmung zwischen OAKs und dem Erosionsmodellierungs-Parameterdatensatz empfohlen, um Synergien zu nutzen und die zugrundeliegenden Annahmen (insbes. auch bzgl. nicht Acker-Flächen) stärker zusammenzuführen.

7 Grundlagen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen in Baden-Württemberg

Basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudie Glems wird für das weitere Vorgehen in Baden-Württemberg ein kombinierter Ansatz aus einer landesweiten und einer dezentralen Bearbeitung vorgeschlagen.

Dieser kombinierte Ansatz ermöglicht einsatzweckspezifisch eine Verbindung der Vorteile beider Herangehensweisen. Für die landesweite Bearbeitung ist dies die Sicherstellung einer einheitlichen und optimierten Methodik, der im Vergleich zur Einzelbearbeitung reduzierte Aufwand bei der Bearbeitung aus einer Hand sowie Schaffung einer Planungsgrundlage auf landesweiter Ebene. Die Erhebung relevanter Informationen zur Bodenbearbeitung bzw. des Bodenzustandes sowie die bedarfsgerechte, simulationsbasierte Maßnahmenplanung unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten hingegen ist nur über ein dezentrales Vorgehen umsetzbar und kann nicht über ein statisches landesweites Kartenwerk geleistet werden.

Wesentliche Elemente der Empfehlungen für das weitere Vorgehen in Baden-Württemberg bilden:

- die künftige Verfügbarkeit landesweiter „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“ zur Ersteinschätzung der Erheblichkeit des Erosionsrisikos im Rahmen des kommunalen Starkregenrisikomanagement-Prozesses (SRRM) sowie
- ein Erosionsrisikomanagement-Prozess (ERM) auf kommunaler Ebene als Folgeprozess zum kommunalen SRRM, sofern ein erhebliches Erosionsrisiko vorliegt (abgeleitet aus der landesweiten „Erosionsgefahrenkarte Baden-Württemberg“).

In Kap. 7.1 wird eine detaillierte Beschreibung für die landesweite Ebene gegeben. Dies beinhaltet Hinweise bezüglich einer eventuellen schrittweisen Umsetzung (Kap. 7.1.2). Der Erosionsrisikomanagement-Prozess (ERM) auf kommunaler Ebene wird in Kap. 7.2 detailliert erläutert.

Eine Übersicht zu den vorgeschlagenen Prozessen wird in Abb. 50 zusammengefasst.

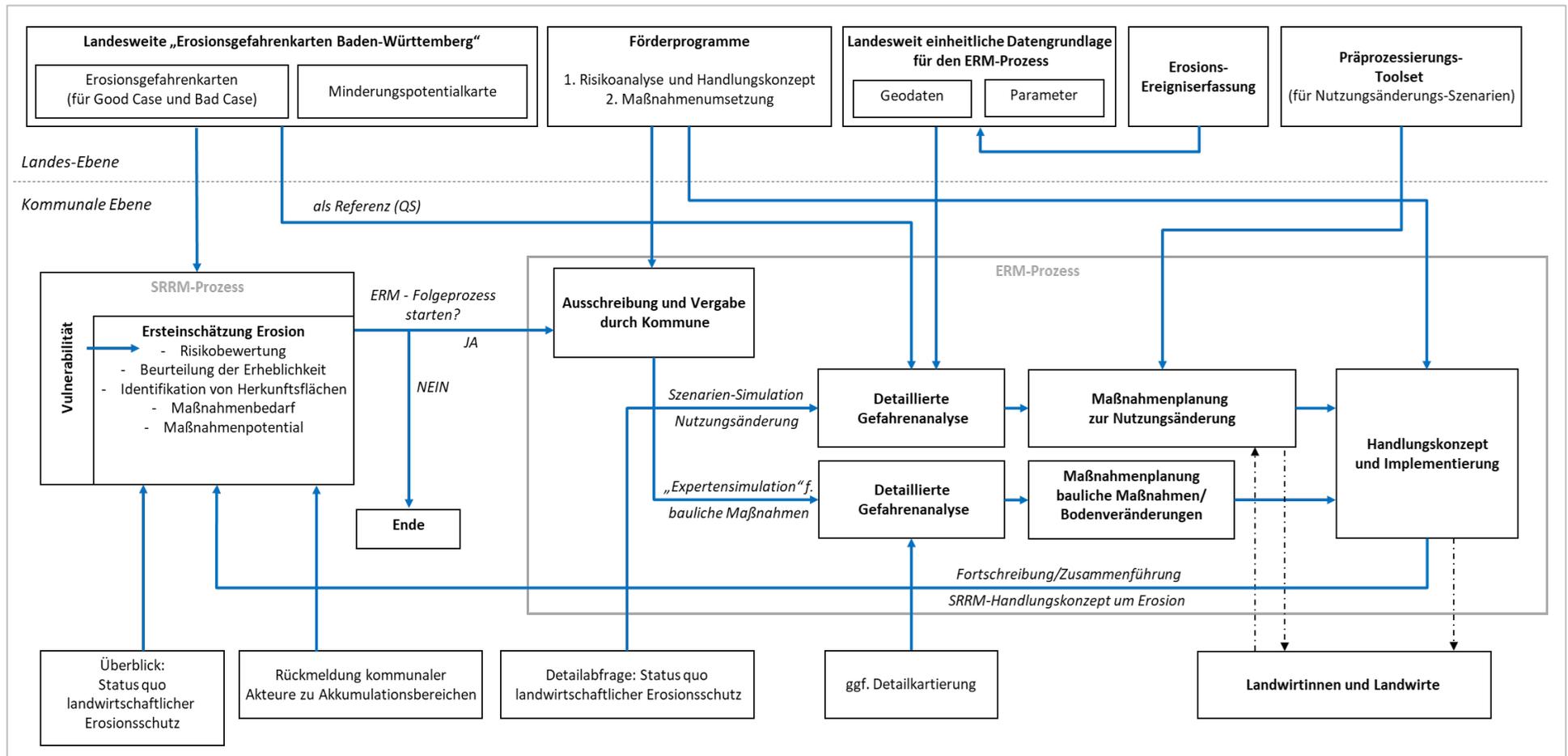


Abb. 50: Übersicht über die Empfehlungen für das weitere Vorgehen in Baden-Württemberg

7.1 Durchführungskonzept für eine landesweite Bearbeitung

7.1.1 Empfehlungen für Komponenten auf landesweiter Ebene

Die zentrale Komponente für die Empfehlungen auf landesweiter Ebene bilden die „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“ (Erosions-Depositionskarte und Sedimentfrachtkarte), die zur Ersteinschätzung der Erheblichkeit des Erosionsrisikos im Rahmen des kommunalen Starkregenrisikomanagement-Prozesses (SRRM) dienen sollen. Des Weiteren wird empfohlen, auf landesweiter Ebene die erforderlichen Randbedingungen und Infrastruktur für den kommunalen ERM-Prozess bereitzustellen (z. B. vorprozessierte Datengrundlagen, QS, Förderung).

Die auf landesweiter Ebene vorgeschlagenen Komponenten werden im Folgenden detailliert erläutert:

I. Landesweite Kartengrundlage „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“

Der angedachte Einsatzzweck für die landesweiten Erosionsgefahrenkarten umfasst die Ersteinschätzung der Erheblichkeit des Erosionsrisikos im Rahmen des kommunalen Starkregenrisikomanagement-Prozesses (SRRM). Demnach sollte das Kartenwerk möglichst übersichtlich und durch Außenstehende einfach verständlich sein. Zudem soll mithilfe der landesweiten Karten das Minderungspotential durch Erosionsschutzmaßnahmen am Standort einschätzbar sein. Die konkrete Maßnahmenplanung am Standort gehört nicht zum angedachten Anwendungsfall, sondern erfolgt im Rahmen der dezentralen Bearbeitung (vgl. Kap. 7.2.3).

Landesweite Kartengrundlage „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“

Randbedingungen der Modellierung:

- Szenarien:
 - o Bad Case (mit konventioneller Bodenbearbeitung)
 - o Good Case (mit konservierender Bodenbearbeitung)
- Niederschlagsereignis: *seltenes* Ereignis
- Zeitpunkt: Mai
- Räumliche Auflösung: 5 m
- Modell: EROSION 3D

Datengrundlagen:

- DGM5 (generiert über Hydroresampling aus DGM 0,25)
- Niederschlagsstatistik für das *seltenes* Ereignis (entsprechend SRRM)
- Bodenkarte 1:50.000 (BK50)
- Schlagkulissen der landwirtschaftlichen Flächen des MLR bzw. EU crop type map 2018

Enthaltene Karten

- Erosionsgefahrenkarten (für Good Case und Bad Case)
 - o Sedimentfrachtkarte (zur Bewertung des Risikos)
 - o Erosions-Depositionskarte (zur Identifikation von Herkunftsflächen)
- Minderungspotentialkarte (Differenz von Bad Case und Good Case zur Abschätzung des Minderungspotentials durch Erosionsschutzmaßnahmen)
 - o Minderungspotential Sedimentfracht
 - o Minderungspotential Erosion

Datengrundlagen

Für die landesweite Erosionsmodellierung wird die im Rahmen dieses Pilotvorhabens erarbeitete und in Kap. 4 beschriebene Datenaufbereitungsmethodik empfohlen. Sofern zum Zeitpunkt der Projektdurchführung die erforderlichen Randbedingungen für die Bereitstellung landesweiter, flächendeckender Daten zur Schlagkulisse vorliegen sollten, ist dieser Datensatz zu verwenden. Ansonsten kann für die Ableitung repräsentativer Schlageometrien auf den EU crop type Datensatz (<https://jeo-dpp.jrc.ec.europa.eu/ftp/jrc-opendata/EUCROP/2018/>) zurückgegriffen werden, da der hier verwendete ECoLaSS Crop Type Prototype die Landesfläche Baden-Württembergs nicht in Gänze abdeckt (vgl. Kap. 4.3.2).

Randbedingungen der Modellierung

Auf Grundlage der Rückmeldungen von den Akteuren zur hohen Relevanz der Berücksichtigung der Bodenbearbeitung, wird für landesweite „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“ empfohlen, neben dem Szenario „Bad Case“ (auf Basis von Belagungsrotationen generiert, vgl. 5.2, konventioneller Bodenbearbeitung) ein Szenario „Good Case“ mit der Annahme von konservierender Bodenbearbeitung zu modellieren. Aus der Differenz beider Szenarien lassen sich zudem Aussagen zum Potential von Erosionsschutzmaßnahmen treffen. Bisher wurde die konservierende Bodenbearbeitung im Wesentlichen für Lössregionen parametrisiert. Da diese Art der Bodenbearbeitung eine hohe Praxisrelevanz hat, sollten Parametrisierungen zur Berücksichtigung von Regionen mit abweichenden Bodeneigenschaften erarbeitet werden, um den Einfluss konservierender Bodenbearbeitungsverfahren entsprechend korrekt landesweit berücksichtigen zu können.

Aus Gründen der Performance sowie der Verfügbarkeit einer Parametergrundlage zur konservierenden Bodenbearbeitung wird für die Erstellung der landesweiten Karten empfohlen, das Modell EROSION 3D zu verwenden. Langfristig sollte jedoch ein Ensemble-Ansatz mit beiden Modellen und weiteren Parametrisierungen angestrebt werden.

Von den drei Niederschlagsszenarien beim SRRM sollte das Szenario *selten* herangezogen werden, da dies ein Wiederkehrintervall von 30 Jahren aufweist und damit für die Planung dezentraler wasser- und bodenrückhaltender Maßnahmen die höchste Relevanz aufweist.

Aufgrund der zeitlichen Überschneidung noch geringer Bedeckungsgrade beim Mais und des erhöhten Auftretens von Starkregen im Mai in Baden-Württemberg (vgl. Kap. 4.3.5), wird empfohlen, die erosionskritischen phänologischen bzw. Bearbeitungsstände zu dieser Zeit heranzuziehen.

Sofern Informationen zu lokal relevanten abweichenden Bedingungen bei der Phänologie bzw. des Auftretens von Starkregenereignissen vorliegen, sollten diese im Rahmen des dezentralen Prozesses entsprechend berücksichtigt werden (vgl. Kap. 7.2.3).

Ergebniskarten

Für die Risikobewertung bei der Erosions-Ersteinschätzung im Rahmen des kommunalen SRRM sollte die landesweite Sedimentfrachtkarte herangezogen werden (s. Abb. 51).

Zur Ermittlung der Herkunftsflächen bei Vorliegen eines relevanten Risikos dienen die Erosions-Depositionskarten (s. Abb. 52).

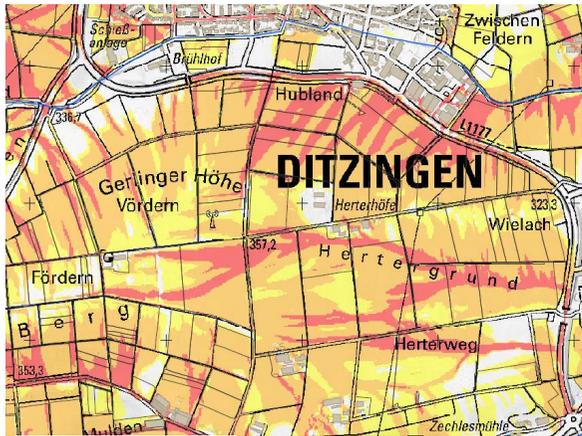
Die Minderungspotentialkarten (Differenz von Good-Case- und Bad-Case-Szenario) ermöglichen eine Einschätzung zum Minderungspotential der Erosionsgefährdung

durch landwirtschaftliche Erosionsschutzmaßnahmen, was für die Beurteilung der Effizienz der Maßnahmen herangezogen werden kann (s. Abb. 51 und Abb. 52).

Für die einfache Handhabung zur Einschätzung der Erheblichkeit im Rahmen des SRRMs wird eine Darstellung, klassifiziert in eine „mittel“, „hohe“ und „sehr hohe“ Erosionsgefährdung, empfohlen. In Abb. 51 und Abb. 52 sind Beispiele für diese vereinfachten Karten für die Ersteinschätzung des Erosionsrisikos im SRRM-Prozess dargestellt. Die Klassengrenzen für die Einteilung in die vereinfachten Klassen sind hier ebenfalls dokumentiert, werden jedoch in den Übergabekarten nicht dargestellt. Es wird empfohlen, das hier entwickelte Kartenlayout sowie die Klassifizierung für die landesweite Kartengrundlage zu übernehmen.

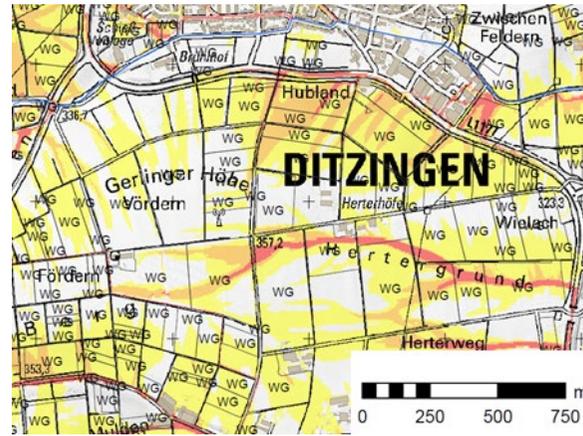
Zu beachten ist, dass in den Legenden der hier im Bericht abgebildeten Karten noch die ursprünglich verwendeten Bezeichnungen für Feldfruchtverteilungen auf den Ackerschlägen dargestellt sind. Im Nachgang der Abschlussveranstaltung erfolgte eine Umbenennung der Hauptfruchtgruppen, die bei dem zukünftigen landesweiten Prozess berücksichtigt werden soll (siehe Kap. 4.3.3).

Bad Case



Sedimentfracht	Klassengrenzen
 mittel	20 – 200 kg/m
 hoch	200 – 2.000 kg/m
 sehr hoch	>2.000 kg/m

Good Case



Minderungspotentialkarte



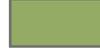
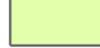
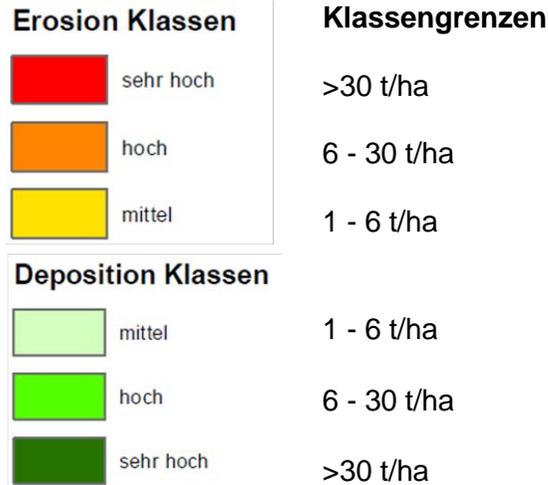
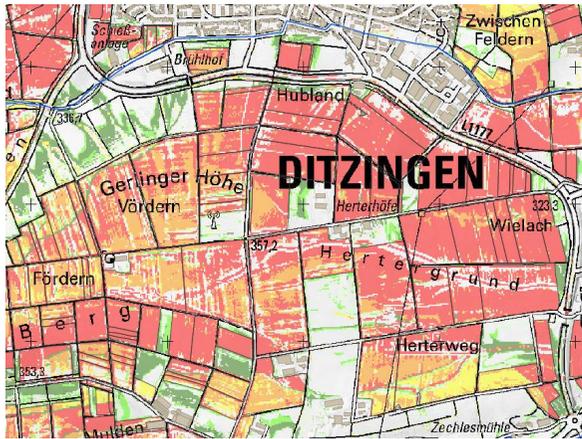
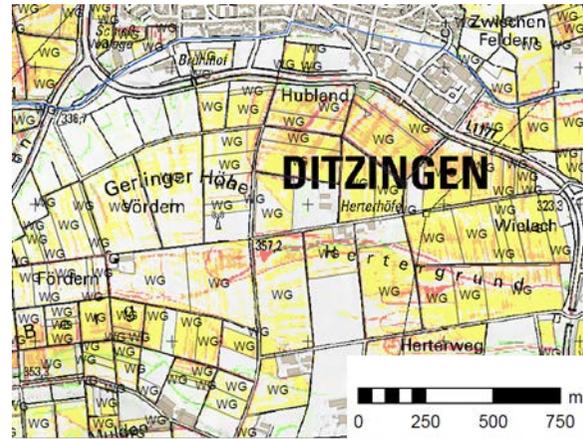
Minderungspotential	Klassengrenzen
 sehr hoch	>2.000 kg/m
 hoch	200 – 2.000 kg/m
 mittel	20 – 200 kg/m

Abb. 51: Vereinfachte Sedimentfrachtkarten und Minderungspotentialkarte zur Risikobewertung für Erosions-Ersteinschätzung mit Vorschlägen für die Einteilung der Klassengrenzen (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad und Good Case und Differenz aus Good und Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)

Bad Case



Good Case



Minderungspotentialkarte



Abb. 52: Vereinfachte Erosions-Depositionskarte und Minderungspotentialkarte zur Risikobewertung für Erosions-Ersteinschätzung mit Vorschlägen für die Einteilung der Klassengrenzen (Szenario: April, seltenes Niederschlagsereignis, Bad und Good Case und Differenz aus Good und Bad Case, räumliche Auflösung: 5 m)

II. Bereitstellung einheitlicher Datengrundlagen für den kommunalen Prozess

Um den Aufwand für die Datenaufbereitung im Rahmen des dezentralen Prozesses so gering wie möglich zu halten und die Anwendung einer einheitlichen Methodik sicherzustellen, wird empfohlen vorprozessierte Geodaten und Parameterdatensätze auf landesweiter Ebene für den ERM-Prozess zur Verfügung zu stellen. Da in diesem Rahmen sowohl openLISEM als auch EROSION 3D zum Einsatz kommen sollen, ist die vorprozessierte landesweite Datengrundlage auf beide Modelle abzustimmen.

Bereitstellung von landesweit einheitlichen Datengrundlagen für den kommunalen Prozess

Vorprozessierte landesweite Geodatengrundlagen (für openLISEM und EROSION 3D)

- DGM5 (mit Integration von Strukturen und Behandlung von Senken)
- Bodenkarte (auf Grundlage BK50)
- Landnutzungsraaster (aus Basis-DLM)
- Niederschlagsraaster für *seltene* Ereignisse

Bereitstellung von Parametersätzen für folgende Varianten

- Sämtliche BK50-Bodeneinheiten Baden-Württembergs
- Zeitpunkte: April, Mai, Juni
- Modelle: openLISEM und EROSION 3D
- Sämtliche relevante Landnutzungen/Kulturarten
- Bodenbearbeitung: konventionell und konservierend (nur EROSION 3D)

III. Bereitstellung Präprozessierungs-Toolset

Im Rahmen des dezentralen ERM-Prozesses kommt hinsichtlich der standortspezifischen Planung landwirtschaftlicher Erosionsschutzmaßnahmen der Kommunikation mit den Landwirtinnen und Landwirten eine besonders wichtige Rolle zu. Hierfür wird insbesondere die Einbindung von landwirtschaftlichen Beratenden empfohlen. Für eine bessere Kommunikation unter den verschiedenen Akteurinnen und Akteuren sowie für die Darstellung des Einflusses veränderter Bodenbewirtschaftungsarten wird die Entwicklung eines Präprozessierungs-Toolsets empfohlen. Die Bereitstellung abgestimmter Präprozessierungs-Tools für die Erstellung von Eingangsdatensätzen für die Modellierung wird insbesondere für verschiedene landwirtschaftliche Szenarien empfohlen. Dies soll den Aufwand der Datenprozessierung und Parameterableitung u. a. für in der Modellierung weniger erfahrene Beratende geringhalten.

Präprozessierungs-Toolset

Präprozessierungs-Toolset zur Vereinfachung der Generierung z. B. von Eingangsdatensätzen für die Boden- und Landnutzung (für openLISEM bzw. EROSION 3D) für Szenarien der Umnutzung, Schlaggestaltung, Grünstreifen, Bodenbearbeitung

- Entwicklung und Bereitstellung des Tools
- Pflege: Aktualisierung und ggf. Wartung des Tools
- Support: Unterstützung der Anwenderinnen und Anwender im Gebrauch des Tools
-



IV. Ereignis-Erfassung

Die Erosionsereignis-Dokumentation (vgl. Kap. 8) kann wertvolle Informationen für die Modellvalidierung sowie zum Status quo der Erosionsproblematik generell liefern. Im Sinne der Qualitätssicherung wird darin ebenfalls ein wichtiger Baustein für das Erosionsrisikomanagement gesehen. Die Ereignis-Dokumentation sollte auf landesweiter Ebene koordiniert und die Ergebnisse für Optimierungen sowie Weiterentwicklungen im Prozess herangezogen werden.

Hinsichtlich der Erosionsereignisdokumentation sind noch verschiedene Punkte zu klären, u. a. die Erstellung einer final anwendbaren App oder die Verantwortlichkeiten für die Erfassung, Datenverwaltung sowie Datenbereitstellung.

Ereignis-Erfassung

Organisation, Steuerung, Auswertung Ereignis-Erfassung

- Betrieb Erfassungs-App
- Auswertung, Einbindung der Ergebnisse in den Prozess zur Aktualisierung der landesweiten Datengrundlage (ggf. auch aus Erosionsmonitoring BaWü)
- Zuständigkeiten Erfassung

V. Förderprogramme

In Analogie oder Verbindung zum SRRM wird die Einrichtung einer Förderung des nachgeordneten kommunalen ERM-Prozesses empfohlen (Durchführung der Risikoanalyse und Erstellung des Handlungskonzepts). Evtl. kann die Förderung des SRRM entsprechend auf diesen nachgeordneten Prozess erweitert werden. Eine enge Verbindung kann damit auch sicherstellen, dass die Ergebnisse des ERM in das SRRM zurückgespielt werden (Handlungskonzept). Analog zum SRRM empfiehlt es sich aus Kosten- und Qualitätsgründen, den ERM-Prozess bei Bedarf nicht nur für einzelne Kommunen, sondern als Gemeinschaftsprojekt von benachbarten Kommunen für Einzugsgebiete durchzuführen. Auch die Umsetzung von landwirtschaftlichen Erosionsschutzmaßnahmen, die im Handlungskonzept vorgeschlagen werden, sollten über Förderprogramme unterstützt werden.

Förderprogramme

Bereitstellung Förderprogramm für kommunales Erosionsrisikomanagement

Zuschuss zu Kosten für Risikoanalyse und Handlungskonzept

Bereitstellung Förderprogramm Maßnahmenumsetzung

Landwirtschaftliche Erosionsschutzmaßnahmen

VI. Qualitätssicherung

Die Implementierung von Instrumenten zur Qualitätssicherung der dezentralen Modellierung sollte ebenfalls auf Landesebene gewährleistet werden. Hierfür werden neben der Verwendung der bereitgestellten präprozessierten Datengrundlagen und Qualifikationsformate die Freigabe von Modellversionen sowie der stichprobenartige Check der lokalen Modellierungen empfohlen.

Qualitätssicherung (QS)**Durchführung der Qualitätssicherung (QS)**

- Freigabe Modellversionen
- stichprobenartiger Check der lokalen Modellierungen

7.1.2 Zwischenschritt: Regionale Priorisierung

Sofern eine schrittweise Umsetzung angestrebt werden sollte, wird im ersten Schritt die Durchführung eines Demonstrationsvorhabens für ein Gebiet mit regionaler Ausdehnung (ca. 3.000-5.000 km²) für eine anschließende landesweite Umsetzung empfohlen. Im Rahmen eines solchen Vorhabens könnte neben der Erstellung der großräumigen „Erosionsgefahrenkarten“ zur Ersteinschätzung auch der kommunale Erosionsrisikomanagement-Prozess (vgl. Kap. 7.2.3) beispielhaft demonstriert und weiter optimiert werden.

Demgegenüber wird eine sukzessive Einzelbearbeitung von Teilgebieten hin zur Erstellung der am Ende landesweiten Kartengrundlage nicht empfohlen: Hierbei wird ein deutlich höherer Gesamtaufwand im Vergleich zur landesweiten Bearbeitung „aus einer Hand“ erwartet.

7.1.3 Weiterverwendung von Daten aus dem Starkregen-Prozess

Aus dem Starkregenrisikomanagement liegt bereits eine Vielzahl von Daten vor, die auch für die Erosionsmodellierung relevant sind und weiterverwendet werden können und sollten. Dies sind zum einen Bearbeitungen am Digitalen Geländemodell sowie Nutzungsänderungen. Auch wenn die Anforderungen an die in den Bodenerosionsmodellen verwendeten Geländedaten etwas abweichen und daher zusätzliche Arbeitsschritte nötig sind, können durch die bereits erfolgten Bearbeitungen deutliche Aufwandreduktionen erwartet werden.

Gleiches gilt für bei der Kartierung erfasste Erosions- und Akkumulationsspuren, inklusive der Lage und der Sedimentation in Durchlässen unter Verkehrswegen. Diese bieten sowohl für die Validierung der Starkregengefahrenkarten als auch für die Erosionskarten eine wertvolle Grundlage. Die Validierungsdaten werden aktuell jedoch nicht an die LUBW weitergegeben, weshalb eine direkte Weitergabe oder Abgabe über die LUBW dringend empfohlen wird.

Die Datenkompatibilität wird durch die Verwendung von üblichen GIS-Formaten (z. B. GeoTIFF) gewährleistet.

7.1.4 Zusätzlicher Informationsbedarf

Für die „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“ ist ausschließlich die Verwendung landesweiter Datensätze angedacht. Dezentral zu erhebende Informationen werden ausschließlich für den ERM-Prozess auf kommunaler Ebene benötigt.

7.1.5 Supportformate

Für die erfolgreiche Implementierung und Verankerung des ERM-Prozesses in der Praxis ist die Information und Schulung der verantwortlichen Akteure von zentraler Bedeutung. Zu entwickelnde Workshop-Formate sollten einerseits Informationsveranstaltungen zum ERM für die SRRM-Beteiligten umfassen. Für die modellbasierte Maßnahmenplanung in Interaktion mit den Landwirten sind andererseits Querschnittskompetenzen aus den Bereichen Pflanzenbau, Bodenschutz und Erosionsmodellierung von

zentraler Bedeutung. Mithilfe entsprechender Workshops können Beteiligte entsprechend geschult und fortgebildet werden. Sinnvoll ist hierbei, sich an etablierte Fortbildungsformate anzudocken, womit recht schnell ein vorausgewählter Teilnehmerkreis adressiert und zugleich eine potentielle Konkurrenz vermieden werden kann.

Aus-/Fortbildungsformate
Informations-Workshop ERM <ul style="list-style-type: none">- adressiert die SRRM-Beteiligten- liefert Überblick über den ERM-Ablauf
mehrtägige Modell-/Software-Schulungen für ERM <ul style="list-style-type: none">- Einführung zu Erosionsmodellierung allgemein- modellspezifische Schulung (openLISEM bzw. EROSION 3D) für den ERM-Prozess- Übungen zu den Schulungsinhalten
Schulung landwirtschaftlicher Beratender

7.1.6 Fortschreibungskonzept

Die Fortschreibung einer landesweiten Erosionsrisikomodellierung sollte nur bei sich verändernden bzw. neuen Datengrundlagen, bei Aktualisierung von Parametern (z. B. auf Grundlage von Ereigniserfassungen) sowie bei der Simulation weiterer Szenarien erfolgen. Regelmäßige Aktualisierungszeiträume werden hierfür nicht als sinnvoll erachtet.

7.1.7 Qualitätskontrollen

Um Ergebnisse einer Erosionsmodellierung zu validieren bzw. zu plausibilisieren, gibt es mehrere Ansätze. In der Regel beziehen sie sich auf einen Vergleich beobachteter Ereignisse mit den modellierten Abträgen bzw. Abflüssen. Im Idealfall sind Abtragsmessungen für Einzelereignisse oder Messzyklen auf einzelnen Schlägen und Versuchspartellen verfügbar, spätestens jedoch bei der Betrachtung von Einzugsgebieten liegen Abtragsmessungen nicht mehr vor oder werden deutlich unzuverlässiger. Im Rahmen des Projekts wurden die Erosions-Depositionskarten bei dem Workshop mit den Landwirten auf Plausibilität hin überprüft (vgl. Kap. 3): Sofern keine Messdaten vorliegen, ist dies eine geeignete Vorgehensweise, mit der sich zumindest Fehler bei räumlichen Mustern, in den Eingangsdaten oder bei den Modellannahmen ermitteln lassen. Eine weitere Informationsquelle für die Plausibilisierung sind die bereits im SRRM erfassten schädlichen Auswirkungen auf die Infrastruktur bzw. Beobachtungen z. B. von Feuerwehr und Bauhof.

7.2 Mustervorgehensweise bei dezentraler (kommunaler) Bearbeitung

7.2.1 Ersteinschätzung im Rahmen des SRRM

Aufgrund der etwas anders gelagerten Schwerpunkte und der unterschiedlichen, am jeweiligen Prozess beteiligten Personen, ist eine Integration in den bisherigen SRRM-Prozess nicht empfehlenswert. Der bestehende Prozess ist zudem durch die Abarbeitung verschiedener Teilthemen bereits überfrachtet, sodass eine Erweiterung der Komplexität tendenziell dazu führt, dass die Einzelthemen nicht mit der gebotenen Tiefe betrachtet und die kommunalen Mitarbeitenden überfordert werden.

Ein weiteres Problem ergibt sich dadurch, dass die üblichen Bearbeiter des SRRM über keine Expertise im Bereich Landwirtschaft und Erosionsmodellierung verfügen. Eine gemeinsame Beauftragung der unterschiedlichen Themen würde den Kreis potentieller Bietenden unnötig einschränken. Oder es würde dazu führen, dass die Erosionsthematik als Teilthema nicht mit der notwendigen Erfahrung bearbeitet wird.

Der inhaltliche Zusammenhang ist jedoch eng. Daher wird empfohlen, das Erosionsmanagement als Unterprozess des SRRM zu etablieren. Dies heißt, die Bearbeitung wird aus dem SRRM heraus getriggert und die Ergebnisse werden ähnlich wie bei anderen Themen wieder in das Handlungskonzept des SRRM, auch bei dessen Fortschreibung, integriert.

Für die Entscheidung zur Bearbeitung des kommunalen ERM-Prozesses sollte die Auswertung der landesweiten Erosionsgefahrenkarten herangezogen werden (s. Kap. 7.1.1). Liegen hier größere Bereiche in den höchsten Gefährdungsklassen und sind diese durch Validierungsdaten bestätigt, sollte der ERM-Prozess angestoßen werden. Eine weitere Überprüfung sollte dann erfolgen, wenn die betroffenen Bereiche auch tatsächlich das Potential für Maßnahmen bieten. Hierzu kann hinsichtlich der landwirtschaftlichen Maßnahmen die Minderungspotentialkarte gute Hinweise liefern.

Im Rahmen der im SRRM durchzuführenden Kartierung können Stellen, an denen in der landesweiten Modellierung hohe Sedimentfrachten auf Infrastrukturelemente oder Siedlungsflächen treffen, gezielt auf Sedimentationsindikatoren (z. B. verlandete oder frisch ausgebagerte Straßengräben) überprüft werden. Liegen diese bereits unter normalen Bedingungen verbreitet vor, ist davon auszugehen, dass bei *seltenen* Ereignissen eine Erheblichkeit gegeben ist und daher der ERM-Prozess angestoßen werden sollte.

Kommunen, die den SRRM-Prozess bereits abgeschlossen haben, sollten durch einen Infobrief auf den vertieften ERM-Prozess hingewiesen werden.



Ersteinschätzung im Rahmen SRRM

Beurteilungsgrundlagen zur Bewertung der Erheblichkeit

- Landesweite Kartengrundlage „Erosionsgefahrenkarten Baden-Württemberg“
- Rückmeldung von kommunalen Akteuren (z. B. Bauhof) zu beobachteten Akkumulationsbereichen
- Überblickserhebung zum Status quo bei Bodenbearbeitungsverfahren/Erosionsschutz in der Landwirtschaft im Gebiet

Beurteilung der Erheblichkeit

- größere Bereiche in den höchsten Gefährdungsklasse (vgl. Kap. 7.1.1) in den Erosionsgefahrenkarten und durch Validierung bestätigt

Ergebnisse zur Übergabe an den ERM

- Akteursliste
- Gebietskulisse
- Rückmeldung der lokalen Akteure zu den beobachteten Akkumulationen
- Ausschreibungsunterstützung
- Ergebnisse der Geländekartierung im Rahmen des SRRM

7.2.2 Beteiligte am Erosionsrisikomanagement-Prozess (ERM)

Die am Erosionsmanagement-Prozess zu Beteiligten sind vorrangig von der Kommune und dem Landratsamt aus den Bereichen Bodenschutz und Landwirtschaft festzulegen. Dabei sind diese Mitarbeitenden persönlich in die Qualifizierung bzw. den ERM-Prozess einzubeziehen. Da der ERM-Prozess an den SRRM-Prozess angekopfelt ist, sollte die/die dortige Hauptansprechpartnerin/-partner auf jeden Fall einbezogen sein und für eine Verbindung der beiden Prozesse sorgen. Die Bearbeiter des SRRM sollten bei Bedarf bei einzelnen Workshops teilnehmen. Vor allem sollten auch die Landwirtinnen und Landwirte bzw. je nach Anzahl der Betroffenen ebenso einige Vertreterinnen oder Vertreter der Landwirtschaft mit einbezogen werden.

Auf Seiten der Bearbeitenden sind geeignete Landwirtschaftsberatende zu beauftragen, die selber oder in einer Kooperation mit einem geeigneten Büro auch die Erosionsmodellierung abdecken können. Je nach Komplexität der Maßnahmen sind hier aufwendige Modellläufe oder auch gar keine Modellierungen notwendig. Dies ist dann aus dem Planungsprozess heraus zu entscheiden und interaktiv festzulegen. Einige Fragestellungen, insbesondere, falls die Maßnahmen vornehmlich Fließwege beeinflussen, können durch das dann bereits vorliegende Starkregenmodell beantwortet werden.

Zu beteiligende Akteursgruppen

- Kommune
- Fachbehörden kommunal oder auf Landkreisebene: Bodenschutz- und Landwirtschaft (optional Forst, Wasserwirtschaft)
- Landwirtschaftliche Beratende
- Landwirtinnen und Landwirte (inklusive Obmänner, Bauernverband)
- Flächeneigentümer
- Rolle von Genossenschaften und Herstellern landwirtschaftlicher Produkte ist zu klären (spielen in der Beratungspraxis deutliche Rolle)

Anforderungen an die landwirtschaftlichen Beratenden/Modellierenden

- Die landwirtschaftlichen Beratenden sollten frei von Interessenkonflikten (wie z. B. bei Produktherstellern) sein
- Qualifikationsprofil und -turnus: landwirtschaftliche Beratungspraxis, Bodenschutz etc.
- Modellierende sind als Dienstleistende der landwirtschaftlichen Beratenden einzubinden und sollten über ausreichend Erfahrung mit den genannten Erosionsmodellen verfügen oder entsprechend geschult sein
- Regelmäßiger Erfahrungsaustausch zwischen den Beratenden und Modellierenden

7.2.3 Prozessschritte Erosionsrisikomanagement (ERM)

Am Beginn des ERM-Prozesses steht eine Detaillierung der Gefahreneinschätzung unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten im Gebiet. Hierfür ist zunächst der Status quo der praktizierten Bodenbearbeitungsverfahren sowie bereits umgesetzter Erosionsschutzmaßnahmen im Gebiet zu erheben und bei der Erosionsmodellierung zu berücksichtigen. Bei den übrigen Datensätzen sollten vorrangig die landesweit präprozessierten Datengrundlagen und Parametersätze verwendet werden.

Wie für die landesweite Modellierung wird auch hier eine räumliche Auflösung von 5 m und *selten* Niederschlagsereignisse als Randbedingungen empfohlen. Als Zeitpunkte werden je nach regionalen Bedingungen Mai und/oder September vorgeschlagen. Die Festlegung sollte unter Berücksichtigung der regionalen Phänologie und saisonalen Häufigkeit von Starkregenereignissen (sofern Informationen diesbezüglich verfügbar sind) erfolgen.

Detaillierte Gefahreneinschätzung

Detaillierte Erfassung Status quo Erosionsschutzmaßnahmen

- Ermittlung der Bodenbearbeitungsverfahren bei den Landwirtinnen und Landwirten
- Erhebung bereits umgesetzter Erosionsschutzmaßnahmen im Gebiet

Detaillierte Erosionsgefahrenkarten mittels Erosionsmodellierung

Randbedingungen für Modellierung

- Nutzung/Bewirtschaftung entsprechend Erhebung
- Niederschlagsereignis: *seltenes* Ereignis
- Zeitpunkt: Mai und/oder September (je nach regionaler Ereignishäufigkeit und Phänologie)
- Räumliche Auflösung: 5 m
- Modell: LISEM und/oder EROSION 3D

Als Simulationsmodelle werden sowohl openLISEM als auch EROSION 3D empfohlen. Die Modellauswahl sollte in Abhängigkeit von der genauen Fragestellung anhand Tab. 13 zum Modellvergleich sowie der Modellierungserfahrung erfolgen.

Für die Modellierung sollten nur die von der QS auf Landesebene (vgl. 7.1.1) geprüfte Modellversion mit Empfehlungen zu wesentlichen Modelleinstellungen zum Einsatz kommen.



Im nächsten Schritt wird eine Validierung bzw. Plausibilisierung der detaillierten Gefahrenkarten empfohlen. Dies kann je nach Verfügbarkeit beispielsweise anhand von Luftbildern, Erosionsereignis-Dokumentationen sowie im Rahmen von Workshops erfolgen, wie sie hier im Rahmen des Pilotprojekts Glems durchgeführt wurden (vgl. Kap. 3).

Validierung/Plausibilisierung
Anhand z. B. Luftbildkatalog, Ereignisdokumentationen, Workshop (je nach vorliegenden Informationen)

Zentraler Bestandteil des ERM ist die Maßnahmenplanung und Erstellung eines Handlungskonzepts.

Für die Maßnahmenplanung wird der Einsatz von openLISEM und/oder EROSION 3D für Szenarienrechnungen zum Vergleich und der Bewertung der erosionsmindernden Wirkung verschiedener Erosionsschutzmaßnahmen am konkreten Standort sowie ggf. im Rahmen der Dimensionierung empfohlen.

Die Schutzmaßnahmen sollten interaktiv und im Dialog mit den betroffenen Akteuren erarbeitet werden. Hierfür ist neben der Modellierungs-Qualifikation ein hohes Maß an pflanzenbaulicher Expertise erforderlich.

Um die Anwendung und den Aufwand insbesondere bei der Simulation von landwirtschaftlichen Szenarien (z. B. Umnutzung, Grünstreifen) – die in der Praxis einen Großteil der Modellierungsanfragen betreffen dürfte – gering zu halten, wird empfohlen, auf landesweiter Ebene ein Präprozessierung-Toolset (zur Teil-Automatisierung der Erstellung der für die Szenarien spezifischen Modelleingangsdatensätze) bereitzustellen (vgl. Kap. 7.1.1), das von den Bearbeitern eingesetzt werden könnte.

Im Falle von speziellen Modellierungsanfragen (z. B. bauliche Szenarien, für die das Präprozessor-Toolset nicht verwendbar ist) wäre die Vergabe an einen Modellierungsexperten obligatorisch.

Maßnahmenplanung	
Simulation von Szenarien (mit openLISEM und/oder EROSION 3D) Variantenvergleich Schutzmaßnahmen	
Simulation mit Präprozessierungs-Tool (für landwirtschaftliche Szenarien)	„Experten-Modellierung“ (für bauliche Szenarien)
landwirtschaftlicher Szenarien (Bsp.) <ul style="list-style-type: none"> - Grünstreifen, - Schlagteilung, - Umnutzung, - Bodenbearbeitungsverfahren 	bauliche Szenarien (Bsp.) <ul style="list-style-type: none"> - Dämme, - Retentionsbecken, - Gräben
Durchführung der Modellierung Landwirtschaftliche Beratende (bzw. in Kooperation mit Modellierenden)	Durchführung der Modellierung Modellierungs-Experten

Für die erfolgreiche Implementierung des ERM-Handlungskonzepts, das mit dem SRRM-Handlungskonzept zusammengeführt bzw. dieses fortschreiben sollte, ist die Sicherstellung der Verbindlichkeit und Kontinuität von hoher Relevanz ebenso wie ein Monitoring bzgl. der tatsächlichen Umsetzung der Maßnahmen.

Handlungskonzept

- Vereinbarung über die Maßnahmen → Verbindlichkeit und Kontinuität
- Monitoring durchgeführter Maßnahmen
- Zusammenführung bzw. Fortschreibung des SRRM-Handlungskonzepts

7.2.4 Praxistest

Im Pilotgebiet musste die Erarbeitung der Empfehlungen und deren Praxistest aus Zeitgründen weitgehend parallelisiert werden. Die Datenströme konnten jedoch alle exemplarisch getestet werden. Für die Integration von Maßnahmen bestehen Erfahrungen aus anderen Projekten für beide Modelle, sodass auch hier keine prinzipiellen Probleme bestehen. Für die Modellierenden sind damit die Anforderungen jedoch deutlich höher, sodass für viele Maßnahmen eine Modifikation des Geländemodells notwendig ist und auch alle davon abhängigen Datensätze prozessiert werden müssen.

Bei eher hydraulisch wirkenden Maßnahmen ist im Einzelfall zu prüfen, ob das bestehende Starkregenmodell herangezogen werden kann.

7.2.5 Empfehlungen für die Ausschreibungsverfahren

Der gesamte Bearbeitungsprozess ist in großem Maße interaktiv zu gestalten. Insofern ist eine allgemein einsetzbare Vorlage bzw. Beschreibung des Arbeitsumfangs nicht zielführend.

Als wichtig wird erachtet, dass zu beauftragende Bearbeitende bzw. Beratende umfangreiche Erfahrung mit der landwirtschaftlichen Praxis haben, insbesondere mit bodenschonender Bearbeitung. Wichtig ist zusätzlich, dass sie/er unabhängig vom landwirtschaftlichen Produktvertrieb agiert.

Für die Modellierung ist eine möglichst langjährige Erfahrung in der Praxis mit einem der beiden physikalischen Modelle eine wichtige Voraussetzung. Vorteilhaft ist zusätzlich, wenn auch schon Erfahrung mit der Modellierung erosionsmindernder Maßnahmen besteht. Alle Qualifikationen sind durch mehrere Referenzen nachzuweisen.

Die Modelle müssen in der von der Qualitätssicherung freigegebenen Version vorgegeben werden.

Die Bearbeitungskulisse ist vorzugeben., Sie muss das gesamte Teileinzugsgebiet umfassen.

Sofern eine zusätzliche Modellierung als sinnvoll erachtet wird, müssen die Szenarien auch eine Abbildung des Ist-Zustandes inkl. der realen Bearbeitungsmethoden enthalten. Nur so sind die Effekte möglicher Maßnahmen sinnvoll abzuschätzen. Wo es möglich ist, soll auf die vorprozessierten Daten zurückgegriffen werden.

Bezüglich durchzuführender Workshops und Simulationsläufe können Kosten pro Stück angegeben werden, bei anderen Arbeiten wird eine Abrechnung auf Basis von Zeit empfohlen, wobei die nächste Leistungsphase immer zuvor abgeschätzt und dann freigegeben werden sollte.

7.2.6 Abstimmung und Synergien mit dem SRRM-Prozess (Datenmodelle und Prozesse)

Um möglichst vor der Erosionsmodellierung detaillierte Kenntnis über die lokalen Verhältnisse in Kommunen zu erhalten, die den SRRM-Prozess bereits durchlaufen haben, wird die Übergabe von Informationen (Daten, Berichte) aus dem SRRM an die Modellierer vorgeschlagen. Die Datenkompatibilität wird durch die Verwendung von üblichen GIS-Formaten (z. B. GeoTIFF) gewährleistet. Daher ist es beim SRRM-Prozess selbst wichtig, dass bei den Geländebegehungen auch auf die Erfassung von Erosions- und Akkumulationsspuren in den Außenbereichen geachtet wird.

Informationen aus dem Starkregenrisikomanagement-Prozess, die für die Erosionsmodellierung relevant sind, umfassen z. B.:

- Übergabe der Akteursliste
- Informationen zu eventuellen Landnutzungsänderungen
- Informationen zu großflächigen Gebietsveränderungen, wie z. B. Neubaugebiete, Straßenneubauten
- Validierungsdaten aus den Workshops, z. B. zu benannten Erosionsrisikobereichen
- Ergebnisse aus der Kartierung erfasster Erosions- und Akkumulationsspuren
- Basisinformationen und Schadensdokumentation früherer Ereignisse
- Liste bereits durchgeführter Maßnahmen zum Erosions- und Überflutungsschutz
- SRRM-Berichte (Gefährdungs-, Risikoanalyse, Handlungskonzept)
- SRRM-Abgabedaten (insbesondere Gefahren- und Risikokarten)

Neben der Übergabe von Daten und Berichten aus dem SRRM-Prozess ist die Abstimmung und der bilaterale Austausch unter den bearbeitenden Büros/Beratenden und Kommune (SRRM, ERM, Modellierer, landwirtschaftliche Beratende, Kommune) zu empfehlen. Des Weiteren sollte im Falle einer Fortschreibung des SRRM-Prozesses die Handlungskonzepte aus beiden Prozessen zusammengeführt bzw. um das Thema Erosion ergänzt werden.

7.3 Ausblick

Langfristig werden Austauschformate, z. B. zu den bei der Maßnahmenplanung und -umsetzung gesammelten Erfahrungen, auf kommunaler Ebene sowie zur Rückmeldung dieser an die Landesebene vorgeschlagen. Hierfür könnte beispielweise ein jährlicher „runder Tisch“ ins Leben gerufen werden.

Für weitergehende Auswertungen der Erosionsgefahrenkarten wäre die Betrachtung zusätzlicher, also über die drei hier berücksichtigten Jährlichkeiten von Niederschlagsereignissen von Interesse. Dies würde eine Abschätzung ermöglichen, welchen Beitrag ein Ereignis einer bestimmten Jährlichkeit zum mittleren jährlichen Ausstrag liefert. Dabei könnte zudem die Wirksamkeit der Maßnahmen differenziert nach verschiedenen Jährlichkeiten analysiert werden.

Da die Schätzung der Bodenparameter aus Landnutzung/Kulturart, Zeitpunkt, Bodenbearbeitung und Bodenart mit deutlichen Unsicherheiten bzgl. der vor Ort vorliegenden Bedingungen behaftet ist, wird langfristig ein Ensemble-Ansatz in der Modellierung vorgeschlagen: Statt eines einzelnen Simulationslaufes mit einer singulären Parameterschätzung wird jeweils eine Vielzahl von Simulationsläufen mit unterschiedlichen

Parameterwerten innerhalb einer Spannweite durchgeführt. Dies erfordert einerseits jedoch eine entsprechende Datengrundlage an Parameterwerten und andererseits aufgrund der zahlreichen Simulationsläufe einen deutlich höheren Rechenaufwand.

Bei der Veränderung von Bodenbearbeitungsverfahren ist zu berücksichtigen, dass sich häufig nur langfristig ein Effekt auf die Bodeneigenschaften zeigt. Dies betrifft u. a. die Umstellung zu konservierender Bodenbearbeitung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem zur Ableitung von bearbeitungsbedingten Bodeneigenschaften und deren Veränderung durch indirekte Nachweise, z. B. mittels Radar, thermische Veränderung etc., um diese ohne Einzelerhebung berücksichtigen zu können.

Für die Vereinfachung einer simulationsgestützten Planung von Erosionsschutzmaßnahmen wird ein Werkzeug benötigt, das für die Modellierung „on-demand“ eingesetzt werden kann. Ein solches Werkzeug würde eine einfache Handhabung durch die landwirtschaftlichen Beratenden vor Ort bieten und den breiten Einsatz bei der Entscheidungsfindung in der landwirtschaftlichen Praxis ermöglichen. Langfristig wird die Entwicklung z. B. einer entsprechenden interaktiven Web-Anwendung in Zusammenarbeit mit MLR, UM, LGRB, LUBW und LTZ vorgeschlagen.

Langfristiger Forschungsbedarf wird außerdem bezüglich einer stärkeren Kopplung zwischen den Modellierungstools gesehen – einerseits für die Hydraulik-Berechnung zur Erstellung der Starkregengefahrenkarten im SRRM sowie für die Erosionsmodelle andererseits. Dies könnte beispielsweise die Modelloption „Durchlässe mit begrenzter Kapazität“ betreffen, die in beiden Erosionsmodellen im Gegensatz zu den Hydraulik-Modellen nicht berücksichtigt werden können (vgl. Kap. 4.2).

Ansätze für eine Kopplung hinsichtlich einzelner Fragestellungen würden die Chance bieten, SRRM und ERM auch modellierungsseitig noch stärker zu verzahnen.

8 Entwicklung einer Vorlage eines Erosionsereignis-Katalogs

8.1 Hintergrund und Ziele

Im Rahmen des Projekts wurde ein digitaler Erfassungsbogen für Erosionsereignisse entwickelt. Die bisherige Version wurde nur zu Testzwecken erstellt. Die Entwicklung eines digitalen Erfassungsbogens war nicht Bestandteil des laufenden Projekts.

Der Erfassungsbogen ist für die Aufnahme des Zustands von nicht versiegelten Flächen bezüglich Spuren von Bodenerosion durch Wasser nach Starkregenereignissen zu nutzen (insbes. landwirtschaftliche Flächen, z. B. Schwarzbrache-Flächen). Sämtliche Flächen, die aufgrund eines Starkregenereignisses vor Ort kontrolliert werden, sind hierüber zu erfassen. Wichtig ist, auch die Flächen ohne Hinweise auf Erosionsschäden zu erfassen. Insbesondere sind solche Flächen zu kontrollieren, bei denen am ehesten von Erosionsschäden auszugehen ist (z. B. geringer Bodenbedeckungsgrad, Neigung etc.). Zudem sollten jeweils auch die angrenzenden Schläge dokumentiert werden. Werden Erosionsschäden nach einem Starkregenereignis beobachtet, ohne dass der Niederschlags-Schwellenwert überschritten wurde, ist ebenfalls eine Erfassung mit dem Erfassungsbogen durchzuführen.

Langfristiges Ziel ist die Erfassung von Erosionsereignissen, die in einer landesweit einheitlichen Datenbank georeferenziert gespeichert werden sollen.

8.2 Inhalte

Der Erhebungsbogen umfasst folgende Inhalte:

- Angaben der bearbeitenden Person (u. a. Name, Kontaktdaten)
- Allgemeine Angaben (u. a. Datum der Erfassung)
- Zustand der Fläche (u. a. Lage, Feldfrucht, Bodenbedeckung)
- Erosions- und Depositionsspuren (u. a. flächen- oder linienhaft, Ausprägung)

Zudem können die Eingaben von Experten und Nicht-Experten vorgenommen werden, die sich durch die Anzahl der Detailfragen unterscheiden.

Als Grundlagen für die Erstellung des Erfassungsbogens dienten folgende Quellen:

- BGR (2005)
- DVWK (1996)
- DWA (2021)
- GKB Publikationen (<https://www.gkb-ev.de/publikationen-2/>; Brunotte et al., 2007, Brunotte et al., 2011)
- LUBW (2011)

8.3 Technische Umsetzung des Prototyps

Bei der aktuellen Version handelt es sich zunächst um eine Testversion, um die Praktikabilität sowie den Aufwand des Ausfüllens des Formulars zu ermitteln. Als Anwendende werden Mitarbeitende von Kommunen (z. B. vom Bauhof, Umweltamt), Landratsämtern, land- und forstwirtschaftlichen Behörden und Ingenieurbüros adressiert.

Die Anwendung des Erfassungsbogens kann durch selbst beobachtete Erosionsereignisse erfolgen. Sie kann auch über die Auswertung radarbasierter Niederschlagsdaten mit festgelegten Grenzwerten ausgelöst werden. Im Rahmen des Projekts wurde

hierzu ein Slack-Kanal erstellt. Slack ist ein kostenfreier Nachrichtendienst. Für das Projekt wurde eine Gruppe „alarme_sr“ erstellt, in der sich Projektbeteiligte befanden. In dieser Gruppe wurden in Baden-Württemberg Starkregenereignisse ab 30 mm/h gemeldet. Die Niederschlagswerte sind angeeichte 5-Minuten-Auswertungen der DWD-Radardaten von kachelmannwetter.de, die für das Projekt testweise zur Verfügung gestellt wurden.

Folgende Ausrüstung wird für die Ereignisdokumentation als notwendig erachtet:

- Smartphone/Tablet mit Kamera und KoboCollect App
- Zollstock (2 m)

Optional können folgende Gegenstände mitgeführt werden:

- Spaten
- Drohne
- Bodensonde
- Penetrometer

Die KoBo Toolbox ist ein Open-Source-Programm zur digitalen Sammlung von Daten mit mobilen Geräten (<https://www.kobotoolbox.org/>).

Für die Nutzung der KoboCollect App ist ein Smartphone oder Tablet mit Android System notwendig. Bei iOS (Apple) wird diese App derzeit nicht angeboten. Der Vorteil der App ist, dass diese auch offline, d. h. ohne Internetverbindung, verwendet werden kann. Die Nutzung des Erfassungsbogens kann auch im Browser über den Link <https://ee.kobotoolbox.org/x/Llpx53Nb> erfolgen, sodass die App nicht zwingend installiert werden muss. Zum Ausfüllen des Erfassungsbogens im Gelände über den Browser ist jedoch eine Internetverbindung erforderlich, damit die Karten dauerhaft angezeigt werden.

8.4 Erfahrungen und Ergebnisse der Erfassung

Im Laufe des Projekts wurde der Erfassungsbogen von verschiedenen Personen im Juli und August 2022 getestet; 40 Standorte in Baden-Württemberg wurden kartiert. IPROconsult kartierte außerdem einen Standort in Sachsen. In Baden-Württemberg wurden nach Starkregenmeldung (41 mm/h und 32 mm/h) im Slack-Kanal an zwei Flächen (Landkreis Böblingen und Ortenaukreis) Erosionsspuren gefunden (s. Abb. 53). Bei allen anderen untersuchten Flächen wurden keine Hinweise auf Erosion wahrgenommen, da diese entweder zu schwach geneigt waren oder der Bedeckungsgrad aufgrund der Jahreszeit hoch war.



Abb. 53: Aufgenommene Akkumulation von Bodenmaterial (links) sowie Erosions- und Verschlammungsspuren (rechts) nach Starkregen (41 mm/h) in Aidlingen (Landkreis Böblingen) am 29.07.2022

Probleme ergaben sich vor allem bei der offline-Anwendung, da die Installation der Karte abgebrochen wurde bzw. der Download zu kompliziert und oft ungenügend Speicherplatz auf dem Mobilgerät vorhanden war. Ein weiterer Nachteil der KoboCollect App ist, dass sie derzeit nur für Android Systeme zur Verfügung steht, der Upload zeitintensiv ist sowie für jede Fläche ein eigener Bogen ausgefüllt werden muss. Ebenso gestaltet sich bisher das Einzeichnen der Fläche in der Karte noch nicht optimal. Außerdem bestehen Unklarheiten bezüglich der rechtlichen Lage beim Betreten von Ackerflächen.

Generell ist die kontinuierliche Kartierung von Erosionsereignissen sehr wichtig, um eine ausreichend große Datengrundlage für die Validierung der prozessorientierten physikalischen Erosionsmodellierung in Baden-Württemberg zu generieren.

Das LTZ beabsichtigt den Erfassungsbogen in seiner bisherigen Form im Jagst Projekt über das Pilotprojekt hinaus anzuwenden.

Des Weiteren plant das LTZ, das Erfassungs-Tool im Rahmen von Weiterbildungsveranstaltungen bei der LEL (Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum) vorzustellen.

9 Literatur

- ASSMANN, A., KEMPF, J. UND HENRICHS, T. (2006): Agricultural measures for water management and their integration into spatial planning – AMEWAM. Final Report. Heidleberg. (unveröffentlicht)
- ASSMANN, A., KEMPF, J., BILLEN, N., SCHIPPER, H., UND ENGELHARDT, M. (2009): Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen – Konzeptstudie. – Im Auftrag des Kooperationsvorhabens Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA) [Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz], 100 S. unveröffentlicht
- ASSMANN, A., JÄGER, S., FRITSCH, K. UND BRAUNER, C. (2012): Starkregengefahrenkarten und Risikomanagement im Glems-Einzugsgebiet. In: Weiler, M. (Hrsg.) (2012): Wasser ohne Grenzen, Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 31,12: S. 195–200.
- ASSMANN, A., KEMPF, J. UND FRITSCH, K. (2016): Sedimentdarangebot des Lippe-Einzugsgebietes. Pilotstudie Seseke. Heidelberg. (unveröffentlicht)
- ASTON, A.R., (1979): Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology*, 42, S. 383–396.
- BILLEN, N., KEMPF, J., ASSMANN, A., PUHLMANN, H., VON WILPERT, K. (2017): Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen (KliStaR). Reihe KLIMOPASS-Berichte. Karlsruhe. Download unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/68225>.
- BILLEN, N., KEMPF, J., ASSMANN, A., PUHLMANN, H. (2018): Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Kommunen. Steckbriefe für die Praxis. Karlsruhe. Download unter: <https://www.geomer.de/fileadmin/downloads/dienstleistungen/naturgefahren-und-risikomanagement/KliStaR-Steckbriefe.pdf>.
- BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE [HRSG.] (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 438 S. (5. Aufl.). Stuttgart.
- BRONSTERT, A., FRITSCH, U., KATZEMAIER, D. (2000): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluß in Flußgebieten. Potsdam.
- Brunotte, J. und Ortmeier, B. (2007): Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände. Braunschweig.
- Brunotte, J.; Senger, M.; Heyn, J.; Voßhenrich, H.; Epperlein, J.; Vorderbrügge, T.; Ortmeier, B.; Lorens, M. (2011): *Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker*: 1. Analyse des Gefüge-Zustands 2. Planung der geeigneten Vorgehensweise für die Bodenbearbeitung. 2. Aufl., Braunschweig; Neuenhagen.
- DE ROO, A. P. J., WESSELING, C. G., CREMERS, N. H. D. T., OFFERMANS, R. J. E., RITSEMA, C. J., & VAN OOSTINDIE, K. (1994): LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 224, 439-448.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (1996): DVWK-Merkblatt 239 Bodenerosion durch Wasser: Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser Und Abfall (DWA, 2021): Bodenerosion durch Wasser – Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. Merkblatt DWA-M 921. Hefen
- Förderrichtlinien Wasserwirtschaft (2015): Richtlinien des Umweltministeriums für die Förderung wasserwirtschaftlicher Vorhaben.
- GeoGnostics (2021): *Erosion-3D Benutzerhandbuch*. Ver. 3.3. GeoGnostics Software Berlin.
- GOVERS, G. (1990): Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. In: *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Pub.* 189. S. 45–63.
- HÖLZEL, H. (2009): Analyse und Parametrisierung von Landnutzungseigenschaften zur Modellierung von Abfluss, Bodenerosion und Sedimentation im Einzugsgebiet des Wahnbachs (Bergisches Land). Dissertation Bonn.
- JETTEN, V. (2002): LISEM – Limburg Soil Erosion Model. Windows Version 2.x. User manual. Utrecht.

- KAMPHORST, E., JETTEN, V., GUERIF, J., PITKANEN, J., IVERSEN, B., DOUGLAS, J. und PAZ GONZALES, A. (2000): Predicting depressional storage from soil surface roughness. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 64. S. 1749-1758.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2008): Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung Ermittlung und Einteilung der Wassererosionsgefährdungsklassen.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2015): Daten zur Bodenerosion in Baden-Württemberg – Erläuterungen.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2011): Merkblatt Gefahrenabwehr bei Bodenerosion. Karlsruhe.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2016a): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe. Download unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/47871> .
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2016b): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Anhang 2, 3, 4 und 5. Karlsruhe. Download unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/47871> .
- Landeshauptstadt Stuttgart (Amt für Umweltschutz) (2004): Gewässerbericht 2003, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 2/2004.
- LENZ, J. (2017): Konzeptionelle Studie zur Überprüfung der Anwendbarkeit verfügbarer Daten zur Erosions- / Abflussmodellierung mit EROSION-3D in Punjab, Indien. Masterarbeit MLU Halle-Wittenberg.
- MICHAEL, A.; SCHMIDT, J.; SCHMIDT, W.: EROSION 2D (1996): Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser, Band II: Parameterkatalog Sachsen, Anwendung. Dresden/Freiberg : Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft/Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- MOORE, I. D. und FOSTER, G. R. (1990): Hydraulics and overland flow. In: Anderson, M. G. und Burt, T. P. (Hrsg.) (1990): Process Studies in Hillslope Hydrology. S. 215-254.
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., SMITH, R.E., GOVERS, G., POESEN, J.W.A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D. und STYCZEN, M.E. (1998): The EUROpean Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from field and small catchments. Earth Surface Processes and Landform, 23, Seite: 527-544.
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G. und ZACHATIAS, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe "Kennwerte des Bodengefüges" zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Berlin.
- SCHINDEWOLF, M., SCHMIDT, W. (2012): Phosphoreinträge durch Erosion in Sachsen, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, Heft 11/2012. Download unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13102/documents/14646> .
- SCHIPPER, H., FOSSER, G., SCHÄDLER, G., KEMPF, J., ASSMANN, A. UND BILLEN, N. (2014): Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen – Endbericht. – Im Auftrag des Kooperationsvorhabens Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA). Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz [Hrsg.]. unveröffentlicht.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. In: Catena Supplement Bd. 19 (1991) S. 101–109.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen, Berliner Geographische Abhandlungen: Institut für Geographische Wissenschaften der Freien Universität Berlin.
- STARKLOFF, T.; STOLTE, J.: Applied comparison of the erosion risk models EROSION 3D and LISEM for a small catchment in Norway. In: CATENA Bd. 118 (2014), S. 154–167.
- STOLTE, J. (2003): Effects of land use and infiltration behaviour on soil conservation strategies. Wageningen.
- UNIVERSITY OF TWENTE (2018): OpenLISEM Multi-Hazard Land Surface Process Model Documentation & User

Manual Second Draft. [https://sourceforge.net/projects/lisem/files/Documentation and Manual/documentation15.pdf](https://sourceforge.net/projects/lisem/files/Documentation%20and%20Manual/documentation15.pdf) , zuletzt abgerufen am 18.10.2022.

UNTERSEHER, E., HARTWIG, H., SCHRÖDER, A., VON WERNER, M. & TH. HÖLSCHER (2012): Einsatz des Modells „EROSION 3D“ für die Landwirtschaft und für den Schutz von Umwelt und Infrastruktur. - In: Landinfo 2, 32–36.

VAN DEURSEN, W. P. A. und WESSELING, C. (1992): The PCRaster package, Department of Physical Geography Utrecht, <https://pcraster.geo.uu.nl/> .

VAN GENUCHTEN, M. Th., Leij, F. J. und Yates, S. R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

von WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten, Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin. Dissertation.

VON WERNER, M., LANGEL, S. (2022): Szenarienkarten Wassererosion in Sachsen, Schriftenreihe, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (Hrsg.), Heft 20/2022. Download unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/40654>



10 Anhang

10.1 Vergleich der Anteile der Kulturartgruppen zwischen MLR Ackerstatistik 2019 und ECoLaSS Crop Type Prototype

Tab. 15: Vergleich der Anteile der Kulturartgruppen zwischen MLR Ackerstatistik 2019 und ECoLaSS Crop Type Prototype für die Gemeinde Ditzingen

Vereinfachende Kulturartgruppe	Flächenanteile [%] der Kulturartgruppen (in der Gemeinde Ditzingen)	
	MLR Ackerstatistik 2019	ECoLaSS Crop Type Prototype 2018
Wintergetreide	42,0	39,3
Sommergetreide	19,9	19,9
Rüben	15,8	21,2
Mais	22,0	18,0
Raps	0,3	1,6



10.2 Zuordnung der Objektarten zu den Modell-IDs

Tab. 16: Zuordnung der Objektarten aus dem Basis-DLM "Tatsächliche Nutzung" zu den Modell-IDs

OBJEKT-ART	OBJEKTNAME	UNTER-ART_ID	UNTERART_NAME	E3D_ID	E3D_Name	LI-SEM_ID	LISEM_Name
41001	Wohnbaufläche	1000	Offen	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
41002	Industrie- und Gewerbefläche	0	Industrie- und Gewerbefläche	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		1490	Gärtnerei	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2520	Wasserwerk	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2530	Kraftwerk	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2540	Umspannstation	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2610	Kläranlage, Klärwerk	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2620	Abfallbehandlungsanlage	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2630	Deponie (oberirdisch)	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
41005	Tagebau/Grube/Steinbruch	0	Tagebau/Grube/Steinbruch	90	HILFS_Klasse	302	Siedlung
41006	Fläche gemischter Nutzung	1000	Offen	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2000	Geschlossen	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
41007	Fläche besonderer funktionaler Prägung	1000	Offen	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		2000	Geschlossen	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
41008	Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche	0	Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
		4100	Gebäude- und Freifläche Erholung	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
		4110	Golfplatz	21	Wiese	102	Grünland
		4200	Freizeitanlage	21	Wiese	102	Grünland
		4220	Safaripark, Wildpark	21	Wiese	102	Grünland
		4240	Freilichttheater	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		4290	Modellflugplatz	21	Wiese	102	Grünland



OBJEKT-ART	OBJEKTNAME	UNTER-ART_ID	UNTERART_NAME	E3D_ID	E3D_Name	LI-SEM_ID	LISEM_Name
		4310	Wochenend- und Ferienhausfläche	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		4320	Schwimmbad, Freibad	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		4400	Grünanlage	21	Wiese	102	Grünland
		4420	Park	21	Wiese	102	Grünland
		4440	Schrebergarten	54	Garten	105	Obst
41009	Friedhof	0	Friedhof	21	Wiese	102	Grünland
42001	Straßenverkehr	0	Straßenverkehr	44	Straße/asphaltierter Weg	305	Weg (befestigt)
		2312	Verkehrsbegleitfläche Straße	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
42009	Platz	0	Platz	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		5130	Fußgängerzone	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		5310	Parkplatz	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		5320	Rastplatz	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		5330	Raststätte	55	bebaute Fläche	302	Siedlung
		5350	Festplatz	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
42010	Bahnverkehr	0	Bahnverkehr	7	Bahnkörper	302	Siedlung
		2322	Verkehrsbegleitfläche Bahnverkehr	45	unbefestigter Weg	304	Weg (unbefestigt)
42015	Flugverkehr	5550	Segelfluggelände	21	Wiese	102	Grünland
43001	Landwirtschaft	1010	Ackerland	21	Wiese	103	Grünland
		1020	Grünland	21	Wiese	102	Grünland
		1021	Streuobstwiese	21	Wiese	102	Grünland
		1030	Gartenland	54	Garten	105	Obst
		1031	Baumschule	54	Garten	105	Obst
		1040	Weingarten	54	Garten	105	Obst
		1050	Obstplantage	54	Garten	105	Obst
43002	Wald	1100	Laubholz	14	Laubwald	104	Laubwald
		1200	Nadelholz	15	Nadelwald	103	Nadelwald



OBJEKT-ART	OBJEKTNAME	UNTER-ART_ID	UNTERART_NAME	E3D_ID	E3D_Name	LI-SEM_ID	LISEM_Name
		1300	Laub- und Nadelholz	12	Wald/Forst	107	Mischwald
43003	Gehölz	0	Gehölz	13	Gehölzstreifen und Hecken	109	Gehölz
43004	Heide	0	Heide	21	Wiese	102	Grünland
43006	Sumpf	0	Sumpf	57	Wasser	201	Wasser
43007	Unland/Vegetationslose Fläche	1100	Öffentliche Zwecke	37	Ruderalvegetation	102	Grünland
44001	Fließgewässer	0	Fließgewässer	57	Wasser	201	Wasser
44006	Stehendes Gewässer	0	Stehendes Gewässer	57	Wasser	201	Wasser



10.3 Eingabeparameter openLISEM und EROSION 3D

Tab. 17: Eingabeparameter openLISEM

Feldname	Bezeichnung	Einheit	1. Schicht ¹	2. Schicht ¹	Datentyp
Infiltrationskarten					
PROFILE	Klassifikation der Bodeneinheit	[-]	x	x	Integer
DEPTH	Untergrenze Bodenschicht	[mm]	x	x	Float
Ks	Hydraulische Leitfähigkeit	[mm/h]	x	x	Float
Theta i	Anfangswassergehalt		x	x	Float
Theta s	Sättigungswassergehalt		x	x	Float
PSI	Matrixpotential	[cm]	x	x	Float
Ksat Crust	Hydraulische Leitfähigkeit verkrusteter Boden	[mm/h]	o	o	Float
Ksat Compact	Hydraulische Leitfähigkeit kompakter Boden	[mm/h]	o	o	Float
Ksat Grass	Hydraulische Leitfähigkeit Grünstreifen	[mm/h]	o	o	Float
Bodenoberflächenkarten					
LISEM_ID	Klassifikation der Landnutzungseinheit	[-]	x		Integer
RR	Oberflächenrauigkeit	[cm]	x		Float
n	Rauigkeitsbeiwert nach Manning	Kehrwert von m ¹ /3/s	x		Float
STONEFRC	Anteil der Zelle, der mit Steinen bedeckt ist	[-]	o		Float
Crust	Anteil der Zelle, der verkrustet ist	[mm/h]	o		Float
Compacted	Anteil der Zelle, der kompakt ist	[-]	o		Float
Hard Surface	Anteil der Zelle, der verhärtet ist	[-]	o		Float



Feldname	Bezeichnung	Einheit	1. Schicht ¹	2. Schicht ¹	Datentyp
<i>Erosionskarten</i>					
LISEM_ID	Klassifikation der Landnutzungseinheit	[-]	x		Integer
PROFILE	Klassifikation der Bodeneinheit	[-]	x	x	Integer
COH	Bodenkohäsion	[kPa]	x		Float
COHADD	Wurzelkohäsion	[kPa]	x		Float
AGGRSTAB	Aggregatstabilität	[-]	x		Integer
D50	Median Korndurchmesser	[µm]	x	x	Float
D90	90. Perzentil Korndurchmesser	[µm]	o	o	Float
<i>Landnutzungs- und Vegetationskarten</i>					
LISEM_ID	Klassifikation der Landnutzungseinheit	[-]	x		Integer
PER	Bodenbedeckungsgrad	[-]	x		Float
LAI	Blattflächenindex	[m ² /m ²]	x		Float
CH	Vegetationshöhe	[m]	x		Float
ROADWIDTH	durchschnittliche Straßenbreite entlang einer Zellenlänge	[m]	x		Float
GRASS	Anteil der Zelle, der von Grünstreifen bedeckt ist	[-]	o		Float
SMAX	Maximum canopy storage	[mm]	o		Float
HOUSE	Anteil der Zelle, der von Häusern bedeckt ist	[-]	x		Float
ROOF	maximale Dachspeicherung in einer Zelle	[mm]	o		Float

¹ x: erforderliche Parameter o: optionale Parameter



Tab. 18: Eingangsdatei Boden- und Bodenbedeckungsparameter in EROSION 3D

Feldname	Bezeichnung	Einheit	Oberste Schicht ¹	Jede weitere Schicht ¹	Grundwasserschicht ¹	Datentyp
POLY_ID	Datensatz-Schlüssel	[-]	x	x	x	String
LAYER_ID	Nummer der Schicht von oben (beginnend mit 0)	[-]	x	x	x	Integer
LAYERTHICK	Schichtmächtigkeit	[m]	x	x	x	Float
BLKDENSITY	Lagerungsdichte	[kg/m ³]	x	x	x	Integer
CORG	org. Kohlenstoffgehalt	[Gew.-%]	x	x	x	Float
INITMOIST	Anfangswassergehalt	[Vol. %]	x	x	x	Float
ROUGHNESS	Rauheit	[s m ^{-1/3}]	x			Float
ERODIBIL	Erosionswiderstand	[kg m ⁻¹ s ⁻²]	x			Float
COVER	Bedeckungsgrad	[%]	x			Float
SKINFACTOR	Skinfaktor	[-]	x	x	x	Float
FT	Feintonanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
MT	Mitteltonanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
GT	Groptonanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
FU	Feinschluffanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
MU	Mittelschluffanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
GU	Grobschluffanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
FS	Feinsandanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
MS	Mittelsandanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
GS	Grobsandanteil	[Gew.-%]	x	x	x	Integer
KS_GW	Gesättigte Leitfähigkeit	[m/s]			o	Float
ROCKFRAGM	Grobskelettanteil	[Gew.-%]	o	o	o	Integer
THETA_R	Restwassergehalt	[Vol. %]	o	o	o	Float
THETA_S	Sättigungswassergehalt	[Vol. %]	o	o	o	Float
ALPHA	van Genuchten-Parameter α	[-]	o	o	o	Float
NORDPOL	van Genuchten-Parameter n	[-]	o	o	o	Float
KS	Gesättigte Leitfähigkeit	[m/s]	o	o	o	Float

¹ x: erforderliche Parameter o: optionale Parameter



10.4 Ausgabedaten von openLISEM und EROSION 3D

Tab. 19: Übersicht zu den Ausgabedaten von EROSION 3D

	Ausgabedateiname	Beschreibung	Einheit
Flächenbezogene Ausgabewerte	sedbudget	Erosions- oder Depositionsbetrag für eine einzelne Zelle	kg/m ²
	q_cell	Infiltrationsüberschuss	m ³
	totalero	Mittlere absolute Bodenerosion innerhalb des Zell-Einzugsgebiets	t/ha
	totaldep	Mittlere absolute Sedimentdeposition innerhalb des Zell-Einzugsgebiets	t/ha
	netero	Mittlere Nettoerosion innerhalb des Zell-Einzugsgebiets	t/ha
	ch_netero	Vorfluter Nettoerosion	t/ha
Querschnittsbezogene Ausgabewerte	sum_q	kumulativer Abfluss aus Zell-Einzugsgebiet und Infiltrationsüberschuss	m ³ /m
	sum_sedvol	kumulativer Sedimenteintrag aus Zell-Einzugsgebiet	kg/m
	sedconc	Sedimentkonzentration des Oberflächenabflusses	kg/m ³
	clayfrac	Tongehalt des transportierten Sediments	%
	siltfrac	Schluffgehalt des transportierten Sediments	%
	sedvol	Sedimentaustrag aus dem Zell-Einzugsgebiet für 9 Kornfraktionen	kg/m
	sum_sedvol_b	Gesamterosion im Zell-Einzugsgebiet	kg/m
	ch_sum_q	Kumulativer Abfluss aus dem Einzugsgebiet der Vorfluter-Zelle und deren Infiltrationsüberschuss	m ³ /m
	ch_sum_sedvol	Kumulativer Sedimenteintrag aus dem Einzugsgebiet der Vorfluter-Zelle und deren Abtrag	kg/m
	ch_sum_sedvol_t	Tonfracht aus dem Einzugsgebiet der Vorfluter-Zelle	kg/m
ch_sum_sedvol_u	Schlufffracht aus dem Einzugsgebiet der Vorfluter-Zelle	kg/m	



Tab. 20: Übersicht zu den Ausgabedaten von openLISEM

	Format	Beschreibung	Ausgabedateiname LISEM	Einheit
Flächenbezogene Ausgabewerte	PCRaster, GeoTIFF	Bodenverlust	soilloss	kg/m ² , t/ha, kg/Zelle
	PCRaster, GeoTIFF	Erosion	detachment	kg/m ² , t/ha, kg/Zelle
	PCRaster, GeoTIFF	Deposition	deposition	kg/m ² , t/ha, kg/Zelle
	PCRaster, GeoTIFF	Infiltration	infiltration	mm
	PCRaster, GeoTIFF	Interzeption	interception	mm
	PCRaster, GeoTIFF	Maximales Wasserlevel (Überflutungstiefe)	whmax	m
	PCRaster, GeoTIFF	Fließgeschwindigkeit	vmax	m/s
	PCRaster, GeoTIFF	Vorfluter Nettoerosion	chandet	kg/m ² , t/ha, kg/Zelle
	PCRaster, GeoTIFF	Vorfluter Nettodeposition	chandep	kg/m ² , t/ha, kg/Zelle
Querschnittsbezogene Ausgabewerte (Gangliniendaten)	hydrographs.csv	Ganglinie Abfluss Gesamtgebiet und vorausgewählte Punkte	Q	l/s
	hydrographs.csv	Ganglinie Sedimentfluss Gesamtgebiet und vorausgewählte Punkte	Qs	kg/s
	hydrographs.csv	Sedimentkonzentration des Oberflächenabflusses Gesamtgebiet und vorausgewählte Punkte	C	g/l
	hydrographs.csv	Ganglinie Wasserhöhe im Vorfluter Gesamtgebiet und vorausgewählte Punkte	chanWH	m
	totalsseries.csv	Gesamtsumme des Abflusses	Runoff	mm
	totalsseries.csv	Gesamtsumme überflutete Fläche	Flood	m ²
	totalsseries.csv	Gesamtsumme Infiltration	Inf	mm
	totalsseries.csv	Gesamtsumme Erosion durch Regentropfen	Splash	ton
	totalsseries.csv	Gesamtsumme Erosion durch Abfluss	FlowDet	ton
	totalsseries.csv	Gesamtsumme Erosion durch Abfluss im Vorfluter	ChanDet	ton
totalsseries.csv	Gesamtsumme Deposition durch Abfluss im Vorfluter	ChanDep	ton	
totalsseries.csv	Gesamtsumme Bodenverlust	soilloss	ton	



10.5 Digitaler Anhang

Dem Projektbericht ist außerdem ein digitaler Anhang beigefügt, der elektronisch unter <https://doi.org/10.5281/zenodo.7680734> heruntergeladen werden kann.

Dieser digitale Anhang enthält die:

- Anleitung und den Fragenkatalog zum Erfassungsbogen für Bodenerosion,
- Modellierungsdateien für openLISEM und EROSION-3D
 - o Parametertabellen, Modelleinstellungen und Simulationsergebnisse
 - o Ergebniskarten der Senkenbehandlung
 - o Skripte und Ergebnisse der Testhangberechnung
- Karten der Simulationsergebnisse im PDF-Format

Eine ausführliche Beschreibung zu diesen Daten findet sich in der Datei `read_me_digitalerAnhang.pdf`.

– Fachberichte

1/2006	(2006)	Hydrogeologische Untersuchungen zur Beurteilung von Tiefbaggerungen durch den Oberen Zwischenhorizont in der Rheinniederung nördlich von Karlsruhe; 66 S., 37 Abb., 37 Tab.	10,- €
6/2006	(2006)	Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden-Württemberg (1. Ausg. 03-2002, überarb. Ausg. 06-2006); 20 S., 1 Abb., 1 Tab., 1 Kt.	10,- €
1/2007	(2007)	Hochauflösende Reflexionsseismik auf dem Rhein und dem Rheinseitenkanal zwischen Mannheim und Rheinfelden; 60 S., 32 Abb., 7 Tab., 1 CD-ROM.	18,- €
1/2008	(2008)	Verweilzeiten des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern in Baden-Württemberg; 31 S., 4 Abb., 5 Tab.	10,- €
2/2008	(2008)	Untergundtemperaturen in Baden-Württemberg; 28 S., 14 Abb., 2 Tab.	10,- €
2015/1	(2015)	Organische Kohlenstoffvorräte der Böden in Baden-Württemberg; 64 S., 28 Abb., 17 Tab.	*
2015/2	(2015)	Ermittlung langjähriger CO ₂ -Emissionen und Beurteilung der Moore Oberschwabens auf Basis historischer und aktueller Höhengniveaus; 44 (+69) S., 15 (+107) Abb., 24 (+3) Tab. (Angaben zum Anhang in Klammern)	*
2015/3	(2015)	Identifikation kleinräumiger Risikogebiete zur Reduzierung der diffusen Phosphateinträge in Oberflächengewässer; 37 S., 27 Abb., 13 Tab.	*
2015/4	(2015)	Lithostratigraphische Entwicklung des baden-württembergischen Rheingletschergebiets: Übertiefe Becken- und Moränenlandschaft; 86 (+19) S., 0 (+16) Abb., 4 Tab. (Angaben zum Abbildungsteil in Klammern)	*
2016/1	(2016)	Paläoböden in quartärgeologischen Sequenzen und als Bestandteil des Solums rezenter Oberflächenböden (... Schichtstufenlandschaft und Alpenvorland ...); 63 S., 19 Abb., 16 Fot., 6 Tab. [Exkursionsführer 35. Jahrestagung AG Paläopedologie].	*
2017/1	(2017)	Periglaziale Lagen – Ansprache und Gliederung in der feldbodenkundlichen Praxis und ihre Bedeutung für die Bodenbildung; 78 S., 11 Abb., 35 Fot., 22 Tab. [Exkursionsführer zum Geländeworkshop der DBG].	*
2017/2	(2017)	Bodenhydrologische Karte Baden-Württemberg; 25 (+9) S., 9 (+16) Abb., 5 Tab. (Angaben zum Anhang in Klammern)	*
2019/1	(2019)	Zur Erstellung von Rohstoffkarten als Grundlage der Rohstoffsicherung in Baden-Württemberg; 262 S., 180 Abb., 12 Tab.	*
2020/1	(2020)	Landesweiter digitaler Datensatz zur Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung in Baden-Württemberg; 108 S., 53 Abb., 7 Tab.	*

– Informationen

...	
Heft 18	(2006)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006 – Gewinnung, Verbrauch und Sicherung von mineralischen Rohstoffen; 202 S., 209+12 Abb., 15 Tab., 1 Kt.	*
Heft 19	(2007)	Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg); 130 S., 118 Abb., 12 Tab.	* / 10,- €
Heft 20	(2008)	Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg; 106 S., 79 Abb., 21 Tab., 1 Kt.	* / 15,- €
Heft 21	(2008)	Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse; 82 S., 36 Abb., 3 Tab. im Anh., 10 Beilage.	* / 15,- €
Heft 22	(2009)	Beiträge zur Lithostratigraphie in Baden-Württemberg; 146 S., 53 Abb., 5 Tab.	* / 15,- €
Heft 23	(2009)	Natürliche Geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydrogeochemischen Einheiten von Baden-Württemberg; 192 S., 43 Abb., 55 Tab., 48 Kt.	* / 15,- €
Heft 24	(2009)	Geogene Grundgehalte (Hintergrundwerte) in den petrogeochemischen Einheiten von Baden-Württemberg; 98 S., 62 Abb., 22 Tab., 40 Kt.	* / 15,- €
Heft 25	(2010)	Beiträge zur Geologie und Bodenkunde in Baden-Württemberg; 142 S., 78 Abb., 17 Tab., 1 Beil.	* / 15,- €
Heft 26	(2012)	Die Forschungsbohrung Heidelberg und Beiträge zum Quartär in Baden-Württemberg; 216 S., 107 Abb., 35 Tab., 1 Beil.	* / 20,- €
Heft 27	(2013)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2012/2013 Bedarf, Gewinnung und Sicherung von mineralischen Rohstoffen – Dritter Landesrohstoffbericht; 204 S., 228 Abb., 7 Tab.	* / 10,- €
Heft 28	(2013)	Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben – Fachlich Technischer Abschlussbericht des INTERREG-Projektes GeORG; 103 S., 49 Abb., 7 Tab.	* / 10,- €
Heft 29	(2014)	Geologische Ergebnisse der Geothermiebohrungen Urach 1, Urach 3 und Urach 4; 152 S., 38 Abb., 3 Tab., 2 Anh.	* / 15,- €
Heft 30	(2015)	GeoMol LCA Projektteam (2015): GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige Nutzung des tieferen Untergrundes in den alpinen Vorlandbecken; 142 S., 78 Abb., 22 Tab.	* / 10,- €
Heft 31	(2020)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg Gewinnung und Sicherung von mineralischen Rohstoffen; 192 S., 191 Abb., 11 Tab.	* / 10,- €
Heft 32	(2021)	Neue Beiträge zur Stratigraphie in Baden-Württemberg; 168 S., 61 Abb., 4 Tab., 4 Taf.	* / 10,- €

Alle oben aufgeführten Schriften sind im LGRB-Online-Shop käuflich zu erwerben.

Preise zuzüglich Versandkosten. Nicht aufgeführte Titel sind zurzeit vergriffen.

* = diese Produkte sind **kostenlos downloadbar** unter <https://produkte.lgrb-bw.de/schriftensuche>